

การถ่ายโอนมวลในเครื่องสกัดน้ำสับปะรด  
Mass Transfer in Pineapple Juice Extractor



ธรรมรัตน์ ธรรมเดชศักดิ์  
Thummarat Thummadetsak

๑


เลขหมู่.....	TP159.E9 NM4 35.39 ค. 2
Order Key.....	28938
Bib Key.....	114973
.....	1-9 ก.ค. 2539


วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
Master of Engineering Thesis in Chemical Engineering  
Prince of Songkla University  
2539

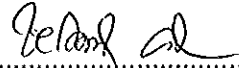
ชื่อวิทยานิพนธ์      การถ่ายโอนมวลในเครื่องสกัดน้ำส้มเปรด  
ผู้เขียน              นายธรรมรัตน์ ธรรมเดชศักดิ์  
สาขาวิชา              วิศวกรรมเคมี

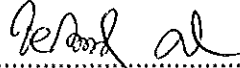
คณะกรรมการที่ปรึกษา

คณะกรรมการสอบ


  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาศรีต ทองอุไร)

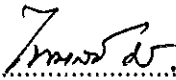
  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาศรีต ทองอุไร)


  
.....กรรมการ  
(ดร. ชัยรัตน์ ศิริพิธานะ)

  
.....กรรมการ  
(ดร. ชัยรัตน์ ศิริพิธานะ)

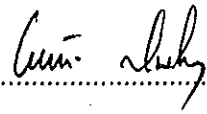
  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุภวรรณ ภูริระวณิชย์กุล)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบุลย์ อินนาจิดร)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ คุปตานนท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

  
.....  
(ดร. ไพรัตน์ สงวนไทร)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์      การถ่ายโอนมวลในเครื่องสกัดน้ำสับปะรด  
ผู้เขียน                นายธรรมรัตน์ ธรรมเดชศักดิ์  
สาขาวิชา              วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา            2539

### บทคัดย่อ

การศึกษาการถ่ายโอนมวลในเครื่องสกัดน้ำสับปะรด โดยใช้การสกัดน้ำสับปะรดจากเปลือกเป็นกรณีศึกษา ในขั้นแรกของงานวิจัยนี้ เริ่มจากการออกแบบ สร้างและพัฒนาระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ (reversing counter current extractor) จากนั้นจึงเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลในเครื่องสกัดซึ่งเรียกว่าแบบจำลอง Diffusion - Backmixing

ขั้นตอนต่อไปเป็นการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องสกัดแบบกะ เพื่อหาพารามิเตอร์ซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การกระจายสมมูล และสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรด เพื่อใช้ทำนายโพรไฟล์ของความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

ต่อมาจึงทำการทดลองสกัดโดยใช้เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับขนาดเล็กที่สร้างขึ้น ซึ่งกำหนดให้มีการผันแปรตัวแปรต่าง ๆ คือ दर्राฟ เวลา และอุณหภูมิในการสกัด พบว่าสภาวะของการทดลองที่ทำให้ได้ผลได้สูงสุด คือ การใช้ दर्राฟ เท่ากับ 2.0 เวลาในการสกัด 90 นาที และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้ผลได้ร้อยละ 70.86 นอกจากนี้ยังพบว่า โพรไฟล์ของความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ที่จุดต่าง ๆ ภายในรางสกัดหลังจากระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ของสภาวะการทดลองต่าง ๆ มีรูปแบบคล้ายกัน เมื่อนำพารามิเตอร์ที่หาได้จากการสกัดแบบกะและแบบต่อเนื่อง มาใช้ในการทำนายโพรไฟล์ความเข้มข้นของตัวละลายโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งได้ดี ส่วนในเฟสของเหลวผลการทำนายก็มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยนี้คือการวิเคราะห์ระบบการสกัดโดยใช้แบบจำลอง โดยวิธีการจำลองสถานการณ์ (simulation) พบว่า การผสมย้อนกลับ (backmixing) ทำให้แรงขับ (driving force) ลดลง แต่ทำให้การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง โดยกระบวนการพาดิชั่น โดยภาพรวมทำให้ผลได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพิสูจน์ได้ว่า สาเหตุที่ทำให้ผลจากการทำนาย และ

ผลการทดลองจริงแตกต่างกันอยู่บ้าง เป็นเพราะ จำนวนใบออก และจำนวนเพศเลท ซึ่งเป็น พารามิเตอร์ของการสกัดที่คำนวณได้จากผลการทดลองจริง มีค่าไม่เท่ากันตลอดรางสกัด ในขณะที่ แบบจำลองกำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งสองตัวมีค่าเท่ากันตลอดรางสกัด

Thesis Title	Mass Transfer in Pineapple Juice Extractor
Author	Mr. Thummarat Thummadetsak
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	1996

### Abstract

A study on mass transfer in a pineapple juice extractor was carried out. The extraction of pineapple juice from its peel was chosen as a case study. At the beginning of this work, a reversing counter current extraction system was designed and developed. Then the mathematical model called "The Diffusion - Backmixing model" was also developed to describe the kinetics of mass transfer in this extractor.

Mass transfer phenomena in a batch extractor were studied. The equilibrium distribution coefficients and the diffusivities of solute in solid phase were estimated. These two parameters were used to predict concentration profiles of solute in both solid and liquid phases in the reversing counter current extraction system by using the Diffusion - Backmixing model.

Later, the extraction trial using the reversing counter current extractor (RCCE) were studied by varying three variables, namely : 1) draft , 2) retention time and, 3) extraction temperature. It was found that the experimental conditions at draft about 2.0, retention time of 90 minutes and extraction temperature of 70 °C provided a maximum yield of 70.86 percent. Furthermore, in any condition, it can be pointed out that a solute concentration profile in both phases at any point throughout the extractor, after system reached a steady state, has the same pattern. The overall parameters, evaluated from batch and continuous extraction processes, were used to predict a solute concentration profile by using the Diffusion - Backmixing model. It was found that the model predictions agreed well

with the experimental data in solid phase and could also approximate a close trend in liquid phase.

In the final step of this work, extraction system was analyzed by using model that has been developed. From the simulation, it was found that backmixing caused the reduction in driving force and the increasing in mass transfer of solute at solid surface by convection. The overall effect was the better yield. Furthermore, it can be concluded that the differences between experimental data and the prediction were due to the variation of Biot number ( $Bi$ ) and Peclet number ( $R$ ) along the extractor which had been assumed constant for the model.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิจัย และการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ ดร.ชัยรัตน์ ศิริพิชนะ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการชี้แนะแนวทางในการแก้ไข ปัญหาที่พบในการทำวิจัย และการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุภวรรณ ภูริระวินชัยกุล กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิจัย และการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบุลย์ อินนาจิตร กรรมการผู้แทนจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ คุปตานนท์ กรรมการผู้แทนจากบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้ คำแนะนำ และการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณประวิทย์ เจนประเสริฐศิลป์ ผู้จัดการทั่วไป บริษัทสับปะรดไทย จำกัด (มหาชน) ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเรื่องที่พัก และให้ความอนุเคราะห์วัดฤดีบ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย คุณนิพนธ์ ไหลภรณ์ และ คุณสุเมธรัตน์ กมลโชติ ตลอดจนพนักงานบริษัทฯ ทุก ๆ ท่านที่ช่วยในการอำนวยความสะดวกในเรื่องต่าง ๆ ขณะทำวิจัย จนทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ ในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณบุคลากร ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี และในคณะอุตสาหกรรมเกษตร ทุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้การวิจัยดำเนินไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ พี่ ๆ และน้อง ๆ ด้วยความเคารพรักอย่างที่สุด ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และ น้อง ๆ ทุกคน สำหรับกำลังใจ และการช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่มีได้ กล่าววามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ สมบูรณ์ ด้วยดี

ธรรมรัตน์ ธรรมเดชศักดิ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
ตัวย่อและสัญลักษณ์.....	(15)
รายการตาราง.....	(19)
รายการภาพประกอบ.....	(22)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
บทนำต้นเรื่อง.....	1
ตรวจเอกสาร.....	2
ทฤษฎีการสกัด.....	2
กระบวนการสกัดแบบไหลสวนทาง.....	5
เครื่องสกัด.....	7
การพัฒนาเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	9
ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด.....	14
การถ่ายโอนมวลในกระบวนการสกัด.....	14
การแพร่ในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว.....	21
สมการการแพร่อย่างง่าย.....	21
วัตถุประสงค์.....	28
2. แนวคิดและการพัฒนาแบบจำลอง Diffusion - Backmixing.....	29
ทฤษฎีการไหลและการผสม.....	29
การผสมในเครื่องสกัดน้ำสับปะรดที่พัฒนาขึ้น.....	30
แบบจำลองการผสมย้อนกลับเชิงปริมาตร.....	32
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมตามทฤษฎีการแพร่.....	36



สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
แนวคิดเกี่ยวกับค่า time lead และ time lag.....	37
ปัจจัยที่มีผลต่อ time lead.....	38
ปัจจัยที่มีผลต่อ time lag.....	39
ผลของการกระจายความเข้มข้นต่อ time lead ตามทฤษฎีต่าง ๆ.....	39
วิธีการหาค่า time lead.....	42
การหาค่า time lead กรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด.....	42
การหาค่า time lead กรณีแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	44
การหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส.....	45
การหาเวลาเทียบเท่าของการสกัด.....	46
แนวคิดเกี่ยวกับ j - factor.....	47
การหาค่า j - factor.....	47
ผลเฉลยสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางเมื่อคิด $t_p$ .....	49
การพัฒนาแบบจำลอง Diffusion - Backmixing โดยใช้ j - factor.....	50
3. วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการ.....	55
วัสดุ.....	55
อุปกรณ์.....	55
วิธีการ.....	59
1. การสร้างและพัฒนาเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	59
2. การสร้างและพัฒนาระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	60
รายละเอียดของระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	60
การเตรียมและติดตั้งระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	65
3. การพัฒนาแบบจำลอง Diffusion - Backmixing.....	66
4. การศึกษาการถ่ายโอนมวลภายในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	67
การคำนวณหาพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการศึกษา	
การถ่ายโอนมวลในเครื่องสกัด.....	67
การกำหนดสภาวะในการทดลอง.....	67

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
วิธีการป้อนและเก็บตัวอย่าง.....	69
การคำนวณหาพารามิเตอร์จากผลการทดลอง สกัดแบบไหลทางย้อนกลับ.....	70
การวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวจากผลการทดลอง.....	70
การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด โดยใช้ปริมาณผลได้เป็นเกณฑ์ตัวตัดสิน.....	70
การพืดข้อมูลจากผลการทดลองกับแบบจำลอง Diffusion - Backmixing.....	70
การวิเคราะห์ระบบการสกัดโดยใช้แบบจำลอง Diffusion - Backmixing.....	70
4 ผลและวิจารณ์.....	71
ผลการศึกษาการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นภายใน เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	71
1. ผลการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้น.....	71
แฟกเตอร์รูปร่าง.....	71
ผลการหาพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดลองสกัดแบบกะ.....	73
ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส.....	73
ผลการหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล.....	77
2. ผลการเก็บข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการสกัด ก่อนและหลังระบบสกัดเข้าสู่สถานะคงตัว.....	77
ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในระหว่างการสกัด.....	77
ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวขณะทำการสกัด.....	78

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. ผลการคำนวณหาพารามิเตอร์จากข้อมูลที่ได้	
จากการทดลองสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	78
ผลการคำนวณหาดีฟฟิวชัน.....	78
ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม.....	82
ผลการประเมินจำนวนเพศเลข.....	85
ผลการประเมินจำนวนไบออกท.....	88
ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมกับ จำนวนเพศเลข.....	92
ผลการประเมินสภาวะที่เหมาะสมสำหรับ	
การสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	96
1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวจากผลการทดลอง.....	96
2. ผลการทำดุลมวลในระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	98
3. ผลการคำนวณปริมาณผลได้.....	100
4. ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด โดยใช้ปริมาณผลได้เป็นเกณฑ์ตัดสิน.....	102
ผลการพืดข้อมูลจากผลการทดลองกับแบบจำลอง	
Diffusion - Backmixing.....	109
ผลการหา number of transfer unit (NTU) และ height of transfer unit (HTU).....	114
5 การวิเคราะห์ระบบการสกัดโดยใช้แบบจำลอง.....	121
ผลของการที่เฟสของแข็งไม่ได้สัมผัสกับเฟสของเหลว	
อย่างเต็มที่ตลอดร่างสกัด.....	121
การเปรียบเทียบผลของการผสมแบบปลั๊ก และการผสมย้อนกลับ.....	126
ผลของการผสมย้อนกลับ และจำนวนไบออกทต่อผลได้.....	128

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ผลการจำลองสถานการณ์ ผลของเวลาในการสกัดต่อผลได้ เมื่อใช้ $B_i$ และ $R$ ต่างกัน.....	131
การเปรียบเทียบผลได้จากผลการทดลองจริงกับ ผลการทำนายโดยแบบจำลอง.....	133
6 บทสรุป.....	134
ข้อเสนอแนะ.....	136
บรรณานุกรม.....	140
ภาคผนวก.....	144
ก. การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการสกัด.....	144
การหาค่าดริฟท์.....	144
การหาจำนวนเพศเลข.....	145
การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม.....	146
การหาจำนวนไบออกท.....	148
การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล.....	149
การคำนวณหาแฟกเตอร์รูปทรง.....	153
การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส.....	160
ข. การแปลงหน่วยความเข้มข้นของตัวละลาย.....	172
การหาความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดโดยการแทนที่น้ำ.....	172
การหาปริมาณความชื้นของเปลือกสับปะรด.....	172
การคำนวณปริมาณของแข็งที่ละลายได้เป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร.....	173
ค. ระบบการควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยไมโครคอมพิวเตอร์.....	176
ง. โปรแกรมควบคุมและทำนายในระบบการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	180
ง.1 โปรแกรมควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	180
ง.2 โปรแกรมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม.....	185
ง.3 โปรแกรมการทำนายจำนวนเพศเลข.....	189

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ง.4 โปรแกรมการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing.....	191
จ. ข้อมูลความเข้มข้นที่ได้จากระหว่างการสกัด ก่อนและหลังระบบเข้าสู่สถานะคงตัว.....	199
ฉ. ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ที่วัดได้จากการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับและ จากการพืดด้วยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing.....	201
ฉ.1 ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ตั้งแต่เริ่มสกัดจนกระทั่งเข้าสู่สถานะคงตัวของ การทดลองชุดต่าง ๆ.....	201
ฉ.2 ข้อมูลการพืดผลการทดลองกับแบบจำลอง Diffusion - Backmixing.....	229
ช. ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์และความเข้มข้น โดยใช้โปรแกรมของการทดลองชุดที่ 1.....	257
ช.1 ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม โดยใช้โปรแกรมในภาคผนวก ง.2 ของการทดลองชุดที่ 1.....	258
ช.2 ผลการประเมินจำนวนเพคเลทโดยใช้โปรแกรมในภาคผนวก ง.3 ของการทดลองชุดที่ 1.....	259
ช.3 ผลการประเมินความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว โดยใช้โปรแกรมในภาคผนวก ง.4 ของการทดลองชุดที่ 1.....	260
ซ. การเปลี่ยนระยะทางในรางสกัดเป็นเวลา.....	261
ฅ. การทำตุลมวลและการหาผลได้สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	263
ญ. การคำนวณหาพารามิเตอร์เพื่อใช้ควบคุมระบบสกัด แบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	264
ฎ. การจับกลุ่มสภาวะในการทดลองสำหรับการวิเคราะห์จำนวนใบออก.....	266
ฏ. ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง.....	268
ฐ. การหาการกระจายของเวลาที่อยู่ในรางสกัดของเฟสของแข็ง.....	271
ฑ. การหา number of transfer unit (NTU).....	273

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
ประวัติผู้เขียน.....	275

## ตัวย่อและสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่
Ae	=	พื้นที่ผิวต่อปริมาตร
Bi	=	จำนวนไบออต (ไม่มีหน่วย)
Br	=	°brix
C <sub>n</sub>	=	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการสกัด
$\hat{C}_n$	=	ค่าประมาณของ C <sub>n</sub>
CCE	=	counter current extraction
CSIRO	=	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
%cv	=	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (coefficient of determination)
D <sub>a</sub>	=	สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน (axial dispersion coefficient) (เมตร <sup>2</sup> /วินาที)
D <sub>x</sub>	=	สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกนในเฟสของแข็ง (เมตร <sup>2</sup> /วินาที)
D <sub>y</sub>	=	สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกนในเฟสของเหลว(เมตร <sup>2</sup> /วินาที)
D <sub>S</sub>	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง (ตารางเมตรต่อวินาที)
DdS	=	De danske Sukkerfabrikker
E	=	สัดส่วนที่เหลืออยู่ของตัวละลาย (ไม่มีหน่วย)
evp	=	การระเหย (evaporation)
F	=	ค่า F - factor
$\hat{F}$	=	ค่าประมาณของ F
FP	=	forward progression
HTU	=	height of transfer unit
Hz	=	ความถี่ของฮิเอร์เตอร์ (hertz)
I	=	เลขลำดับชั้น
IS	=	แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด (infinite slab)
J	=	ค่าคงที่สำหรับการสกัด ( $= \frac{1}{\alpha}$ )
$J'$	=	ปริมาณการถ่ายโอนมวลของตัวละลายต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด ของของแข็งต่อเวลา
J <sub>0</sub>	=	เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) อันดับ 0

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$J_1$	=	เบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ 1
$j$	=	$j$ - factor ตามแบบจำลองการแพร่อย่างง่าย
$j_t$	=	$j$ - factor ตามทฤษฎีการแพร่
$j_R$	=	$j$ - factor ตามแบบจำลอง Diffusion - Backmixing กรณีแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
$K_b$	=	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการสกัด (ไม่มีหน่วย)
$k$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิว (surface mass transfer coefficient)
$K_x$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient)
$l$	=	ความยาวเชิงลักษณะ (characteristic length)
$l'$	=	ระยะทางที่ห่างจากทางเข้าเฟสของแข็ง
$L$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$L_0$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลวที่ป้อนเข้าเครื่องสกัด
$L_t$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลวที่ออกจากเครื่องสกัด
$L'$	=	ความยาวเครื่องสกัด
$m$	=	สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (equilibrium mass transfer coefficient) (ไม่มีหน่วย)
$Mc$	=	ความชื้น (moisture)
NTU	=	number of transfer unit
$P$	=	จำนวนเพคเลต (Peclet number) ของเฟสของแข็ง (ไม่มีหน่วย)
$q_n$	=	eigen value ลำดับที่ $n$ ซึ่งมีค่าเป็นบวก
$R$	=	จำนวนเพคเลตของเฟสของเหลว (ไม่มีหน่วย)
RCCE	=	reversing counter current extractor
RPM	=	รอบต่อนาที (round per minute)
RS	=	แผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular slab)
RT	=	retention time



ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$r$	=	รัศมีของทรงกลม
$r'$	=	ระยะทางที่วัดจากจุดกึ่งกลางของของแข็ง
$S$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$SD$	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)
$S_0$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็งที่ป้อนเข้าเครื่องสกัด
$S_f$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็งที่ออกจากเครื่องสกัด
$s$	=	แฟกเตอร์รูปทรง
$\hat{S}$	=	ความชันระหว่าง $\ln E$ กับ $t$
$T$	=	อุณหภูมิ
$T'$	=	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการสกัด ( $= K_x t_f$ )
$t$	=	ระยะเวลาที่ของแข็งอยู่ในระบบสกัด
$t'$	=	เวลาที่เกิดการแพร่
$t_d$	=	เวลาในการสกัดที่กำหนดไว้ในการทดลอง
$t_f$	=	เวลาเทียบเท่าของการสกัด
$t_l$	=	time lead
$t_p$	=	เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (time delay due to plasmolysis)
$V$	=	ปริมาตร
$V_x$	=	ปริมาตรเฟสของแข็ง
$V_L$	=	ปริมาตรเฟสของเหลว
$V_c$	=	ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)
$X$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$\bar{X}$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายเฉลี่ยในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$X^*$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่สถานะคงตัวกรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$X_{\infty}$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่สถานะคงตัว กรณีการสกัดแบบกะ
$X_0$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ป้อนเข้าเครื่องสกัด
$X_f$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ออกจากเครื่องสกัด
$X_{max}$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งสูงสุด
$X_p$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายเริ่มต้นเสมือน
$y$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา และตำแหน่ง
$y^*$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่สถานะคงตัว กรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง
$y_{\infty}$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่สถานะคงตัว กรณีการสกัดแบบกะ
$y_0$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ป้อนเข้าเครื่องสกัด
$y_f$	=	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ออกจากเครื่องสกัด
$z$	=	ระยะทาง หรือ ปริมาตรไรมิต
$\alpha$	=	ดริฟ (อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟส ของเหลวต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง)
$\alpha_f$	=	ดริฟตรงทางออกของเครื่องสกัด
$\gamma$	=	แฟกเตอร์ของการสกัดสมมูล (equivalent extraction factor)
$\tau$	=	จำนวนฟิคส์ (Fick number)
$\rho$	=	ความหนาแน่น
$\rho_{avg}$	=	ความหนาแน่นเฉลี่ย
$\infty$	=	อนันต์ (infinity)

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1	พารามิเตอร์สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง สำหรับกรณี $\alpha > 1$ .....19
1.2	สมการหาค่า $q_n$ และ $C_n$ สำหรับการสกัดแบบกะและแบบไหลสวนทาง เมื่อ $\tau > 0.1$ , $Bi \rightarrow \infty$ และ $\alpha$ มีค่าจำกัด.....20
1.3	ค่าประมาณของ $F(\hat{F})$ สำหรับแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด และทรงกลม กรณีการสกัดแบบกะ.....23
1.4	ค่าประมาณของ $F(\hat{F})$ สำหรับแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด และทรงกลม กรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง.....24
1.5	สมการหาค่า $\hat{C}_1$ สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง.....25
1.6	ค่าคงที่ $a$ และ $b$ สำหรับการหาค่า $q_1^2$ กรณี $Bi$ มีค่าจำกัด.....26
1.7	สมการหาค่า $q_1^2$ โดยประมาณ กรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง และ $Bi \rightarrow \infty$ สำหรับของแข็งรูปทรงแบบต่าง ๆ.....27
2.1	ค่า $E$ ตามทิศทางการแพร่ที่เกิดขึ้นในเฟสของแข็งที่มีรูปทรงต่าง ๆ กัน เมื่อ $\tau > 0.1$ และ $0.5 < \alpha < \infty$ .....53
3.1	เปรียบเทียบขนาดและรูปทรงของเครื่องสกัดที่พัฒนาขึ้น กับเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางที่พัฒนาขึ้นโดยสถาบัน CSIRO ประเทศออสเตรเลีย และ University of Delaware.....60
3.2	การกำหนดสภาวะในการทดลองชุดต่าง ๆ.....68
4.1	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....74
4.2	ค่าดริฟท์ ( $\alpha$ ) สัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรด ( $D_s$ ) และเวลาต่ำสุดเนื่องจากพลาสมอลิซิส ของการทดลองชุดต่าง ๆ เมื่อ $m = 1.14$ .....83
4.3	ข้อมูลความเข้มข้นสุดท้ายในเฟสของแข็งที่ได้จากการพิด ด้วยสมการเอกโปเนนเชียล นำมาประเมินหา ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_x$ ).....84
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา ดริฟท์ และอุณหภูมิในการสกัด ต่อจำนวนเพลต.....86
4.5	ผลการทำนายค่าต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมในภาคผนวก ง.4 (RCCE).....90

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา ตรวจจับ และอุณหภูมิในการสกัด ต่อจำนวนไบออกท.....93
4.7	ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดลองชุดที่ 1.....96
4.8	สรุปค่า $S_0$ , $S_f$ , $L_0$ , $L_f$ , $X_0$ , $X_f$ , $Y_f$ และ %evp ของการทดลองชุดต่าง ๆ.....99
4.9	ผลได้ (yield) จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ.....101
4.10	การเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้เมื่ออัตราเพิ่มเพิ่มขึ้น.....106
4.11	การเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้เมื่อใช้เวลาในการสกัดนานขึ้น.....107
4.12	การเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้เมื่อใช้อุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้น.....108
4.13	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริง กับผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Diffusion - Backmixing.....110
4.14	เปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวและเฟสของแข็ง ที่ได้จากผลการทดลองจริงกับผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง.....111
4.15	ค่า NTU และ HTU จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ เมื่อรางสกัดยาว 2.0 เมตร.....115
4.16	ค่า HTU แต่ละช่วงในเครื่องสกัด ของการทดลองชุดต่าง ๆ.....119
5.1	เปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว จากผลการทดลองจริง ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง และผลการจำลองสถานการณ์ (การแบ่งรางสกัดออกเป็น 2 ส่วน).....124
5.2	ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ เมื่อ $Bi \rightarrow \infty$ , $m = 1.14$ $\alpha = 1.5$ เวลาในการสกัด 50 นาที อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที).....126
ก.1	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองสกัดแบบกะ สำหรับหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล.....152
ก.2	ข้อมูลกราฟมาตรฐานสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่.....166
ก.3	ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ได้จาก การสกัดแบบกะที่ 55 องศาเซลเซียส สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่.....167

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ก.4	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ.....170
ค.1	การแปลงความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองเพื่อป้อนเข้าโปรแกรม ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอมพิวเตอร์.....179
จ.1	อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในเครื่องสกัดของการทดลองชุดต่าง ๆ.....199
จ.2	ข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองเมื่อการสกัดสิ้นสุด.....200
ช.1	ตัวอย่างการจับคู่ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสทั้งสองกับเวลาที่ใช้ในการสกัด.....262
ฎ.1	การจับกลุ่มความสัมพันธ์ระหว่างเวลา ตรีฟ และอุณหภูมิในการสกัด ต่อจำนวนไบออก.....267
ฎ.1	ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ของเฟสของแข็ง สำหรับการทดลองชุดที่ 1 เมื่อใช้ค่า R ต่าง ๆกัน.....268
ฎ.2	ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ของเฟสของเหลว สำหรับการทดลองชุดที่ 1 เมื่อใช้ค่า R ต่าง ๆกัน.....268
ฎ.3	ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ของเฟสของแข็ง สำหรับการทดลองชุดที่ 1 เมื่อใช้ค่า Bi ต่าง ๆกัน.....269
ฎ.4	ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ของเฟสของเหลว สำหรับการทดลองชุดที่ 1 เมื่อใช้ค่า Bi ต่าง ๆกัน.....269
ฎ.5	ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ เมื่อ $\alpha = 1.5$ เวลาในการสกัด 50 นาที $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที (อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส) $Bi \rightarrow \infty$ โดยที่ R ต่างกัน.....270
ฎ.6	ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ เมื่อ $\alpha = 1.5$ เวลาในการสกัด 50 นาที $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที (อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส) $R = 20$ โดยที่ Bi ต่างกัน.....270

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1	กระบวนการสกัดแบบ cross - current multistage leaching.....4
1.2	กระบวนการสกัดแบบ cocurrent multistage leaching.....4
1.3	กระบวนการสกัดแบบ counter current multistage leaching.....5
1.4	ระบบการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง.....6
1.5	ระบบการสกัดแบบเพอร์โคเลชัน.....7
1.6	เปรียบเทียบการไหลของเฟสของเหลวในระบบการสกัดแบบเพอร์โคเลชัน และแบบอิมเมอร์ชัน.....8
1.7	ก. เครื่องสกัดชนิด DdS .....10 ข. ภาพตัดขวางเครื่องสกัดชนิด DdS .....11
1.8	สภาวะขอบเขตของการสกัดแบบกะ.....17
1.9	การไหลในกระบวนการสกัดแบบกะหรือทางเดียว.....17
1.10	การไหลในกระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง.....18
2.1	การผสมแบบปลั๊ก.....29
2.2	การผสมย้อนกลับ.....30
2.3	การไหลของเฟสของแข็งและเฟสของเหลวในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....33
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับ $\tau$ แสดง time lead และ time lag.....37
2.5	รูปแบบการแพร่ของตัวละลายในเฟสของแข็ง.....38
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับ เวลาในการสกัดไร้มิติ ( $t'/L'$ ) ซึ่งได้จากผลการจำลองสถานการณ์ สำหรับ $K_x = 0.001$ วินาที <sup>-1</sup> ทราย 1.5 อุนท์มี 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที).....41
2.7	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับ $t$ กรณีที่มี และไม่มีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส.....45
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับ เวลา สำหรับอธิบาย $j$ - factor.....47
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับ เวลา สำหรับอธิบายความเข้มข้นเริ่มต้นเสมือน.....48

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log x$ หรือ $\log y$ กับเวลาในการสกัดสำหรับหาค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง.....	52
3.1 รูปทรงเปลือกสับปะรดที่ใช้ทดลอง.....	56
3.2 เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับที่พัฒนาขึ้น.....	56
3.3 วงจรรีเลย์.....	58
3.4 การ์ด เอทูดี - ดีทูเอ .....	58
3.5 ก. มิติเครื่องสกัดน้ำสับปะรดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	61
ข. มิติเครื่องสกัดน้ำสับปะรดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	62
3.6 ระบบการสกัดน้ำสับปะรดจากเปลือกแบบไหลสวนทางย้อนกลับ.....	63
3.7 จุดสัมผัสตัวอย่างของแข็ง ของเหลว และจุดวัดอุณหภูมิ ภายในเครื่องสกัด.....	65
4.1 ทิศทางการแพร่ในเปลือกสับปะรด 2 แผ่นประกบกัน.....	72
4.2 ทิศทางการแพร่ในแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด.....	72
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (เคลวิน) กับสัมประสิทธิ์การแพร่ ในเปลือกสับปะรด (ตารางเมตรต่อวินาที).....	75
4.4 อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในเครื่องสกัดของการทดลองชุดต่าง ๆ.....	79
4.5 ความเข้มข้นในเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มสกัด จนกระทั่งระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ของการทดลองชุดที่ 1.....	80
4.6 ความเข้มข้นในเฟสของแข็งที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มสกัด จนกระทั่งระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ของการทดลองชุดที่ 1.....	81
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดริฟท์ กับจำนวนเพลต.....	89
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบสกรู กับจำนวนไบออก.....	94
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม กับจำนวนเพลต.....	95
4.10 ความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ตามความยาวเครื่องสกัดเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว.....	97

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.11 ผลของดริ๊ฟต์ต่อปริมาณผลได้.....	103
ก. เวลาในการสกัด 50 นาที	
ข. เวลาในการสกัด 70 นาที	
ค. เวลาในการสกัด 90 นาที	
4.12 ผลของอุณหภูมิในการสกัดต่อปริมาณผลได้.....	104
ก. ดริ๊ฟต์ 1.0	
ข. ดริ๊ฟต์ 1.5	
ค. ดริ๊ฟต์ 2.0	
4.13 ผลของเวลาในการสกัดต่อปริมาณผลได้.....	105
ก. ดริ๊ฟต์ 1.0	
ข. ดริ๊ฟต์ 1.5	
ค. ดริ๊ฟต์ 2.0	
4.14 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง.....	112
4.15 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง.....	112
4.16 ผลของดริ๊ฟต์ ต่อ HTU .....	116
ก. เวลาในการสกัด 50 นาที	
ข. เวลาในการสกัด 70 นาที	
ค. เวลาในการสกัด 90 นาที	
4.17 ผลของอุณหภูมิ ต่อ HTU .....	117
ก. ดริ๊ฟต์ 1.0	
ข. ดริ๊ฟต์ 1.5	
ค. ดริ๊ฟต์ 2.0	



รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.18 ผลของเวลาในการสกัด ต่อ HTU.....	118
ก. ดริ์ฟ 1.0	
ข. ดริ์ฟ 1.5	
ค. ดริ์ฟ 2.0	
4.19 ค่า HTU ที่จุดต่าง ๆ ในรางสกัดของการทดลองชุดต่าง ๆ.....	120
5.1 ดุลมวลของระบบสกัดแบบไหลสวนทาง เมื่อแบ่งรางสกัดออกเป็น 2 ส่วน.....	121
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวของการทดลองชุดที่ 27.....	122
5.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลว จากผลการทดลอง จากผลการทำนายโดยแบบจำลอง และ จากการจำลองสถานการณ์ (โดยแบ่งรางสกัดออกเป็น 2 ส่วน) ของการทดลองชุดที่ 1.....	125
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $x/x_0$ หรือ $y/mx_0$ กับ $l'/L'$ เมื่อ $Bi \rightarrow \infty$ $m = 1.14$ , $\alpha = 1.5$ เวลาในการสกัด 50 นาที อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_S = 6.08 \times 10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที).....	127
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $x/x_0$ กับ $l'/L'$ จากผลการทดลอง และ การจำลองสถานการณ์ในเฟสของแข็ง ของการทดลองชุดที่ 1 เมื่อ ค่า R ต่างกัน.....	129
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $y/mx_0$ กับ $l'/L'$ จากผลการทดลอง และ การจำลองสถานการณ์ในเฟสของเหลว ของการทดลองชุดที่ 1 เมื่อ ค่า R ต่างกัน.....	129
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $x/x_0$ กับ $l'/L'$ จากผลการทดลอง และ การจำลองสถานการณ์ ในเฟสของแข็ง ของการทดลองชุดที่ 1 เมื่อ ค่า $Bi$ ต่างกัน.....	130
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $y/mx_0$ กับ $l'/L'$ จากผลการทดลอง และ การจำลองสถานการณ์ในเฟสของเหลว ของการทดลองชุดที่ 1 เมื่อ ค่า $Bi$ ต่างกัน.....	130

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัด กับ ผลได้ เมื่อ $R = 20$ ดริฟ = 1.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ $6.08 \times 10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที.....	132
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัด กับ ผลได้ เมื่อ $Bi$ มีค่านันต์ ดริฟ = 1.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ $6.08 \times 10^{-9}$ ตารางเมตรต่อวินาที.....	132
ก.1 ทิศทางการแพร่ของตัวละลายออกจากชั้นเปลือกสับปะรด.....	154
ก.2 รูปทรงของเปลือกสับปะรดที่ได้จากการคำนวณ.....	158
ก.3 แผนภาพถึงสกัดแบบกะสำหรับหาสัมประสิทธิ์การแพร่ และสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูล ในเปลือกสับปะรด.....	161
ก.4 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรด.....	162
ก.5 ดุลมวลในกระบวนการสกัดแบบกะ.....	164
ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับเวลาที่ใช้ในการสกัด (นาที).....	168
ค.1 ระบบการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์.....	177
ง.1 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมหาจำนวนเพคเลต (Peclet number).....	196
ง.2 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม.....	197
ง.3 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรม RCCE.....	198
ช.1 จุดเก็บตัวอย่างภายในรางสกัดเพื่อใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลาย.....	261
ฉ.1 การทำดุลมวลของระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง สำหรับการคำนวณผลได้.....	263

## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

อุตสาหกรรมแปรรูปสับปะรดนับเป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่ทำรายได้ให้แก่ประเทศหลายพันล้านบาทต่อปี มีแหล่งผลิตกระจายอยู่ตั้งแต่ภาคใต้ตอนบน ตั้งแต่จังหวัดชุมพร ไปจนถึงภาคกลางตอนล่าง รวมไปถึงภาคตะวันออกเฉียงตอนล่าง ซึ่งได้แก่ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี และตราด โรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าว มีตั้งแต่ขนาดกลาง (วัดฤดูบตั้งแต่ 20 - 50 ตันต่อวัน) ไปจนถึงขนาดใหญ่ (วัดฤดูบมากกว่า 50 ตันต่อวัน) ปัจจุบันอุตสาหกรรมสับปะรดเริ่มประสบปัญหาเกี่ยวกับการตลาด เพราะตลาดเกือบทั้งหมดเป็นตลาดต่างประเทศ ซึ่งมีการแข่งขันสูงขึ้นทั้งด้านราคาและคุณภาพ อีกทั้งค่าจ้างแรงงานก็สูงขึ้น จนทำให้ไทยไม่ได้เปรียบในแง่ค่าจ้างแรงงานอีกต่อไป แนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แรงงาน นำเศษเหลือจากการบรรจุกระป๋องมาใช้ประโยชน์ให้สูงสุดโดยการแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มมูลค่า ในปัจจุบันที่กำลังทำกันอยู่ก็คือการทำเป็นน้ำสับปะรดเข้มข้น ซึ่งสามารถทำรายได้เข้าประเทศในปี 2533 ถึง 1,600 ล้านบาท แต่ประสิทธิภาพในการผลิตโดยรวมแล้วยังไม่ดี สามารถพัฒนาเพิ่มขึ้นได้อีก (วรรณิ์ เศรษฐ์สุทธยางกูล, 2535) ในช่วงปี 2532 - 2536 ประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกน้ำผลไม้โดยเฉลี่ยต่อปีถึง 2,193.16 ล้านบาท ซึ่งเป็นการส่งออกน้ำสับปะรดมากที่สุด (สมคิด บุญถิ่นเหลือ, 2537)

ปัจจุบันการใช้เศษเหลือจากการบรรจุกระป๋องที่กำลังทำกันอยู่ก็นำมาตากแห้ง ทำอาหารสัตว์ นอกจากโรงงานขนาดใหญ่ที่นำเศษเหลือมาสกัดน้ำหวานผลิตเป็นน้ำผลไม้เข้มข้น กระบวนการสกัดน้ำหวานและทำน้ำสับปะรดเข้มข้นในแต่ละแห่งนั้นอาจจะแตกต่างกันไปบ้าง ส่วนใหญ่ยังคงใช้วิธีการบีบเชิงกลอยู่ ซึ่งสามารถสกัดน้ำหวานได้ประมาณร้อยละ 60 - 70 ส่วนโรงงานขนาดใหญ่บางโรงก็ได้นำเทคโนโลยีการสกัดแบบไหลสวนทางซึ่งใช้น้ำร้อนในการสกัดมาใช้ร่วมกับการบวนการระเหยหลายชั้นในการผลิตเป็นน้ำสับปะรดเข้มข้น ซึ่งทำให้ได้ผลผลิตน้ำหวานเพิ่มเป็นร้อยละ 85 - 90 แต่เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีต่างประเทศ ซึ่งไม่ได้พัฒนาขึ้นมาโดยตรงสำหรับการสกัดน้ำสับปะรด ประสิทธิภาพที่ได้ก็ยังคงไม่สูงเท่าที่ควรจะเป็น (มีกระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางหลายแบบที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดให้สูงกว่าร้อยละ 95) อีกทั้งยังต้องลงทุนสูงมากเพราะเป็นเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

เทคโนโลยีการสกัดไม้ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงที่ยากเกินไปที่จะมีการพัฒนาขึ้นมาให้จริงจังในประเทศไทย อีกทั้งยังเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำไปใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมน้ำตาล น้ำมัน น้ำผลไม้เข้มข้น เป็นต้น ในกรณีของการสกัดน้ำหวานจากสับปะรด การพัฒนาเทคโนโลยีการสกัด จะช่วยให้โรงงานขนาดกลางสามารถเพิ่มผลผลิต โดยการใช้เทคโนโลยีการทำน้ำหวานเข้มข้นที่มีต้นทุนต่ำ มีรายได้เพิ่มขึ้นจากการใช้ประโยชน์จากเศษเหลืออย่างเต็มที่ ซึ่งจะช่วยให้ความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมนี้ดีขึ้น

ในต่างประเทศมีการพัฒนาเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางที่มีประสิทธิภาพในการสกัดสูงอย่างต่อเนื่อง เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ (reversing counter current extractor) จัดว่าเป็นเครื่องสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการสกัดน้ำผลไม้ในปัจจุบัน (Carsimir, 1983 ; Siripatana, 1986 ; Gunasekaron et al., 1989)

ถึงแม้ว่ามีการสกัดน้ำสับปะรดจากเศษเหลือจากการบรรจุกระป๋องโดยกระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางจะได้มีทำกันแล้วในโรงงานขนาดใหญ่ แต่ก็ยังไม่มีการศึกษากันอย่างจริงจังในเรื่องของการออกแบบเครื่องสกัด ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการสกัด และหาสภาวะของการสกัดที่เหมาะสมในการผลิตน้ำสับปะรดเข้มข้น

งานวิจัยนี้เป็นงานขั้นเริ่มต้น เพื่อศึกษาการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องสกัดน้ำสับปะรด ซึ่งใช้การสกัดน้ำสับปะรดจากเปลือกสับปะรดเป็นกรณีศึกษา โดยเริ่มจากนำข้อมูลที่มีผู้วิจัยไว้ในต่างประเทศและในประเทศ มาใช้ในการออกแบบเครื่องสกัดต้นแบบ ซึ่งเป็นเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ (reversing counter current extractor) และทำการศึกษากลไกการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสกัด ผลการวิจัยขั้นต้นนี้ คาดว่าน่าจะเป็นข้อมูลพื้นฐานของการวิจัยขั้นต่อไป เพื่อการออกแบบระบบการสกัดและการขยายขนาดในระดับโรงงานต้นแบบต่อไปอย่างมีระบบ

## ตรวจเอกสาร

### 1. ทฤษฎีการสกัด (leaching theory)

กระบวนการสกัดระหว่างของแข็ง - ของเหลว (solid - liquid extraction) หรือที่เรียกว่า leaching process เป็นกระบวนการถ่ายโอนส่วนประกอบที่ละลายได้จากของแข็ง ไปสู่ตัวทำละลายที่เหมาะสมซึ่งอยู่รอบ ๆ เป็นหน่วยดำเนินการ (unit operation) ที่รู้จักกันมานานแล้วในอุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมอาหาร สามารถนำกระบวนการนี้มาประยุกต์ใช้กับ

อุตสาหกรรมอาหารได้อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืช อุตสาหกรรมน้ำตาล และอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้

Baird (1978) ได้แบ่งกระบวนการสกัดออกตามวิธีการดำเนินงานออกเป็น 2 แบบ

1. กระบวนการสกัดที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ การสกัดแบบนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากตัวละลายในของแข็งเกิดการแพร่เข้าสู่ตัวทำละลายที่อยู่รอบ ๆ เช่น การสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืช เป็นต้น

2. กระบวนการสกัดที่ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมี การสกัดเกิดขึ้นเมื่อตัวทำละลายทำปฏิกิริยาเคมีกับส่วนประกอบที่อยู่ในของแข็ง และทำให้เกิดส่วนประกอบที่ละลายได้ในตัวทำละลาย เช่น การสกัดโลหะออกจากถ่านหิน เป็นต้น

อุตสาหกรรมการสกัดด้วยตัวทำละลายในช่วงแรก มีจุดประสงค์เพื่อสกัดน้ำมันออกจากเมล็ดพืชซึ่งผ่านการทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อทำให้ตัวทำละลายผ่านเข้าสู่เนื้อเมล็ดได้ง่าย ต่อมามีการพัฒนาระบบการสกัดโดยให้ตัวทำละลายและของแข็งไหลสวนทางกัน ทำให้มีประสิทธิภาพการสกัดสูงซึ่งมีน้ำมันเหลืออยู่ในกากเมล็ดพืชจำนวนน้อยมาก (Milligan, 1976)

กระบวนการสกัด

สามารถแบ่งกระบวนการสกัดตามความต่อเนื่องของกระบวนการเป็น 2 แบบ คือ

1. กระบวนการสกัดแบบกะ (batch process)

ของแข็งและตัวทำละลายถูกกวนผสมกันในถัง (vessel) ทำให้ของแข็งและของเหลวเกิดการสัมผัสกันอย่างพอเหมาะ จากนั้นจึงแยกของแข็งและของเหลวที่สกัดได้ออกจากกัน ตัวอย่างของกระบวนการสกัดแบบนี้ได้แก่ การชงชา กาแฟ ฯ ในระดับอุตสาหกรรมระบบการสกัดแบบนี้ถูกนำไปใช้กับการผลิตแดงกวาดอง กระหล่ำปลีดอง การแช่ส้มฝักและผลไม้ การสกัดโปรตีนออกจากถั่วลิสง เป็นต้น

กระบวนการสกัดแบบกะมักเป็นกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว (single stage process) ซึ่งมีประสิทธิภาพการสกัดต่ำ สามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพการสกัดสูงขึ้นโดยทำการสกัดแบบกึ่งกะ (semi - batch) ซึ่งนำสารละลายที่สกัดได้ไประเหยตัวทำละลายออก แล้วจึงป้อนเข้าสู่กระบวนการสกัดอีกครั้ง

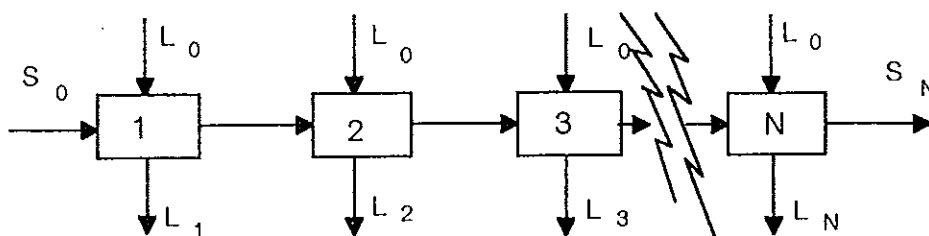
กระบวนการสกัดแบบกะหลายขั้น (multistage batch process) ใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ในการสกัดแต่ละขั้นตอน ของแข็งสัมผัสกับตัวทำละลายที่มีความเข้มข้นของตัวละลายต่ำมาก ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลสูง กระบวนการนี้เหมาะกับกรณีที่ตัวทำละลายที่ใช้มีราคาถูก

หาได้ง่าย ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม Schwartzberg (1980) รายงานว่า กระบวนการนี้เหมาะสำหรับกรณีของแข็งนั้นมีขนาดใหญ่ เช่น การผลิตฝักกาดอง เป็นต้น

## 2. กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (continuous process)

เป็นกระบวนการสกัดซึ่งป้อนของแข็งและตัวทำละลายเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง ในระดับอุตสาหกรรมมักเป็นกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องหลายชั้น ซึ่งให้ประสิทธิภาพการสกัดสูง การสกัดแบบต่อเนื่องหลายชั้น (continuous multistage leaching) แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

2.1 Cross current multistage leaching เป็นกระบวนการสกัดที่ใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ป้อนเข้าสู่แต่ละสเตจ (stage) อย่างต่อเนื่อง กระบวนการสกัดตามภาพประกอบ 1.1



$S$  คือ เฟสของแข็ง

$S_0$  คือของแข็งสด

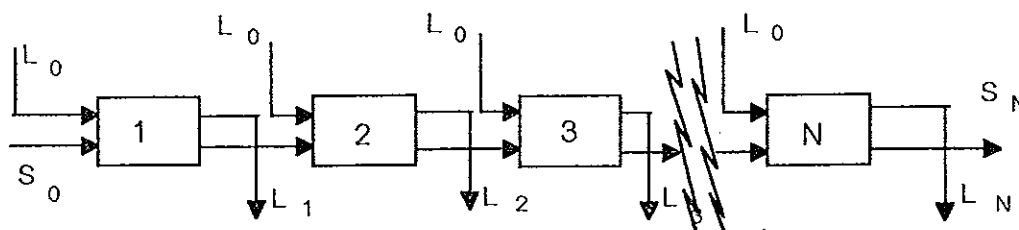
$L$  คือเฟสของเหลว

$L_0$  คือตัวทำละลายสด

ภาพประกอบ 1.1 กระบวนการสกัดแบบ cross-current multistage leaching

ที่มา : Traybal (1980)

2.2 Cocurrent multistage leaching เป็นกระบวนการสกัดที่ป้อนตัวทำละลายบริสุทธิ์และของแข็งบริสุทธิ์ในทิศทางเดียวกัน เกิดการผสมกันในสเตจแรก (first stage) จากนั้นของแข็งจากสเตจแรกถูกป้อนเข้าสู่สเตจถัดไป แต่ป้อนตัวทำละลายสดเข้าไปใหม่ กระบวนการสกัดดังภาพประกอบ 1.2

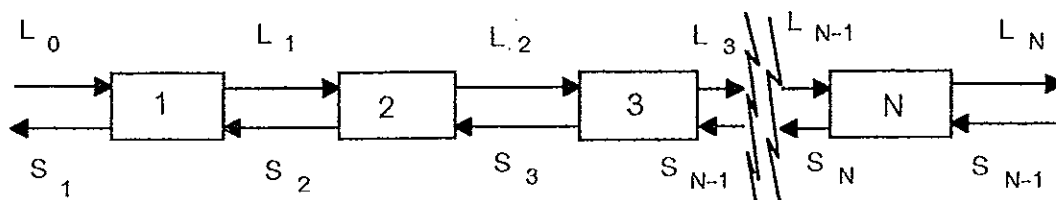


ภาพประกอบ 1.2 กระบวนการสกัดแบบ cocurrent multistage leaching

ที่มา : Schweitzer (1979)

2.3 Counter current multistage leaching เป็นกระบวนการสกัดที่ของแข็งและตัวทำละลายไหลสวนทางกัน กระบวนการสกัดแบบนี้พร้อมทั้งมีการควบไปด้วยถูกนำไปใช้ในกระบวนการสกัดน้ำส้มออกจากส่วนที่เป็นเนื้อ (pulp) และการสกัดน้ำชาออกจากใบชา กระบวนการสกัดดังภาพประกอบ 1.3

กระบวนการสกัดแบบกะ และ cross - current จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการแยกตัวละลายที่ต้องการออกจากตัวทำละลายค่อนข้างสูง กระบวนการสกัดแบบนี้จึงไม่เหมาะในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมจริง กระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางจึงเหมาะในการนำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเพราะเสียค่าใช้จ่ายในการสกัดน้อยกว่า และมีปริมาณของเสียออกมาน้อยกว่า



ภาพประกอบ 1.3 กระบวนการสกัดแบบ counter current multistage leaching

ที่มา : Schweitzer (1979)

กระบวนการสกัดแบบไหลสวนทาง (counter current leaching)

การสกัดแบบไหลสวนทาง เป็นกระบวนการสกัดที่ใช้ตัวทำละลายปริมาณน้อย จึงเป็นการช่วยลดปริมาณตัวทำละลายที่ต้องระเหยออกจากตัวละลายที่สกัดได้ สามารถแบ่งกระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางได้เป็น 3 ระบบ ดังนี้

1. ระบบการสกัดแบบไหลสวนทางเป็นขั้น (stagewise counter-current leaching system)

Desai และ Schwatzberg (1980) กล่าวว่าระยะเวลาในการสัมผัส (contact time) ระหว่างของแข็งกับตัวทำละลายในแต่ละสแตจไม่สมดุลกัน เนื่องจากการถ่ายโอนมวลของตัวละลายในของแข็งกับตัวทำละลายเกิดขึ้นค่อนข้างช้า แต่ไม่ควรทำให้มีการถ่ายโอนมวลดีขึ้นโดยการทำให้ของแข็งละเอียด เพราะเหตุผลดังนี้

- (1) ของแข็งมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม
- (2) การแยกของแข็งละเอียดออกจากของเหลวทำได้ยาก

(3) เกิดการสูญเสียความดัน (pressure drop) มากขึ้น

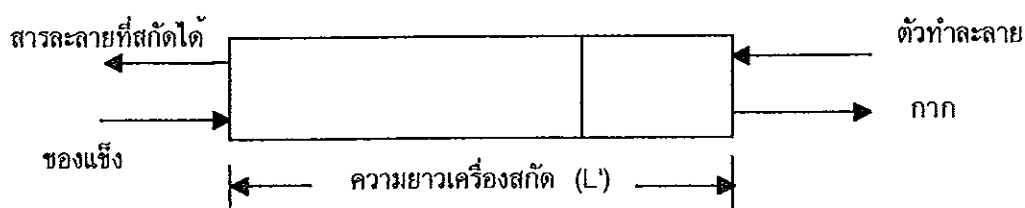
(4) อนุภาคคอลลอยด์ที่ไม่ต้องการและตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ถูกปล่อยออกมา

## 2. ระบบสกัดไหลสวนทางแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous counter current leaching system)

เป็นระบบการสกัดที่ปล่อยให้ตัวทำละลายเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องตรงบริเวณทางเข้า ส่วนของแข็งถูกป้อนเข้าและปล่อยออกจากระบบเป็นช่วง ๆ ระบบการสกัดแบบนี้ต้องดูแลอย่างใกล้ชิด ดังนั้นจึงหันมานิยมใช้ระบบการสกัดแบบต่อเนื่องมากกว่า ระบบการสกัดไหลสวนทางแบบกึ่งต่อเนื่องมักจะประกอบด้วยแบตเตอรี่ (battery) เรียงต่อกันเป็นชุดอย่างต่อเนื่อง และยังคงใช้กันอยู่ในการสกัดน้ำตาลจากหัวบีท การสกัดน้ำชา เครื่องดื่มที่สกัดจากถั่วงอกพืช เป็นต้น (Schwartzberg, 1980)

## 3. ระบบสกัดไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง (continuous counter current leaching system)

เป็นระบบการสกัดซึ่งกระแสของแข็งและตัวทำละลายไหลสวนทางกันเข้าสู่เครื่องสกัดอย่างต่อเนื่อง เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะลดค่าใช้จ่ายเรื่องแรงงาน ประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น และยังสามารถควบคุมได้โดยระบบอัตโนมัติ ดังภาพประกอบ 1.4 ตัวอย่างของเครื่องสกัดแบบต่อเนื่อง ได้แก่ Oliver-Morton extractor , The silver scroll extractor, The silver chain diffuser , R.T extractor เป็นต้น



ภาพประกอบ 1.4 ระบบการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง

ที่มา : Linko และคณะ (1980)



## เครื่องสกัด (extractor)

เครื่องสกัดเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดในกระบวนการสกัด มีหน้าที่และประโยชน์ดังนี้

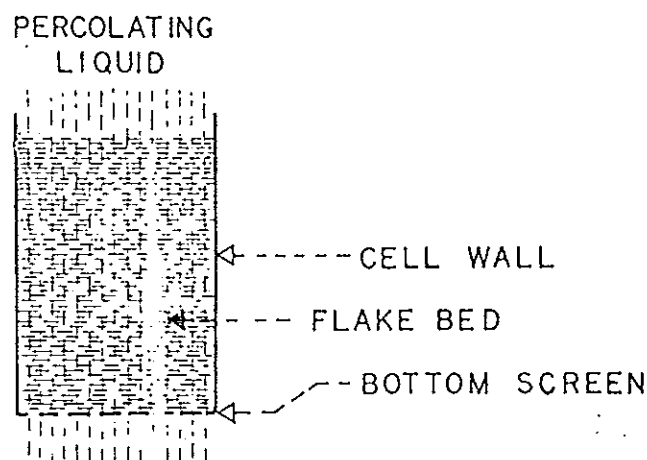
1. เป็นตัวพาของแข็งให้เคลื่อนที่มีระยะเวลาที่ทำให้เกิดการสกัดอย่างเพียงพอ
2. ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างของแข็งกับตัวทำละลายอย่างมีประสิทธิภาพ
3. ของแข็งและของเหลวหลังผ่านการสกัดถูกแยกออกจากกันได้ง่ายโดยใช้สายพานลำเลียง

ลำเลียง

เครื่องสกัดสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ตามความต่อเนื่องการทำงาน คือ แบบกะและแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งชนิดของเครื่องสกัดตามลักษณะการสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลวออกเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องสกัดแบบเพอร์โคเลชัน (percolation extractor) และเครื่องสกัดแบบอิมเมอร์ชัน (immersion extractor) (Milligan, 1976)

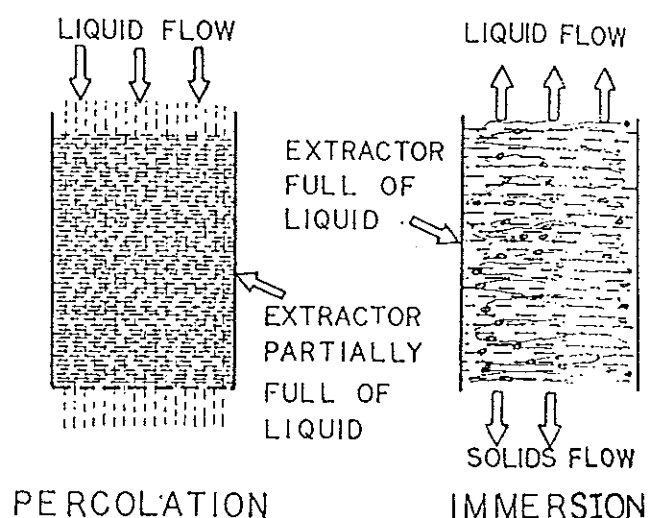
### 1. เครื่องสกัดแบบเพอร์โคเลชัน

เป็นเครื่องสกัดที่ทำงานโดยการป้อนตัวทำละลายเข้าทางบริเวณด้านบนของเครื่องสกัด ตัวทำละลายซึมผ่านเบด (bed) ของของแข็งและออกจากเบดบริเวณด้านล่าง ซึ่งมีตะแกรงกั้นอยู่ ดังภาพประกอบ 1.5 เครื่องสกัดที่มีระบบแบบนี้สามารถนำมาดัดแปลงให้มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นในพื้นที่จำกัด มีประสิทธิภาพในการสกัดสูง จึงนิยมใช้กันในระดับโรงงานมากกว่าระบบอิมเมอร์ชัน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบทั้งสอง ดังภาพประกอบ 1.6 จะเห็นว่าเบดของแข็งในระบบเพอร์โคเลชันอัดตัวกันแน่นกว่าระบบอิมเมอร์ชัน จึงใช้ปริมาณของเหลวในการสกัดน้อยกว่า และการปล่อยของเหลวออกจากระบบทำได้ง่ายกว่า



ภาพประกอบ 1.5 ระบบการสกัดแบบเพอร์โคเลชัน

ที่มา : Milligan (1976)



ภาพประกอบ 1.6 เปรียบเทียบการไหลของของเหลวในระบบการสกัดแบบเพอร์โคเลชัน และอิมเมอร์ชัน

ที่มา : Milligan(1976)

Milligan (1976) แบ่งชนิดเครื่องสกัดที่มีระบบการสกัดแบบเพอร์โคเลชันแบ่งออกเป็น 5 ชนิดดังนี้

1.1 ชนิดหมุน (rotary type) ตัวเครื่องมีลักษณะเป็นถังรูปทรงกระบอกซึ่งวางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งออกเป็นหลายช่อง แต่ละช่องเรียกว่า 1 เซล เซลจะหมุนรอบแกนกลางในระหว่างที่มีการสกัด ตัวอย่างของเครื่องสกัดในระบบนี้ได้แก่ เครื่องสกัดโรโตเซล (rotocel extractor) ของแข็งถูกป้อนเข้าสู่เซลล์อย่างต่อเนื่อง ตัวทำละลายบริสุทธิ์ถูกป้อนเข้าสู่เซลล์สุดท้ายของเครื่องสกัด ของแข็งที่ผ่านการสกัดแล้วถูกปล่อยออกมา ส่วนสารละลายที่สกัดได้ถูกนำมาผ่านตะแกรงร่อน ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่เครื่องระเหยตัวทำละลายต่อไป

1.2 ชนิดตะกร้าเชื่อมต่อกัน (chain and basket type) เครื่องสกัดประกอบด้วย ตะกร้าหลายใบเชื่อมต่อกัน การออกแบบเครื่องสกัดแบบนี้ในสมัยก่อนนิยมออกแบบในแนวตั้ง (vertical basket extractor) เช่น เครื่องสกัดโบลแมน (Bollman extractor) ตะกร้าเคลื่อนที่ไปตามลูป (loop) ของเหลวที่ถูกปล่อยออกจากตะกร้าที่อยู่สูงกว่าจะตกลงมาสู่ตะกร้าที่อยู่ด้านล่าง .

1.3 ชนิดสายพาน (percolate belt type) การสกัดเกิดขึ้นบนสายพานในแนวนอน ตัวอย่างของเครื่องสกัดแบบนี้ เช่น De Smet continuous - belt type

1.4 ชนิดโซ่ลำเลียง (chain conveyor type) ประกอบด้วยโซ่ลาก 2 ชุดและมีใบสกรู (flight) ซึ่งใช้ในการลำเลียงของแข็งติดอยู่ ตัวอย่างของเครื่องสกัดแบบนี้ เช่น Crown extractor อาศัยหลักการสกัดผสมกันทั้งแบบเพอร์โคเลชัน และอิมเมอร์ชัน

1.5 ชนิดกรอง (filter type) ประกอบด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ทำหน้าที่ช่วยดึงตัวละลายออกมา ตัวอย่างของเครื่องสกัดแบบนี้ เช่น Wurster & Sanger filtration extractor

## 2. เครื่องสกัดแบบอิมเมอร์ชัน

Milligan (1976) ; Baird (1978) ได้สรุปข้อดีและสภาวะการสกัดที่เหมาะสมสำหรับการสกัดโดยใช้เครื่องสกัดแบบอิมเมอร์ชันไว้ดังนี้

(1) ใช้กับการสกัดสารจากเมล็ดพืชซึ่งมีขนาดเล็ก และมีสารที่ต้องการสกัดปริมาณน้อย เช่น เม็ดสี, ยาสมุนไพร เป็นต้น

(2) ใช้ในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืช เช่น น้ำมันจากถั่วลิสง ดอกคำฝอย เมล็ดฝ้าย เนื้อมะพร้าวตากแห้ง และน้ำมันจากเมล็ดพืชชนิดอื่น ๆ ที่มีขนาดเล็ก

(3) ใช้สำหรับการสกัดของแข็งโดยตรง ไม่ทำให้ของแข็งเกิดการจับตัวกัน และไม่ทำให้ของแข็งมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการสกัด

(4) การดำเนินการทำได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องควบคุมสภาวะการสกัดให้เหมาะสมตลอดเวลาอย่างที่ต่างกับเครื่องสกัดแบบเพอร์โคเลชัน

(5) อัตราส่วนระหว่างของเหลวกับของแข็งไม่มีความสำคัญมากนัก แต่ต้องปรับอัตราการไหลของตัวทำละลายให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับ

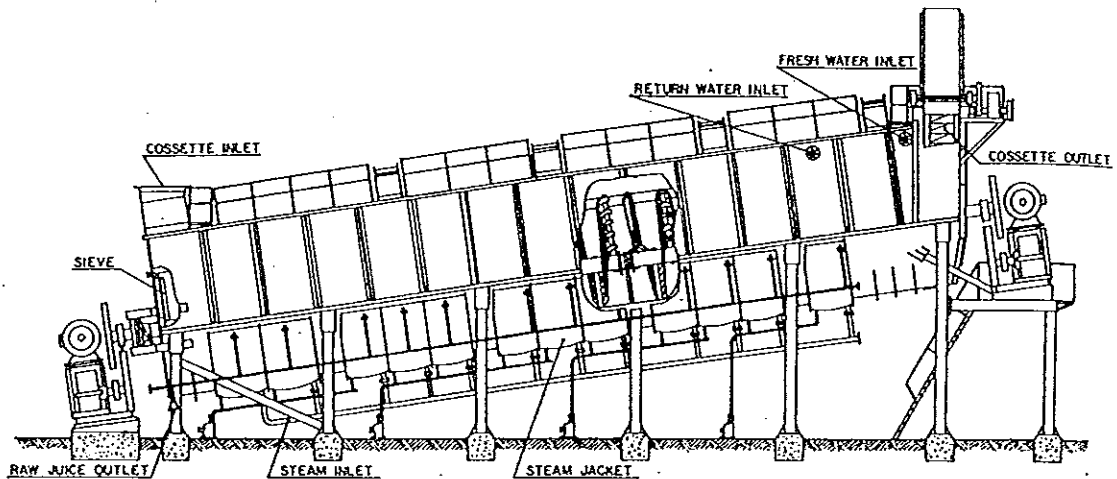
ตัวอย่างของเครื่องสกัดแบบอิมเมอร์ชันได้แก่ BMA diffusion tower , De danske Sukkerfabriker diffuser เป็นต้น

การพัฒนาเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

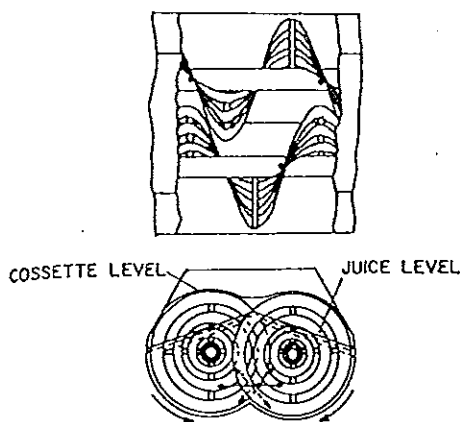
(development of reversing counter current extractor)

เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางที่ถือว่าเป็นต้นแบบของเครื่องสกัดต่อมาคือ De danske Sukkerfabriker (DdS) extractor ดังภาพประกอบ 1.7ก ถูกพัฒนาขึ้นมาเมื่อ 60 ปีก่อนโดย De danske Sukkerfabriker ต่อมามีการนำระบบการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่องมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมสกัดน้ำตาลจากหัวบีทอย่างแพร่หลาย (Schwartzberg, 1980) ต่อมาในปี 1969 Bruniche-Olsen ได้นำเครื่องสกัด DdS มาใช้ในการสกัดน้ำผลไม้ โดยใช้กระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง วางเครื่องสกัดทำมุมกับพื้น ต่อมากระบวนการสกัดแบบนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการสกัดน้ำแอปเปิ้ลในแอฟริกาใต้ (Casimir, 1983)

เครื่องสกัด DdS ประกอบด้วยรางรูปตัวยู ซึ่งหล่อหุ้มด้วยเจคเก็ต มีไอน้ำป้อนเข้าเพื่อรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสมในการสกัด ตัวรางเครื่องสกัดวางตัวทำมุมกับพื้นราบประมาณ 7 - 11 องศา ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการสกัด ภายในรางมีใบสกรู (screw flight) ลักษณะเป็นเกลียว 2 ชุด มีช่องว่างระหว่างสกรูแต่ละใบเท่า ๆ กัน สกรู 2 ชุด หมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน ใบสกรูถูกเจาะเป็นรูเพื่อให้ตัวทำละลายไหลผ่านไปได้ ดังภาพประกอบ 1.7 ซ สกรูชุดหนึ่งหมุนเร็วกว่าสกรูอีกชุดหนึ่ง ร้อยละ 5 ทำให้ใบสกรูแต่ละชุด สามารถกวาดเอาของแข็งที่อยู่ระหว่างใบสกรูอีกชุดหนึ่งได้ ส่วนของแข็งจะเคลื่อนที่ไปในรางตามระยะทางที่ต้องการ (Schwartzberg, 1980) วัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เครื่องสกัดตรงบริเวณปลายรางเครื่องสกัดด้านที่มีระดับต่ำกว่า และเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแนวพื้นเอียงโดยมีสกรูเป็นตัวขับเคลื่อน และถูกปล่อยออกทางปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่องสกัด สกรูสองตัวหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดถูกป้อนเข้าสู่เครื่องสกัดบริเวณปลายด้านบน น้ำผลไม้เจือจางที่สกัดได้ส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาป้อนเข้าสู่เครื่องสกัดอีกครั้ง บริเวณตำแหน่งที่ความเข้มข้นของน้ำผลไม้ในรางสกัดเท่ากับ ความเข้มข้นของน้ำผลไม้ที่นำกลับมาป้อนใหม่ น้ำบริสุทธิ์และน้ำผลไม้เจือจาง เคลื่อนที่ลงสู่ปลายรางตามแรงโน้มถ่วงของโลก (Siripatana, 1986)



ภาพประกอบ 1.7ก เครื่องสกัดชนิด DdS



ภาพประกอบ 1.7 ข ภาพตัดขวางเครื่องสกัดชนิด DdS

ที่มา : Schwartzberg (1980)

Bruniche-Olsen (1962) ได้นำเครื่องสกัดแบบ DdS มาประยุกต์ใช้กับการสกัดน้ำแอปเปิ้ล Osberg และ Sorensen (1981) รายงานว่า สถาบัน A.S. Rynkeby Mosteri แห่งประเทศเดนมาร์ก ได้ทดลองปรับปรุงเครื่องสกัดแบบ DdS เพื่อใช้กับการสกัดน้ำแอปเปิ้ลอย่างต่อเนื่อง หลังจากประสบความสำเร็จในการใช้เครื่องสกัดแบบ double helix diffuser มาแล้ว มีกำลังการผลิตสูงสุดเท่ากับ 3000 กิโลกรัมแอปเปิ้ลต่อชั่วโมง ต่อมามีการติดตั้งเครื่องสกัดแบบนี้ในปี 1975 กำลังการผลิตประมาณ 4000 - 5000 กิโลกรัมแอปเปิ้ล ต่อชั่วโมง

Binkley และ Willey (1978) ทดลองการสกัดน้ำแอปเปิ้ลโดยใช้เครื่องสกัด DdS เปรียบเทียบกับเครื่องสกัดแบบใช้แรงบีบอัด (Willimes press) โดยป้อนชิ้นแอปเปิ้ลที่มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 3 มิลลิเมตร เข้าสู่เครื่องสกัด DdS ควบคุมอุณหภูมิของการสกัดในช่วง 55 - 75 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องสกัดแบบ DdS ให้ปริมาณน้ำหวานมากกว่าเครื่องสกัดแบบใช้แรงบีบอัดร้อยละ 13.47 หากที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้น้อยกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบการยอมรับทางประสาทสัมผัส พบว่า ผู้ทดสอบส่วนใหญ่ชอบรสชาติน้ำแอปเปิ้ลจากเครื่องสกัดแบบใช้แรงบีบอัดมากกว่าที่ได้จากการสกัดโดยใช้เครื่องสกัดแบบ DdS

Emch (1980) ทดลองสกัดน้ำผลไม้โดยใช้เครื่องสกัดแบบ DdS เปรียบเทียบกับเครื่องสกัดแบบใช้แรงบีบอัดในทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าถ้าใช้น้ำผลไม้ที่สกัดได้ส่วนหนึ่งมาหมุนเวียนในระบบ DdS จะทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 90.8 เป็นร้อยละ 93.4 ในขณะที่เครื่องสกัดแบบใช้แรงบีบอัดจะให้ผลผลิตเพียงร้อยละ 82.02 เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของมูลค่า

น้ำผลไม้ที่สกัดได้ โดยที่มีกำลังการผลิตเท่ากับคือ 5 ตันต่อชั่วโมง พบว่า เครื่องสกัดแบบ DdS ให้น้ำผลไม้ที่มีมูลค่ามากกว่าการสกัดแบบใช้แรงบีบอัด

Osberg และ Sorensen (1981) ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำแอปเปิ้ล โดยใช้เครื่องสกัดของสถาบัน A.S Rynkeby Mosteri ซึ่งเป็นเครื่องสกัดแบบ DdS ใช้อุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำร้อนต่อปริมาณชิ้นผลไม้อ่าง ๆ กัน พบว่า เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิต่ำกว่า 58 องศาเซลเซียส การใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำร้อนต่อปริมาณชิ้นแอปเปิ้ลน้อยกว่า 1 : 1 จะทำให้ได้ผลผลิตต่ำ สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำแอปเปิ้ลคือ ที่อุณหภูมิการสกัด 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำร้อนต่อปริมาณชิ้นแอปเปิ้ลเท่ากับ 1.5 ได้ปริมาณน้ำแอปเปิ้ลถึงร้อยละ 90

Casimir แห่งสถาบัน Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization ประเทศออสเตรเลีย ร่วมกับบริษัท Bioquip Australia Pty Limited ได้พัฒนาเครื่องสกัดชนิดสกรูเดี่ยว (single screw extractor) ซึ่งมีประสิทธิภาพการสกัดสูง เรียกเครื่องสกัดนี้ว่า CSIRO-Howden counter current extractor

Casimir (1983) ทดลองสกัดน้ำผลไม้เช่น แอปเปิ้ล ส้ม และแพร์ โดยใช้เครื่องสกัด CSIRO unit ที่เขาได้พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับการสกัดโดยใช้เครื่องสกัดแบบอาศัยแรงบีบอัด พบว่า CSIRO unit ให้น้ำผลไม้ซึ่งมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้สูงสุด มีคุณภาพดีที่สุดในขณะที่ให้น้ำผลไม้ที่สกัดได้มาผ่านการทำให้บริสุทธิ์ พบว่า น้ำผลไม้ที่ได้จากเครื่อง CSIRO unit มีปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าน้ำผลไม้ที่ได้จากเครื่องสกัดแบบอาศัยแรงบีบอัด และสามารถทำให้เข้มข้นได้โดยไม่มีปัญหาใด ๆ จากการนำน้ำแอปเปิ้ลพันธุ์ Granny Smit ที่สกัดได้จากเครื่อง CSIRO unit และ เครื่องสกัดแบบอาศัยแรงบีบอัดมาหาปริมาณน้ำมันหอมระเหย พบว่า น้ำแอปเปิ้ลที่สกัดได้จากเครื่อง CSIRO unit มีปริมาณ 6-methyl-hept-5-en-2-one มากกว่าเครื่องสกัดแบบอาศัยแรงบีบอัดถึง 4 เท่า

จากการทดลองของ Casimir (1983) ในการสกัดน้ำผลไม้โดยใช้เครื่องสกัดแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งออกแบบให้มีการหมุนของสกรูไปข้างหน้าเพียงทิศทางเดียว พบว่าการสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลวไม่ค่อยมีประสิทธิภาพเพราะ เมื่อสกัดไปได้ช่วงเวลาหนึ่งของแข็งจะไปรวมอยู่ทางด้านข้างของเครื่องสกัดด้านใดด้านหนึ่ง ประกอบกับแรงอัดเนื่องจากการหมุนของสกรู ทำให้ของเหลวไม่ได้สัมผัสกับของแข็งอย่างทั่วถึง เป็นผลให้เครื่องสกัดแบบสกรูเดี่ยวนี้มีประสิทธิภาพการสกัดต่ำ แต่ปัญหาดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขได้เมื่อใช้เครื่องสกัด CSIRO unit ซึ่งปรับให้มีการหมุนของสกรูไปข้างหน้า และให้มีการหมุนถอยหลังกลับไปกลั้บมาตลอดช่วงเวลาของการสกัด

ของแข็งถูกส่งไปตามรางสกัด และสัมผัสกับของเหลว จากนั้นของแข็งเกิดการอัดตัวกันแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งของราง ต่อมาของแข็งดังกล่าวจะเคลื่อนที่กลับไปอยู่อีกด้านหนึ่งของรางเมื่อสกรูหมุนถอยหลัง การปรับให้มีเวลาการหมุนของสกรูไปข้างหน้ามากกว่าเวลาการหมุนถอยหลังทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ ภายในเครื่องสกัด จากการศึกษาการหมุนของสกรูไปข้างหน้าและหมุนถอยหลังกลับเป็นช่วง ๆ ตลอดระยะเวลาการสกัด เป็นผลให้ของแข็งกับของเหลวสัมผัสกันอย่างทั่วถึง มีประสิทธิภาพการสกัดสูงขึ้น (Siripatana, 1986 ; Gunasekaran et al., 1989)

Bioquip (1984) รายงานว่า จากการนำเครื่องสกัด CSRIO unit มาใช้ในการสกัดน้ำผลไม้ชนิดต่าง ๆ พบว่ามีประสิทธิภาพในการสกัดสูง ให้น้ำผลไม้ที่มีสี กลิ่น รสชาติ คงเดิม เมื่อนำมาใช้ในการสกัดน้ำแอปเปิ้ลพบว่า สามารถสกัดน้ำแอปเปิ้ลออกมาได้ร้อยละ 92.6

Siripatana (1986) ทดลองนำทฤษฎีการแพร่มาใช้ในการอธิบายกลไกการสกัดของเครื่องสกัด CSIRO unit โดยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาหลายแบบ แล้วนำมาทดสอบกับเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ (RCCE) พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมซึ่งสามารถใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในเครื่องสกัดที่สร้างขึ้น ได้ดีที่สุดคือแบบจำลอง Diffusion - Backmixing

Gunasekaran และคณะ (1989) ทดลองสกัดน้ำแอปเปิ้ลและแพร์ โดยใช้เครื่องสกัด RCCE ประกอบด้วยสกรูเดี่ยว หมุนกลับไปมาได้ จากนั้นจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมา 2 แบบ มาใช้ในการอธิบายสมรรถนะของเครื่องสกัดในรูปโพโพลีของความสัมพันธ์ของของแข็งที่ละลายได้ตามความยาวของเครื่องสกัด พบว่าความสัมพันธ์ของของแข็งที่ละลายได้ที่สกัดได้จากแอปเปิ้ลและแพร์ อยู่ในรูปยกกำลังกับระยะทางตามความยาวเครื่องสกัด ซึ่งเป็นไปตามที่ทำนายไว้โดยแบบจำลองทั้งสอง

Lee และ Schwartzberg (1990) พบว่าการกระจายตัวตามแนวแกน (axial dispersion) หรือการเกิดการผสมย้อนกลับ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียผลผลิตระหว่างการสกัดแบบไหลสวนทาง และได้หาผลเฉลยสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งสามารถใช้ในการอธิบายผลของการเปลี่ยนสภาวะในการสกัด และผลของการผสมย้อนกลับที่มีต่อการสกัด เช่น สามารถอธิบายได้ว่าการเกิดการผสมย้อนกลับทำให้ผลผลิตลดลงได้อย่างไร และจะลดปริมาณผลผลิตที่สูญเสียไปได้โดยวิธีใด

## 2. ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด

### 2.1 การถ่ายโอนมวลในกระบวนการสกัด (mass transfer in leaching process)

กระบวนการสกัดของแข็ง-ของเหลว เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลของตัวละลาย (solute) จากภายในของแข็ง ออกสู่ภายนอก การถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นได้โดยมีกระบวนการ 2 กระบวนการเข้ามาเกี่ยวข้องคือ กระบวนการพา (convection) และการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion) กระบวนการพามีอิทธิพลต่อการถ่ายโอนมวลจากผิวหน้าเฟสของแข็งไปสู่ตัวทำละลาย ส่วนการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นภายในเฟสของแข็งนั้น มักเป็นการแพร่ของโมเลกุลแบบสุ่ม การถ่ายโอนมวลโดยกระบวนการพาเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการแพร่ของโมเลกุลภายในเฟสของแข็ง ดังนั้นการถ่ายโอนมวลโดยการแพร่ภายในเฟสของแข็งจึงเป็นกระบวนการที่ควบคุม (rate controlling) การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในระหว่างการสกัด (Schwartzberg and Chao, 1982) สามารถแบ่งกลไกออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- (1) ตัวทำละลายแพร่เข้าสู่บริเวณผิวหน้าของแข็ง
- (2) ตัวทำละลายเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในช่องว่างภายในของแข็ง
- (3) เกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างตัวทำละลายและตัวละลาย
- (4) เกิดการแพร่ของตัวละลายออกมาสู่บริเวณช่องว่างในของแข็งซึ่งมีตัวทำละลายอยู่
- (5) เกิดการแพร่ของตัวละลายออกสู่บริเวณผิวหน้าของของแข็ง

จำนวนไบออต (Biot number) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสำคัญเชิงเปรียบเทียบระหว่างความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในเทียบกับความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายนอกเฟสของแข็ง

$$Bi = \frac{k \cdot m \cdot l}{D_s}$$

- เมื่อ  $Bi$  คือจำนวนไบออต  
 $k$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง  
 $D_s$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง  
 $l$  คือความยาวเชิงลักษณะ (characteristic length) ของเฟสของแข็ง  
 $m$  คือสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (distribution coefficient)

จำนวนไบออตจึงเป็นพารามิเตอร์ที่รวมทั้งพารามิเตอร์ที่แสดงถึงการแพร่ภายในเฟสของแข็ง คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ( $D_s$ ) และพารามิเตอร์ที่แสดงถึงการ



ถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าของเฟสของแข็งคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิว (surface mass transfer coefficient) ( $k$ )

จำนวนไบออตอาจแสดงถึง สัดส่วนระหว่างความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในต่อความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็ง ถ้าความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็งมีค่าน้อย แสดงว่า การถ่ายโอนมวลจากผิวหน้าเฟสของแข็งไปสู่ตัวทำละลาย (เฟสของเหลว) เกิดขึ้นได้ดี ( $k$  มีค่าสูง) ดังนั้นจำนวนไบออตมีค่ามาก ( $Bi \rightarrow \infty$ ) ในทางกลับกัน ถ้าความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายนอกมาก แสดงว่า  $k$  มีค่าน้อย จำนวนไบออตมีค่าน้อย ( $Bi \rightarrow 0$ )

Loncin (1980) อ้างโดย Schwartzberg และ Chao (1982) รายงานว่า การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ในสภาวะที่กำหนดให้  $Bi > 200$  (ถือว่าไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายนอกเฟสของแข็ง) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1 ยกเว้นในกรณีที่มีอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กมาก หรือสารที่สกัดได้ไหลผ่านเบดที่ถูกอัดแน่น หรือ  $m$  มีค่าน้อยมาก จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนมากยิ่งขึ้น

ทฤษฎีการแพร่ในของแข็ง มีสมมติฐานว่า การถ่ายโอนมวลของตัวละลายผ่านพื้นที่หน้าตัดขนาดหนึ่งหน่วย เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง

จากกฎข้อที่หนึ่งของฟิกค์ (Fick's first law) ได้นิยามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง ( $D_s$ ) ดังสมการ(1.1)

$$J' = -D_s \left( \frac{\partial x}{\partial r} \right) \quad (1.1)$$

เมื่อ  $J'$  คือปริมาณการถ่ายโอนมวลของตัวละลายต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของของแข็งต่อเวลา

$D_s$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง

$x$  คือความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง

$r'$  คือระยะทางที่วัดจากจุดกึ่งกลางของของแข็ง

Spanink (1979) ได้เสนอสมการทั่วไป จากกฎข้อที่สองของฟิกค์ (Fick's second law) สำหรับใช้ในการอธิบายการแพร่ในของแข็งที่สมมาตรในสถานะที่ไม่คงตัว

$$\frac{\partial x}{\partial t'} = \frac{1}{r'^{(s-1)}} \frac{\partial}{\partial r'} [r'^s D_s \frac{\partial x}{\partial r'}] \quad (1.2)$$

โดยที่  $t'$  คือเวลาที่เกิดการแพร่

$s$  คือแฟกเตอร์รูปร่างทรงของของแข็ง (shape factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของพื้นที่ผิวของแข็งสำหรับการถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรของแข็งคูณด้วยระยะทางที่วัดจากจุดกึ่งกลางของของแข็งตามสมการ

$$s = \frac{A \cdot r'}{V} \quad (1.3)$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่ผิวของแข็ง

$V$  คือ ปริมาตรของแข็ง

$r'$  คือ ระยะทางที่วัดจากจุดกึ่งกลางของของแข็ง

สำหรับ แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด (infinite flat slab)  $s = 1$

ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด (infinite cylinder)  $s = 2$

ทรงกลม (sphere)  $s = 3$

Plachco และ Krasuk (1970) เสนอผลเฉลยของสมการการแพร่สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางเมื่อของแข็งเป็นแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด ส่วนผลเฉลยของสมการการแพร่สำหรับรูปทรงกระบอกยาวไม่จำกัด และทรงกลมอธิบายไว้โดย Munro และ Amundson (1950) อ้างโดย Siripatana (1986)

สมมติฐานเกี่ยวกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต

เพื่อให้สามารถใช้กฎข้อที่ 2 ของฟิคค์ ตามสมการ (1.2) สำหรับการสกัดได้ง่ายขึ้น ต้องมีการกำหนดสมมติฐานเบื้องต้น ดังนี้

1. Linear sorption isotherm หมายถึง สัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลายภายนอก และความเข้มข้นของตัวละลายภายในของแข็งที่ภาวะสมดุลมีค่าคงตัวไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปัจจัยอื่นๆ

2. สัมประสิทธิ์การแพร่โมเฟสของแข็งมีค่าคงที่

3. มีส่วนประกอบเดียวเท่านั้นที่มีการแพร่และการแพร่เกิดในทิศทางเดียว

Siripatana (1994) ; Schwartzberg และ Chao (1982) ได้ตั้งสมมติฐานเพิ่มเติมเกี่ยวกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต สำหรับการสกัดแบบกะ และการสกัดแบบไหลสวนทาง ดังนี้

1. การสกัดแบบกะ (batch extraction)

สมมติฐานเกี่ยวกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตดังนี้

(1)  $x = x_0$  สำหรับ  $0 < r' < l$  เมื่อ  $t = 0$

(2)  $\frac{\partial x}{\partial r'} = 0$  ที่  $r = 0$

(3)  $y^* = mx^*$  ที่  $r' = 1$

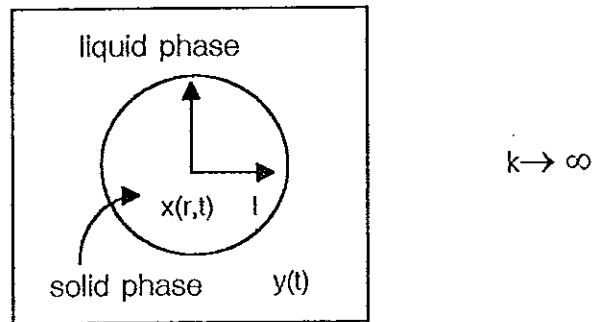
(4) ค่าดราฟ (draft) หรือแฟกเตอร์ของการสกัด ( $\alpha$ ) มีค่าคงที่

$$\alpha = \frac{Lm}{S} \tag{1.4}$$

เมื่อ  $L$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลว  
 $S$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง  
 $m$  คือ สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (equilibrium distribution coefficient)

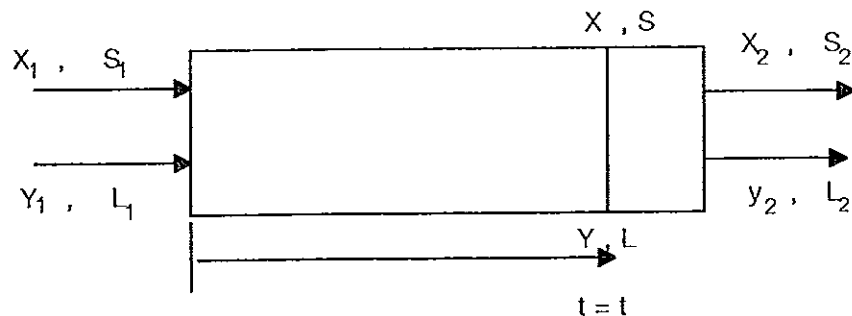
(5) ภายในเฟสของเหลว มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (well-mixed) ไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็ง ( $k \rightarrow \infty, Bi \rightarrow \infty$ ) การถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่เพียงอย่างเดียว

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง



ภาพประกอบ 1.8 สภาวะขอบเขตของการสกัดแบบกะ

ที่มา : Siripatana (1994)

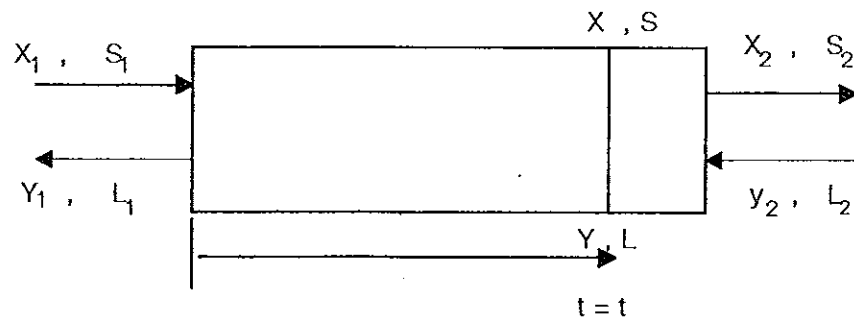


ภาพประกอบ 1.9 การไหลในกระบวนการสกัดแบบกะหรือทางเดียว

ที่มา : Siripatana (1994)

## 2. การสกัดแบบไหลสวนทาง (counter current extraction)

สมมติฐานที่เกี่ยวกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต สำหรับกระบวนการสกัดแบบไหลสวนทาง เช่นเดียวกับการสกัดแบบกะใน 4 ประการแรก แผนภาพของการสกัดแบบต่อเนื่อง ดังภาพประกอบ 1.10



ภาพประกอบ 1.10 การไหลในกระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง

ที่มา : Siripatana (1994)

สมมติให้ของแข็งและของเหลวมีการไหลแบบปลั๊ก (plug flow) ไม่เกิดการผสมย้อนกลับและไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอก ( $Bi \rightarrow \infty$ ) เช่นเดียวกับการสกัดแบบกะ Schwartzberg (1980) ได้สรุปผลเฉลยของสมการอนุพันธ์จากกฎข้อที่ 2 ของฟิกค์ สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง กรณีดริฟท์ ( $\alpha > 1$ ) ดังสมการ

$$\frac{\bar{x}-x_0}{\frac{y_f}{m}-x_0} = H_t = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \left[ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-q_n^2 D_s t / l^2) \right] \quad (1.5)$$

$$\frac{y}{y_f} = \frac{[H_T - H_t]}{H_T}, \quad \text{yield} = \frac{(\alpha)(y_f)}{m x_0} = \frac{(\alpha)(H_T)}{\alpha - H_T} \quad (1.6)$$

ในที่นี้

$y_f$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ออกจากเครื่องสกัด

$x_0$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ป้อนเข้าเครื่องสกัด

$\bar{x}$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายเฉลี่ยในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและ

ตำแหน่ง

$y$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง

$\alpha$  คือ ดริฟท์ (อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลวต่ออัตรา

การไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง)

$H_t$  คือ ค่า  $H$  ที่เวลาใด ๆ

$H_T$  คือ ค่า  $H$  ที่เวลา  $t = T$  (เวลาที่ใช้ในการสกัดทั้งหมด)

$q_n$  คือ eigen value ลำดับที่  $n$  ซึ่งมีค่าเป็นบวก

$C_n$  คือ ค่าพารามิเตอร์สำหรับการสกัด

ค่า  $q_n$  และ  $C_n$  สำหรับของแข็งรูปทรงแบบต่าง ๆ ดังตาราง 1.1

ตาราง 1.1 พารามิเตอร์สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง สำหรับกรณี  $\alpha > 1$ 

รูปทรงของแข็ง	ความยาวเชิงลักษณะ (l) (characteristic length)	$q_n$ (ค่ารากที่เป็นบวก)	$C_n$
แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด	ครึ่งหนึ่งของความหนา	$\frac{\tan(q_n)}{\alpha} = q_n$	$\frac{-2\alpha(1-\alpha)}{\alpha^2 q_n^2 + (1-\alpha)}$
ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด	รัศมี	$\alpha q_n J_0(q_n) = 2J_1(q_n)$	$\frac{-4\alpha(1-\alpha)}{\alpha^2 q_n^2 + 4(1-\alpha)}$
ทรงกลม	รัศมี	$\tan(q_n) = \frac{3q_n}{3-\alpha q_n^2}$	$\frac{-6\alpha(1-\alpha)}{\alpha^2 q_n^2 + 9(1-\alpha)}$

ที่มา : Schwartzberg (1980)

Siripatana (1994) ได้หาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์จากกฎข้อที่ 2 ของฟิกค์ โดยดัดแปลงจากสมการของ Crank (1975) , Schwartzberg (1980) , Schwartzberg และ Chao (1982) และ Siripatana (1986) ให้เป็นสมการการสกัดที่ใช้ได้ทั้งแบบกะ และแบบไหลสวนทาง ดังนี้

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp[-q_n^2 \tau] \quad , \quad \tau = \frac{D_{st}}{l^2} \quad (1.7)$$

$$E = \frac{x-x^*}{x_0-x^*}$$

$$x^* = \frac{1}{1+\gamma}(\bar{x}_1 + \gamma \frac{y_1}{m}) = \frac{1}{1+\gamma}(\bar{x}_2 + \gamma \frac{y_2}{m}) \quad (1.8)$$

หรือ

$$E = \frac{y-y^*}{y_0-y^*}$$

$$y^* = \frac{1}{1+\gamma}(m\bar{x}_1 + \gamma y_1) = \frac{1}{1+\gamma}(m\bar{x}_2 + \gamma y_2) \quad (1.9)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ จำนวนฟิกค์ (Fick number) $t$  คือ ระยะเวลาที่ของแข็งอยู่ในระบบสกัด $E$  คือ สัดส่วนที่เหลืออยู่ของตัวละลาย $x^*$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่สถานะคงตัว $y^*$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่สถานะคงตัว

ในระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง ค่า  $x^*$  และ  $y^*$  ขึ้นอยู่กับระยะเวลาทั้งหมดที่ของแข็งและของเหลวอยู่ในระบบสกัด

ในระบบการสกัดแบบกะ

$x^*$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่สถานะคงตัว ( $x_\infty$ )

$y^*$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่สถานะคงตัว ( $y_\infty$ )

$\gamma$  คือ แฟกเตอร์การสกัดสมมูล (equivalent extraction factor)

ในกรณีการสกัดแบบกะ  $\gamma = \alpha$  และในกรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง  $\gamma = -\alpha$

$x, x_1, x_2, y, y_1$  และ  $y_2$  คือความเข้มข้นของตัวละลายที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 1.9 และ 1.10

สำหรับกรณีการสกัดแบบกะ  $x_1, y_1$  เท่ากับความเข้มข้นของตัวละลายเริ่มต้นในเฟสของแข็ง ( $x_0$ ) และในเฟสของเหลว ( $y_0$ ) ตามลำดับ ส่วน  $x_2, y_2$  เท่ากับความเข้มข้นของตัวละลายที่สถานะคงตัวในเฟสของแข็ง ( $x_\infty$ ) และในเฟสของเหลว ( $y_\infty$ ) ตามลำดับ

$q_n$  และ  $C_n$  สำหรับของแข็งรูปทรงต่าง ๆ ดังตาราง 1.2

ตาราง 1.2 สมการหาค่า  $q_n$  และ  $C_n$  สำหรับการสกัดแบบกะ และแบบไหลสวนทาง เมื่อ  $\tau > 0.1, Bi \rightarrow \infty$  และ  $\alpha$  มีค่าจำกัด

รูปทรงของแข็ง	สมการสำหรับ $q_n$	$C_n$
แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด	$q_n = \frac{-\tan(q_n)}{\gamma}$	$\frac{2\gamma(\gamma+1)}{(\gamma+1)+(\gamma q_n)^2}$
ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด	$q_n = \frac{-2J_1(q_n)}{\gamma J_0(q_n)}$	$\frac{4\gamma(\gamma+1)}{4(\gamma+1)+(\gamma q_n)^2}$
ทรงกลม	$q_n = \frac{(3+\gamma q_n^2)\tan(q_n)}{3}$	$\frac{6\gamma(\gamma+1)}{9(\gamma+1)+(\gamma q_n)^2}$

ที่มา : Siripatana (1994)

ในที่นี้  $J_0$  และ  $J_1$  คือเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) อันดับที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ในกรณีที่  $\tau > 0.1$  พบว่า ถ้าใช้เทอมที่ 1 เพียงเทอมเดียวในการคำนวณหาผลเฉลยของสมการ (1.7) ผลการคำนวณจะมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยจริงไม่เกินร้อยละ 1 ดังนั้นในการคำนวณในทางปฏิบัติ ( $\tau$  มักจะมีค่ามากกว่า 0.1) จึงใช้เทอมที่ 1 ( $q_1, C_1$ ) เพียงเทอมเดียวก็เพียงพอ (Schwartzberg and Chao, 1982)

## 2.2 การแพร่ในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลว

การแพร่ในของแข็ง เป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลที่มีความเข้มข้นมากกว่าในของแข็งนั้น จากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การแพร่ในของแข็งมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ช้าเมื่อเทียบกับกระบวนการพาดังนั้นจึงเป็นกระบวนการที่ควบคุมการถ่ายโอนมวลในระหว่างการสกัด (Schwartzberg and Chao, 1982)

ในอุตสาหกรรมแปรรูปผลไม้ เนื้อเยื่อผลไม้ประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเป็นที่กักเก็บก๊าซ และของเหลว การแพร่ของก๊าซ ไอน้ำ และตัวละลายภายในของแข็ง มีความซับซ้อนกว่าการแพร่ในของเหลว เนื่องจากของแข็งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และยังเกิดอันตรกิริยากับสารที่แพร่ออกมาได้ ดังนั้นการแพร่ของโมเลกุลในของแข็งจะช้ากว่าในของเหลว

พารามิเตอร์ที่แสดงถึงความสามารถของตัวละลายในการแพร่ภายในเฟสของแข็ง เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient หรือ diffusivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการสกัด และความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟสของเหลวที่ใช้

เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่มีโครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แท้จริงได้ ดังนั้นจึงสมมติให้การถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นในทิศทางเดียว เรียกสัมประสิทธิ์การแพร่ที่หาได้ว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏ (Crank, 1970)

### สมการการแพร่อย่างง่าย (simplified diffusion equation)

จากสมการการแพร่ ซึ่งเสนอโดย Spanink (1979) [สมการ (1.2)] Siripatana (1994) ได้เสนอสมการการแพร่อย่างง่าย โดยแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่  $\tau > 0.1$  จะได้ว่า ค่า E (สัดส่วนที่เหลืออยู่ของตัวละลาย) ลดลงอย่างเอกโปเนนเชียล (exponential) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่ากระบวนการสกัดมีกลไกการสกัดอันดับที่ 1 (first order extraction kinetic) นั่นคือในกรณีที่  $\tau > 0.1$  การคำนวณค่า E จะคิดเฉพาะเทอมแรกของค่า  $q_n$  และ  $C_n$  ในตาราง 1.1 ก็เพียงพอแล้ว กระบวนการสกัดนี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองอย่างง่าย (simplified model) เมื่อไม่คิดกระบวนการแพร่ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการสกัด สมมติให้การกระจายของความเข้มข้นของตัวละลายมีรูปแบบเป็นพาราโบลา พิจารณาของแข็งที่มีรูปร่างอย่างง่าย เช่น แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด , ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด และทรงกลม จากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย สมการ (1.2) จัดรูปใหม่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อย่างง่ายได้ ดังนี้

$$-\frac{dx}{dt} = K' Ae [\bar{x} - \frac{y}{m}] \quad (1.10)$$

$$K' = \frac{1}{D_s} \left[ \frac{1}{F} + \frac{1}{Bi} \right] \quad (1.11)$$

พิจารณากรณีที่ค่า  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง

ในที่นี้  $Ae$  คือพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเฟสของแข็ง

$\bar{x}$  คือความเข้มข้นของตัวละลายเฉลี่ยในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา

และตำแหน่ง

$y$  คือความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและ

ตำแหน่ง

เมื่อ  $F$  คือ F-factor เป็นค่าที่แสดงถึง ความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวละลาย (solute concentration gradient) ขึ้นกับรูปทรงของแข็งและสภาวะขอบเขตของการแพร่

Siripatana (1986) ได้หาค่า  $F$  จากการพัฒนา สมการการสกัด กรณี  $Bi \rightarrow \infty$  และเขียนอยู่ในรูปทั่วไปดังนี้

$$F = q_{1,\infty}^2 \left[ \frac{\gamma}{S(\gamma+1)} \right] \quad (1.12)$$

และได้ แสดงผลเฉลยอย่างง่ายของสมการ (1.10) สำหรับการสกัดแบบกะ และแบบไหลสวนทางดังนี้

$$E = j \exp[-q_1^2 \tau] \quad (1.13)$$

$$\text{เมื่อ } q_1^2 = \left[ \frac{1}{1+F/Bi} \right] s F \left( \frac{\gamma+1}{\gamma} \right) \quad , \quad j = 1 \quad (1.14)$$

จากสมการของ Siripatana (1986) ทำให้สรุปผลเฉลยของสมการการแพร่อย่างง่าย

ดังนี้

1. ผลเฉลยของสมการการแพร่อย่างง่ายสำหรับการสกัดแบบกะ

$$\frac{x-x^*}{x_0-x^*} = \frac{y-y^*}{y_0-y^*} = E = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp[-q_n^2 \tau]$$

กรณีที่  $\tau > 0.1$  จะได้ว่า

$$E = C_1 \exp[-q_1^2 \tau] \quad , \quad j = C_1 \quad (1.15)$$

กรณีการสกัดแบบกะ สามารถเขียนสมการ (1.12) ได้ตามสมการ

$$F = q_{1,\infty}^2 \frac{\alpha}{s(\alpha+1)} \quad (1.16)$$

เนื่องจากค่า  $F$  ในสมการ (1.16) มีเทอม  $q_1$  เหลืออยู่ ซึ่งหาค่า  $q_1$  โดยการแก้สมการ จากตาราง 1.1 จะต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) ไม่สะดวกในการคำนวณ

Siripatana (1994) หาค่าประมาณของ  $F$  ( $\hat{F}$ ) ซึ่งไม่มีเทอมของ  $q_1$  เหลืออยู่ โดยการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อหาค่าประมาณของ  $F$  ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\hat{F}$  กับ  $\alpha$  สำหรับการสกัดของแข็งรูปทรงต่าง ๆ ดังตาราง 1.3



ตาราง 1.3 ค่าประมาณของ  $F(\hat{F})$  สำหรับแผ่นแบบราบยาวไม่จำกัด, ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด และทรงกลม กรณีการสกัดแบบกะ

รูปทรงของแข็ง	$\hat{F}$
แผ่นแบบราบยาวไม่จำกัด	$2.4391 - 3.7766 \times 10^{-1}/\alpha + 2.1857 \times 10^{-2}/\alpha^2$
ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด	$2.8050 - 5.9282 \times 10^{-1}/\alpha + 3.9620 \times 10^{-2}/\alpha^2$
ทรงกลม	$3.2600 - 1.1067/\alpha + 0.19179/\alpha^2 + 1.1258 \times 10^{-2}/\alpha^3$

ความถูกต้องเมื่อ  $0.1 < \alpha < \infty$  และ  $Bi \rightarrow \infty$  เท่ากับ  $\pm 2\%$

ที่มา : ดัดแปลงจาก Siripatana (1994)

จากผลเฉลยของแบบจำลองการแพร่อย่างง่าย จะได้ว่า  $j_1 = C_1 = 1$  ในขณะที่สมการการแพร่ทั่วไป ซึ่งกำหนดให้  $Bi \rightarrow \infty$  จากตาราง 1.2 สามารถหาค่า  $C_1$  สำหรับรูปทรงของแข็งเป็นแผ่นแบบราบยาวไม่จำกัด โดยใช้สมการดังนี้

$$C_1(\alpha, Bi \rightarrow \infty) = \frac{2s\gamma(\gamma+1)}{s^2(\gamma+1) + (\gamma q_1)^2} \quad (1.17)$$

สำหรับการสกัดแบบกะ  $\gamma = \alpha$  จะได้

$$C_1(\alpha, Bi \rightarrow \infty) = \frac{2s\alpha(\alpha+1)}{s^2(\alpha+1) + (\alpha q_1)^2} \quad (1.18)$$

เมื่อ  $\alpha \rightarrow \infty$  จะได้  $C_1(\infty, \infty) = 2s/q_1^2(\infty, \infty)$

กรณีที่  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้ (Luikov, 1968)

$$C_1(\infty, Bi) = \frac{2sBi^2}{q_1^2[q_1^2 + Bi^2 + (2-s)Bi]} \quad (1.19)$$

จากสมการ (1.19) จะเห็นว่า ถ้า  $\alpha \rightarrow \infty$  จะทำให้ค่า  $C_1$  ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์  $Bi^2/(q_1^2 + Bi^2 + (2-s)Bi)$  ถ้าสมมติให้ค่า  $\alpha$  และ  $Bi$  ไม่มีผลกระทบต่อค่า  $C_1$  สามารถประมาณค่า  $C_1$  ในกรณีที่  $\alpha$  และ  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่งตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\hat{C}_1(\alpha, Bi) = \frac{C_1(\alpha, Bi \rightarrow \infty)Bi^2}{(q_1^2 + Bi^2 + (2-s)Bi)} \quad (1.20)$$

2. ผลเฉลยของสมการการแพร่อย่างง่ายสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง

สมการทั่วไปของการสกัดแบบไหลสวนทาง (Siripatana, 1986)

$$E = \frac{(\alpha-1)\bar{x}/\alpha + \bar{x}\alpha_f - y_o/m}{(\alpha-1)x_o/\alpha + \bar{x}/\alpha_f - y_o/m} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-q_n^2 \tau)$$

เมื่อ  $\bar{x}$  คือความเข้มข้นของตัวละลายเฉลี่ยในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง

$\alpha_f$  คืออัตราที่ทางออกของเครื่องสกัด (มีค่าคงที่  $\equiv \alpha$ )

$m$  คือ สัมประสิทธิ์การกระจายสมมูล (distribution coefficient)

ของตัวละลายระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่สถานะคงตัว

กรณีที่  $\tau > 0.1$  เจาะเทอมแรกเท่านั้นที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณดังนี้

$$E = C_1 \exp(-q_1^2 \tau) \quad , \quad j = C_1 \quad (1.21)$$

กรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง และกำหนดให้  $Bi \rightarrow \infty$  สามารถเขียนสมการ (1.12)

ได้ดังนี้

$$F = q_{1,\infty}^2 \frac{(\alpha)}{s(\alpha-1)} \quad (1.22)$$

ในทำนองเดียวกันกับการสกัดแบบกะ Siripatana (1986) ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาค่า  $\hat{F}$  ซึ่งไม่มีเทอมของ  $q_1$  เหลืออยู่และเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง  $\hat{F}$  กับ  $\alpha$  กรณีการสกัดแบบไหลสวนทางดังนี้

$$\hat{F} = \frac{1}{\alpha} [s(0.509 + 0.37588\alpha) - (-2.0903\alpha + 0.0664)] \quad (1.23)$$

จากสมการ (1.23) สามารถหาค่า  $\hat{F}$  สำหรับการสกัดของแข็งรูปทรงต่าง ๆ แบบไหลสวนทางดังตาราง 1.4

ตาราง 1.4 ค่าประมาณของ  $F$  ( $\hat{F}$ ) สำหรับแผ่นแบบราบยาวไม่จำกัด , ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด และทรงกลม กรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง

รูปทรงของแข็ง	$\hat{F}$
แผ่นแบบราบยาวไม่จำกัด	$2.46618 + 0.5245/\alpha$
ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด	$2.84206 + 1.1154/\alpha$
ทรงกลม	$3.21494 + 1.7063/\alpha$

ความถูกต้องเมื่อ  $0.5 < \alpha < \infty$  และ  $Bi \rightarrow \infty$  เท่ากับ  $\pm 2\%$

ในทำนองเดียวกับการสกัดแบบกะเราสามารถหาค่า  $C_1$  ในกรณีที่  $Bi \rightarrow \infty$  สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง จากสมการ (1.17)

จากสมการ (1.17) แทนค่า  $\gamma = -\alpha$  จะได้

$$C_1(\alpha, Bi \rightarrow \infty) = \frac{-2s\alpha(1-\alpha)}{s^2(1-\alpha) + (-\alpha)^2 q_1^2}$$

$$\text{จัดรูปใหม่ ได้ } C_1(\alpha, Bi \rightarrow \infty) = \left[ \frac{2S\alpha}{\frac{\alpha^2 q_1^2}{(\alpha-1)} - S^2} \right] \quad (1.24)$$

จากสมการ (1.22) สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง และกำหนดให้  $Bi \rightarrow \infty$  จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$q_{1,\infty}^2 = \frac{S(\alpha-1)\hat{F}}{\alpha} \quad (1.25)$$

สามารถประมาณค่า  $C_1$  ( $\hat{C}_1$ ) โดยการแทนค่า  $q_{1,\infty}^2$  ลงในสมการ (1.24) จะได้

$$\hat{C}_1 = \frac{2\alpha}{(\alpha\hat{F}-S)} \quad (1.26)$$

จากการแทนค่า  $\hat{F}$  ในสมการ (1.26) สามารถหาค่า  $C_1$  โดยประมาณ ( $\hat{C}_1$ ) กรณีการสกัดแบบไหลสวนทางสำหรับรูปทรงแบบต่าง ๆ ดังตาราง 1.5

ตาราง 1.5 สมการหาค่า  $\hat{C}_1$  สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง

รูปทรงของแข็ง	$\hat{C}_1$
แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด	$\frac{2\alpha}{(2.46618\alpha-0.4755)}$
ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด	$\frac{4\alpha}{(5.68412-1.7692)}$
ทรงกลม	$\frac{6\alpha}{(9.64482-3.8811)}$

ความถูกต้องเมื่อ  $0.5 < \alpha < \infty$  และ  $Bi \rightarrow \infty$  เท่ากับ  $\pm 2\%$

Siripatana (1994) ได้สรุปผลเฉลยโดยประมาณสำหรับการสกัดแบบกะ และการสกัดแบบไหลสวนทาง (CCE) สำหรับรูปทรงสมมาตรใด ๆ ที่  $\gamma$  และ  $Bi$  ใด ๆ เมื่อ  $(\tau > 0.1)$  ดังนี้

$$E(\tau, s, \gamma, Bi) = C_1(s, \gamma, Bi) \exp[-q_1^2(s, \gamma, Bi)\tau] \quad (1.27)$$

ในที่นี้  $\gamma = \alpha$  สำหรับการสกัดแบบกะ

$\gamma = -\alpha$  สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง

$\tau = \frac{D_{st}}{l^2}$  คือ จำนวนฟิคส์

Siripatana (1986) พบว่าผลเฉลยสำหรับระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง กรณีที่สมมติให้การไหลในเฟสของแข็งเป็นแบบปลึกโดยสมบูรณ์ ( $P \rightarrow \infty$ ) และ ไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็ง ( $Bi \rightarrow \infty$ ) มีความสัมพันธ์กับ ค่า  $\hat{C}_1$  ดังสมการ

$$E = \frac{\frac{(\alpha-1)\bar{x} + \frac{x_f}{\alpha} - \frac{y_0}{m}}{(\alpha-1)x_0 + \frac{x_f}{\alpha} - \frac{y_0}{m}}}{\alpha} = \hat{C}_1 \exp(-q_1^2 \tau) \quad (1.28)$$

จากสมการ (1.24) สามารถหาค่า  $\hat{C}_1$  กรณีของแข็งมีรูปทรงเป็นแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด โดยการแทนค่า  $s=1$  จะได้

$$\hat{C}_1 = \frac{2\alpha}{\left[\frac{\alpha^2 q_1^2}{(\alpha-1)} - 1\right]} \quad (1.29)$$

แทนค่าสมการ (1.25) และ (1.26) ลงในสมการ (1.28) จะได้ ผลเฉลยอย่างง่าย สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง ดังนี้

$$E = \frac{2\alpha}{(\hat{F}\alpha - s)} \exp\left[-s\hat{F}\frac{(\alpha-1)}{\alpha}\tau\right] \quad (1.30)$$

สำหรับกรณีที่  $q_1^2$  เป็นฟังก์ชันกับ  $Bi$  และรูปทรงของของแข็ง Luikov (1968) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_1^2$  เมื่อ  $Bi \rightarrow \infty$  กับค่า  $q_1^2$  เมื่อ  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่งดังนี้

$$q_1^2 = (q_1^2)_\infty \left[ \frac{1}{1 + (a/Bi^b)} \right] \quad (1.31)$$

เมื่อ  $(q_1^2)_\infty$  คือค่า  $q_1^2$  เมื่อ  $Bi \rightarrow \infty$

$a$  และ  $b$  คือค่าคงที่ขึ้นกับรูปทรงของของแข็งดังตาราง 1.6

ตาราง 1.6 ค่าคงที่  $a$  และ  $b$  สำหรับการหาค่า  $q_1^2$  กรณี  $Bi$  มีค่าจำกัด

รูปทรง	$a$	$b$
แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด	2.24	1.02
ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด	2.45	1.04
ทรงกลม	2.70	1.07

ที่มา : Siripatana (1986)

กรณีที่  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง และ  $Dr$  ฝมากกว่า 1 จะทำให้ค่า  $\hat{C}_1$  เป็นฟังก์ชันกับ  $Bi$  Siripatana (1986) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\hat{C}_1$  เมื่อ  $Bi \rightarrow \infty$  กับค่า  $\hat{C}_1$  เมื่อ  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง ดังนี้

$$\hat{C}_1 = (\hat{C}_1)_\infty + [1 - (\hat{C}_1)_\infty] \exp(\delta Bi) \quad (1.32)$$

เมื่อ  $(\hat{C}_1)_\infty$  คือค่า  $\hat{C}_1$  เมื่อ  $Bi \rightarrow \infty$   $(\hat{C}_1)_\infty = \frac{2\alpha}{(\alpha\hat{F} - s)}$

$\hat{C}_1$  คือค่า  $\hat{C}_1$  เมื่อ  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง

$\delta$  คือค่าคงที่ขึ้นกับรูปทรงของของแข็ง

กรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด และทรงกระบอกยาวไม่จำกัด  $\delta = -0.1$

กรณีทรงกลม  $\delta = -0.08$

สามารถหาค่า  $q_1^2$  โดยการแทนค่า  $\hat{F}$  จากตาราง 1.4 ลงในสมการ (1.25) ค่า  $q_1^2$  สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง กรณี  $Bi \rightarrow \infty$  ดังตาราง 1.7

ตาราง 1.7 สมการหาค่า  $q_1^2$  โดยประมาณกรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง และ  $Bi \rightarrow \infty$  สำหรับของแข็งรูปทรงแบบต่าง ๆ

รูปทรงของแข็ง	$q_1^2$
แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด	$\frac{(2.46618\alpha+0.5245)(\alpha-1)}{\alpha^2}$
ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด	$\frac{(5.68412\alpha+2.2308)(\alpha-1)}{\alpha^2}$
ทรงกลม	$\frac{(9.64482\alpha+5.1189)(\alpha-1)}{\alpha^2}$

## วัตถุประสงค์

1. สร้างและพัฒนาระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับสำหรับการสกัดน้ำสับปะรดจากเปลือกสับปะรด
2. ศึกษาการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับที่ได้พัฒนาขึ้น
3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องสกัด และทดสอบแบบจำลองโดยใช้ผลการทดลอง

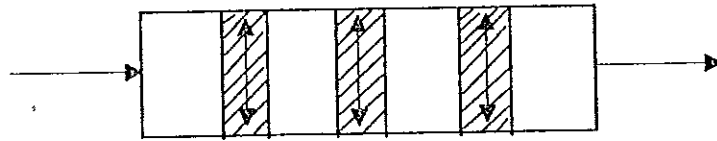
## บทที่ 2

### แนวคิดและการพัฒนาแบบจำลอง Diffusion-Backmixing

#### 1. ทฤษฎีการไหลและการผสม

ในกระบวนการสกัด เฟสของแข็งและเฟสของเหลว จะมีระดับการผสม ที่แตกต่างกัน ซึ่งตามทฤษฎีการผสมย้อนกลับ (backmixing) สามารถแบ่งการผสมออกเป็น 3 แบบ คือ

1.1 การผสมแบบปลั๊ก (plug flow) เป็นการผสมที่มีการผสมในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลเป็นไปโดยสมบูรณ์ (ภาพประกอบ 2.1) ความเข้มข้นของตัวละลายในแนวตั้งฉากกับการไหล เท่ากันทุกจุด ไม่มีการผสมในแนวราบ (แนวแกน) พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงระดับของการผสมในแนวแกน (ระนาบ) เรียกว่า สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน (axial dispersion coefficient) ( $D_a$ )



ภาพประกอบ 2.1 การผสมแบบปลั๊ก

ในกรณีการไหลแบบปลั๊กจะ ไม่มีการผสมในแนวระนาบ นั่นคือสัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน ในกรณีนี้เป็นศูนย์

การไหลแบบปลั๊ก จะมีค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของตัวละลายภายในและภายนอกเฟสของแข็ง (driving force) สูงที่สุด

ดรรชนีไร้มิติที่บ่งชี้ถึงระดับของการผสมย้อนกลับคือจำนวนเพคเลต (Peclet number)

นิยาม 
$$P = SV_x/D_x$$

$$R = LV_L/D_y$$

เมื่อ  $P$  คือ จำนวนเพคเลต ของเฟสของแข็ง (ไม่มีหน่วย)

$R$  คือ จำนวนเพคเลต ของเฟสของเหลว (ไม่มีหน่วย)

$D_x$  คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกนในเฟสของแข็ง (เมตร<sup>2</sup>/วินาที)

$D_y$  คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกนในเฟสของเหลว (เมตร<sup>2</sup>/วินาที)

$S$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง (เมตร<sup>3</sup>/วินาที)

$L$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลว (เมตร<sup>3</sup>/วินาที)

$V_x$  คือ ปริมาตรของเฟสของแข็ง (เมตร<sup>3</sup>)

$V_L$  คือ ปริมาตรของเฟสของเหลว (เมตร<sup>3</sup>)

สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน เป็นตัวแปรที่แสดงถึงระดับของการผสมย้อนกลับ (backmixing) นั่นคือถ้าสัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกนมีค่ามาก (กระจายตัวในแนวแกนดี) แสดงว่ามีระดับของการผสมย้อนกลับมาก จะเห็นได้ว่าจำนวนเพศเลขเป็นสัดส่วนผกผันกับสัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน

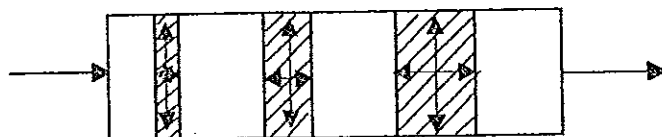
ดังนั้นในกรณีการผสมแบบปลັก จะมีค่า  $P \rightarrow \infty$  และ  $R \rightarrow \infty$

### 1.2 การผสมสมบูรณ์ (well - mixed or perfect mixing)

การผสมจะเกิดขึ้นในทุกทิศทุกทาง ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวจะเท่ากันทุกจุด สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน ( $D_a$ ) มีค่าอนันต์ นั่นคือ  $P \rightarrow \infty$  และ  $R \rightarrow 0$

### 1.3 การผสมย้อนกลับ (Backmixing)

เป็นการผสมที่อยู่ระหว่างการผสมแบบปลັก กับ การผสมสมบูรณ์ คือมีการผสมกันในแนวตั้งจากทิศทางการไหลอย่างสมบูรณ์ และมีการผสมในแนวแกนเกิดขึ้นด้วย แต่การผสมในแนวแกนเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ นั่นคือค่า  $R$  มีค่าจำกัด (ภาพประกอบ 2.2)



ภาพประกอบ 2.2 การผสมย้อนกลับ

## 2. การผสมในเครื่องสกัดน้ำสับปะรดที่พัฒนาขึ้น

ในกระบวนการสกัด ในทางทฤษฎีการไหลแบบปลັก จะทำให้เกิด driving force สูงสุด ถ้ามีการผสมกันในแนวตั้งจากทิศทางการไหลอย่างดี แต่ในทางปฏิบัติ ถ้าจัดระบบสกัดให้มีการไหลให้ใกล้เคียงกับแบบปลັก พบว่าการถ่ายโอนมวลโดยกระบวนการพา (convection) ของตัวละลายจากผิวหน้าเฟสของแข็งไปยังเฟสของเหลวเกิดขึ้นได้ไม่ดี เสมือนว่ามีแผ่นฟิล์มบาง ๆ กั้นอยู่ที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง การแพร่จากผิวหน้าของแข็งไปสู่เฟสของเหลว จึงเป็นขั้นตอนที่ควบคุมการแพร่



แทนที่จะเป็นขั้นตอนการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในของแข็งเป็นตัวควบคุม สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าของแข็ง ( $k$ ) มีค่าน้อย

พารามิเตอร์ที่แสดงถึงสัดส่วนระหว่างความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในเฟสของแข็ง ต่อ ความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็ง ได้แก่ จำนวนไบออต (Biot number) มีความสัมพันธ์กับ  $k$  และ  $D_s$  ดังสมการ

$$Bi = \frac{k \cdot m \cdot l}{D_s}$$

เมื่อ  $Bi$  คือ จำนวนไบออต

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าของแข็ง

$m$  คือ สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลง

$l$  คือ ความยาวเชิงลักษณะ

$D_s$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็ง

ถ้าความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็งมีค่าน้อย ( $Bi \rightarrow \infty$ ) แสดงว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง ( $k$ ) มีค่าสูง เมื่อเทียบกับการถ่ายโอนมวลภายในของแข็ง

การผสมที่เกิดขึ้นในเครื่องสกัดเป็นผลจากการหมุนเวียนของเฟสของเหลวโดยกระบวนการพา (convection) ซึ่งส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ 2 พารามิเตอร์ คือ

1. จำนวนไบออต ( $Bi$ ) ถ้ามีการหมุนเวียนของเฟสของเหลวได้ดี จะทำให้ความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็งลดลง นั่นคือ จำนวนไบออตมีค่ามาก ความหนาของฟิล์มลดลง สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง ( $k$ ) สูง การแพร่ภายในของแข็งจะเป็นกลไกที่จำกัดการถ่ายโอนมวล

2. จำนวนเพลท ( $R$ ) ถ้ามีการหมุนเวียนของเฟสของเหลวได้ดี จะทำให้มีการผสมย้อนกลับมากขึ้น จำนวนเพลทมีค่าน้อย

ปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวของแข็ง และการผสมย้อนกลับมีกลไกที่ต่างกันในทางทฤษฎี แต่ได้รับผลกระทบจากเหตุอันเดียวกันคือ การหมุนเวียนของเฟสของเหลวโดยกระบวนการพา ดังนั้น ค่า  $Bi$  และ  $R$  มีพื้นฐานทางทฤษฎีที่ต่างกัน และไม่อาจนำมาสัมพันธ์กันได้โดยตรง

## 2.1 การผสมในเฟสของแข็ง

เนื่องจากเครื่องสกัดที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องสกัดชนิดสกรูเดี่ยว ซึ่งของแข็งจะถูกจำกัดอยู่ในช่องว่างระหว่างใบสกรู ไม่สามารถกระจายตัวออกในแนวแกนได้ นั่นคือ เราสามารถคาดการณ์ได้ว่า การผสมที่เกิดขึ้นในเฟสของแข็ง จะเป็นการผสมแบบปลั๊ก นั่นคือค่า  $Da = 0$  ทำให้  $P \rightarrow \infty$

## 2.2 การผสมในเฟสของเหลว

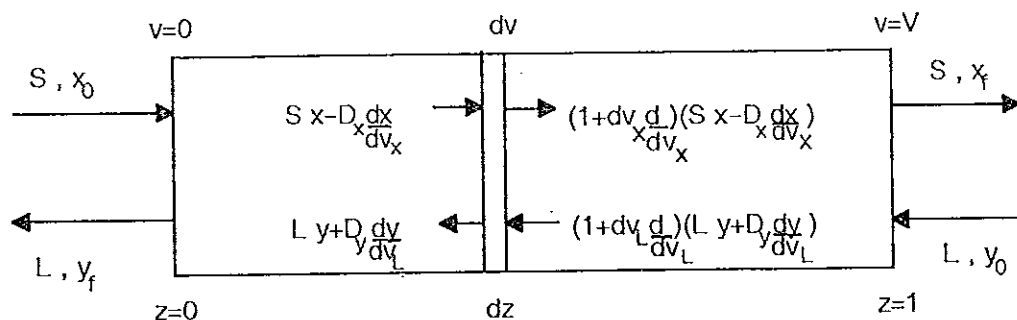
ในกระบวนการสกัดจริง เราต้องการลดความหนาของแผ่นฟิล์มที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง โดยการทำให้ของเหลวที่บริเวณผิวหน้าของของแข็งเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าของของแข็งเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ( $k$  และ  $Bi$  มีค่ามาก) แต่การหมุนเวียนของเฟสของเหลวได้ดี เท่ากับว่ามีการผสมย้อนกลับมากขึ้น ( $R$  มีค่าน้อย) ซึ่งจะมีผลทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของตัวละลายภายในและภายนอกเฟสของแข็งลดลง นั่นคือ driving force ต่ำ แสดงว่าการทำให้เกิดการผสมย้อนกลับจะไปทำลาย driving force

การผสมที่เกิดขึ้นในเฟสของเหลวภายในเครื่องสกัดจะมีการผสมย้อนกลับเกิดขึ้นอย่างแน่นอน นั่นคือจำนวนเพคเลท มีค่าจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง

## 3. แบบจำลองการผสมย้อนกลับเชิงปริมาตร (volumetric backmixing model)

เนื่องจากแบบจำลองการผสมย้อนกลับที่พัฒนาขึ้นโดย Mecklenberg และ Hartland (1975) ได้ตั้งสมมติฐานว่า ความเร็วของเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่ไหลผ่านเครื่องสกัดมีค่าคงที่ แต่เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับที่เราได้พัฒนาขึ้นมา กำหนดให้วางท่ามุมเอียงกับพื้นราบ นั่นคือ ความเร็วของเฟสของแข็งและเฟสของเหลวแต่ละจุดในเครื่องสกัดไม่คงที่ Siripatana (1986) ได้เสนอแบบจำลองการผสมย้อนกลับโดยมีสมมติฐานให้อัตราเร็วเชิงปริมาตรของเฟสของแข็งและเฟสของเหลวมีค่าคงที่ตลอดรางสกัด ซึ่งมีความสอดคล้องและสามารถนำไปใช้อธิบายกลไกในการสกัด สำหรับเครื่องสกัดที่เราได้พัฒนาขึ้นมาได้ สมมติฐานอื่น ๆ สำหรับแบบจำลองการผสมย้อนกลับเชิงปริมาตรมีดังนี้

1. การไหลในเฟสของแข็งเป็นแบบปลັก
2. ดริฟเฟอที่ตลอดรางสกัด
3. สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลคงที่ตลอดรางสกัด
4. สัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็งคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา และความเข้มข้น
5. อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลวคงที่ ตลอดรางสกัด
6. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_x$ ) คงที่ตลอดรางสกัด
7. จำนวนเพคเลทคงที่ตลอดรางสกัด



ภาพประกอบ 2.3 การไหลของเฟสของแข็งและของเหลวในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

พิจารณาตุลุมวลรอบปริมาตร  $dv$

เฟสของแข็ง

$$\text{ปริมาณตัวละลายเข้า} = S(x - \frac{D_x dx}{S dv_x})$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณตัวละลายออก} &= S(x - \frac{D_x dx}{S dv_x}) + [\frac{d}{dv_x} S(x - \frac{D_x dx}{S dv_x})] dv_x + K_x dv_x (x - x^*) \\ &= S(x - \frac{D_x dx}{S dv_x}) + S dv_x \frac{d}{dv_x} (x - \frac{D_x dx}{S dv_x}) + K_x dv_x (x - x^*) \\ &= S(1 + dv_x \frac{d}{dv_x}) (x - \frac{D_x dx}{S dv_x}) + K_x dv_x (x - x^*) \end{aligned}$$

ปริมาณตัวละลายสะสม ในปริมาตร  $dv$  เท่ากับ ศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} S(x - \frac{D_x dx}{S dv_x}) - S(1 + dv_x \frac{d}{dv_x}) (x - \frac{D_x dx}{S dv_x}) - K_x dv_x (x - x^*) &= 0 \\ S(x - \frac{D_x dx}{S dv_x}) - S(x - \frac{D_x dx}{S dv_x}) - S dv_x (\frac{dx}{dv_x} - \frac{D_x d^2x}{S dv_x^2}) - K_x dv_x (x - x^*) &= 0 \\ -S dv_x (\frac{dx}{dv_x} - \frac{D_x d^2x}{S dv_x^2}) - K_x dv_x (x - x^*) &= 0 \\ -S (\frac{dx}{dv_x} - \frac{D_x d^2x}{S dv_x^2}) - K_x (x - x^*) &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{กำหนดให้ } z = \frac{v_x}{V_x}$$

$$\text{ดังนั้น } dz = \frac{1}{V_x} dv_x$$

$$\text{จะได้ } -S (\frac{dx}{V_x dz} - \frac{D_x d^2x}{S V_x^2 dz^2}) - K_x (x - x^*) = 0$$

คูณตลอดด้วย  $V_x/S$  จะได้

$$(\frac{dx}{dz} - \frac{D_x d^2x}{S V_x dz^2}) + K_x \frac{V_x}{S} (x - x^*) = 0$$

$$(\frac{dx}{dz} - \frac{1}{P} \frac{d^2x}{dz^2}) + T' (x - x^*) = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{ในที่นี้ } P = \frac{S V_x}{D_x} \quad T' = \frac{K_x V_x}{S} = K_x t_f \quad (2.2)$$

เฟสของเหลว

$$\text{ปริมาณตัวละลายเข้า} = L(1 + dv_L \frac{d}{dv_L})(y + \frac{Dy}{L} \frac{dy}{dv_L}) + K_x dv_L (x - x^*)$$

$$\text{ปริมาณตัวละลายออก} = L(y + \frac{Dy}{L} \frac{dy}{dv_L})$$

ปริมาณตัวละลายสะสม ในปริมาตร  $dv$  เท่ากับ ศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$L(1 + dv_L \frac{d}{dv_L})(y + \frac{Dy}{L} \frac{dy}{dv_L}) + K_x dv_L (x - x^*) - L(y + \frac{Dy}{L} \frac{dy}{dv_L}) = 0$$

$$L(y + \frac{Dy}{L} \frac{dy}{dv_L}) + L(dv_L \frac{dy}{dv_L} + dv_L \frac{Dy}{L} \frac{d^2y}{dv_L^2}) + K_x dv_L (x - x^*) - L(y + \frac{Dy}{L} \frac{dy}{dv_L}) = 0$$

$$Ldv_L (\frac{dy}{dv_L} + \frac{Dy}{L} \frac{d^2y}{dv_L^2}) + K_x dv_L (x - x^*) = 0$$

$$L(\frac{dy}{dv_L} + \frac{Dy}{L} \frac{d^2y}{dv_L^2}) + K_x (x - x^*) = 0$$

ในการทำงานเดียวกัน  $z = \frac{v_L}{V_L}$

ดังนั้น  $dz = \frac{1}{V_L} dv_L$

จะได้  $L(\frac{dy}{V_L dz} + \frac{Dy}{L} \frac{d^2y}{V_L^2 dz^2}) + K_x (x - x^*) = 0$

คูณด้วย  $V_L/L$  ตลอด จะได้

$$(\frac{dy}{dz} + \frac{Dy}{L} \frac{d^2y}{V_L dz^2}) + K_x \frac{V_L}{L} (x - x^*) = 0$$

$$(\frac{dy}{dz} + \frac{1}{R} \frac{d^2y}{dz^2}) + T' (x - x^*) = 0 \quad (2.3)$$

ในที่นี้  $R = \frac{LV_L}{Dy} \quad T' = K_x \frac{V_L}{L} = K_x t_f \quad (2.4)$

เมื่อ

$S$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

$L$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลว (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

$V$  คือ ปริมาตรของเครื่องสกัด

$K_x$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (วินาที<sup>-1</sup>)

$t_f$  คือ เวลาเทียบเท่าของการสกัด (วินาที)

$x$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง

(กิโกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$x^*$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่สถานะคงตัว

(กิโกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$y$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง

(กิโกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$v_x$  คือ ปริมาตรของเฟสของแข็ง

$v_L$  คือ ปริมาตรของเฟสของเหลว

$$z = v_x N_x = v_L N_L$$

$T'$  คือค่าพารามิเตอร์สำหรับการสกัด (ไม่มีหน่วย) =  $K_x t_f$

ในกรณีเฟสของแข็ง สมมติ ให้การไหลของเฟสของแข็งผ่านเครื่องสกัดเป็นแบบปลັก ผลเฉลยของสมการ (2.1) และ (2.3) ซึ่งเสนอโดย Mecklenberg และ Hartland (1975) ดังต่อไปนี้

กรณีที่  $J \neq 1$  กำหนดให้  $J = \frac{1}{\alpha}$

จะได้

$$\frac{x_0 - x}{x_0 - \frac{y_0}{m}} = \frac{(1-w_1)H_1/Q_1 - (1-w_2)H_2/Q_2}{(1-JW_1)H_1/Q_1 - (1-JW_2)H_2/Q_2} \quad (2.5)$$

หรือ

$$\left(\frac{y-y_0}{mx_0-y_0}\right)\alpha = \frac{(w_1-H_1W_1)/Q_1 - (w_2-H_2W_2)/Q_2}{(1-JW_1)H_1/Q_1 - (1-JW_2)H_2/Q_2} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $Q_1$  และ  $Q_2$  คือ รากของสมการ

$$Q^2 + Q(T' + R) = T'R \frac{(1-\alpha)}{\alpha}$$

$$H_1 = 1 + Q_1/R \quad H_2 = 1 + Q_2/R$$

$$w_1 = \exp(Q_1 Z) \quad w_2 = \exp(Q_2 Z)$$

$$W_1 = \exp(Q_1) \quad W_2 = \exp(Q_2 Z)$$

$$T' = K_x t_f$$

$t_f$  คือเวลาเทียบเท่าของสกัด (equivalent extraction time) ซึ่งเป็นค่าที่นำเอาเวลาที่ใช้ในการสกัดจริงมาลบกับเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ( $t_p$ ) และบวกกับ time lead ( $t_l$ )

กรณีที่  $J = \frac{1}{\alpha} = 1$  จะได้ผลเฉลยดังนี้

$$\frac{x_0 - x}{x_0 - \frac{y_0}{m}} = \frac{(1-w_3)H_3/Q_3 + Z}{(1-W_3H_3)/Q_3 + 1 + 2/R + 1/T'} \quad (2.7)$$

$$\frac{y-y_0}{mx_0-y_0} = \frac{(w_3-H_3W_3)/Q_3 + 1 - Z + 1/R}{(1-W_3H_3)/Q_3 + 1 + 2/R + 1/T'} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $Q_3 = -(R + T')$

$$H_3 = 1 + Q_3/R$$

$$w_3 = \exp(Q_3 Z)$$

$$W_3 = \exp(Q_3)$$

จะเห็นว่าสมการ (2.5) และ (2.6) เป็นผลเฉลยสำหรับการสกัดในกรณีที่สมมติให้การไหลของเฟสของแข็งผ่านเครื่องสกัดเป็นแบบปลັก ( $P \rightarrow \infty$ ) ส่วนในเฟสของเหลวมีการผสมย้อนกลับเกิดขึ้นนั่นคือ จำนวนเพศเลขในเฟสของเหลวมีค่าจำกัดค่าหนึ่ง ซึ่งจะเห็นว่าค่า  $R$  ปรากฏอยู่ในสมการ (2.5) และ (2.6) นอกจากนี้ สมการ (2.5) และ (2.6) เป็นสมการที่อยู่บนพื้นฐานของ

ทฤษฎีการผสมย้อนกลับ (backmixing theory) ซึ่งไม่มีค่า  $Bi$  และ  $D_s$  ปรากฏอยู่ เนื่องจากค่าเหล่านี้มาจากทฤษฎีการแพร่ (diffusion theory) ซึ่งจะนำมาเกี่ยวโยงต่อไป

#### 4. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมตามทฤษฎีการแพร่

และแบบจำลอง Diffusion - Backmixing

จากการวิเคราะห์ผลเฉลยของทฤษฎีการแพร่ ในภาคผนวก ก.4 มีความสัมพันธ์กับค่า  $K_x$  ดังนี้

กรณีแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$K_x = sFD_s \left[ \frac{1}{1 + \frac{2.24}{Bi^{1.02}}} \right] \left( \frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2} \right) \quad (2.9)$$

เมื่อนำค่า  $K_x$  ที่หาได้มาแทนค่าในสมการ  $T' = K_x t_f$  แล้วนำค่า  $T'$  มาแทนในสมการ (2.5) และ (2.6) เท่ากับว่าเป็นการรวมทฤษฎีการแพร่และ ทฤษฎีการผสมย้อนกลับเข้าด้วยกัน จึงเรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลอง Diffusion - Backmixing

สมการ (2.9) สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่า  $Bi$  ถ้าเราทราบค่า  $K_x$  นั่นคือ

$$Bi = \left[ \frac{2.24}{\left( \frac{sFD_s}{K_x} \left[ \frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2} \right] - 1 \right)} \right]^{1/1.02} \quad (2.10)$$

ผลเฉลยสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีการแพร่ ซึ่งเสนอโดย Schwartzberg (1980) สมมติให้การไหลของเฟสของแข็งและเฟสของเหลวผ่านเครื่องสกัดเป็นแบบปลັก ( $P \rightarrow \infty, R \rightarrow \infty$ ) และกำหนดให้  $Bi \rightarrow \infty, \alpha > 1$  ดังสมการ (1.7)

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-q_n^2 \tau)$$

ค่า  $C_n$  และ  $q_n$  หาได้จากตาราง 1.2

จะเห็นว่าสมการดังกล่าวนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในการหาผลเฉลยสำหรับการสกัดของเราได้ เพราะผลเฉลยนี้ไม่ได้ใช้สำหรับกรณีที่มีการผสมย้อนกลับเกิดขึ้น

ต่อมา Lee และ Schwartzberg (1990) ได้เสนอค่า  $C_n$  และ  $q_n$  ที่มีเทอมของ  $Bi$  และ  $R$  รวมอยู่ด้วย สำหรับกรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด แต่จากการตรวจสอบแล้วพบว่า ค่า  $C_n$  ที่เขาได้เสนอนี้ ไม่ถูกต้อง (รายละเอียดในวิธีการหาค่า time lead) จึงเลี่ยงไปใช้ผลเฉลยจากสมการ (2.5) และ (2.6) แทน

ถ้าการกระจายความเข้มข้น (concentration distribution) ในของแข็งสม่ำเสมอ (uniform) ความเข้มข้นในเฟสของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการสกัด จากนั้นจึงลดลงอย่างเอกโปเนนเชียล (exponential)

## 5. แนวคิดเกี่ยวกับค่า time lead และ time lag

### 5.1 นิยาม time lead

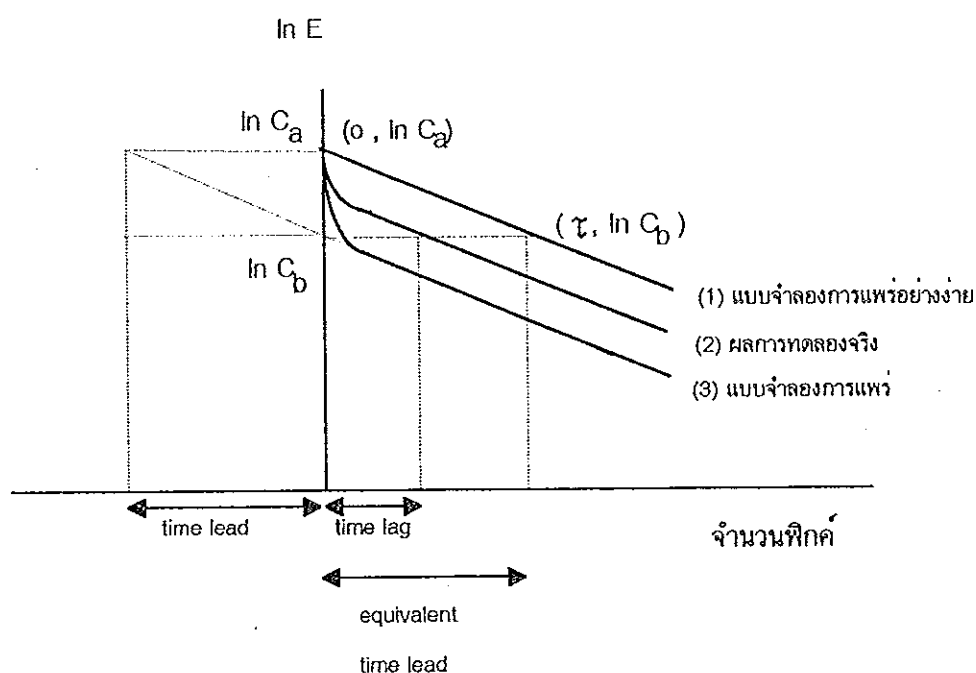
time lead คือเวลาเสมือนว่าการสกัดได้เกิดขึ้นล่วงหน้ามาแล้ว และมีผลทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งลดลง มากกว่าความเข้มข้นที่ทำนายโดยแบบจำลองมาตรฐาน (แบบจำลองแบบปลั๊ก) ซึ่งเป็นแบบจำลองการแพร่อย่างง่าย (diffusion simplified model)

### 5.2 นิยาม time lag

time lag คือเวลาล่าช้าในการแพร่ของตัวละลายในเฟสของแข็ง เสมือนว่าการสกัดยังไม่เกิดขึ้น เพราะตัวละลายไม่สามารถเกิดการแพร่ผ่านเนื้อเยื่อออกมาได้

สมการการแพร่อย่างง่าย สำหรับอธิบายกลไกการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง ซึ่งกำหนดให้  $C_1 = 1$  และ ไม่คิดสภาวะเริ่มต้น (initial condition) ดังนี้

$$E = C_1 \exp(-q_1^2 \tau)$$

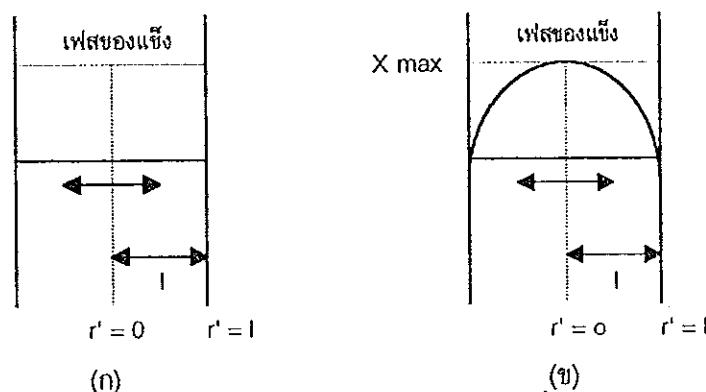


ภาพประกอบ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ  $\tau$  แสดง time lead และ time lag

ปัจจัยที่มีผลต่อ time lead

time lead เกิดจากสภาวะเริ่มต้น (initial condition) ของแบบจำลองการสกัด และผลของการชะล้างที่ผิวหน้า (surface washing) ดังนี้

1. ผลของการกระจายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเมื่อเริ่มต้นสกัด



ภาพประกอบ 2.5 รูปแบบการแพร่ของตัวละลายในเฟสของแข็ง

พิจารณาภาพประกอบ 2.5 (ก) แบบจำลองการแพร่ ได้มีการกำหนดสภาวะขอบเขตของการสกัดไว้ดังนี้

$$x = x_0 \text{ สำหรับ } 0 < r' < 1 \text{ ที่ } t = 0$$

หมายถึง ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่จุดใด ๆ จะเท่ากับทุกจุด

เมื่อเฟสของแข็งสัมผัสกับเฟสของเหลวตัวละลายในเฟสของแข็งจะเกิดการแพร่จากผิวหน้าเฟสของแข็งไปสู่เฟสของเหลวซึ่งอยู่ภายนอก ตัวละลายซึ่งอยู่ลึกเข้าไปจากผิวหน้าเฟสของแข็งจะแพร่เข้ามาแทนที่ เมื่อเวลาผ่านไปก็จะได้โปรไฟล์ของตัวละลายที่จุดต่างในเฟสของแข็งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 2.5 (ข) ซึ่งมีรูปแบบเป็นพาราโบลา นั่นคือโปรไฟล์ของความเข้มข้นในเฟสของเหลวเข้าสู่รูปที่เกิดการแพร่แบบกึ่งคงตัว (pseudo steady state) การแพร่จะเป็นไปในลักษณะที่ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งลดลงอย่างเอกโปเนนเชียล (exponential)

สำหรับในกระบวนการสกัดที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ ดังนั้น ในช่วงแรกของการสกัด ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้มี time lead เกิดขึ้น



## 2. ผลของการชะล้างที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง (surface washing effect)

การชะล้างของตัวละลายจากผิวหน้าเฟสของแข็งไปสู่เฟสของเหลว จะส่งผลเช่นเดียวกับผลของการกระจายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง เมื่อเริ่มต้นสกัด กล่าวคือ ทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งลดลงอย่างรวดเร็วกว่าผลที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลองการแพร่อย่างง่าย

โดยปกติเมื่อเนื้อเยื่อของผลไม้ถูกตัด ทำให้เซลล์เกิดการแตกตัว จะมีตัวละลายบางส่วนที่แพร่ผ่านจากในเซลล์ออกมาสู่ผิวหน้าของของแข็ง ของเหลวบริเวณผิวหน้าถูกชะล้างได้ง่าย เป็นผลให้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิด time lead ขึ้น

### ปัจจัยที่มีผลต่อ time lag

ดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่า ตัวละลายจะไม่สามารถแพร่ออกจากเซลล์ได้ถ้าเซลล์นั้นยังไม่แตก สำหรับกระบวนการสกัด การแพร่ของตัวละลายจากในเซลล์ไปสู่ตัวทำละลายภายนอกได้ ก็ต้องรอให้เซลล์แตกก่อนเช่นเดียวกัน ซึ่งการทำให้เซลล์แตกอาจทำได้โดยวิธีทางเชิงกล เช่นการบีบอัดหรืออาจใช้ความร้อนในการลวกเพื่อให้เซลล์แตกออก เราเรียกเวลาที่รอให้เซลล์แตกออก เพื่อให้ตัวละลายสามารถแพร่ออกมาสู่ตัวทำละลายได้ ว่า เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (time delay due to plasmolysis) ( $t_p$ ) ดังนั้นถ้าการล่าช้าในการแพร่เกิดจากพลาสมอลิซิสเพียงอย่างเดียว time lag จะมีค่าเท่ากับ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส นั่นเอง

ในสภาวะที่เกิดการสกัดจริง พบว่า ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง จะเป็นไปตามสภาวะเริ่มต้น และที่ผิวหน้าของแข็งจะมีตัวละลายเคลือบอยู่ ดังนั้นจะมี time lead อย่างแน่นอน และของแข็งเป็นเปลือกสับประรดสด ดังนั้นในระหว่างการสกัดจะมีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสเข้ามาเกี่ยวข้อง

## 6. ผลของการกระจายความเข้มข้นต่อ time lead ตามทฤษฎีต่าง ๆ

### 6.1 time lead และ time lag ตามทฤษฎีการแพร่

แบบจำลองการแพร่ เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายกลไกในการสกัดแบบไหลสวนทาง ซึ่งอาศัยทฤษฎีการแพร่ ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัด แต่เป็นแบบจำลองที่สมมติให้ การกระจายตัวของความเข้มข้นของเฟสของแข็งมีความสม่ำเสมอ (ความเข้มข้น

ของตัวละลายในเฟสของแข็งเท่ากันทุกจุด) ดังนั้นจะเกิดการแพร่ขึ้นทันทีที่ของแข็งสัมผัสกับตัวทำละลาย นั่นคือความเข้มข้นภายในเฟสของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้นการสกัด แสดงว่า แบบจำลองนี้กำหนดให้มี time lead แต่ไม่มี  $t_p$  และถ้านำแบบจำลองนี้มาใช้ในการทำนายกับสถานะในการสกัดจริง จะพบว่าแบบจำลองนี้ให้ผลการทำนายค่า  $E$  (สัดส่วนที่เหลืออยู่ของตัวละลายในเฟสของแข็ง) ที่ต่ำจากความเป็นจริง เป็นเพราะไม่ได้หักเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ออกไป

แบบจำลองการแพร่อย่างง่าย (simplify model) เป็นแบบจำลองที่กำหนดให้  $c_1 = 1$  จึงไม่มีทั้ง time lead และ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ทำให้ความเข้มข้นในเฟสของแข็งลดลงอย่างเอกโปเนนเชียลตั้งแต่เริ่มต้นการสกัด ถ้านำแบบจำลองนี้มาใช้ในการทำนายการสกัดที่เกิดขึ้นจริง จะพบว่า แบบจำลองนี้ให้ผลการทำนายค่า  $E$  สูงกว่าการทำนายโดยใช้แบบจำลองการแพร่

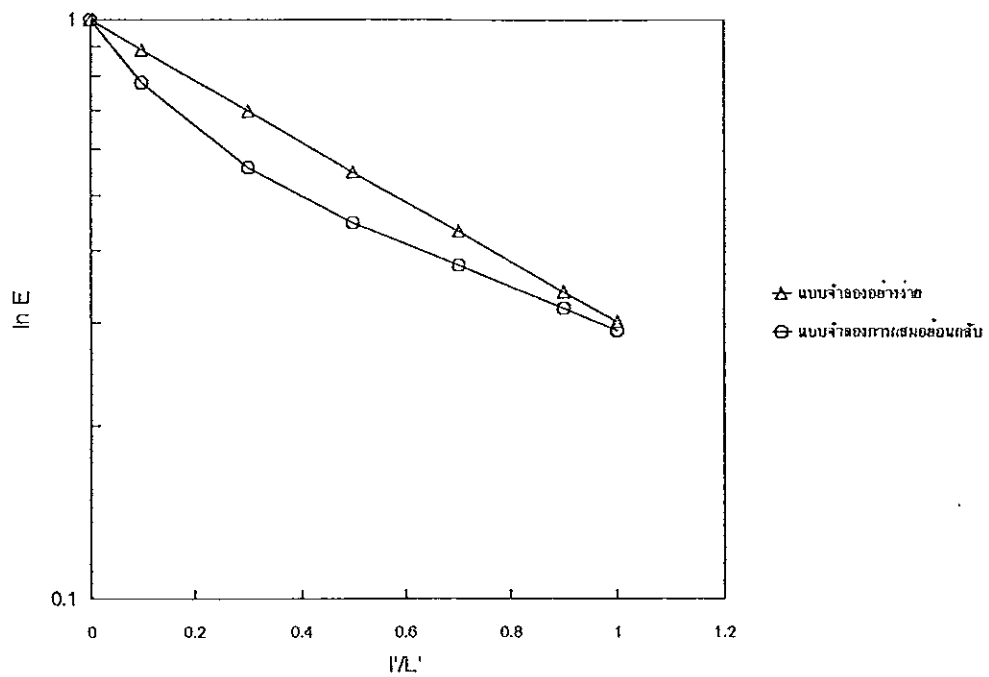
## 6.2 time lead และ time lag ตามแบบจำลองการผสมย้อนกลับ และแบบจำลอง

### Diffusion - Backmixing

แบบจำลองการผสมย้อนกลับ เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายกลไกการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่องย้อนกลับ จะเหมือนกับแบบจำลองการแพร่อย่างง่าย คือ เป็นแบบจำลองที่กำหนดให้  $c_1 = 1$  นั่นคือไม่มีทั้ง time lead และ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส แต่มีความแตกต่างจากแบบจำลองการแพร่อย่างง่ายคือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งไม่ได้ลดลงอย่างเอกโปเนนเชียล ตั้งแต่เริ่มต้นการสกัด เหมือนดังเช่นแบบจำลองการแพร่อย่างง่าย เพราะแบบจำลองการผสมย้อนกลับ นำเอาผลของการผสมย้อนกลับ [(จำนวนเพลต (R))] มาคิด จึงทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งลดลงดังในภาพประกอบ 2.6

แบบจำลอง Diffusion - Backmixing เป็นแบบจำลองที่คล้ายกับแบบจำลองการผสมย้อนกลับ คือ ไม่มีทั้งค่า time lead และ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส แบบจำลองนี้เกิดขึ้นจากการโยงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองการแพร่อย่างง่ายเข้ากับ แบบจำลองการผสมย้อนกลับโดยใช้ค่า  $K_x$  ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น

ในสถานะการทดลองจริง ค่า time lead และ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส อาจจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ดังนั้นการแยกหาค่า time lead และ  $t_p$  แล้วนำมาหักลบกับเวลาในการสกัดที่กำหนดไว้ในกรณีการทดลองจะทำให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ เวลาในการสกัดไร้มิติ ( $t'/L'$ ) ซึ่งได้จาก ผลการจำลองสถานการณ์ สำหรับ  $K_x = 0.001$  วินาที<sup>-1</sup> ทราย 1.5 อุนทงมี 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที)

วิธีการอีกวิธีหนึ่งที่มีการรวมเอาผลของ time lead และ  $t_p$  ไว้ด้วยกัน แล้วนำมาใช้ใน แบบจำลองการผสมย้อนกลับ คือการกำหนดค่าตัวแปรขึ้นมาใหม่อีกตัวหนึ่ง เรียกตัวแปรนี้ว่า  $j$ -factor สำหรับแนวคิดเกี่ยวกับ  $j$ -factor จะกล่าวในลำดับต่อไป

## 7. วิธีการหาค่า time lead

### 7.1 การหาค่า time lead สำหรับแผ่นแบบราบยาวไม่จำกัด

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ  $\tau$  ที่ได้จากการทดลอง และการทำนายโดยใช้แบบจำลองการแพร่ และ แบบจำลองที่มีการไหลแบบปลั๊กอย่างง่าย ในภาพประกอบ 2.4

จากสมการ  $E = c_1 \exp(-q_1^2 \tau)$   
 กรณีที่  $c_1 = 1$  (แบบจำลองอย่างง่าย) จะได้เส้นกราฟเส้นที่ 1 มีสมการดังนี้

$$\ln E_1 = \ln c_a - q_1^2 \tau \quad (2.11)$$

กรณีที่  $c_1 \neq 1$  (แบบจำลองการแพร่) จะได้เส้นกราฟเส้นที่ 3 มีสมการดังนี้

$$\ln E_2 = \ln c_b - q_1^2 \tau \quad (2.12)$$

จากกราฟ จะได้ ความชัน =  $\frac{\ln C_a - \ln C_b}{0 - \tau}$

เมื่อ  $c_a = 1$  แทนค่า จะได้

$$\begin{aligned} -q_1^2 &= \frac{0 - \ln C_b}{0 - \tau} \\ \tau &= \frac{\ln C_b}{-q_1^2} = \frac{\ln C_1}{-q_1^2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Lee และ Schwartzberg (1990) ได้เสนอผลเฉลยสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง กรณีที่การไหลในเฟสของแข็งเป็นแบบปลั๊ก ( $P \rightarrow \infty$ ) แต่เฟสของเหลวมีการผสมย้อนกลับ ( $R$  มีค่าจำกัด) และ  $Bi$  มีค่าจำกัด ดังนี้

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \exp(-q_n^2 \tau)$$

ถ้า  $\tau > 0.1$  เทอมอื่น ๆ นอกเหนือจากเทอมแรกมีค่าน้อยมาก จึงคิดเฉพาะเทอมแรก จะได้

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} c_1 \exp(-q_1^2 \tau) \quad (2.14)$$

สำหรับ แผ่นแบบราบยาวไม่จำกัด สามารถหาค่า  $q_1$  ได้จาก

$$\frac{\tan(q_1)}{q_1} = \alpha Bi Pi / [Bi + \alpha Pi q_1^2] \quad , \text{ เมื่อ } \alpha > 1 \quad (2.15)$$

โดยที่  $Bi$  คือ จำนวนไบออก

$\alpha$  คือ ดริ์ฟ

$$Pi = (1 - Gq_1^2)$$

$$G = \frac{\tau}{R}$$

$\tau$  คือ จำนวนพิงค์

$R$  คือ จำนวนเพศเลขของเฟสของเหลว

และหาค่า  $c_1$  ได้จาก

$$c_1 = \frac{2s\alpha(\alpha-1)Bi^2Pi^2}{\alpha^2q_n^2Pi^2[Bi^2+(2-s)Bi+q_n^2]+s(s+2)Bi^2Gq_n^2+2s\alpha Biq_n^2Pi} \quad (2.16)$$

จะเห็นว่า  $c_1$  เป็นฟังก์ชันกับ  $\alpha, Bi$  และ  $R$  ซึ่งในกรณีนี้  $c_1$  ได้รับผลกระทบจากการเกิดการผสมย้อนกลับ (ตัวแปรที่บ่งชี้ถึงระดับของการผสมย้อนกลับ คือ  $R$ ) และ  $c_1 \neq 1$

สมการ (2.16) จัดได้ว่าเป็นสมการที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ใช้ได้ตั้งแต่  $Bi=0$  จนถึง  $Bi \rightarrow \infty$  และ  $R=0$  จนถึง  $R \rightarrow \infty$  ดังนั้นค่า  $c_1$  ในสมการนี้จึงใช้ได้ในการไหลเป็นแบบปลึก จนถึง กรณีที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์

สมมติให้การไหลในเฟสของเหลวเป็นแบบปลึก ( $R \rightarrow \infty$ ) และไม่คิดความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอก ( $Bi \rightarrow \infty$ ) สามารถเขียนสมการ (2.16) ใหม่ได้ดังนี้

$$c_1 = \frac{2\alpha}{\frac{\alpha^2q_1^2}{(\alpha-1)}} \quad (2.17)$$

Siripatana (1986) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\hat{c}_1$  กับ  $q_1^2$  (สมการ 1.24 ถึง 1.29) สำหรับแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด ในกรณีการไหลเป็นแบบปลึก และไม่คิดความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอก ดังนี้

$$c_1 \cong \hat{c}_1 = \frac{2\alpha}{\left(\frac{\alpha^2q_1^2}{(\alpha-1)} - 1\right)} \quad (2.18)$$

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสมการ (2.17) กับ (2.18) จะเห็นว่าสมการ (2.17) ซึ่งพัฒนาโดย Lee และ Schwartzberg (1990) นั้น ค่าแฟกเตอร์รูปทรง ( $s=1$ ) หายไป

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการในการหาค่า  $c_1$  โดยการหาค่า  $c_1$  เมื่อกำหนดให้  $Bi \rightarrow \infty$  สำหรับแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัดนั้น ควรจะเป็นสมการ (2.18) ที่มีความถูกต้อง จึงอาจกล่าวได้ว่า สมการ (2.17) ของ Lee และ Schwartzberg (1990) ไม่ถูกต้อง

สมการ (2.18) เมื่อแทนค่า  $q_1^2 = (2.46618\alpha + 0.5245)\frac{(\alpha-1)}{\alpha^2}$  จะได้

$$\hat{c}_1 = \frac{2\alpha}{(2.46618\alpha - 0.5245)} \quad (2.19)$$

ส่วนสมการ (2.15) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการหาค่า  $q_n$  ที่เสนอโดย Lee และ Schwartzberg (1990) ถ้าสมมติให้การไหลในเฟสของเหลวเป็นแบบปลึก ( $R \rightarrow \infty$ ) และกำหนดให้  $Bi \rightarrow \infty$  จะสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\tan(q_n)}{q_n} = \alpha \quad (2.20)$$

จะเห็นว่าสมการ (2.20) เป็นสมการเดียวกับสมการที่ อ้างโดย Schwartzberg(1980) ดังตาราง 1.1 และ Siripatana (1986) ดังตาราง 1.2 ทำให้สมการนี้มีความน่าเชื่อถือ และน่าจะเป็นสมการที่ถูกต้อง

ดังนั้นในการพัฒนาแบบจำลอง Diffusion-Backmixing เป็นที่น่าเสียดายที่เราไม่สามารถนำสมการ (2.16) มาใช้ในการคำนวณหาค่า  $c_1$  ได้ จึงจำเป็นต้องสมมติว่า ค่า  $c_1$  ไม่ได้รับผลกระทบจากการผสมย้อนกลับมากนัก (ไม่คิดค่าจำนวนเพศเลข) ดังนั้นในส่วนของการหาค่า time lead กรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัดเราจึงหาค่า  $c_1$  จากสมการ (2.19) และ หาค่า  $q_n$  จากสมการ (2.15)

ค่า  $c_1$  ในสมการ (2.19) ใช้ในกรณีที่  $Bi \rightarrow \infty$  ดังนั้นในการคำนวณหาค่า time lead สำหรับกรณีที่  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง ค่า  $c_1$  ที่คำนวณได้ จะต้องนำไปแทนค่าในสมการ (1.32) เพื่อปรับค่า  $c_1$  ให้ถูกต้องก่อนนำไปใช้ในการหาค่า time lead ต่อไป

$$\begin{aligned} \text{กรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด} \quad \tau &= \frac{D_{st}}{l^2} \text{ เมื่อเทียบกับ สมการ (2.13) จะได้} \\ \text{time lead (t}_p\text{)} &= -\frac{\ln C_1 (l^2)}{q_1^2 D_s} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ค่า time lead ที่ได้จากสมการ (2.21) สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาเวลาเทียบเท่าของการสกัด (equivalent extraction time) ได้ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

## 7.2 การหาค่า time lead สำหรับแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular slab)

ในกรณีแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการถ่ายโอนมวลทั้ง 3 ทิศทาง

$$\begin{aligned} E &= [c_{11} \exp(-q_1^2 \tau_1)] [c_{12} \exp(-q_1^2 \tau_2)] [c_{13} \exp(-q_1^2 \tau_3)] \\ \text{กำหนดให้ } c_1 &= c_{11} = c_{12} = c_{13} \text{ จะได้} \\ E &= c_1^3 \exp(-q_1^2 [\tau_1 + \tau_2 + \tau_3]) \\ &= c_1^3 \exp(-q_1^2 [\frac{D_{st}}{l_1^2} + \frac{D_{st}}{l_2^2} + \frac{D_{st}}{l_3^2}]) \\ E &= c_1^3 \exp(-q_1^2 D_{st} (\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2})) \end{aligned} \quad (2.22)$$

ในทำนองเดียวกับกรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด สมการ (2.13) จะได้ค่า  $\tau$  สำหรับการหาค่า time lead ในกรณี แผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนี้

$$\begin{aligned} \tau &= -\frac{\ln c_1^3}{q_1^2} \\ \text{ในที่นี้} \quad \tau &= D_{st} [\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}] \\ \text{จะได้} \quad \text{time lead (t}_p\text{)} &= -\frac{\ln c_1^3}{q_1^2 D_s [\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}]} \end{aligned} \quad (2.23)$$

กรณีที่คิดความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอก ( $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง) จะต้องหาค่า  $c_1$  จากสมการ (1.32) จากนั้นจึงแทนค่าหา time lead จากสมการ (2.23)

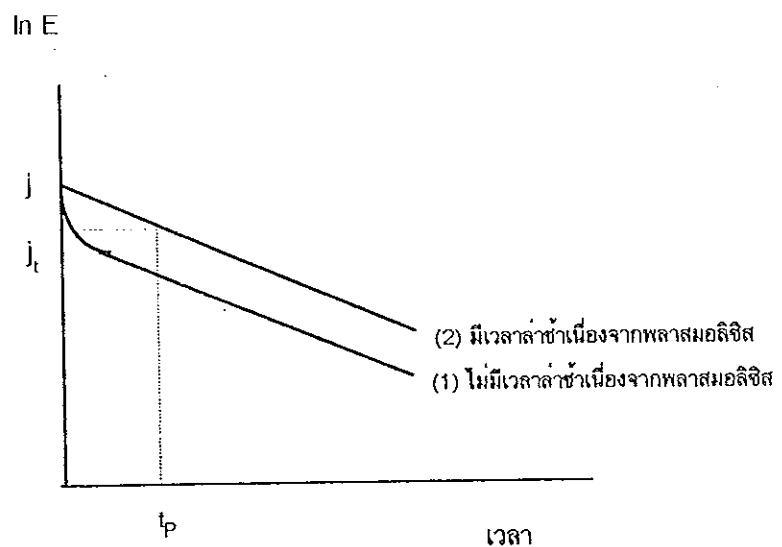
### 8. การหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (time delay due to plasmolysis) ( $t_p$ )

เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ( $t_p$ ) เป็นเวลาที่รอให้เซลล์แตกออก เพื่อปล่อยให้ตัวละลายซึ่งอยู่ในเซลล์แพร่ผ่านเซลล์ออกมาสู่ตัวทำละลายซึ่งอยู่นอกได้ เดิมที  $t_p$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดอย่างมาก

Siripatana (1986) ได้อธิบายวิธีการหาค่า  $t_p$  ไว้ดังนี้ พิจารณาภาพประกอบ 2.7

เส้นกราฟ (1) เป็นเส้นโค้งของการสกัดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการแพร่ จากทฤษฎีการแพร่สมมติให้ การกระจายของความเข้มข้นเฟสของแข็งมีความสม่ำเสมอ (ความเข้มข้นของตัวละลายทุกจุดในเฟสของแข็งเท่ากัน) และไม่คิดว่ามีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส นั่นคือตัวละลายที่อยู่ในเฟสของแข็งจะเกิดการแพร่ทันทีที่ของแข็งสัมผัสกับของเหลว ทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการสกัด (ค่า  $E$  ลดลงอย่างรวดเร็ว)

เส้นกราฟ (2) เป็นเส้นโค้งที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งของแข็งเป็นผลไม้ที่เซลล์ยังไม่แตก จึงมีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสอยู่ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งไม่ได้ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการสกัด



ภาพประกอบ 2.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ  $t$  กรณีที่มี และ ไม่มีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส

ที่มา : Siripatana (1986)

จากภาพประกอบ 2.7 สามารถหาความชันของเส้นโค้งจากการทดลองจริง (เส้นที่ 2) ได้ดังนี้

$$\hat{S} = \frac{\ln j - \ln j_t}{0 - t_p} \quad (2.24)$$

$$t_p = \frac{\ln j_t - \ln j}{\hat{S}}$$

$\ln j$  คือ จุดตัดบนแกน  $y$  ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ เวลาที่ใช้ในการสกัด ( $t$ )

ในกรณีที่เป็นการสกัดแบบไหลสวนทาง และ ช่องแข็งที่มีรูปทรงเป็นแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด จะได้

$$j_t = C_1 = \frac{2\alpha(\alpha+1)}{(\alpha+1)+(\alpha q_1)^2} \quad (2.25)$$

กรณีของแข็งที่มีรูปทรงเป็นแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งการแพร่เกิดขึ้นทั้ง 3 มิติ ( $x, y$  และ  $z$ ) สามารถหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ได้จากสมการ

$$t_p = \frac{\ln C_1^3 - \ln j}{\hat{S}} \quad (2.26)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ดูจากภาคผนวก ก.7

### 9. การหาเวลาเทียบเท่าของการสกัด (equivalent extraction time)

ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่า เวลาที่กำหนดไว้ในการสกัดขณะทดลองยังไม่ใช้เวลาเทียบเท่าของการสกัดเพราะ แบบจำลอง Diffusion - Backmixing จะต้องรวมค่า time lead และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสเข้าไปด้วย ดังนั้นสามารถหาเวลาเทียบเท่าของการสกัดได้จากสมการ

$$t_f = t_a + t_l - t_p \quad (2.27)$$

เมื่อ  $t_a$  คือ เวลาในการสกัดที่กำหนดไว้ในการทดลอง

$t_l$  คือ time lead

$t_p$  คือ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส

$t_f$  คือ เวลาเทียบเท่าของการสกัด

ค่า  $t_f$  ที่ได้มักไปใช้ในการคำนวณหาค่า  $T'$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีอยู่ในแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมา ( $T' = K_x t_f$ ) ซึ่งเมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (2.5) และ (2.6) จะได้ผลการทำนายค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งหลังการสกัดสิ้นสุด ( $x$ ) และความเข้มข้นของตัวละลายที่สกัดได้ในเฟสของเหลว ( $y$ ) ตามลำดับ

ดังนั้นเราจึงได้แบบจำลองที่ใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ในระหว่างการสกัด และเพื่อความสะดวกในการใช้งานจริง



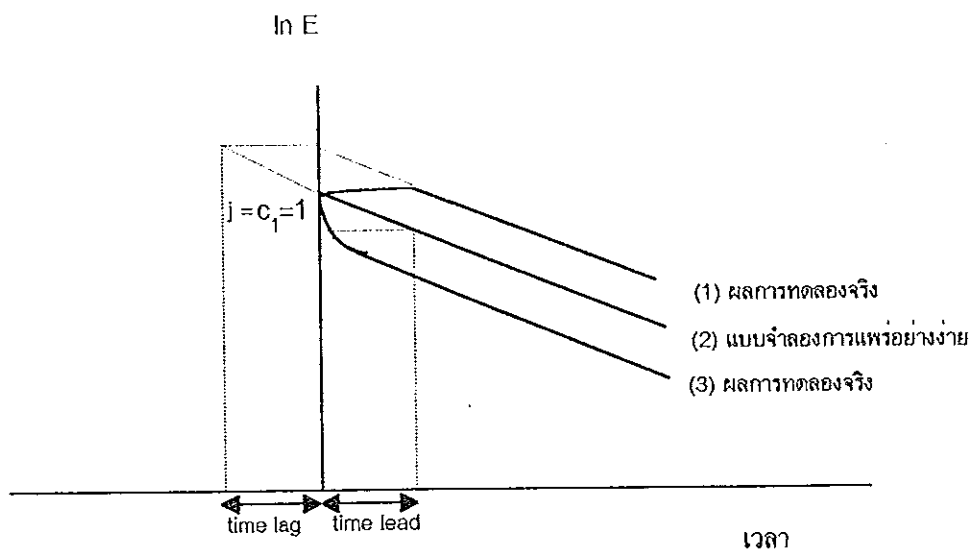
จึงได้เขียนโปรแกรมการคำนวณเป็นภาษาเบสิกสำหรับการทำนาย รายละเอียดของโปรแกรมดัง  
ในภาคผนวก ง.4 โปรแกรมนี้ได้ปรับปรุงจากโปรแกรมของ Siripatana (1986)

#### 10. แนวคิดเกี่ยวกับ j-factor

ค่า j-factor เป็นตัวแปรที่กำหนดขึ้นมาเพื่อใช้แทนค่า  $\hat{c}_1$  เป็นตัวแปรที่รวมเอาผลของ  
time lead และ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลศาสตร์เข้าสู่ไว้ด้วยกัน (ค่า  $\hat{c}_1$  คิดเฉพาะผลของ time  
lead เท่านั้น) แทนที่จะต้องหาค่า time lead และ  $t_p$  แยกกันต่างหากแล้วจึงค่อยนำมารวมกัน จึง  
เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการพัฒนาแบบจำลอง Diffusion - Backmixing

##### 10.1 การหาค่า j-factor

การสกัดตัวละลายเช่น น้ำตาล ออกจากผลไม้ จะต้องให้ความร้อน หรือแรงบีบอัดเพื่อ  
ทำให้เซลล์แตกออกก่อนที่จะเกิดการแพร่จริง อัตราการแพร่สูงสุดเกิดขึ้นหลังจากเซลล์แตกแล้ว เพื่อ  
ความเข้าใจเกี่ยวกับการค่า j-factor ดูในภาพประกอบ 2.8



ภาพประกอบ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับเวลา สำหรับอธิบาย j - factor

ที่มา : Siripatana (1986)

จากภาพประกอบ 2.8 จะเห็นว่า เส้นที่ 1,3 แสดงถึงข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่ง  
จะมีทั้ง ค่า time lead และ time lag ค่าทั้งสองนี้จะหักลบกันเอง

ถ้า  $\text{time lag} > \text{time lead}$  จะได้เส้นกราฟจากการทดลองอยู่เหนือเส้นกราฟที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองการแพร่อย่างง่าย (simplify model) (เส้นที่ 1)

ถ้า  $\text{time lag} < \text{time lead}$  จะได้เส้นกราฟอยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟจากแบบจำลองการแพร่อย่างง่าย (เส้นที่ 3)

เส้นที่ 2 แสดงถึงข้อมูลที่ได้จากการทำนายโดย แบบจำลองการแพร่อย่างง่าย ซึ่งสมมติให้ค่า  $c_1 = j = 1$  นั่นคือ  $\text{time lead}$  และ  $\text{time lag}$  จะหักล้างกันพอดี

กรณีการสกัดแบบไหลสวนทาง แนวความคิดเกี่ยวกับ  $j$ -factor เป็นไปตามสมการ

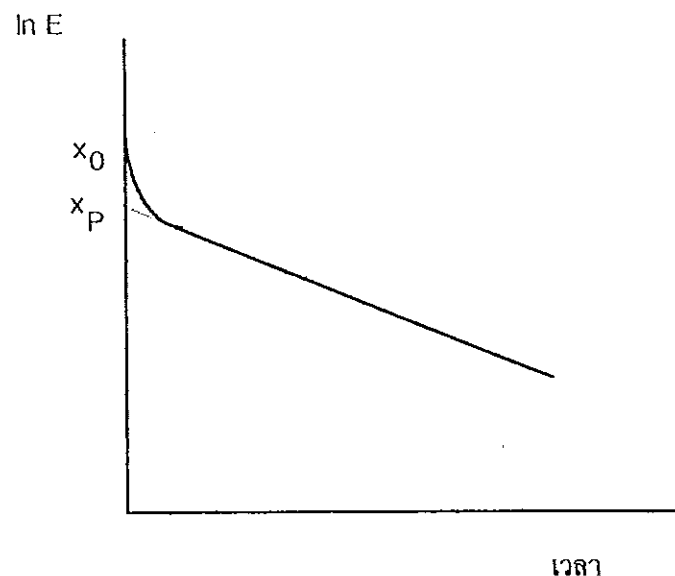
$$\frac{\frac{(\alpha-1)}{\alpha}x_p + \frac{x_f y_0}{\alpha m}}{\frac{(\alpha-1)}{\alpha}x_0 + \frac{x_f y_0}{\alpha m}} = j t \quad (2.28)$$

ถ้า  $t=0$  จะได้  $x_p = x$

เมื่อ  $x$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง

$x_p$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายเริ่มต้นเสมือน (pseudoinitial solute concentration)

กรณีที่  $x_f = 0$  และ  $y_0 = 0$  จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ เวลา ดังนี้



ภาพประกอบ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ เวลา สำหรับอธิบายความเข้มข้นเริ่มต้นเสมือน

ที่มา : Siripatana (1986)

จากภาพประกอบ 2.9 สามารถหาค่า  $x_p$  โดยการลากเส้นกราฟให้ไปตัดแกน  $y$  ตามทฤษฎีการแพร่ ถ้าความเข้มข้นของตัวละลายในช่องแข็งมีค่าเท่ากับทุกจุด ค่า  $j$ -factor ตามทฤษฎีการแพร่ ( $j_t$ ) และ  $t_p = 0$  จะมีค่าดังนี้

$$j_t = c_1 = \frac{2\alpha}{\alpha\hat{F}-s} \quad (2.29)$$

ถ้ามี  $t_p$  แต่ความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกมีค่ามาก ( $Bi \rightarrow 0$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจากผิวหน้าของช่องแข็งไปยังตัวทำละลายมีค่าน้อย เป็นผลให้ค่า  $E$  ลดลงได้ช้ามาก นั่นคือการสกัดเกิดขึ้นได้ไม่ดี จะมีความเข้มข้นของตัวละลายเหลืออยู่ในช่องแข็งเป็นจำนวนมาก และถ้าคิดว่ามี  $t_p$  ด้วย ก็จะทำให้ค่า  $E$  ลดลงช้ากว่าที่เป็นจริงมาก นั่นคือค่า  $j$ -factor  $> 1$  (ภาพประกอบ 2.8 กราฟเส้นที่ 1) ตามทฤษฎีการแพร่เมื่อ  $\alpha > 1$  ค่า  $j$ -factor กรณีทรงกลมจะมีค่าน้อยที่สุดและ  $j$ -factor กรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด จะมีค่าเข้าใกล้ 1

กรณีที่  $t_p$  มีค่าน้อย และ  $Bi \rightarrow \infty$  ( $k$  มีค่ามาก) การถ่ายโอนมวลจากผิวหน้าของช่องแข็งไปยังตัวทำละลายที่อยู่รอบ ๆ เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น  $j < 1$  (ภาพประกอบ 2.8 กราฟเส้นที่ 3)

การหาค่า  $t_p$  หาได้จากการทดลองการสกัดแบบกะ ซึ่งถ้าคิด  $j$ -factor จะได้สมการของการสกัดแบบกะ ดังนี้

$$E = \frac{x-y_0/m}{x_0-y_0/m} = j \exp(\hat{S}t_p) \quad (2.30)$$

ในที่นี้  $\hat{S}$  คือ ความชันของกราฟระหว่าง  $\ln E$  กับ เวลาที่ใช้ในการสกัด ( $t$ )

จากสมการ (2.28), (2.29) และ (2.30) จะได้

$$\begin{aligned} j_t &= \frac{2\alpha}{\alpha\hat{F}-s} = j \exp(\hat{S}t_p) \\ j &= \frac{2\alpha/(\alpha\hat{F}-s)}{\exp(\hat{S}t_p)} \end{aligned} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $j_t$  คือ ค่า  $j$ -factor ตามทฤษฎีการแพร่มีค่าเท่ากับ  $\hat{c}_1$

$j$  คือ ค่า  $j$ -factor ตามแบบจำลองการแพร่อย่างง่าย

$\hat{F}$  คือ ค่าประมาณของ  $F$

## 10.2 ผลเฉลยสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง เมื่อคิด $t_p$

จากสมการ  $E = c_1 \exp(\hat{S}t_p) = c_1 \exp(-q_1^2 \tau_p)$

จากการเทียบสัมประสิทธิ์ จะได้  $\hat{S}t_p = -q_1^2 \tau_p$

แทนค่าในสมการ (2.31) จะได้

$$j = \frac{2\alpha}{(\alpha\hat{F}-s)} \exp(q_1^2 \tau_p) \quad (2.32)$$

$$\text{เมื่อ } \tau_p = \frac{D_{st} t_p}{l^2}$$

จากสมการการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง

$$E = c_1 \exp(-q_1^2 \tau) \quad (2.33)$$

ในที่นี้  $j = c_1$

แทนค่า สมการ (2.32) ลงใน (2.33) จะได้

$$E = \frac{2\alpha}{(\alpha^2 - s)} \exp(q_1^2 \tau_p) \exp(-q_1^2 \tau)$$

$$E = \hat{c}_1 \exp[-q_1^2 (\tau - \tau_p)] \quad (2.34)$$

### 10.3 การพัฒนาแบบจำลอง Diffusion-Backmixing โดยใช้แนวคิด j-factor

กรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด จากสมการ (2.34) จะได้

$$E = \hat{c}_1 \exp[-q_1^2 (\tau - \tau_p)]$$

กรณี แผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีค่า j-factor ( $j_R$ ) เป็นไปตามสมการดังนี้

$$j_R = j^3$$

$$j_R = c_1^3 \exp(q_1^2 D_{st} p [\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}])$$

ค่า  $j_R$  ที่ได้ในกรณีนี้เป็นค่าที่ได้อรวมผลของ time lead และ  $t_p$  เข้าไปด้วย นำค่า  $j_R$  ที่ได้ไปใช้แทนค่า  $c_1^3$  ในสมการ(2.22) จะได้ ค่า E ในกรณีแผ่นแบนราบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนี้

$$E = c_1^3 \exp(q_1^2 D_{st} p [\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}]) \exp(-q_1^2 D_{st} t [\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}])$$

$$E = c_1^3 \exp(-q_1^2 D_s [\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}](t - t_p)) \quad (2.35)$$

สมการ (2.35) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่เวลาต่าง ๆ ในกรณี  $Bi \rightarrow \infty$  และ  $P \rightarrow \infty$  เช่นเดียวกัน แต่กรณีที่  $Bi$  มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง จะต้องการค่า  $c_1$  จากสมการ (1.32)

เนื่องจากแนวคิดเกี่ยวกับ j-factor มีความซับซ้อนและชี้ให้เห็นถึง ค่า time lead และ  $t_p$  ได้ไม่ชัดเจน ในการพัฒนาแบบจำลอง Diffusion-Backing นี้จึงเลือกใช้วิธีการคิดค่า  $t_1$  และ  $t_p$  แยกกัน แล้วจึงนำมาหักลบกับเวลาในการสกัดที่กำหนดไว้ในการทดลอง ( $t_0$ )

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ สามารถพัฒนาได้โดยใช้สมการพื้นฐานของ Lee และ Schwartzberg (1990) ในทำนองเดียวกับแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายในเฟสของแข็งเช่นเดียวกัน แต่ไม่ขอแสดงไว้ในที่นี้

### 11. การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็ง

สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient or diffusivity) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสามารถของเนื้อเยื่อหรือตัวกลางที่จะยอมให้ตัวละลายผ่านได้ มีความสำคัญต่ออัตราการแพร่

$$\text{จากสมการการสกัด } x = y = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \exp[-q_n^2 \tau]$$

กรณีที่จำนวนพิกต์ ( $\tau$ ) มีค่ามากกว่า 0.1 สามารถใช้เทอมแรกเพียงเทอมเดียวในการคำนวณหา ค่า  $x$  และ  $y$  ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 1 (Wei-Chi Wang and Sastry, 1993) นั่นคือในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะใช้ค่า  $c_1, q_1$  ในการคำนวณเท่านั้น

Schwartzberg และ Chao (1982) ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็งสำหรับระบบการสกัดแบบกะ โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log$  ของ  $x$  หรือ  $y$  กับเวลาในการสกัด ( $t$ ) ดังภาพประกอบ 2.10

กรณีการสกัดแบบกะ

$$x = \frac{x - x_{\infty}}{x_0 - x_{\infty}} \quad (2.36)$$

$$y = \frac{y - y_{\infty}}{y_0 - y_{\infty}} \quad (2.37)$$

เมื่อ  $x$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา  
 $x_0$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ป้อนเข้าสู่เครื่องสกัด  
 $x_{\infty}$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่สถานะคงตัว  
 $y$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา  
 $y_0$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ป้อนเข้าสู่เครื่องสกัด  
 $y_{\infty}$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่สถานะคงตัว

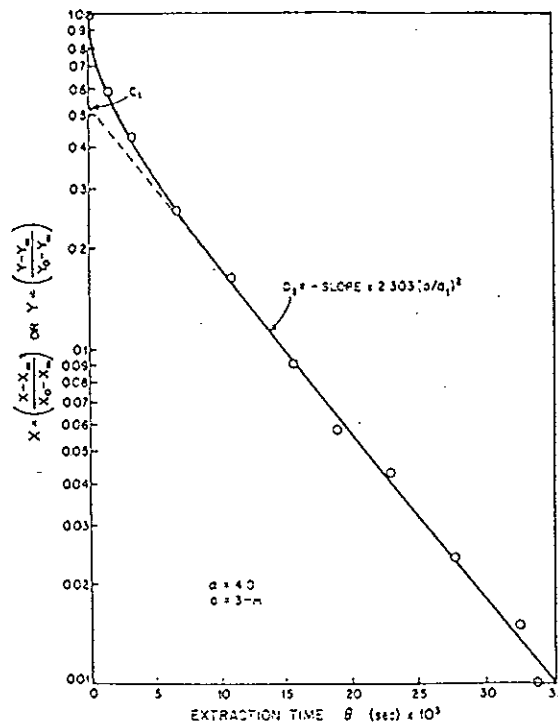
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log x$  หรือ  $\log y$  กับ  $t$  จะได้

$$\text{ความชัน}(\hat{S}) = -\frac{q_1^2 D_s}{2.303 \cdot (l^2)}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็งได้จากสมการ

$$D_s = \frac{-\hat{S} \times 2.303 \times l^2}{q_1^2} \quad (2.38)$$

ค่า  $C_1$  คือ จุดตัดแกน  $y$  แสดงดังภาพประกอบ 2.10



ภาพประกอบ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log x$  หรือ  $\log y$  กับเวลาในการสกัดสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ที่มา : Schwartzberg และ Chao (1982)

สมการที่พัฒนาขึ้นมาโดย Schwartzberg และ Chao (1982) มีข้อจำกัดคือสามารถใช้ได้กับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็งที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด และทรงกลม เท่านั้น

Siripatana (1986) พัฒนาสมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็งสำหรับรูปทรงต่าง ๆ ได้กว้างขวางขึ้น โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็งที่มีความยาวจำกัด เช่น ทรงกระบอกที่มีความยาวจำกัด รูปแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า และแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยคิดค่า E ทุกทิศทางที่เกิดการแพร่ ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ค่า E ตามทิศทางของการแพร่ ที่เกิดขึ้นในเฟสของแข็งที่มีรูปทรงต่าง ๆ กัน เมื่อ  $\tau > 0.1$  และ  $0.5 < \alpha < \infty$

ลักษณะรูปทรงของแข็ง	ค่า l	ค่า E คิดเฉพาะเทอมแรก
แผ่นแบบราบยาวไม่จำกัด (Infinite slab, IS)	ครึ่งหนึ่งของความหนา (l)	$E_{IS}$
ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด (Infinite cylinder, IC)	รัศมี (l)	$E_{IC}$
ทรงกลม (Sphere, SP)	รัศมี (l)	$E_{SP}$
ทรงกระบอกยาวจำกัด (Finite cylinder, FC)	ครึ่งหนึ่งของความหนาและรัศมี ( $l_1, l_2$ )	$E_{IS} * E_{IC}$
แท่งรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular rod, RR)	ครึ่งหนึ่งของความหนา ( $l_1, l_2$ )	$E_{IS1} * E_{IS2}$
แผ่นแบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular slab, RS)	ครึ่งหนึ่งของความหนา ( $l_1, l_2, l_3$ )	$E_{IS1} * E_{IS2} * E_{IS3}$

ที่มา : ดัดแปลงจาก Siripatana (1986)

กรณีของแข็งมีลักษณะเป็นแผ่นแบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีสมการดังนี้

$$E_{RS} = E_{IS1} * E_{IS2} * E_{IS3}$$

เมื่อคิดเฉพาะเทอมที่ 1 ของการแพร่ในแต่ละทิศทาง จะได้

$$E_{RS} = c_{11} \exp[-q_1^2 \tau_1] \cdot c_{12} \exp[-q_1^2 \tau_2] \cdot c_{13} \exp[-q_1^2 \tau_3]$$

กำหนดให้  $c_1 = c_{11} = c_{12} = c_{13}$  จะได้

$$E = c_1^3 \exp[-(q_1^2 \tau_1 + q_1^2 \tau_2 + q_1^2 \tau_3)]$$

แทนค่า  $\tau = D_{st} l^2$  จะได้

$$E_{RS} = c_1^3 \exp[-(\frac{q_1^2}{l_1^2} + \frac{q_1^2}{l_2^2} + \frac{q_1^2}{l_3^2}) D_{st}]$$

$$\ln E_{RS} = \ln c_1^3 - (\frac{q_1^2}{l_1^2} + \frac{q_1^2}{l_2^2} + \frac{q_1^2}{l_3^2}) D_{st} \quad (2.39)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\ln E$  กับ เวลาที่ใช้ในการสกัด จะได้

$$D_s = -\frac{\hat{S}}{\left(\frac{q_1^2}{l_1^2} + \frac{q_1^2}{l_2^2} + \frac{q_1^2}{l_3^2}\right)} \quad (2.40)$$



### บทที่ 3

#### วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการ

##### วัสดุ

เปลือกสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย ซึ่งเป็นเศษเหลือจากกระบวนการผลิตสับปะรดกระป๋องของโรงงานสับปะรดไทยจำกัด (มหาชน) อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เปลือกสับปะรดที่ออกจากกระบวนการผลิตผ่านเข้าเครื่องสับให้มีขนาดเล็กลง ขึ้นเปลือกสับปะรดที่ได้มีรูปทรงไม่แน่นอน ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 การคำนวณแฟกเตอร์รูปทรง (shape factor) ของชิ้นเปลือกสับปะรดซึ่งมีรูปทรงไม่แน่นอน ดังแสดงในภาคผนวก ก.6

##### อุปกรณ์

#### 1. เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางขนาดเล็กที่สร้างขึ้น \* ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2

รายละเอียดของเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

##### (1) ร่างสกัดและแผ่นตะแกรง

ร่างสกัดรูปตัวยู ความยาว 220 เซนติเมตร กว้าง 21.8 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ทำด้วยสแตนเลสหุ้มสองชั้น มีช่องว่างระหว่างชั้นทั้งสอง 1 เซนติเมตร

แผ่นตะแกรง สอดอยู่ในร่างสกัด ห่างจากปลายร่างด้านหนึ่ง 20 เซนติเมตร สามารถถอดออกได้

##### (2) สกรูและแกนสกรู

แกนสกรู ทำด้วยสแตนเลสกลวง เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร

ใบสกรู ทำด้วยสแตนเลส หนา 2.5 มิลลิเมตร มีจำนวน 12 ใบ แต่ละใบเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร จำนวน 415 รู

##### (3) ชุดปรับมุมเฉียงของเครื่องสกัด ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2

#### 2. อุปกรณ์ประกอบระบบสกัด

(1) ระบบทำความร้อนสำหรับควบคุมอุณหภูมิในร่างสกัด ประกอบด้วย



ภาพประกอบ 3.1 รูปทรงเปลือกสับปรดที่ใช้ทดลอง



ภาพประกอบ 3.2 เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับที่พัฒนาขึ้น

ถังสแตนเลสขนาด 0.1 ลูกบาศก์เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร พร้อมฮีตเตอร์ขนาด 1500 วัตต์จำนวน 3 ชุด

(2) ระบบทำความร้อนสำหรับน้ำร้อนที่ใช้ในการสกัด ประกอบด้วย

ถังสแตนเลสขนาด 0.1 ลูกบาศก์เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร พร้อมฮีตเตอร์ขนาด 5000 วัตต์ จำนวน 1ชุด

(3) ถังสแตนเลสรองรับกากเปลือกสับประรด ขนาด 0.1 ลูกบาศก์เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร

(4) ถังสแตนเลสรองรับน้ำสับประรดที่สกัดได้ ขนาด 0.1 ลูกบาศก์เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร

(5) ระบบควบคุมความเร็วและทิศทางลมของสกรู

มอเตอร์เกียร์ ยี่ห้อ NORD ขนาด 2 แรงม้า อัตราทดรอบของเกียร์ เท่ากับ

48 ต่อ 1 อัตราเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์ 1496 รอบต่อนาที

อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ SIMAX ขนาด 2 แรงม้า ของบริษัทสยามอินเวอร์เตอร์ จำกัด

วงจรีเลย์ ขนาด 12 โวลท์ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3

การ์ด เอทูดี - ดีทูเอ (ADDA card) (IBM PC VERSION) โมเดล MCT 02362

ประเทศไต้หวัน (บ. Electronic Source Co.,Ltd ตัวแทนจำหน่าย)ดังแสดงในภาพประกอบ 3.4

ไมโครคอมพิวเตอร์ PC XT หน่วยความจำ 1 เมกกะไบท์

โปรแกรมควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

### 3. อุปกรณ์บันทึกและควบคุมอุณหภูมิระบบสกัด

(1) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ แบบเข็ม 0 - 200 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ Super

(2) เทอร์โมมิเตอร์ ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่ 1 โมเดล 51 K/J ของบริษัท

Fluke

(3) สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

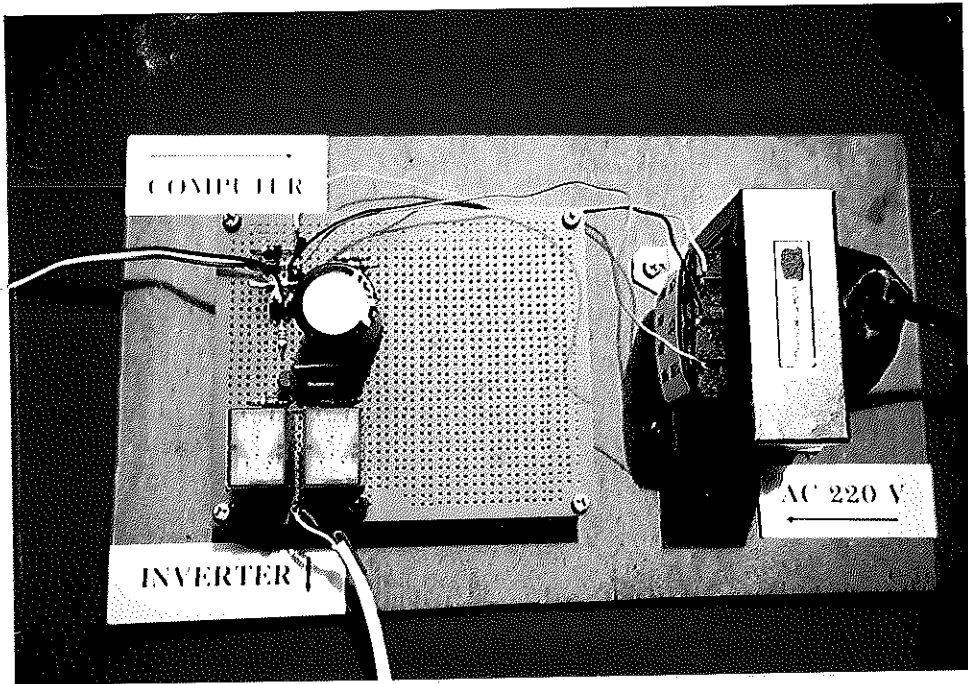
(4) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ Hydra data logger โมเดล 2625A ของบริษัท Fluke

### 4. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการป้อนน้ำร้อนเข้าและอัตราการไหลออกของน้ำสับประรดที่สกัดได้

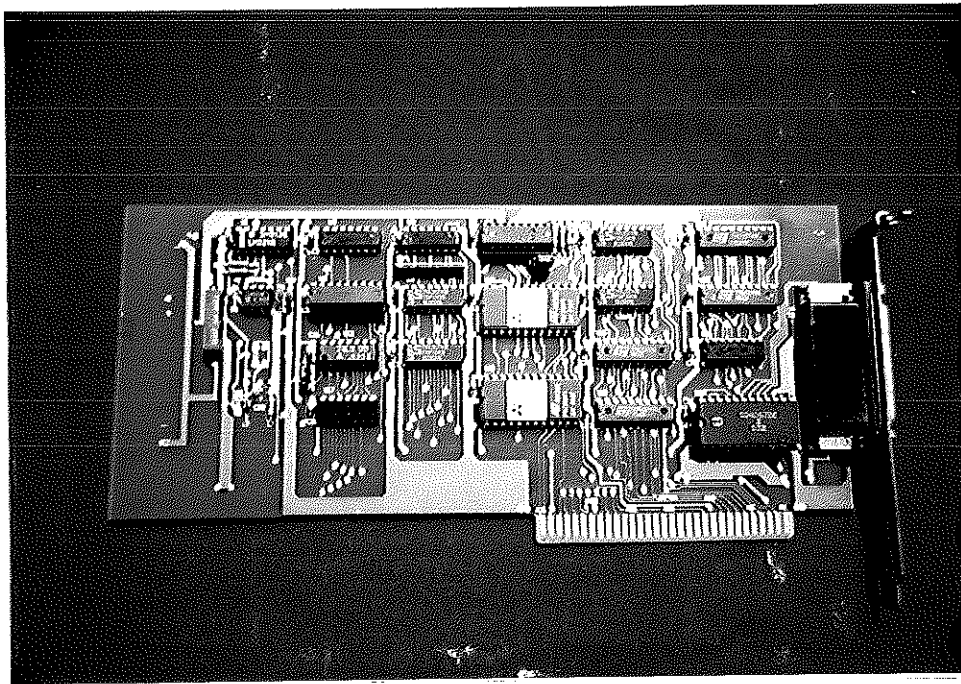
(1) โรตاميเตอร์ ขนาด 0 - 900 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ยี่ห้อ Gilmont

(2) นาฬิกาจับเวลาแบบตัวเลข โมเดล HS-10W ยี่ห้อ CASIO

(3) กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร



ภาพประกอบ 3.3 วงจรรีเลย์



ภาพประกอบ 3.4 การ์ด เอทูดี - ดีทูเอ

5. อุปกรณ์ในการป้อนเปลือกสับปะรดเข้าเครื่องสกัด

- (1) ตะกร้าพลาสติก ขนาดบรรจุ 1 กิโลกรัม
- (2) ตาชั่งกิโลแบบเข็ม ขนาด 3 กิโลกรัม

6. อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกสับปะรด และน้ำสับปะรด

- (1) เครื่องชั่งแบบตัวเลข ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่ 2 โมเดล WB-6001-g 89061 ของบริษัท Sartorius GmbH Gottingen
- (2) เครื่องชั่งแบบตัวเลข ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่ 4 รุ่น 4210 P ของบริษัท Sartorius GmbH Gottingen
- (3) กระจกตวง ขนาด 250 มิลลิลิตร
- (4) ตู้อบไฟฟ้า รุ่น DO 6061 โมเดล 500 ของบริษัท Memmert
- (5) ถ้วยอลูมิเนียม หาความชื้น
- (6) เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Abbe Refractometer) รุ่น 3L ของบริษัท Bausch & Lomb ประเทศสหรัฐอเมริกา

7. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

- (1) ขวดพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร

\*ในการสร้างเครื่องสกัดแบบไหลสวนทาง ดัดแปลงจาก Siripatana (1986) , Gunasekaran และคณะ (1989)

วิธีการ

1. การสร้างและพัฒนาเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

เครื่องสกัดแบบไหลสวนทาง (reversing counter current extractor) (RCCE) ที่สร้างขึ้น ได้พัฒนามาจากเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางของสถาบัน CSIRO ประเทศออสเตรเลีย ซึ่ง Siripatana (1986) ใช้ในการสกัดน้ำหวานจากแอปเปิ้ล และแพร์ นอกจากนี้ยังอาศัยข้อมูลเครื่องสกัดที่สร้างขึ้นโดย University of Delaware อ้างโดย Gunasekaran และคณะ (1989)

เครื่องสกัดที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ ได้มีการดัดแปลงให้เหมาะสมกับการทดลองสกัดน้ำหวานจากเปลือกสับปะรด ขนาดและรูปทรงของเครื่องสกัดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องสกัดที่พัฒนาขึ้นโดย University of Delaware และสถาบัน CSIRO ดังแสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 เปรียบเทียบขนาดและรูปร่างของเครื่องสกัดที่พัฒนาขึ้น กับเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางที่พัฒนาขึ้นโดยสถาบัน CSIRO ประเทศออสเตรเลีย และ University of Delaware

ลักษณะเครื่องสกัด	เครื่องสกัดที่พัฒนาขึ้น	เครื่องสกัดของ Univ.of Delaware	เครื่องสกัดของ CSIRO
ความยาวทั้งหมด (ม.)	2.2	2.6	2.4
ความยาวสกรูทั้งหมด (ม.)	2.0	2.2	2.2
จำนวนใบสกรู	12	10.5	15
เส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (ซ.ม.)	21	22	21
ความกว้างของรางสกัด (ซ.ม.)	21.8	22.8	21.8
ความสูงของรางสกัด (ซ.ม.)	30	25.5	24.5

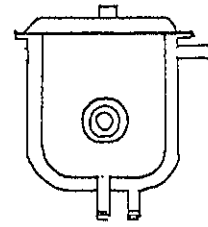
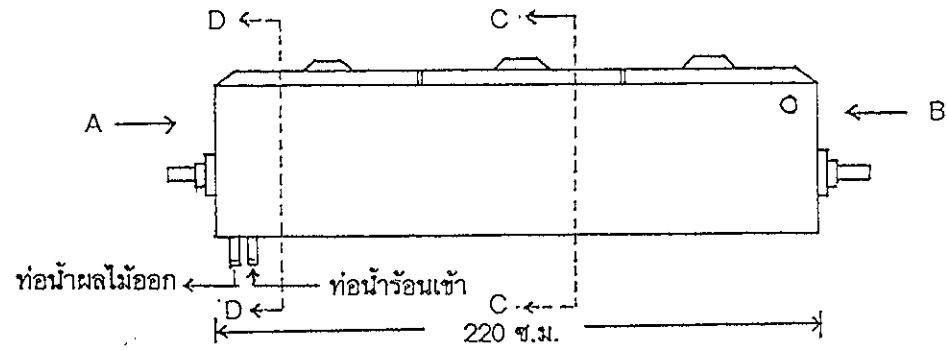
รายละเอียดของเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับที่พัฒนาขึ้น ดังภาพประกอบ 3.5 ก และ ภาพประกอบ 3.5 ข

## 2. การสร้างและพัฒนาระบบการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

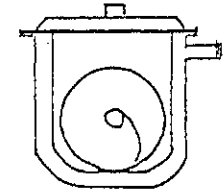
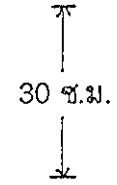
### 2.1 รายละเอียดของระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง (ภาพประกอบ 3.6)

2.1.1 รางสกัดถูกปรับให้มีมุมเอียงตามต้องการ เปลือกสับปะรดถูกป้อนเข้าสู่ระบบการสกัด ตรงตำแหน่งที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 3.6 น้ำร้อนที่ใช้ในการสกัดถูกป้อนตรงตำแหน่งปลายรางสกัดอีกด้านหนึ่งซึ่งอยู่ในระดับที่สูงกว่า เปลือกสับปะรดถูกลำเลียงขึ้นไปตามแนวเอียงของรางสกัดโดยการหมุนไปข้างหน้าสุทธิ (net forward progression) ของสกรูลำเลียง ในขณะที่เดียวกัน น้ำร้อนที่ใช้สกัดไหลลงมาตามแนวเอียงของรางสกัดสวนทางกับการเคลื่อนที่ของเปลือกสับปะรด

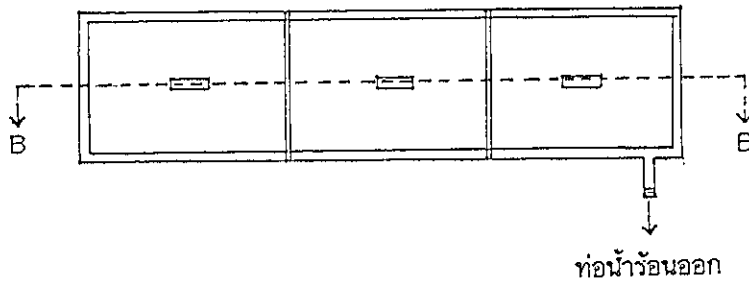
2.1.2 มอเตอร์เกียร์ ซึ่งทำหน้าที่หมุนสกรูลำเลียงเปลือกสับปะรด ถูกควบคุมให้มีความเร็วในการหมุนตามที่ต้องการโดยอินเวอร์เตอร์ และใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น \* 1 ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้บังคับการหมุนของ



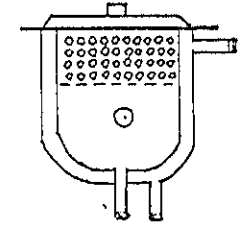
ด้าน A



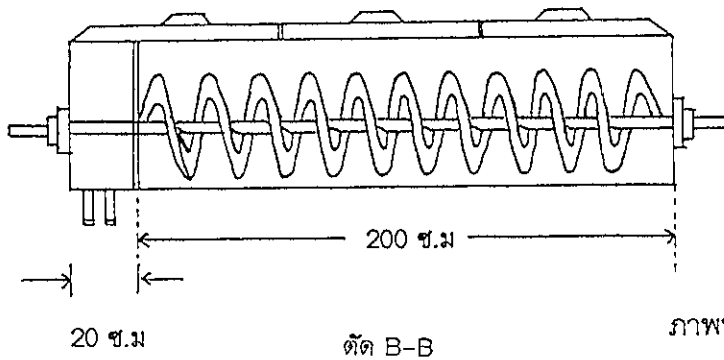
ตัด C-C



ด้าน B

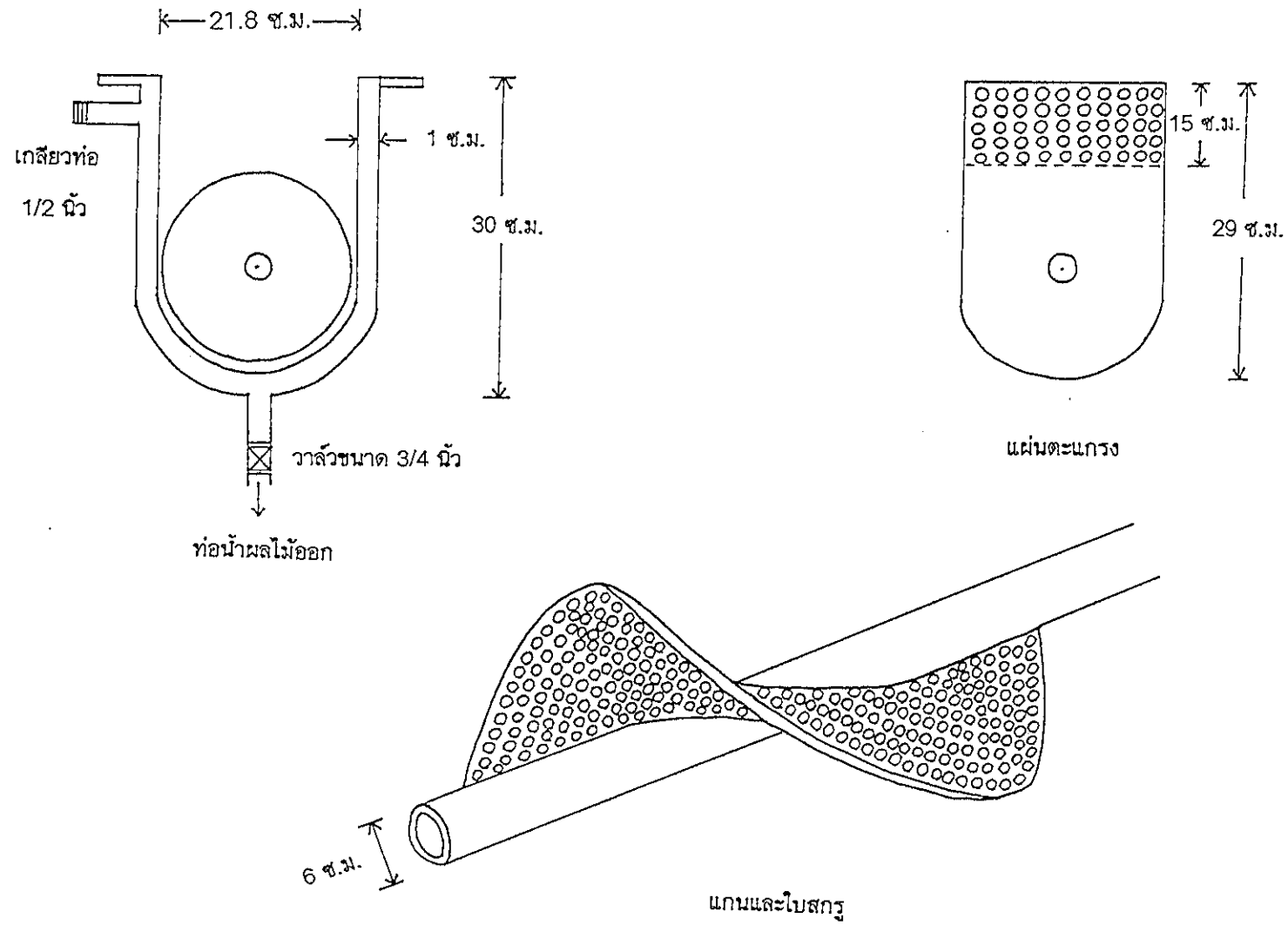


ตัด D-D



ตัด B-B

ภาพประกอบ 3.5ก มิติเครื่องสก๊ัดน้ำสับประดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ



ภาพประกอบ 3.5 มิติเครื่องสกัดน้ำส้มประตแบบไหลสวนทางย้อนกลับ





มอเตอร์ไปข้างหน้า (forward direction) และการหมุนถอยหลัง (reverse direction) ตามระยะเวลาที่ต้องการ \*2

2.1.3 การทำให้เปลือกสับปะรดและน้ำร้อนที่ใช้ในการสกัด มีเวลาสัมผัสกันตามที่ต้องการ สามารถทำได้โดยการควบคุมสิ่งต่าง ๆ ดังนี้

(1) ระดับของของเหลวในเครื่องสกัด โดยการปรับมุมเอียงของเครื่องสกัดด้านที่เปลือกสับปะรดออกจากเครื่องสกัด

(2) ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของเปลือกสับปะรดตั้งแต่ต้นรางสกัดจนกระทั่งออกจากเครื่องสกัด เรียกว่า residence time หรือ retention time ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของสกรู ระยะเวลาที่สกรูหมุนไปข้างหน้า และหมุนถอยหลัง จำนวนในสกรู และรัยละการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเปลือกสับปะรด รายละเอียดในภาคผนวก ก.

2.1.4 ป้อนคำสั่งการควบคุมการหมุนของสกรูตามต้องการ\*3 ผ่านไมโครคอมพิวเตอร์ โดยป้อนคำสั่งให้สกรูมีระยะเวลาในการหมุนไปข้างหน้า มากกว่าระยะเวลาในการหมุนถอยหลัง ทำให้การหมุนสุทธิเป็นการหมุนไปข้างหน้า ซึ่งช่วยให้เปลือกสับปะรดเคลื่อนที่ผ่านรางสกัดอย่างช้า ๆ

2.1.5 การหมุนของสกรูไปข้างหน้า ทำให้เปลือกสับปะรดเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของเครื่องสกัด เมื่อสกรูหมุนถอยหลังเปลือกสับปะรดก็จะกลับไปรวมกับอีกด้านหนึ่งของเครื่องสกัด ซึ่งเป็นการช่วยให้ น้ำร้อนที่ใช้สกัดและเปลือกสับปะรดสัมผัสกันมากขึ้น มีประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น

2.1.6 เปลือกสับปะรดและน้ำร้อนที่ใช้สกัดถูกป้อนเข้าสู่ระบบสกัดอย่างต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนระหว่างอัตราการป้อนน้ำร้อนที่ใช้สกัด ต่ออัตราการป้อนเปลือกสับปะรดที่คงที่ตามต้องการ

2.1.7 อัตราการป้อนน้ำร้อนที่ใช้สกัดจะต้องเท่ากับอัตราการไหลออกของน้ำสับปะรดที่สกัดได้ตลอดระยะเวลาการสกัด โดยการควบคุมอัตราการป้อนน้ำร้อนที่ใช้สกัดโดยใช้โรตารีมิเตอร์ และควบคุมอัตราการไหลออกของน้ำสับปะรดที่สกัดได้ โดยใช้นาฬิกาจับเวลาและวัดปริมาตรของน้ำผลไม้ที่สกัดได้โดยใช้กระบอกตวง

\*1 รายละเอียดของโปรแกรม ในภาคผนวก ง.1

\*2 รายละเอียดระบบการควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ ในภาคผนวก ค

\*3 วิธีการคำนวณเลขลำดับขั้นที่ใช้ในการป้อนข้อมูล ในภาคผนวก ค

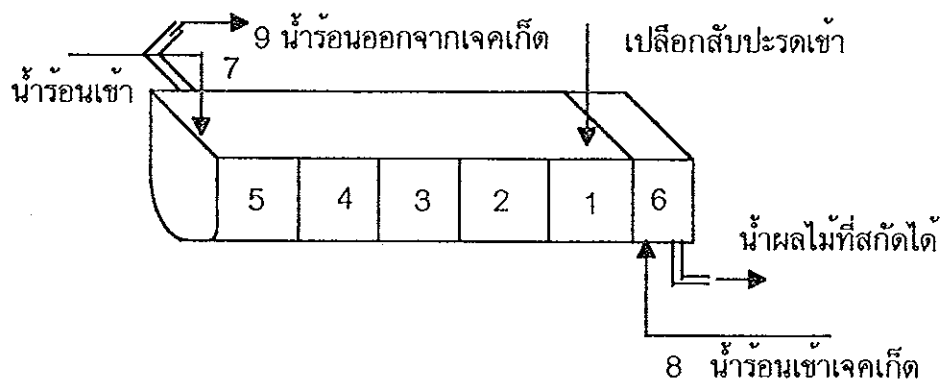
2.1.8 ปลายด้านหนึ่งของรางสกัดซึ่งอยู่ติดกับบริเวณที่ป้อนเปลือกสับปะรด มีแผ่นตะแกรง ทำหน้าที่ในการแยกน้ำผลไม้ที่สกัดได้ออกจากชิ้นเปลือกสับปะรด

2.1.9 ภายในเครื่องสกัด ตัวละลายแพร่ออกจากชิ้นเปลือกสับปะรด (เฟสของแข็ง) ไปสู่กระแสน้ำร้อนที่ใช้สกัด (เฟสของเหลว)

2.1.10 น้ำร้อนจากระบบทำความร้อนถูกปั๊มเข้าสู่เจคเก็ต (jacket) ของเครื่องสกัด และไหลออกทางปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่องสกัดกลับเข้าสู่ระบบทำความร้อน หมุนเวียนไปเช่นนี้ ซึ่งช่วยในการควบคุมอุณหภูมิโดยเฉลี่ยในเครื่องสกัดให้คงที่ตลอดระยะเวลาการสกัด อุณหภูมิโดยเฉลี่ยในการสกัดถูกควบคุมไว้ที่ 55 , 62.5 และ 70 องศาเซลเซียส

## 2.2. การเตรียมและติดตั้งระบบการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

ในการทดลองนี้เราแบ่งรางสกัดออกเป็น 6 ส่วน ช่องที่ 1 ถึง 5 กว้างช่องละ 40 เซนติเมตร ช่องที่ 6 กว้าง 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบ 3.7



ภาพประกอบ 3.7 จุดสัมผัสตัวอย่างของแข็ง ของเหลว และจุดวัดอุณหภูมิ ภายในเครื่องสกัด

### 2.2.1 การกำหนดจุดเก็บตัวอย่าง

- กรณีเฟสของแข็ง (เปลือกสับปะรด) มีทั้งหมด 7 จุด คือ
  - จุดที่ 1 ถึง 5 ดังภาพประกอบ 3.7
  - จุดที่เปลือกสับปะรดออกมาจากเครื่องสกัดเป็นจุดที่ 6
  - จุดที่เปลือกสับปะรดถูกป้อนเข้าสู่ระบบสกัดก่อนสัมผัสกับน้ำร้อน เป็นจุดที่ 7
- กรณีเฟสของเหลว (น้ำสับปะรดที่สกัดได้)
  - จุดที่ 1 ถึง 6 ดังภาพประกอบ 3.7

จุดที่น้ำสับปะรดที่สกัดได้ไหลออกมาจากท่อภายนอกรางสกัด เป็นจุดที่ 7

#### 2.2.2 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิ มีทั้งหมด 9 จุด ดังนี้

จุดที่ 1 ถึง 6 ดังภาพประกอบ 3.7

จุดที่ 7 คืออุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ในการสกัด

จุดที่ 8 คืออุณหภูมิของน้ำร้อนจากระบบทำความร้อนที่ทางเข้าเจคเก็ตของเครื่องสกัด

จุดที่ 9 คืออุณหภูมิของน้ำร้อนที่ออกจากเจคเก็ต

#### 2.2.3 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลภายในรางสกัด

ใช้ปลายข้างหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิ้ลต่อเข้ากับ hydra data logger ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งใช้แผ่นอลูมิเนียมปิดทับแนบชิดกับกับบริเวณผิวรางด้านบน ให้ปลายของเทอร์โมคัปเปิ้ลอยู่ที่ก้นรางสกัด และอยู่บริเวณตรงกลางช่องแต่ละช่อง ส่วนจุดที่ 7, 8 และ 9 สามารถสอดเข้าไปในสายยางได้โดยตรง ตั้งเวลาการบันทึกอุณหภูมิของ hydra data logger ทุก ๆ 5 นาที

#### 2.2.4 การปรับมุมเอียงเครื่องสกัด

ทำได้โดยการปรับชุดปรับมุมเอียงของเครื่องสกัด ในการทดลองนี้ใช้มุมเอียงในการสกัดเท่ากับ 5 องศา

#### 2.2.5 การปรับอัตราการไหลเข้าและออกของเฟสของเหลว

วัดอัตราการป้อนน้ำร้อนที่ใช้ในการสกัด โดยการปรับที่โรตารีเตอร์ และปรับอัตราการไหลออกของน้ำสับปะรดที่สกัดได้โดยการจับเวลาแล้ววัดปริมาตรโดยใช้กระบอกตวง

### 2.3 การหาค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมระบบการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

2.3.1 การหาความเร็วรอบการหมุนของสกรูลำเลียง ดูจากภาคผนวก ก.

2.3.2 การหาร้อยละของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ดูจากภาคผนวก ก.

2.3.3 การหาเลขลำดับขั้นในการป้อนเข้าโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ดูจากภาคผนวก ค.

### 3. การพัฒนาแบบจำลอง Diffusion-Backmixing

ศึกษาทฤษฎีและแบบจำลองต่าง ๆ ที่ได้มีการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติมาก่อน เพื่อนำมาพัฒนาแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบการสกัดแบบไหลสวนย้อนกลับที่ได้พัฒนาขึ้นมา (รายละเอียดในบทที่ 2)

#### 4. การศึกษาการถ่ายโอนมวลภายในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

##### 4.1 การคำนวณหาพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการศึกษาการถ่ายโอนมวลในเครื่องสกัด

###### 4.1.1 การหาแฟกเตอร์รูปร่าง (shape factor) ของเฟสของแข็ง

รายละเอียดและวิธีการหา ดูจากภาคผนวก ก.6

###### 4.1.2 การหาพารามิเตอร์ที่ได้จากการสกัดแบบกะ

ก. การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity) และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสโมลิซิส (time delay due to plasmolysis)

รายละเอียด วิธีการหา และการคำนวณดูจากภาคผนวก ก.7

ข. การหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (distribution coefficient)

รายละเอียด วิธีการหา และการคำนวณ ดูจากภาคผนวก ก.5

##### 4.2 การกำหนดสภาวะในการทดลอง

###### 4.2.1 กำหนดให้ตัวแปรต่อไปนี้ มีค่าคงที่

(1) ความเร็วรอบการหมุนของสกรูไปข้างหน้า เท่ากับความเร็วย้อนกลับของสกรูถอยหลัง

(2) มุมเอียงของเครื่องสกัด 5 องศา

(3) อัตราการป้อนเปลือกสับปะรด 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

(4) ระยะเวลาที่สกรูหมุนไปข้างหน้าต่อระยะเวลาที่สกรูหมุนถอยหลัง เท่ากับ 25/22

วินาที

(5) จากข้อกำหนดในข้อ (1) และ (4) จะได้ว่าร้อยละของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของชิ้นเปลือกสับปะรดเท่ากับ 6.38 ดูวิธีการคำนวณจากภาคผนวก ก.ญ.

###### 4.2.2 กำหนดให้ผันแปร ตัวแปรดังต่อไปนี้

(1) อุณหภูมิเฉลี่ยที่ใช้ในการสกัด 55 , 62.5 และ 70 องศาเซลเซียส

(2) ระยะเวลาที่เปลือกสับปะรดอยู่ในระบบสกัด (retention time) 3 ช่วงเวลาคือ 50 , 70 และ 90 นาที โดยการปรับที่อินเวอร์เตอร์ ในการควบคุมความเร็วรอบของสกรู

(3) อัตราส่วนระหว่างอัตราการป้อนน้ำร้อนที่ใช้สกัดต่ออัตราการป้อนเปลือกสับปะรด 3 ระดับ คือ 1.0 ต่อ 1 , 1.5 ต่อ 1 และ 2.0 ต่อ 1

ดังนั้นจึงมีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 27 ชุด รายละเอียดดังตาราง 3.2

ตาราง 3.2 การกำหนดสภาวะในการทดลองชุดต่าง ๆ

การทดลองที่	ระยะเวลาสกัด (นาที)	ดราฟ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	เลขลำดับชั้น
1	50	1.0	55	3.76	2707
2	70	1.0	55	2.69	1944
3	90	1.0	55	2.09	1493
4	50	1.5	55	3.76	2707
5	70	1.5	55	2.69	1944
6	90	1.5	55	2.09	1493
7	50	2.0	55	3.76	2707
8	70	2.0	55	2.69	1944
9	90	2.0	55	2.09	1493
10	50	1.0	62.5	3.76	2707
11	70	1.0	62.5	2.69	1944
12	90	1.0	62.5	2.09	1493
13	50	1.5	62.5	3.76	2707
14	70	1.5	62.5	2.69	1944
15	90	1.5	62.5	2.09	1493
16	50	2.0	62.5	3.76	2707
17	70	2.0	62.5	2.69	1944
18	90	2.0	62.5	2.09	1493
19	50	1.0	70	3.76	2707
20	70	1.0	70	2.69	1944
21	90	1.0	70	2.09	1493
22	50	1.5	70	3.76	2707
23	70	1.5	70	2.69	1944
24	90	1.5	70	2.09	1493
25	50	2.0	70	3.76	2707
26	70	2.0	70	2.69	1944
27	90	2.0	70	2.09	1493

จากการที่กำหนดให้ระยะเวลาในการสกด เท่ากับ 50 , 70 และ 90 นาที ระยะเวลาที่สกรูหมุนไปข้างหน้า ต่อระยะเวลาที่สกรูหมุนหมุนถอยหลังมีค่าคงที่เท่ากับ 25/22 วินาที สามารถคำนวณหาความเร็วรอบของสกรูลำเลียงได้เท่ากับ 3.76 , 2.69 และ 2.09 ตามลำดับ วิธีการและตัวอย่างการคำนวณ ดูจากภาคผนวก ก.

อัตราการหมุนไปข้างหน้า และอัตราการหมุนถอยหลัง สามารถนำไปใช้ในการคำนวณ เพื่อแปลงเป็นเลขลำดับชั้น ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการป้อนเข้าโปรแกรมควบคุมการทำงานของ อินเวอร์เตอร์ รายละเอียดและตัวอย่างการคำนวณดังภาคผนวก ค.

#### 4.3 วิธีการป้อนและเก็บตัวอย่าง

(1) ป้อนเปลือกสับปะรดด้วยอัตรา 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในการทดลองนี้กำหนดให้ ป้อนเปลือกสับปะรดด้วยอัตรา 1 กิโลกรัมต่อ 5 นาที โดยการชั่งเปลือกสับปะรดด้วยตาชั่งกิโล แบบเข็ม การป้อนเปลือกสับปะรดเข้าสู่เครื่องสกดกำหนดให้ป้อนในขณะที่สกรูหยุดหมุนจากการ หมุนถอยหลัง ก่อนที่สกรูจะหมุนไปข้างหน้า (the end of reversing cycle) กรณีที่ครบเวลา จะต้องป้อน แต่สกรูยังไม่อยู่ในตำแหน่งดังกล่าว กำหนดให้ป้อนโดยใช้ตำแหน่งของสกรูเป็นเกณฑ์

(2) ป้อนเปลือกสับปะรดจนกระทั่งเริ่มมีเปลือกสับปะรดออกจากเครื่องสกด จึงเริ่ม เก็บตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่างในขณะที่ สกรูอยู่ในตำแหน่ง the end of reversing cycle เช่น เดียวกัน และกำหนดเวลาเก็บตัวอย่างทุก ๆ 5 นาที แต่ไม่ให้พร้อมกับการป้อนเปลือกสับปะรด เนื่องจากเวลาที่ให้เก็บตัวอย่างสั้นมาก (ช่วงที่สกรูเริ่มหยุดจากการถอยหลัง ก่อนที่จะหมุนไปข้างหน้าต่อไป) การเก็บตัวอย่างทั้งของแข็งและของเหลวพร้อมกันไม่สามารถทำได้ทัน จึงกำหนดให้ เก็บตัวอย่างของแข็งก่อน จากนั้นในรอบถัดไปติดกัน จึงเก็บตัวอย่างที่เป็นของเหลว ตัวอย่างที่เก็บ ได้แต่ละจุดถูกนำมาใส่ไว้ในหลอดพลาสติก นำไปวัดหาความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสทั้งสอง (องศาบริกซ์) การเก็บตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

1. ช่วงเริ่มเดินเครื่อง (start up) เริ่มเก็บตัวอย่างตั้งแต่เวลาที่เปลือกสับปะรดเริ่มออกจากเครื่อง

2. ช่วงที่ระบบสกดเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) สังเกตได้จากที่จุดเดียวกันของ รางสกด ทั้งเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ความเข้มข้นของตัวละลายทั้งหมด จะมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เก็บตัวอย่างอย่างน้อย 5 ครั้ง นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ข้อมูลความเข้มข้นของของตัวละลายที่ได้ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา นำไปสู่การอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกดต่อไป

- 4.4 การคำนวณหาพารามิเตอร์จากผลการทดลองสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ
  - 4.4.1 อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลวต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง (ดริ๊ฟ)  
ดูรายละเอียดวิธีการหา และการคำนวณ ในภาคผนวก ก.1
  - 4.4.2 จำนวนเพคเลต (Peclet number) ในเฟสของเหลว  
ดูรายละเอียดวิธีการหา และการคำนวณ ในภาคผนวก ก.2 โปรแกรมสำหรับการคำนวณในภาคผนวก ง.3
  - 4.4.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient)  
ดูรายละเอียดวิธีการหา และการคำนวณ ในภาคผนวก ก.3 โปรแกรมสำหรับการคำนวณในภาคผนวก ง.2
  - 4.4.4 จำนวนไบออต (Biot number)  
ดูรายละเอียด วิธีการหา และการคำนวณ ในภาคผนวก ก.4 โปรแกรมสำหรับคำนวณในภาค ผนวก ง.4
  
- 4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง
  - 4.5.1 การแปลงความเข้มข้นจากองศาบริกซ์เป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
ดูรายละเอียด วิธีการ จากภาคผนวก ข.
  - 4.5.2 การทำดุลมวลในระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ  
ดูรายละเอียด วิธีการ จากภาคผนวก ฉ.
- 4.6 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโดยใช้ปริมาณผลได้เป็นเกณฑ์ตัดสิน  
ดูรายละเอียด วิธีการหาปริมาณผลได้ จากภาคผนวก ฉ.
- 4.7 การพิตข้อมูลจากผลการทดลองกับแบบจำลอง Diffusion - Backmixing
- 4.8 การวิเคราะห์ระบบสกัดโดยใช้แบบจำลอง Diffusion - Backmixing  
ดูรายละเอียดในบทที่ 5



## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

#### 1. ผลการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้น

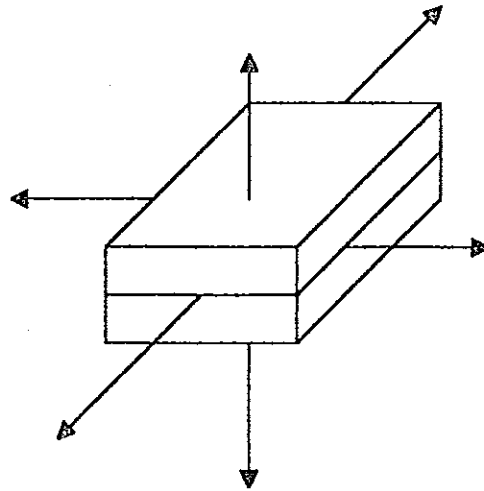
##### 1.1 แฟกเตอร์รูปทรง (shape factor)

จากการที่เปลือกสับปะรดที่ใช้ในการสกัดมีรูปทรงไม่แน่นอน ดังในภาพประกอบ 3,1 ผิวด้านนอกมีสีเขียวและเป็นมัน ส่วนด้านในเป็นด้านที่มีเนื้อสับปะรดติดอยู่ ความหนาเฉลี่ยของเปลือกสับปะรด 1 ชิ้นประมาณ 0.522 เซนติเมตร เนื่องจากด้านนอกที่มีสีเขียวมีผิวมัน การแพร่ของตัวละลายผ่านผนังด้านนี้จึงน่าจะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับที่ผ่านด้านอื่น ๆ จึงสมมติว่าไม่มีการแพร่ของตัวละลายผ่านผนังด้านนอกเลย ตามทฤษฎีการแพร่ สำหรับแผ่นแบนราบยาวจำกัด (finite slab) การแพร่ของตัวละลายจะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของของแข็งซึ่งอยู่ติดกับตัวละลายก่อน จากนั้นตัวละลายซึ่งอยู่ในบริเวณที่ลึกเข้าไปจากผิวหน้าจะแพร่เข้ามาแทนที่ การแพร่ดำเนินต่อไป จนกระทั่งเข้าสู่สถานะคงตัว ซึ่งการแพร่จะเกิดขึ้นในทุกทิศทาง ( $x$ ,  $y$  และ  $z$ ) และไม่มีการแพร่เกิดขึ้นตรงบริเวณกึ่งกลางของของแข็ง นั่นคือความหนาจริงที่เกิดการแพร่เท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของของแข็ง

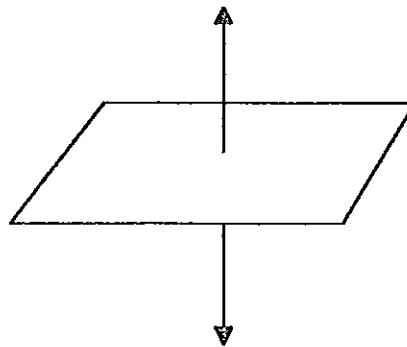
แต่จากการที่สมมติว่าไม่มีการแพร่ของตัวละลายผ่านผนังด้านนอกของเปลือกสับปะรดเลย แสดงว่ากำหนดให้ความหนาจริงที่เกิดการแพร่ เท่ากับ ความหนาของชั้นของแข็ง แทนที่จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของชั้นของแข็ง ดังนั้นการแพร่ในเปลือกสับปะรดเพียงแผ่นเดียวจะไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีการแพร่ตามแบบแผนของกรณีแผ่นแบนราบยาวจำกัดได้ จึงเกิดแนวความคิดในการพิจารณาว่าการแพร่เกิดขึ้นในแผ่นเปลือกสับปะรด 2 แผ่นประกบกัน

สมมติว่าเอาแผ่นเปลือกสับปะรด 2 แผ่นประกบกัน โดยหันด้านที่มีสีเขียวเข้าหากัน การแพร่จะเกิดขึ้นในทุกทิศทาง ดังในภาพประกอบ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ ในแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด นั่นคือบริเวณกึ่งกลางของชั้นเปลือกสับปะรดจะไม่มีการแพร่เกิดขึ้น และความหนาจริงที่เกิดการแพร่เท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของของแข็ง เราจึงใช้สมมติฐานนี้ในการคำนวณหารูปทรงของเปลือกสับปะรดที่ใช้ในการทดลองต่อไป

จากการคำนวณเพื่อหารูปทรงของเปลือกสับปะรดตามวิธีการในภาคผนวก ก.6 พบว่าเปลือกสับปะรดที่ใช้ในการทดลองสามารถเทียบได้กับรูปทรงแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular slab) มีมิติเฉลี่ยขนาด  $0.5220 \times 1.4928 \times 5.1997$  ลูกบาศก์เซนติเมตร



ภาพประกอบ 4.1 ทิศทางการแพร่ในเปลือกสับปะรด 2 แผ่นประกบกัน



ภาพประกอบ 4.2 ทิศทางการแพร่ในแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด

เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด ซึ่งมีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนมวลเพียงด้านเดียว (y-direction) ดังในภาพประกอบ 4.2 มีความกว้าง ความยาว ไม่สิ้นสุด ซึ่งมีแฟกเตอร์

รูปทรงเท่ากับ 1.0 สำหรับกรณีแผ่นเปลือกสับปะรดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจัดว่าเป็นแผ่นแบนซึ่งมีความกว้าง ความยาว และความหนา (finite slab) แต่มีผิวด้านหนึ่งไม่เกิดการแพร่ เมื่อนำแผ่นเปลือกสับปะรด แล้วหันด้านที่ไม่มีการแพร่มาประกบกัน ก็เปรียบเสมือนว่าการแพร่เกิดขึ้นในแผ่นแบนที่มีความหนาเป็น 2 เท่า และเกิดการแพร่ขึ้นทั้ง 3 ทิศทาง ( $x, y$  และ  $z$ ) และยังเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ด้วย รายละเอียด วิธีการหา และการคำนวณหาפקเตอร์รูปทรงดังกล่าวในภาคผนวก ก.6

การหาผลเฉลยสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง กรณีแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะใช้สมการเดียวกับ กรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด แต่ในการคำนวณต้องแทนค่าครึ่งหนึ่งของความหนาเป็น 3 ด้าน (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.6) ซึ่งก็คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาในแต่ละด้านของชั้นเปลือกสับปะรด ในที่นี้มีค่าดังนี้ 0.00522 เมตร 0.007464 เมตร และ 0.0259985 เมตร

## 1.2 ผลการหาพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองสกัดแบบกะ

### 1.2.1 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส

ในการทดลองสกัดทั้งแบบกะ และแบบไหลสวนทางย้อนกลับ ได้กำหนดให้นำเปลือกสับปะรดมาึ่งจมน้ำอุณหภูมิตรงใจกลางประมาณ 70 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องสกัด โดยมีจุดประสงค์ 2 ประการ คือ

1. เพื่อช่วยรักษาอุณหภูมิในการสกัดตรงทางเข้าของเฟสของแข็งให้คงที่ตลอดระยะเวลาการสกัด
2. เพื่อลดความยุ่งยากในการอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นในการสกัดเกี่ยวกับเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ซึ่งถ้าไม่มีการนึ่งก่อนการสกัดจะมีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ถ้านำเปลือกสับปะรดมาผ่านการนึ่งก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ระบบสกัด เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสควรจะลดลงจนไม่มีความสำคัญต่อการสกัด

จากผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ และ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสตามวิธีการในภาคผนวก ก.7 พบว่า เมื่อนำเปลือกสับปะรดที่ผ่านการนึ่งที่ 70 องศาเซลเซียส มาสกัดแบบกะจนกระทั่งระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ที่อุณหภูมิในการสกัด 55 , 62.5 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรด ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ครั้งที่	สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D_s$ ) (ตารางเมตรต่อวินาที)
55	1	$4.75 \times 10^{-9}$
55	2	$5.15 \times 10^{-9}$
55	3	$5.20 \times 10^{-9}$
เฉลี่ย		$5.03 \times 10^{-9}$
62.5	1	$6.12 \times 10^{-9}$
62.5	2	$6.31 \times 10^{-9}$
62.5	3	$5.82 \times 10^{-9}$
เฉลี่ย		$6.08 \times 10^{-9}$
70	1	$6.62 \times 10^{-9}$
70	2	$7.13 \times 10^{-9}$
70	3	$7.41 \times 10^{-9}$
เฉลี่ย		$7.05 \times 10^{-9}$

จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายภายในเปลือกสับปะรด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 7.5 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันประมาณ  $1 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที นั่นคือที่ 62.5 องศาเซลเซียสจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าที่ 55 องศาเซลเซียสประมาณ  $1 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะมีสัมประสิทธิ์การแพร่มากกว่าที่ 62.5 องศาเซลเซียสประมาณ  $1 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาทีเช่นเดียวกัน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น

Beristain และคณะ (1990) ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ใน การทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีการออสโมติก โดยไม่มีการกวน และใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสที่มีความเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ พบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส จะมีค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ประมาณ  $6.0 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที และ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

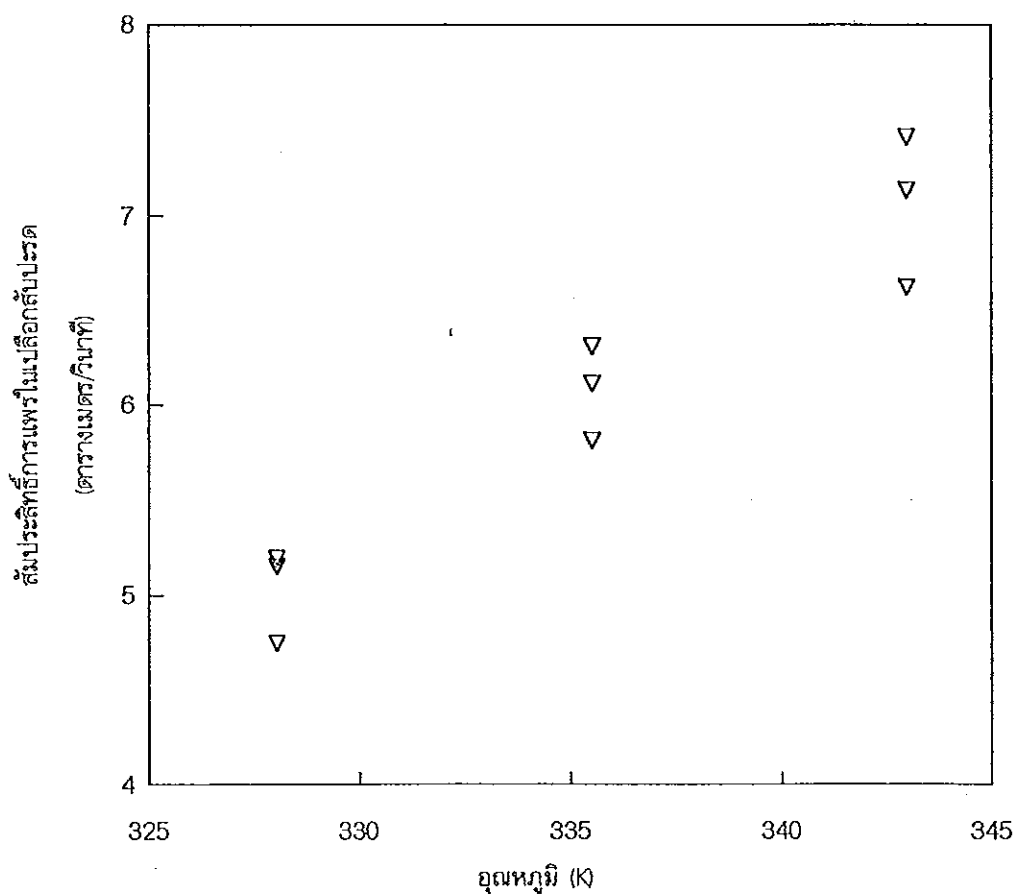
จะเห็นว่าผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรดของเรามี ความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) อย่างยิ่ง

เมื่อนำข้อมูลจากตาราง 4.1 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ (เคลวิน) กับสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังในภาพประกอบ 4.3 จะเห็นว่าได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (เคลวิน) กับสัมประสิทธิ์การแพร่ เป็นไปตามสมการเส้นตรง ดังนี้

$$D_s = 1.3466 \times 10^{-10}T - 3.9121 \times 10^{-8} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $D_s$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง (ตารางเมตรต่อวินาที)

$T$  คือ อุณหภูมิในการสกัด (เคลวิน)



ภาพประกอบ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (เคลวิน) กับสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง (ตารางเมตรต่อวินาที)

Schwartzberg และ Chao (1982) อธิบายว่า เนื่องจากภายในเฟสของแข็งจะมีโพรงเล็ก ๆ ระหว่างเซลล์ของเนื้อเยื่อ ซึ่งทะลุต่อกันเป็นท่อเล็ก ๆ จำนวนมาก การแพร่ภายในเฟสของแข็งจึงเกิดขึ้นโดยผ่านท่อเล็ก ๆ เหล่านี้ นั่นคือ การแพร่ในเฟสของแข็ง จะมีรูปแบบที่เหมือนกันกับการแพร่ในเฟสของเหลว

Bird และคณะ (1960) ได้พัฒนาสมการของสัมประสิทธิ์การแพร่โดยอาศัยพื้นฐานของสมการ Stokes - Einstein สำหรับการแพร่ในตัวละลาย A ไปสู่ตัวทำละลาย B ดังนี้

$$D_{AB} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\phi_B M_B)^{1/2} T}{\mu \tilde{V}_A^{0.6}}$$

เมื่อ  $\tilde{V}_A$  คือ ปริมาตรเชิงโมลของตัวละลาย A

$\mu$  คือ ความหนืดของสารละลาย

$\phi_B$  คือ ค่าคงที่สำหรับตัวทำละลาย B

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$M_B$  คือน้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย B

จะเห็นว่า สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ นั้นมีสมการเป็นเส้นตรง ซึ่งผลจากการทดลองก็ให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสอดคล้องกับรายงานของ Bird และคณะ (1960) เป็นอย่างดี

โดยปกติเนื้อเยื่อของผลไม้ชนิดต่าง ๆ จะประกอบด้วยเส้นใย (fiber) มากมาย ซึ่งในเปลือกสับปรดก็เช่นเดียวกัน เมื่อเปลือกสับปรดสัมผัสกับความร้อน จะส่งผลให้เส้นใยที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อเกิดการหดตัว และเกิดการบีบรัดตัว เรียกว่า thermal stress และเป็นผลให้ตัวละลายซึ่งอยู่ภายในเซลล์ถูกบีบออกมามาก ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปรดค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับในผลไม้ชนิดอื่น ๆ เช่นจากรายงานของ Schwartzberg และ Chao (1982) พบว่า apple slice ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ  $(1.18 \pm 0.9) \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที และ ใน sugar beet ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ  $(8.30 \pm 0.6) \times 10^{-10}$  ตารางเมตรต่อวินาที

การหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส วิธีการหาและตัวอย่างการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก.7 ก่อนการสกัดกำหนดให้นำเปลือกสับปรดมาผ่านการนึ่งที่ 70 องศาเซลเซียส มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจนทำให้เซลล์แตก และปล่อยให้ตัวละลายซึ่งอยู่ภายในเซลล์แพร่ผ่านเซลล์ออกมาได้ ดังนั้นเมื่อนำเปลือกสับปรดที่ผ่านการนึ่งมาสกัด เราจึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ซึ่งเป็นเวลาที่รอให้เซลล์แตกก่อนที่จะเกิดการแพร่ของตัวละลายออกมาสู่ตัวทำละลายซึ่งอยู่นอกได้ จะมีค่าน้อยมากใกล้ศูนย์ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้

เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกชนิดเดียวกับ ศูนย์ ซึ่งจะใช้เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งในการทำนายความเข้มข้นโดยใช้แบบจำลองซึ่งจะกล่าวต่อไป

ถ้านำขึ้นเปลือกสับปะรดที่ยังไม่ผ่านการนึ่งมาก่อน แล้วนำมาสกัด จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้น จะทำให้เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกชนิดของตัวละลายในเปลือกสับปะรดที่วัดได้ลดลง ไพโรจน์ และ ศิริชัย (2535) พบว่าเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกชนิดของตัวละลายในเปลือกสับปะรดที่ไม่ผ่านการนึ่ง และทำการสกัดที่ 50 , 60 และ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 12 - 24 นาที , 11 - 19 นาที และ 5 - 14 นาที ตามลำดับ

### 1.2.2 ผลการหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (distribution coefficient)

จากการทดลองหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลตามวิธีการในภาคผนวก ก.5 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลที่อุณหภูมิ 55 , 62.5 และ 70 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1.15 , 1.12 และ 1.14 ตามลำดับ (ข้อมูลดิบ และตัวอย่างการคำนวณ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.5) เนื่องจากสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล เป็นพารามิเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างและองค์ประกอบในเฟสของแข็ง ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้สกัด เปลือกสับปะรดที่ใช้ในการทดลองถือว่ามีความเหมือนกัน จึงเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลที่หาได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ต่อไป

## 2. ผลการเก็บข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการสกัดก่อนและหลังระบบเข้าสู่สถานะคงตัว

### 2.1 ข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในระหว่างการสกัด

ในการออกแบบระบบการสกัดเราต้องการให้อุณหภูมิทุกจุดในรางสกัดมีค่าคงที่ตลอดความยาวเครื่องสกัด ตามอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้คือ 55 , 62.5 และ 70 องศาเซลเซียส การรักษามุณหภูมิในการสกัดให้คงที่ตลอดระยะเวลาการสกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปลายรางทั้งสองข้าง ทำได้โดยการควบคุมสิ่งต่าง ๆ ดังนี้

(1) การให้ความร้อนแก่น้ำร้อนที่ใช้ในการสกัด ให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

(2) การให้ความร้อนแก่เปลือกสับปะรดจนมีอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องสกัดโดยการนึ่ง

ในการทดลองนี้เราต้องการควบคุมให้สัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็งมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการสกัด ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยที่จุดต่าง ๆ ในรางสกัดที่ได้จากการทดลองชุดต่าง ๆ

จากการบันทึกด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (hydra data logger) ดังในตาราง จ.1 ภาคผนวก จ. จากข้อมูลที่ได้จะเห็นว่า อุณหภูมิเฉลี่ยในรางสัปดาห์แต่ละชุดการทดลองค่อนข้างคงที่ ซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ (ถ้าไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดรางสัปดาห์ ทุกช่วงเวลาการสัปดาห์ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่คงที่) ข้อมูลจากตาราง จ.1 นำมาเขียนกราฟแสดงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในรางสัปดาห์ ดังภาพประกอบ 4.4

## 2.2 ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวขณะทำการสัปดาห์

ในระหว่างการสัปดาห์ได้กำหนดให้เก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ความเข้มข้นในเฟสของแข็ง ความหนาแน่นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว เริ่มตั้งแต่เปลี่ยนสัปดาห์เต็มรางสัปดาห์เริ่มออกจากเครื่องสัปดาห์ ไปจนกระทั่งระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ซึ่งพบว่า ใช้เวลาในการสัปดาห์ประมาณ 4 ชั่วโมงครึ่ง ถึง 5 ชั่วโมงครึ่ง ข้อมูลความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองทุกชุด อยู่ในภาคผนวก จ.1 ข้อมูล 5 ค่าสุดท้ายซึ่งอยู่ในช่วงที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวแล้ว ถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย แล้วแปลงหน่วยความเข้มข้นจากองศาปริมาตร เป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ข้อมูลเบื้องต้นคือ ความเข้มข้นในเฟสของแข็ง ความหนาแน่นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ดังตาราง จ.2 ในภาคผนวก จ. ส่วนวิธีการแปลงหน่วยความเข้มข้น แสดงไว้ในดังภาคผนวก ข.

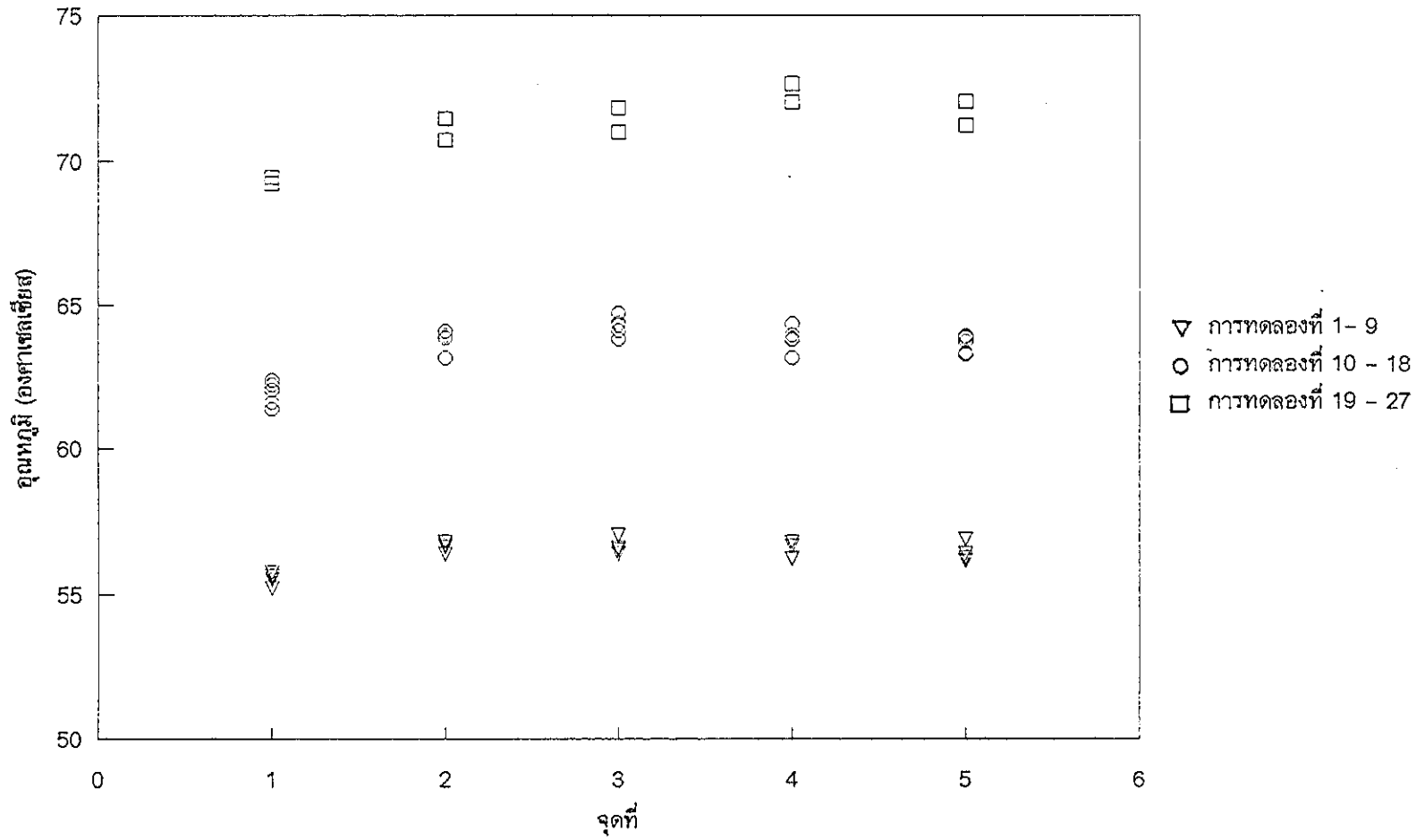
จากข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวตั้งแต่เริ่มสัปดาห์จนกระทั่งเข้าสู่สถานะคงตัว ของการทดลองชุดที่ 1 ในภาคผนวก จ.1 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสัปดาห์กับความเข้มข้นในเฟสของเหลวและเฟสของแข็ง ดังภาพประกอบ 4.5 และภาพประกอบ 4.6 ตามลำดับ

## 3. ผลการคำนวณหาพารามิเตอร์จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองสัปดาห์แบบไหลสวนทางย้อนกลับ

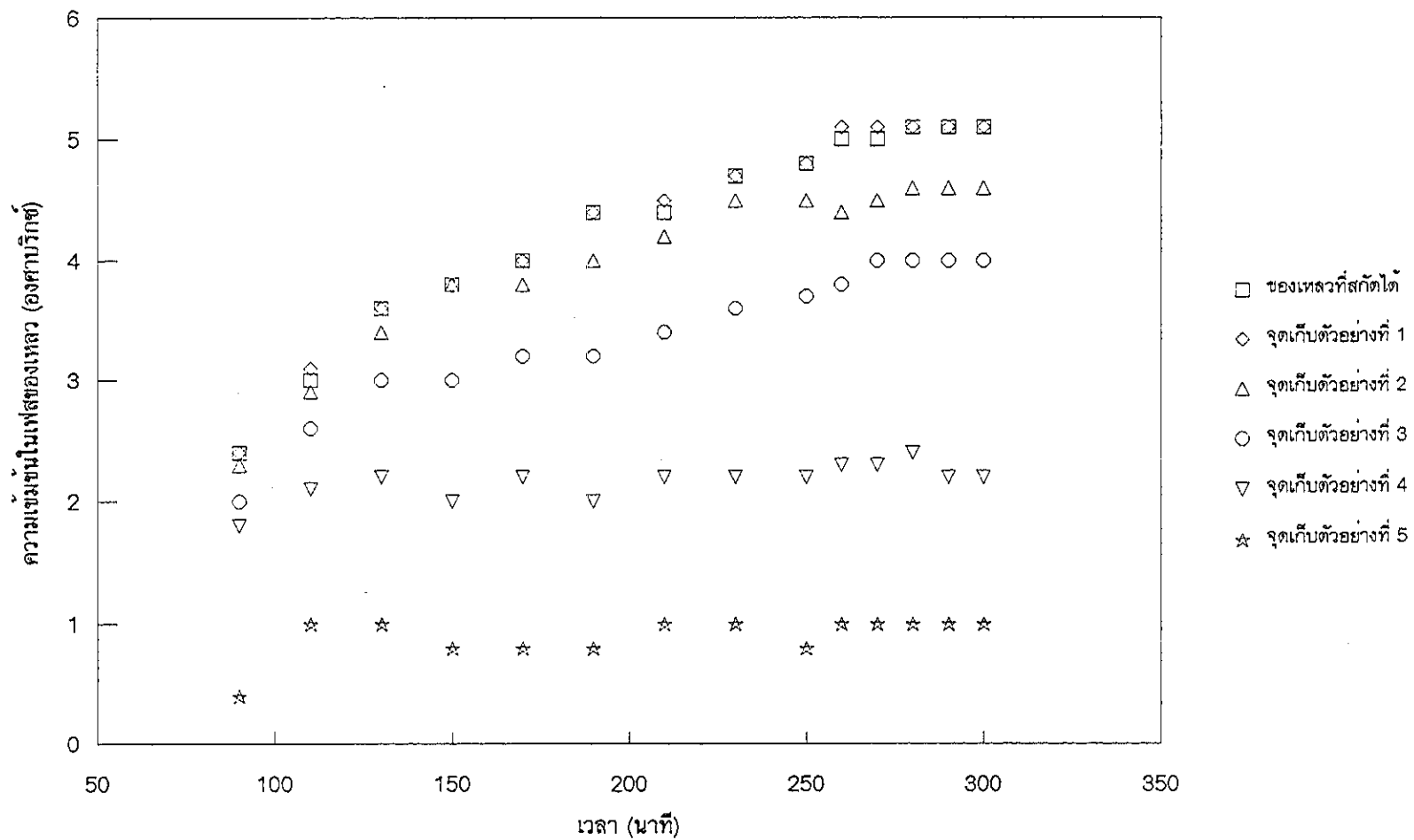
### 3.1 ผลการคำนวณหากราฟ (อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลวต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง)

การหาค่ากราฟทำได้โดยการวัดค่า  $S_0$ ,  $S_f$ ,  $L_0$  และ  $L_f$  ขณะทำการทดลองจริง ซึ่งรายละเอียดวิธีการวัดค่าเหล่านี้ และการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก.1 เนื่องจากการควบคุมอัตราการไหลเข้า และอัตราการไหลออกของเฟสของแข็งและเฟสของเหลวให้เท่ากันตลอดระยะเวลาการสัปดาห์ในทางปฏิบัติแล้วทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของการออกแบบระบบสัปดาห์และตัวเครื่องสัปดาห์เองดังนี้

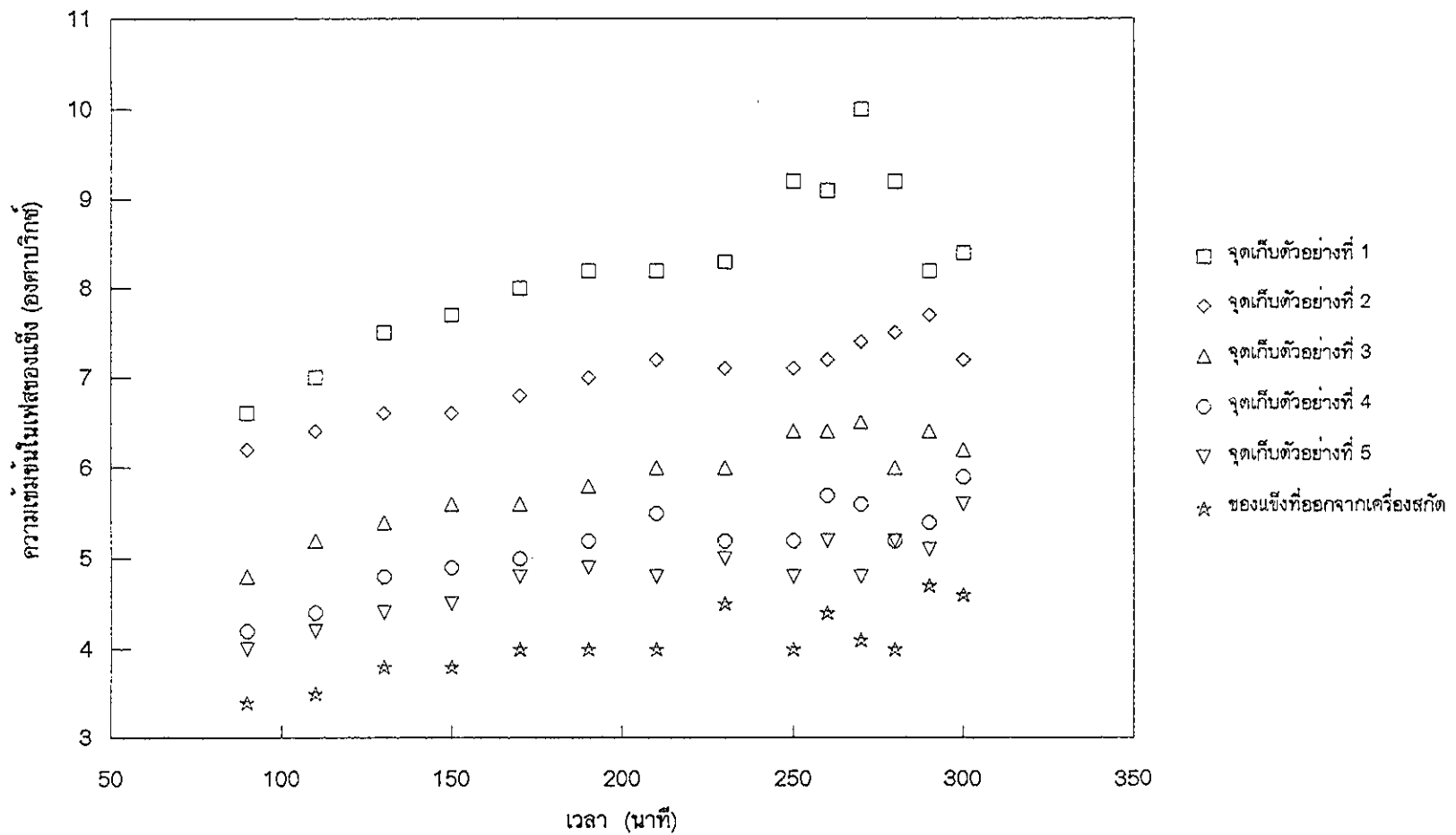




ภาพประกอบ 4.4 อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในเครื่องสกัดของการทดลองชุดต่าง ๆ



ภาพประกอบ 4.5 ความเข้มข้นในเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มสกัดจนกระทั่งเข้าระบบสู่อุณหภูมิคงตัวของสารสกัดชุดที่ 1



ภาพประกอบ 4.6 ความเข้มข้นในเฟสของแข็งที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มสกัดจนกระทั่งระบบเข้าสู่สถานะคงตัว ของการทดลองชุดที่ 1

(1) บริเวณทางออกของเฟสของแข็งมีลักษณะเป็นช่องแคบ ทำให้อัตราการไหลออกของเฟสของแข็ง ( $S_1$ ) ขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่คงที่

(2) บริเวณทางออกของเฟสของเหลว มีลักษณะเป็นท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.90 เซนติเมตร (3/4 นิ้ว) ในระหว่างการสกัดมีการเสียดสีกันระหว่างเปลือกสับประดากับใบสกรู ทำให้เปลือกสับประดบางส่วนแตกออกเป็นชิ้นขนาดเล็ก ประกอบกับแผ่นตะแกรงที่ออกแบบไว้สำหรับกั้นเปลือกสับประด ไม่สามารถแยกชิ้นเปลือกสับประดที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำสับประดได้ จึงทำให้เกิดการอุดตันได้เป็นบางช่วง ทำให้การควบคุมอัตราการไหลออกของน้ำสับประดที่สกัดได้ทำได้ค่อนข้างยาก ค่า  $L_1$  มีการผันแปรบ้างเล็กน้อย

(3) ถังน้ำร้อนสำหรับป้อนเข้าสู่ระบบสกัด อัตราการไหลเข้าของน้ำร้อนจะขึ้นกับระดับของน้ำร้อนที่อยู่ในถัง แม้ว่าจะมีโรตาริเตอร์ แต่ก็ต้องคอยดูระดับของน้ำในถังด้วย ทำให้อัตราการไหลเข้าของน้ำร้อน ( $L_0$ ) มีการผันแปรบ้างเล็กน้อย

แต่เนื่องจากในการทดลองนี้เราได้ตั้งสมมติฐานว่า ค่าดริฟคิงที่ตลอดระยะเวลาการสกัด ดังนั้นขณะทำการทดลองจึงได้วัดค่า  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $L_0$ ,  $L_1$  โดยการสุ่มวัดค่าต่าง ๆ เป็นช่วงทั้งหมด 3 ช่วง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นจึงมาคำนวณหากราฟ ค่า  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $L_0$  และ  $L_1$  โดยเฉลี่ย สำหรับการทดลองชุดต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 4.8 ส่วนค่าดริฟคิงที่คำนวณได้ดังแสดงในตาราง 4.2

จากข้อมูลค่า  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $L_0$  และ  $L_1$  ที่ได้จะเห็นว่าค่า  $S_0$  ค่อนข้างจะคงที่เพราะกำหนดให้ป้อนในอัตรา 1 กิโลกรัม ทุก ๆ 5 นาที และไม่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่น ๆ ในขณะที่ค่า  $S_1$ ,  $L_0$  และ  $L_1$  จะไม่คงที่เนื่องข้อจำกัดดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

### 3.2 ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient) ( $K_x$ )

ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่เวลา (จุด)ต่าง ๆ ในรางสกัด จากการทดลองชุดต่าง ๆ ถูกนำมาฟิต (fit) กับสมการเอกโปเนนเชียล  $\bar{x} = c + \exp(b \cdot t)$  เมื่อ  $c$  และ  $b$  คือค่าคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับสมการแสดงผลเฉลยของการสกัดแบบไหลสวนทาง ([สมการ (1.7)]สมการที่ได้ถูกนำมาหาความเข้มข้นสุดท้ายของตัวละลายในเฟสของแข็ง ( $x_1$ ) สมการเอกโปเนนเชียลที่ได้จากการฟิตกับผลการทดลองชุดต่าง ๆ และความเข้มข้นสุดท้ายของตัวละลายในเฟสของแข็งสำหรับการทดลองชุดต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 4.3 เมื่อทราบค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่นความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง ( $x_0$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

ตาราง 4.2 ค่าตัวฟ ( $\alpha$ ) สัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรด ( $D_s$ ) และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของการทดลองชุดต่าง ๆ เมื่อ  $m = 1.14$

การทดลองที่	ตัวฟที่กำหนดไว้	ตัวฟผลการทดลอง	สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตรต่อวินาที)	เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (วินาที)
1	1.00	1.41	$5.03 \times 10^{-9}$	0
2	1.00	1.18	$5.03 \times 10^{-9}$	0
3	1.00	1.16	$5.03 \times 10^{-9}$	0
4	1.50	1.76	$5.03 \times 10^{-9}$	0
5	1.50	1.69	$5.03 \times 10^{-9}$	0
6	1.50	1.67	$5.03 \times 10^{-9}$	0
7	2.00	2.17	$5.03 \times 10^{-9}$	0
8	2.00	2.21	$5.03 \times 10^{-9}$	0
9	2.00	1.98	$5.03 \times 10^{-9}$	0
10	1.00	1.28	$6.08 \times 10^{-9}$	0
11	1.00	1.15	$6.08 \times 10^{-9}$	0
12	1.00	1.10	$6.08 \times 10^{-9}$	0
13	1.50	1.58	$6.08 \times 10^{-9}$	0
14	1.50	1.45	$6.08 \times 10^{-9}$	0
15	1.50	1.44	$6.08 \times 10^{-9}$	0
16	2.00	2.12	$6.08 \times 10^{-9}$	0
17	2.00	1.99	$6.08 \times 10^{-9}$	0
18	2.00	1.84	$6.08 \times 10^{-9}$	0
19	1.00	1.24	$7.05 \times 10^{-9}$	0
20	1.00	1.10	$7.05 \times 10^{-9}$	0
21	1.00	1.11	$7.05 \times 10^{-9}$	0
22	1.50	1.62	$7.05 \times 10^{-9}$	0
23	1.50	1.52	$7.05 \times 10^{-9}$	0
24	1.50	1.52	$7.05 \times 10^{-9}$	0
25	2.00	2.10	$7.05 \times 10^{-9}$	0
26	2.00	1.75	$7.05 \times 10^{-9}$	0
27	2.00	1.51	$7.05 \times 10^{-9}$	0

ตาราง 4.3 ข้อมูลความเข้มข้นสุดท้ายในเฟสของแข็งที่ได้จากการ พิต ด้วยสมการเอกโปเนนเชียล นำมาประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_d$ )

การทดลองที่	สมการความเข้มข้น ในเฟสของแข็ง	ความเข้มข้นสุดท้ายในเฟสของแข็ง จากการพิตด้วยสมการเอกโปเนนเชียล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอน มวลรวม ( $K_d$ ) (วินาที <sup>-1</sup> )
1	$x = 96.70 \exp(-0.00029t)$	40.5	0.000517
2	$x = 96.72 \exp(-0.00022t)$	38.8	0.000476
3	$x = 95.17 \exp(-0.00017t)$	37.1	0.000420
4	$x = 90.48 \exp(-0.00033t)$	33.9	0.000555
5	$x = 92.25 \exp(-0.00024t)$	33.3	0.000455
6	$x = 91.98 \exp(-0.00019t)$	32.1	0.000387
7	$x = 85.95 \exp(-0.00032t)$	33.0	0.000525
8	$x = 87.68 \exp(-0.00025t)$	30.6	0.000447
9	$x = 86.94 \exp(-0.00020t)$	29.4	0.000380
10	$x = 89.71 \exp(-0.00026t)$	34.8	0.000683
11	$x = 89.78 \exp(-0.00021t)$	37.2	0.000542
12	$x = 87.99 \exp(-0.00017t)$	35.5	0.000495
13	$x = 91.10 \exp(-0.00032t)$	29.0	0.000817
14	$x = 89.26 \exp(-0.00024t)$	32.3	0.000542
15	$x = 90.49 \exp(-0.00020t)$	31.1	0.000483
16	$x = 85.26 \exp(-0.00032t)$	27.3	0.000742
17	$x = 89.19 \exp(-0.00026t)$	29.8	0.000507
18	$x = 88.10 \exp(-0.00020t)$	30.5	0.000440
19	$x = 90.17 \exp(-0.00029t)$	31.2	0.000908
20	$x = 87.40 \exp(-0.00020t)$	34.8	0.000582
21	$x = 86.77 \exp(-0.00018t)$	33.7	0.000500
22	$x = 92.04 \exp(-0.00034t)$	27.0	0.000999
23	$x = 90.60 \exp(-0.00026t)$	30.3	0.000705
24	$x = 88.34 \exp(-0.00020t)$	30.6	0.000543
25	$x = 86.47 \exp(-0.00034t)$	25.5	0.000833
26	$x = 84.34 \exp(-0.00026t)$	27.6	0.000656
27	$x = 86.31 \exp(-0.00021t)$	28.0	0.000562

สมมูล (m) ค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และตัวแปรอื่นที่ต้องป้อนเข้าโปรแกรมการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_x$ ) ดังแสดงในภาคผนวก ง.2 ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการทดลองชุดที่ 1 โดยการใช้โปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข.1 ค่า  $K_x$  ที่ได้จากการประเมินเป็นค่าที่หาได้จากโพรไฟล์ของความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวและเฟสของแข็งโดยตรง จึงเป็นค่าที่น่าจะมีความถูกต้อง สำหรับผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสำหรับการทดลองชุดต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 4.3

จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในตาราง 4.3 จะเห็นว่า การทดลองแต่ละชุด จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมแตกต่างกันตั้งแต่  $3.80 \times 10^{-4} - 9.99 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> Siripatana (1986) ทดลองสกัดน้ำแอปเปิ้ล และ แพร้โดยใช้เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ พบว่า มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในช่วง  $9.50 \times 10^{-4} - 2.50 \times 10^{-3}$  วินาที<sup>-1</sup>

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่หาได้จากข้อมูลการทดลองนี้ เป็นค่าที่รวมเอาผล เนื่องจากการแพร่ของตัวละลายภายในเฟสของแข็ง รวมกับการถ่ายโอนมวลจากผิวหน้าของเฟสของแข็งไปสู่เฟสของเหลวซึ่งอยู่รอบ ๆ จึงเรียกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายโอนมวลจากภายในเฟสของแข็งไปยังเฟสของเหลวซึ่งอยู่ภายนอก ค่า  $K_x$  สูงจะแสดงถึง การสกัดเกิดขึ้นได้ดี ประสิทธิภาพในการสกัดสูง

### 3.3 ผลการประเมินจำนวนเพคเลต (Peclet number) ในเฟสของเหลว (R)

เนื่องจากแบบจำลอง Diffusion - Backmixing มีสมมติฐานว่า การไหลของเฟสของแข็งเป็นแบบปลั๊ก (plug flow) นั่นคือ จำนวนเพคเลต ในเฟสของแข็งมีค่าสูงมาก ( $P \rightarrow \infty$ ) แต่ในเฟสของเหลวจะมีค่า R จำกัดซึ่งสามารถหาค่า R ได้ตามวิธีการในภาคผนวก ก.2 และโปรแกรมสำหรับการคำนวณจำนวนเพคเลต ในภาคผนวก ง.3 ซึ่งเราสามารถใส่ตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งได้จากการคำนวณ ป้อนเข้าโปรแกรมการคำนวณ ตัวแปรเหล่านั้นได้แก่ สัมประสิทธิ์การกระจายสมมูล (m) ดริฟท์ ความเข้มข้นเริ่มต้นในเฟสของแข็งและในเฟสของเหลว ( $x_0, y_0$ ) ความเข้มข้นสุดท้ายในเฟสของแข็งที่ได้จากการพิดด้วยสมการเอกไปเนนเซียล ( $x_1$ ) และ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_x$ ) ผลการประเมินจำนวนเพคเลต ของการทดลองชุดที่ 1 โดยการใช้โปรแกรมแสดงดังในภาคผนวก ข.2 สำหรับผลการทำนายจำนวนเพคเลต ของการทดลองทุกชุด แสดงดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา ดริฟ และอุณหภูมิในการสกัด ต่อจำนวนเพศเลท

การทดลองที่	ระยะเวลาสกัด (นาที)	ดริฟ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	จำนวนเพศเลท จากการทดลองจริง	จำนวนเพศเลท จากสมการ (4.2)
1	50	1.0	55	3.2	3.1
2	70	1.0	55	3.4	3.1
3	90	1.0	55	3.2	3.1
4	50	1.5	55	3.5	2.6
5	70	1.5	55	2.5	2.6
6	90	1.5	55	2.3	2.6
7	50	2.0	55	1.5	2.0
8	70	2.0	55	1.9	2.0
9	90	2.0	55	2.3	2.0
10	50	1.0	62.5	2.7	3.1
11	70	1.0	62.5	2.4	3.1
12	90	1.0	62.5	2.6	3.1
13	50	1.5	62.5	3.3	2.6
14	70	1.5	62.5	2.4	2.6
15	90	1.5	62.5	2.6	2.6
16	50	2.0	62.5	1.9	2.0
17	70	2.0	62.5	2.4	2.0
18	90	2.0	62.5	1.9	2.0
19	50	1.0	70	3.6	3.1
20	70	1.0	70	3.3	3.1
21	90	1.0	70	3.2	3.1
22	50	1.5	70	2.7	2.6
23	70	1.5	70	2.1	2.6
24	90	1.5	70	1.8	2.6
25	50	2.0	70	2.2	2.0
26	70	2.0	70	1.8	2.0
27	90	2.0	70	2.3	2.0



จำนวนเพศเลข เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงระดับของการผสมย้อนกลับ ถ้า R มีค่าน้อย ( $R \rightarrow 0$ ) แสดงว่ามีการผสมย้อนกลับมาก (backmixing มาก) จากผลการหาค่า R ในตาราง 4.4 จะเห็นว่า ค่า R ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 3.6 ซึ่งถือว่ามีค่าน้อย Siripatana (1986) ทดลองสกัดน้ำแอปเปิ้ล และ แพร้ โดยใช้เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ พบว่า R อยู่ในช่วง 3.0 ถึง  $\infty$  เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของเราจะเห็นว่าค่า R ที่ได้จากผลการทดลองถือว่ายู่ในช่วงแคบ และมีค่าน้อย ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การผสมกันในเฟสของเหลวเป็นการผสมที่เกิดการผสมย้อนกลับมาก การทดลองชุดต่าง ๆ ได้มีการกำหนดสภาวะการทดลองต่าง ๆ กันโดยมีตัวแปรต่างกัน 3 ตัวแปร คือ เวลาที่ใช้ในการสกัด อุณหภูมิที่ใช้ และกราฟการที่ค่า R ของการทดลองแต่ละชุดมีค่าต่างกัน แสดงว่า ตัวแปรทั้ง 3 ตัวนี้อาจมีผลต่อค่า R ซึ่งเราต้องใช้วิธีทางสถิติเป็นตัวทดสอบ

#### ผลของกราฟ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้การสกัดต่อ จำนวนเพศเลข

จากผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง กราฟ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด กับค่า R โดยการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) พบว่า เวลาที่ใช้ในการสกัดจะมีผลต่อค่า R ด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 80 กราฟที่ใช้ในการสกัดจะมีผลต่อค่า R ด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 99 และพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด กับ จำนวนเพศเลข อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาสมการที่อธิบายจำนวนเพศเลข ในบทที่ 2

$$R = LV_L/D_y$$

เนื่องจาก ค่า L ซึ่งเป็นอัตราการใช้ของไหลเชิงปริมาตร ในเฟสของเหลว จะมีความสัมพันธ์กับกราฟ ดังนั้นจำนวนเพศเลขจึงมีความสัมพันธ์กับกราฟ และไม่มีเทอมของเวลาปรากฏอยู่เลย

เมื่อตัดอุณหภูมิและเวลาในการสกัดซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า R ออกไป แล้ววิเคราะห์การถดถอยจะเหลือตัวแปรที่ใช้พิจารณาเพียงตัวเดียว คือกราฟ ผลจากการทดสอบโดยวิเคราะห์การถดถอย พบว่าได้ความสัมพันธ์ระหว่าง กราฟ กับ ค่า R เป็นไปตามสมการ

$$R = 4.1191 - 1.0433\alpha \quad (4.2)$$

เมื่อ R คือจำนวนเพศเลข  
 $\alpha$  คือกราฟ

สามารถประมาณจำนวนเพศเลข จากสมการ (4.2) เมื่อแทนค่ากราฟ ลงไป จำนวนเพศเลขจากผลการทดลองจริง และจากการใช้สมการ (4.2) สำหรับการทดลองชุดต่าง ๆ แสดงดังตาราง 4.4

จากข้อมูลในตาราง 4.4 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ดริฟท์ กับ จำนวน เพศเลข ที่ได้จากการทดลองจริง และจำนวนเพศเลข ที่ได้จากสมการ (4.2) ดังภาพประกอบ 4.7

เนื่องจากในการทดลองของเราได้กำหนดให้ระยะเวลาในการหมุนไปข้างหน้าและระยะเวลาในการหมุนถอยหลังของสกรูมีค่าคงที่ ความเร็วในการหมุนของสกรูไปข้างหน้าและความเร็วในการหมุนถอยหลังเท่ากัน ดังนั้นเมื่อต้องการเปลี่ยนระยะเวลาในการสกัด ตัวแปรที่ต้องเปลี่ยนไป เพื่อให้ได้ระยะเวลาในการสกัดตามต้องการ ก็คือ ความเร็วรอบการหมุนของสกรู นั่นเอง

จากภาพประกอบ 4.7 จะเห็นว่า เมื่อใช้เวลาในการสกัดเท่ากัน แต่เมื่อใช้ดริฟท์เพิ่มขึ้น จะทำให้จำนวนเพศเลข ลดลง แสดงว่าการใช้ดริฟท์เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการผสมย้อนกลับมากขึ้น แรงขับ (driving force) ลดลง ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง

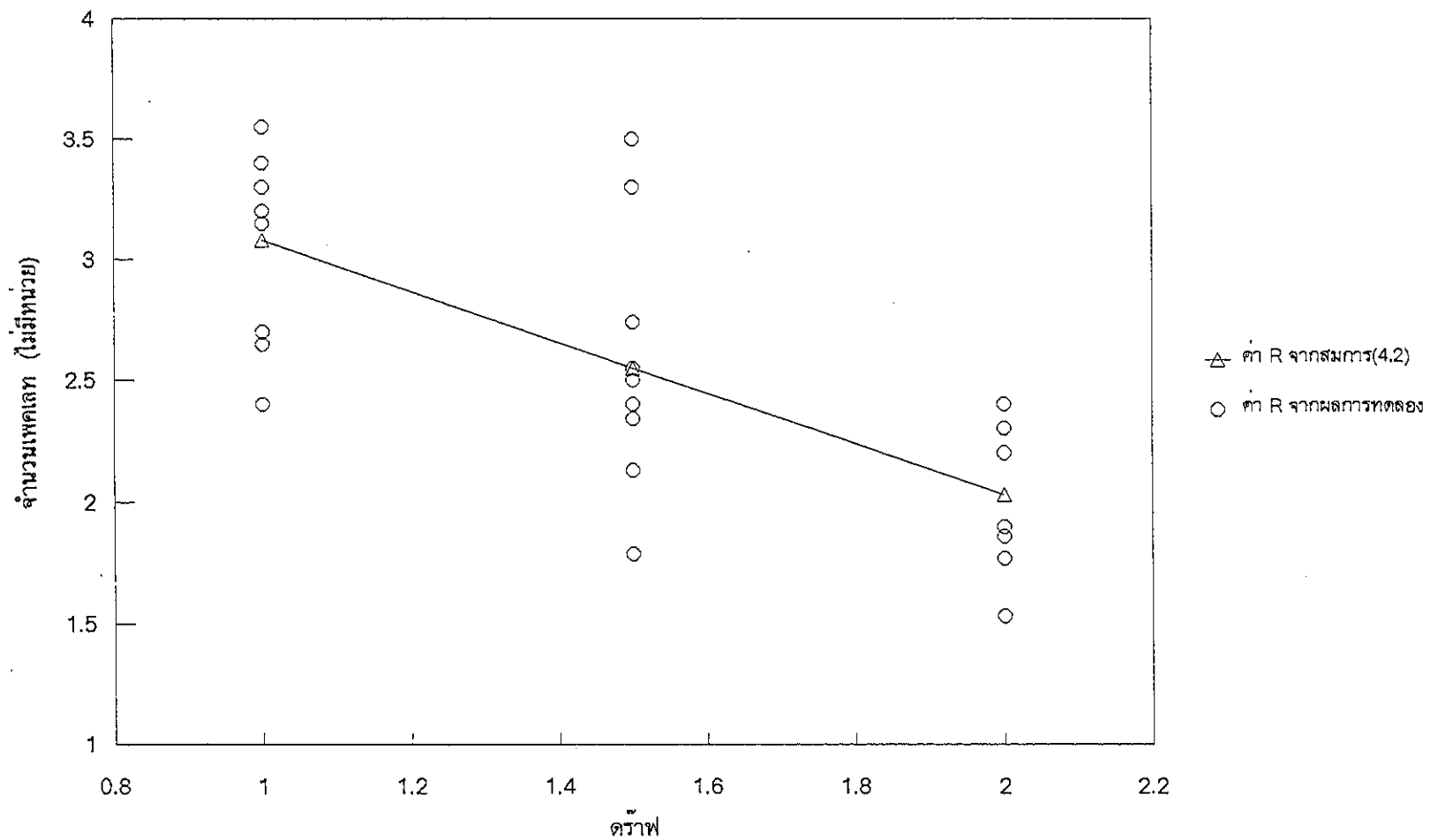
### 3.4 ผลการประเมินจำนวนไบออกท (Biot number)

เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_x$ ) และค่าตัวแปรอื่น ๆ ตามสมการ (ผ10) ก็จะสามารถหาจำนวนไบออกท ได้โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ (ผ10) วิธีการคำนวณดูจากภาคผนวก ก.4 และโปรแกรมสำหรับการคำนวณในแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ในภาคผนวก ง.4 ผลการประเมินจำนวนไบออกท สำหรับการทดลองชุดต่าง ๆ แสดงดังในตาราง 4.5

จำนวนไบออกท เป็นพารามิเตอร์ ที่แสดงถึงสัดส่วนระหว่างความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในต่อความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายนอกเฟสของแข็ง ถ้าจำนวนไบออกท มีค่าน้อย แสดงว่ามีความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายนอกเฟสของแข็งมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานภายใน นั่นคือการถ่ายโอนมวลจากผิวหน้าของเฟสของแข็งไปยังเฟสของเหลวที่อยู่ติดกันเกิดขึ้นได้ไม่ดี ในทางตรงกันข้ามถ้าจำนวนไบออกท มีค่าสูงแสดงว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็งมีค่าสูง ( $k$  สูง) การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็งเกิดขึ้นได้ดี

จากผลการหาจำนวนไบออกท ในตาราง 4.5 จะเห็นว่า จำนวนไบออกท ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1.71 ถึง 22.82 ซึ่งมีช่วงกว้าง Siripatana (1986) ทดลองสกัดน้ำแอปเปิ้ล และแพร้โดยการใช้อุปกรณ์สกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ พบว่ามีค่าจำนวนไบออกทในช่วง 0.8 –  $\infty$

การทดลองชุดต่าง ๆ มีการกำหนดสภาวะการทดลองต่าง ๆ กัน โดยมีตัวแปรต่างกัน 3 ตัว คือ เวลาที่ใช้ในการสกัด อุณหภูมิที่ใช้ และดริฟท์ ผลการวิเคราะห์ผลตัวแปรเหล่านี้ที่มีต่อจำนวนไบออกท ดังนี้



ภาพประกอบ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างดราฟ กับจำนวนเพคเลต

ตาราง 4.5 ผลการทำนายค่าต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมในภาคผนวก ง.4 (RCCE)

การทดลองที่	จำนวนทริกต์	F-แฟกเตอร์	จำนวนไบออก	$q_1$	$c_1$	time lead (วินาที)
1	0.827	2.84	4.25	0.613	0.979	618
2	1.16	2.91	3.21	0.397	0.992	574
3	1.49	2.92	2.40	0.338	0.994	547
4	0.827	2.76	5.80	0.797	0.961	686
5	1.16	2.77	3.21	0.640	0.977	622
6	1.49	2.78	2.25	0.565	0.983	579
7	0.827	2.71	5.14	0.771	0.956	829
8	1.16	2.70	3.67	0.730	0.966	711
9	1.49	2.73	2.25	0.635	0.980	558
10	1.00	2.88	5.31	0.510	0.981	654
11	1.40	2.92	2.73	0.321	0.994	525
12	1.81	2.94	2.23	0.250	0.997	469
13	1.00	2.80	14.6	0.752	0.942	955
14	1.40	2.83	2.94	0.520	0.983	556
15	1.81	2.83	2.29	0.475	0.987	524
16	1.00	2.71	9.58	0.794	0.933	979
17	1.40	2.73	2.74	0.670	0.976	494
18	1.81	2.75	2.02	0.542	0.983	530
19	1.17	2.89	8.75	0.507	0.977	691
20	1.64	2.94	2.26	0.275	0.996	358
21	2.11	2.94	1.71	0.258	0.997	350
22	1.17	2.80	22.8	0.726	0.928	1083
23	1.64	2.81	3.89	0.524	0.977	646
24	2.11	2.81	2.15	0.437	0.986	561
25	1.17	2.72	7.81	0.784	0.942	747
26	1.64	2.76	3.38	0.557	0.974	636
27	2.11	2.81	2.30	0.468	0.986	507

ผลของดริฟ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้การสกัดต่อ จำนวนไบออก

$$\text{จากสมการ ผ(10)} \quad B_i = \left[ \frac{2.24}{\left( \frac{\text{std}_s}{K_x} \left[ \frac{1}{i_1^2} + \frac{1}{i_2^2} + \frac{1}{i_3^2} \right] - 1 \right)} \right]^{1/1.02}$$

$$\text{ในที่นี้} \quad \hat{F} = 2.46618 + 0.5245/\alpha$$

นั่นคือ จำนวนไบออกจะมีความสัมพันธ์กับ ดริฟ ( $\alpha$ )

ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง ( $D_s$ ) จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังนั้นอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อจำนวนไบออกด้วย ส่วนค่า  $K_x$  นั้นแสดงถึงระยะเวลาในการสกัด ซึ่งในที่นี้พิจารณาในแง่ของความเร็วการหมุนของสกรูดังนี้

การที่มีระยะเวลาในการสกัดนาน หมายถึงสกรูหมุนช้าลง จึงทำให้เกิดการกวนหรือเกิดการสัมผัสกันระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของเหลวได้ไม่ดี  $K_x$  จะมีค่าต่ำ ทำให้  $B_i$  น้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าสกรูหมุนเร็วขึ้น (ระยะเวลาในการสกัดน้อย) การสัมผัสกันระหว่างเฟสของแข็งกับเฟสของเหลวดีขึ้น ค่า  $K_x$  สูง จำนวนไบออกสูงด้วย

จากผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง ดริฟ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด กับ จำนวนไบออก โดยการวิเคราะห์การถดถอย (multiple regression analysis) พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนไบออก ด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 80 เวลาที่ใช้ในการสกัดจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนไบออก ด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 99 และพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างดริฟที่ใช้ในการสกัดกับจำนวนไบออก อย่างมีนัยสำคัญ

จากการจัดกลุ่มสภาวะของการทดลองกับจำนวนไบออกที่ทำได้ ดังภาคผนวก ฎ จะเห็นว่าดริฟและอุณหภูมิไม่มีความสัมพันธ์กับจำนวนไบออก จึงต้องวิเคราะห์การถดถอยใหม่ โดยการตัดดริฟและอุณหภูมิ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์กับจำนวนไบออก ออกไป ดังนั้น จะเหลือตัวแปรที่ใช้พิจารณาเพียงตัวเดียว คือ เวลาที่ใช้ในการสกัด แต่ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าเวลาที่ใช้ในการสกัดในที่นี้จะหมายถึงความเร็วรอบของสกรู ในการวิเคราะห์การถดถอยจึงพิจารณาผลของความเร็วรอบสกรูที่มีต่อจำนวนไบออก ผลจากการวิเคราะห์การถดถอย พบว่าได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบสกรู กับ จำนวนไบออก เป็นไปตามสมการ

$$B_i = -7.8356 + 4.4655v_c \quad (4.3)$$

เมื่อ  $B_i$  คือจำนวนไบออก

$v_c$  คือความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)

ผลจากการวิเคราะห์การถดถอย เราสามารถประมาณจำนวนไบออกท โดยใช้สมการ (4.3) เมื่อแทนค่าความเร็วรอบสกรูลงไป ค่าจำนวนไบออกท จากผลการทดลองจริง และจากการใช้สมการ (4.3) สำหรับการทดลองชุดต่าง ๆ แสดงดังตาราง 4.6

จากข้อมูลในตาราง 4.6 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบของสกรู กับจำนวนไบออกท ที่ได้จากการทดลองจริง และจำนวนไบออกท ที่ได้จากสมการ (4.3) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ดังภาพประกอบ 4.8

จากภาพประกอบ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบสกรูสูงขึ้น จะทำให้จำนวนไบออกท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า

จากการที่สกรูหมุนเร็วขึ้น จะทำให้การสัมผัสกันระหว่างเฟสของแข็งกับเฟสของเหลว ซึ่งอยู่ติดกันเกิดขึ้นได้ดี เกิดการหมุนเวียนของเฟสของเหลวที่อยู่ใกล้ชิดกับผิวหน้าของเฟสของแข็งได้ดี เป็นผลให้ความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็งมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้จำนวนไบออกท มีค่ามาก ความหนาของฟิล์มที่ผิวของแข็งบางลง ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมสูงขึ้น นั่นคือจำนวนไบออกท เป็นพารามิเตอร์ ซึ่งใช้ในการอธิบายการผสมที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแข็ง ซึ่งเป็นการผสมในระดับจุลภาค (microscopic) เท่านั้น

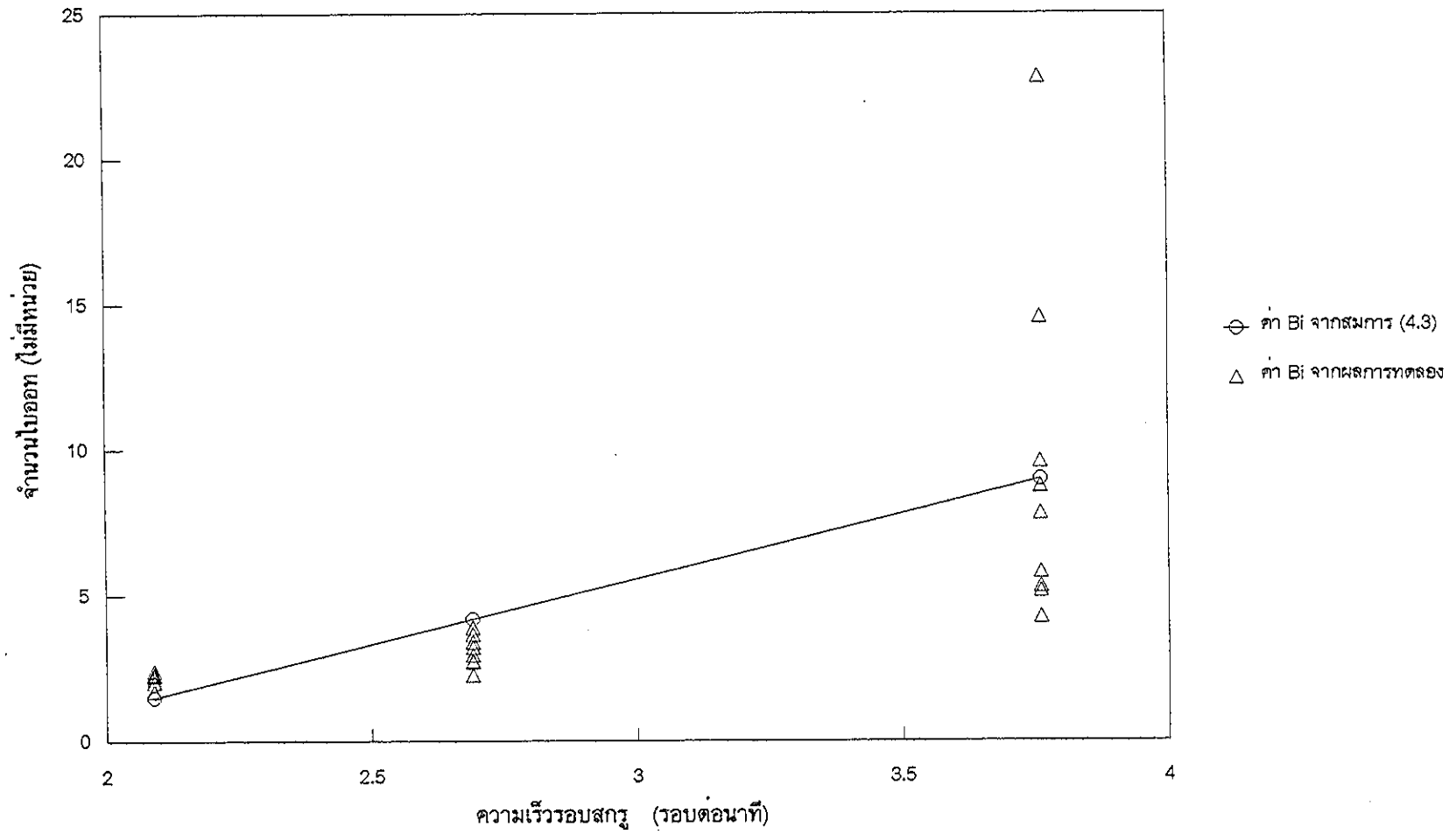
#### ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมกับจำนวนเพลต

จากข้อมูลสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในตาราง 4.3 และจำนวนเพลต ดังในตาราง 4.4 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมกับจำนวนเพลต ดังภาพประกอบ 4.9

จากภาพประกอบ 4.9 จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ไม่มีความสัมพันธ์กับจำนวนเพลตอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 แล้วว่า จำนวนเพลตเป็นพารามิเตอร์ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการผสมย้อนกลับ ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเป็นพารามิเตอร์ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการแพร่ ปรัชญาการถ่ายโอนมวลที่ผิวของแข็งและการผสมย้อนกลับ มีกลไกที่ต่างกันทางทฤษฎี แต่ได้รับผลกระทบจากเหตุอันเดียวกันคือ การหมุนเวียนของเฟสของเหลวโดยกระบวนการพา ดังนั้นจึงไม่อาจนำค่า  $K_x$  และ  $R$  มาสัมพันธ์กันได้ และจากภาพประกอบ 4.9 ก็แสดงให้เห็นว่า  $K_x$  และ  $R$  ไม่มีความสัมพันธ์กัน

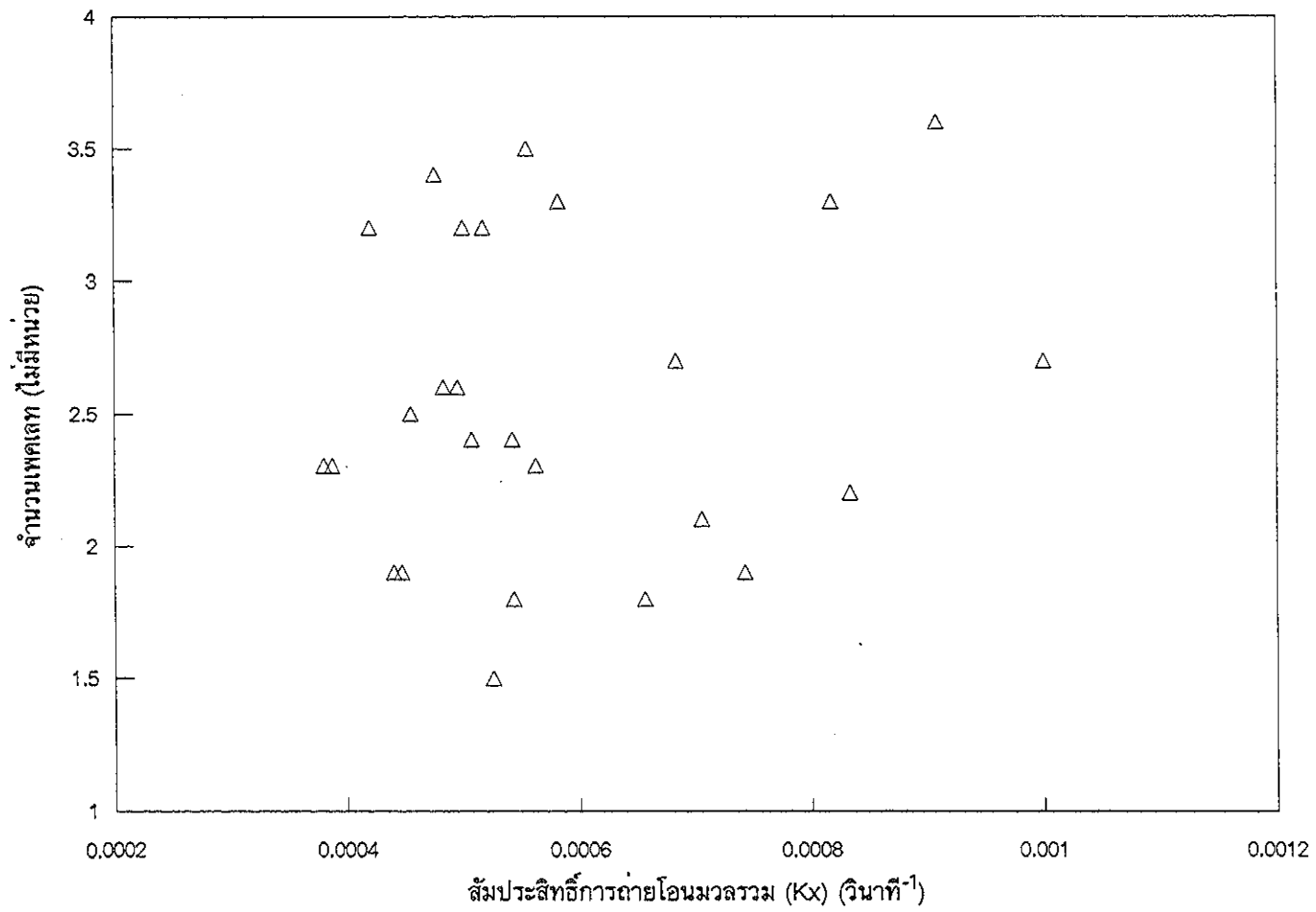
ตาราง 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา ดรีฟ และอุณหภูมิในการสกัด ต่อจำนวนไบออก

การทดลองที่	ระยะเวลาสกัด (นาที)	ดรีฟ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	จำนวนไบออก จากการทดลองจริง	จำนวนไบออก จากสมการ (4.3)
1	50	1.0	55	4.25	7.80
2	70	1.0	55	3.21	2.52
3	90	1.0	55	2.40	0.345
4	50	1.5	55	5.80	7.80
5	70	1.5	55	3.21	2.52
6	90	1.5	55	2.25	0.345
7	50	2.0	55	5.14	7.80
8	70	2.0	55	3.67	2.52
9	90	2.0	55	2.25	0.345
10	50	1.0	62.5	5.31	9.23
11	70	1.0	62.5	2.73	3.94
12	90	1.0	62.5	2.23	1.76
13	50	1.5	62.5	14.6	9.23
14	70	1.5	62.5	2.94	3.94
15	90	1.5	62.5	2.29	1.76
16	50	2.0	62.5	9.58	9.23
17	70	2.0	62.5	2.74	3.94
18	90	2.0	62.5	2.02	1.76
19	50	1.0	70	8.75	10.3
20	70	1.0	70	2.26	5.06
21	90	1.0	70	1.71	2.88
22	50	1.5	70	22.8	10.3
23	70	1.5	70	3.89	5.06
24	90	1.5	70	2.15	2.88
25	50	2.0	70	7.81	10.3
26	70	2.0	70	3.38	5.06
27	90	2.0	70	2.30	2.88



ภาพประกอบ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบสกรู กับจำนวนใบออก





ภาพประกอบ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม กับ จำนวนพีคเลข

## ผลการประเมินสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

### 1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากการทดลอง

จากข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ เมื่อไหลผ่านระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ ที่เข้าสู่สถานะคงตัวแล้ว ของการทดลองชุดต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ฉ. วิธีการเปลี่ยนระยะทางที่ของแข็งและของเหลวเคลื่อนที่ไปในรางสกัดเป็นเวลาในการสกัด และการจับคู่ความเข้มข้นกับเวลา แสดงอยู่ในภาคผนวก ซ.

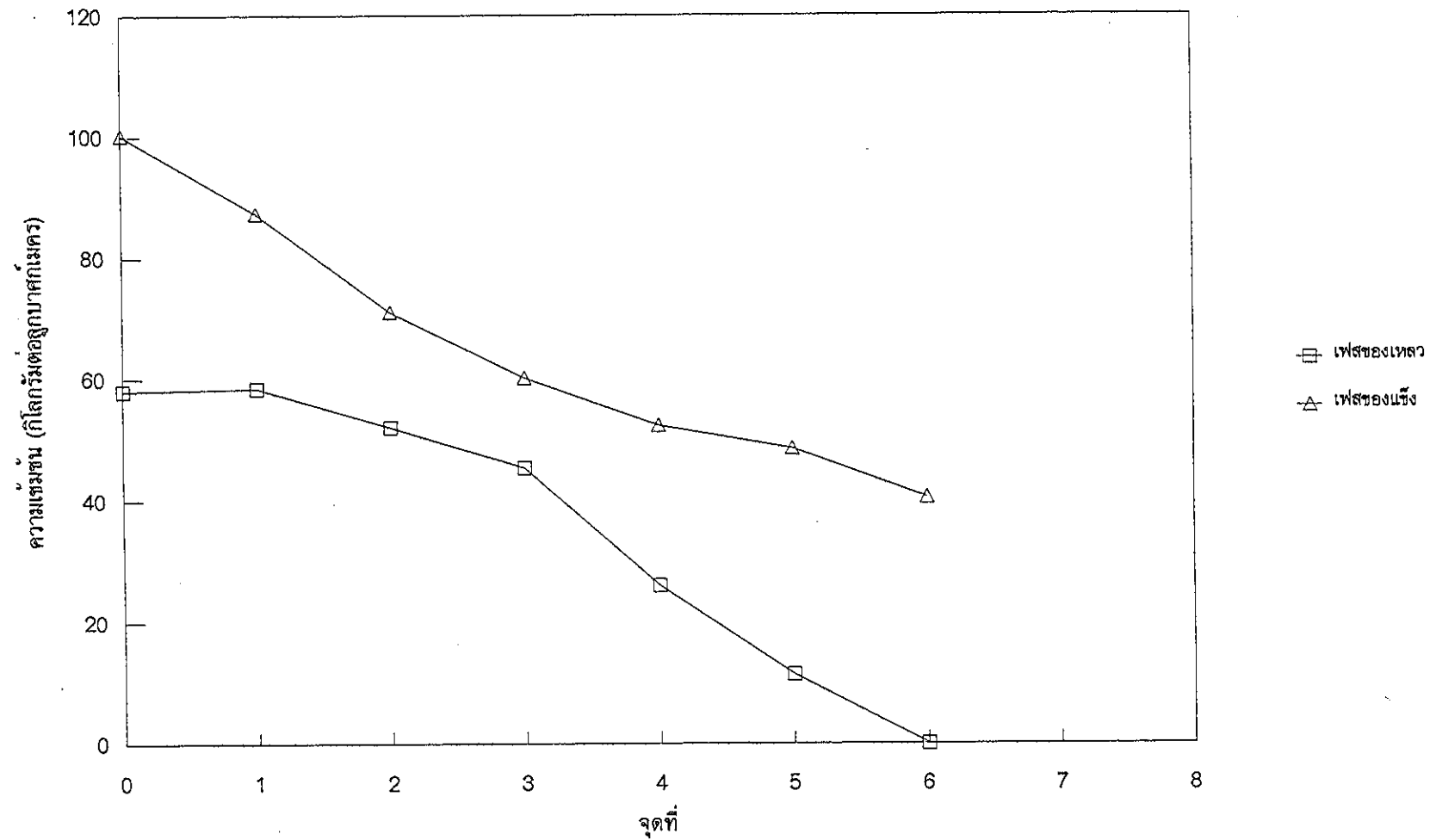
ข้อมูลจากตารางในภาคผนวก ฉ. สำหรับการทดลองชุดที่ 1 สามารถนำมาเขียนเป็นข้อมูลที่แสดงถึงความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ดังแสดงในตาราง 4.7 ส่วนข้อมูลชุดอื่น ๆ แสดงดังภาคผนวก ฉ.

ตาราง 4.7 ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ  
จากการทดลองชุดที่ 1

จุดที่	0	1	2	3	4	5	6
เวลา (วินาที)	0	300	900	1500	2100	2700	3000
ความเข้มข้น							
เฟสของเหลว ( $\text{kg/m}^3$ )	50.89	51.30	45.66	39.83	22.93	10.06	0.00
ความเข้มข้น							
เฟสของแข็ง ( $\text{kg/m}^3$ )	100.29	87.29	71.04	60.18	52.34	48.56	40.53

ข้อมูลในตาราง 4.7 นำมาเขียนกราฟความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่จุดต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.10

จากภาพประกอบ 4.10 จะเห็นว่า ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่จุดที่ 0 กับจุดที่ 1 ไม่ค่อยแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่า จุดที่ 0 เป็นความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวซึ่งออกมาจากรางสกัดแล้ว ไม่ได้มีการสัมผัสกับเฟสของแข็งอีก ในความเป็นจริงเราไม่ได้วัดความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่บริเวณจุดที่ 0 ซึ่งอยู่ในรางสกัดจริง ๆ ส่วนความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งตรงจุดที่ 0 ก็เช่นเดียวกัน เราไม่ได้วัดความเข้มข้นที่อยู่ใน



ภาพประกอบ 4.10 ความเข้มข้นในเฟสของแข็งและ เฟสของเหลวตามความยาวเครื่องสกัด เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว

รางสกัดจริง ๆ แต่ในที่นี้จุดที่ 0 คือความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเริ่มต้นซึ่งยังไม่สัมผัสกับเฟสของเหลว ดังนั้นความเข้มข้นในเฟสของแข็งที่จุด 0 ในภาพประกอบควรจะต่ำกว่านี้

จากภาพประกอบ 4.10 จะเห็นว่า ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งลดลงจากที่เวลา 0 วินาที ไปจนถึงสิ้นสุดการสกัด และความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวก็ลดลงเช่นกัน ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ลดลง จะไปอยู่ในเฟสของเหลว ทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการสกัดแบบไหลสวนทาง ที่วินาทีที่ 0 เริ่มนับจากของแข็งถูกป้อนเข้าสู่เครื่องสกัดตรงจุดเก็บตัวอย่างที่ 0 ของรางสกัด แต่น้ำร้อนที่ใช้สกัดถูกป้อนเข้าตรงจุดเก็บตัวอย่างที่ 6 ซึ่งอยู่บริเวณปลายรางอีกด้านหนึ่ง จึงทำให้สังเกตเห็นว่าความเข้มข้นทั้งสองเฟสต่างก็ลดลง

สำหรับการทดลองชุดอื่น ๆ ก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน

## 2. ผลการทำดุลมวลในระบบการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ (mass balance in reversing counter current extractor)

จากดุลมวลของระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง ดังในภาคผนวก ฉ. ได้สมการสำหรับหาความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ออกจากเครื่องสกัดได้ ดังสมการ (ฉ1)

$$y_f = \frac{(x_0 S_0 - x_f S_f)}{L_f} \quad (\text{ฉ1})$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของการคำนวณหากราฟ เราสามารถหาค่า  $S_0$ ,  $S_f$ ,  $L_0$  และ  $L_f$  ได้จากการวัดโดยตรง เมื่อแทนค่า  $S_0$ ,  $S_f$ ,  $L_f$ ,  $L_0$ ,  $x_0$  และ  $x_f$  ลงในสมการ (ฉ1) จะสามารถหาค่า ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ออกจากเครื่องสกัด ( $y_f$ ) ได้ ข้อมูลค่า  $S_0$ ,  $S_f$ ,  $L_f$ ,  $L_0$ ,  $x_0$ ,  $x_f$ , ค่า  $y_f$  ที่ได้จากการทดลองจริง [ $y_f$  (exp)] และค่า  $y_f$  ที่ได้จากการทำดุลมวล [ $y_f$  (cal)] สำหรับการทดลองแต่ละชุดแสดงดังตาราง 4.8

จากตาราง 4.8 จะเห็นว่า ทุกชุดการทดลองความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่สกัดได้จากผลการทดลองจริง มีค่ามากกว่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่คำนวณได้จากการทำดุลมวล ตั้งแต่ร้อยละ 1.97 - 11.86 แสดงว่าการสกัดนี้ไม่ได้ดุล ที่เป็นเช่นนี้พอจะสรุปสาเหตุได้ 2 ประการ ดังนี้

1). ความผิดพลาดจากการวัดค่า  $S_f$ ,  $L_f$  และ  $L_0$  เนื่องจากค่า  $S_f$ ,  $L_f$  และ  $L_0$  มีค่าไม่คงที่ วัดได้ค่อนข้างลำบาก ด้วยเหตุผลดังที่ได้อธิบายไว้ในส่วนของผลการคำนวณหากราฟ

2). ในขณะที่สกัดเปลือกสับปะรดซึ่งได้รับความร้อน จนอาจทำให้ตัวละลายอื่น ๆ ที่สามารถละลายได้เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในเปลือกสับปะรด นอกเหนือไปจากน้ำตาล ละลายออกมาสู่เฟสของเหลว จึงทำให้วัดค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟส

ตาราง 4.8 สรุปลค่า  $S_0$ ,  $S_t$ ,  $L_0$ ,  $L_t$ ,  $X_0$ ,  $X_t$ ,  $Y_t$ , และ %evp ของการทดลองชุดต่าง ๆ

การทดลองที่	$S_0$ ( $m^3/hr$ )	$S_t$ ( $m^3/hr$ )	$L_0$ ( $m^3/hr$ )	$L_t$ ( $m^3/hr$ )	$X_0$ ( $kg/m^3$ )	$X_t$ ( $kg/m^3$ )	$Y_t(\text{exp})$ ( $kg/m^3$ )	$Y_t(\text{cal})$ ( $kg/m^3$ )	% $Y_t$ dif	$S_t + L_t$ ( $kg/hr$ )	$S_0$ ( $kg/hr$ )	%evp
1	0.0116	0.0116	0.0145	0.0141	100.27	40.53	50.89	49.15	3.42	1.1870	1.1645	1.53
2	0.0117	0.0116	0.0120	0.0119	101.67	38.73	63.46	62.21	1.97	1.2044	1.1895	0.84
3	0.0116	0.0116	0.0120	0.0114	100.86	36.65	67.78	65.33	3.61	1.1978	1.1700	2.54
4	0.0117	0.0114	0.0181	0.0172	96.61	35.07	43.88	42.47	3.21	1.1545	1.1303	4.03
5	0.0116	0.0107	0.0168	0.0159	97.54	34.16	51.38	48.17	6.25	1.1824	1.1314	6.34
6	0.0116	0.0107	0.0168	0.0157	97.85	31.79	55.05	51.25	8.03	1.2044	1.1351	7.04
7	0.0117	0.0115	0.0240	0.0199	89.97	31.45	39.30	34.72	11.65	1.1437	1.0526	12.04
8	0.0117	0.0107	0.0231	0.0200	96.33	31.16	45.02	39.68	11.86	1.2338	1.1271	11.78
9	0.0117	0.0103	0.0195	0.0183	96.37	28.74	51.03	45.44	10.95	1.2299	1.1275	8.33
10	0.0116	0.0115	0.0132	0.0132	93.32	36.27	51.92	50.41	2.91	1.1024	1.0825	0.40
11	0.0117	0.0114	0.0120	0.0116	96.44	36.59	65.47	61.31	6.35	1.1766	1.1283	2.95
12	0.0116	0.0115	0.0120	0.0106	97.52	36.32	70.47	67.32	4.47	1.1647	1.1312	6.36
13	0.0116	0.0115	0.0164	0.0161	100.72	35.37	50.08	47.30	5.55	1.2130	1.1684	2.31
14	0.0117	0.0116	0.0157	0.0145	96.19	32.86	54.03	51.33	5.00	1.1646	1.1254	4.74
15	0.0117	0.0109	0.0157	0.0151	100.18	32.33	57.06	54.28	4.86	1.2140	1.1721	5.11
16	0.0116	0.0115	0.0232	0.0195	94.70	31.95	42.52	37.49	11.82	1.1966	1.0985	10.92
17	0.0116	0.0114	0.0218	0.0189	100.99	3.194	47.80	42.72	10.63	1.2675	1.1715	9.28
18	0.0117	0.0105	0.0190	0.0171	98.88	30.25	54.30	49.08	9.61	1.2462	1.1569	10.10
19	0.0117	0.0116	0.0127	0.0125	99.08	35.64	61.50	59.66	2.99	1.1822	1.1592	1.23
20	0.0116	0.0115	0.0113	0.0110	95.73	34.82	68.57	64.55	5.86	1.1547	1.1105	1.75
21	0.0117	0.0116	0.0120	0.0107	96.99	34.09	73.11	69.10	5.48	1.1777	1.1348	5.91
22	0.0116	0.0115	0.0164	0.0155	104.28	34.21	58.40	52.66	9.83	1.2986	1.2096	3.57
23	0.0116	0.0114	0.0160	0.0145	103.67	32.91	62.11	57.06	8.13	1.2758	1.2026	6.16
24	0.0117	0.0100	0.0138	0.0127	92.78	33.01	65.68	59.48	9.44	1.1642	1.0855	10.98
25	0.0117	0.0116	0.0235	0.0200	98.58	29.54	44.97	40.54	9.86	1.2421	1.1534	10.23
26	0.0117	0.0114	0.0199	0.0168	96.26	28.34	53.89	47.81	11.29	1.2284	1.1262	10.76
27	0.0117	0.0115	0.0176	0.0145	98.37	28.66	64.02	56.64	11.52	1.2579	1.1509	11.26

ของเหลวได้มากกว่าที่คำนวณได้จากการทำดุลมวล Dull (1971) ได้วิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของสับประตสายพันธ์ปัดตาเวีย พบว่า มีกรดซิตริกอยู่ร้อยละ 0.62 - 1.62 และมี เพนโตแซนกับเพคตินรวมกันร้อยละ 0.39 - 0.59 ดังนั้นจะมีตัวละลายที่สามารถละลายได้เมื่อได้รับความร้อนรวมร้อยละ 1.01 - 2.21

จากการทดสอบสมมติฐาน ดังกล่าว โดยการทดลองวัดความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งสด (ไม่ึ่ง) เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ผ่านการึ่งที่ 70 องศาเซลเซียส พบว่า สามารถวัดความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ผ่านการึ่งที่ 70 องศาเซลเซียส ได้มากกว่า ของแข็งที่ไม่ึ่ง ร้อยละ 2 - 3 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Dull (1971)

ดังนั้นความผิดพลาดในการวัดความเข้มข้นเนื่องจากการที่มีตัวละลายอื่น ละลายเข้ามาอยู่ในเฟสของเหลวขณะทำการสกัดจะมีค่าประมาณ ร้อยละ 2 - 3 ส่วนความผิดพลาดที่เหลืออยู่ประมาณไม่เกินร้อยละ 7 เกิดขึ้นเนื่องจากการวัดค่า  $L_f$ ,  $L_0$  และ  $S_f$  เอง ซึ่งน่าจะยอมรับได้

#### การหาร้อยละการระเหย (percent evaporation)

เนื่องจากระบบการสกัดที่ใช้ในการทดลองเป็นระบบเปิด ดังนั้นจึงมีน้ำบางส่วนระเหยออกไปในระหว่างการสกัด สามารถหาร้อยละการระเหยได้จากการคิดทั้งระบบ ดังสมการ

$$\%evp = \left[ \frac{(S_0+L_0)-(S_f+L_f)}{(S_0+L_0)} \right] \times 100 \quad (4.4)$$

จากสมการ (4.4) สามารถคำนวณหาร้อยละการระเหยของการทดลองชุดต่าง ๆ ได้ดังในตาราง 4.8 ซึ่งจะเห็นว่าในขณะที่ทำการสกัดจะมีการระเหยร้อยละ 1.53 - 12.04 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และกราฟที่ใช้ในการสกัด โดยที่พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้น จะมีอัตราการระเหยมากขึ้น และเมื่อกราฟเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการระเหยสูงขึ้น เนื่องจากการที่กราฟเพิ่มขึ้นหมายถึงอัตราการไหลเข้าของเฟสของเหลวเพิ่มขึ้น นั่นคือมีปริมาณของเหลวไหลผ่านเครื่องสกัดปริมาณมากขึ้น จึงทำให้อัตราการระเหยสูงตามไปด้วย

### 3. ผลการคำนวณหาปริมาณผลได้ (yield)

การคิดปริมาณผลได้ จากภาคผนวก ฉ. สามารถหาปริมาณผลได้จากสมการ(ฉ2)

$$\text{ผลได้ (ร้อยละ)} = \frac{(x_0-x_f)}{x_0} \times 100 = \frac{\alpha y_f}{m x_0} \times 100 \quad (\text{ฉ}2)$$

ผลการคำนวณหาปริมาณผลได้ที่ได้จากการทดลองชุดต่าง ๆ โดยใช้สมการ (ฉ2) ดัง

แสดงในตาราง 4.9

ตาราง 4.9 ผลได้ (yield) จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ

การทดลองที่	ความเข้มข้นสุดท้ายในเฟสของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ความเข้มข้นสุดท้ายในเฟสของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ผลได้ (ร้อยละ)
1	100.27	40.53	59.58
2	101.67	38.73	61.91
3	100.86	36.65	63.66
4	96.61	35.07	63.70
5	97.54	34.16	64.98
6	97.85	31.79	67.51
7	89.97	31.45	65.04
8	96.33	31.16	67.65
9	96.37	28.74	70.18
10	93.32	36.27	61.13
11	96.44	36.59	62.06
12	97.52	36.32	62.76
13	100.72	35.37	64.88
14	96.19	32.86	65.84
15	100.18	32.33	67.73
16	94.70	31.95	66.26
17	100.99	31.94	68.37
18	98.88	30.25	69.41
19	99.08	35.64	64.03
20	95.73	34.82	63.63
21	96.99	34.09	64.85
22	104.28	34.21	67.19
23	103.67	32.91	68.26
24	100.50	33.01	67.15
25	98.58	29.54	70.03
26	96.26	28.34	70.56
27	98.37	28.66	70.86

จากตาราง 4.9 จะเห็นว่า ปริมาณร้อยละผลได้ที่ได้จากการสกัดสำหรับการทดลองชุดต่าง ๆ กัน ซึ่งมีสภาวะแตกต่างกัน จะได้ผลได้ในปริมาณต่างกัันตั้งแต่ร้อยละ 59.58 - 70.86 และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลได้ ได้แก่ ดริฟท์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสกัด

#### 4. ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโดยใช้ปริมาณผลได้เป็นเกณฑ์ตัดสิน

##### 4.1 ผลของดริฟท์ต่อปริมาณผลได้

เมื่อใช้เวลาในการสกัด 50 , 70 และ 90 นาที และใช้อุณหภูมิในการสกัดเท่ากัน พบว่าเมื่อใช้ดริฟท์เท่ากับ 1.0 จะให้ร้อยละผลได้ต่ำสุด ผลได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ดริฟท์ 1.5 และจะได้อ้อยละผลได้สูงสุดเมื่อใช้ดริฟท์เท่ากับ 2.0 และพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะได้อ้อยละผลได้มากขึ้น เมื่อใช้ดริฟท์เท่ากัน ดังภาพประกอบ 4.11ก , 4.11ข และ 4.11ค และจะเห็นว่าไม่ว่าจะใช้เวลาและอุณหภูมิในการสกัดเท่าใด แต่เมื่อใช้ดริฟท์สูงขึ้นจะทำให้ได้อ้อยละของผลได้เพิ่มขึ้นด้วย

##### 4.2 ผลของอุณหภูมิในการสกัดต่อร้อยละของผลได้

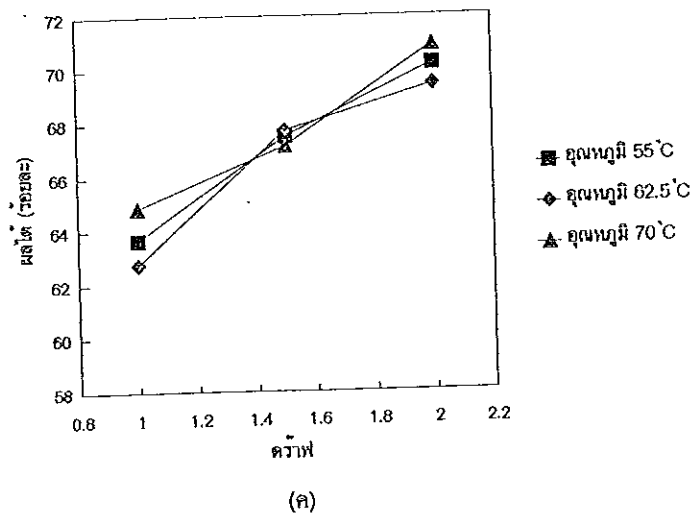
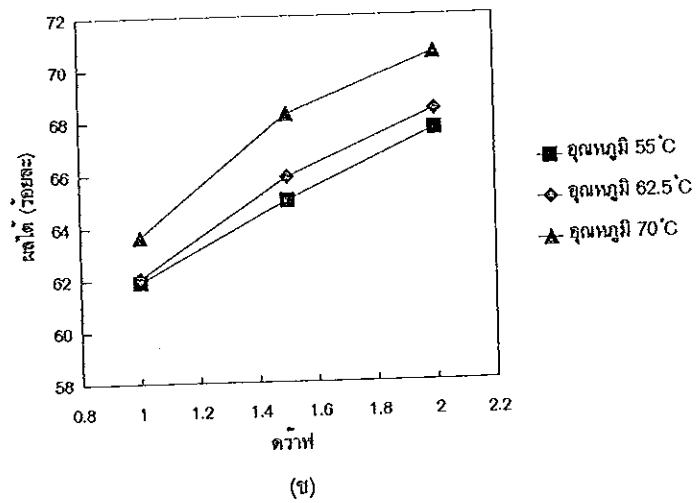
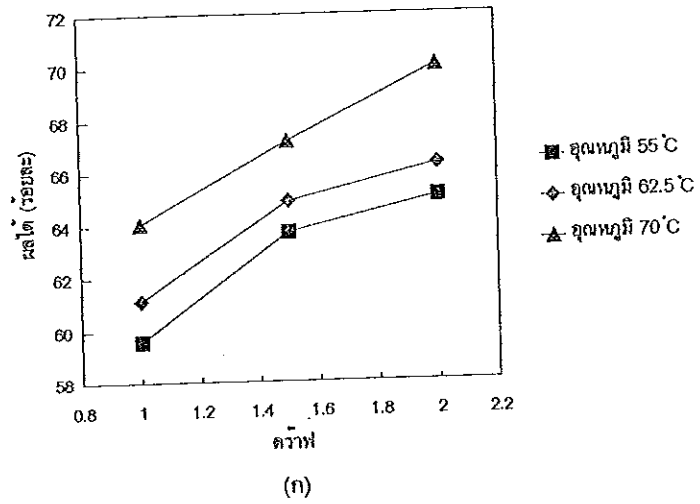
เมื่อใช้ดริฟท์ที่ 1.0 , 1.5 และ 2.0 ใช้เวลาในการสกัด 50 และ 70 นาที จะได้อ้อยละผลได้เรียงตามลำดับจากน้อยไปหามากเมื่อใช้อุณหภูมิต่างกัน คือ 55 , 62.5 และ 70 องศาเซลเซียส แต่เมื่อใช้เวลาในการสกัด 90 นาที จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดต่าง ๆ กัน ไม่ได้ทำให้ได้อ้อยละผลได้แตกต่างกันมากนัก ดังภาพประกอบ 4.12ก , 4.12ข และ 4.12ค และเมื่อใช้อุณหภูมิในการสกัดสูงถึงระดับหนึ่ง (70 องศาเซลเซียส) ที่ดริฟท์คงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะใช้เวลาในการสกัด 50 70 หรือ 90 นาที จะพบว่าได้อ้อยละผลได้ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

##### 4.3 ผลของเวลาในการสกัดต่อร้อยละผลได้

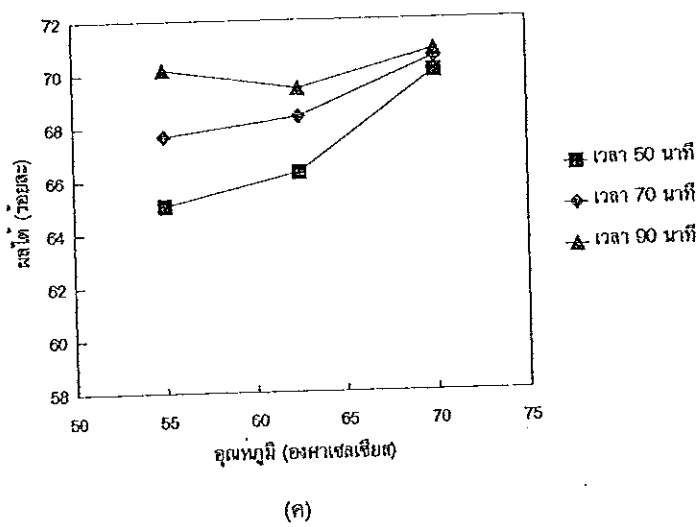
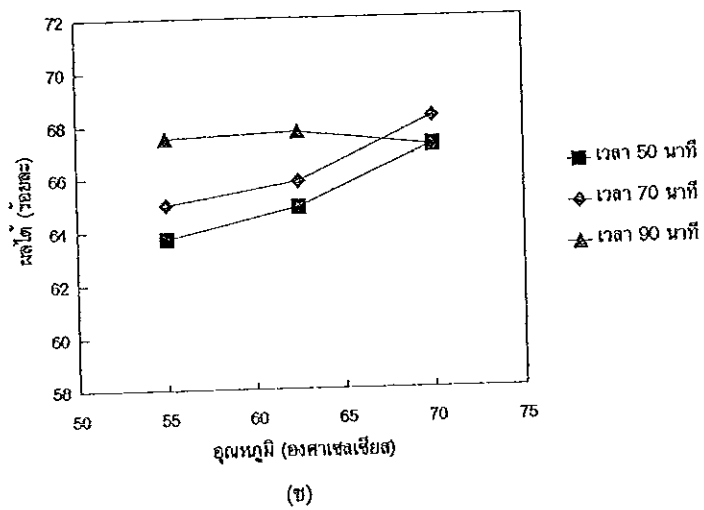
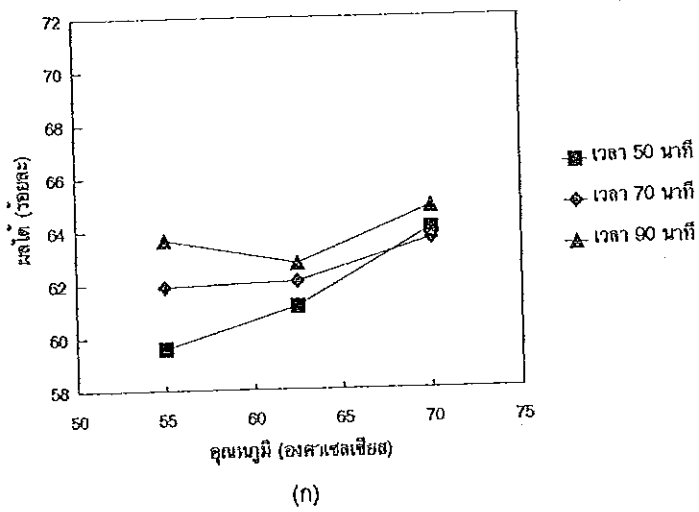
เมื่อใช้ดริฟท์ 1.0 , 1.5 และ 2.0 อุณหภูมิในการสกัด 55 และ 62.5 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการสกัดต่างกัน จะได้อ้อยละผลได้เรียงตามลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้ 50 , 70 และ 90 นาที ดังภาพประกอบ 4.13ก และ 4.13ข แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัดต่างกัน จะไม่ได้ทำให้ได้อ้อยละผลได้ที่แตกต่างกัน และจะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการสกัดนานถึงระดับหนึ่ง (90 นาที) อุณหภูมิในการสกัดต่างกัน ก็ไม่ได้ทำให้ได้รับร้อยละผลได้ที่แตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 4.13ค

จากข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองจะเห็นว่า สภาวะการสกัดที่ดีสำหรับการสกัดเมื่อคิดร้อยละผลได้ที่ได้เป็นเกณฑ์จะพบว่า การใช้อุณหภูมิในการสกัด 70 องศาเซลเซียส ดริฟท์ 2.0 และเวลาในการสกัด 90 นาที จะให้ร้อยละผลได้สูงถึง 70.86 แต่จากผลการทดลองจะเห็นว่าสามารถสรุปสภาวะที่ใช้ในการสกัดซึ่งทำให้ได้ผลได้ปริมาณสูงได้ 2 แนวทาง คือ

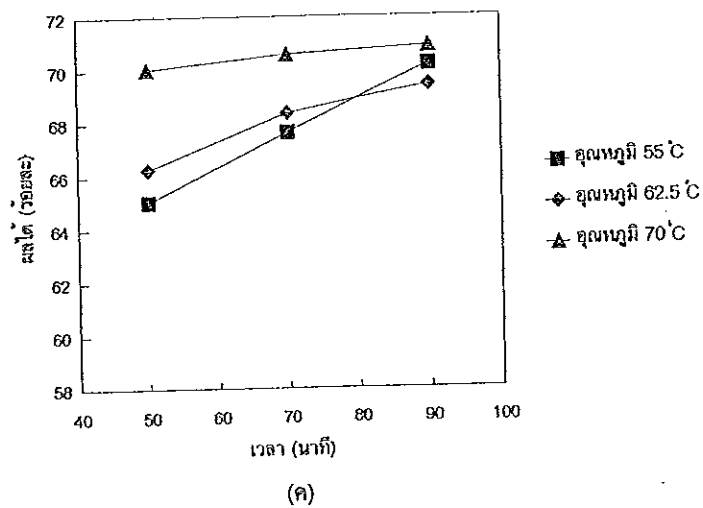
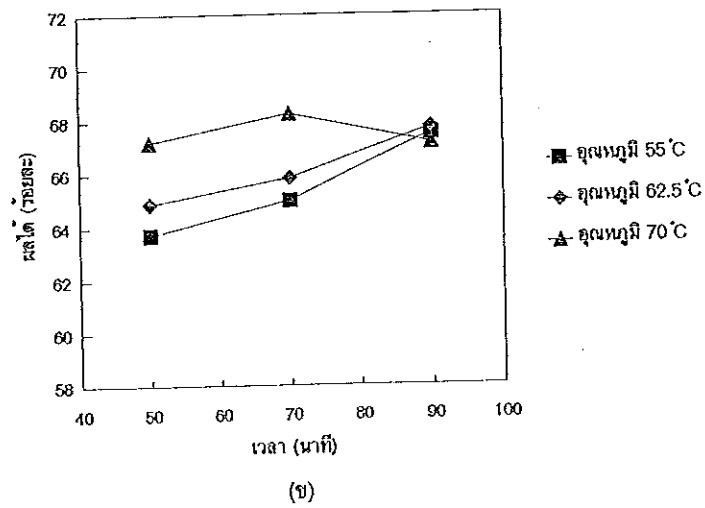
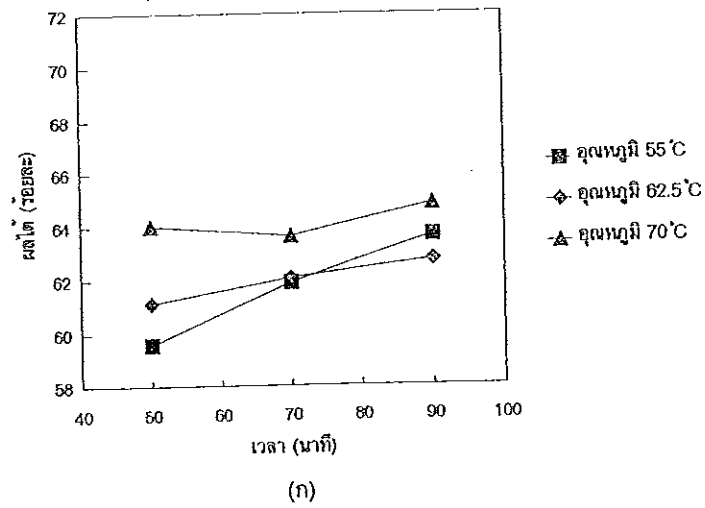




ภาพประกอบ 4.11 ผลของดว้ฟต่อปริมาณผลได้  
 (ก) เวลาในการสกัด 50 นาที  
 (ข) เวลาในการสกัด 70 นาที  
 (ค) เวลาในการสกัด 90 นาที



ภาพประกอบ 4.12 ผลของปุ๋ยหมักในการสกัดต่อปริมาณผลได้  
 (ก) ดัชนี 1.0  
 (ข) ดัชนี 1.5  
 (ค) ดัชนี 2.0



ภาพประกอบ 4.13 ผลของเวลาในการสกัดต่อปริมาณผลได้

(ก) คาร์ฟ 1.0

(ข) คาร์ฟ 1.5

(ค) คาร์ฟ 2.0

1. การใช้อุณหภูมิสูงแต่ใช้เวลาในการสกัดสั้น จากผลการสกัดโดยใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ดรีฟ 2.0 และเวลาในการสกัด 50 นาที พบว่าได้ผลได้ร้อยละ 70.03 ซึ่งสภาวะดังกล่าวเหมาะกับกระบวนการผลิตที่ต้องการใช้เวลาในการผลิตสั้น แต่ได้ผลได้สูง โดยยอมเสียค่าใช้จ่ายในการใช้อุณหภูมิในการผลิตสูง

2. การใช้อุณหภูมิต่ำแต่ใช้เวลาในการสกัดนาน จากผลการสกัดโดยใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ดรีฟ 2.0 และเวลาในการสกัด 90 นาที พบว่าได้ผลได้ร้อยละ 70.18 สภาวะดังกล่าวเหมาะสำหรับกระบวนการผลิตที่ต้องการประหยัดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการสกัด โดยยอมเสียเวลาในการผลิตนาน

อย่างไรก็ตามเรายังไม่สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางได้จริง ๆ เพราะดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ขอบเขตในการทำวิจัยของเราใช้ผลได้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ถูกต้องนัก เพราะควรคำนึงถึงปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่นพลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออก เพื่อทำน้ำสับประรดเข้มข้น ตลอดจนคุณภาพของผลได้ที่ได้ด้วย แต่ปัจจัยนี้ไม่ได้อยู่ในขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์

จากข้อมูลร้อยละผลได้ที่ได้จากการทดลองสกัดที่สภาวะต่าง ๆ กัน เราสามารถพิจารณาได้ว่า ดรีฟ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสกัดจะทำให้ได้อัตราการเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้ดังในตาราง 4.10 4.11 และ 4.12

ตาราง 4.10 การเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้เมื่อดรีฟเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการสกัด (นาที)	ร้อยละผลได้ที่เพิ่มขึ้นเมื่อดรีฟเพิ่มขึ้น	
		ช่วง 1.0 - 1.5	ช่วง 1.5 - 2.0
55	50	6.92	2.10
	70	4.69	4.11
	90	6.05	3.95
62.5	50	6.13	2.13
	70	6.09	3.84
	90	7.94	2.48
70	50	4.94	4.23
	70	7.28	3.37
	90	3.55	5.52
เฉลี่ย		5.98	3.53

จากตาราง 4.10 จะเห็นว่า เมื่อใช้ดริฟเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.0 เป็น 1.5 จะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยร้อยละ 5.98 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ดริฟในการสกัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.5 เป็น 2.0 จะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้น ร้อยละ 3.53 แสดงว่าการใช้ดริฟเพิ่มขึ้น จากช่วง 1.0 - 1.5 เป็นช่วง 1.5 - 2.0 จะได้อัตราการเพิ่มขึ้นของผลได้ลดลง ซึ่งไม่ได้หมายความว่า ผลได้ไม่ได้เพิ่มขึ้น แต่ผลได้เพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยลง ซึ่งอาจไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายในส่วนอื่นที่ต้องเสียไปก็เป็นได้ การใช้ดริฟมากกว่า 2.0 จะต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการระเหยน้ำออกไปด้วยว่าจะคุ้มกับผลได้ที่เพิ่มขึ้นหรือไม่ แต่ข้อมูลจากบทความในวารสารต่าง ๆ เกี่ยวกับการสกัดน้ำผลไม้ มักจะมีข้อสรุปว่า ไม่ควรใช้ดริฟเกิน 2.0 เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในกระบวนการระเหยน้ำออกสูงเกินไป ไม่คุ้มกับปริมาณผลได้ที่ได้เพิ่มขึ้น

ตาราง 4.11 การเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้เมื่อใช้เวลาในการสกัดนานขึ้น

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ดริฟ	ร้อยละผลได้ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสกัดนานขึ้น	
		ช่วง 50-70 นาที	ช่วง 70-90 นาที
55	1.0	3.91	2.83
	1.5	2.01	3.89
	2.0	4.01	3.74
62.5	1.0	1.52	1.11
	1.5	1.48	2.87
	2.0	3.18	1.52
70	1.0	-0.00624	1.92
	1.5	1.59	-1.63
	2.0	0.00757	0.00425
เฉลี่ย		1.97	1.81

จากตาราง 4.11 จะเห็นว่า เมื่อใช้เวลาในการสกัดนานขึ้นจากเดิม 50 นาทีเป็น 70 นาที จะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.97 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้เวลาในการสกัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 70 นาทีเป็น 90 นาที จะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยร้อยละ 1.81 จะเห็นว่า การใช้เวลาในการสกัดเพิ่มขึ้นจากช่วง 50 - 70 นาที เป็น 70 - 90 นาที ไม่ได้ทำให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลได้ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ใช้เวลาในการสกัดนานเกิน 90 นาที จากข้อมูลผลการทดลองจะเห็นว่า ผลผลิตอาจเพิ่มขึ้นไม่มาก เนื่องจากจะต้องพิจารณาปัจจัยอื่น เช่น ดริฟ และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อปริมาณผลได้ด้วยเช่นกัน

ตาราง 4.12 การเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้เมื่อใช้อุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้น

เวลาในการสกัด (นาที)	ดริฟ	ร้อยละผลได้ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น	
		ช่วง 55-62.5 C	ช่วง 62.5-70 C
50	1.0	2.60	4.53
	1.5	1.85	4.64
	2.0	1.88	5.69
70	1.0	0.00242	2.53
	1.5	1.32	3.68
	2.0	1.06	3.20
90	1.0	-1.43	3.35
	1.5	0.00326	-0.00856
	2.0	-1.10	2.09
เฉลี่ย		0.68	3.30

จากตาราง 4.12 จะเห็นว่า เมื่อใช้อุณหภูมิจากเดิม 55 องศาเซลเซียสเป็น 62.5 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยเพียงร้อยละ 0.6873 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อุณหภูมิจากเดิม 62.5 เป็น 70 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยร้อยละ 3.30 จะเห็นว่า การใช้อุณหภูมิจาก 62.5 - 70 องศาเซลเซียสทำให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลได้ที่สูงกว่า การใช้อุณหภูมิจาก 55 - 62.5 องศาเซลเซียส แสดงว่าผลได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิจากเดิมที่สูงขึ้น แต่จะต้องพิจารณาที่ปัจจัยอื่นด้วย เช่น ด้รภาพและเวลาที่ใช้ในการสกัด

#### ผลการพิชข้อมูลจากผลการทดลองกับแบบจำลอง Diffusion - Backmixing

ข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณ รวมทั้งข้อมูลอื่น ๆ ที่หามาได้ทั้งหมด จะถูกนำมาป้อนเข้าสู่โปรแกรม RCCE ดังในภาคผนวก ง.4 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว สำหรับระบบสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ เป็นแบบจำลองที่ใช้ทฤษฎีการแพร่ และทฤษฎีการผสมย้อนกลับ มาใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในทั้งสองเฟส ตัวอย่างการทำนายสำหรับการทดลองชุดที่ 1 โดยใช้โปรแกรม RCCE ดังในภาคผนวก ข. ภาพประกอบ ข.3

จากภาพประกอบ ข.3 จะเห็นว่า สามารถทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ กันได้ และยังแสดงการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของตัวละลายในทั้งสองเฟสที่ได้จากการทดลองจริง กับความเข้มข้นของตัวละลายในทั้งสองเฟสที่ได้จากการทำนายในรูปของค่ายกกำลังสองเฉลี่ย (mean square of error) สำหรับค่าตัวแปรที่ทำนายได้จากโปรแกรม RCCE เช่น จำนวนฟีดส์ F- แพกเตอร์ จำนวนไบออก  $q_1$ ,  $C_1$  และ ค่า time lead สำหรับการทำนายชุดต่าง ๆ แสดงดังตาราง 4.5 ส่วนผลการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบระหว่าง ความเข้มข้นของตัวละลายในทั้งสองเฟสที่ได้จากการทดลองจริง กับความเข้มข้นของตัวละลายในทั้งสองเฟสที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Diffusion - Backmixing สำหรับการทำนายชุดต่าง ๆ ดังในตาราง 4.13

จากตาราง 4.13 พบว่าในเฟสของแข็งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ตั้งแต่ 3.79 ถึง 8.75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (coefficient of deviation) (%CV) อยู่ในช่วง 5.93 - 15.92 ส่วนในเฟสของเหลวพบว่า มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 5.52 - 11.95 และสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนอยู่ในช่วง 19.35 - 31.88

ตาราง 4.13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริงกับผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง  
Diffusion - Backmixing

การทดลองที่	เฟสของแข็ง				เฟสของเหลว			
	S <sup>2</sup>	ค่าเฉลี่ย(x)	SD	%CV	S <sup>2</sup>	ค่าเฉลี่ย(x)	SD	%CV
1	15.20	65.74	3.90	5.93	37.26	31.52	6.10	19.35
2	22.77	64.70	4.77	7.37	76.62	41.83	8.75	20.92
3	26.70	62.93	5.17	8.22	77.65	43.43	8.81	20.28
4	38.39	58.96	6.20	10.52	30.83	27.26	5.52	20.25
5	14.38	59.26	3.79	6.40	54.21	30.83	7.36	23.87
6	16.28	58.38	4.03	6.90	77.34	33.20	8.79	26.48
7	20.70	56.49	4.55	8.05	58.72	24.03	7.66	31.88
8	35.48	55.55	5.96	10.73	72.72	27.04	8.53	31.54
9	46.27	54.61	6.80	12.45	72.43	29.11	8.51	29.23
10	23.22	62.10	4.82	7.76	63.05	35.22	7.94	22.54
11	25.29	60.77	5.03	8.28	112.01	43.42	10.58	24.37
12	55.10	59.02	7.42	12.57	85.98	44.56	9.27	20.80
13	57.75	59.27	7.60	12.82	39.99	32.64	6.32	19.36
14	22.69	57.44	4.76	8.29	59.02	34.44	7.62	22.12
15	46.29	57.16	6.80	11.90	56.27	36.67	7.50	20.45
16	63.94	55.55	8.00	14.40	51.74	27.22	7.19	26.41
17	69.84	55.86	8.36	14.96	59.04	29.98	7.68	25.62
18	51.95	55.17	7.21	13.07	114.43	33.74	10.70	31.71
19	44.62	60.21	6.68	11.09	62.97	40.56	7.94	19.58
20	51.00	58.29	7.14	12.25	76.89	44.08	8.77	19.89
21	60.80	57.70	7.80	13.52	78.95	45.41	8.88	19.56
22	74.50	58.46	8.63	14.76	69.60	37.43	8.34	22.28
23	70.91	56.72	8.42	14.84	84.22	38.95	9.18	23.57
24	58.52	54.90	7.65	13.93	142.72	41.18	11.95	29.02
25	76.62	54.96	8.75	15.92	49.59	28.98	7.04	24.29
26	56.01	52.42	7.48	14.27	118.21	34.98	10.87	31.07
27	65.14	53.44	8.07	15.10	97.95	39.08	9.90	25.33



จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติจะเห็นว่า แบบจำลอง Diffusion - Backmixing สามารถใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งได้ใกล้เคียงกว่าเฟสของเหลว

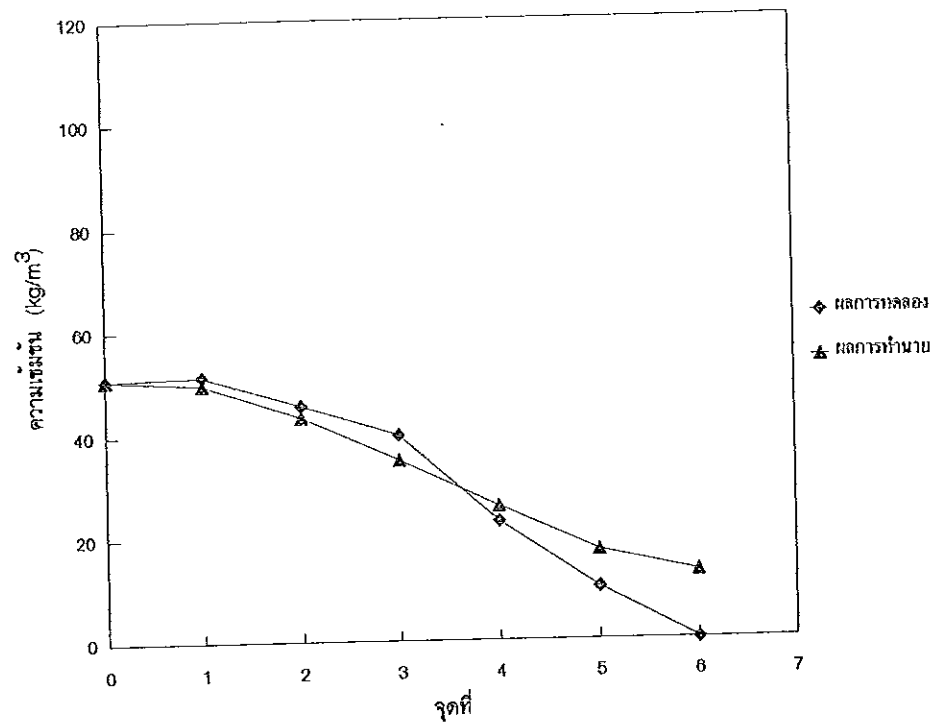
ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง สำหรับการทดลองชุดที่ 1 ดังตาราง 4.14

ตาราง 4.14 เปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวและเฟสของแข็งที่ได้จากผลการทดลองจริงกับผลการทำนายโดยแบบจำลอง

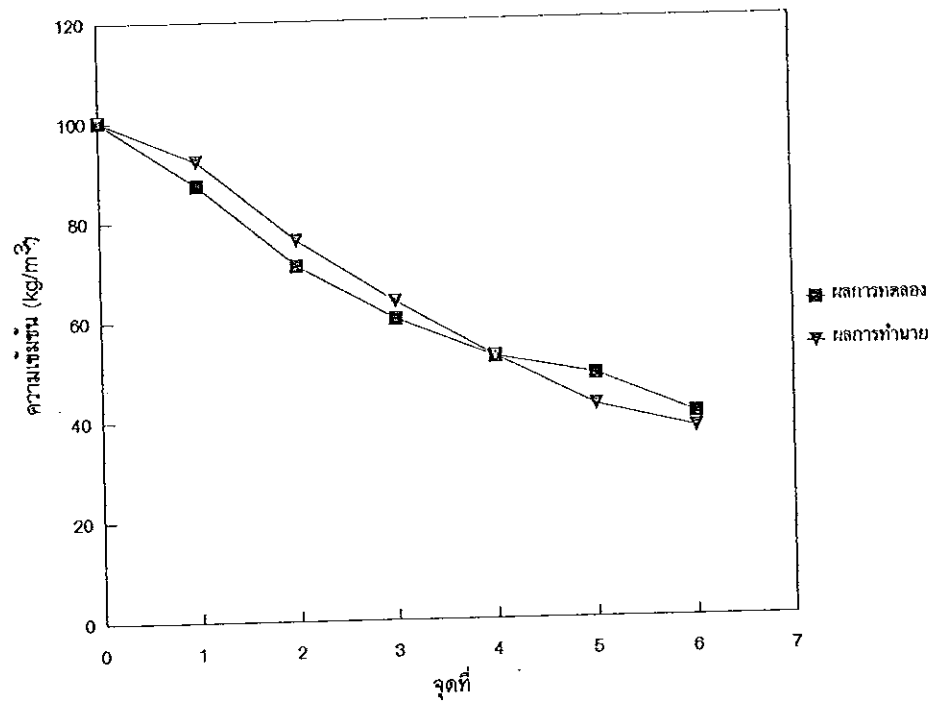
เวลา (วินาที)	ความเข้มข้นในเฟสของแข็ง		ความเข้มข้นในเฟสของเหลว	
	ผลการทดลอง	ผลการทำนาย	ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
0.00	100.27	100.27	50.89	50.80
341.94	87.29	92.14	51.30	49.71
1025.83	71.04	76.12	45.66	43.43
1709.72	60.18	63.58	39.83	34.94
2393.61	52.34	52.49	22.93	25.98
3077.50	48.56	42.39	10.06	17.22
3419.45	40.53	37.64	0.00	13.00

ข้อมูลความเข้มข้นจากตาราง 4.14 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของเหลวและเฟสของแข็งจากการทดลองกับผลการทำนาย ที่เวลาต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 4.14 สำหรับในเฟสของเหลว พบว่าค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ได้จากการทำนาย ผลจากการทำนายมีค่าน้อยกว่าผลจากการทดลองตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 0 ไปจนถึงจุดเก็บตัวอย่างที่ 4 จากนั้นเริ่มจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ความเข้มข้นของตัวละลายที่ได้จากการทดลอง จะมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นจากการทำนาย ทั้งนี้เป็นเพราะว่าจำนวนเพศเลท ภายในรางสกัดไม่คงที่ตลอดรางสกัด ที่บริเวณปลายรางสกัดด้านที่ป้อน



ภาพประกอบ 4.14 เปรียบเทียบความชื้นในเฟสของเหลวจากผลการทดลองกับผลการทำนายโดยแบบจำลอง



ภาพประกอบ 4.15 เปรียบเทียบความชื้นในเฟสของแข็งจากผลการทดลองกับผลการทำนายโดยแบบจำลอง

น้ำร้อนที่ใช้สกัดเข้าจะมีจำนวนเพศเลก สูงกว่าปลายรางด้านที่ป้อนเปลือกสับประดเข้า สามารถอธิบายได้ดังนี้

เนื่องจากผลของ ข้อสมมติ (assumption) ของแบบจำลอง Diffusion - Backmixing เอง ซึ่งเป็นแบบจำลองที่กำหนดให้มีการผสมย้อนกลับในเฟสของเหลวเท่ากันตลอดทั้งรางสกัด นั้นหมายถึงแบบจำลองนี้ได้กำหนดให้ จำนวนเพศเลก คงที่ และมีค่าน้อย ๆ เนื่องจากเกิดการผสมย้อนกลับ แสดงว่า เมื่อตัวละลายเกิดการแพร่เข้าสู่เฟสของเหลว จะทำให้เกิดการละลายเป็นเนื้อเดียวกับเฟสของเหลวทันที ดังนั้นจึงสามารถวัดความเข้มข้นของตัวละลายได้ทันที เมื่อเป็นเช่นนี้จึงเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่จุดปลายรางด้านที่น้ำร้อนเข้า จากผลการทำนายสามารถหาค่าได้ ไม่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์เหมือนกับผลจากการทดลอง

ในสภาวะการทดลองจริงจำนวนเพศเลก ไม่คงที่ เนื่องจากมีข้อจำกัดดังนี้

เครื่องสกัดถูกปรับให้มีมุมเอียง 5 องศา โดยที่ปลายรางด้านที่น้ำร้อนเข้า จะสูงกว่าปลายรางด้านที่เปลือกสับประดเข้า ซึ่งจะทำให้ความเร็วของเฟสของเหลวด้านปลายรางที่ปล่อยเฟสของเหลวเข้า จะสูงกว่าปลายรางด้านที่เปลือกสับประดเข้า เมื่อเป็นเช่นนี้ก็ส่งผลต่อระดับของการผสมย้อนกลับ คือ บริเวณปลายรางด้านที่เฟสของเหลวเข้าจะมีโอกาสในการเกิดการผสมย้อนกลับน้อย (backmixing น้อย) นั่นคือจำนวนเพศเลก มีค่ามาก ดังนั้นแสดงว่าในการทดลองจริง จำนวนเพศเลก จะไม่เท่ากันตลอดทั้งรางสกัด จากการที่ปลายรางสกัดด้านที่เฟสของเหลวเข้ามีโอกาสเกิดการผสมย้อนกลับน้อย จำนวนเพศเลก มีค่าสูง แต่การสัมผัสกันระหว่างเฟสของแข็งกับของเหลวไม่ดี เพราะมีเฟสของแข็งโผล่ขึ้นมา จึงทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่วัดได้จากการทดลองจริงตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 เป็นต้นไป มีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นในเฟสของเหลวที่ได้จากผลการทำนายโดยแบบจำลอง ซึ่งกำหนดให้จำนวนเพศเลกคงที่

จากภาพประกอบ 4.15 ในเฟสของแข็ง เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ได้จากการทดลอง กับความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง พบว่า ตั้งแต่จุดที่ 0 จนถึงปลายจุดที่ 3 ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ได้จากการทำนาย มีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองจริง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองในกรณีเฟสของเหลว ส่วนตั้งแต่จุดที่ 4 เป็นต้นไป ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ได้จากการทำนาย มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในเฟสของแข็งที่ได้จากการทดลองจริง เพราะว่าในช่วงจุดเก็บตัวอย่างดังกล่าวจะมีเฟสของแข็งโผล่ขึ้นมาจากผิวหน้าเฟส

ของเหลว ซึ่งทำให้การสกัดเกิดขึ้นได้ไม่ดี จึงเหลือความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งมากกว่าค่าที่ได้จากผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Diffusion - Backmixing

สำหรับข้อมูลและกราฟความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่ได้จากผลการทดลองจริง และค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้ แบบจำลอง ของการทดลองชุดต่าง ๆ ดังในภาคผนวก จ.2

ผลการหา number of transfer unit (NTU) และ height of transfer unit (HTU)

จากการหาค่า NTU และ HTU ตามวิธีการในภาคผนวก ข. พบว่า ได้ค่า NTU และ HTU สำหรับการทดลองชุดต่าง ๆ ดังในตาราง 4.15 ข้อมูลในตาราง นำมาเขียนเพื่อแสดงผลของกราฟ อุณหภูมิ และ เวลาในการสกัด ต่อ HTU ดังภาพประกอบ 4.16 , 4.17 และ ภาพประกอบ 4.18 ตามลำดับ

จากตาราง 4.15 จะเห็นว่า ค่า NTU ที่ได้จากการทดลองสกัด มีค่าอยู่ระหว่าง 1.68 ถึง 4.63 และ HTU อยู่ระหว่าง 0.43 - 1.19 แสดงว่าประสิทธิภาพในการสกัดของแต่ละชุดการทดลองไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับ กราฟ อุณหภูมิ และเวลาในการสกัด ดังนี้

### 1. ผลของกราฟต่อ HTU

จากภาพประกอบ 4.16 จะเห็นว่า เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น จะทำให้ HTU มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่กราฟเพิ่มขึ้นจะทำให้ driving force มากขึ้นดังนั้น NTU จึงลดลงตามสมการ(ท.1) นั่นคือ HTU เพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อกราฟเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสกัดน้อยลง

### 2. ผลของอุณหภูมิต่อ HTU

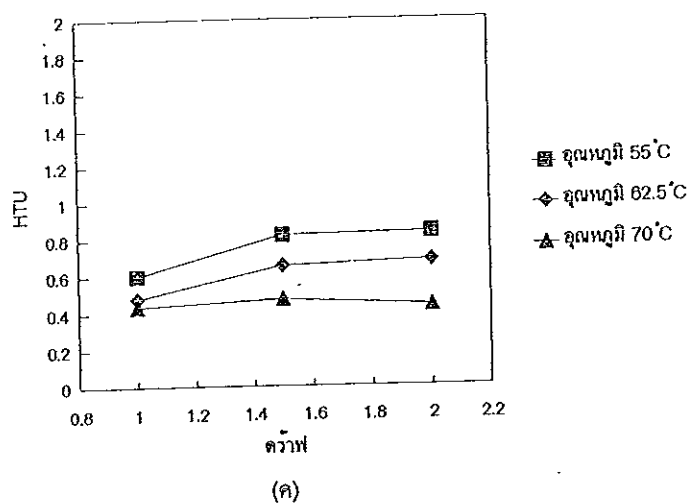
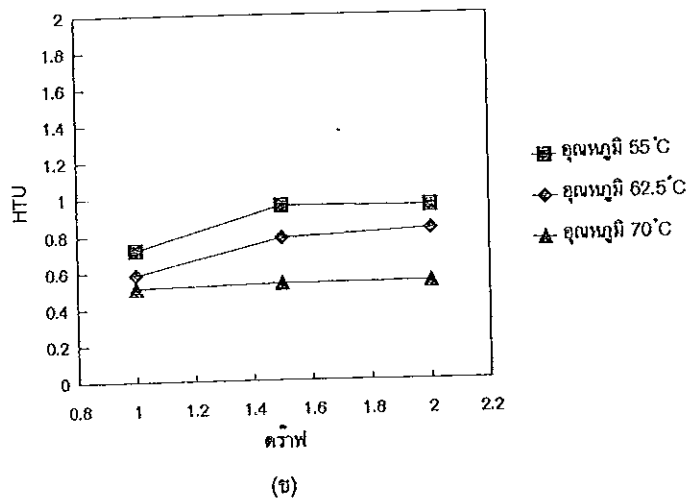
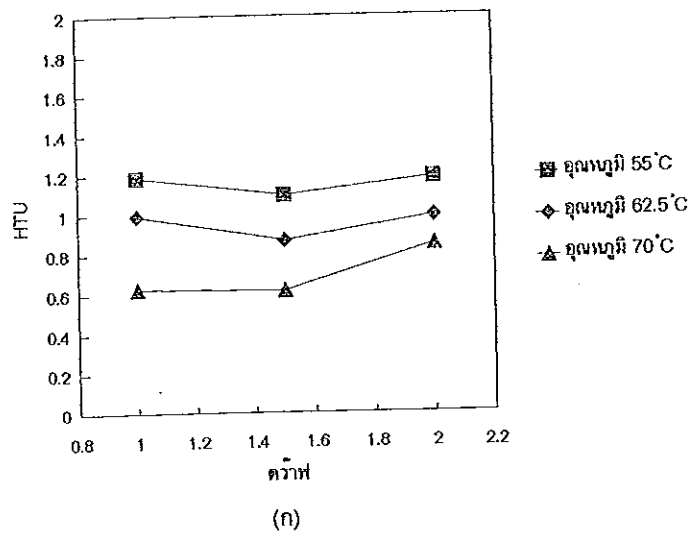
จากภาพประกอบ 4.17 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้ HTU ลดลง เนื่องจากการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้การไหลเวียนของเฟสของเหลวบริเวณผิวหน้าเฟสของแข็ง เนื่องจากระบวนการพาดีซีชั่น สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเพิ่มขึ้น นั่นคือประสิทธิภาพในการสกัดสูง (HTU ลดลง)

### 3. ผลของเวลาในการสกัดต่อ HTU

จากภาพประกอบ 4.18 จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการสกัดนานขึ้น จะทำให้ HTU มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้เวลาในการสกัดนาน ทำให้ระดับความสูงของเฟสของแข็งภายในรางสกัดสูงกว่า การใช้เวลาในการสกัดสั้น ๆ นั่นคือถ้าใช้เวลาในการสกัดนาน จะมีพื้นที่หน้าตัดของเฟสของแข็งเพิ่มขึ้น พิจารณาสมการ (ท.3) จากภาคผนวก ข

ตาราง 4.15 ค่า NTU และ HTU จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ เมื่อวางสัปดาห์ยาว 2.0 เมตร

การทดลองที่	ระยะเวลาสกัด (นาที)	ดริฟท์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	NTU	HTU
1	50	1.0	55	1.68	1.19
2	70	1.0	55	2.77	0.72
3	90	1.0	55	3.33	0.60
4	50	1.5	55	1.82	1.10
5	70	1.5	55	2.09	0.96
6	90	1.5	55	2.43	0.82
7	50	2.0	55	1.69	1.18
8	70	2.0	55	2.10	0.95
9	90	2.0	55	2.39	0.84
10	50	1.0	62.5	2.01	0.99
11	70	1.0	62.5	3.42	0.58
12	90	1.0	62.5	4.17	0.48
13	50	1.5	62.5	2.30	0.87
14	70	1.5	62.5	2.56	0.78
15	90	1.5	62.5	3.06	0.65
16	50	2.0	62.5	2.02	0.99
17	70	2.0	62.5	2.42	0.83
18	90	2.0	62.5	2.94	0.68
19	50	1.0	70	3.20	0.62
20	70	1.0	70	3.93	0.51
21	90	1.0	70	4.63	0.43
22	50	1.5	70	3.25	0.62
23	70	1.5	70	3.77	0.53
24	90	1.5	70	4.23	0.47
25	50	2.0	70	2.36	0.85
26	70	2.0	70	3.71	0.54
27	90	2.0	70	4.58	0.44

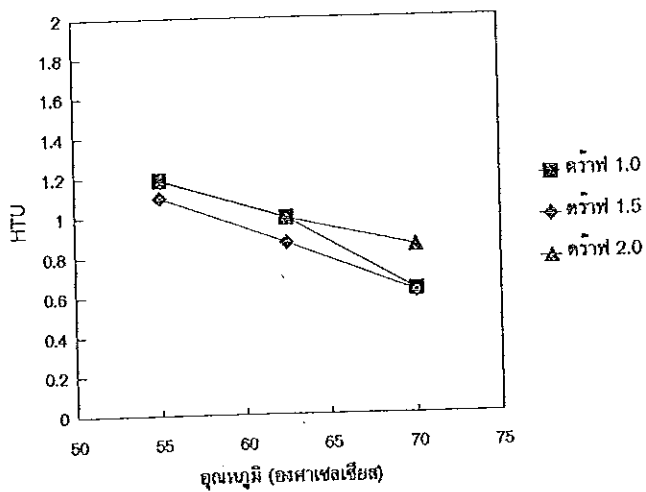


ภาพประกอบ 4.16 ผลของกราฟต่อ HTU

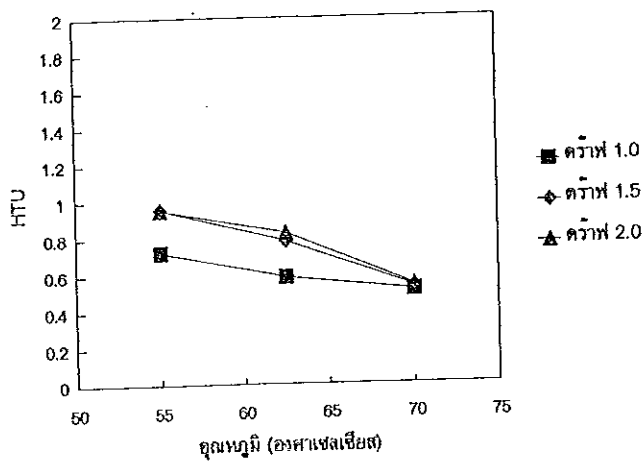
(ก) เวลาในการสกัด 50 นาที

(ข) เวลาในการสกัด 70 นาที

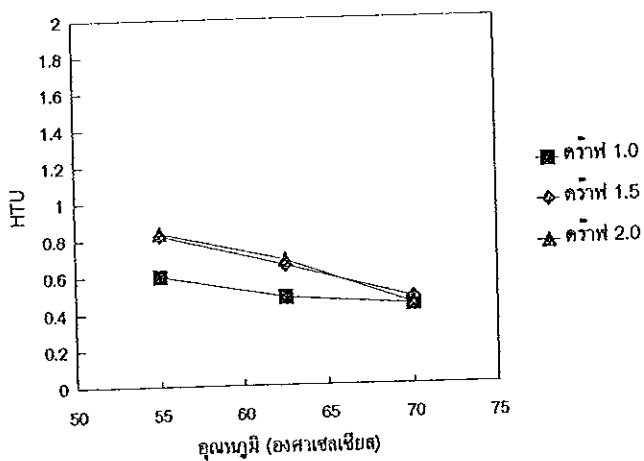
(ค) เวลาในการสกัด 90 นาที



(ก)



(ข)



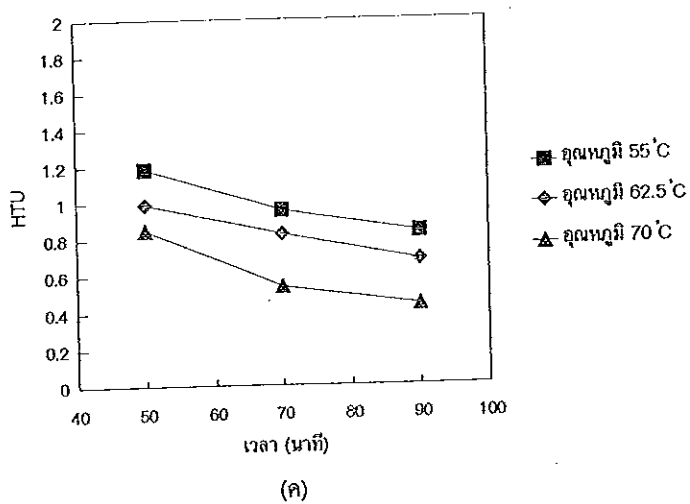
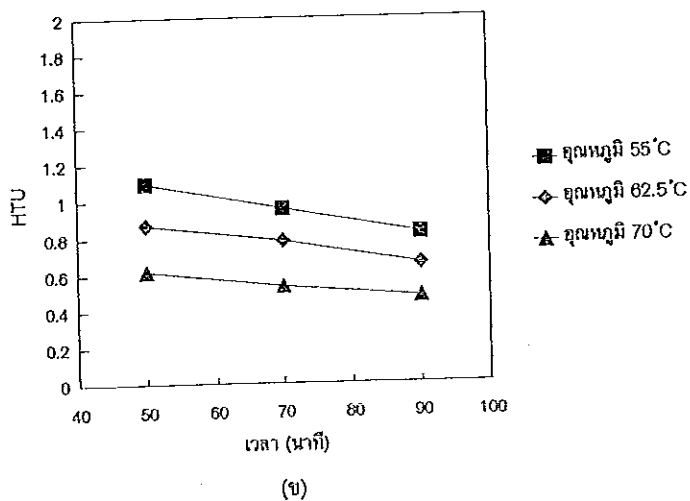
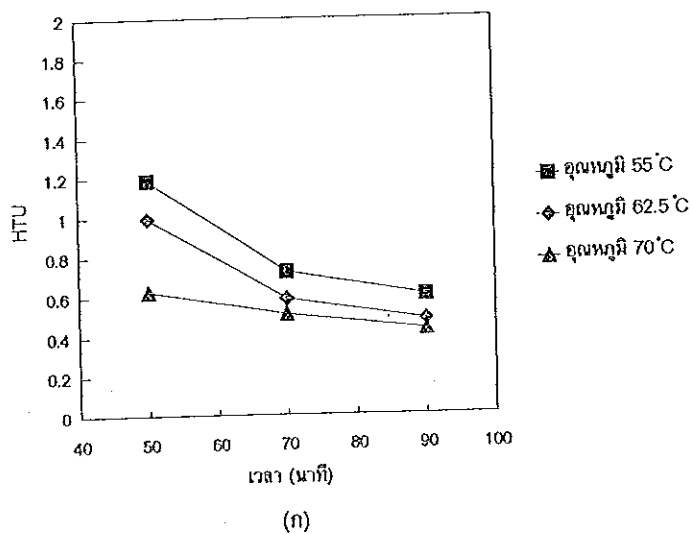
(ค)

ภาพประกอบ 4.17 ผลของอุณหภูมิในการสกัดต่อ HTU

(ก) draft 1.0

(ข) draft 1.5

(ค) draft 2.0



ภาพประกอบ 4.18 ผลของเวลาในการสกัดต่อ HTU  
 (ก) ดัชนี 1.0  
 (ข) ดัชนี 1.5  
 (ค) ดัชนี 2.0



$$HTU = \frac{S/A}{K_x}$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัด (A) เพิ่มขึ้นจะทำให้ HTU น้อยลง นั่นคือ เมื่อใช้เวลาในการสกัดนานขึ้นจะทำให้ HTU น้อยลง ประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น

#### 4. การหาประสิทธิภาพของเครื่องสกัดแต่ละช่วง

จากการแบ่งรางสกัดออกเป็น 6 ช่วง หา HTU แต่ละช่วง ดังตัวอย่างของการทดลองสกัดชุดต่าง ๆ ในตาราง 4.16

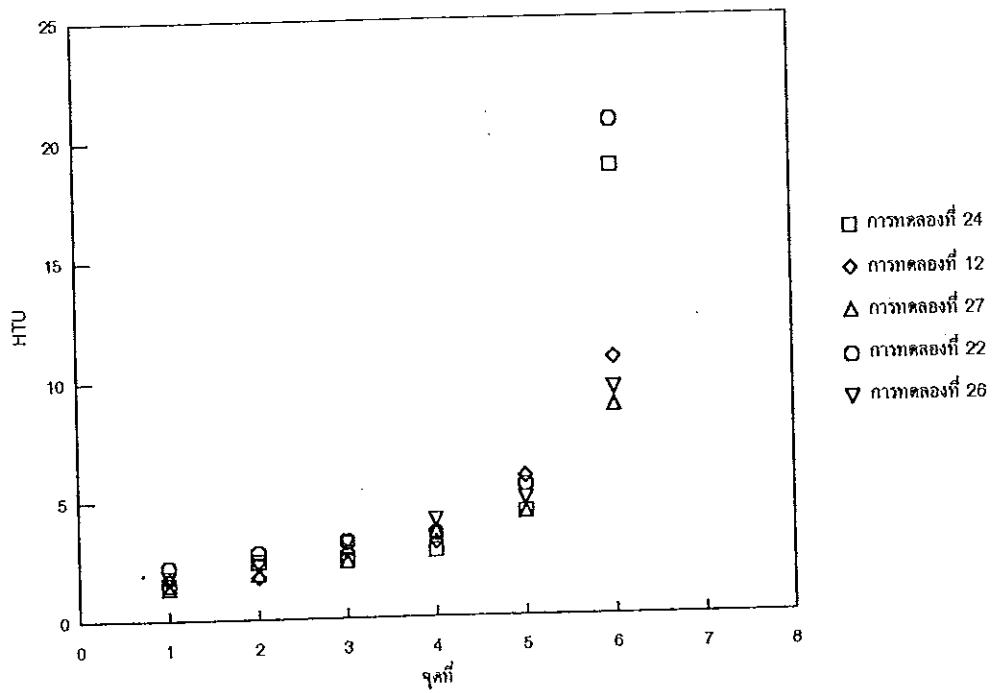
ตาราง 4.16 ค่า HTU แต่ละช่วงในเครื่องสกัด ของการทดลองชุดต่าง ๆ

ช่วง	HTU				
	การทดลองที่ 24	การทดลองที่ 12	การทดลองที่ 27	การทดลองที่ 22	การทดลองที่ 26
0 - 1	1.54	1.70	1.37	2.26	1.83
1 - 2	2.42	1.80	1.91	2.81	2.31
2 - 3	2.45	2.79	2.41	3.23	3.12
3 - 4	2.78	3.14	3.59	3.48	4.05
4 - 5	4.33	5.84	4.39	5.51	4.90
5 - 6	18.80	10.73	8.76	20.66	9.45

ข้อมูลในตาราง 4.16 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า HTU กับจุดเก็บตัวอย่าง ดังภาพประกอบ 4.19

จากภาพประกอบ 4.19 จะเห็นว่า ค่า HTU ของเครื่องสกัดที่จุดต่าง ๆ ในรางสกัดไม่เท่ากันโดย ค่า HTU จะเพิ่มขึ้นตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ถึงจุดเก็บตัวอย่างที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นในเฟสของแข็งที่เหลืออยู่ที่จุดต่าง ๆ แสดงว่า ประสิทธิภาพในการสกัดแต่ละช่วงของเครื่องสกัดไม่เท่ากัน คือ ประสิทธิภาพในการสกัดสูงที่สุดตรงบริเวณจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ประสิทธิภาพในการสกัดลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดเก็บตัวอย่างที่ 6 จะมีประสิทธิภาพในการสกัดต่ำที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เฟสของแข็งกับเฟสของเหลวสัมผัสกันได้ไม่เต็มที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณปลายรางสกัด (ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 เป็นต้นไป) ซึ่งเฟสของแข็งไหลผ่านผิวหน้าเฟส

ของเหลว สำหรับการทดลองชุดอื่น ๆ ค่า HTU ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ไปจนถึงจุดเก็บตัวอย่างที่ 6 เช่นเดียวกัน

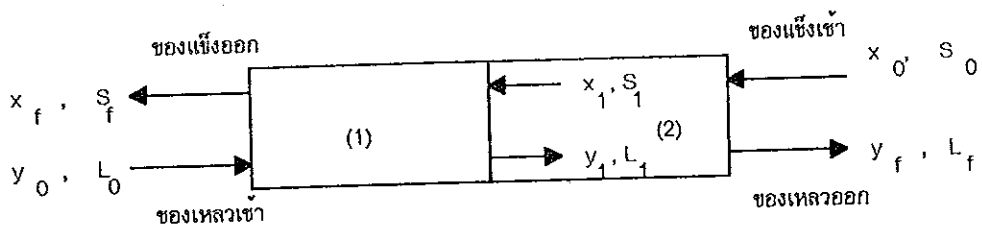


ภาพประกอบ 4.19 ค่า HTU ที่จุดต่าง ๆ ในรางสกัดของการทดลองชุดต่าง ๆ

บทที่ 5

การวิเคราะห์ระบบการสกัดโดยใช้แบบจำลอง

1. ผลของการที่เฟสของแข็งไม่ได้สัมผัสกับเฟสของเหลวอย่างเต็มที่ตลอดรางสกัด  
การทำดุลมวลของระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง



ภาพประกอบ 5.1 ดุลมวลของระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง เมื่อแบ่งรางสกัดออกเป็น 2 ส่วน

ดุลมวลรวม

$$L_0 y_0 + S_0 x_0 = L_f y_f + S_f x_f$$

ที่สถานะคงตัวสมดุลของตัวละลายระหว่างเฟสของแข็งกับเฟสของเหลวตั้งสมการ

$$y^* = mx^*$$

จากผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (m) ได้เท่ากับ 1.14

จากผลการทดลองชุดที่ 27 พบว่า

$$x_f = 32.67 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$y_1 = 32.01 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

กำหนดให้  $L_0 = L_f = 24$  ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

พิจารณาเครื่องสกัดส่วนที่ (1)

$$L_0 y_0 + S_1 x_1 = L_f y_f + S_f x_f$$

จะได้ตัวละลายออกจากเครื่องสกัดส่วนที่ (1)  $= 32.01 \times 24 = 768.24$  กิโลกรัม

จาก  $\alpha = \frac{L_0 m}{S_0}$

ในที่นี้  $\alpha = 1.51$   $m = 1.14$  จะได้

$$S_0 = \frac{24 \times 1.14}{1.51} = 18.12 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง}$$

จะได้ตัวละลายเหลืออยู่ในเปลือกสับปะรดตรงทางออกส่วนที่ (1)

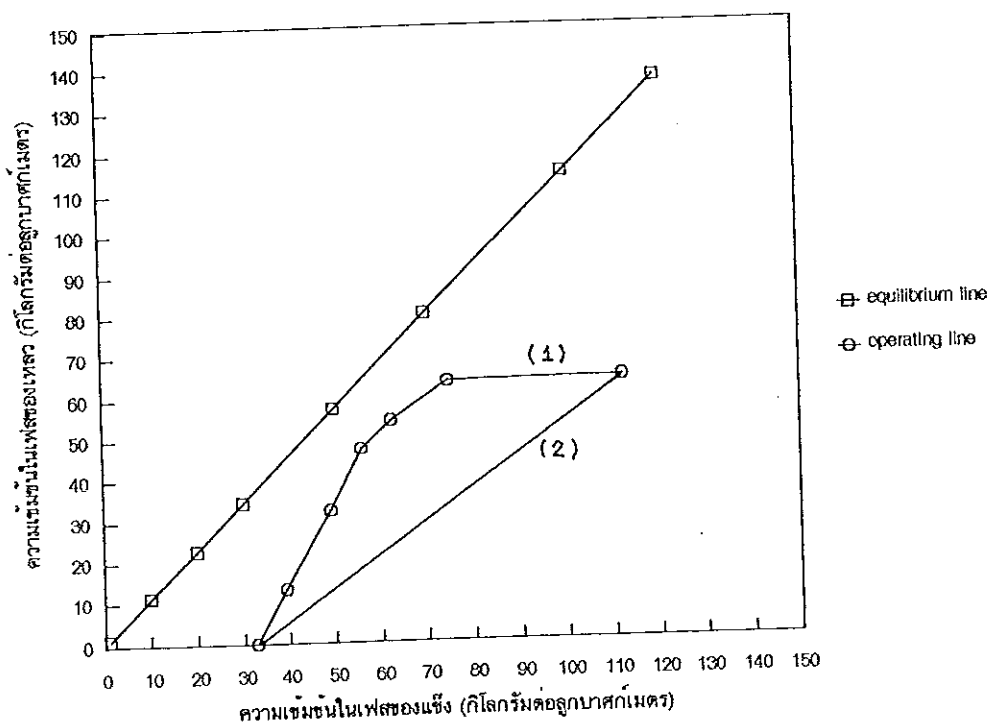
$$= 32.67 \times 18.12 = 591.98 \text{ กิโลกรัม}$$

ตัวละลายในเปลือกสับปะรดเข้า = ตัวละลายที่เหลืออยู่ในเปลือก + ตัวละลายในเฟสของเหลว

$$= 591.98 + 768.24 = 1360.22 \text{ กิโลกรัม}$$

จะได้  $x_1 = \frac{1360.22}{18.12} = 75.07$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อลากเส้นตรงระหว่างจุด  $(x_1, y_1)$  กับ  $(x_1, y_1)$  จะได้เส้นดำเนินการ (operating line) สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่องที่มีการผสมในเฟสของเหลวและเฟสของแข็งแบบปลั๊ก ไม่มีการผสมย้อนกลับเกิดขึ้น ดังในภาพประกอบ 5.2



ภาพประกอบ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวของการทดลองชุดที่ 27

เมื่อเปรียบเทียบเส้นดำเนินการที่ได้จากผลการทดลองจริง (เส้นที่ 1) กับเส้นดำเนินการสำหรับการผสมแบบปลั๊ก (เส้นที่ 2) จะเห็นว่าเส้นดำเนินการที่ได้จากผลการทดลองจริงเป็นเส้นโค้ง เพราะตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 0 - 3 ความเข้มข้นในเฟสของแข็งลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเข้มข้นในเฟสของเหลวลดลงไม่มาก ซึ่งเป็นเพราะผลของการผสมย้อนกลับ ในขณะที่เส้นดำเนินการสำหรับการผสมแบบปลั๊ก ได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการทดลองของเราที่มีการผสมย้อนกลับมาก (จำนวนเพคเลต R มีค่าน้อย อยู่ในช่วง 1.5 - 3.6)

จากการสังเกตในขณะทำการทดลองพบว่า ตรงบริเวณปลายตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 เฟสของแข็งจะเริ่มโผล่พ้นผิวหน้าเฟสของเหลว ซึ่งจะทำให้การสัมผัสกันระหว่างเฟสของแข็งกับเฟสของเหลวเกิดขึ้นได้ไม่ดี ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง ตัวอย่างเช่น ในภาคผนวก จ.2 สำหรับการทดลองชุดที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าตรงบริเวณปลายจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 พบว่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ได้จากผลการทดลองจริงมีค่าน้อยกว่า ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ส่วนในเฟสของแข็งก็ได้ผลตรงกันข้ามกันดังที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 4 ที่เป็นเช่นนี้เราคาดว่าอาจเป็นเพราะ การที่เฟสของแข็งกับเฟสของเหลวสัมผัสกันไม่ได้ดี ทำให้จำนวนไบออก และจำนวนเพคเลทไม่คงที่ตลอดรางสกัด โดยที่สามารถคาดการณ์ได้ว่า

1. บริเวณปลายรางด้านที่มีน้ำร้อนเข้า น่าจะมีจำนวนเพคเลทมากกว่าบริเวณปลายรางด้านที่เปลือกล้างประรดเข้า เพราะเนื่องจากปลายทางด้านน้ำร้อนเข้าเฟสของเหลวมีความเร็วในการไหลสูงกว่า จึงเกิดการผสมย้อนกลับได้น้อยกว่า แสดงว่า มีค่า  $R$  มาก

2. บริเวณปลายรางด้านที่มีน้ำร้อนเข้า น่าจะมีจำนวนไบออกต่ำกว่าบริเวณปลายรางด้านที่เปลือกล้างประรดเข้า เนื่องจากตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 มีเฟสของแข็งโผล่พ้นผิวหน้าเฟสของเหลว ของแข็งส่วนที่จมน้ำจะเกิดการหมุนเวียนของเฟสของเหลวได้ดี แต่ส่วนที่ไม่สัมผัสกับเฟสของเหลวก็จะไม่มีการหมุนเวียนของเฟสของเหลวโดยกระบวนการพา เมื่อมองภาพรวมคาดว่าเกิดการเกิดกระบวนการถ่ายโอนโดยกระบวนการพาลดลง ทำให้ความต้านการถ่ายโอนมวลจากภายนอกโดยรวมแล้วมีค่ามาก นั่นคือ  $B_i$  ลดลง และ  $K_x$  ลดลง

จากข้อจำกัดของแบบจำลอง คือ กำหนดให้แบบจำลองนี้มีจำนวนไบออก และจำนวนเพคเลท คงที่ตลอดรางสกัด แต่จากผลการทดลองจริงไม่ได้เป็นเช่นนั้น จึงทำให้แบบจำลองนี้ผิดกับผลการทดลองโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเฟสของเหลวได้ไม่ดีนัก

จึงเกิดแนวความคิดในการตรวจสอบสมมติฐาน โดยการแบ่งรางสกัดออกเป็น 2 ส่วน และกำหนดให้ค่า  $B_i$  และ  $R$  ของรางสกัด 2 ส่วน ไม่เท่ากัน ดังนี้

ส่วนที่ 1 กำหนดให้เริ่มจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 0 (บริเวณเปลือกล้างประรดเข้า) จนถึงปลายบริเวณจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ( $B_i = 3.97$ ,  $R = 3.2$ )

ส่วนที่ 2 กำหนดให้เริ่มจากจุดเก็บตัวอย่างที่ 4 จนถึงจุดเก็บตัวอย่างที่ 6 (บริเวณเปลือกล้างประรดออก) ( $B_i = 0.33$ ,  $R = 20$ )

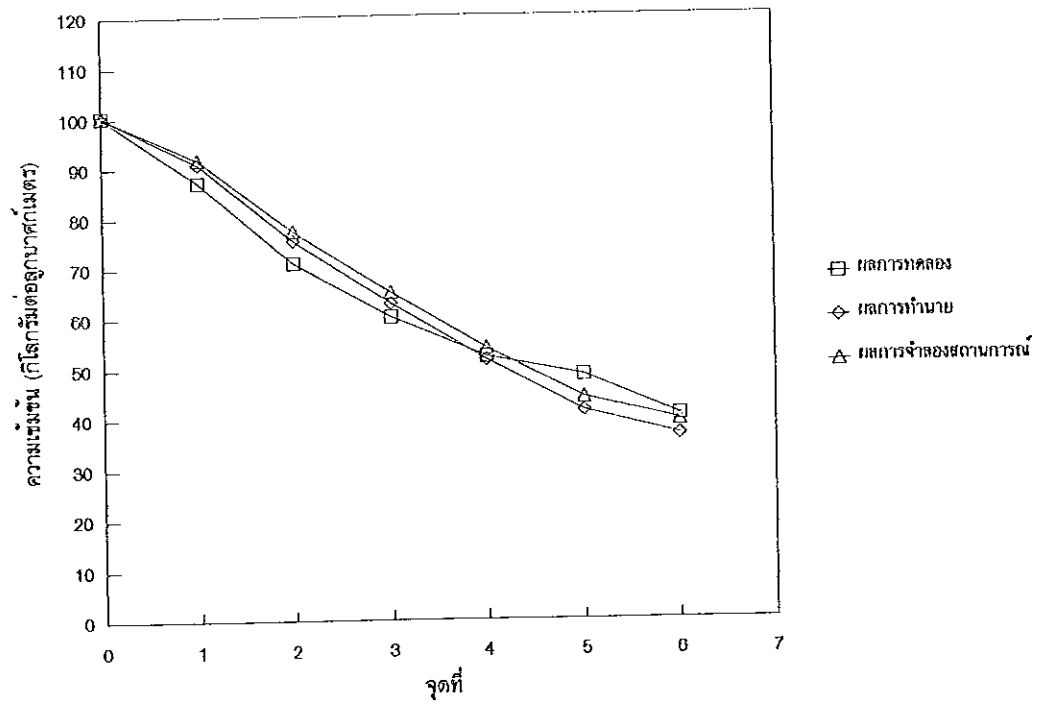
โดยที่กำหนดให้ส่วนที่ 2 มีจำนวนไบออกต่ำกว่า และมีจำนวนเพศสูงกว่าส่วนที่ 1 ด้วยเหตุผลดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ผลจากการจำลองสถานการณ์ (simulation) จะได้ความเข้มข้นในเพศของแข็งและเพศของเหลวที่จุดต่าง ๆ จากการทดลองชุดที่ 1 ดังในตาราง 5.1

ตาราง 5.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวละลายในเพศของแข็งและเพศของเหลว จากผลการทดลองจริง ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง และผลการจำลองสถานการณ์ (การแบ่งรังสั๊กได้ออกเป็น 2 ส่วน)

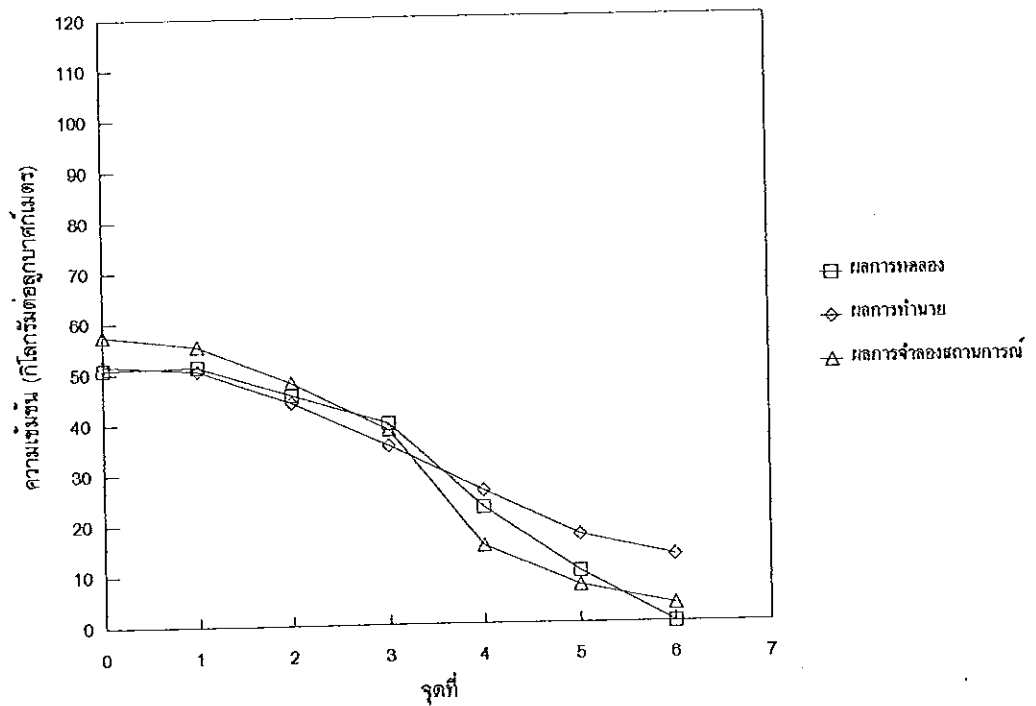
จุดที่	ความเข้มข้น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					
	เพศของแข็ง			เพศของเหลว		
	ผลการทดลอง	ผลทำนาย	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการทดลอง	ผลทำนาย	ผลการจำลองสถานการณ์
0	100.29	100.29	100.29	50.59	51.63	57.50
1	87.29	90.87	91.86	51.30	50.50	55.39
2	71.04	75.52	77.41	45.66	44.05	48.01
3	60.18	62.79	65.06	39.83	35.38	38.52
4	52.34	51.59	53.99	22.93	26.26	15.25
5	48.56	41.42	44.17	10.06	17.39	7.32
6	40.53	36.64	39.51	0.00	13.13	3.52

ข้อมูลในตาราง 5.1 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวละลายในเพศของแข็งและเพศของเหลว ที่จุดที่ต่าง ๆ ดังในภาพประกอบ 5.3

จากภาพประกอบ 5.3 จะเห็นว่าแม้ว่าแบบจำลองนี้ไม่สามารถจะใช้ในการจำลองสถานการณ์ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองเอง แต่จากการที่กำหนดให้แบ่งเครื่องสั๊กได้ออกเป็น 2 ส่วน ก็พอที่จะบอกได้ว่าในเพศของเหลวผลจากการจำลองสถานการณ์จะได้ความเข้มข้นของตัวละลายที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากยิ่งขึ้น โดยที่ความเข้มข้นตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ลดลงใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ในขณะที่เพศของแข็ง จะได้ความเข้มข้นของตัวละลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับในเพศของเหลว



(ก) เฟสของแข็ง



(ข) เฟสของเหลว

ภาพประกอบ 5.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว จากผลการทดลอง จากผลการทำนายโดยแบบจำลอง และจากการจำลองสถานการณ์ (โดยแบ่งวางสกัดออกเป็น 2 ส่วน) ของการทดลองชุดที่ 1

ดังนั้นสามารถพิสูจน์สมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ คือ บริเวณส่วนที่ 2 ของเครื่องสกัดจะมีจำนวนไบออกต่ำกว่า และมีจำนวนเพศเลทสูงกว่า บริเวณส่วนที่ 1 ของเครื่องสกัดจริง แสดงว่าเครื่องสกัดของเรามีประสิทธิภาพไม่สูงนัก

การที่จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องสกัดสูงขึ้น ควรจะทำให้มีจำนวนไบออกในส่วนที่ 2 ของเครื่องสกัดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการออกแบบเครื่องสกัดให้มีความจุที่เหมาะสมกับอัตรา การไหลเข้าออก ของเฟสของแข็งและเฟสของเหลว โดยที่ทำให้เฟสของแข็งกับเฟสของแข็งเกิดการสัมผัสกันมากที่สุด

## 2. การเปรียบเทียบผลของการผสมแบบปลั๊ก และการผสมย้อนกลับ

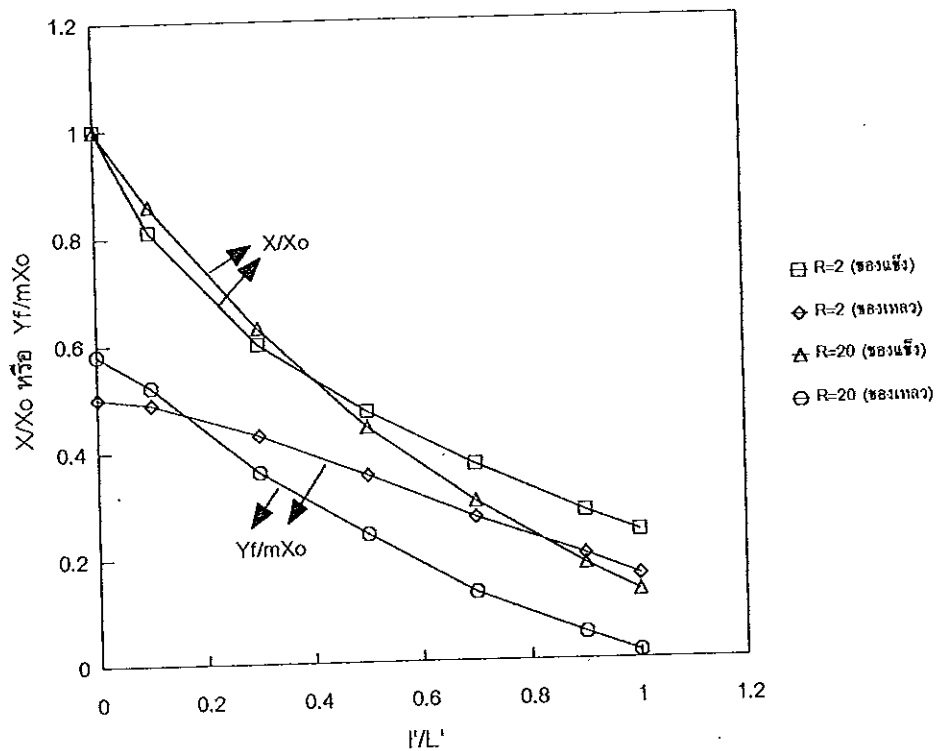
สมมติสภาวะการสกัด ให้  $Bi \rightarrow \infty$ ,  $m=1.14$ ,  $\alpha = 1.5$  เวลาในการสกัด 50 นาที อุณหภูมิในการสกัด 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที) จะได้ โปรไฟล์ความเข้มข้นที่จุดต่าง ๆ ในรางสกัดดังตาราง 5.2

ตาราง 5.2 ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ เมื่อ  $Bi \rightarrow \infty$ ,  $m=1.14$ ,  $\alpha = 1.5$   
เวลาในการสกัด 50 นาที อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส  
( $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที)

$l'/L'$	R = 2		R = 20	
	$x/x_0$	$y_1/mx_0$	$x/x_0$	$y_1/mx_0$
0.0	1.00	0.50	1.00	0.58
0.1	0.81	0.49	0.86	0.52
0.3	0.60	0.43	0.63	0.36
0.5	0.47	0.35	0.44	0.24
0.7	0.37	0.27	0.30	0.13
0.9	0.28	0.20	0.18	0.051
1.0	0.24	0.16	0.13	0.016

ข้อมูลในตาราง 5.2 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $x/x_0$  หรือ  $y_1/mx_0$  กับ  $l'/L'$  ดังในภาพประกอบ 5.4





ภาพประกอบ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $x/x_0$  หรือ  $y_f/mx_0$  กับ  $l'/L'$  เมื่อ  $Bi \rightarrow \infty$   
 $m = 1.14$ ,  $\alpha = 1.5$  เวลาในการสกัด 50 นาที อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_S = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที)

จากภาพประกอบ 5.4 กรณีที่ไม่มี การผสมย้อนกลับ ( $R=20$ ) เปรียบเทียบกับกรณีที่ มีการผสมย้อนกลับ ( $R=2$ ) จะเห็นว่า การผสมย้อนกลับทำให้เกิดสิ่งที่ไม่สังเกต 3 ประการคือ

1. ค่า  $y_f/mx_0$  ที่  $l'/L' = 1.0$  (ตรงบริเวณทางเข้าของน้ำร้อนที่ใช้ในการสกัด) ในกรณีที่  $R=2$  จะมีค่ากระโดดขึ้นไปอยู่ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งไม่เท่ากับ ศูนย์ (ค่า  $y_f/mx_0$  ที่  $l'/L' = 1.0$  มีค่าเท่ากับ ศูนย์ เมื่อ  $R=20$ )

2. ค่า  $y_f/mx_0$  ที่  $l'/L' = 0$  (ตรงบริเวณทางเข้าของเฟสของแข็ง) เมื่อ  $R=2$  จะมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับ กรณีที่  $R=20$  แสดงให้เห็นว่าการผสมย้อนกลับทำให้ตัวละลายในเฟสของแข็งเข้ามาอยู่ในเฟสของเหลวได้น้อยลง

3. ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว (driving force) น้อยลง

### 3. ผลของการผสมย้อนกลับ และจำนวนใบออกต่อผลได้ (yield)

การปรับความเร็วรอบการหมุนของสกรูไปหน้า และถอยหลังให้สูงขึ้น จะช่วยให้เกิดการไหลเวียนของเฟสของเหลวที่อยู่ผิวหน้าเฟสของแข็ง โดยกระบวนการพาได้ดีขึ้น ความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็งมีค่าลดลง นั่นคือ  $Bi$  จะสูงขึ้น ทำให้ผลได้สูงขึ้นด้วย แต่กลับทำให้มีการผสมย้อนกลับมากขึ้น ( $R$  ลดลง) ซึ่งเป็นผลให้ผลได้ลดลง ดังนั้นจะเห็นว่า การทำให้สกรูหมุนไปข้างหน้าและหมุนถอยหลังจะมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งต้องมีการทดสอบโดยการจำลองสถานการณ์ เพื่อศึกษาผลของ ค่า  $Bi$  กับ  $R$  ที่มีต่อผลได้ ว่าพารามิเตอร์ตัวไหนจะมีอิทธิพลต่อผลได้มากกว่ากัน

#### 3.1 ผลของจำนวนเพศต่อผลได้

สภาวะการสกัดสำหรับการทดลองชุดที่ 1 ดังนี้

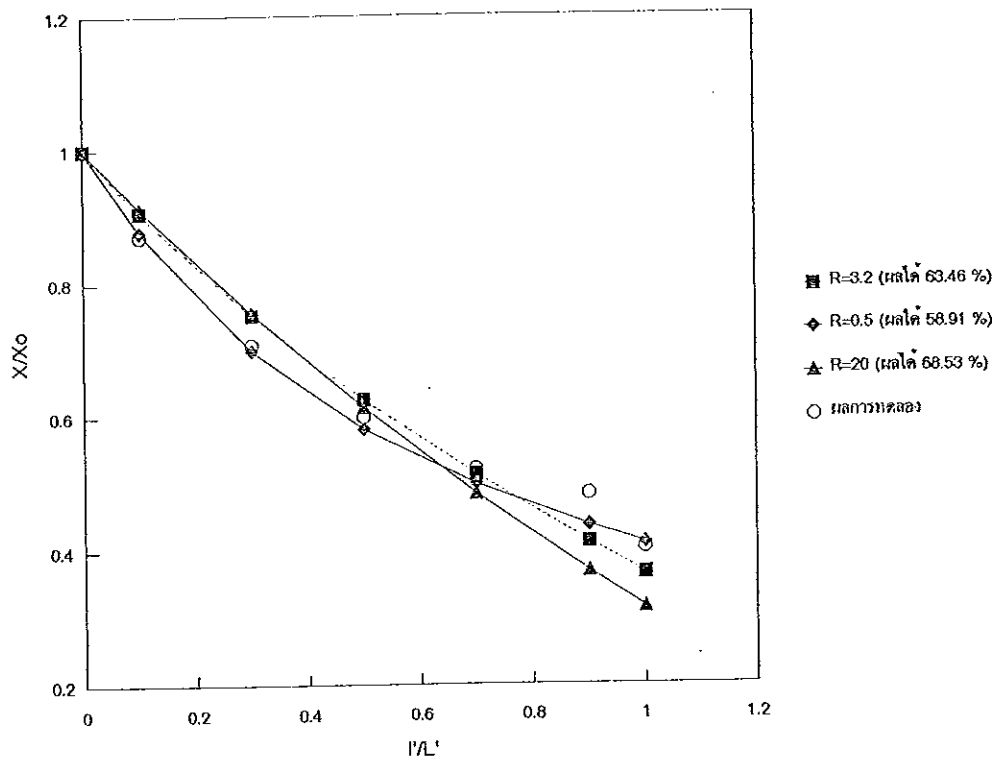
$K_x = .000517$  วินาที<sup>-1</sup> ,  $Bi = 3.97$  , ดริฟท์ = 1.4141 , เวลาในการสกัด 50 นาที , อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ( $D_s = 5.03 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที)

ผลการจำลองสถานการณ์ ในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว เมื่อใช้ค่า  $R$  ต่าง ๆ กัน สำหรับผลการทดลองจากผลการทดลองชุดที่ 1 ดังตาราง ฎ1 และ ตาราง ฎ2 ในภาคผนวก ฎ ข้อมูลในตาราง ฎ1 และ ตาราง ฎ2 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังภาพประกอบ 5.5 และ ภาพประกอบ 5.6 ตามลำดับ

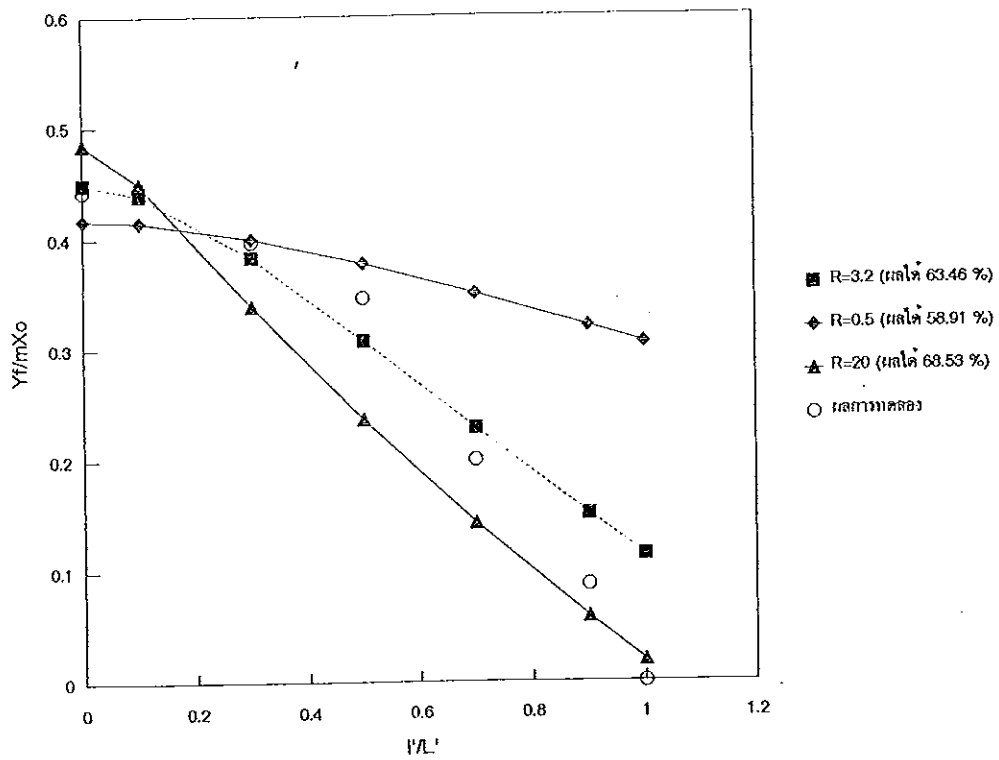
จากภาพประกอบ 5.5 และภาพประกอบ 5.6 ผลจากการจำลองสถานการณ์ จะเห็นว่า ถ้าสมมติให้การผสมเป็นแบบปลั๊ก ( $R=20$ ) จะได้ผลได้ร้อยละ 68.53 และถ้าสมมติให้มีการผสมย้อนกลับเกิดขึ้น ( $R=0.5$ ) จะได้ผลได้ร้อยละ 58.91 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การผสมย้อนกลับมากขึ้น จะทำให้ได้ผลได้ลดลง นั่นคือ ในที่นี้สภาวะที่มีการผสมย้อนกลับ ( $R=0.5$ ) จะทำให้ผลได้ลดลงร้อยละ 9.62 เมื่อเทียบกับผลได้ที่ได้จากการผสมแบบปลั๊ก ( $R=20$ ) และนอกจากนี้จะเห็นว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับค่า  $R=3.2$

#### 3.2 ผลของจำนวนใบออกต่อผลได้

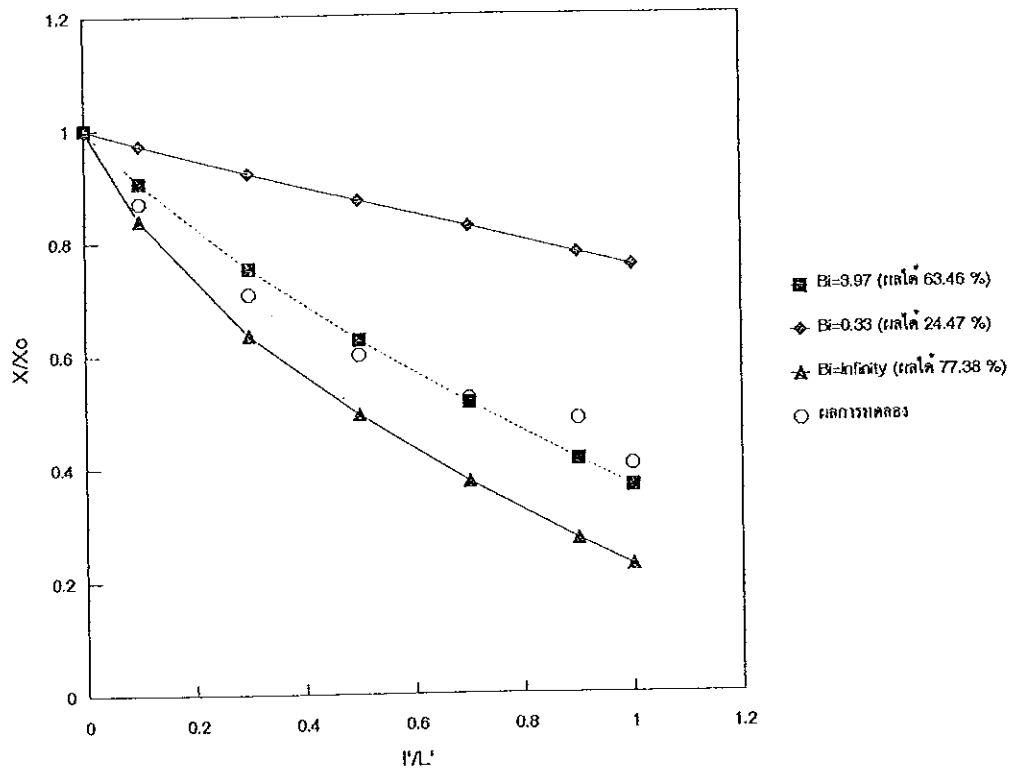
จากสภาวะของการทดลองชุดที่ 1 ผลการจำลองสถานการณ์ ในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว เมื่อใช้ค่า  $Bi$  ต่าง ๆ กัน ดังตาราง ฎ3 และ ตาราง ฎ4 ในภาคผนวก ฎ ข้อมูลในตาราง ฎ3 และ ตาราง ฎ4 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังภาพประกอบ 5.7 และภาพประกอบ 5.8 ตามลำดับ



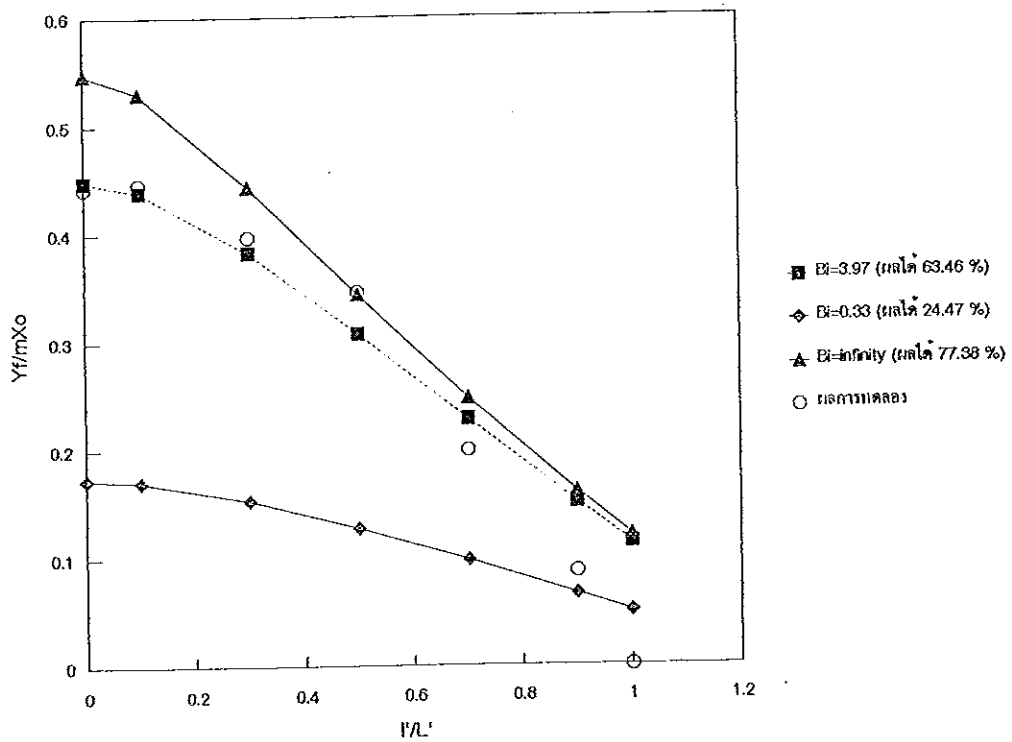
ภาพประกอบ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $X/X_0$  กับ  $l/L'$  จากผลการทดลองและ การจำลองสถานการณ์ ในเฟสของแข็ง ของการทดลองชุดที่ 1 เมื่อค่า R ต่างกัน



ภาพประกอบ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Y_f/mX_0$  กับ  $l/L'$  จากผลการทดลองและ การจำลองสถานการณ์ ในเฟสของเหลว ของการทดลองชุดที่ 1 เมื่อ R ต่างกัน



ภาพประกอบ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $X/X_o$  กับ  $l/L'$  จากผลการทดลองและ การจำลองสถานการณ์ ในเฟสของแข็ง ของการทดลองชุดที่ 1 เมื่อค่า  $Bi$  ต่างกัน



ภาพประกอบ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Y_f/mX_o$  กับ  $l/L'$  จากผลการทดลองและ การจำลองสถานการณ์ ในเฟสของเหลว ของการทดลองชุดที่ 1 เมื่อค่า  $Bi$  ต่างกัน

จากภาพประกอบ 5.7 และภาพประกอบ 5.8 ผลจากการจำลองสถานการณ์ จะเห็นว่า เมื่อใช้  $Bi = 3.97$  จะได้ผลได้ร้อยละ 63.46 ส่วนเมื่อใช้  $Bi = \infty$  จะได้ผลได้ร้อยละ 77.38 แสดงว่า การที่  $Bi$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้น โดยที่พบว่า จากสภาวะที่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอก (Bi=0.33) จนกระทั่งไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอก ( $Bi = \infty$ ) จะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 52.91

เมื่อเปรียบเทียบผลของ  $Bi$  และ  $R$  ต่อผลได้ จะเห็นได้ว่า ค่า  $Bi$  มีผลกระทบต่อผลได้มากกว่า ค่า  $R$  นั่นคือ จากการจำลองสถานการณ์ เราสามารถสรุปได้ว่า การทำให้เกิดการผสมย้อนกลับมากขึ้น ( $R$  มีค่าน้อย) จะส่งผลดีต่อการสกัดคือ ทำให้ได้ผลได้โดยรวมเพิ่มขึ้น กล่าวคือ แม้ว่าการผสมย้อนกลับจะทำให้ได้ผลได้ลดลง แต่จากผลการทดลองจริงพบว่า การเคลื่อนที่ของเฟสของเหลว เนื่องจากความรุนแรงของการหมุนของสกรูไปข้างหน้าและการหมุนถอยหลังทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างของแข็งกับของเหลวได้ดีขึ้น ค่า  $Bi$  มากขึ้น นั่นคือจะได้ผลได้มากขึ้น นอกจากนี้ผลจากการจำลองสถานการณ์ก็แสดงให้เห็นว่า ผลได้ที่เพิ่มขึ้นจากการที่  $Bi$  เพิ่มขึ้น มีปริมาณมากกว่า ผลได้ที่ลดลงเนื่องจากการเกิดการผสมย้อนกลับมากขึ้น

#### 4. ผลการจำลองสถานการณ์ ผลของ เวลาในการสกัด ต่อผลได้ เมื่อใช้ $Bi$ และ $R$ ต่างกัน

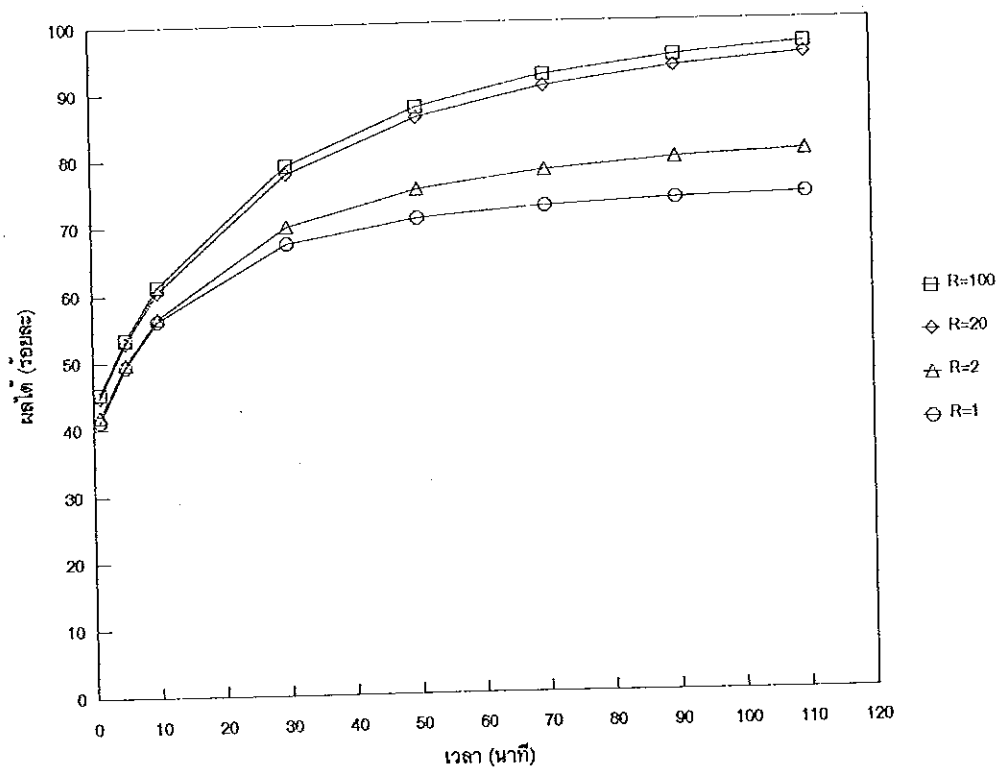
สมมติ สภาวะในการจำลองสถานการณ์ ดังนี้ ดริฟท์ = 1.5 เวลาในการสกัด 50 นาที อุณหภูมิในการสกัด 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที) ,  $Bi \rightarrow \infty$

จากข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ในตาราง ฏ5 ในภาคผนวก ฏ นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ผลได้ (ร้อยละ) กับ เวลาในการสกัด (นาที) เมื่อใช้  $R$  ต่างกัน ดังภาพประกอบ 5.9

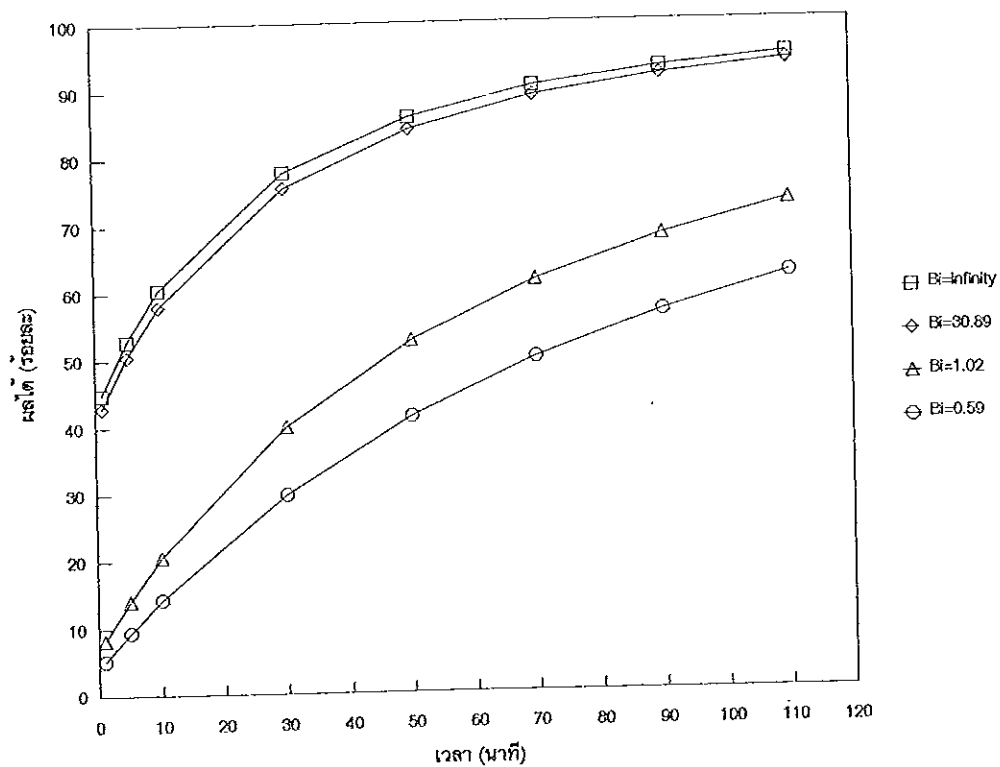
จากภาพประกอบ 5.9 จะเห็นว่า ผลได้สูงสุดที่เป็นไปได้ เมื่อใช้เวลาในการสกัดต่าง ๆ จะเกิดขึ้นได้เมื่อ การผสมเป็นแบบปลັก ( $R \rightarrow \infty$ ) เมื่อระดับการผสมย้อนกลับมากขึ้น ( $R$  ลดลง) จะทำให้ผลได้ลดลง เวลาในการสกัดมากขึ้น จะได้ผลได้เพิ่มขึ้น

สมมติ สภาวะในการจำลองสถานการณ์ ดังนี้ ดริฟท์ = 1.5 เวลาในการสกัด 50 นาที อุณหภูมิในการสกัด 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที) ,  $R=20$

จากข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ในตาราง ฏ6 ในภาคผนวก ฏ นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ผลได้ (ร้อยละ) กับ เวลาในการสกัด (นาที) เมื่อใช้  $Bi$  ต่างกัน ดังภาพประกอบ 5.10 จะเห็นว่า ผลได้สูงสุดที่เป็นไปได้ เมื่อใช้เวลาในการสกัดต่าง ๆ จะเกิดขึ้นได้เมื่อไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอก ( $Bi \rightarrow \infty$ ) เมื่อ  $Bi$  ลดลง ผลได้ลดลง



ภาพประกอบ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัด กับ ผลได้ เมื่อ Bi มีค่านับตั้งแต่ 1 ถึง 100 ตัวย่อ = 1.5 สัมประสิทธิ์การแพร่  $6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที



ภาพประกอบ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัด กับ ผลได้ เมื่อ R = 20 ตัวย่อ = 1.5 สัมประสิทธิ์การแพร่  $6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที

## 5. การเปรียบเทียบผลได้จากผลการทดลองจริงกับ ผลการทำนายโดยแบบจำลอง

สถานะของการทดลองชุดที่ 13 ดังนี้ ตาราง 1.58 เวลาในการสกัด 50 นาที อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส ( $D_s = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที)  $R = 3.3$ ,  $Bi = 12.09$   $K_x = 8.17 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> ได้ผลได้ร้อยละ 64.88 ในขณะที่ผลจากการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing จะได้ผลได้ร้อยละ 74.70 ส่วนผลจากการจำลองสถานการณ์ โดยกำหนดให้  $Bi \rightarrow \infty$  และการผสมเป็นแบบปลັก ( $R=20$ ) ซึ่งเป็นสถานะที่จะได้ผลได้สูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ พบว่าได้ผลได้ร้อยละ 81.34

จะเห็นว่า จากผลการทดลองจริงได้ผลได้น้อยกว่า ผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ประมาณร้อยละ 10 ทั้งนี้เป็นเพราะ ผลของการผสมย้อนกลับ กล่าวคือ แบบจำลอง Diffusion - Backmixing กำหนดให้  $R$  และ  $Bi$  คงที่ตลอดตารางสกัด แต่จากการทดลองจริงได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่า ค่า  $R$  และ  $Bi$  ไม่คงที่ตลอดตารางสกัด ดังนี้

1. ค่า  $R$  ตรงบริเวณปลายรางสกัดด้านที่น้ำร้อนเข้า มีค่ามากกว่าบริเวณปลายรางด้านที่เปลือกสับปะรดเข้า เพราะเครื่องสกัดวางทำมุมกับพื้นราบ ทำให้บริเวณปลายรางด้านที่น้ำร้อนเข้า มีความเร็วการไหลของเฟสของเหลวสูงกว่าปลายรางอีกด้านหนึ่ง ดังนั้นจึงมีโอกาสในการเกิดการผสมย้อนกลับน้อย นั่นคือ  $R$  มีค่ามาก ซึ่งควรทำให้ผลได้เพิ่มขึ้น

2. จากการที่ความเร็วการไหลของน้ำร้อนสูง จึงทำให้เกิดการไหลเวียนของเฟสของเหลวตรงบริเวณผิวหน้าเฟสของแข็งได้ดี ความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกมีค่าน้อย ดังนั้น  $Bi$  ของเฟสของแข็งที่สัมผัสกับเฟสของเหลวมีค่าสูง แต่จากการสังเกตพบว่า ตั้งแต่ปลายบริเวณจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 มีเฟสของแข็งไหลผ่านผิวหน้าเฟสของเหลว นั่นคือไม่มีการถ่ายโอนมวลจากเฟสของแข็งไปยังเฟสของเหลว เสมือนว่า ความต้านทานการถ่ายโอนมวลมีค่ามาก ดังนั้น  $Bi$  ของเฟสของแข็งที่ไม่สัมผัสกับเฟสของเหลว มีค่าต่ำ ซึ่งโดยรวมค่า  $Bi$  มีค่าน้อย

จากผลการจำลองสถานการณ์ เราพบว่า ค่า  $R$  จะมีผลกระทบต่อปริมาณผลได้ น้อยกว่า ค่า  $Bi$  ดังนั้นถึงแม้ว่า บริเวณปลายรางด้านที่น้ำร้อนเข้า จะมีค่า  $R$  มาก แต่บริเวณนี้ก็มีค่า  $Bi$  ต่ำ จึงทำให้ผลได้จากผลการทดลองจริงน้อยกว่า ผลที่ได้ที่ทำนายโดยแบบจำลอง

ในทางทฤษฎี เราสามารถทำให้ผลได้ที่ได้จากการทดลองจริง ใกล้เคียงกับผลได้ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง ได้โดยการทำให้  $Bi$  และ  $R$  คงที่ตลอดตารางสกัด

## บทที่ 6

### บทสรุป

การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในเครื่องสกัดน้ำสับประรดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ โดยใช้การสกัดน้ำสับประรดจากเปลือกเป็นกรณีศึกษา ในเบื้องต้นเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบ สร้าง และพัฒนาเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ ติดตั้ง และทดสอบระบบการสกัดจนกระทั่งสามารถใช้งานได้จริง ต่อมาจึงศึกษาในเรื่องของทฤษฎีการแพร่ การสกัด และการผสม ซึ่งเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในระบบการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้อธิบายการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นจากการศึกษาค้นคว้าจากรายงานการวิจัยที่ได้มีการตีพิมพ์ในวารสารทั้งในและต่างประเทศ พอลจะสรุปได้ว่า แบบจำลองที่จะใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางที่ได้พัฒนาขึ้นมาได้ดีที่สุดคือ แบบจำลอง Diffusion - Backmixing เราจึงได้พัฒนาแบบจำลองนี้ขึ้นมา ดังรายละเอียดในบทที่ 2 และได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ง.4 แบบจำลองนี้จะต้องมีการทดสอบโดยใช้ผลการทดลองจริง ต่อไป

ต่อมาจึงศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในเครื่องสกัดดังนี้

(1) แฟกเตอร์รูปร่าง (shape factor) พบว่า เปลือกสับประรดที่ใช้ในการทดลองมีรูปร่างเป็นแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $0.5220 \times 1.4928 \times 5.1997$  ลูกบาศก์เซนติเมตร แฟกเตอร์รูปร่างเท่ากับ 1.0

(2) สัมประสิทธิ์การแพร่และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับประรดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดคือ เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับประรดที่คำนวณได้จากการทดลองอยู่ในช่วง  $5.03 \times 10^{-9} - 7.05 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเซลล์เปลือกสับประรดก่อนการสกัด ซึ่งในการทดลองนี้ได้เพิ่มอุณหภูมิเปลือกสับประรดก่อนการสกัด จนทำให้เซลล์แตก ดังนั้นจึงไม่มีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสเหลืออยู่

(3) สัมประสิทธิ์การกระจายสมมูล ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและองค์ประกอบของเปลือกสับประรด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.12 - 1.15



(4) ดรีฟ พบว่าดรีฟในกระบวนการสกัดไม่คงที่ จึงคำนวณเป็นค่าดรีฟเฉลี่ยตลอดความยาวเครื่องสกัด มีปัญหาในการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดรีฟ เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องสกัดเอง ซึ่งต้องมีการปรับปรุงแก้ไข ดังรายละเอียดในข้อเสนอแนะ แต่พบว่า ดรีฟที่คำนวณได้จากการทดลองจริงส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับดรีฟที่ได้กำหนดไว้ใน การทดลอง

(5) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่หาได้จากข้อมูลผลการทดลอง มีค่าอยู่ระหว่าง  $3.80 \times 10^{-4} - 9.99 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>1</sup>

(6) จำนวนเพศเลท พบว่าจำนวนเพศเลทที่หาได้จากผลการทดลอง มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 - 3.6 ซึ่งถือว่ามีค่าน้อย แสดงว่าการผสมกันของเฟสของเหลวภายในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ เกิดการผสมย้อนกลับมาก และพบว่าเมื่อดรีฟเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนเพศเลทลดลง

(7) จำนวนไบออกท พบว่าจำนวนไบออกทที่หาได้จากผลการทดลอง มีค่าอยู่ระหว่าง 1.71 - 22.8 ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงกว้าง เพราะมีสภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน คือ ดรีฟ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสกัด และพบว่าเมื่อใช้เวลาในการสกัดนานขึ้น (ความเร็วรอบสกรูต่ำ) จะทำให้จำนวนไบออกทลดลง

จากผลการทดลองสกัดน้ำสับปะรดจากเปลือกโดยใช้เครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ ซึ่งผันแปรปัจจัยต่าง ๆ 3 ปัจจัยคือ ดรีฟ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสกัด ซึ่งตัวแปรทั้งสามมีผลต่อปริมาณน้ำสับปะรดที่สกัดได้ต่าง ๆ กันดังนี้

เมื่อใช้ดรีฟในการสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ผลได้เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้อุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้นจะทำให้ได้ผลได้สูงขึ้น แต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงจนถึงระดับหนึ่ง เวลาที่ใช้ในการสกัดจะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณผลได้ และเมื่อใช้เวลาในการสกัดนานขึ้นจะทำให้ได้ผลได้มากขึ้นแต่ถ้าใช้เวลาในการสกัดนานมากถึงระดับหนึ่ง พบว่าอุณหภูมิในการสกัดจะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณผลได้

สภาวะที่ใช้ในการทดลองซึ่งให้ร้อยละของผลได้มากที่สุดคือ การใช้ดรีฟ 2.0 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการสกัด 90 นาที ซึ่งให้ผลได้ร้อยละ 70.80 แต่สภาวะนี้สิ้นเปลืองพลังงานมาก มีสภาวะที่ให้เลือกใช้อีก 2 สภาวะ ซึ่งพบว่าให้ร้อยละผลได้ที่ใกล้เคียงกัน ดังนี้

1. การใช้ดรีฟ 2.0 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการสกัด 90 นาที ได้ผลได้ร้อยละ 70.18

2. การใช้ดรีฟ 2.0 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการสกัด 50 นาที ได้ผลได้ร้อยละ 70.03

การทดสอบแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ที่ได้พัฒนาขึ้นมา โดยการใช้ผลการทดลองจริง จากการศึกษาที่เรทราบค่าพารามิเตอร์ ที่จำเป็นในการป้อนเข้าสู่โปรแกรมการคำนวณ สำหรับการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งกับเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ในการสกัด จากการพิตแบบจำลองกับผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองนี้สามารถใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งได้ดี และในเฟสของเหลวผลจากการทำนายก็มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองเช่นกัน

ขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยนี้คือ การวิเคราะห์ระบบการสกัดโดยใช้แบบจำลอง ซึ่งจากการจำลองสถานการณ์ สามารถพิสูจน์สิ่งต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์โดยการแบ่งรางสกัดออกเป็น 2 ส่วน สามารถพิสูจน์ให้เห็นว่า จำนวนเพลต และจำนวนไบออก ไม่เท่ากันตลอดรางสกัด
2. การผสมย้อนกลับ (R มีค่าน้อย) ทำให้ผลได้ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า จำนวนไบออกเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลได้เพิ่มขึ้น จำนวนไบออกส่งผลกระทบต่อผลได้มากกว่า จำนวนเพลต
3. ในทางทฤษฎี เราสามารถทำให้ผลได้จากผลการทดลองจริง มีค่าใกล้เคียงกับผลได้ที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองได้ โดยการปรับปรุงแบบจำลองให้มีข้อสมมติว่าพารามิเตอร์ เช่น จำนวนไบออก และจำนวนเพลตไม่คงที่ตลอดรางสกัด

#### ข้อเสนอแนะ

ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองส่วนมากเกิดขึ้นจากตัวเครื่องสกัดและระบบการสกัดที่ได้พัฒนาขึ้นมาเอง ทำให้การเก็บข้อมูลเกิดความผิดพลาด และการควบคุมสภาวะในการสกัดทำได้ลำบาก

#### ปัญหาเกี่ยวกับเครื่องสกัดและระบบการสกัด

การควบคุมสภาวะในการทดลอง เราต้องการให้ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ คงที่ตลอดเวลาการสกัด แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยาก เช่น การควบคุมอัตราการไหลออกของเปลือกสับปะรด การควบคุมอัตราการป้อนน้ำร้อนที่ใช้ในการสกัด และการควบคุมอัตราการไหลออกของน้ำสับปะรดที่สกัดได้ การควบคุมสิ่งเหล่านี้ไม่ได้จะทำให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ไม่คงที่ เช่น ดริฟ และ จำนวนเพลต เป็นต้น

1. อัตราการไหลออกของเปลือกสับปะรดไม่คงที่ เป็นเพราะตรงทางออกของเครื่องสกัดเป็นช่องมีขนาดเล็ก เนื่องจากแกนสกรูมีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้อัตราการไหลออกของเปลือกสับปะรดช้ากว่าอัตราการไหลเข้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เวลาการสกัดนาน (มีเปลือกสับปะรดอยู่ในระบบสกัดจำนวนมาก) จนบางครั้งต้องคอยเหยียดออก แนวทางการแก้ไขคือ ต้องออกแบบแกนสกรูให้มีขนาดเล็กลง และออกแบบให้เครื่องสกัดมีขนาดที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกสับปะรดที่ต้องการให้มีอยู่ในเครื่องสกัด

2. อัตราการไหลเข้าของน้ำร้อนที่ใช้ในการสกัดไม่คงที่ เนื่องจากการป้อนน้ำร้อนเข้าสู่เครื่องสกัด อาศัยการติดตั้งถังน้ำร้อนให้อยู่ในที่สูง เปิดวาล์วปล่อยให้ น้ำร้อนไหลผ่านโรตารี ดังนั้นอัตราการป้อนจึงขึ้นกับความสูงของระดับน้ำในถังน้ำร้อน แนวทางการแก้ไข คือควรติดตั้งปั้มน้ำ เช่น ปั้มนชนิด peristaltic ซึ่งช่วยให้อัตราการป้อนน้ำร้อนค่อนข้างคงที่

3. อัตราการไหลออกของน้ำสับปะรดที่สกัดได้ไม่คงที่ เนื่องจากท่อตรงทางออกของน้ำสับปะรดมีขนาดเล็กเกินไป (ประมาณ 1.9 เซนติเมตร หรือ 3/4 นิ้ว) เปลือกสับปะรดสามารถลอดผ่านตะแกรงเข้ามา ทำให้เกิดการอุดตัน แนวทางการแก้ไขคือ ต้องออกแบบให้ท่อทางออกของน้ำสับปะรดอยู่บริเวณด้านข้างของเครื่องสกัดแทนที่จะเป็นบริเวณก้นราง

4. มีการสูญเสียพลังงานในระหว่างการสกัดมาก เพราะระบบสกัดเป็นระบบเปิด ทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการควบคุมอุณหภูมิในการสกัดให้คงที่ มีการระเหยของน้ำไปตลอดเวลา ทำให้การคิดดุลมวล และพลังงานทำได้ยาก แนวทางการแก้ไขคือควรออกแบบระบบการสกัดให้เป็นระบบปิด

5. ระหว่างการสกัดมีเปลือกสับปะรดบางส่วนไหลพ้นผิวหน้าของเฟสของเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจุดเก็บตัวอย่าง ที่ 4 เป็นต้นไป เนื่องจากเครื่องสกัดทำมุมเอียงกับพื้นราบ ทำให้ปริมาตรของเฟสของเหลวไม่เท่ากันตลอดรางสกัด ในขณะที่ปริมาตรของเฟสของแข็งทุกจุดในรางสกัดใกล้เคียงกัน เพราะมีใบสกรูกันอยู่เป็นช่อง ๆ การที่มีของแข็งบางส่วนไหลขึ้นมา แสดงว่า ป้อนเปลือกสับปะรดเข้าในอัตราที่สูงเกินไป แต่ในการทดลองถ้าป้อนเปลือกสับปะรดในอัตราที่ต่ำกว่า 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะทำให้วัดความเข้มข้นของตัวละลายในน้ำสับปะรดโดยใช้เครื่อง refractometer ไม่ได้ แนวทางการแก้ไขคือ ต้องป้อนเปลือกสับปะรดเข้าสู่เครื่องสกัดในอัตราที่ต่ำกว่านี้ หรือออกแบบเครื่องสกัดให้มีขนาดที่เหมาะสมกับอัตราการป้อน หรือใช้เครื่อง refractometer ที่สามารถอ่านความเข้มข้นของตัวละลายต่ำ ๆ ได้

### ปัญหาเกี่ยวกับการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด โดยการพิจารณาที่ปริมาณผลได้เพียงอย่างเดียว เป็นวิธีการที่ไม่ถูกต้อง แต่เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งขอบเขตไว้ตั้งแต่ตอนแรกแล้ว จึงพิจารณาที่ปริมาณผลได้เพียงอย่างเดียว แต่สำหรับผู้ที่สนใจทำวิจัยเรื่องนี้ต่อ ควรจะพิจารณาถึงประเด็นอื่น ๆ ด้วย ดังนี้

1. พลังงานความร้อนที่ต้องสูญเสียไปในระหว่างการสกัด เช่น พลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการสกัดว่าจะคุ้มกับปริมาณผลผลิตที่ได้รับหรือไม่ การใช้เวลาในการสกัดนาน แต่ใช้อุณหภูมิต่ำ หรือการใช้อุณหภูมิสูงแต่ใช้เวลาในการสกัดน้อย ซึ่งอาจให้ปริมาณผลได้ที่ใกล้เคียงกัน วิธีไหนจะมีความเหมาะสมมากกว่ากัน
2. พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ เช่น พลังงานในการหมุนมอเตอร์ การทำน้ำร้อนที่ใช้ป้อนเข้าสู่ระบบสกัด และน้ำร้อนที่ใช้ป้อนเข้าเจคเกิด เพื่อรักษาอุณหภูมิการสกัดให้คงที่
3. พลังงานที่สูญเสียในการทำน้ำสับประรดเข้มข้น ควรศึกษาถึงการใช้ดริฟท์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัด ซึ่งทำให้สูญเสียพลังงานในการระเหยน้ำออกน้อยที่สุด แต่ได้ปริมาณผลได้ที่คุ้มค่า

### ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแบบจำลอง Diffusion - Backmixing

1. แบบจำลองนี้ได้สมมติให้การไหลของเฟสของแข็งเป็นแบบปลั๊ก (plug flow) ส่วนในเฟสของเหลวให้มีการผสมย้อนกลับ (backmixing) และ กำหนดให้ ดริฟท์ จำนวน เพคเลต จำนวนไบออก สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม และสัมประสิทธิ์การแพร่ คงที่ตลอดรางสกัด แต่ในการทดลองจริงพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้มีค่าไม่คงที่ตลอดรางสกัด ดังนั้นควรปรับปรุงแบบจำลองให้พารามิเตอร์เหล่านี้ไม่คงที่ เช่น ให้จำนวนไบออก และจำนวนเพคเลตเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่ง สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ขึ้นกับดริฟท์ จำนวนพิกซ์ เป็นต้น
2. การหาจำนวนไบออก สำหรับการทดลองนี้ได้คำนวณมาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมซึ่งไม่เหมาะสมนัก จึงควรพัฒนาหาวิธีการคำนวณจำนวนไบออกจากผลการทดลองโดยตรง เช่นเดียวกับการหาค่า  $K_x$  และ จำนวนเพคเลต

### ข้อเสนอแนะในการออกแบบเครื่องสกัด และการกำหนดสภาวะในการสกัด

1. การปรับให้ค่า Bi มีค่าสูงและคงที่ตลอดรางสกัด โดยการออกแบบเครื่องสกัดตรงบริเวณปลายรางสกัดด้านที่เฟสของแข็งออก ให้กักเก็บของเหลวได้มากขึ้น อาจทำได้โดยการใช้แผ่นสแตนเลสปิดท้ายราง ประมาณ 1 ใน 5 ส่วน และปรับให้ช่องทางออกกว้างขึ้นโดยการออกแบบให้แกนสกรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง เล็กลง ซึ่งจะต้องมีการทดสอบ จนกระทั่งได้เครื่องสกัดที่เหมาะสมสำหรับการสกัดจริง

2. การปรับให้ความเร็วรอบการหมุนของสกรูไปข้างหน้า และถอยหลังให้เหมาะสม ซึ่งทำให้เกิดการไหลเวียนของเฟสของเหลวบริเวณผิวหน้าเฟสของแข็งได้ดีขึ้น ค่า Bi จะสูงขึ้น ซึ่งแม้ว่าจะทำให้เกิดการผสมย้อนกลับมาก แต่จากผลการจำลองสถานการณ์ จะเห็นว่าไม่ได้ส่งผลให้ผลได้โดยรวมลดลงแต่อย่างใด

3. การเพิ่มระยะเวลาในการสกัดขึ้น จะทำให้ผลได้เพิ่มขึ้น แต่จะทำให้อัตราการผลิต (production rate) ลดลง

4. การเพิ่มดริฟฟ์ จะทำให้ผลผลิตที่ได้มีความเจือจาง และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการระเหยน้ำออกจำนวนมาก

Lee และ Schwartzberg (1990) รายงานว่าสภาวะที่ทำให้สูญเสียผลได้ (yield loss) เพิ่มขึ้น มีดังนี้

1. การใช้เฟสของแข็งที่มีขนาดเล็กลง จะทำให้เฟสของเหลวแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของแข็งได้ยาก

2. การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด จะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น แต่กลับทำให้ของแข็งอ่อนนุ่ม การบีบน้ำผลไม้ออกจากของแข็งหลังการสกัดทำได้ยาก นอกจากนี้การที่เฟสของแข็งนุ่มลง จะทำให้การแทรกตัวของเฟสของเหลวไปในช่องว่างระหว่างของแข็งเกิดขึ้นได้ยาก

## บรรณานุกรม

- วรรณิ์ เซษฐ์สูทชยงกุล. 2535. แนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้. ชาวเศรษฐกิจ  
การเกษตร. 38(427) : 6 - 21
- สมคิด บุญล้ำเหลือ. 2537. อุตสาหกรรมน้ำผลไม้. เศรษฐศาสตร์. 12(เมษายน-มิถุนายน),  
6 - 22.
- Baird, M.H.T. 1978. Liquid-Solid Extraction. Encyclopedia of Chemical Technology.  
3 rd. ed. John Willey & Sons, New York. (9) : 721 - 737
- Beristain, C.J., Asuara, E., Cortes, R. and Garcia, H.S. 1990. Mass transfer  
during osmotic dehydration of pineapple rings. Int. J. of Food Sci & Technol.  
25 : 576 - 582
- Binkley, C.R. and Winley, R.C. 1978. Continuous diffusion-extraction method to  
produce apple juice. J. Food. Sci., 43 : 1019 - 1023
- Bioquip. 1984. The application of the Bioquip counter-current extractor to the  
commercial production of apple juice by continuous diffusion extraction.  
Bioquip Australia Pty Limited, St. Leonards, NSW, Australia. cited by  
Gunasekaran, S. et.,al 1989
- Bird, B.R. ; Stewart, E.W. and Lightfoot, N.E. 1960. Transport Phenomena.  
John Wiley & Sons, New York.
- Bruniche-Olsen, H. 1962. Solid-Liquid extraction. NYT Nordisk Forlag Arnold Busck,  
Copenhagen.

- Bruniche-Olsen, H. 1969. Diffusion of beet and cane. Sugar Technol Rev. 1 : 3
- Carsimir, D.J. 1983. Counter-current extraction of soluble solids from foods.  
CSIRO. Fd. Res. Quar., 53(2) : 38 - 43
- Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. Oxford University Press, London.
- Desai, M. and Schwartzberg, H.G. 1980. Mathematical modelling of leaching processes. In Linko, P., et., al (Eds). Food Process Engineering, pp 86 - 91  
Applied Science Press, London.
- Dull, G.G. 1971. The biochemistry of fruits and their products. Academic Press.  
Inc. London.
- Emch, F. 1980. Extraction of fruit and vegetables. Food Process Engineering. vol.1  
App. Sc. Pub. Ltd., London. (53)424 - 433
- Gunasekaran, S., Fisher, R.J. and Casimir, D.J. 1989. Predicting soluble solids extraction from fruits in a reversing, single screw counter current diffusion extractor. J. Food. Sci. 5(54) : 1261 - 1265
- Lee, Y.C. and Schwartzberg, H.G. 1990. Effect of axial dispersion during solid-liquid extraction. In Engineering and Food. Vol. 3. Spiess, W.E.L. and Schubert, H. (ed.), p. 1 - 10. Elsevier Science publishers. Ltd. London.
- Linko, P., Malkki, Y., Oikkku, J. 1980. Food Process Engineering. vol.1. Applied Science Publishers, Ltd., London.

Loncin, M. 1980. Diffusion phenomena in solid. cited by Schwartzberg and Chao.(1982)

Luikov, 1969. The Theory of Heat Diffusion. Academic Press, New York.

Mecklenburgh, J.C. and Hartland, S. 1975. The Theory of Backmixing. John Wiley & Sons, Ltd. London

Milligan, E.D. 1976. Survey of current solvent extraction equipment. J. Am. Oil chemists. Soc., 53 : 286 - 290

Munro, W.D., Amundson, N.R., 1950. Ind. Eng. Chem. (420) : 1481

Osterberg, N.O. and Sorensen, T.S. 1981. Apple juice extraction in a counter-current diffuser. J. of Food Technol. 16(10) : 379 - 420

Plachco, F.P. and Krasuk, J.H. 1970. Solid - Liquid Counter current Extractor. Ind. Eng. Chem. Proc. Dev., 9(3) : 419 - 433

Schwartzberg, H.G. 1980. Continuous counter current extraction in the food industry. Chem. Eng. Progress. 76(4):67

Schwartzberg, H.G. and Chao, R.Y. 1982. Solute diffusivity in leaching process. Food. Technol. 36(2) : 73 - 86

Spaninks, J. 1979. Design Procedures for Solid - Liquid Extraction. Doctoral Diss., Agricultural University of Netherlans, Wageningen. cited by Siripatana, C. 1986



Siripatana, C. 1986. Mass transfer in a reversing counter-current extractor. Master of Applied Science Thesis. University of New South Wales, Australia.

Siripatana, C. 1994. Solute diffusion in fruit, vegetable and cereal processing: Simplified solution for anomalous shapes. Department of Agro-Industry. Prince of Songkla University, Hatyai , Thailand. Unpublished report.

Treybal, R.E. 1980. Mass transfer operations. McGraw - Hill , Auckland.

Wei - Chi W. and Sastry, K.S. 1993. Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for ohmic heating. : Determination of parameters and mathematical model verification. J. Food Eng. 20 : 311 - 323

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการสกัด

### ก.1 การหาค่าดริฟท์

กรณีการสกัดแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง

$$\text{ดริฟท์ } (\alpha) = \frac{Lm}{S}$$

เมื่อ  $L$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของเหลว

$S$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง

$m$  คือสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล

เนื่องจากในระบบการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ เครื่องสกัดวางทำมุมกับพื้นราบ ทำให้ค่าดริฟท์แต่ละจุดในรางสกัดจะไม่เท่ากัน จำเป็นต้องหาค่าดริฟท์เฉลี่ย เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงหาค่าดริฟท์ที่บริเวณทางเข้าและทางออกของเครื่องสกัด แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยต่อไป

#### บริเวณทางเข้าของของแข็ง

หาอัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง ( $S_0$ ) โดยการที่เราทราบน้ำหนักของเปลือกสับปะรด ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้ป้อนด้วยอัตรา 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง นำเปลือกสับปะรดก่อนเข้าเครื่องสกัดมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ( $M$ ) แล้ววัดปริมาตรโดยใช้วิธีการแทนที่น้ำ ( $V$ ) สามารถคำนวณหาความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดได้ จึงวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเปลือกสับปะรดได้

หาอัตราการไหลออกเชิงปริมาตรของเฟสของเหลว ( $L$ ) สามารถวัดได้โดยตรงโดยการวัดปริมาตรด้วยกระบอกตวง แล้วจับเวลา ซึ่งจะต้องสุ่มวัดอย่างน้อย 10 ครั้งขณะทำการสกัด

#### บริเวณทางออกของเครื่องสกัด

หาอัตราการไหลออกเชิงปริมาตรของเฟสของแข็ง ( $S_1$ ) ทำได้โดยการจับเวลาขณะเปลือกสับปะรดออกจากเครื่องสกัด นำมาชั่งน้ำหนักจะได้อัตราการไหลโดยน้ำหนัก นำเปลือกสับปะรดนี้ไปหาความหนาแน่นตามวิธีการเดียวกับกรณีหาค่า  $S_0$  เมื่อทราบความหนาแน่นของเฟสของเหลวจะสามารถหาค่า  $S_1$  ได้

หาอัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของเฟสของเหลว ( $L_0$ ) สามารถอ่านค่าโดยตรงจากโรตاميเตอร์

ค่า  $S_0, L_f, S_f, L_0$ , และ  $m$  ที่วัดได้นำมาหาค่า ดริฟเฟอเรียได้จาก

$$\text{ดริฟเฟอเรีย} = \left( \frac{mL_f}{S_0} + \frac{mL_0}{S_f} \right) / 2$$

ก.2 การหาจำนวนเพคเลต (Peclet number) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 1. หลักการและแนวคิด

สำหรับแบบจำลอง Diffusion - Backmixing จากสมการ (2.5) และ (2.6) สามารถหาความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง ( $x_s$ ) และในเฟสของเหลวตามลำดับ โดยที่ต้องทราบค่า  $K_x$ , จำนวนเพคเลต (R) และพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ในทางกลับกันเราสามารถหาพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงระดับของการผสมย้อนกลับ (R) ได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองเมื่อรู้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่เหลือ

### 2. ขั้นตอนการคำนวณ

1. จากการพิดข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ได้จากการทดลองด้วยสมการเอกโปเนนเชียล ใช้สมการที่ได้หาค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่ออกจากเครื่องสกัด ( $x_s$ ) ได้

2. หาค่า  $K_x$  จากโปรแกรมในภาคผนวก ง.2

3. คำนวณค่าดริฟเฟอเรีย จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

4. ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ นำมาใช้ป้อนเข้าสู่โปรแกรมการคำนวณหาจำนวนเพคเลตในภาคผนวก ง.3 ต่อไป

### 3. ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรม (ภาคผนวก ง.3)

1. ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการคำนวณ

2. ป้อนจำนวนเพคเลตโดยการสุ่มเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ

3. คำนวณค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งสุดท้าย ( $x_s$ ) แล้วให้เปรียบเทียบดูว่าค่า  $x_s$  ที่คำนวณได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $x_s$  ที่ได้จากสมการที่พิดกับผลการทดลองหรือไม่ กำหนดให้มีความผิดพลาด  $\pm 0.5$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4. ถ้าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน จะได้จำนวนเพคเลตสำหรับการทดลองชุดนั้น ๆ จากนั้นจึงไปทำนายค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง และ ของเหลวที่เวลาต่าง ๆ พร้อมทั้งคำนวณค่ายกกำลังสองเฉลี่ย (mean square of error) ในเฟสของแข็งให้ด้วย

5. ถ้าค่าทั้งสองไม่ใกล้เคียงกัน ให้กลับไปป้อนจำนวนเพศเลทใหม่ จนกระทั่งได้จำนวนเพศเลทที่ทำให้ได้ค่า  $x_t$  ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันตามต้องการ

โปรแกรมสำหรับคำนวณหาจำนวนเพศเลทตัดแปลงและพัฒนาจาก Siripatana (1986) รายละเอียดดั่งภาคผนวก ง.3

### ก.3 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_x$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ได้จากผลการทดลองนี้ เป็นค่าที่รวมผลของการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นจากการแพร่ภายในเฟสของแข็ง และการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของเฟสของแข็ง เข้าไว้ด้วยกัน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient)

Siripatana (1986) ได้ให้นิยามสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลตามสมการดังนี้

$$-\frac{d\bar{x}}{dt} = K_x(\bar{x} - y/m) \quad (ก1)$$

เมื่อ  $\bar{x}$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายเฉลี่ยในเฟสของแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง

$y$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและตำแหน่ง

$m$  คือ สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล

$t$  คือ ระยะเวลาที่ของแข็งอยู่ในระบบสกัด

$K_x$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่จุดใด ๆ ตามความยาวเครื่องสกัดสามารถนำมาพิต โดยใช้สมการโพลิโนเมียล 6 เทอม (six-termed polynomial) ดังนี้

$$y = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (ก2)$$

แทนค่าสมการ (ก2) ใน (ก1) แล้วจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$-\frac{d\bar{x}}{dt} + K_x \bar{x} = \frac{K_x}{m}(a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5) \quad (ก3)$$

แก้สมการโดยการทำให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่ 1 ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{x} \exp(K_x t) &= \frac{K_x}{m} \int (a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5) \exp(K_x t) dt + c \\ &= \frac{1}{m} [a_0 e^{K_x t} + a_1 e^{K_x t} (t - \frac{1}{K_x}) + a_2 e^{K_x t} (t^2 - \frac{2t}{K_x} + \frac{2}{K_x^2}) \\ &\quad + a_3 e^{K_x t} (t^3 - \frac{3t^2}{K_x} + \frac{6t}{K_x^2} - \frac{6}{K_x^3}) + a_4 e^{K_x t} (t^4 - \frac{4t^3}{K_x} + \frac{12t^2}{K_x^2} - \frac{24t}{K_x^3} + \frac{24}{K_x^4}) \\ &\quad + a_5 e^{K_x t} (t^5 - \frac{5t^4}{K_x} + \frac{20t^3}{K_x^2} - \frac{60t^2}{K_x^3} + \frac{120t}{K_x^4} - \frac{120}{K_x^5})] + c \end{aligned}$$

$$\bar{x}(t) = \frac{G(t)+c}{\exp(K_x t)} \quad (ก4)$$

c คือค่าคงที่

กำหนดสภาวะเริ่มต้น (initial condition)

$\bar{x}(0) = x_0 =$  ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง

$$\text{จะได้ } c = x_0 - \frac{1}{m} \left[ a_0 - \frac{a_1}{K_x} + \frac{2a_2}{K_x^2} - \frac{6a_3}{K_x^3} + \frac{24a_4}{K_x^4} - \frac{120a_5}{K_x^5} \right] \quad (ก5)$$

เมื่อ  $x_0$  คือความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเริ่มต้น

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  คือค่าคงที่ในสมการโพลีโนเมียล

### ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรม (ภาคผนวก ง.2)

1. ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่จุดต่างๆ ตามความยาวเครื่องสกัด ซึ่งได้มาจากผลการทดลอง นำมาพิต กับสมการเอกโปเนนเชียล  $\bar{x} = c + a \exp(b \cdot t)$  เมื่อ c, a และ b คือค่าคงที่

จากสมการที่ได้นำมาหาความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งหลังออกจากเครื่องสกัด ( $x_t$ ) โดยการแทนค่า  $t = t_f$

2. ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลว ที่จุดต่างๆ ตามความยาวเครื่องสกัด ซึ่งได้มาจากผลการทดลอง นำมาพิต กับสมการโพลีโนเมียล อันดับที่ 6 ตามสมการ (ก2)

3. จากการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น  $x_0, t_f, m, a$  เป็นต้น แล้วป้อนค่า  $K_x$  โดยการเดาค่า ลงในสมการ (ก4) จะได้ค่า  $\bar{x}(t_f)$  ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่เวลา  $t_f$  นั่นคือได้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งสุดท้าย

4. ให้พิจารณาว่าค่า  $\bar{x}(t_f)$  ที่คำนวณได้จากโปรแกรม มีค่าใกล้เคียงกันกับค่า  $\bar{x}(t_f)$  ที่คำนวณได้จากสมการที่พิต กับผลการทดลองในข้อ 1 หรือไม่ (ความผิดพลาด  $\pm 0.5$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ถ้าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ก็จะได้ค่า  $K_x$  ที่ถูกต้องซึ่งได้มาจากการทดลอง แต่ถ้าค่าทั้งสองที่ได้มีความแตกต่างกัน ก็จะต้องกลับไปป้อนค่า  $K_x$  ใหม่ จนกระทั่งได้ค่า  $\bar{x}(t_f)$  ที่มีค่าใกล้เคียงกันจะได้ค่า  $K_x$  ที่ถูกต้อง

โปรแกรมการคำนวณค่า  $K_x$  ดัดแปลงและพัฒนาจาก Siripatana(1986) รายละเอียดของโปรแกรม ดูได้จากภาคผนวก ง.2

#### ก.4 การหาจำนวนไบออต (Biot number) กรณีแผ่นแบนราบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Siripatana (1986) ได้เขียนสมการสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางให้อยู่ในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ( $K_x$ ) ได้ดังนี้

$$E = \exp\left[-K_x \frac{(\alpha-1)}{\alpha} t\right] \quad (ก6)$$

จากสมการ  $E = \hat{c}_1 \exp(-q_1^2 \tau) \quad (ก7)$

จากสมการ (1.31)  $q_1^2 = (q_1^2)_\infty K_b$

ในที่นี้  $K_b = \left[ \frac{1}{1+2.24/Bi^{1.02}} \right]$   
 $(q_1^2)_\infty = s\hat{F} \left( \frac{\alpha-1}{\alpha} \right)$

$$\hat{c}_1 = \frac{2\alpha}{\hat{F}\alpha-s}$$

แทนค่าต่างๆ ลงใน สมการ (ก6) จะได้

$$E = \frac{2\alpha}{\hat{F}\alpha-s} \exp\left(-s\hat{F} \frac{(\alpha-1)}{\alpha} K_b \tau\right)$$

$$E = \frac{2\alpha}{\hat{F}\alpha-s} \exp\left(-\frac{s\hat{F}K_b D_s (\alpha-1)}{l^2} t\right) \quad (ก8)$$

สมการ (ก8) เทียบกับสมการ (ก6) สำหรับกรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด จะได้

$$K_x = \frac{s\hat{F}K_b D_s}{l^2} \quad (ก9)$$

กรณีแผ่นแบนราบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$E = E_{IS1} E_{IS2} E_{IS3}$$

$$E = c_1 \exp\left[-\frac{s\hat{F}K_b D_s (\alpha-1)}{l_1^2} t\right] c_1 \exp\left[-\frac{s\hat{F}K_b D_s (\alpha-1)}{l_2^2} t\right] c_1 \exp\left[-\frac{s\hat{F}K_b D_s (\alpha-1)}{l_3^2} t\right]$$

$$E = c_1^3 \exp\left[-s\hat{F}K_b D_s \frac{(\alpha-1)}{\alpha} t \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}\right)\right]$$

นั่นคือ  $K_x = s\hat{F}K_b D_s \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}\right)$

$$K_x = s\hat{F}D_s \left[ \frac{1}{1+\frac{2.24}{Bi^{1.02}}} \right] \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}\right)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$Bi = \left[ \frac{2.24}{\left(\frac{s\hat{F}D_s}{K_x} \left[\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}\right] - 1\right)} \right]^{1/1.02} \quad (ก10)$$

## ก.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (m)

### 1. ความเข้าใจเกี่ยวกับค่า m

ที่สถานะคงตัว สำหรับการสกัดแบบกะพบว่า ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง ( $x^*$ ) ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลว ( $y^*$ ) จะมีความสมดุลซึ่งกันและกัน แต่ถ้าจะไม่เท่ากันก็ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในเฟสของแข็ง กรณีที่คิดเฉพาะสารละลาย (น้ำ + ตัวละลาย) จะได้

(1) เฟสของเหลว จะได้ว่า

ความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลาย = ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลว

(2) เฟสของแข็ง [ น้ำ + ตัวละลาย + สารเฉื่อย (inert) ] จะได้ว่า

ความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลาย มากกว่า ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง เพราะว่าในเฟสของแข็งมีองค์ประกอบที่เป็นสารเฉื่อยอยู่ด้วย

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลจึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างและองค์ประกอบของเฟสของแข็ง

จะได้ความสัมพันธ์ที่สถานะคงตัว ของกระบวนการสกัดแบบกะ ดังนี้

$$y^* = mx^*$$

เมื่อ  $m$  คือสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (distribution coefficient)

### 2. การหาค่า $y^*$

ทำการทดลองสกัดแบบกะ จนกระทั่งระบบเข้าสู่สถานะคงตัว

$$\text{ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลว } (y^*) = \frac{\text{น้ำหนักของตัวละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}} \quad (ก11)$$

ค่า  $y^*$  สามารถหาค่าได้โดยตรงโดยการวัดค่าบริกซ์ ทารด้วย 100 คูณด้วยความหนาแน่นของสารละลายที่สกัดได้ ( $\rho_L$ ) สมมติให้วัดความเข้มข้นในเฟสของเหลวได้ Br องศาบริกซ์ จะได้

$$y^* = \frac{Br}{100} (\rho_L) \quad (ก12)$$

ค่าความหนาแน่นของสารละลายหาได้จาก การนำสารละลายที่สกัดได้บรรจุลงในขวดวัดปริมาตร (V) แล้วชั่งน้ำหนักสารละลายที่สกัดได้ (M) จะได้  $\rho_L = M/V$

3. การหาค่า  $x^*$ 

ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง ( $x^*$ )

$$= \frac{\text{น้ำหนักของตัวละลาย}}{(\text{ปริมาตรของสารละลาย} + \text{ปริมาตรของสารเจือย})} \quad (\text{ก13})$$

ขั้นตอนการหาค่า  $x^*$

1. ชั่งน้ำหนักของของแข็งรวม (น้ำ+ตัวละลาย+สารเจือย) น้ำของแข็งไปแทนที่น้ำโดยใช้กระบอกตวงจะได้ปริมาตรของแข็งรวม ดังนั้นหาความหนาแน่นรวมของของแข็งได้

2. นำของแข็งมาหาค่าความชื้น จะได้น้ำหนักของน้ำ ซึ่งเท่ากับปริมาตรของน้ำ (ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) สมมติให้ร้อยละของความชื้นเท่ากับ Mc และน้ำหนักของแข็งเท่ากับ M กรัม จะได้

$$\text{น้ำในน้ำ} = \frac{Mc(M)}{100}$$

3. วัดความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเป็นองศาบริกซ์ ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) สมมติวัดความเข้มข้นได้ Br องศาบริกซ์ ดังนั้นจะได้

$$\text{น้ำหนักของตัวละลายในเฟสของแข็ง (กรัม)} = \frac{Br}{(100-Br)} \frac{Mc(M)}{100} \quad (\text{ก14})$$

4. จากการที่รู้ความหนาแน่นของของแข็งรวมจากข้อ 1 และรู้น้ำหนักของของแข็งที่นำมาหาความชื้นจากข้อ 2 จึงสามารถหาปริมาตรรวมของของแข็งที่นำมาหาความชื้นได้

5. จากปริมาตรรวม = ปริมาตรของสารละลาย + ปริมาตรของสารเจือย (ก15)

ดังนั้นสามารถหาความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง ( $x^*$ ) โดยใช้สมการ (ก14) และ (ก15)

4. การหาค่า  $m$ 

จากสมการ (ก12) และ (ก13) หาค่า  $m$  ได้จาก

$$m = y^*/x^*$$



## ตัวอย่างการคำนวณ

การทำสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลงี้ 62.5 องศาเซลเซียส

จากการสกัดแบบกะจนกระทั่งระบบเข้าสู่สถานะคงตัว สามารถหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องนำไปใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลงี้ ดังนี้

ความหนาแน่นของตัวละลายในเฟสของเหลวเจ็ลลี่ ( $\rho_L$ ) = 1000.05 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ความเข้มข้นสุดท้ายหลังการสกัดในเฟสของเหลว = 0.9 องศาบริกซ์

ความเข้มข้นในเฟสของแข็งหลังการสกัด (Mc) ร้อยละ 88.30

น้ำหนักของเฟสของแข็งหลังการสกัด (M) 332.80 กรัม

ความหนาแน่นของเฟสของแข็งหลังสกัด 1.0000 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ปริมาตรรวมของเฟสของแข็งหลังสกัด  $\frac{332.80}{1.0000} = 332.80 =$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากสมการ (ก12)  $y^* = \frac{Br}{100}(\rho_L)$

แทนค่าจะได้  $y^* = \frac{(0.9)(1000.05)}{100} = 9.0005$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากสมการ (ก14)

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของตัวละลายในเฟสของแข็ง} &= \frac{(Br)(Mc)(M)}{(100-Br)(100)} \\ &= \frac{(0.9)(88.03)(332.80)}{(100-0.9)(100)} \\ &= 2.6688 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จาก  $x^* = \frac{\text{น้ำหนักของตัวละลาย}}{\text{ปริมาตรรวมของเฟสของแข็ง}}$

แทนค่า จะได้  $x^* = \frac{2.6688}{332.80} = 8.0192$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned} \text{จาก สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลงี้ (m)} &= \frac{y^*}{x^*} \\ &= \frac{9.0005}{8.0192} = 1.1224 \\ &= 1.12 \end{aligned}$$

ในการทำงานเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 55 และ 70 องศาเซลเซียส จะได้สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลงี้เท่ากับ 1.15 และ 1.14 ตามลำดับ สรุปค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการคำนวณและค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลงี้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังตาราง ก.1

ตาราง ก.1 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการสกัดแบบกะสำหรับหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลง

ค่าตัวแปร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	55	62.5	70
ความเข้มข้นสุดท้าย (องศาบริกซ์) ( $^{\circ}\text{Br}$ )	1.0	0.9	1.0
ความหนาแน่นเฟสของแข็ง ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.982	1.00	0.985
ความหนาแน่นเฟสของเหลว ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.00	1.00	1.00
ความชื้นในเฟสของแข็ง (Mc) (ร้อยละ)	87.92	88.30	87.98
น้ำหนักเฟสของแข็ง (กรัม)	342.06	332.80	322.35
ปริมาตรรวมของเฟสของแข็ง (V) ( $\text{cm}^3$ )	348.45	332.80	327.13
$y^*$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	10.00	9.00	10.00
$x^*$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	8.72	8.02	8.76
สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลง (m)	1.15	1.12	1.14
สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลงเฉลี่ย		1.14	

### ก.6 การคำนวณหาแฟกเตอร์รูปทรง (shape factor)

เนื่องจากในการทดลองใช้ชิ้นเปลือกสับปะรดซึ่งมีรูปทรงไม่แน่นอน จำเป็นต้องหาแฟกเตอร์รูปทรง (shape factor) ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของเปลือกสับปะรดที่ใช้ในการทดลอง เพื่อใช้ในการคำนวณในแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมา

$$\text{สูตรทั่วไปในการหา แฟกเตอร์รูปทรง (s)} = \frac{(A)(r)}{V} = (Ae)(r)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิวของของแข็ง

V คือ ปริมาตรของของแข็ง

r คือ รัศมีของทรงกลม

Ae คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการถ่ายโอนมวลต่อหน่วยปริมาตรของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับชิ้นของเปลือกสับปะรด

เพื่อความสะดวกในการคำนวณหาแฟกเตอร์รูปทรง จึงใช้รูปทรงกลมเป็นรูปทรงอ้างอิง โดยการหารัศมีทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของเปลือกสับปะรดที่ใช้ทดลอง

#### แนวความคิดเกี่ยวกับแฟกเตอร์รูปทรง

เนื่องจากการแพร่ของตัวละลายในเปลือกสับปะรดจะเกิดขึ้นได้เพียง 2 ทิศทาง ดังภาพประกอบ ก.1 เพราะด้านซึ่งมีสีเขียวมีผิวมัน การแพร่ของตัวละลายผ่านด้านนี้เกิดขึ้นได้น้อยมาก ดังนั้นการแพร่ที่เกิดขึ้นในชิ้นเปลือกสับปะรดเพียงชิ้นเดียวจึงไม่เป็นไปตามแบบแผนของการแพร่สำหรับแผ่นแบนราบยาวจำกัด (finite slab)

สมมติให้มีชิ้นเปลือกสับปะรด 2 ชิ้นประกบกัน โดยหันด้านที่มีสีเขียวซึ่งไม่มีการแพร่เกิดขึ้นเข้าหากัน ดังภาพประกอบ ก.1 ดังนั้นจะทำให้การแพร่เกิดขึ้นในทุกทิศทาง (x, y และ z) ซึ่งเป็นไปตามแบบแผนของการแพร่สำหรับแผ่นแบนราบยาวจำกัด นั่นคือบริเวณกึ่งกลางของชิ้นเปลือกสับปะรดจะไม่มี การแพร่เกิดขึ้น

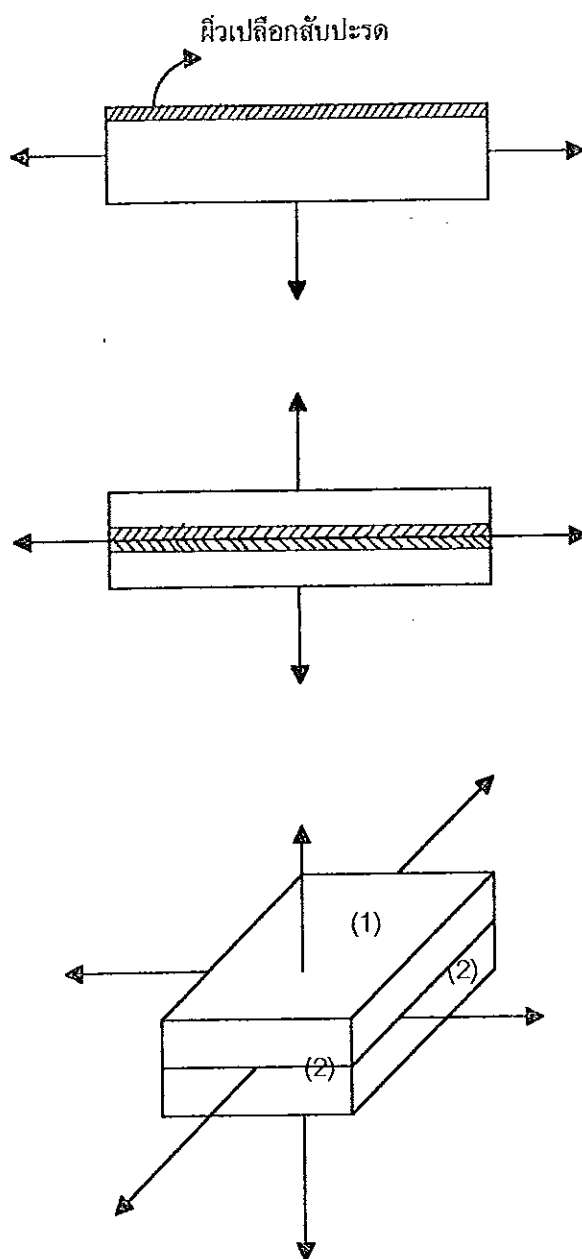
#### วิธีการหาแฟกเตอร์รูปทรง

1. เก็บตัวอย่างเปลือกสับปะรดที่สามารถเป็นตัวแทนของเปลือกสับปะรดที่ใช้ในการทดลองได้ทั้งหมด ประมาณ 20 ชิ้น นำมาคดทับบนแผ่นหมึก พิมพ์รูปทรงลงบนกระดาษ เพื่อใช้ในการหาพื้นที่ผิวที่เกิดการถ่ายโอนทั้งหมด

2. หาพื้นที่ผิวทั้งหมด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

2.1 พื้นที่ผิวด้านบน (1) วัดได้โดยการใช้เครื่อง planimeter แบบตัวเลข

2.2 พื้นที่ผิวด้านข้างโดยรอบชิ้นเปลือกสับปะรด (2)



ภาพประกอบ ก.1 ทิศทางการแพร่ของตัวละลายออกจากชั้นเปลือกสับปะรด

หาความยาวเส้นรอบรูป โดยการใช้หมุดปักลงไปตามเส้นขอบรูปของเปลือกสับปะรด  
ใช้เส้นด้ายเกาะไปตามเส้นขอบ วัดความยาวของเส้นด้ายโดยใช้ไม้โปรแทรกเตอร์

พื้นที่ผิวด้านข้างทั้งหมด = ความยาวเส้นรอบรูป  $\times$  ความหนาเฉลี่ยของเปลือก

3. แบ่งเปลือกสับปะรดเป็น 4 ชุด ๆ ละ 5 ชั้น ซึ่งน้ำหนักเริ่มต้น แล้วหาปริมาตร  
โดยการแทนที่น้ำ จะได้ความหนาแน่นของเปลือกสับปะรด

4. เนื่องจากความหนาของชั้นเปลือกสับปะรดไม่แน่นอน จึงจำเป็นต้องหาความหนา  
เฉลี่ยของเปลือกสับปะรดแต่ละชุด (ชุดละ 5 ชั้น)

จากการที่ทราบน้ำหนักรวมของเปลือกสับปะรด 5 ชั้น = M

ทราบความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดจากข้อ 3 =  $\rho$

ทราบปริมาตรของชั้นเปลือกสับปะรดรวม 5 ชั้น = V

ทราบพื้นที่ผิวด้านบนของเปลือกรวม 5 ชั้น จากข้อ 2.1 = A

ความหนาของชั้นเปลือกสับปะรดเฉลี่ย =  $\frac{V}{A}$

พื้นที่ผิวของเปลือก 1 ชั้น = พื้นที่(1) + พื้นที่(2)

พื้นที่ผิวของเปลือกรวม 5 ชั้น = พื้นที่ผิวชั้นเปลือกแต่ละชั้นรวมกัน

พื้นที่ผิวรวม 20 ชั้น (4 ชุด) = พื้นที่ผิวแต่ละชุดรวมกัน

ดังนั้นหาพื้นที่ผิวเฉลี่ยของเปลือกสับปะรด 1 ชั้น ได้ (A) (ก16)

5. หาน้ำหนักรวมของทั้ง 20 ชั้น แล้วหาน้ำหนักเฉลี่ยของเปลือกสับปะรด 1 ชั้น (M)

ดังนั้นหาปริมาตรของเปลือกสับปะรด 1 ชั้น (V) =  $\frac{M}{\rho}$  (ก17)

หาพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Ae) ชั้นเปลือกสับปะรดประกบกัน จาก

$$Ae = n(16)/n(17)$$

6. ทหารัศมีเมื่อคิดว่าปริมาตรของเปลือกสับปะรด 2 ชั้นประกบกัน เท่ากับปริมาตร  
ของทรงกลม นั่นคือ

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = n(17) \times 2 = V$$

$$r = \left(\frac{3V}{4\pi}\right)^{1/3}$$

r คือรัศมีของทรงกลมซึ่งมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของชั้นเปลือกสับปะรด

การคำนวณหาพื้นที่ผิวของเปลือกสับปะรด

ชุดที่ 1 พื้นที่ผิว 1 ด้านของ 5 ชั้นรวมกัน =  $11.3+7.0+8.4+9.2+7.4 = 43.30$

ตารางเซนติเมตร

จากน้ำหนักรวมของเปลือกสับปะรด 5 ชั้น = 23.5950 กรัม

ความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นเปลือกสับปะรด = 1.0438 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\text{ปริมาตรของเปลือกสับปะรด (V)} = 23.5950/1.0438$$

$$= 22.6049 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{ความหนาของเปลือกสับปะรดเฉลี่ย} = \frac{V}{A} = \frac{22.6049}{43.30} = 0.522 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ความหนาของเปลือกสับปะรด 2 ชิ้น ประกอบกัน} = 0.522 \times 2 = 1.0440$$

$$\text{พื้นที่ (2) รวมทั้ง 5 ชิ้น} = \text{ความยาวเส้นรอบรูป} \times \text{ความหนาเฉลี่ย}$$

$$= (17.5 + 10.9 + 13.75 + 15.15 + 11.6) \times 0.522$$

$$= 35.9658 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่ (1) รวมทั้ง 5 ชิ้น} = 43.30 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่ผิวที่มีการถ่ายโอนมวลทั้งหมดของชุดที่ 1} = 35.9658 + 43.30$$

$$= 79.2658 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

ใบทำนองเดียวกันกับชุดที่ 1 จะได้

$$\text{พื้นที่ผิวที่มีการถ่ายโอนมวลทั้งหมดของชุดที่ 2} = 74.5155 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่ผิวที่มีการถ่ายโอนมวลทั้งหมดของชุดที่ 3} = 66.2754 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

$$\text{พื้นที่ผิวที่มีการถ่ายโอนมวลทั้งหมดของชุดที่ 4} = 74.9326 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

พื้นที่ผิวของการถ่ายโอนมวล 1 ชิ้น เฉลี่ย

$$= \frac{79.2658 + 74.5155 + 66.2754 + 74.9326}{20}$$

$$= 14.7494 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

หาปริมาตรของชิ้นสับปะรดเฉลี่ย 1 ชิ้น

จากน้ำหนักรวมของเปลือกสับปะรด 4 ชุด

$$= 23.5950 + 21.8063 + 17.8602 + 21.3259 = 84.5874 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักเฉลี่ยเปลือกสับปะรด 1 ชิ้น} = \frac{84.5874}{20} = 4.2294 \text{ กรัม}$$

จากความหนาแน่นเฉลี่ย = 1.0438 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\text{จะได้ ปริมาตรของชิ้นสับปะรด 1 ชิ้น} = \frac{4.2294}{1.0438} = 4.0519 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{ดังนั้น } Ae = \frac{14.7494}{4.0519} = 3.6401$$

หาค่า r ของทรงกลมซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ ปริมาตรของเปลือกสับปะรด 2 ชิ้น

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = 4.0519 \times 2$$

$$r = 1.2460 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก แฟกเตอร์รูปทรง (s)} &= (Ae)(r) \\ &= 3.6401 \times 1.2460 = 4.5356 \end{aligned}$$

แฟกเตอร์รูปทรง ที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับทรงกลม พบว่ามีค่า เท่ากับ 3.6401 ซึ่งถ้าหาค่า Ae จากทรงกลม แล้วใช้รัศมีของทรงกลม จะหาแฟกเตอร์รูปทรง ได้เท่ากับ 3 ดังแสดงในวิธีการคำนวณ

สมมติให้ทรงกลมมีรัศมี เท่ากับ 1 เซนติเมตร

$$\text{พื้นที่ผิวทรงกลม} = 4\pi r^2$$

$$\text{ปริมาตรทรงกลม} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad Ae = \frac{3}{r}$$

$$\text{นั่นคือ แฟกเตอร์รูปทรงของทรงกลม} = (Ae)(r) = 3$$

แต่ในกรณีที่คิดค่า Ae จากรูปทรงแบบอื่น ๆ ซึ่งมีค่า Ae มากกว่า ของทรงกลม เช่น ทรงลูกเต๋า หรือแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อนำมาเทียบหารัศมีของทรงกลม จะได้แฟกเตอร์รูปทรง มากกว่า 3 อย่างแน่นอน

กรณีของแข็งมีรูปทรงเป็นลูกเต๋า

สมมติให้มีลูกเต๋าชขนาด  $1 \times 1 \times 1$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

นั่นคือ มีพื้นที่ผิว = 6 ตารางเซนติเมตร

มีปริมาตร = 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

หารัศมีของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของลูกเต๋า ได้ดังนี้

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = 1$$

$$r = 0.620$$

$$\text{แฟกเตอร์รูปทรง} = (Ae)(r) = 6 \times 0.620 = 3.720$$

กรณีของแข็งมีรูปทรงเป็นแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สมมติให้ของแข็งมีขนาด  $2 \times 2 \times 0.25$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

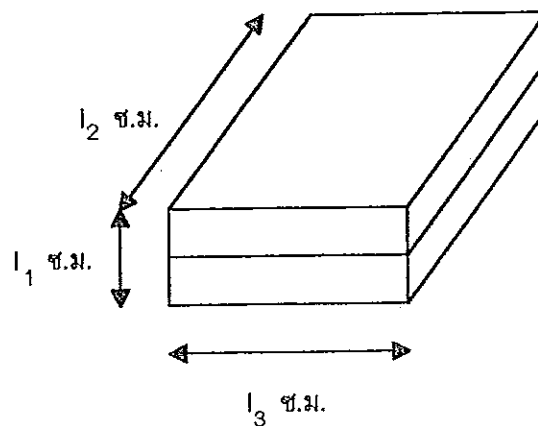
พื้นที่ผิว =  $(2 \times 2 \times 2) + (0.25 \times 2 \times 4) = 10$  ตารางเซนติเมตร

ปริมาตร =  $2 \times 2 \times 0.25 = 1$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

จะได้รัศมีของทรงกลม = 0.62 เซนติเมตร

จะได้ แฟกเตอร์รูปทรง (s) = 6.2

เมื่อเปรียบเทียบกับפקเตอร์รูปทรงที่คำนวณได้ = 4.5356 จะเห็นว่า มีค่าอยู่ระหว่างรูปทรงลูกเต๋า และ รูปทรงแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งคาดว่าเปลือกสับปะรดที่ใช้ทดลองน่าจะมีรูปทรงเป็นแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



ภาพประกอบ ก.2 รูปทรงของเปลือกสับปะรดที่ได้จากการคำนวณ

การคำนวณหารูปทรงของเปลือกสับปะรด

จากการคำนวณพบว่า เปลือกสับปะรด 1 ชิ้นมีความหนาโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.5220 เซนติเมตร และมีปริมาตรเท่ากับ 4.0519 ลูกบาศก์เซนติเมตร

สมมติให้ชิ้นเปลือกสับปะรดมีขนาด  $l_1 \times l_2 \times l_3$

$$\text{จาก } \frac{A}{V} = Ae$$

$$\frac{2 \cdot l_1 l_2 + l_2 l_3 + 2 \cdot l_1 l_3}{(4.0519)} = 3.6401$$

$$2 \cdot l_1 l_2 + l_2 l_3 + 2 \cdot l_1 l_3 = 14.7494$$

$$\text{แทนค่า } l_1 = 0.5220 \text{ จะได้}$$

$$1.0440l_3 + l_2 l_3 + 1.0440l_2 = 14.7494 \quad (\text{ก18})$$

$$\text{จาก } V = l_1 l_2 l_3$$

$$\text{แทนค่าจะได้ } l_2 l_3 = 7.7623 \quad (\text{ก19})$$

$$\text{แทนค่า (ก19) ใน (ก18) จะได้ } 1.0440l_3^2 - 6.9870l_3 + 8.1038 = 0$$

$$\text{จากการแก้สมการจะได้ } l_2 = 5.1997, \quad l_3 = 1.4928$$

ดังนั้นชิ้นเปลือกสับปะรดจะมีรูปทรงขนาด  $0.5220 \times 1.4928 \times 5.1997$  เมตร<sup>3</sup>



การทดสอบหาแฟกเตอร์รูปทรง

$$\frac{A}{V} = \frac{(0.5220 \times 1.4928 \times 2) + (0.5220 \times 5.1997 \times 2) + (1.4928 \times 5.1997)}{(0.5220 \times 1.4928 \times 5.1997)} = 3.6401$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = 0.5220 \times 1.4928 \times 5.1997 \times 2$$

$$r = 1.2460$$

จะได้ แฟกเตอร์รูปทรง =  $1.2460 \times 3.6401 = 4.5356$

จะเห็นว่าค่าแฟกเตอร์รูปทรงเท่ากัน

เมื่อเปรียบเทียบรูปทรงแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กับ แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด จะพบว่าแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีการแพร่เกิดขึ้นทั้ง 3 ทิศทาง แต่แผ่นแบนราบยาวไม่จำกัดจะมีการแพร่เกิดขึ้นเพียงทิศทางเดียว ดังนั้นในการคำนวณจึงใช้สูตรเดียวกับกรณีแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด ซึ่งให้มีแฟกเตอร์รูปทรงเท่ากับ 1.0 แต่คิดว่าการแพร่เกิดขึ้น 3 ทิศทาง ดังนี้

สมการสำหรับการสกัดแบบไหลสวนทาง

$$E_{IS} = C_n \exp(-q_n^2 \tau)$$

กรณีแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$E_{RS} = E_{IS1} \cdot E_{IS2} \cdot E_{IS3}$$

เมื่อคิดเฉพาะเทอมที่ 1 ของการแพร่ในแต่ละทิศทาง จะได้

$$E_{RS} = C_{11} \exp(-q_1^2 \tau_1) \cdot C_{12} \exp(-q_1^2 \tau_2) \cdot C_{13} \exp(-q_1^2 \tau_3)$$

กำหนดให้  $C_1 = C_{11} \cdot C_{12} \cdot C_{13}$

$$\tau = \frac{D_s t}{l^2}$$

จะได้  $E_{RS} = C_1^3 \exp\left[-\left(\frac{q_1^2}{l_1^2} + \frac{q_1^2}{l_2^2} + \frac{q_1^2}{l_3^2}\right) D_s t\right]$  (ก20)

เมื่อ  $l_1$  คือ ความหนาของมิติที่ 1 (0.00522 เมตร)

$l_2$  คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาของมิติที่ 2 (0.007464 เมตร)

$l_3$  คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาของมิติที่ 3 (0.0259985 เมตร)

ก.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกซีส  
วัสดุ

1. เปลือกสับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย ซึ่งเป็นเศษเหลือจากการผลิตสับประรดกระป๋อง  
ของบริษัทสับประรดไทย จำกัด มหาชน เปลือกสับประรดผ่านเครื่องสับ ได้ชั้นเปลือกสับประรดที่มี  
รูปทรงไม่แน่นอน

2. น้ำประปา

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการสกัดน้ำสับประรดจากเปลือก

(1) ถังสกัด (ภาพประกอบ ก.3) ประกอบด้วยถังไม้รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 30  
เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร หุ้มด้วยสแตนเลส สำหรับใส่น้ำประปาเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการ  
สกัดตามต้องการ โดยมีเครื่องทำน้ำร้อนหมุนเวียน ภายในถังมีท่อสำหรับปล่อยน้ำที่ใช้แล้วทิ้ง  
และมีถังรูปทรงกระบอก 4 ใบ แต่ละใบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความลึก 19  
เซนติเมตร กันถังรูปทรงกระบอกมีลักษณะเป็นกรวยมีก๊อกเปิดปิดได้สำหรับถ่ายน้ำสับประรดที่สกัด  
ได้ออก ส่วนด้านบนของถังมีแกนเหล็กสำหรับติดตั้งมอเตอร์เพื่อใช้สำหรับหมุนใบพัดทั้ง 4 โดยที่  
ใบพัดทั้ง 4 จุ่มอยู่ในถังทรงกระบอก

(2) ตะแกรงสำหรับบรรจุเปลือกสับประรดที่ใช้สกัด ตะแกรงมีฝาปิดทำด้วยเหล็กชุบ  
โครเมียม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร มีความจุเปลือกสับประรดได้ประมาณ 350 กรัม

(3) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็วรอบใบพัด (digital tachometer) Lutron  
DT-2233

(4) เครื่องชั่งแบบตัวเลข ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่ 2 model WB-6001-g  
89061 ของบริษัท Sartorius Basic Series สำหรับชั่งกากสับประรด

(5) กระบอกตวง ขนาด 1000 มิลลิลิตร สำหรับตวงน้ำร้อนที่ใช้สกัด

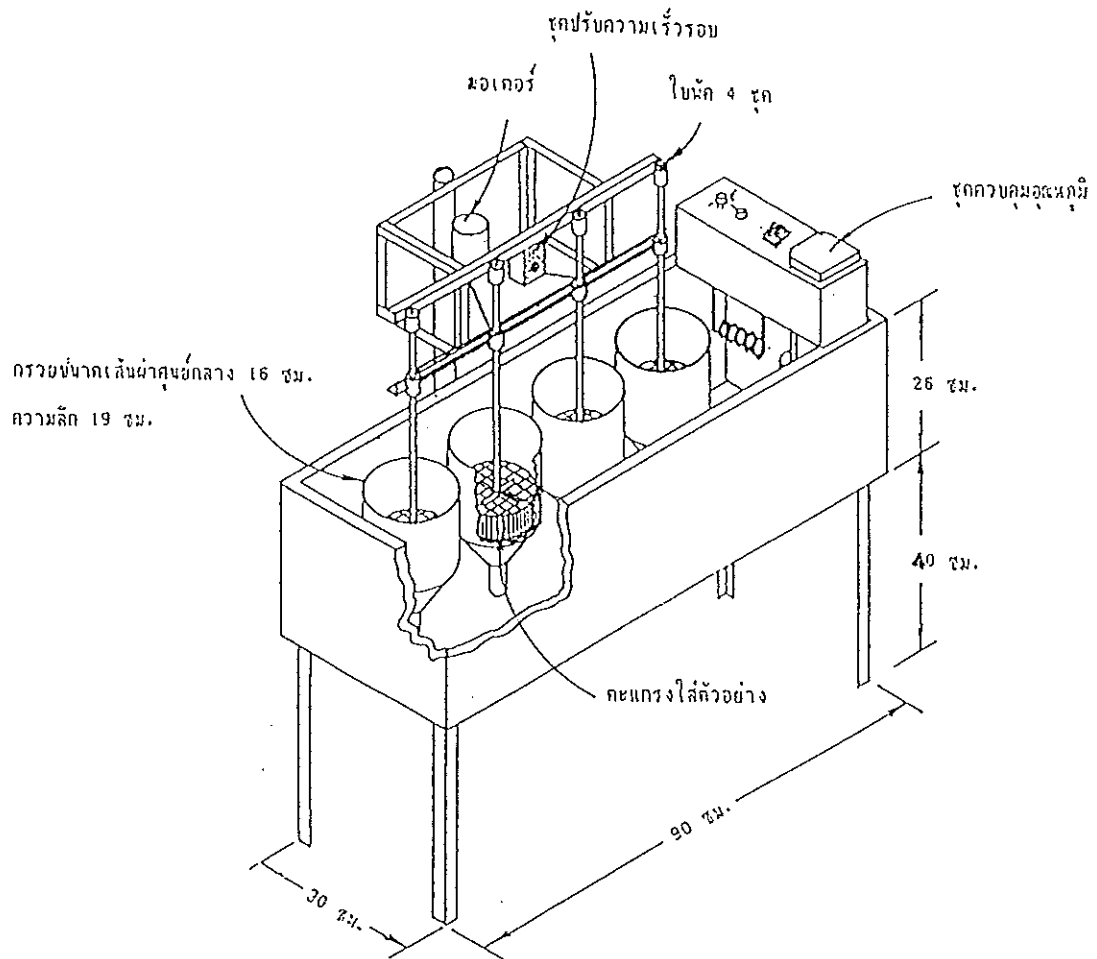
2. อุปกรณ์และเครื่องมือวัดความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลในน้ำสับประรดที่สกัดได้

(1) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity meter) รุ่น ORION Model 120 ชนิด  
Hand-held Set, Instruction Manual

(2) นาฬิกาจับเวลา แบบตัวเลข โมเดล HS-10W ยี่ห้อ CASIO

3. อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับทำกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของ  
สารละลายน้ำตาลในน้ำสับประรด

(1) บีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร สำหรับใส่น้ำสับประรด



ภาพประกอบ ก.3 แผนภาพตั้งสกัดแบบกะสำหรับหาสัมประสิทธิ์การแพร่  
และสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลง ในเปลือกสับปะรด  
ออกแบบโดย : ดร.ชัยรัตน์ ศิริพัฒนะ และครูพรชัย ศรีไพบูลย์

(2) เครื่องซึ่งสำหรับการเจือจางน้ำสับปะรด แบบตัวเลข ความละเอียดทศนิยม  
ตำแหน่งที่ 4 รุ่น 4210P ของบริษัท Sartorius GmbH Gottingen

(3) เครื่องวัดความเข้มข้นของน้ำตาล (ของแข็งที่ละลายได้) ใช้ Abbe Refractometer  
รุ่น 3L บริษัท Bausch & Lomb ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้วัดความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสับปะรด

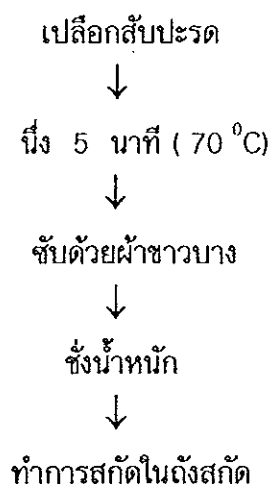
(4) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity meter) รุ่น ORION model 120 ชนิด  
Hand-held Set, Instruction Manual

(5) อุปกรณ์สำหรับปรับอุณหภูมิน้ำสับปะรด (hot plate)

(6) เทอร์โมมิเตอร์แบบตัวเลข ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่ 1 โมเดล 51 K/J  
ของบริษัท Fluke

#### วิธีทดลอง

##### 1. การเตรียมวัตถุดิบ ดังภาพประกอบ ก.4



ภาพประกอบ ก.4 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเปลือกสับปะรด

##### 2. การทำกราฟมาตรฐาน

(1) วัดความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลายน้ำสับปะรดเริ่มต้นด้วยเครื่อง Abbe  
Refractometer

(2) นำสารละลายที่ได้หลังการสกัด ทำการเจือจางด้วยน้ำประปา ครั้งละ 2 เท่า จน  
ครบ 5 ความเข้มข้น

(3) นำสารละลายที่ได้มาเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ใช้สกัด แล้ววัดค่าการนำไฟฟ้า  
ของสารละลายทั้งหมดด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

(4) สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของตัวละลายเป็นองศาเบริกซ์ ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) กับค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์) ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )

### 3. การกำหนดสภาวะในการทดลอง

(1) อุณหภูมิเฉลี่ยในระบบการสกัด 3 ระดับ คือ 55 , 62.5 และ 70 องศาเซลเซียส

(2) รูปทรงของชิ้นเปลือกสับปะรดขนาด  $0.5220 \times 1.4928 \times 5.1997$  ลูกบาศก์ เซนติเมตร

(3) ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทุกชุดการทดลอง

### 4. ทำการสกัดแบบกะ

(1) ชั่งน้ำหนักเปลือกสับปะรดใส่ในตะแกรงประมาณ 350 กรัม

(2) ใช้น้ำหนักน้ำร้อนที่ใช้สกัด ต่อน้ำหนักเปลือกสับปะรดในอัตราส่วน 7 ต่อ 1

(3) ทำการสกัดโดยใส่ตะแกรงลงในชุดสกัดซึ่งมีน้ำร้อนอยู่ ควบคุมความเร็วของใบพัด ประมาณ 250 รอบต่อนาที

(4) สุ่มตัวอย่างที่เวลา 2 , 4 , 6 , 8 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 40 , 50 , 60 , 70 , 80 นาที วัดความเข้มข้นของตัวละลายในชิ้นสับปะรด โดยใช้เครื่อง Abbe Refractometer วัดความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลายที่สกัดได้โดยใช้ เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ควบคุมไปกับ Abbe Refractometer

(5) ชั่งน้ำหนักกากเปลือกสับปะรดหลังสกัด และน้ำหนักสารละลายที่สกัดได้ เพื่อใช้ทำดุลมวลสำหรับหาค่าความเข้มข้นสุดท้าย (ที่สถานะคงตัว) ของน้ำตาลในกากเปลือกสับปะรด และในสารละลายที่สกัดได้

(6) วัดความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลายที่สกัดได้เมื่อการสกัดสิ้นสุดลง นำมาเจือจาง เพื่อใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

(7) หาความชื้นของเปลือกสับปะรดก่อนการสกัดและหลังการสกัด

### การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

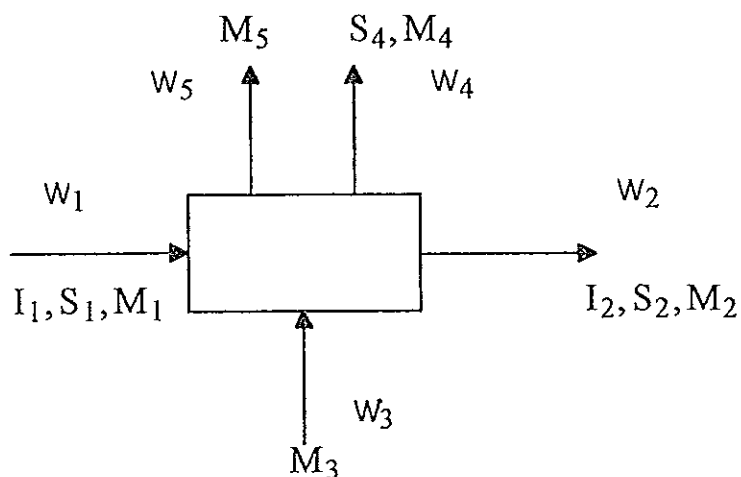
กรณีเปลือกสับปะรดมีรูปทรงเป็นแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หาได้โดยใช้สมการ

$$D_s = -\hat{s} \left( \frac{1}{q_{11}^2/l_1^2 + q_{12}^2/l_2^2 + q_{13}^2/l_3^2} \right)$$

หาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส โดยใช้สมการ

$$t_p = [\ln C_{11} C_{12} C_{13}(s, \gamma, Bi) - \ln j] / \hat{S}$$

การทำดุลมวลในการสกัดน้ำสับปะรดจากเปลือกสับปะรด



ภาพประกอบ ก.5 ดุลมวลในกระบวนการสกัดแบบกะ

ดุลมวลทั้งหมด

$$W_1 + W_3 = W_2 + W_4 + W_5$$

ดุลขององค์ประกอบเฉื่อย

$$I_1 W_1 = I_2 W_2$$

ดุลของน้ำ

$$M_1 W_1 + W_3 = M_2 W_2 + M_4 W_4 + W_5$$

ดุลของแข็งที่ละลายได้

$$S_1 W_1 = S_2 W_2 + S_4 W_4$$

เมื่อ  $W_1$  = น้ำหนักเปลือกสับปะรดก่อนการสกัด (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักเปลือกของสับปะรดหลังการสกัด (กรัม)

$W_3$  = น้ำหนักน้ำร้อนที่ใช้สกัด (กรัม)

$W_4$  = น้ำหนักสารละลายที่สกัดได้ (กรัม)

$W_5$  = น้ำหนักน้ำร้อนที่ระเหยไป (กรัม)

$I_1$  = สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยในเปลือกสับปะรดก่อนสกัด

$I_2$  = สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยในเปลือกสับปะรดหลังสกัด

$S_1$  = สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ในเปลือกสับปะรดก่อนสกัด

$S_2$  = สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ในเปลือกสับปะรดที่สถานะคงตัว

$S_4$  = สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ในสารละลายที่สถานะคงตัว

$M_1$  = สัดส่วนของความชื้นในเปลือกสับปะรดก่อนการสกัด

$M_2$  = สัดส่วนของความชื้นในเปลือกสับปะรดหลังการสกัด

$M_3$  = สัดส่วนของความชื้นในน้ำร้อนที่ใช้สกัด

$M_4$  = สัดส่วนของความชื้นในสารละลายที่สกัดได้

$M_5$  = สัดส่วนของความชื้นในน้ำร้อนที่ระเหยไป

กำหนดให้

$x^*$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในเปลือกสับปะรดที่สถานะคงตัว

$y^*$  คือ ความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลายที่สกัดได้ที่สถานะคงตัว

ที่สถานะคงตัว ค่า  $y^* = mx^*$  ในที่นี้  $m$  คือค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล วิธีการหาดังในภาคผนวก ก.5 จากตาราง ก.1  $m=1.14$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในชั้นเปลือกสับปะรดซึ่งมีรูปทรงเป็นแผ่นแบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $0.5220 \times 1.4928 \times 5.1997$  ลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยในการสกัด 55 องศาเซลเซียส

#### 1. การทำดุลมวล

น้ำหนักเปลือกสับปะรดก่อนการสกัด ( $W_1$ ) = 351.16 กรัม

น้ำหนักน้ำร้อนที่ใช้ในการสกัด ( $W_3$ ) = 2450 กรัม

น้ำหนักเปลือกสับปะรดหลังการสกัด ( $W_2$ ) = 342.06 กรัม

น้ำหนักสารละลายที่สกัดได้ ( $W_4$ ) = 2010 กรัม

ความชื้นของเปลือกสับปะรดก่อนการสกัดร้อยละ 83.10

ความชื้นของเปลือกสับปะรดหลังการสกัดร้อยละ 87.92

ดุลมวลทั้งหมด

$$W_1 + W_3 = W_2 + W_4 + W_5$$

$$W_5 = 351.16 + 2450 - 342.06 - 2010 = 449.10 \text{ กรัม}$$

ดุลของน้ำ

$$M_1 W_1 + W_3 = M_2 W_2 + M_4 W_4 + W_5$$

$$0.8310(351.16) + 2450 = 0.8792(342.06) + 2010M_4 + 449.10$$

$$M_4 = 0.9910$$

$$\text{หาค่า } S_4 \text{ จาก } S_4 = 1 - I_4 - M_4$$

$$S_4 = 1 - 0 - 0.9910 = 0.0090$$

จะได้น้ำหนักของตัวละลายต่อน้ำหนักของสารละลายเท่ากับ 0.9 องศาบริกซ์  
 ความหนาแน่นของสารละลายที่สกัดได้ = 1.00002 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
 จะได้น้ำหนักของตัวละลายต่อปริมาตรของสารละลาย =  $\frac{0.9}{1.00002} = 0.9$   
 ดังนั้นความเข้มข้นในเฟสของเหลวที่สถานะคงตัว ( $y^*$ ) = 0.9

$$\text{จาก } y^* = mx^*$$

$$x^* = \frac{0.9}{1.14} = 0.79$$

ดังนั้นความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งที่สถานะคงตัว = 0.79

$$\text{จะได้ } S_2 = 0.0079$$

ดุลของแข็งที่ละลายได้

$$S_1 W_1 = S_2 W_2 + S_4 W_4$$

$$\text{หาค่า } S_1 \text{ จาก } S_1 = (S_2 W_2 + S_4 W_4) / W_1$$

$$= (0.0079)(342.06 + 2010) / 351.16$$

$$S_1 = 0.0529$$

ตาราง ก.2 ข้อมูลกราฟมาตรฐาน สำหรับการหาสัมประสิทธิ์การแพร่

ระดับความเจือจาง	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์)
1	1.0	1176
1/2	0.5	630
1/4	0.25	343
1/8	0.125	184
1/16	0.0625	100

ได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Y) กับค่าการนำไฟฟ้า (X) เป็นเส้นตรงตามสมการ

$$\ln Y = 1.12518 \ln X - 7.95139 \quad (\text{ก21})$$

ค่าการนำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ จากการทดลองแปลงเป็นปริมาณของแข็งที่ละลายได้



ทั้งหมดในสารละลายที่สกัดได้ โดยใช้สมการ (ก21) ข้อมูลที่ได้ดังแสดงในตาราง ก.2

จากปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสารละลายที่สกัดได้ที่เวลาต่างๆ นำมาหา  
ค่า E (สัดส่วนที่เหลืออยู่ของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด) หาได้จากสมการ (ก22)

$$E = \frac{y-y_{\infty}}{y_0-y_{\infty}} \quad (\text{ก22})$$

ค่า E ที่คำนวณได้แสดงในตาราง ก.3

ข้อมูลที่ได้นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ เวลาที่ใช้ในการสกัด (t)

ดังภาพประกอบ ก.6 จะได้ ความชัน (S) = - 0.04306

$$\text{จุดตัดแกน Y } (\ln j) = - 0.3992$$

ตาราง ก.3 ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ได้จากการทดลองสกัดแบบกะ  
ที่ 55 องศาเซลเซียส สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

เวลา (นาที)	ค่าความนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์)	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)	ค่า E
2	220	0.152	0.831
4	357	0.262	0.708
6	468	0.356	0.605
8	537	0.415	0.538
10	614	0.483	0.463
15	744	0.600	0.334
20	796	0.647	0.281
25	838	0.685	0.238
30	884	0.728	0.191
40	946	0.786	0.127
50	997	0.833	0.0740
60	1023	0.858	0.0468
70	1035	0.869	0.0342
80	1047	0.880	0.0216

## 2. การคำนวณค่าดริฟต์( $\alpha$ )

ดริฟต์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเฟสของเหลวต่อปริมาตรของสารละลาย  
ในเฟสของแข็ง

สัดส่วนของตัวละลายในเปลือกสับปะรดก่อนการสกัด = 0.0529

สัดส่วนของความชื้นในเปลือกสับปะรดก่อนการสกัด = 0.8310

น้ำหนักเปลือกสับปะรดก่อนการสกัด = 351.16 กรัม

ความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดที่สถานะคงตัว = 1.0085 กรัมต่อลูกบาศก์

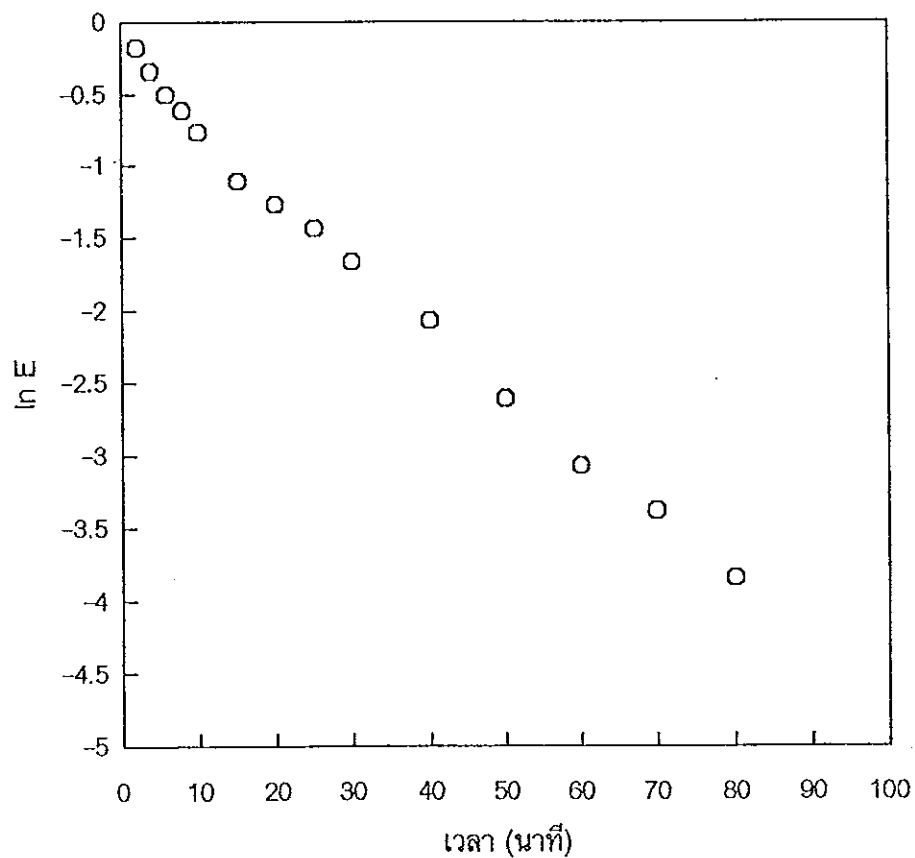
เซนติเมตร

ความหนาแน่นของน้ำสับปะรดที่สถานะคงตัว = 1.0002 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

น้ำหนักสารละลายน้ำตาลทั้งหมด =  $(351.16)(0.8310 + 0.0529)$

= 310.39 กรัม

$$\alpha = \frac{2450 \times 1.00002}{1.0000 \times 310.39} = 7.8949$$



ภาพประกอบ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับ เวลาที่ใช้ในการสกัด (นาที)

3. การคำนวณค่า  $\hat{F}$ 

หาค่า  $\hat{F}$  ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณของ F จากตาราง 1.3

$$\hat{F} = 2.4391 - 3.7766 \times 10^{-1}/\alpha + 2.1857 \times 10^{-2}/\alpha^2$$

แทนค่า  $\alpha = 7.8949$  จะได้

$$\hat{F} = 2.3916$$

4. การคำนวณค่า  $q_1^2$ 

จากสมการ

$$q_1^2 = \left[ \frac{1}{(1+\hat{F}/B_i)} \right] s \hat{F} \left[ \frac{\gamma+1}{\gamma} \right] \quad , \quad j = 1$$

ในที่นี้

$$B_i \rightarrow \infty$$

$$s = \text{แฟกเตอร์รูปทรง} = 1$$

$$\gamma = \alpha$$

$$\begin{aligned} \text{จากการแทนค่าได้ } q_1^2 &= (2.3916) \left[ \frac{(7.8949+1)}{7.8949} \right] \\ &= 2.6945 \end{aligned}$$

## 5. การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่

จากสมการ

$$D_s = -\hat{S} \left[ \frac{1}{q_{11}^2/l_1^2 + q_{12}^2/l_2^2 + q_{13}^2/l_3^2} \right]$$

เมื่อ  $\hat{S}$  คือความลาดชันของกราฟ  $\ln E$  กับเวลา (t) ในที่นี้  $= -0.04306$

$a_1, a_2, a_3$  คือครึ่งหนึ่งของความหนา, ความกว้าง และความยาวตามลำดับ  
ในที่นี้ ขึ้นเปลือกสับประต้อมีขนาด  $0.5220 \times 1.4928 \times 5.1997$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$l_1^2 = (0.00522)^2 \text{ ตารางเมตร}$$

$$l_2^2 = (0.007464)^2 \text{ ตารางเมตร}$$

$$l_3^2 = (0.0259985)^2 \text{ ตารางเมตร}$$

เนื่องจาก  $q_1$  เป็นค่าคงที่ขึ้นกับรูปทรงของเฟสของแข็งและค่าดริฟท์

$q_{11}, q_{12}, q_{13}$  เป็นค่าคงที่ตามทิศทางการแพร่ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ในที่นี้

$$q_1 = q_{11} = q_{12} = q_{13}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } D_s &= \frac{-0.04306}{\left[ \frac{2.6945}{(0.00522)^2} + \frac{2.6945}{(0.007464)^2} + \frac{2.6945}{(0.0259985)^2} \right]} \\ &= 4.7488 \times 10^{-9} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

6. การคำนวณเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ( $t_p$ )

กรณีแผ่นแบนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$t_p = [\ln C_{11} C_{12} C_{13} (s, \gamma, Bi) - \ln j] / \hat{S}$$

หาค่า  $C_1$  ได้จาก  $C_1 = \frac{2\gamma(\gamma+1)}{(\gamma+1)+(\gamma q_1)^2}$ 

$$\text{แทนค่าได้ } C_1 = \frac{2(7.8949)(7.8949+1)}{(7.8949+1)+(7.8949)^2(2.6945)} = 0.7944$$

ในที่นี้  $C_1 = C_{11} = C_{12} = C_{13}$ 

$\ln j =$  จุดตัดแกน  $y$  ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln E$  กับเวลาในการสกัด  
 $= -0.3992$

ความชัน ( $\hat{S}$ ) = -0.04306

$$\text{แทนค่าได้ } t_p = \frac{\ln(0.7944)^3 - (-0.3992)}{-0.04306} = 6.76 \text{ นาที}$$

$$t_p = 6.76 \text{ นาที}$$

สรุปค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสดังตาราง ก.4

ตาราง ก.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ครั้งที่	สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D_s$ ) (ตารางเมตรต่อวินาที)	เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ( $t_p$ ) (นาที)
55	1	$4.75 \times 10^{-9}$	6.76
55	2	$5.15 \times 10^{-9}$	5.15
55	3	$5.20 \times 10^{-9}$	4.05
	เฉลี่ย	$5.03 \times 10^{-9}$	5.32
62.5	1	$6.12 \times 10^{-9}$	1.78
62.5	2	$6.31 \times 10^{-9}$	1.45
62.5	3	$5.82 \times 10^{-9}$	1.86
	เฉลี่ย	$6.08 \times 10^{-9}$	1.70
70	1	$6.62 \times 10^{-9}$	1.06
70	2	$7.13 \times 10^{-9}$	0.78
70	3	$7.41 \times 10^{-9}$	0.95
	เฉลี่ย	$7.05 \times 10^{-9}$	0.93

หมายเหตุ การนึ่งเปลือกสับประรดโดยใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก่อนที่จะนำมาสกัดเพื่อหาค่าเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกสามารถคาดการณ์ได้ว่า เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกน่าจะมีค่าน้อยมาก เข้าใกล้ศูนย์ แต่จากผลการทดลองจะเห็นว่า เวลายังมีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกอยู่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลของการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer effect) กล่าวคือ เปลือกสับประรดก่อนการสกัดได้ปล่อยทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิต่ำลง ก่อนที่จะนำไปสกัด จึงมีอุณหภูมิต่ำกว่าเฟสของเหลวที่ใช้ในการสกัด ทำให้ต้องมีเวลาการถ่ายโอนความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิใจกลางเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในการสกัด ทำให้ดูเหมือนว่า ยังมีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกเหลืออยู่

ดังนั้นในการคำนวณเพื่อใช้ในการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวในโปรแกรม ง.4 จึงกำหนดให้เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติกเท่ากับศูนย์

## ภาคผนวก ข การแปลงหน่วยความเข้มข้นของตัวละลาย

### 1. การหาความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดโดยการแทนที่น้ำ

- (1) สุ่มหยิบเปลือกสับปะรดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนเปลือกสับปะรดที่ใช้ในการทดลองจำนวน 20 ชิ้น
- (2) แบ่งเปลือกสับปะรดออกเป็น 4 ชุด ๆ ละ 5 ชิ้น ชั่งน้ำหนักหว่านที่ผิวเปลือกออกโดยใช้กระดาษทึบ
- (3) ชั่งน้ำหนักเปลือกสับปะรดแต่ละกลุ่ม ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่ 2
- (4) นำเปลือกสับปะรดที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้วแต่ละชุด เติมลงในกระบอกตวงขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีน้ำอยู่มีปริมาตรที่แน่นอน จดบันทึกปริมาตรของน้ำก่อนเติมน้ำขึ้นตัวอย่าง
- (5) ใช้พลาสติกปิดส่วนบนของกระบอกตวงให้ยางรัดให้แน่น เขย่ากระบอกตวงจนกระทั่งไม่มีฟองอากาศเกาะอยู่ที่ผิวหน้าของเปลือกสับปะรด
- (6) จดบันทึกปริมาตรของน้ำหลังเติมน้ำขึ้นตัวอย่างเปลือกสับปะรด
- (7) คำนวณหาความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดได้จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่น } (\rho) = \frac{M}{V}$$

เมื่อ M คือ น้ำหนักเปลือกสับปะรด

V คือ ปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยเปลือกสับปะรด

### 2. การหาปริมาณความชื้นของเปลือกสับปะรด

- (1) อบอุ่นสำหรับหาความชื้นในตูบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 - 3 ชั่วโมง นำออกจากตูบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น จนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก
- (2) กระทำซ้ำจนกระทั่ง ได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งทั้งสองครั้งติดกันไม่เกิน 1 - 3 มิลลิกรัม
- (3) ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1 - 3 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นซึ่งทราบน้ำหนักแล้ว
- (3) นำไปอบในตูบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 5 - 6 ชั่วโมง
- (4) นำออกจากตูบใส่ในโถดูดความชื้น ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก

(5) อบอุ่นอีกครั้ง ๆ ละประมาณ 30 นาที และกระทำเช่นเดิมจนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ซึ่งทั้งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1 - 3 มิลลิกรัม

(6) คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสมการ

ปริมาณความชื้นคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

$$= \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น}} \times (100)$$

3. การคำนวณปริมาณของแข็งที่ละลายได้เป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ความเข้มข้นเป็นองศาบริกซ์ ( $^{\circ}$ brix) หมายถึง ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวละลาย (solute) ต่อน้ำหนักของสารละลาย (solution)

ความเข้มข้นเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หมายถึง น้ำหนักของตัวละลายต่อปริมาตรของสารละลาย

เฟสของเหลว

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลว} &= \frac{\text{น้ำหนักของตัวละลาย}}{\text{ปริมาตรของเฟสของเหลว}} \\ &= \frac{\text{น้ำหนักของตัวละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}} \end{aligned}$$

เนื่องจากในเฟสของเหลว ประกอบด้วยน้ำและตัวละลายเท่านั้น ดังนั้นปริมาตรของเฟสของเหลว จึงเท่ากับปริมาตรของสารละลาย

เฟสของแข็ง

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง} &= \frac{\text{น้ำหนักของตัวละลาย}}{\text{ปริมาตรของเฟสของแข็ง}} \\ &= \frac{\text{น้ำหนักของตัวละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย} + \text{ปริมาตรของของแข็ง}} \end{aligned}$$

กรณีเฟสของเหลว

จากการที่ทราบค่าความเข้มข้นของตัวละลายโดยการวัดด้วยเครื่อง Abbe Refractometer หน่วยเป็นองศาบริกซ์ สมมติให้วัดค่าได้ Br องศาบริกซ์ นั่นคือ สารละลาย 100 กรัม มีตัวละลายหนัก Br กรัม ต้องเปลี่ยนน้ำหนักของสารละลายเป็นปริมาตร โดยการวัดความหนาแน่นของสารละลายดังกล่าว ด้วยการเอาสารละลายที่สกัดได้ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ Br องศาบริกซ์ บรรจุในขวดวัดปริมาตร แล้วชั่งน้ำหนัก จะได้

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของสารละลายที่มีความเข้มข้น Br ปริกซ์ } (\rho_L) \\ = \frac{\text{น้ำหนักของสารละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}} \end{aligned}$$

$$\text{ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลว} = \frac{(\text{Br})(\rho_L)}{100}$$

เนื่องจากในการทดลองจริง ไม่สามารถวัดหาความหนาแน่นของสารละลายที่สกัดได้ที่จุดต่างๆ ในเครื่องสกัดได้ และกำหนดให้ความหนาแน่นของเฟสของเหลวแต่ละจุดในเครื่องสกัดมีค่าใกล้เคียงกัน สมมติให้ความหนาแน่นในเฟสของเหลวคงที่ จึงประมาณความหนาแน่นของเฟสของเหลวเป็นความหนาแน่นโดยเฉลี่ย ดังนี้

ความหนาแน่นเฉลี่ยในเฟสของเหลว

$$= (\text{ความหนาแน่นของสารละลายตรงทางเข้า} + \text{ความหนาแน่นของสารละลายตรงทางออก}) / 2$$

ความหนาแน่นของสารละลายตรงทางออก คือความหนาแน่นของสารละลายที่สกัดได้

ความหนาแน่นของสารละลายตรงทางเข้า คือความหนาแน่นของน้ำที่ใช้ในการสกัด

เท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กรณีเฟสของแข็ง

(1) จากการที่ทราบค่าความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดก่อน และหลังการสกัด สามารถหาความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดเฉลี่ยจาก

$$\text{ความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดเฉลี่ย } (\rho_{\text{avg}}) = \frac{\rho_{\text{in}} + \rho_{\text{out}}}{2}$$

เมื่อ  $\rho_{\text{in}}$  คือ ความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดตรงทางเข้า

$\rho_{\text{out}}$  คือ ความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดตรงทางออก

(2) จากการที่เราทราบค่าความหนาแน่นของเปลือกสับปะรด จึงสามารถหาปริมาตรของเปลือกสับปะรดได้จาก

$$V = \frac{M}{\rho_{\text{avg}}} \quad (\text{ข1})$$

(3) จากการที่เราทราบค่าปริกซ์เริ่มต้นของเปลือกสับปะรดก่อนการสกัด (Br) และทราบความชื้นของเปลือกสับปะรด (Mc)

$$\text{ดังนั้นปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเปลือกสับปะรดน้ำหนัก } M \text{ กรัม เท่ากับ } \frac{(Mc)(M)}{100}$$

$$\text{และมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้เท่ากับ } \frac{(\text{Br})(Mc)(M)}{(100-\text{Br})(100)} \quad (\text{ข2})$$

สมการ (ข2) หาด้วย สมการ (ข1) จะได้



$$\text{ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)} = \frac{(Br)(Mc)(p_{avg})}{(100-Br)(100)} \quad (ข3)$$

ดังนั้นสามารถหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ โดยใช้สมการ (ข3)

เมื่อ Br คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (องศาบริกซ์)

Mc คือ ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)

$p_{avg}$  คือ ความหนาแน่นของเปลือกสับปะรดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

#### ข้อกำหนดในการคำนวณสำหรับเฟสของแข็ง

เนื่องจากความชื้นในเฟสของแข็งแต่ละจุดในรางสัปดาห์จะไม่เท่ากัน แต่การหาความหนาแน่นในเฟสของแข็งทุกจุดมีความยุ่งยาก จึงกำหนดให้หาความชื้นในเฟสของแข็งตรงทางเข้าและตรงทางออกเท่านั้น ความชื้นที่หาได้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่การคำนวณหาความเข้มข้นในเฟสของแข็งที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ให้ใช้ความชื้นตรงทางเข้ามาใช้คำนวณ ส่วนการคำนวณหาความเข้มข้นในเฟสของแข็งที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 4, 5 และ 6 ให้ใช้ความชื้นตรงทางออกมาใช้ในการคำนวณ

#### ข้อกำหนดในการคำนวณสำหรับเฟสของเหลว

เนื่องจากความหนาแน่นของเฟสของเหลวที่จุดต่าง ๆ ในเครื่องสัปดาห์มีค่าไม่คงที่ การคำนวณเพื่อหาความเข้มข้นเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ถึง 6 ให้ใช้ความหนาแน่นเฉลี่ยมาใช้คำนวณ ส่วนการคำนวณหาความเข้มข้นในเฟสของเหลวตรงทางออก ให้ใช้ความหนาแน่นตรงทางออกมาใช้คำนวณ

## ภาคผนวก ค ระบบการควบคุมอินเวอร์เตอร์โดยไมโครคอมพิวเตอร์

### 1. ความจำเป็นในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ไม่สามารถตั้งระยะเวลาที่จะให้มอเตอร์หมุนไปข้างหน้าและถอยหลังได้ ในขณะที่ระบบสเก็ดต้องการให้อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ให้หมุนไปข้างหน้าและถอยหลังสลับไปมาในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นต้องใช้คนคอยปรับความเร็วในการหมุน และบังคับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไปข้างหน้าและถอยหลังตลอดเวลา ซึ่งไม่สะดวกในการทดลอง จึงได้พัฒนาโปรแกรมซึ่งเขียนด้วยภาษาซีขึ้นมา เพื่อช่วยให้ระบบสเก็ดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ เป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ โปรแกรมการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในภาคผนวก ง.1

### 2. ประโยชน์ของโปรแกรมควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

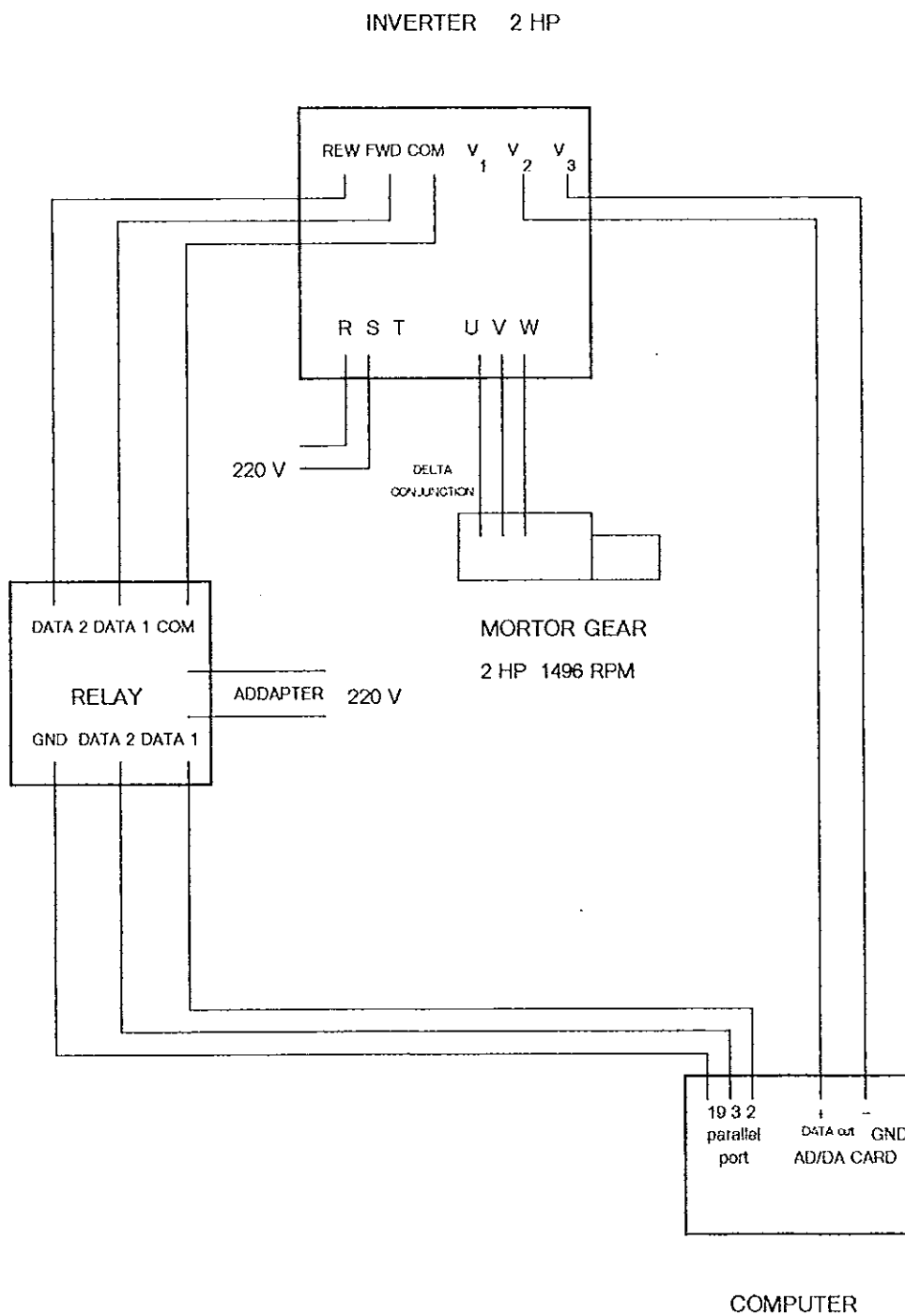
(1) สามารถป้อนอัตราเร็วในการหมุนของมอเตอร์ไปข้างหน้า และอัตราเร็วในการหมุนถอยหลังได้ตามต้องการ

(2) สามารถป้อนระยะเวลาที่ให้มอเตอร์หมุนไปข้างหน้า และระยะเวลาที่ให้มอเตอร์หมุนถอยหลังได้ตามต้องการ

### 3. ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการเชื่อมต่อกันระหว่างอินเวอร์เตอร์กับไมโครคอมพิวเตอร์

สัญญาณที่ออกจากคอมพิวเตอร์ เป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีระดับไม่ต่อเนื่อง ส่วนสัญญาณที่อินเวอร์เตอร์รับได้นั้นเป็นสัญญาณแอนาล็อก (analog) ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีความต่อเนื่อง ดังนั้นการเชื่อมต่อกันระหว่างอินเวอร์เตอร์กับไมโครคอมพิวเตอร์ จะต้องใช้ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลที่ออกจากคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณแอนาล็อกซึ่งอินเวอร์เตอร์เข้าใจได้ ปัจจุบันวงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนาล็อกมีขายเป็นวงจรสำเร็จรูป เรียกว่า ดี ทุ เอ การ์ด (D/A card) สามารถเสียบเข้ากับช่องเสียบ (slot) ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง

การใช้การ์ด ดี ทุ เอ เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอินเวอร์เตอร์ ช่วยให้อินเวอร์เตอร์รับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ได้เท่านั้น การสั่งงานอินเวอร์เตอร์จะต้องใช้โปรแกรมสั่งงานที่ได้พัฒนาขึ้นมา การควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้หมุนไปข้างหน้า และหมุนถอยหลังได้ต้องผ่านวงจรรีเลย์ (relay) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมาเช่นเดียวกัน แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ อินเวอร์เตอร์ และ วงจรรีเลย์ ในภาพประกอบ ค.1



ภาพประกอบ ค.1 ระบบการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

#### 4. แนวคิดเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์

##### 4.1 การหาความเร็วรอบของสกรูลำเลียง

มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนสกรู เป็นมอเตอร์เกียร์ มีอัตราทดรอบเท่ากับ 48 ต่อ 1 ความเร็วสูงสุดในการหมุนของมอเตอร์เท่ากับ 1496 รอบต่อนาที เมื่อทดรอบแล้วจะเหลือความเร็วสูงสุดรอบที่แกนสกรูเท่ากับ 31.16 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าสูงไม่สามารถใช้กับการทดลองได้ (ต้องการความเร็วรอบของมอเตอร์ช่วง 1 - 5 รอบต่อนาที) จึงติดตั้งเฟืองทดรอบลงมาจนเหลือความเร็วรอบสูงสุดของแกนสกรูประมาณ 5 รอบต่อนาที

ในการทดลองนี้ เราต้องการให้สกรูหมุนด้วยความเร็ว 3 ระดับ คือ 2.09 , 2.69 และ 3.76 รอบต่อนาที ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (รายละเอียดในภาคผนวก ก)

$$\text{ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)} = \frac{(NF)(TF+TB)}{(RT)(TF-TB)} \quad (ค1)$$

##### 4.2 การเทียบความเร็วรอบของสกรูเป็นความถี่ของอินเวอร์เตอร์

เมื่อทราบความเร็วรอบที่ต้องการแล้ว ก็นำมาหาความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเทียบเท่ากับความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่ต้องการ โดยการสุ่มปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ แล้วจับเวลาหาความเร็วการหมุนจริงของสกรูจนกระทั่งได้ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ซึ่งให้ความเร็วรอบของสกรูตามต้องการ

##### 4.3 การเทียบค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์เป็นเลขลำดับขั้น

เนื่องจากโปรแกรมควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา จะต้องป้อนข้อมูลเป็นเลขลำดับขั้น ซึ่งคอมพิวเตอร์เข้าใจได้ การเทียบค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์เป็นเลขลำดับขั้นมีขั้นตอนดังนี้

1. เนื่องจากการ์ดเอชยูดี - ดีทูเอ ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 12 บิต นั่นคือมีจำนวนขั้นเท่ากับ  $2^{12} = 4096$  ขั้น นั่นคือสามารถป้อนเลขได้ตั้งแต่ 0 ถึง 4095

2. เราทราบว่ามอเตอร์ที่ใช้งานมีความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 1496 รอบต่อนาที ที่ความถี่ของไฟฟ้าปกติเท่ากับ 59 เฮอรัซ เมื่อทราบความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง จะทำให้ทราบความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้

3. ความเร็วรอบมอเตอร์ 1496 รอบต่อนาที เทียบได้เป็นเลขลำดับขั้นเท่ากับ 4095 ขั้น เมื่อทราบความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ต้องการจากข้อ 2 จึงสามารถคำนวณเลขลำดับขั้นที่ต้องป้อนเข้าสู่โปรแกรมได้

สามารถคำนวณเลขลำดับขั้นได้จากสมการ

$$I = \frac{4095(\text{Hz})}{59} \quad (ค2)$$

เมื่อ I คือ เลขลำดับชั้น  
 Hz คือ ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ต้องการ (เฮอ์ซ)  
 สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาได้ดังตาราง ค.1

ตาราง ค.1 การแปลงความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองเพื่อป้อนเข้าโปรแกรมควบคุมการทำงาน  
 ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

RT(นาที)	TF/TB	%FP	ความเร็วรอบ(รอบต่อนาที)		ความถี่อินเวอร์เตอร์		เลขลำดับชั้น
			คำนวณ	วัดได้จริง	คำนวณ	วัดได้จริง	
50	25/22	6.38	3.76	3.76	39.0	39.0	2707
70	25/22	6.38	2.69	2.70	28.0	28.0	1944
90	25/22	6.38	2.09	2.10	21.5	21.5	1493

## ภาคผนวก ง. โปรแกรมควบคุม และทำนายในระบบการสััดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ

### ภาคผนวก ง.1 โปรแกรมการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

```
/* This program is used to control inverter */
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <stdlib.h>
```

```
#include <dos.h>
```

```
#include <conio.h>
```

```
#include <bios.h>
```

```
#define PARALLEL1 0L
```

```
#define PARALLEL2 2L
```

```
#define PARALLEL3 3L
```

```
#define FORWARD 1
```

```
#define REVERSE 2
```

```
unsigned far *base = 0x00000408L;
```

```
char stat_o(long paraport);
```

```
char pralel_o(char character,long paraport);
```

```
char put_out(char character);
```

```
main()
```

```
{
```

```
int i;
```

```
int j,k;
```

```
int forward_speed;
```

```
int reverse_speed;
```

```
unsigned forward_time; /* in second */
```

```
unsigned reverse_time; /* in second */
```

```
printf("\nEnter forward speed :");
scanf("%d",&forward_speed);
printf("\nEnter reverse speed :");
scanf("%d",&reverse_speed);
printf("\nEnter forward time (sec) :");
scanf("%d",&forward_time);
printf("\nEnter reverse time (sec) :");
scanf("%d",&reverse_time);
forward_time = forward_time*1000;
reverse_time = reverse_time*1000;

pralel_o(0,PARALLEL1);
outp(632+6,0);
outp(632+7,0);

printf("\nNow all the red light should be off ");
printf("\n——— TURN ON CONTROL SWITCH WHEN READY ——");
printf("\n —— PRESS ENTER WHEN READY ——");
getch();

for (;;)
{
/* stop before forwarding */
printf("\n—— Stop before forwarding ");
outp(632+6,0);
outp(632+7,0);

/* go in forward direction for forward time millisecond
```

```

*/ printf("\n— Forwarding for %u secs',forward_time/1000);
pralel_o(1,PARALLEL1);
outp(632+6,forward_speed & 0x00ff);
outp(632+7,(forward_speed & 0x0f00) >> 8);
for (i=0;i<(forward_time/1000);i++)
{
    if (bioskey(1))
    {
        if ((getch() == 'S') || (getch() == 's'))
        {
            printf("\n+++++ USER BREAK +++++ ");
            pralel_o(0,PARALLEL1);
            outp(632+6,0);
            outp(632+7,0);
            exit(0);
        }
    }
    delay(1000);
}

/* stop before reversing */
printf("\n— Stop before reversing ");
outp(632+6,0);
outp(632+7,0);

/* go in reverse direction for reverse time millisecond */
printf("\n— reversing for %u secs',reverse_time/1000);
pralel_o(2,PARALLEL1);
outp(632+6,reverse_speed & 0x00ff);
outp(632+7,(reverse_speed & 0x0f00) >> 8);
for (i=0;i<(reverse_time/1000);i++)

```



```

{
if (bioskey(1))
{
if ((getch() == 'S') || (getch() == 's'))
{
printf("\n+++++ USER BREAK +++++ ");
pralel_o(0,PARALLEL1);
outp(632+6,0);
outp(632+7,0);
exit(0);
}
}
delay(1000);
}
} /* end forever loop */
} /* end main */

union REGS regs;

char pralel_o(char character, long paraport)
{
/* while (!stat_o(paraport));*/
outp(*(base+paraport),character);
}

char stat_o(long paraport)
{
regs.h.ah = inp(*(base + paraport) + 1);
regs.h.ah &= 0xF8;
regs.h.ah ^= 0x48;
return(regs.h.ah & 0x80);
}

```

```
char put_out(char character)
{
union REGS regs;
regs.h.ah = 0;
regs.h.al = character;
regs.x.dx = 0;
int86(0x17, &regs, &regs);
return(regs.h.ah);
}
```

ภาคผนวก ง.2 โปรแกรมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

```

5 CLEAR
6 PRINT "***** MASS TRANSFER COEFFICIENT*****"
7 REM [ADDR. 10-550 FOR FITTING THE DATA TO SIX-TERM POLYNOMIAL]
8 INPUT "RUN NO."; YUDEE
10 INPUT "NUMBER OF DATA POINTS="; N
11 LPRINT "RUN NO."; YUDEE
15 LPRINT "NUMBER OF DATA POINTS="; N
20 DIM NUMBER(1, N - 1)
30 FOR M = 1 TO N
50 READ X, Y: NUMBER(0, M - 1) = X: NUMBER(1, M - 1) = Y
60 NEXT M
65 DIM M(150)
70 NB = 6 75 E = NB - 1
80 FOR I = 1 TO NB
90 FOR J = 1 TO NB
98 FD = 0
99 FA = 0
100 FOR K = 1 TO N
110 FT = NUMBER(0, K - 1) ^ (I - 1) * NUMBER(0, K - 1) ^ (J - 1)
120 FA = FT + FA
122 FC = NUMBER(0, K - 1) ^ (I - 1) * NUMBER(1, K - 1)
123 FD = FC + FD
130 NEXT K
142 M(I - 1 + NB * (J - 1)) = FA
150 NEXT J
154 M(I - 1 + NB * NB) = FD
160 NEXT I

```

```
180 FOR B = 0 TO E
190 IF B = E THEN 290
200 F = 0: G = 0
210 FOR C = B + 1 TO E
220 IF F < ABS(M(C + NB * B)) THEN F = ABS(M(C + NB * B)): G = C
230 NEXT C
240 IF B = G THEN 290
250 FOR C = 0 TO NB
260 F = M(B + NB * C): M(B + NB * C) = M(G + NB * C): M(G + NB * C) = F
270 NEXT C
290 F = M(B + NB * B)
300 FOR C = B + 1 TO NB
310 M(B + NB * C) = M(B + NB * C) / F
320 NEXT C
330 FOR C = 0 TO E
340 IF M(B + NB * C) = 0 THEN 400
350 IF B = C THEN 400
360 F = M(C + NB * B)
370 FOR D = B + 1 TO NB
380 M(C + NB * D) = M(C + NB * D) - F * M(B + NB * D)
390 NEXT D
400 NEXT C
410 NEXT B
425 FOR C = 0 TO E
430 PRINT "a( ; C; )="; M(C + NB * NB)
435 LPRINT "a( ; C; )="; M(C + NB * NB)
440 NEXT C
450 FOR AB = 1 TO 20
455 XE = NUMBER(0, 0) + ((NUMBER(0, N - 1) - NUMBER(0, 0)) * AB / 20)
```

```

465 YF = 0

470 FOR AC = 1 TO NB

480 YE = M(AC - 1 + NB * NB) * XE ^ (AC - 1)

490 YF = YF + YE

500 NEXT AC

510 PRINT "TIME(t)=", XE; "    Y(t)=", YF

520 LPRINT "TIME(T)=", XE; "    Y(t)=", YF

550 NEXT AB

850 INPUT "INITIAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3) = "; X0

900 INPUT " DISTRIBUTION COEFFICIENT (DIMENSIONLESS)="; M: M = 1 / M

903 INPUT "Xf (FROM FIT CURVE EQUATION) (KG/M^3)="; Xf

904 INPUT "TOTAL EXTRACTION TIME (MIN)="; TA

905 LPRINT "INITIAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)="; X0

906 LPRINT "DISTRIBUTION COEFFICIENT (m)="; 1 / M

908 LPRINT "TOTAL EXTRATION TIME (MIN)="; TA

909 GOTO 950

910 IF (XS < Xf) THEN 940

920 PRINT "YOU MUST INCREASE VALUE OF KX"

930 GOTO 950

940 PRINT "YOU MUST DECREASE VALUE OF KX"

950 INPUT "MASS TRANSFER COEFFICIENT (1/MIN)="; KX

960 LPRINT "MASS TRANSFER COEFFICIENT (1/MIN)="; KX

1050 LPRINT "Xi(FROM FIT CURVE EQUATION) (KG/M^3)="; Xi

1100 G1 = M(36) + M(37) * (TA - 1 / KX) + M(38) * (TA ^ 2 - 2 * TA / KX + 2 / KX ^ 2) + M(39) * (TA
      ^ 3 - 3 * TA ^ 2 / KX + 6 * TA / KX ^ 2 - 6 / KX ^ 3)

1200 G1 = G1 + M(40) * (TA ^ 4 - 4 * TA ^ 3 / KX + 12 * TA ^ 2 / KX ^ 2 - 24 * TA / KX ^ 3 + 24 /
      KX ^ 4) + M(41) * (TA ^ 5 - 5 * TA ^ 4 / KX + 20 * TA ^ 3 / KX ^ 2 - 60 * TA ^ 2 / KX ^
      3 + 120 * TA / KX ^ 4 - 120 / KX ^ 5)

1300 MC = M

```

```
1400 C1 = -MC * (M(36) - M(37) / KX + 2 * M(38) / KX ^ 2 - 6 * M(39) / KX ^ 3 + 24 * M(40) / KX ^
      4 - 120 * M(41) / KX ^ 5)
1450 XS = M * G1 + (C1 + X0) / EXP(KX * TA)
1500 PRINT 'FINAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)='; XS
1510 LPRINT 'FINAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)='; XS
1550 IF ABS(XS - Xf) < .05 THEN 2540
1600 GOTO 910
2540 KX = KX / 60
2550 PRINT 'EVALUATE MASS TRANSFER COEFFICIENT(1/SEC)='; KX
2555 LPRINT 'EVALUATE MASS TRANSFER COEFFICIENT(1/SEC)='; KX
2560 STOP
3000 DATA 7,53.83,21,49.59,35,43.14,49,28.42,63,12.10
```

## ภาคผนวก ง.3 โปรแกรมการทำนายจำนวนเพคเลต (Peclet number)

```
1 CLEAR
5 PRINT "*****PELET NUMBER*****"
6 INPUT "RUN NO.:"; GIBB
10 INPUT "INITIAL SOLUTE CONCENTRATION IN LIQUID PHASE (KG/M^3)="; Y0
15 INPUT "INITIAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)="; X0
20 INPUT "DISTRIBUTION COEFFICIENT (DIMENSIONLESS) ="; m
25 INPUT "TOTAL EXTRACTION TIME (SEC) "; TA
30 INPUT "EFFECTIVE DRAFT (DIMENSIONLESS)="; A
35 INPUT "MASS TRANSFER COEFFICIENT (1/SEC) ="; KX
36 INPUT "Xf (FROM FIT CURVE) (KG/M^3)="; YD
40 PRINT "FINAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (FR. FIT CURVE)="; YD
41 LPRINT "RUN NO.:"; GIBB
42 LPRINT "Y0="; Y0
43 LPRINT "X0="; X0
44 LPRINT "m="; m
45 LPRINT "TOTAL EXTRACTION TIME (TA)(SEC)="; TA
46 LPRINT "DRAFT (A)="; A
47 LPRINT "KX="; KX
48 LPRINT "Xf (FROM FIT CURVE)(KG/M^3)="; YD
49 GOTO 55 50 IF (X < YD) THEN 54
51 PRINT "YOU MUST INCRASS VALUE OF PECLET NUMBER"
53 GOTO 55
54 PRINT "YOU MUST DECRESS VALUE OF PECLET NUMBER"
55 INPUT "PECLET NUMBER (DIMENSIONLESS) ="; R
56 LPRINT "PECLET NUMBER (R)="; R
57 Z = 1: GOSUB 250
60 PRINT "FINNAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)="; X
```

```

61 LPRINT 'FINNAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)='; X
63 IF ABS(X - YD) < .05 THEN 130
64 GOTO 50
130 SQ = 0
135 PRINT 'EVALUATE PECLET NUMBER='; R
136 LPRINT 'EVALUATE PECLET NUMBER='; R
140 INPUT 'HOW MANY DATA POINT YOU HAVE ?'; NB
145 LPRINT 'NUMBER OF DATA='; NB
150 FOR CH = 1 TO NB 160 READ X, MF: Z = X / TA
170 TI = X: GOSUB 250 180 IF CH <> 1 THEN 210
190 LPRINT '***** CONCENTRATION PROFILE ALONG THE EXTRACTOR (KG/M^3)*****'
200 LPRINT 'TIME (SEC)   SOLID(ACTUAL)   SOLID (PRED)   LIQUID(PRED)'
210 LPRINT ; TI; '      '; MF; '      '; X; '      '; Y
220 SQ = (MF - X) ^ 2 + SQ: NEXT CH
230 LPRINT 'MEAN SQUARE ERROR OF SOLID PHASE='; (SQ / (CH - 1)): STOP
250 T = KX * TA
260 G = ((T + R) / 2) ^ 2 + T * R * (1 / A - 1)
270 IF G >= 0 THEN 290
280 LPRINT 'NO REAL ROOT'
290 W = -(T + R) / 2 + G ^ .5
300 I = -(T + R) / 2 - G ^ .5
310 O = ((1 - EXP(W * Z)) * (1 + W / R)) / W - ((1 - EXP(I * Z)) * (1 + I / R)) / I
320 K = O / (((1 - 1 / A * EXP(W)) * (1 + W / R)) / W - ((1 - 1 / A * EXP(I)) * (1 + I / R)) / I)
330 X = X0 - (X0 - Y0 / m) * K
350 S = (EXP(W * Z) - (1 + W / R) * EXP(W)) / W - (EXP(I * Z) - (1 + I / R) * EXP(I)) / I
360 Y = (m * X0 - Y0) / A * S / (O / K) + Y0
400 RETURN
1000 DATA .001,100.86,540,82.35,1620,67.99,2700,58.04,3780,49.09,4860,45.56,5400,36.65

```



ภาคผนวก ง.4 โปรแกรมการทำนายความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและ  
เฟสของเหลวโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing (RCCE)

```

5 PRINT "***** RCCE MODEL *****"
9 INPUT "RUN NO.="; RNO
10 INPUT "INITIAL SOLUTE CONCENTRATION IN LIQUID PHASE (KG/M^3)="; Y0
15 INPUT "INITIAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)="; X0
25 INPUT "EFFECTIVE DRAFT="; A
30 INPUT "DISTRIBUTION COEFFICIENT="; m
35 INPUT "HALF OF THICKNESS (FIRST DIMENSION)="; I1
40 INPUT "HALF OF THICKNESS (SECOND DIMENSION)="; I2
45 INPUT "HALF OF THICKNESS (THIRD DIMENSION)="; I3
50 INPUT "MASS TRANSFER COEFFICIENT (1/SEC)="; KX
55 INPUT "PECLET NUMBER (DIMENSIONLESS)="; R
60 INPUT "TOTAL EXTRACTION TIME (SEC)="; TA
65 INPUT "SHAPE FACTOR (DIMENSIONLESS)="; sh
70 INPUT "DIFFUSIVITY (M^2/SEC)="; D
75 INPUT "TIME DELAY DUE TO PLASMOLYSIS="; TP
79 LPRINT "RUN NO."; RNO
85 LPRINT "EFFECTIVE DRAFT="; A
86 LPRINT "DISTRIBUTION COEFFICIENT="; m
87 LPRINT "DIFFUSIVITY="; D
90 FK = D * TA * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2)
95 LPRINT "FICK'S NUMBER="; FK
100 F = 2.46618 + .5245 / A
105 LPRINT "F-FACTOR="; F
106 YC = (sh * F * D / KX) * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2)
107 IF YC < 1 THEN 117
108 GOTO 110
110 B = (2.24 / (YC - 1)) ^ (1 / 1.02)

```

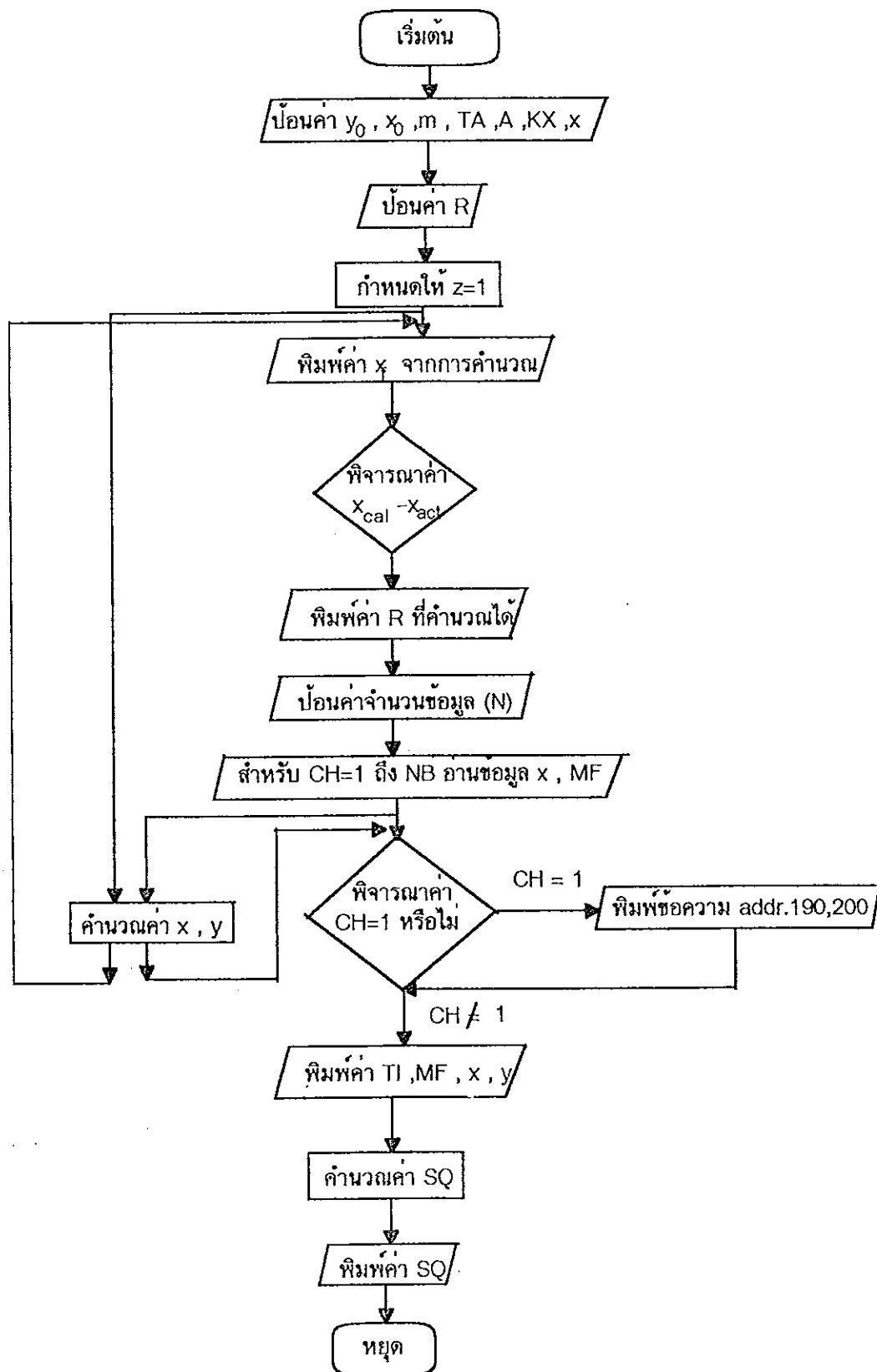
```
225 I = I + 1
230 P0 = P1
235 P1 = P
240 GOTO 165
250 LPRINT 'q='; P
255 GOTO 280
260 PRINT 'METHOD FAILED AFTER 'N ITERATIONS'
265 PRINT 'COMMENT 1.YOU SHOULD GIVE MORE ITERATION NUMBER'
270 PRINT '      2.OR YOU MAY GIVE APPROX.P0 , P1 INTERVAL MORE CLOSE TOGETER'
275 GOTO 140
280 q1 = P
285 REM THE CASE THAT BIOT NUMBER IS FINITE,C-FACTOR MUST BE CALCULATE AS 'h'
290 REM ADDR.295-340 TO FIND TIME LEAD
300 LPRINT 'q1='; q1
305 C = 2 * A / (F * A - sh)
310 LPRINT 'C='; C
315 h = C + (1 - C) * EXP(-1 * B)
319 LPRINT 'C1='; h
320 LPRINT 'C1^3='; h ^ 3
325 REM 'T0' IS FICK'S NUMBER, USED TO CALCULATE TIME LEAD
326 h = h ^ 3
330 T0 = -LOG(h) / q1 ^ 2
331 LPRINT 'T0='; T0
335 TL = T0 / (D * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2))
340 LPRINT 'TIME LEAD (SEC)='; TL
345 TF = TA + TL - TP
350 LPRINT 'REAL EXTRACTION TIME (SEC)='; TF
351 INPUT 'GO ON'; BENGY
355 INPUT 'NUMBER OF DATA POINTS='; NB
```

```

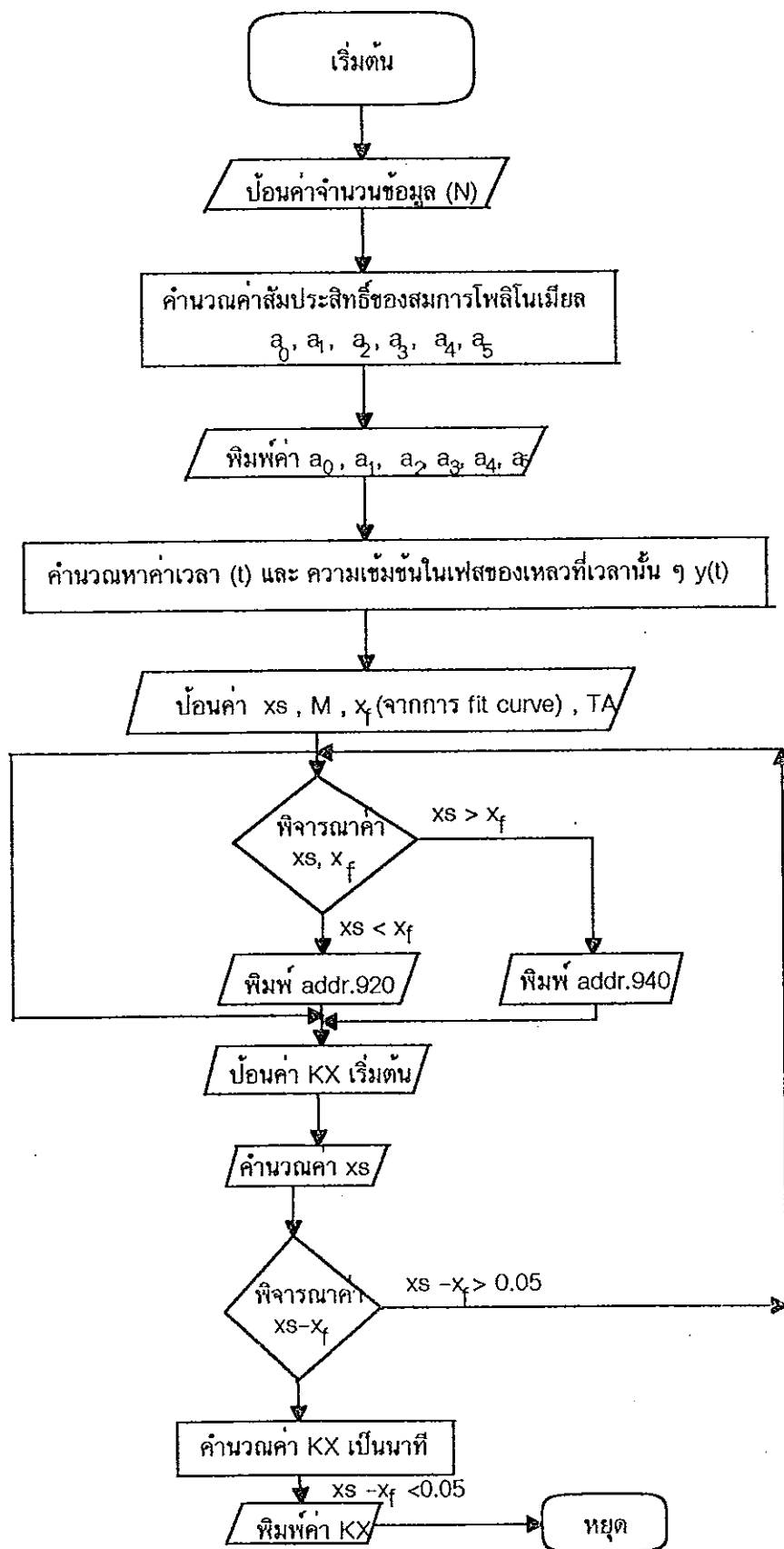
359 SQ = 0
360 SS = 0
361 REM [ADDR.362-370 FINDIND NEW TIME INTERVAL ALONG THE EXTRACTOR]
362 TC = TF / 5
363 TD = TC / 2
364 T0 = .001: PRINT 'T0='; T0
365 T1 = TD: PRINT 'T1='; T1
366 T2 = T1 + TC: PRINT 'T2='; T2
367 T3 = T2 + TC: PRINT 'T3='; T3
368 T4 = T3 + TC: PRINT 'T4='; T4
369 T5 = T4 + TC: PRINT 'T5='; T5
370 T6 = T5 + TD: PRINT 'T6='; T6
371 F0 = D * T0 * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2): LPRINT 'F0='; F0
372 F1 = D * T1 * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2): LPRINT 'F1='; F1
373 F2 = D * T2 * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2): LPRINT 'F2='; F2
374 F3 = D * T3 * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2): LPRINT 'F3='; F3
375 F4 = D * T4 * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2): LPRINT 'F4='; F4
376 F5 = D * T5 * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2): LPRINT 'F5='; F5
377 F6 = D * T6 * (1 / I1 ^ 2 + 1 / I2 ^ 2 + 1 / I3 ^ 2): LPRINT 'F6='; F6
382 FOR CH = 1 TO NB
383 INPUT 'TIME,X,Y='; X, Y, HA: Z = X / TF
384 TI = X: MF = Y
385 T = KX * TF
390 T = T
395 U = ((T + R) / 2) ^ 2 + T * R * (1 / A - 1)
400 IF U >= 0 THEN 410
405 LPRINT 'NO REAL ROOT'
410 W = -(T + R) / 2 + U ^ .5
415 I = -(T + R) / 2 - U ^ .5

```

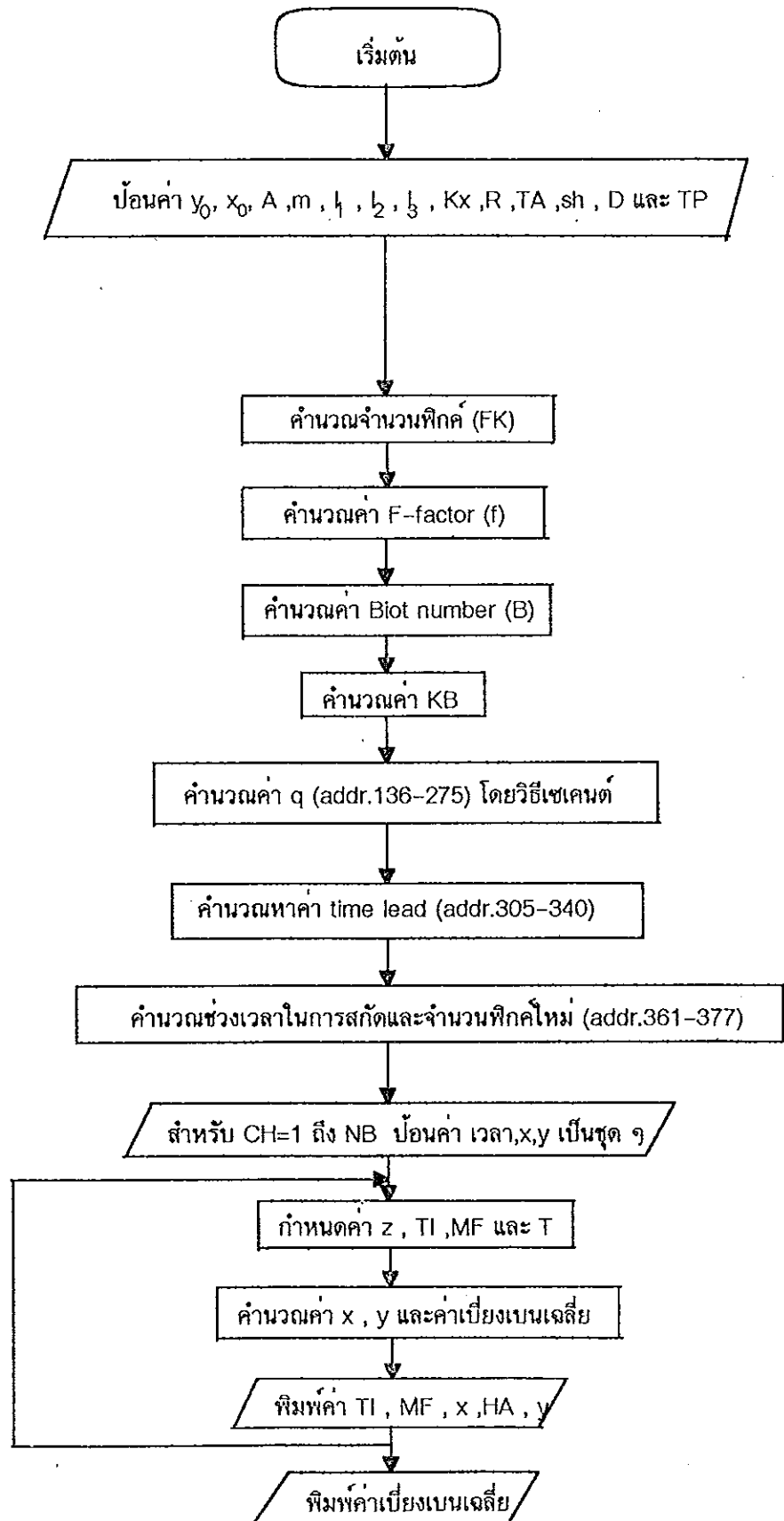
```
420 O = ((1 - EXP(W * Z)) * (1 + W / R)) / W - ((1 - EXP(I * Z)) * (1 + I / R)) / I
425 PC = (((1 - 1 / A * EXP(W)) * (1 + W / R)) / W - ((1 - 1 / A * EXP(I)) * (1 + I / R)) / I)
426 K = O / PC
430 X = X0 - (X0 - Y0 / m) * K
450 V = (EXP(W * Z) - (1 + W / R) * EXP(W)) / W - (EXP(I * Z) - (1 + I / R) * EXP(I)) / I
455 Y = (m * X0 - Y0) / A * V / PC + Y0
460 SQ = (MF - X) ^ 2 + SQ
464 SS = (HA - Y) ^ 2 + SS
465 IF CH = 1 THEN 467
466 GOTO 470
467 LPRINT *CONCENTRATION IN BOTH PHASE (KG/M^3)*
468 LPRINT *TIME (SEC)  SOLID(ACT)  SOLID(PRED)  LIQUID(ACT)  LIQUID(PRED)*
470 LPRINT ; TI; *      ; MF; *      ; X; *      ; HA; *      ; Y
475 NEXT CH
480 LPRINT *MEAN SQUARE OF ERROR FOR SOLID PHASE=*; (SQ / (CH - 1))
490 LPRINT *MEAN SQUARE OF ERROR FOR LIQUID PHASE=*; (SS / (CH - 1))
```



ภาพประกอบ ง.1 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมหาจำนวนเพคเลต (Peclet number)



ภาพประกอบ ง.2 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม



ภาพประกอบ ง.3 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรม RCCE

ภาคผนวก จ. ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากระหว่างการสกัด ก่อนและหลังระบบเข้าสู่สถานะคงตัว

ตาราง จ.1 อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในเครื่องสกัดของการทดลองชุดต่าง ๆ

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)						SD	%CV
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	เฉลี่ย		
1	56.0	56.4	56.1	55.6	55.3	55.9	0.40	0.71
2	55.6	56.6	56.4	56.2	56.2	56.2	0.37	0.65
3	55.7	56.8	56.5	56.6	56.2	56.4	0.42	0.75
4	55.8	56.3	56.2	56.2	56.1	56.1	0.20	0.35
5	55.5	56.4	56.2	56.0	56.0	56.0	0.34	0.61
6	55.5	56.7	56.6	56.4	56.3	56.3	0.46	0.82
7	55.8	56.6	56.6	56.4	56.4	56.4	0.30	0.53
8	55.5	56.4	56.6	56.2	56.4	56.2	0.42	0.74
9	55.2	56.7	57.0	56.8	56.9	56.5	0.74	1.31
10	61.6	63.4	63.9	62.7	63.2	62.9	0.85	1.35
11	62.0	63.9	64.3	63.8	63.8	63.6	0.87	1.38
12	61.4	63.5	64.1	63.8	63.3	63.2	1.08	1.71
13	62.2	64.1	64.7	64.4	63.9	63.9	0.96	1.51
14	62.4	64.4	64.9	64.6	63.9	64.0	0.98	1.54
15	61.6	63.5	64.2	64.1	63.4	63.4	0.93	1.47
16	61.6	63.2	63.8	63.2	63.4	63.0	0.83	1.32
17	62.4	64.0	64.4	63.9	63.9	63.7	0.78	1.22
18	61.6	63.6	64.2	63.9	63.4	63.4	1.03	1.63
19	69.7	72.0	71.7	71.4	71.6	71.2	0.90	1.27
20	69.5	71.4	72.2	72.3	71.5	71.4	1.10	1.54
21	69.7	71.2	72.6	71.7	71.2	71.3	1.05	1.47
22	69.2	70.7	71.0	72.0	71.2	70.8	1.03	1.46
23	69.4	71.5	71.9	72.7	72.1	71.5	1.23	1.72
24	69.7	71.4	71.8	71.6	72.1	71.3	0.94	1.32
25	69.4	72.0	72.4	72.3	72.3	71.7	1.27	1.77
26	69.8	71.9	72.3	72.3	72.2	71.7	1.10	1.53
27	69.2	72.0	72.6	72.7	72.2	71.8	1.44	2.00



ตาราง จ.2 ข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองเมื่อสิ้นสุดการสกัด

การทดลองที่	ความชื้น (ร้อยละ)		ความหนาแน่นเฟสของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)		ความหนาแน่นเฟสของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	เริ่มต้น	เฉลี่ยในรางสกัด	เริ่มต้น	เฉลี่ยในรางสกัด	เฉลี่ยในรางสกัด
1	83.6	85.7	1025	1014	1006
2	83.8	86.7	1036	1019	1010
3	83.9	86.2	1031	1025	1009
4	83.3	86.7	1021	1026	1006
5	84.0	87.6	1025	1026	1007
6	83.4	87.5	1035	1026	1008
7	83.2	88.5	1030	1016	1002
8	83.3	86.7	1024	1015	1005
9	83.4	86.4	1031	1019	1004
10	84.0	86.3	1032	1030	1006
11	83.2	85.5	1021	1021	1010
12	83.2	86.6	1034	1017	1009
13	83.4	86.1	1035	1018	1006
14	84.1	85.6	1030	1022	1008
15	83.6	86.4	1030	1020	1008
16	83.3	86.2	1035	1022	1003
17	83.1	86.4	1030	1019	1004
18	83.4	86.8	1021	1021	1006
19	84.2	86.2	1025	1007	1008
20	83.2	86.0	1031	1008	1008
21	83.4	86.2	1022	1007	1010
22	83.2	86.4	1035	1008	1007
23	83.8	85.9	1030	1014	1008
24	83.1	86.9	1021	1017	1007
25	83.2	86.9	1025	1015	1008
26	83.7	86.0	1030	997	1005
27	83.4	87.0	1028	1016	1007

ภาคผนวก ฉ. ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ที่วัดได้จากการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ และจากการพืดด้วยแบบจำลอง  
Diffusion - Backmixing

ภาคผนวก ฉ.1 ข้อมูลความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวตั้งแต่เริ่มสกัดจนกระทั่งเข้าสู่สถานะคงตัว ของการทดลองชุดต่าง ๆ

ภาพทดลองที่ 1 (RT=50 min 3.76 rpm draft=1.41 temp. =55 C)  
 starting time (take sample) 1.20 hr later  
 finish time 5:00 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.40	6.40	2.30	5.40	2.10	4.80	1.00	3.80	0.40	4.00	2.00	4.50	2.20	15.00
10	2.50	6.00	2.30	6.20	2.00	4.80	1.80	4.20	0.40	4.00	2.20	3.40	2.40	9.00
15	2.70	7.20	2.00	6.40	2.40	5.00	1.80	6.20	0.50	5.20	2.40	3.00	2.60	11.20
20	2.90	9.20	2.60	5.50	2.40	4.50	2.00	5.00	0.80	6.00	2.60	4.00	2.90	10.20
25	3.00	7.10	2.80	6.80	2.60	5.50	2.00	4.80	0.80	5.20	2.90	2.80	3.00	10.40
30	3.10	7.00	2.90	6.40	2.80	5.20	2.10	4.40	1.00	4.20	2.90	3.50	3.00	10.10
35	3.20	7.60	3.00	6.20	2.70	4.80	2.20	5.10	1.00	4.40	3.00	3.40	3.10	9.80
40	3.30	8.20	3.10	6.50	2.80	6.10	2.20	5.20	1.00	4.20	3.10	2.00	3.20	9.60
45	3.50	7.20	3.30	6.40	3.00	5.00	2.20	4.60	1.00	3.40	3.20	2.80	3.50	10.20
50	3.60	7.50	3.40	6.60	3.00	5.40	2.20	4.80	1.00	4.40	3.40	3.80	3.60	10.60
55	3.60	8.40	3.40	7.20	3.20	6.00	2.20	4.50	1.00	3.60	3.50	3.00	3.60	10.80
60	3.60	8.00	3.60	7.80	3.20	6.00	2.10	4.70	0.80	4.20	3.50	2.80	3.60	9.50
65	3.80	9.40	3.00	7.10	3.00	7.00	2.20	4.50	0.80	5.00	3.50	2.40	3.80	10.10
70	3.80	7.70	3.80	6.00	3.00	5.00	2.00	4.90	0.80	4.50	3.60	3.80	3.80	9.80
75	4.00	7.40	3.80	7.60	3.00	6.20	2.00	5.40	1.00	4.20	3.80	3.00	4.00	10.60
80	4.20	9.20	3.70	6.20	3.40	4.80	2.20	5.00	1.00	5.00	4.10	2.80	4.20	11.20
90	4.00	8.00	3.80	6.80	3.20	5.60	2.20	5.00	0.80	4.80	4.00	4.00	4.00	10.40
100	4.20	8.20	4.00	6.10	3.40	4.60	2.00	6.10	0.80	4.80	4.10	3.20	4.20	9.80
110	4.40	8.20	4.00	7.00	3.20	5.80	2.00	5.20	0.80	4.90	4.30	4.00	4.40	9.60
120	4.30	7.60	4.10	6.50	3.30	6.50	2.20	5.20	0.80	4.20	4.30	3.40	4.40	10.20
130	4.50	8.20	4.20	7.20	3.40	6.00	2.20	5.50	1.00	4.80	4.40	4.00	4.40	10.10
140	4.60	8.40	4.30	7.70	3.60	5.80	2.20	5.00	1.00	4.80	4.40	4.30	4.60	11.20
150	4.70	8.30	4.50	7.10	3.60	6.00	2.20	5.20	1.00	5.00	4.50	4.50	4.70	12.30
160	4.80	8.20	4.30	6.80	3.80	6.20	2.20	5.00	1.00	4.80	4.70	4.00	4.80	11.50
170	4.80	9.20	4.50	7.10	3.70	6.40	2.20	5.20	0.80	4.80	4.70	4.00	4.80	11.20
180	5.10	9.10	4.40	7.20	3.80	6.60	2.30	5.70	1.00	5.20	4.80	4.40	5.00	10.40
190	5.10	10.00	4.50	7.40	4.00	6.50	2.30	5.60	1.00	4.80	5.00	4.10	5.00	10.40
200	5.10	9.20	4.60	7.50	4.00	6.00	2.40	5.20	1.00	5.20	5.10	4.00	5.10	10.40
210	5.10	8.20	4.60	7.70	4.00	6.40	2.20	5.40	1.00	5.10	5.00	4.70	5.10	10.60
220	5.10	8.40	4.60	7.20	4.00	6.20	2.20	5.90	1.00	5.60	5.00	4.60	5.10	10.10
avg.conc (brix)	5.10	8.98	4.54	7.40	3.96	6.34	2.28	5.56	1.00	5.18	4.98	4.36	5.06	10.54
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	51.30	87.29	45.66	71.04	39.83	60.18	22.93	52.34	10.06	48.56	50.09	40.53	50.89	100.29
	ความชื้น		ความหนาแน่น											
	จุด 1-6	เริ่มต้น												
ของแข็ง	88.66	83.29	1025.80											
ของเหลว			1005.80											



การทดสอบที่ 3 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.16 temp. =55 C)  
 starting time (take sample) 1.53 hr later  
 finish time 5:40 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	3.10	6.80	2.90	4.80	2.50	4.20	1.90	3.20	0.60	3.80	2.50	2.10	3.10	9.20
10	3.20	6.90	3.00	4.80	2.60	4.20	1.90	3.40	0.60	4.00	2.60	2.50	3.20	15.00
15	3.50	7.10	3.20	6.20	2.90	4.50	1.90	3.80	0.60	3.40	3.20	2.60	3.40	11.20
20	3.70	6.80	3.40	6.20	3.20	4.60	2.00	3.50	0.70	4.60	3.20	3.20	3.60	8.20
25	3.90	6.50	3.60	6.50	3.20	5.00	2.00	4.50	0.70	5.20	3.50	3.50	3.80	10.10
30	4.10	6.70	3.70	5.60	3.20	5.00	2.00	4.20	0.70	6.00	3.80	3.80	3.90	11.20
35	4.20	7.00	3.80	6.50	3.40	5.40	2.10	4.60	0.80	5.00	3.50	2.70	4.10	9.20
40	4.50	7.50	4.00	5.40	3.60	5.80	2.10	4.80	0.80	4.60	4.00	3.80	4.40	10.20
45	4.50	7.00	3.90	5.70	3.50	5.30	2.10	5.20	0.80	4.20	4.20	3.60	4.40	10.10
50	4.50	7.10	4.10	6.00	3.80	5.20	2.20	4.80	0.80	4.80	4.40	4.50	4.40	9.20
55	4.60	7.50	4.20	6.20	3.80	5.40	2.20	4.40	0.90	4.60	4.40	4.00	4.50	9.50
60	4.70	7.90	4.30	6.40	3.80	6.00	2.40	5.50	0.90	4.10	4.40	4.30	4.70	9.20
65	4.80	7.60	4.60	6.90	4.00	6.40	2.40	5.50	1.00	3.50	4.60	3.90	5.00	9.60
70	5.00	7.40	4.70	5.80	4.00	5.80	2.60	5.00	1.00	4.50	4.80	3.50	5.00	10.20
75	5.20	6.80	5.00	6.00	4.20	6.90	2.70	4.80	1.00	4.60	5.00	3.80	5.20	9.50
80	5.40	8.00	5.00	6.40	4.50	6.10	2.60	5.00	1.20	5.00	5.20	3.70	5.20	10.60
85	5.40	8.10	5.20	6.50	4.50	6.50	2.80	4.80	1.10	4.80	5.30	3.60	5.20	10.20
90	5.40	7.60	5.20	6.30	4.60	5.80	2.90	6.20	1.20	4.20	5.20	3.40	5.50	9.80
95	5.60	7.40	5.20	6.70	4.60	6.70	3.00	5.60	1.20	4.20	5.40	4.00	5.60	10.00
100	5.60	8.10	5.30	6.90	4.80	6.80	3.10	6.20	1.30	5.00	5.50	4.30	5.70	12.00
110	5.80	8.20	5.60	7.00	4.80	6.10	3.20	5.70	1.30	5.60	5.60	4.10	5.80	11.40
120	6.00	8.10	5.70	7.20	4.80	6.00	3.40	5.10	1.30	5.20	5.70	4.50	5.80	10.40
130	6.10	7.20	5.80	7.80	5.00	6.20	3.40	5.30	1.20	5.80	5.80	3.90	6.00	11.10
140	6.10	7.30	6.00	7.40	5.00	6.10	3.50	5.40	1.30	5.40	6.10	3.50	6.20	8.60
150	6.10	7.60	6.20	7.30	5.10	6.00	3.40	5.70	1.40	5.00	6.20	3.80	6.40	10.60
160	6.20	8.00	6.30	7.50	5.10	6.40	3.60	5.00	1.40	5.10	6.30	3.70	6.50	10.40
170	6.40	8.10	6.20	7.60	5.20	6.20	3.60	5.20	1.40	4.70	6.40	3.00	6.60	11.40
180	6.50	8.90	6.30	7.00	5.20	6.00	3.70	5.60	1.40	5.40	6.50	3.80	6.60	10.40
190	6.60	8.40	6.20	6.80	5.30	6.00	3.80	5.60	1.40	5.00	6.50	4.20	6.70	13.20
200	6.60	8.60	6.20	7.00	5.30	6.10	3.80	5.40	1.40	5.40	6.60	4.80	6.70	10.50
210	6.70	8.50	6.30	7.10	5.20	6.00	3.80	4.60	1.40	5.20	6.60	4.00	6.70	10.20
220	6.70	8.60	6.20	7.20	5.30	5.80	3.80	5.20	1.40	5.10	6.60	3.50	6.70	11.40
230	6.70	8.40	6.30	7.00	5.30	6.40	3.80	5.60	1.40	4.20	6.60	3.70	6.80	10.60
240	6.70	8.50	6.30	7.40	5.30	6.50	3.80	5.30	1.40	4.60	6.50	3.90	6.70	10.8
avg.conc (brix)	6.68	8.52	6.26	7.14	5.28	6.16	3.80	5.26	1.40	4.90	6.58	3.98	6.72	10.45
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	67.38	82.35	63.14	67.99	53.26	58.04	38.33	49.09	14.12	45.56	66.37	36.65	67.78	100.86
		ความชื้น		ความหนาแน่น										
		จุด 1-6	เบียร์ต้น											
ของแข็ง		86.25	63.86	1025.20										
ของเหลว				1008.69										

การทดลองที่ 4 (RT=50 min 3.76 rpm draft=1.7G temp. =55 C)  
 starting time (take sample) 1.18 hr later  
 finish time 4:53 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	1.70	6.50	1.60	4.60	1.20	4.80	0.80	4.00	0.20	2.80	1.20	3.20	1.40	8.40
10	1.80	6.40	1.60	5.40	1.30	4.60	1.00	3.80	0.20	4.00	1.30	2.80	1.80	9.80
15	1.80	5.40	1.80	5.00	1.50	5.20	1.20	3.60	0.20	3.20	1.40	3.60	1.80	10.70
20	2.00	6.20	1.80	7.00	1.60	5.20	1.40	3.40	0.20	4.20	1.50	3.40	1.90	10.00
25	2.20	6.80	1.90	6.00	1.70	6.00	1.40	3.10	0.20	2.80	1.50	3.40	2.00	8.40
30	2.20	6.50	2.00	7.00	1.80	5.00	1.50	3.80	0.20	2.20	1.80	2.40	2.10	9.60
35	2.20	6.20	2.20	5.60	2.00	4.80	1.50	4.00	0.20	4.00	1.80	3.80	2.20	9.60
40	2.40	6.80	2.20	6.20	2.10	4.80	1.80	4.60	0.20	4.80	2.00	3.20	2.20	11.80
45	2.60	6.00	2.40	5.80	2.10	4.90	1.80	3.50	0.30	4.00	2.20	3.50	2.40	9.80
50	2.60	6.50	2.40	6.00	2.20	5.20	1.80	4.60	0.30	3.50	2.20	3.20	2.50	9.80
55	2.60	7.50	2.40	4.80	2.10	6.20	1.80	3.20	0.30	3.80	2.30	3.80	2.50	11.40
60	2.70	7.10	2.50	6.40	2.20	4.80	1.80	4.00	0.30	5.00	2.40	3.00	2.60	10.80
65	2.80	7.80	2.60	6.80	2.20	4.90	1.80	5.20	0.30	4.60	2.40	3.00	2.60	10.50
70	2.80	7.20	2.70	4.80	2.20	5.80	1.80	4.40	0.30	3.80	2.40	4.00	2.80	10.80
75	3.00	7.50	2.70	5.40	2.30	5.00	2.00	3.80	0.40	4.60	2.60	3.40	3.00	11.00
80	3.00	7.20	2.80	5.00	2.50	5.20	2.00	4.50	0.40	3.30	2.80	3.30	2.80	10.80
90	3.20	7.80	3.00	5.20	2.40	5.80	2.00	4.60	0.40	3.70	3.00	3.40	3.00	11.20
100	3.30	7.60	3.00	5.50	2.60	5.20	1.90	4.80	0.40	4.20	3.20	3.80	3.30	8.00
110	3.50	7.60	3.00	5.40	2.40	5.40	2.00	4.60	0.40	4.20	3.20	3.70	3.50	10.20
120	3.80	7.90	3.20	5.00	2.60	6.20	2.00	4.80	0.40	4.50	3.80	3.40	3.70	9.80
130	3.80	7.80	3.40	6.20	2.80	5.00	2.00	4.50	0.40	3.80	3.80	3.60	3.80	11.80
140	4.00	8.00	3.80	6.00	3.00	5.20	2.00	4.60	0.40	4.00	3.60	3.80	3.80	9.00
150	4.20	8.60	4.00	6.20	3.20	5.40	2.00	4.80	0.50	4.50	3.80	3.80	4.00	10.00
160	4.40	7.50	4.20	6.40	3.40	6.50	2.10	5.20	0.50	4.20	4.00	3.80	4.40	11.00
170	4.40	8.40	4.10	6.80	3.40	6.20	2.20	5.30	0.50	4.20	4.00	3.80	4.20	9.50
180	4.40	8.50	4.10	7.00	3.30	5.80	2.20	5.20	0.50	4.00	4.20	4.00	4.40	9.80
190	4.50	8.00	4.10	6.80	3.30	6.20	2.20	5.00	0.50	4.20	4.30	3.80	4.40	11.40
200	4.50	8.20	4.10	6.50	3.40	6.10	2.20	5.00	0.50	4.20	4.30	4.00	4.40	9.80
avg.conc (brix)	4.44	8.12	4.12	6.70	3.36	6.16	2.18	5.14	0.50	4.16	4.16	3.88	4.36	10.20
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	44.68	78.79	41.46	62.40	33.82	57.04	21.94	47.08	5.03	37.71	41.87	35.07	43.88	96.61
		ความชื้น		ความหนาแน่น										
		จุด 1-6		เริ่มต้น										
ของแข็ง		85.66		83.04										
ของเหลว				1014.35										
				1006.40										

การทดลองที่ 5 (RT=70 min 2.69 rpm draft=1.09 temp. =55 C)  
 starting time (take sample) 1.37 hr later  
 finish time 5:00 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.40	7.10	2.20	5.40	2.00	5.20	1.30	4.00	0.00	3.20	2.10	3.00	2.40	7.60
10	2.00	7.30	2.40	4.80	2.10	5.00	1.40	4.00	0.20	3.50	2.40	2.10	2.60	14.20
15	2.80	6.90	2.60	5.30	2.40	5.00	1.70	4.00	0.60	3.00	2.60	3.50	2.80	10.80
20	3.00	7.50	2.60	5.60	2.50	4.80	1.80	3.80	0.60	3.20	2.80	3.00	3.00	10.00
25	3.20	7.30	2.90	6.00	2.60	5.60	1.80	4.50	0.60	3.80	3.00	2.00	3.10	10.10
30	3.20	7.20	2.90	6.20	2.60	5.30	1.80	4.20	0.60	4.00	3.10	3.40	3.20	10.10
35	3.20	7.00	3.10	6.30	2.50	5.10	1.80	4.00	0.60	3.50	3.20	2.90	3.20	10.40
40	3.40	7.60	3.10	6.10	2.70	5.00	1.80	5.20	0.60	4.00	3.20	2.50	3.20	10.20
45	3.00	6.80	3.30	6.00	3.00	4.80	2.20	4.80	0.60	3.20	3.40	3.60	3.50	8.50
50	3.00	7.50	3.30	6.40	3.10	4.70	2.00	4.60	0.80	3.60	3.50	3.10	3.50	10.40
55	3.70	7.40	3.30	6.50	3.00	4.60	2.00	4.50	0.80	3.50	3.60	3.20	3.70	12.10
60	3.80	7.60	3.50	5.90	3.20	5.30	2.00	5.20	0.60	3.00	3.70	2.60	3.80	9.80
65	4.00	7.90	3.70	5.00	3.40	5.60	2.00	5.30	0.60	3.40	3.80	3.20	4.00	8.40
70	4.00	7.20	3.60	5.60	3.30	5.00	2.00	4.80	0.80	2.90	3.90	3.50	4.00	8.50
75	4.00	8.00	3.80	6.50	3.40	5.20	2.00	4.60	0.80	3.90	4.00	3.10	4.00	10.20
80	4.20	7.00	3.80	6.30	3.40	5.10	2.00	4.80	0.80	4.00	4.20	3.50	4.10	10.40
85	4.20	7.20	3.80	6.00	3.40	5.30	1.80	5.00	0.80	4.10	4.30	2.80	4.20	9.80
90	4.40	7.80	4.00	6.20	3.60	5.70	1.80	5.30	0.80	4.60	4.40	3.40	4.30	10.40
95	4.40	7.60	4.00	6.80	3.60	5.60	2.00	4.80	0.90	3.90	4.40	3.80	4.30	10.20
105	4.70	7.80	4.20	6.70	3.40	5.80	2.00	4.70	0.90	4.00	4.40	4.40	4.50	10.80
115	4.70	8.00	4.40	6.50	3.60	5.40	2.00	4.60	0.80	3.80	4.50	4.40	4.60	10.00
125	4.80	8.10	4.40	6.70	3.60	5.60	2.10	4.90	1.00	4.00	4.60	4.50	4.70	9.00
135	4.80	7.90	4.30	6.90	3.70	5.80	2.20	4.80	1.00	4.80	4.80	4.60	4.80	12.00
145	4.90	8.30	4.40	7.00	3.60	5.90	2.10	5.00	1.00	4.00	4.80	3.50	4.90	10.00
155	4.90	8.20	4.40	7.60	3.60	6.00	2.20	5.30	0.90	4.50	4.90	3.00	5.00	10.00
165	5.10	8.40	4.50	6.20	3.60	5.10	2.10	5.00	1.00	4.00	5.10	3.80	5.10	9.00
175	5.10	8.20	4.40	7.20	3.60	6.00	2.10	5.10	1.00	4.30	5.10	4.00	5.10	11.20
185	5.10	8.60	4.50	7.10	3.60	5.40	2.10	4.80	1.00	4.00	5.10	4.00	5.10	11.00
195	5.20	7.40	4.60	6.80	3.60	5.80	2.10	5.00	1.00	4.20	5.10	3.00	5.10	10.30
205	5.10	7.60	4.50	6.70	3.60	5.20	2.10	4.80	1.00	4.10	5.10	3.50	5.10	9.80
avg conc (brix)	5.12	8.04	4.50	6.80	3.60	5.62	2.10	4.94	1.00	4.12	5.10	3.66	5.10	10.17
avg conc (kg/m <sup>3</sup> )	51.58	78.60	45.33	65.60	36.27	53.54	21.16	46.72	10.07	38.63	51.38	34.16	51.38	97.54

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มคั้น	
ของแข็ง	87.63	84.01	1025.96
ของเหลว			1007.40

การทดลองที่ 6 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.67 temp. =55 C)  
 starting time (take sample) 1.50 hr later  
 finish time 5:30 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.90	6.80	2.70	5.40	2.40	4.00	1.20	4.20	0.40	3.40	2.60	2.80	2.80	8.00
10	3.00	6.40	2.70	5.60	2.50	4.20	1.20	4.40	0.40	3.80	2.60	2.80	2.80	9.00
15	3.20	6.90	2.80	5.90	2.50	4.30	1.30	5.00	0.50	3.50	2.70	3.60	3.00	9.00
20	3.20	6.20	2.80	5.80	2.60	4.50	1.20	4.00	0.50	3.70	2.70	3.80	3.00	10.00
25	3.30	6.80	3.00	5.70	2.60	4.90	1.40	5.10	0.60	3.00	2.80	2.80	3.20	8.40
30	3.40	6.30	3.00	5.80	2.70	4.80	1.40	4.80	0.60	3.20	3.00	4.10	3.20	9.00
35	3.60	7.20	3.10	5.90	2.80	4.60	1.40	4.50	0.50	4.20	3.10	3.20	3.30	8.20
40	3.70	6.90	3.20	6.00	2.80	4.80	1.60	4.90	0.60	4.60	3.10	3.00	3.30	10.30
45	3.70	6.50	3.20	6.10	2.80	5.00	1.60	5.00	0.60	4.10	3.30	3.30	3.50	9.40
50	3.80	7.00	3.30	6.50	2.80	5.60	1.70	4.60	0.60	3.80	3.40	3.40	3.60	8.60
55	3.90	7.60	3.50	6.80	3.00	6.00	1.70	4.30	0.70	3.90	3.40	3.20	3.60	10.00
60	3.90	7.90	3.50	6.90	3.00	5.80	1.80	4.70	0.70	3.70	3.60	3.00	3.80	10.00
65	4.00	7.10	3.60	6.00	3.00	5.00	1.80	4.80	0.60	4.00	3.70	3.50	3.80	10.10
70	4.10	7.00	3.60	6.50	3.10	5.40	1.80	4.20	0.70	4.20	3.80	3.60	3.80	10.60
75	4.20	8.40	3.70	6.70	3.20	5.30	1.80	4.10	0.80	4.50	3.80	3.40	4.00	9.80
80	4.30	7.20	3.80	6.10	3.20	5.10	1.80	5.00	0.80	3.80	3.80	3.40	4.10	10.20
85	4.30	7.40	3.80	6.50	3.40	5.30	2.00	4.60	0.80	3.70	4.00	3.60	4.30	10.00
90	4.40	7.50	3.90	6.20	3.40	5.40	2.00	4.70	0.90	4.00	4.00	3.30	4.50	10.60
95	4.60	7.90	4.10	7.00	3.40	5.80	2.00	4.80	0.90	4.00	4.10	2.80	4.60	10.00
100	4.70	8.00	4.20	7.20	3.50	5.60	2.20	4.30	0.90	4.10	4.30	2.90	4.60	10.80
110	4.70	8.60	4.20	6.40	3.50	6.20	2.20	4.00	0.80	3.80	4.40	3.00	4.70	10.50
120	4.70	8.20	4.40	6.90	3.50	6.30	2.10	4.80	1.00	4.00	4.50	3.30	4.80	11.30
130	4.90	8.10	4.40	6.80	3.60	5.80	2.20	4.90	1.00	4.80	4.70	3.40	5.00	10.60
140	5.10	7.90	4.60	6.70	3.60	5.70	2.30	5.00	1.10	3.90	4.90	3.20	5.10	14.10
150	5.20	7.80	4.80	7.00	3.60	6.10	2.30	5.20	1.10	3.50	5.00	3.00	5.30	11.10
160	5.30	7.60	4.90	6.50	3.70	5.90	2.30	4.50	1.20	3.80	5.20	3.00	5.30	10.20
170	5.40	8.00	5.00	6.80	3.70	5.80	2.30	4.80	1.20	4.00	5.30	3.50	5.40	11.20
180	5.30	8.00	5.00	6.60	3.80	5.70	2.20	5.00	1.20	4.20	5.20	3.30	5.50	12.40
190	5.40	8.60	5.10	6.50	3.70	5.50	2.30	4.80	1.20	4.30	5.30	3.10	5.50	10.50
210	5.40	7.40	5.00	6.70	3.80	5.60	2.20	4.90	1.20	3.80	5.30	3.40	5.40	10.80
220	5.40	7.60	5.00	6.80	3.80	5.40	2.20	5.00	1.20	4.00	5.30	3.80	5.50	11.00
avg.conc (drix)	5.38	7.92	5.02	6.68	3.76	5.80	2.24	4.99	1.20	4.06	5.28	3.42	5.46	10.18
avg.conc(kg/m³)	54.25	77.22	50.62	64.27	37.91	53.26	22.59	46.26	12.10	37.98	53.24	31.79	55.05	97.85

	ความชื้น		ความหนาแน่น	
	จุด 1-6	เริ่มคั้น		
ของแข็ง	87.54	83.4	1025.61	
ของเหลว			1008.30	



การทดสอบที่ 7 (RT=50 min 3.70 rpm draft=2.17 temp. =55 C)  
 starting time (take sample) 1.22 hr later  
 finish time 4:40 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.50	6.00	2.30	5.40	2.10	5.00	1.00	4.80	0.20	3.40	2.00	2.00	2.20	10.00
10	2.60	6.20	2.30	5.60	2.10	4.90	1.00	4.20	0.20	3.60	2.20	2.60	2.20	9.00
15	2.60	6.30	2.40	5.30	2.10	4.80	1.00	4.60	0.20	3.20	2.40	2.50	2.40	11.00
20	2.80	6.50	2.60	5.00	2.20	4.60	1.20	4.50	0.30	3.00	2.60	4.00	2.50	9.60
25	3.00	7.00	2.60	5.40	2.20	5.00	1.20	4.30	0.30	3.90	2.60	3.00	2.70	10.10
30	3.10	6.00	2.50	5.90	2.30	5.30	1.20	4.60	0.30	3.80	2.80	2.80	2.80	10.20
35	3.10	6.60	2.70	5.80	2.30	5.20	1.30	4.80	0.30	4.10	2.80	2.90	3.00	9.80
40	3.20	6.50	2.80	6.00	2.40	5.60	1.30	5.00	0.40	5.00	2.90	3.00	3.00	9.00
45	3.20	6.20	2.90	7.00	2.40	5.40	1.30	5.30	0.40	4.30	2.90	3.50	3.00	8.50
50	3.20	7.00	2.80	5.40	2.40	5.80	1.40	5.20	0.40	5.00	3.00	3.20	3.10	8.40
55	3.20	7.00	3.00	5.80	2.50	5.30	1.40	5.00	0.50	4.30	3.00	3.10	3.10	7.70
60	3.40	6.50	3.00	5.30	2.50	5.70	1.40	5.10	0.50	4.60	3.10	3.40	3.20	9.80
65	3.40	6.90	3.00	5.60	2.50	5.60	1.40	5.40	0.50	3.90	3.10	3.60	3.20	8.80
70	3.50	6.80	3.10	5.80	2.50	5.00	1.40	5.30	0.50	3.80	3.10	3.80	3.20	10.80
75	3.60	7.00	3.10	5.90	2.60	5.00	1.50	5.20	0.60	4.00	3.20	3.00	3.30	8.50
80	3.60	7.00	3.20	6.00	2.60	5.40	1.50	5.10	0.60	3.90	3.20	3.50	3.50	8.00
85	3.60	7.30	3.20	6.10	2.70	5.10	1.50	4.90	0.60	3.20	3.40	3.10	3.50	8.50
90	3.60	7.80	3.20	6.30	2.70	5.60	1.50	4.80	0.60	4.00	3.40	3.60	3.50	9.60
95	3.70	7.60	3.30	6.50	2.70	5.80	1.60	5.30	0.60	4.10	3.50	3.50	3.60	9.80
100	3.70	8.00	3.30	6.40	2.80	5.60	1.60	4.80	0.70	4.20	3.50	3.40	3.60	8.20
110	3.80	7.60	3.30	6.20	2.80	5.70	1.60	5.00	0.70	4.30	3.60	3.00	3.60	9.80
120	3.80	7.50	3.40	6.00	2.80	5.80	1.70	5.30	0.70	4.20	3.60	3.80	3.70	10.20
130	3.80	7.10	3.40	6.20	2.80	5.90	1.70	5.20	0.70	4.60	3.70	3.20	3.80	9.60
140	3.90	7.80	3.40	6.30	2.80	5.70	1.70	5.10	0.80	4.00	3.80	3.70	3.90	10.20
150	3.90	7.90	3.50	6.00	2.90	5.60	1.80	5.30	0.80	4.60	3.80	3.60	3.90	11.00
160	4.00	7.90	3.50	6.40	2.90	5.60	1.80	5.00	0.80	4.00	3.90	3.10	4.00	9.20
170	3.90	7.50	3.40	6.10	2.90	5.80	1.80	4.90	0.80	4.20	3.90	3.50	4.00	9.50
180	4.00	8.00	3.50	6.20	2.80	5.90	1.80	5.20	0.80	3.80	3.90	3.60	4.00	11.00
190	3.90	7.60	3.40	6.10	2.80	5.40	1.80	4.80	0.80	4.10	4.00	3.30	4.00	9.40
200	3.90	7.80	3.40	6.00	2.80	5.70	2.00	5.20	0.80	4.00	3.90	3.40	4.00	9.80
avg conc (brix)	3.94	7.76	3.44	6.16	2.84	5.68	1.84	5.02	0.80	4.02	3.92	3.38	4.00	9.50
avg conc (kg/m <sup>3</sup> )	39.50	75.64	34.48	59.02	28.47	54.15	18.45	47.52	8.02	37.66	39.30	31.45	40.10	89.97

ของแข็ง ของเหลว	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เต็มคาน	
	88.48	83.23	1016.18
			1002.47

การทดลองที่ 8 (RT=70 min 2.60 rpm draft=2.21 temp.=55 C)  
 starting time (take sample) 1.45 hr later  
 finish time 5:00 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.40	6.40	2.20	5.20	2.00	5.00	1.20	4.00	0.40	3.20	2.30	2.60	2.40	11.00
10	2.80	6.60	2.40	5.30	2.10	5.20	1.20	4.20	0.40	3.60	2.60	2.90	2.60	9.20
15	3.00	6.30	2.50	5.00	2.20	5.40	1.30	4.00	0.40	3.50	2.70	3.00	2.80	9.40
20	3.10	6.00	2.70	5.40	2.20	5.30	1.30	4.30	0.50	3.80	2.80	2.80	2.90	11.20
25	3.10	7.00	2.80	5.90	2.20	5.60	1.30	4.60	0.50	3.60	2.90	2.50	3.00	10.40
30	3.10	7.20	2.80	5.80	2.30	5.20	1.40	4.40	0.40	3.70	3.00	2.60	3.10	11.00
35	3.20	6.80	2.90	6.00	2.30	5.50	1.40	4.70	0.50	4.00	3.20	2.90	3.20	9.00
40	3.20	6.80	3.00	6.30	2.50	5.60	1.50	4.50	0.50	4.30	3.20	3.50	3.30	8.60
45	3.30	7.00	3.10	5.90	2.50	5.80	1.50	4.90	0.60	3.90	3.20	3.20	3.30	10.70
50	3.40	6.50	3.10	5.80	2.60	5.10	1.50	4.20	0.60	4.00	3.50	2.90	3.50	10.40
55	3.60	6.90	3.20	5.60	2.60	5.10	1.60	4.60	0.60	4.00	3.50	3.60	3.60	12.00
60	3.70	7.80	3.20	5.40	2.60	5.20	1.60	4.30	0.60	0.30	3.60	3.30	3.60	10.10
65	3.70	7.60	3.30	6.00	2.50	5.40	1.70	4.70	0.60	3.90	3.60	3.10	3.70	10.00
70	3.70	7.20	3.30	5.90	2.60	5.30	1.70	4.90	0.60	3.50	3.70	3.20	3.70	9.20
75	3.70	7.00	3.30	5.80	2.70	5.80	1.70	4.50	0.60	3.80	3.60	3.50	3.70	10.10
80	3.80	7.60	3.40	6.10	2.70	5.60	1.80	4.60	0.70	4.00	3.70	3.40	3.70	10.40
85	3.80	7.30	3.40	6.20	2.70	6.20	1.80	5.00	0.70	4.20	3.70	3.40	3.80	9.20
90	3.90	7.20	3.50	6.30	2.80	5.30	1.90	5.20	0.70	4.30	3.80	3.20	3.80	9.80
95	4.00	7.50	3.50	6.40	2.80	5.40	1.90	4.80	0.70	3.90	3.90	3.50	4.00	10.10
100	4.00	7.80	3.50	6.50	2.80	5.60	1.90	4.80	0.70	3.80	4.00	3.60	4.10	10.80
110	4.10	7.90	3.60	6.10	2.90	5.80	1.90	4.70	0.80	3.70	4.00	3.40	4.20	9.60
120	4.20	7.60	3.80	5.90	2.80	5.00	2.00	4.50	0.80	4.00	4.10	3.70	4.30	9.40
130	4.30	7.50	3.80	5.80	2.90	5.20	2.00	5.00	0.80	3.90	4.20	3.40	4.40	10.50
140	4.40	7.20	4.00	6.50	3.00	5.70	2.00	4.60	0.80	4.20	4.30	3.50	4.40	9.70
150	4.40	7.30	3.90	5.80	3.00	5.20	1.90	4.50	0.90	3.80	4.30	3.30	4.40	10.20
160	4.50	7.40	4.10	6.20	3.00	5.60	2.00	4.90	0.80	3.70	4.40	3.60	4.40	10.60
170	4.60	7.80	4.00	6.00	3.00	5.70	1.90	5.10	0.80	4.00	4.40	3.20	4.40	9.40
180	4.60	8.00	4.00	6.10	3.00	5.10	2.00	4.90	0.90	4.00	4.40	3.70	4.60	11.20
190	4.60	7.20	4.00	6.30	3.00	5.80	2.00	5.10	0.90	4.10	4.40	3.30	4.60	9.80
avg.conc (brlx)	4.54	7.58	4.00	6.08	3.00	5.48	1.96	4.90	0.86	3.92	4.33	3.42	4.48	10.14
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	45.62	72.17	40.19	56.96	30.15	51.02	19.69	45.34	8.64	35.90	44.01	31.16	45.02	96.33

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
ของแข็ง	86.7	83.29	1014.94
ของเหลว			1004.84

การทดสอบที่ 9 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.98 temp.=55 C)  
 starting time (take sample) 2.00 hr later  
 finish time 5:38 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.90	6.60	2.50	5.60	1.60	4.80	0.90	4.20	0.30	3.00	2.50	2.50	2.60	10.20
10	3.00	6.50	2.50	5.90	1.70	5.20	0.90	4.00	0.40	3.20	2.60	2.40	2.70	9.00
15	3.10	6.90	2.40	5.80	1.70	5.00	1.00	4.40	0.30	3.10	2.80	2.80	2.90	13.00
20	3.20	6.80	2.60	6.00	1.80	5.00	1.00	4.30	0.40	3.20	2.80	2.80	3.00	9.00
25	3.30	6.70	2.60	6.30	1.80	5.10	1.10	4.20	0.40	4.00	2.90	3.00	3.00	9.60
30	3.30	6.90	2.70	5.90	1.80	4.90	1.10	4.50	0.40	3.50	3.00	2.60	3.10	9.60
35	3.40	7.00	2.80	5.80	1.90	4.80	1.20	4.60	0.40	3.70	3.20	2.50	3.40	9.70
40	3.40	7.20	2.90	5.40	1.90	4.60	1.20	4.90	0.40	3.60	3.40	2.70	3.40	9.30
45	3.40	6.90	2.80	5.60	1.90	4.90	1.10	4.20	0.40	3.50	3.40	3.20	3.40	9.70
50	3.60	6.50	3.00	5.70	2.00	4.80	1.20	4.60	0.50	2.90	3.40	3.00	3.50	9.00
55	3.60	6.30	3.00	5.90	2.00	5.00	1.30	4.10	0.40	2.70	3.50	3.40	3.60	8.60
60	4.00	7.00	3.20	5.60	2.20	5.20	1.30	4.60	0.50	3.00	3.70	3.20	3.70	10.60
65	4.00	7.60	3.40	5.30	2.30	5.30	1.30	4.70	0.50	3.60	3.70	2.90	3.90	11.20
70	4.00	7.10	3.50	5.80	2.20	5.20	1.30	4.90	0.50	3.80	3.90	3.50	4.00	10.10
75	4.00	7.10	3.50	6.00	2.20	5.40	1.40	4.90	0.50	3.40	3.90	3.40	4.00	9.80
80	4.00	7.30	3.50	6.20	2.30	5.00	1.40	4.30	0.50	3.70	4.00	3.20	4.00	10.20
85	4.10	7.20	3.50	6.30	2.30	5.00	1.50	4.60	0.60	3.90	4.00	3.10	4.10	9.20
90	4.10	7.40	3.60	6.00	2.40	5.40	1.60	4.00	0.60	4.00	4.10	3.00	4.10	10.10
95	4.10	7.00	3.60	5.90	2.40	5.60	1.60	4.70	0.60	4.20	4.10	2.80	4.10	9.00
100	4.10	7.10	3.60	5.80	2.50	5.30	1.60	4.60	0.60	4.50	4.20	2.90	4.20	10.20
110	4.20	7.30	3.60	6.10	2.60	5.20	1.70	4.50	0.70	3.90	4.20	3.00	4.20	9.60
120	4.20	8.00	3.70	6.20	2.60	5.10	1.80	4.90	0.70	4.00	4.40	3.20	4.40	9.80
130	4.50	7.90	3.70	6.40	2.60	5.00	1.80	4.80	0.70	3.80	4.40	3.10	4.50	10.40
140	4.70	7.80	3.80	6.00	2.70	5.60	1.80	4.70	0.80	3.60	4.60	3.50	4.80	9.60
150	4.80	7.60	3.80	5.80	2.70	5.40	1.90	4.60	0.80	3.70	4.70	3.60	4.80	9.60
160	4.80	7.70	3.90	6.20	2.80	5.80	1.90	4.30	0.90	3.00	4.80	3.80	4.90	10.40
170	4.90	7.60	3.90	6.50	2.80	5.30	2.00	5.00	0.80	4.20	4.80	3.00	4.90	12.20
180	4.90	6.90	4.00	6.00	3.00	5.40	2.00	5.10	0.90	3.80	4.90	3.10	4.90	10.60
190	5.00	7.80	4.10	5.90	3.10	5.50	2.10	4.80	1.00	4.10	5.00	3.20	5.00	11.70
200	5.10	7.40	4.10	6.10	3.10	5.40	2.00	5.00	1.00	3.90	5.10	3.00	5.10	9.80
210	5.10	6.90	4.00	5.90	3.10	5.60	2.00	4.70	0.90	3.80	5.00	3.00	5.10	10.20
220	5.20	7.40	4.10	6.10	3.00	5.30	2.00	5.00	1.00	3.90	5.00	3.40	5.10	10.40
230	5.20	7.10	4.00	6.00	3.00	5.40	2.00	4.80	1.00	3.80	5.10	3.20	5.10	11.20
avg.conc (brix)	5.12	7.32	4.06	6.00	3.06	5.44	2.02	4.86	0.98	3.90	5.04	3.16	5.08	10.08
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	51.43	69.58	40.78	56.22	30.74	50.67	20.29	44.99	9.84	35.74	50.62	28.74	51.03	96.37

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	6	
ของแข็ง	86.41	83.4	1019.27
ของเหลว			1004.45

การทดลองที่ 10 (RT=50 min 3.76 rpm draft=1.28 temp. = 62.5 C)  
 starting time (take sample) 1.18 hr later  
 finish time 5:47 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.20	7.20	2.00	5.60	1.90	5.00	1.70	4.10	0.40	3.00	1.70	2.50	2.00	8.20
10	2.20	6.40	2.00	5.70	1.90	4.80	1.80	4.60	0.50	4.00	1.70	3.60	2.00	10.70
15	2.40	7.40	2.20	6.00	2.00	5.20	1.80	4.80	0.50	4.40	1.80	2.60	2.20	7.60
20	2.60	6.60	2.40	6.10	2.00	5.40	1.80	4.60	0.60	4.20	2.00	3.50	2.20	9.80
25	2.60	6.50	2.40	5.60	2.20	5.00	1.80	4.80	0.60	4.40	2.20	3.20	2.40	10.80
30	2.70	7.60	2.50	5.60	2.30	5.20	2.00	4.90	0.60	4.00	2.20	4.10	2.40	10.10
35	3.00	6.50	2.70	5.80	2.50	5.00	2.20	4.70	0.80	4.80	2.40	2.60	2.60	8.70
40	3.00	7.60	2.80	7.00	2.60	5.40	2.20	4.70	1.00	4.10	2.60	3.20	2.80	10.20
45	3.00	7.80	2.80	6.20	2.60	5.90	2.30	4.70	1.00	4.00	2.60	3.70	3.00	11.10
50	3.00	7.00	2.80	6.20	2.60	5.00	2.20	5.40	1.00	4.40	2.80	3.90	3.00	10.10
55	3.10	7.60	2.90	6.50	2.70	5.60	2.30	4.90	0.80	4.30	2.80	1.90	3.10	8.90
60	3.10	8.10	2.90	6.40	2.70	5.80	2.30	4.80	1.00	4.20	2.90	3.50	3.10	10.20
65	3.30	6.80	3.00	5.80	2.80	5.60	2.30	5.20	0.80	4.70	3.00	3.60	3.20	9.20
70	3.30	7.80	3.10	6.50	2.80	5.70	2.40	5.10	0.90	4.80	3.00	2.50	3.20	10.60
75	3.40	7.60	3.20	6.80	2.90	6.00	2.40	5.10	1.00	4.10	3.10	3.40	3.20	11.20
80	3.40	7.80	3.20	6.50	2.80	6.00	2.40	5.20	1.00	4.40	3.30	3.20	3.40	10.40
85	3.50	6.90	3.30	6.90	3.00	5.80	2.40	5.30	0.90	4.80	3.40	4.00	3.50	8.40
100	3.60	8.20	3.40	7.00	3.10	5.20	2.40	5.40	1.00	4.90	3.40	3.00	3.50	9.60
110	3.70	6.70	3.40	7.00	3.20	5.40	2.50	5.00	1.00	4.40	3.50	3.70	3.50	9.40
120	3.80	8.00	3.60	7.00	3.30	6.20	2.70	5.00	1.00	4.50	3.50	3.90	3.60	8.60
130	3.80	8.50	3.60	6.50	3.40	5.80	2.70	5.20	1.20	5.40	3.50	4.00	3.70	9.80
140	4.20	8.10	3.90	6.90	3.50	5.90	3.00	5.30	1.00	4.90	3.70	4.20	3.90	10.20
150	4.40	7.40	4.10	6.80	3.80	6.00	3.00	4.80	1.20	4.80	3.90	4.10	4.20	8.80
160	4.50	7.60	4.30	6.60	3.80	6.00	3.30	4.90	1.20	5.00	4.20	3.80	4.40	8.90
170	4.70	8.30	4.50	6.80	3.90	6.20	3.50	5.00	1.00	5.10	4.40	3.70	4.60	8.40
180	4.70	8.40	4.50	6.70	4.10	5.60	3.80	5.70	1.20	5.60	4.60	3.90	4.60	9.60
190	4.80	7.80	4.60	6.50	4.20	5.80	3.80	5.30	1.20	5.00	4.80	4.00	4.80	9.20
200	5.00	7.80	4.60	7.60	4.20	6.20	3.80	5.40	1.20	4.90	5.00	4.20	4.80	9.80
210	5.20	8.10	4.80	7.50	4.40	6.00	3.80	5.50	1.20	4.80	5.00	4.00	5.00	9.40
220	5.20	8.60	4.70	7.00	4.40	6.40	3.80	5.40	1.20	5.10	5.20	3.80	5.20	9.60
230	5.20	8.40	4.70	6.80	4.40	8.10	3.80	5.10	1.20	5.00	5.20	4.10	5.20	10.40
240	5.30	8.00	4.80	6.90	4.40	6.20	3.80	5.60	1.20	5.20	5.10	3.70	5.20	11.80
250	5.20	8.70	4.70	7.80	4.30	6.00	3.80	5.50	1.20	4.70	5.20	4.00	5.20	10.20
avg.conc (brix)	5.22	8.36	4.74	7.16	4.38	6.14	3.80	5.42	1.20	4.96	5.14	3.92	5.16	9.69
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	52.53	81.10	47.70	68.56	44.07	58.15	38.24	50.94	12.08	46.39	51.72	36.27	51.92	93.32

	ความชื้น		ควมชื้นแน่นอน
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
ของแห้ง	80.31	84.01	1029.98
ของเหลว			1006.25

การทดลองที่ 11 (RT=70 min 2.69 rpm draft=1.15 temp.=82.5 C)  
 starting time (take sample) 1.34 hr later  
 finish time 5:16 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.90	7.20	2.50	5.40	2.30	4.90	1.90	4.80	0.50	3.90	2.20	3.00	2.60	10.20
10	3.00	7.40	2.70	6.40	2.50	4.90	2.00	4.50	0.50	3.80	2.70	3.50	2.80	10.20
15	3.00	7.00	2.80	6.50	2.60	5.00	2.30	4.80	0.60	4.20	2.80	4.00	3.00	9.40
20	3.30	7.50	3.00	5.90	2.80	5.10	2.30	4.80	0.60	3.90	3.00	4.00	3.10	9.50
25	3.40	7.80	3.20	6.10	2.80	5.40	2.40	4.70	0.60	3.60	3.00	4.00	3.30	10.20
30	3.40	8.20	3.20	5.00	3.00	5.40	2.40	5.30	0.60	3.80	3.20	2.80	3.60	10.00
35	3.60	7.80	3.50	6.50	3.20	5.60	2.60	4.90	0.80	4.50	3.30	3.50	3.70	10.10
40	3.70	7.30	3.50	6.70	3.30	6.10	2.80	5.20	0.80	5.30	3.50	3.80	3.80	9.80
45	3.90	6.80	3.70	6.30	3.50	6.20	3.00	4.90	0.80	4.80	3.60	3.60	4.10	11.20
50	4.00	7.60	3.70	6.50	3.50	5.80	3.00	5.00	0.80	4.90	3.70	3.60	4.20	10.10
55	4.30	7.80	3.80	6.40	3.60	5.70	3.00	5.20	0.80	4.50	3.80	4.10	4.30	9.60
60	4.30	7.90	4.00	6.70	3.80	5.80	3.10	4.80	0.90	4.70	4.00	4.20	4.40	10.20
65	4.30	7.80	4.00	6.40	3.70	5.40	3.00	5.00	0.90	4.80	4.10	2.60	4.40	10.80
70	4.50	7.20	4.20	6.50	3.80	5.60	3.20	5.10	1.00	4.20	4.20	3.60	4.50	10.20
75	4.50	8.00	4.30	6.80	3.80	5.20	3.30	5.20	1.00	4.60	4.30	3.80	4.50	12.10
80	4.60	8.00	4.40	6.90	4.00	6.10	3.50	5.00	1.00	4.90	4.40	3.70	4.40	8.80
85	4.80	7.80	4.50	7.00	4.10	6.00	3.60	5.10	1.10	5.00	4.60	3.90	4.70	8.80
90	4.90	7.00	4.50	7.20	4.20	6.10	3.50	5.40	1.10	4.70	4.80	3.80	4.80	10.10
95	5.00	7.60	4.80	6.50	4.50	6.00	3.50	5.00	1.10	4.20	4.90	4.50	5.00	9.60
100	5.00	7.80	4.80	6.80	4.50	6.00	3.60	5.00	1.20	4.60	5.00	4.00	5.00	10.30
110	5.40	7.40	4.90	6.70	4.50	6.20	3.70	5.00	1.20	4.80	5.20	4.10	5.20	10.10
120	5.50	8.00	5.20	6.50	4.70	5.90	3.70	5.40	1.30	4.60	5.50	4.10	5.40	10.60
130	5.80	8.50	5.40	6.90	4.80	6.20	3.80	4.90	1.30	4.80	5.80	4.30	5.60	10.40
140	6.10	8.20	5.60	6.50	4.90	6.10	3.80	5.00	1.40	5.00	5.80	4.20	6.00	10.60
150	6.30	8.50	5.80	6.70	4.90	6.30	3.90	5.10	1.40	5.00	6.10	4.50	6.20	10.10
160	6.30	8.40	6.00	7.00	5.00	6.10	4.00	5.40	1.50	4.80	6.20	4.30	6.40	10.10
170	6.40	8.00	6.20	7.20	5.00	5.90	4.00	5.20	1.50	4.70	6.40	4.50	6.50	10.80
180	6.50	8.60	6.30	7.00	5.10	6.00	4.10	5.00	1.50	5.10	6.50	4.10	6.50	11.20
190	6.40	7.90	6.20	6.80	5.10	6.00	4.20	5.60	1.60	5.00	6.40	4.20	6.50	10.70
200	6.50	7.80	6.20	7.00	5.10	6.20	4.20	5.30	1.60	4.70	6.50	4.00	6.50	10.20
210	6.40	8.40	6.30	7.00	5.20	6.10	4.20	5.40	1.60	4.80	6.40	4.20	6.40	10.10
220	6.50	8.20	6.20	6.80	5.10	5.90	4.20	5.20	1.60	4.90	6.40	3.80	6.50	9.80
230	6.50	8.10	6.20	6.90	5.10	6.30	4.20	5.40	1.60	4.80	6.40	3.90	6.50	9.60
avg.conc (brix)	6.46	8.08	6.22	6.90	5.12	6.10	4.20	5.38	1.60	4.84	6.42	4.02	6.48	10.20
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	65.27	76.79	62.85	64.74	51.73	56.74	42.44	49.67	16.17	44.43	64.87	36.59	65.47	96.44

ของแข็ง ของเหลว	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
	85.54	83.15	1002.52
			1010.40

การทดลองที่ 12 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.10 temp.=62.5 C)  
 starting time (take sample) 1.57 hr later  
 finish time 5:52 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	llq(y1)	sol(x1)	llq(y2)	sol(x2)	llq(y3)	sol(x3)	llq(y4)	sol(x4)	llq(y5)	sol(x5)	llq(y6)	sol(x6)	llq(y7)	sol(x7)
5	2.50	6.80	2.30	6.00	2.00	4.80	1.50	4.40	0.20	3.60	1.80	3.60	2.30	10.00
10	3.50	6.60	3.20	6.20	2.70	5.60	1.70	4.50	0.40	4.00	2.50	2.60	3.20	10.30
15	3.70	7.00	3.40	6.20	3.10	5.20	2.00	5.00	0.40	4.20	3.00	3.20	3.00	8.90
20	4.00	7.20	3.50	6.10	3.10	5.40	2.20	4.80	0.40	4.00	3.50	3.10	3.90	8.60
25	4.10	6.80	3.70	6.30	3.20	5.30	2.30	4.90	0.60	4.10	3.50	2.80	4.00	8.80
30	4.40	6.50	3.80	6.40	3.40	5.20	2.40	5.00	0.60	4.30	3.80	3.60	4.10	10.60
35	4.30	6.90	4.00	6.10	3.60	5.80	2.40	5.00	0.60	4.40	3.80	3.80	4.30	10.10
40	4.40	7.00	4.00	6.30	3.60	5.40	2.50	5.00	0.60	4.40	3.80	2.70	4.30	10.00
45	4.70	7.50	4.10	6.50	3.60	5.10	2.70	4.80	0.60	4.20	4.00	4.00	4.20	11.20
50	4.80	7.30	4.40	6.60	3.70	5.50	2.70	5.20	0.80	4.30	4.00	2.80	4.40	10.60
55	4.90	7.00	4.40	6.40	3.90	5.70	2.90	4.90	0.80	4.60	4.10	3.40	4.70	12.10
60	4.90	7.60	4.60	6.00	3.90	5.20	3.00	5.00	0.80	4.00	4.40	3.60	4.80	9.80
65	5.00	7.50	4.50	6.10	4.00	5.60	3.00	5.20	0.80	3.80	4.50	3.60	4.80	9.00
70	5.00	7.00	4.50	6.20	4.00	5.40	3.10	5.10	1.00	4.00	4.60	4.00	5.00	9.60
75	5.10	7.80	4.80	6.70	4.20	5.30	3.10	4.80	1.00	4.20	4.70	3.60	4.80	9.80
80	5.40	7.00	4.70	6.00	4.20	5.80	3.10	4.90	1.00	4.10	4.70	3.80	5.10	9.60
85	5.70	7.20	5.00	6.20	4.40	5.60	3.20	4.70	1.10	3.80	4.90	3.70	5.10	9.60
95	5.80	6.80	5.20	6.40	4.40	5.40	3.50	4.80	1.00	3.90	5.10	3.60	5.40	10.00
105	5.80	6.90	5.40	6.30	4.40	5.80	3.50	5.10	1.20	4.20	5.20	3.80	5.50	11.20
115	6.00	7.30	5.40	6.10	4.50	5.50	3.50	5.30	1.20	4.30	5.40	3.90	5.60	10.00
125	6.20	7.60	5.40	6.00	4.60	5.40	3.60	5.40	1.30	4.50	5.00	4.00	5.60	10.10
135	6.30	7.50	5.50	6.50	4.80	5.60	3.50	5.20	1.20	4.60	5.70	4.00	5.80	12.20
145	6.40	7.30	5.60	6.50	4.80	5.70	3.70	5.40	1.40	4.30	5.80	4.00	5.80	10.20
155	6.50	7.60	5.70	6.70	5.00	5.80	3.70	5.60	1.40	4.20	6.00	4.20	6.00	9.80
165	6.60	7.50	5.80	6.40	5.00	5.90	3.80	5.20	1.60	4.80	6.20	4.10	6.20	9.60
175	6.70	7.60	5.80	6.50	5.10	5.80	3.90	5.30	1.60	4.50	6.40	4.30	6.50	12.10
185	6.80	7.80	6.00	6.90	5.20	5.80	4.00	5.10	1.70	4.60	6.60	4.20	6.70	9.80
195	6.90	7.80	5.90	6.60	5.30	5.90	4.10	5.00	1.80	4.70	6.80	4.00	6.90	10.10
205	6.80	7.40	6.00	6.30	5.20	5.80	4.00	5.30	1.80	4.40	7.00	4.00	7.00	12.10
215	6.80	7.60	6.00	6.70	5.30	6.10	4.00	5.20	1.80	4.40	7.00	4.10	7.00	10.20
225	6.80	7.60	6.00	6.50	5.30	5.90	4.00	5.40	1.80	4.50	7.00	3.90	7.00	9.20
235	6.90	7.50	6.00	6.40	5.30	5.80	4.00	5.20	1.80	4.80	7.00	3.80	7.00	10.40
avg.conc (brtx)	6.84	7.58	5.98	6.50	5.28	5.90	4.02	5.22	1.80	4.56	6.96	3.96	6.98	10.18
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	69.05	72.25	60.37	61.24	53.30	55.23	40.58	48.52	18.17	42.09	70.26	36.32	70.47	97.52

ของแข็ง ของเหลว	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
	86.61	83.20	1017.14
			1009.54

การทดลองที่ 13 (RT=50 min 3.76 rpm draft=1.58 temp. =62.5 C)  
 starting time (take sample) 1.20 hr later  
 finish time 4:40 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	llq(y1)	sol(x1)	llq(y2)	sol(x2)	llq(y3)	sol(x3)	llq(y4)	sol(x4)	llq(y5)	sol(x5)	llq(y6)	sol(x6)	llq(y7)	sol(x7)
5	2.00	6.60	1.70	5.60	1.50	5.00	1.10	4.00	0.20	3.40	1.80	2.80	2.00	9.80
10	2.20	6.80	2.00	5.40	1.70	5.20	1.20	4.20	0.30	3.60	1.90	3.00	2.00	11.20
15	2.30	7.10	2.10	5.80	1.90	5.10	1.30	4.00	0.40	3.20	2.00	3.20	2.10	10.70
20	2.50	7.60	2.20	5.70	2.00	5.20	1.40	4.30	0.50	3.80	2.20	3.30	2.30	10.00
25	2.70	6.40	2.40	6.00	2.20	5.40	1.50	4.00	0.40	3.50	2.40	3.60	2.60	10.00
30	2.80	6.50	2.60	6.10	2.40	5.10	1.70	4.50	0.50	3.70	2.50	3.50	2.70	9.60
35	3.00	6.20	2.80	6.00	2.50	5.40	2.00	4.20	0.60	3.60	2.50	3.70	2.70	11.50
40	3.10	6.80	2.90	6.10	2.60	5.60	2.20	4.30	0.60	3.20	2.60	3.80	2.90	11.80
45	3.20	6.70	3.00	5.80	2.80	5.50	2.20	4.00	0.60	4.00	2.80	3.60	3.00	11.40
50	3.20	6.90	3.00	5.60	2.80	5.80	2.20	4.00	0.60	4.10	3.00	3.90	3.10	9.80
55	3.30	6.50	3.10	6.00	2.90	5.40	2.20	4.00	0.60	4.30	3.00	4.00	3.10	11.40
60	3.50	6.70	3.20	6.20	3.00	5.60	2.30	4.60	0.50	4.20	3.10	4.60	3.40	10.80
65	3.60	7.00	3.40	5.90	3.10	6.00	2.40	5.00	0.50	4.60	3.30	3.40	3.50	10.50
70	3.70	7.20	3.50	5.80	3.20	5.90	2.40	5.10	0.50	4.20	3.40	3.50	3.50	10.80
75	3.80	7.60	3.50	6.00	3.20	6.00	2.40	5.20	0.60	3.80	3.40	4.60	3.60	11.00
80	4.00	7.40	3.70	6.40	3.40	6.00	2.40	5.30	0.60	3.90	3.60	4.00	3.80	10.80
90	4.20	7.30	3.90	6.60	3.40	6.20	2.40	5.10	0.70	4.00	3.60	4.20	4.00	11.20
100	4.30	7.80	3.90	6.30	3.40	6.10	2.50	5.00	0.70	4.20	3.80	3.70	4.00	9.00
110	4.40	7.50	4.10	6.70	3.50	5.90	2.60	5.30	0.80	4.30	4.00	3.60	4.30	10.20
120	4.50	8.00	4.20	6.80	3.70	6.20	2.60	5.40	0.80	4.10	4.20	3.90	4.40	9.80
130	4.60	7.60	4.30	6.20	3.80	5.90	2.80	5.00	0.80	3.80	4.30	4.00	4.50	10.40
140	4.80	8.00	4.50	6.70	4.00	5.70	2.80	5.20	0.90	4.00	4.50	4.00	4.70	9.00
150	4.80	8.50	4.50	6.50	4.00	5.80	3.00	4.80	0.90	4.20	4.60	3.80	4.80	10.00
160	5.00	8.10	4.60	7.00	4.10	6.00	3.00	5.00	1.00	4.10	4.80	4.00	4.80	11.20
170	5.00	8.00	4.50	6.70	4.00	5.90	3.10	4.80	1.00	4.40	4.80	3.80	5.00	10.60
180	5.00	7.80	4.60	6.60	4.10	6.10	3.00	5.20	0.90	4.30	4.90	4.10	5.00	10.30
190	5.10	7.60	4.70	6.80	4.10	5.80	3.10	5.10	1.00	4.00	5.00	3.60	5.00	9.80
200	5.10	8.10	4.60	6.50	4.00	6.00	3.10	5.30	1.00	3.90	5.00	3.90	5.10	9.60
avg.conc (brix)	5.04	7.92	4.60	6.72	4.06	5.96	3.06	5.08	0.98	4.14	4.90	3.88	4.98	10.44
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	50.69	75.37	46.26	63.13	40.83	55.54	30.77	46.90	9.86	37.85	49.28	35.37	50.08	100.72

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
ของแข็ง	86.06	83.45	1037.68
ของเหลว			1005.71

การทดสอบที่ 14 (RT=70 min 2.69 rpm draft=1.45 temp. =62.5 C)  
 starting time (take-sample) 1.30 hr later  
 finish time 5:00 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.60	6.80	2.30	6.00	2.10	5.00	1.50	4.00	0.40	3.00	2.30	2.60	2.40	10.60
10	2.80	6.90	2.50	6.20	2.30	5.20	1.50	4.20	0.40	3.20	2.60	2.80	2.80	9.00
15	3.00	7.00	2.00	6.20	2.40	5.60	1.60	4.10	0.40	3.50	2.80	3.00	3.00	10.00
20	3.20	7.20	2.70	6.30	2.50	5.40	1.60	4.30	0.50	3.40	2.80	3.10	3.00	9.60
25	3.20	6.80	2.80	6.40	2.50	5.00	1.60	4.50	0.50	3.00	2.80	3.10	3.00	9.40
30	3.40	7.00	2.90	6.20	2.70	5.30	1.80	4.60	0.50	3.60	3.00	3.50	3.20	9.00
35	3.40	6.80	2.90	5.90	2.70	5.80	1.80	5.00	0.60	3.80	3.20	3.20	3.40	11.00
40	3.50	6.90	3.10	6.10	2.70	5.10	1.80	4.70	0.60	3.80	3.20	3.40	3.30	10.10
45	3.50	6.50	3.10	6.20	2.80	5.30	2.00	5.20	0.60	4.00	3.20	3.60	3.40	9.40
50	3.60	6.60	3.20	6.00	2.90	5.60	2.00	4.60	0.50	3.90	3.20	3.80	3.40	10.40
55	3.60	6.80	3.20	6.30	2.90	6.00	2.00	4.80	0.70	3.80	3.30	3.00	3.50	10.00
60	3.80	6.60	3.40	6.50	3.00	5.10	2.00	4.30	0.70	5.00	3.40	3.60	3.60	10.80
65	3.90	7.00	3.40	6.00	3.00	5.20	2.00	4.10	0.70	4.60	3.50	3.70	3.70	10.90
70	4.10	7.20	3.60	6.10	3.20	5.70	2.20	4.60	0.80	3.80	3.80	3.00	4.00	9.40
75	4.10	7.60	3.60	6.40	3.20	5.30	2.20	4.80	0.80	3.50	3.90	3.00	4.10	9.60
80	4.20	7.00	3.80	6.50	3.40	5.40	2.20	4.60	0.80	3.40	4.00	3.00	4.10	10.20
90	4.30	7.20	3.80	6.00	3.40	5.90	2.30	4.80	0.80	3.70	4.00	3.20	4.20	9.80
100	4.30	7.50	3.90	6.30	3.50	5.60	2.30	5.00	0.90	4.20	4.30	3.40	4.60	10.20
110	4.50	7.80	4.00	6.50	3.60	5.40	2.30	5.00	0.90	4.20	4.50	3.60	4.70	10.00
120	4.70	8.00	4.20	6.80	3.80	5.80	2.40	5.30	0.90	3.90	4.50	3.70	4.70	8.90
130	4.80	7.80	4.30	6.90	3.80	5.90	2.40	4.90	1.00	3.80	4.80	3.90	4.90	9.20
140	4.90	7.50	4.50	6.70	4.00	5.70	2.50	5.20	1.00	3.90	4.80	4.00	5.00	10.80
150	5.10	7.60	4.70	6.80	4.10	6.00	2.60	5.00	1.10	4.00	5.00	4.10	5.00	11.00
160	5.20	7.90	4.80	6.70	4.20	5.80	2.70	5.00	1.10	4.30	5.10	3.60	5.20	10.10
170	5.30	8.00	4.90	6.70	4.30	6.00	2.80	4.80	1.20	4.00	5.30	3.30	5.30	9.80
180	5.40	8.10	4.90	6.40	4.20	5.70	2.80	5.00	1.20	4.10	5.20	3.40	5.40	9.60
190	5.30	7.60	5.00	6.80	4.30	5.90	2.90	5.20	1.20	4.30	5.20	3.90	5.40	9.70
200	5.30	7.40	4.90	6.60	4.30	5.70	2.80	4.90	1.20	4.20	5.20	4.00	5.30	11.20
210	5.40	7.90	4.90	6.50	4.30	6.00	2.80	4.80	1.20	3.80	5.20	3.50	5.40	9.60
avg conc (brix)	5.34	7.80	4.92	6.60	4.28	5.86	2.82	4.94	1.20	4.08	5.22	3.62	5.36	10.00
avg conc(kg/m <sup>3</sup> )	53.83	74.02	49.59	61.88	43.14	54.47	28.42	45.47	12.10	37.22	52.62	32.86	54.03	96.19

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มคั้น	
ของแข็ง	85.63	84.1	1021.82
ของเหลว -			1007.96



การทดลองที่ 15 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.44 temp. =62.5 C)  
 starting time (take sample) 2.00 hr later  
 finish time 5:20 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	llq(y1)	sol(x1)	llq(y2)	sol(x2)	llq(y3)	sol(x3)	llq(y4)	sol(x4)	llq(y5)	sol(x5)	llq(y6)	sol(x6)	llq(y7)	sol(x7)
5	2.80	6.60	2.60	6.00	2.50	5.00	1.40	4.00	0.30	3.50	2.60	3.00	2.80	9.20
10	2.90	6.60	2.60	5.90	2.50	5.20	1.60	4.30	0.40	3.60	2.60	2.90	2.80	9.60
15	3.10	6.90	2.80	5.80	2.50	4.90	1.60	4.50	0.40	3.80	2.80	2.70	2.90	10.20
20	3.40	6.00	3.00	6.00	2.60	4.80	1.70	4.00	0.40	3.90	3.10	2.60	3.20	10.30
25	3.50	6.40	3.10	6.30	2.60	6.00	1.70	4.60	0.60	3.20	3.40	2.90	3.40	11.20
30	3.50	6.80	3.10	5.90	2.70	5.20	1.70	4.90	0.60	3.00	3.60	2.80	3.60	10.50
35	3.70	6.30	3.30	5.40	2.70	5.10	1.70	4.80	0.60	3.70	3.80	3.00	3.80	10.40
40	3.90	6.00	3.50	5.70	2.90	4.70	1.70	4.50	0.60	3.60	3.90	3.60	3.90	10.90
45	4.00	7.00	3.70	6.30	2.90	4.90	1.80	5.00	0.70	3.80	3.90	3.10	3.90	10.20
50	4.00	7.20	3.70	6.00	3.10	4.30	1.80	4.70	0.70	4.00	3.90	3.50	4.00	11.50
55	4.20	7.00	3.70	6.20	3.10	4.60	1.80	4.30	0.80	4.30	4.00	2.90	4.10	12.00
60	4.30	7.60	3.80	6.00	3.20	5.30	1.80	4.00	0.80	4.50	4.00	2.70	4.20	10.40
65	4.30	7.80	3.80	6.30	3.20	5.10	1.90	5.00	0.80	3.90	4.10	3.50	4.30	10.00
70	4.40	6.90	4.00	5.80	3.30	5.00	1.90	4.60	0.90	3.80	4.30	3.50	4.50	10.80
75	4.40	6.80	4.00	5.40	3.40	4.90	1.80	4.00	0.90	4.50	4.50	3.70	4.60	9.80
80	4.60	7.00	4.20	6.00	3.40	4.80	2.00	4.20	0.90	4.00	4.50	3.20	4.60	9.80
85	4.70	7.50	4.30	6.80	3.60	5.00	2.00	4.60	1.00	4.20	4.60	3.40	4.80	10.20
90	4.90	7.10	4.50	6.50	3.60	5.20	2.10	4.80	1.00	3.90	4.60	3.60	4.80	9.60
100	4.90	7.30	4.60	6.30	3.80	5.60	2.20	4.90	1.20	3.80	4.70	2.90	4.90	10.00
110	5.00	8.00	4.80	6.30	3.90	5.80	2.20	4.70	1.20	3.70	4.80	3.40	5.00	10.20
120	5.10	7.60	4.80	6.20	3.90	5.40	2.40	4.60	1.30	3.90	5.00	3.60	5.10	10.10
130	5.10	8.20	4.80	6.80	4.00	5.20	2.60	4.90	1.30	3.80	5.00	3.80	5.10	12.30
140	5.30	7.80	4.90	6.50	4.20	5.40	2.80	4.80	1.40	3.90	5.20	3.50	5.20	10.20
150	5.40	7.90	5.00	7.00	4.40	6.00	3.00	5.00	1.40	4.10	5.40	3.70	5.40	10.00
160	5.60	7.60	5.20	6.70	4.40	5.90	3.10	4.80	1.40	4.40	5.50	3.50	5.60	12.00
170	5.60	7.50	5.20	6.70	4.50	5.80	3.00	4.80	1.40	4.00	5.50	3.40	5.60	9.80
180	5.70	7.40	5.30	6.30	4.50	5.60	3.10	5.00	1.40	4.20	5.50	3.50	5.70	10.40
190	5.60	7.80	5.30	6.50	4.40	5.70	3.10	4.90	1.40	4.00	5.60	3.80	5.70	11.50
200	5.60	7.70	5.20	6.50	4.50	5.40	3.00	5.10	1.40	3.80	5.50	3.60	5.60	9.80
210	5.60	7.50	5.20	6.40	4.50	5.70	3.10	4.80	1.40	3.90	5.50	3.40	5.70	10.00
avg conc (brix)	5.62	7.54	5.24	6.48	4.48	5.64	3.06	4.92	1.40	3.98	5.52	3.54	5.66	10.43
avg conc(kg/m <sup>3</sup> )	56.66	71.84	52.83	61.04	45.16	52.66	30.85	45.59	14.11	36.52	55.65	32.33	57.06	100.18

ของแข็ง ของเหลว	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
	86.4	83.55	1019.65
			1008.13

การทดลองที่ 16 (RT=50 min 3.76 rpm draft=2.12 temp. =62.5 C)  
 starting time (take sample) 1.22 hr later  
 finish time 4:30 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.00	6.50	1.90	5.50	1.70	5.00	1.20	4.30	0.20	3.50	1.60	2.90	1.80	9.50
10	2.20	6.70	2.00	5.60	1.80	4.90	1.30	4.50	0.30	3.60	1.80	3.00	2.00	11.40
15	2.30	6.80	2.10	5.80	2.00	4.80	1.50	4.60	0.40	4.00	2.00	2.50	2.20	10.10
20	2.40	6.90	2.20	5.70	2.00	5.20	1.50	4.90	0.50	3.80	2.10	2.80	2.20	9.20
25	2.50	6.30	2.30	5.30	2.10	5.00	1.50	5.00	0.50	5.00	2.20	3.60	2.40	9.00
30	2.60	6.50	2.40	6.00	2.20	4.60	1.60	4.60	0.50	3.90	2.30	3.20	2.50	9.60
35	2.80	6.80	2.50	6.80	2.20	5.30	1.60	4.70	0.60	3.50	2.50	3.00	2.70	10.40
40	2.90	6.80	2.70	5.70	2.30	5.60	1.70	5.00	0.60	3.40	2.60	3.40	2.80	8.60
45	2.90	7.00	2.70	5.90	2.30	5.10	1.70	5.30	0.60	4.00	2.60	3.50	2.90	10.00
50	3.00	7.80	2.70	6.20	2.30	5.00	1.80	4.20	0.60	4.10	2.70	4.00	2.90	9.80
55	3.20	7.60	2.90	6.30	2.50	5.40	1.80	5.00	0.70	4.20	2.80	3.20	3.00	10.20
60	3.20	7.36	2.90	6.80	2.50	5.60	1.90	5.30	0.70	4.00	2.80	3.30	3.00	10.10
65	3.20	6.90	3.00	6.00	2.50	4.90	2.00	5.00	0.70	4.30	2.90	3.50	3.20	9.60
70	3.20	6.50	3.00	5.80	2.60	5.00	2.00	5.30	0.70	4.50	3.00	3.70	3.20	10.20
75	3.30	7.60	3.00	5.70	2.60	4.80	2.10	5.40	0.80	4.00	3.00	3.80	3.20	10.10
80	3.40	7.00	3.10	6.20	2.80	4.70	2.10	5.00	0.80	4.10	3.00	3.50	3.30	9.80
90	3.50	7.10	3.20	6.10	2.80	5.00	2.20	5.20	0.80	4.30	3.10	3.50	3.40	10.10
100	3.60	7.30	3.40	6.30	3.00	5.30	2.20	4.80	0.80	4.20	3.30	3.60	3.40	10.00
110	3.80	7.20	3.60	6.00	3.20	5.40	2.30	5.00	0.80	4.50	3.30	3.40	3.60	9.60
120	3.90	7.50	3.70	6.10	3.30	5.60	2.40	4.80	0.90	4.20	3.50	3.80	3.80	10.20
130	4.10	7.10	3.70	6.30	3.30	5.80	2.50	5.10	0.80	3.80	3.80	3.60	3.80	10.30
140	4.10	7.70	3.80	6.00	3.40	5.60	2.50	5.20	0.80	3.80	3.90	3.70	4.00	9.20
150	4.20	7.90	3.80	6.20	3.30	5.40	2.50	4.80	0.80	4.00	3.90	3.80	4.10	9.80
160	4.20	7.50	3.80	6.20	3.30	5.60	2.60	4.70	0.90	3.90	4.10	3.40	4.20	10.40
170	4.30	7.20	3.80	6.00	3.30	5.70	2.60	5.00	0.80	4.10	4.20	3.80	4.30	9.80
180	4.30	7.80	3.70	6.10	3.40	5.30	2.60	4.90	0.90	3.80	4.20	3.40	4.30	10.20
190	4.20	7.60	3.80	6.20	3.30	5.40	2.60	5.10	0.80	4.00	4.10	3.70	4.20	10.40
200	4.20	7.20	3.70	6.00	3.30	5.60	2.60	5.00	0.80	4.20	4.20	3.20	4.20	9.60
avg.conc (brk)	4.24	7.46	3.76	6.10	3.32	5.52	2.60	4.94	0.84	4.00	4.16	3.50	4.24	9.90
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	42.52	71.02	37.70	57.23	33.29	51.47	26.07	45.78	8.42	36.71	41.71	31.95	42.52	94.70
		ความชื้น		ความหนาแน่น										
		จุด 1-6	เริ่มต้น											
ของแข็ง		86.2	83.29	1022.02										
ของเหลว				1002.02										

การทดลองที่ 17 (RT=70 min 2.69 rpm draft=1.99 temp.=62.5 C)  
 starting time (take sample) 1.31 hr later  
 finish time 5:20 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.50	6.50	2.30	5.60	2.00	5.00	1.50	5.00	0.20	3.50	2.40	3.20	2.50	10.00
10	2.90	6.40	2.50	5.40	2.20	5.20	1.50	4.70	0.30	3.90	2.70	2.90	2.80	12.00
15	2.90	7.00	2.60	6.20	2.20	4.90	1.60	4.40	0.30	3.40	2.70	3.20	2.90	9.80
20	3.00	7.20	2.80	5.90	2.30	4.80	1.60	4.30	0.30	3.80	2.80	3.50	2.90	9.60
25	3.10	7.40	2.80	5.40	2.30	5.00	1.70	4.60	0.30	4.00	2.80	3.40	3.00	10.00
30	3.10	6.80	2.80	5.60	2.30	5.30	1.70	4.00	0.40	4.20	2.90	2.50	3.00	10.50
35	3.10	6.70	2.80	5.80	2.40	5.10	1.60	4.20	0.40	4.00	3.00	2.80	3.10	10.70
40	3.30	6.60	2.90	5.30	2.50	5.20	1.60	4.10	0.40	5.00	3.00	3.20	3.30	9.60
45	3.40	6.30	2.90	5.70	2.50	5.30	1.60	4.60	0.40	4.70	3.20	3.10	3.40	10.20
50	3.40	6.50	2.90	5.60	2.50	5.60	1.70	4.50	0.40	3.60	3.30	3.00	3.40	10.00
55	3.50	6.80	3.00	6.00	2.60	5.40	1.70	4.80	0.50	3.80	3.30	3.50	3.40	10.20
60	3.50	6.90	3.20	6.20	2.60	5.10	1.80	4.90	0.50	3.60	3.30	3.80	3.50	10.00
65	3.50	7.00	3.20	6.30	2.60	5.60	1.80	4.30	0.50	3.90	3.40	3.40	3.50	10.00
70	3.70	7.30	3.20	6.40	2.80	4.90	1.80	4.50	0.60	3.40	3.50	3.20	3.70	9.80
75	3.70	7.50	3.20	6.00	2.80	4.90	2.00	4.60	0.60	3.80	3.60	3.40	3.70	11.50
80	3.90	7.20	3.50	6.10	2.80	5.20	2.00	4.90	0.60	3.90	3.80	3.70	3.80	11.40
90	3.90	7.40	3.50	6.20	3.00	5.30	2.20	5.00	0.70	3.70	3.80	3.50	3.80	10.30
100	4.00	7.60	3.60	6.00	3.00	5.10	2.20	5.20	0.70	4.00	3.80	3.80	4.00	12.50
110	4.20	7.60	3.80	6.40	3.10	5.40	2.30	5.10	0.80	4.10	4.00	2.90	4.00	10.30
120	4.20	8.20	3.80	6.30	3.10	5.60	2.40	5.60	0.80	3.80	4.00	3.40	4.20	9.80
130	4.40	7.40	3.90	6.20	3.20	5.00	2.40	4.90	0.80	3.70	4.20	3.00	4.40	10.40
140	4.40	7.50	4.10	6.00	3.20	5.80	2.60	5.20	0.80	4.20	4.30	4.00	4.40	10.20
150	4.50	7.20	4.20	6.20	3.30	5.40	2.60	4.80	0.90	4.00	4.50	3.60	4.50	10.30
160	4.60	7.30	4.20	6.20	3.30	5.50	2.60	5.10	0.90	3.90	4.50	3.80	4.60	12.40
170	4.70	7.10	4.30	6.00	3.40	5.30	2.60	4.90	0.90	3.80	4.60	3.60	4.80	11.50
180	4.80	7.40	4.40	5.90	3.40	5.60	2.70	5.00	0.90	4.30	4.70	3.70	4.70	10.40
190	4.80	7.20	4.40	6.10	3.40	5.50	2.60	5.00	0.90	3.80	4.70	3.60	4.80	10.10
200	4.80	7.60	4.40	6.00	3.40	5.40	2.70	4.90	0.90	4.10	4.80	3.20	4.80	9.80
210	4.80	7.50	4.50	6.00	3.40	5.20	2.70	4.80	0.90	3.70	4.70	3.40	4.70	12.50
avg.conc (brfx)	4.78	7.36	4.40	6.00	3.40	5.40	2.66	4.92	0.90	3.94	4.70	3.50	4.76	10.54
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	48.00	69.96	44.19	56.21	34.14	50.27	26.71	45.57	9.04	36.12	47.20	31.94	47.80	100.99

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-0	เริ่มต้น	
ของแข็ง	86.41	83.10	1019.08
ของเหลว			1004.21

การทดลองที่ 18 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.84 temp. =62.5 C)  
 starting time (take sample) 2.00 hr later  
 finish time 5:00 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	3.40	6.50	3.00	5.40	2.10	4.90	1.00	4.50	0.30	3.50	3.00	2.60	3.40	9.40
10	3.40	6.40	3.00	5.30	2.10	4.80	1.20	4.60	0.30	3.60	3.20	3.00	3.40	11.50
15	3.60	6.60	3.20	5.60	2.10	4.60	1.40	4.80	0.40	3.40	3.30	2.70	3.40	10.20
20	3.70	6.90	3.20	5.90	2.40	5.30	1.40	4.30	0.50	3.20	3.40	2.80	3.60	12.40
25	3.70	6.80	3.20	5.80	2.60	4.80	1.50	4.60	0.50	3.00	3.40	2.90	3.60	10.20
30	3.80	6.70	3.40	6.00	2.60	4.60	1.50	4.90	0.50	3.60	3.50	3.20	3.70	9.60
35	3.80	6.90	3.50	5.70	2.60	5.60	1.60	5.00	0.60	3.80	3.50	3.10	3.70	13.00
40	4.00	6.30	3.50	5.90	2.60	4.90	1.60	4.80	0.60	3.20	3.70	2.90	3.80	11.10
45	4.00	7.00	3.50	6.10	2.70	4.70	1.70	4.70	0.60	3.00	3.70	2.80	3.90	9.60
50	4.20	7.80	3.70	6.30	2.80	4.50	1.70	4.60	0.60	3.70	3.90	3.20	4.00	10.10
55	4.20	7.30	3.70	5.90	3.00	5.00	1.70	4.90	0.60	4.00	3.90	3.20	4.10	9.40
60	4.20	6.90	3.80	5.40	3.00	5.30	1.80	5.30	0.70	3.80	4.10	3.10	4.20	9.60
65	4.40	7.00	3.80	6.10	3.00	5.20	1.80	5.20	0.70	3.90	4.20	3.50	4.30	10.20
70	4.40	7.20	4.00	6.10	3.20	5.40	1.80	4.60	0.80	3.60	4.20	3.20	4.40	10.20
75	4.40	7.60	4.00	5.80	3.20	5.30	2.00	5.00	0.80	4.20	4.30	3.00	4.40	11.50
80	4.60	7.00	4.20	5.60	3.40	5.60	2.00	4.70	0.80	4.00	4.40	3.40	4.50	10.20
90	4.70	7.10	4.30	5.80	3.40	5.50	2.20	4.60	0.90	4.30	4.60	3.30	4.60	10.10
100	4.90	7.60	4.40	5.30	3.60	5.40	2.20	4.90	0.90	3.60	4.70	3.50	4.80	10.60
110	5.00	7.00	4.50	5.70	3.80	4.90	2.30	4.80	0.90	4.20	4.80	3.20	4.90	10.40
120	5.30	7.30	4.60	5.90	3.80	5.00	2.40	5.00	1.00	3.80	5.00	3.40	5.20	10.10
130	5.40	7.40	4.80	6.20	3.90	5.60	2.60	5.20	1.00	3.80	5.20	3.00	5.30	11.60
140	5.40	7.60	4.90	6.00	4.00	5.30	2.70	4.80	1.00	3.50	5.30	3.40	5.40	9.80
150	5.40	7.20	5.00	6.20	4.00	5.20	2.80	5.00	1.00	3.40	5.40	3.20	5.40	9.60
160	5.50	7.00	4.90	5.90	4.00	5.40	2.80	4.70	0.90	4.40	5.30	3.20	5.40	10.00
170	5.40	7.40	4.90	5.80	4.00	5.50	2.70	4.90	1.00	4.20	5.30	3.30	5.40	9.60
180	5.40	7.10	4.90	6.00	4.00	5.40	2.80	5.00	1.00	3.80	5.40	3.40	5.40	10.40
avg.conc (brlx)	5.42	7.26	4.92	5.98	4.00	5.36	2.76	4.88	0.98	3.86	5.34	3.30	5.40	10.40
avg.conc(kg/m^3)	54.53	69.40	49.50	56.39	40.25	50.21	27.77	45.48	9.86	35.59	53.73	30.25	54.33	98.88

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	รวมคั้น	
ของแข็ง	86.85	83.4	1003.52
ของเหลว			1006.13

การทดสอบที่ 19 (RT=50 min 3.76 rpm draft=1.24 temp. =70 C)  
 starting time (take sample) 1.20 hr later  
 finish time 4:40 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.40	6.80	2.20	6.40	2.00	5.00	1.60	4.40	0.30	4.00	2.20	3.10	2.20	10.00
10	2.70	6.90	2.60	6.20	2.40	5.20	1.80	4.50	0.40	4.20	2.40	3.40	2.40	10.10
15	2.70	7.10	2.60	6.10	2.50	5.30	2.00	4.60	0.50	4.10	2.50	3.20	2.70	10.00
20	3.20	7.10	2.90	6.20	2.70	5.20	2.20	4.90	0.60	3.90	2.90	2.50	3.00	11.00
25	3.20	7.50	3.00	6.50	2.80	5.40	2.20	4.50	0.60	3.80	3.00	2.80	3.20	9.40
30	3.30	7.00	3.10	6.70	3.00	5.60	2.20	4.30	0.60	3.50	3.00	3.20	3.10	10.10
35	3.50	7.20	3.10	6.40	2.90	6.00	2.20	4.60	0.60	4.30	3.10	3.40	3.30	9.60
40	3.60	7.60	3.30	6.20	3.00	5.00	2.20	4.90	0.60	4.20	3.20	3.70	3.30	10.60
45	3.60	7.50	3.40	6.60	3.20	5.40	2.40	5.00	0.60	4.10	3.40	3.10	3.50	10.70
50	3.80	7.20	3.60	6.00	3.40	5.50	2.30	4.60	0.60	4.40	3.50	2.70	3.50	10.80
55	4.00	7.20	3.80	6.20	3.60	5.70	2.40	4.80	0.60	4.60	3.70	3.80	3.80	10.40
60	4.10	6.90	3.80	6.50	3.70	5.40	2.40	4.40	0.60	3.80	3.80	3.00	4.00	9.80
65	4.30	7.10	4.00	6.20	3.80	5.60	2.40	4.60	0.60	3.50	4.00	3.00	4.00	9.80
70	4.40	7.40	4.10	6.30	4.00	5.10	2.40	4.50	0.60	3.70	4.10	4.00	4.20	10.40
75	4.50	0.00	4.20	6.40	4.10	5.40	2.60	5.00	7.00	4.00	4.40	3.40	4.30	9.80
80	4.70	7.20	4.30	6.50	4.20	5.60	2.80	5.20	0.80	4.20	4.60	3.30	4.60	10.10
85	4.80	7.60	4.50	7.10	4.30	5.20	2.80	5.30	0.80	4.20	4.60	3.40	4.70	9.60
90	4.80	7.50	4.60	6.80	4.30	5.30	3.00	5.00	0.90	4.50	4.70	3.80	4.70	9.80
100	5.00	7.70	4.60	6.50	4.50	5.40	3.00	5.20	0.90	4.10	4.80	4.00	4.70	10.60
110	5.20	7.80	4.80	7.20	4.80	5.70	3.20	5.40	1.00	4.60	5.00	3.40	5.00	9.60
120	5.30	7.50	5.00	6.70	5.00	5.80	3.40	5.80	1.00	4.80	5.20	4.10	5.20	11.00
130	5.50	7.70	5.20	6.80	5.10	5.90	3.60	5.10	1.20	4.70	5.30	3.80	5.30	10.70
140	5.70	7.90	5.40	6.50	5.20	6.20	3.60	5.60	1.20	4.80	5.60	3.80	5.40	10.40
150	5.80	7.80	5.40	7.10	5.20	6.10	3.80	5.20	1.20	4.40	5.60	3.40	5.80	11.40
160	5.80	8.00	5.60	7.20	5.10	5.70	3.80	5.30	1.20	4.70	5.90	3.80	5.80	9.80
170	6.00	8.20	5.60	7.30	5.10	6.20	3.90	5.60	1.20	4.50	5.80	4.00	5.90	11.40
180	6.20	8.40	5.60	6.70	5.20	6.00	3.80	5.40	1.30	4.80	6.00	3.80	6.10	10.80
190	6.10	8.00	5.70	7.20	5.10	5.80	3.90	5.20	1.30	4.70	6.00	4.00	6.10	10.60
200	6.20	7.90	5.70	6.50	5.10	5.60	3.90	5.30	1.20	4.80	6.00	3.70	6.20	10.40
210	6.20	7.80	5.70	7.00	5.10	5.80	3.90	5.20	1.30	4.50	6.00	4.20	6.20	10.20
avg.conc (brix)	6.14	8.06	5.66	6.94	5.12	5.88	3.88	5.34	1.26	4.66	5.96	3.94	6.10	10.30
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	61.90	76.17	57.06	64.79	51.62	54.28	39.12	49.01	12.70	42.47	60.09	35.64	61.50	99.08

	ความชื้น		ความหนาแน่น
ของแข็ง	จุด 1-6	เริ่มต้น	
ของเหลว	80.23	84.2	1007.56
			1008.18

การทดลองที่ 20 (RT=70 min 2.89 rpm draft=1.10 temp.=70 C)  
 starting time (take sample) 1.40 hr later  
 finish time 5:30 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.60	6.20	2.50	5.60	2.20	5.20	1.40	4.30	0.30	4.00	2.40	3.30	2.60	6.80
10	2.90	6.80	2.60	6.00	2.40	5.40	1.50	4.50	0.30	4.20	2.50	3.40	2.70	6.80
15	3.00	6.90	2.80	6.00	2.60	5.00	1.70	4.70	0.40	4.10	2.80	3.20	2.90	6.90
20	3.20	7.20	2.80	6.00	2.60	5.00	1.80	4.60	0.40	4.30	3.00	3.60	3.10	10.00
25	3.20	7.20	3.00	6.50	2.80	5.00	1.70	4.70	0.40	4.60	3.00	3.50	3.20	8.90
30	3.50	6.30	3.20	6.00	2.60	5.40	1.80	4.80	0.40	4.10	3.10	3.70	3.30	10.00
35	3.70	6.00	3.40	6.40	3.00	5.00	1.80	5.00	0.50	4.50	3.20	3.80	3.50	8.90
40	3.80	7.10	3.50	6.40	3.00	5.30	1.80	4.20	0.50	4.90	3.40	3.90	3.50	9.20
45	3.80	7.00	3.60	6.00	3.20	6.00	1.80	5.10	0.50	3.60	3.60	3.50	3.70	10.40
50	4.10	8.00	3.70	6.70	3.40	6.00	1.80	4.90	0.50	4.40	3.80	3.70	4.00	9.00
55	4.10	7.00	3.80	6.50	3.50	5.90	1.90	5.00	0.50	4.20	3.80	4.00	4.00	10.00
60	4.10	7.40	3.90	6.40	3.50	5.40	1.80	5.00	0.60	4.00	4.00	3.50	4.10	11.40
65	4.20	7.10	4.00	6.00	3.50	5.50	2.00	5.10	0.60	4.10	4.00	3.10	4.20	10.60
70	4.40	7.20	4.10	6.10	3.50	5.80	2.00	4.90	0.60	3.80	4.20	3.20	4.40	9.40
75	4.50	7.00	4.20	6.50	3.80	5.70	2.00	4.60	0.60	4.00	4.30	3.40	4.50	9.20
80	4.60	7.40	4.20	6.20	3.80	5.60	2.20	5.20	0.80	4.00	4.40	3.30	4.50	10.40
90	4.60	7.30	4.30	6.70	3.80	5.90	2.20	4.90	0.80	3.90	4.40	3.40	4.50	9.50
100	4.80	7.60	4.50	6.80	4.00	5.40	2.40	4.70	1.00	4.20	4.50	3.60	4.60	9.60
110	4.80	7.90	4.60	6.50	4.00	5.70	2.40	4.60	1.00	4.20	4.60	3.00	4.70	10.10
120	4.80	8.00	4.60	6.70	4.30	5.30	2.60	4.50	1.20	4.90	4.70	3.00	4.90	10.60
130	5.10	7.40	4.90	7.00	4.60	6.00	2.60	4.90	1.20	4.70	4.90	3.20	5.10	9.90
140	5.60	7.00	5.30	6.80	4.80	5.40	2.60	4.70	1.40	4.60	5.20	3.60	5.30	11.00
150	6.00	7.20	5.40	6.80	4.80	5.60	3.00	4.80	1.40	4.20	5.60	3.70	5.60	12.00
160	6.00	7.40	5.50	7.00	4.80	5.70	3.20	5.20	1.50	4.60	5.70	3.50	5.90	11.00
170	6.20	7.60	5.70	7.10	5.00	5.60	3.40	5.00	1.50	4.50	5.90	3.60	6.20	11.20
180	6.40	7.80	5.90	7.50	5.10	5.70	3.60	5.40	1.50	4.90	6.00	3.90	6.40	11.00
190	6.50	7.10	6.20	7.00	5.10	5.90	3.80	5.30	1.60	4.70	6.30	3.70	6.60	10.20
200	6.60	7.60	6.30	7.00	5.10	6.00	4.00	5.10	1.60	4.50	6.50	3.80	6.70	10.20
210	6.70	7.40	6.40	7.00	5.00	5.90	4.00	4.90	1.60	4.70	6.60	3.90	6.80	10.90
220	6.80	7.60	6.30	6.70	5.10	5.60	4.00	5.00	1.60	4.50	6.70	3.80	6.80	10.10
230	6.70	7.40	6.40	6.80	5.10	5.70	4.00	5.20	1.60	4.60	6.70	4.10	6.80	9.60
240	6.60	7.80	6.30	7.00	5.10	5.70	4.00	5.40	1.80	4.40	6.70	3.60	6.80	10.20
250	6.80	7.70	6.40	7.10	5.10	5.80	4.00	5.50	1.60	4.60	6.70	3.70	6.80	10.10
avg.conc (brk)	6.76	7.58	6.36	6.92	5.08	5.74	4.00	5.20	1.60	4.56	6.68	3.86	6.80	10.05
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	68.17	71.14	64.13	64.48	51.23	52.82	40.34	47.58	16.13	41.44	67.36	34.62	68.57	95.73

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มคั้น	
ของแข็ง	86.00	83.15	1008.57
ของเหลว			1008.40

การทดสอบที่ 21 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.11 temp. =70 C)  
 starting time(take sample) 2.00 hr later  
 finish time 5:45 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	3.30	6.50	2.90	6.00	2.70	5.70	1.70	4.40	0.30	4.20	3.20	2.60	3.30	8.70
10	3.40	6.80	3.20	5.80	3.00	5.40	1.80	4.80	0.40	4.30	3.30	2.80	3.30	10.30
15	3.60	7.00	3.40	6.10	3.00	5.60	2.00	4.60	0.40	4.10	3.30	3.60	3.40	9.60
20	4.10	7.00	3.60	6.00	3.00	4.80	2.20	4.20	0.40	4.50	3.50	3.40	3.80	10.00
25	4.10	7.00	3.70	6.50	3.20	4.90	2.40	4.60	0.50	4.20	3.80	3.40	4.00	10.80
30	4.20	7.20	3.90	6.00	3.50	4.50	2.40	4.70	0.50	4.70	3.80	2.40	4.00	9.20
35	4.30	6.80	4.00	6.00	3.60	4.80	2.60	4.30	0.50	4.60	4.00	3.80	4.20	10.20
40	4.40	6.90	4.20	6.20	3.70	4.80	2.80	5.00	0.60	4.30	4.20	2.80	4.40	10.10
45	4.50	6.70	4.30	6.50	3.80	5.60	3.00	5.30	0.60	4.20	4.30	2.90	4.40	11.20
50	4.70	7.80	4.40	6.20	3.90	5.30	3.00	5.80	0.60	4.10	4.50	3.20	4.60	11.20
55	4.80	7.20	4.60	6.40	4.10	5.00	3.00	4.60	0.60	4.00	4.60	3.50	4.70	10.40
60	4.80	6.50	4.80	6.80	4.10	5.20	3.00	5.90	0.60	4.20	4.70	3.00	4.80	10.20
65	5.00	7.40	4.80	6.20	4.30	5.40	3.00	4.10	0.80	4.60	4.90	3.00	5.00	9.80
70	5.00	7.00	4.80	6.20	4.30	5.80	3.00	4.30	0.80	4.70	5.00	3.40	5.00	10.00
75	5.10	7.00	4.90	6.60	4.40	5.00	3.20	4.50	0.80	4.90	5.00	3.40	5.00	9.80
80	5.50	7.20	5.20	6.40	4.40	4.80	3.40	4.60	0.90	4.30	5.20	3.30	5.40	9.60
90	5.00	7.50	5.30	6.20	4.50	4.50	3.40	4.90	1.00	4.20	5.40	3.40	5.60	10.00
100	5.80	6.70	5.50	6.80	4.50	5.20	3.40	5.60	1.00	4.30	5.60	3.80	5.80	10.20
110	5.80	6.90	5.60	6.30	4.60	5.40	3.60	5.20	1.10	4.60	5.60	2.40	5.80	9.80
120	6.20	7.10	5.90	6.50	4.60	4.50	3.60	5.10	1.10	4.10	5.90	3.40	6.00	9.80
130	6.30	7.50	5.90	6.70	4.70	5.00	3.70	5.30	1.20	4.50	6.00	3.00	6.00	10.60
140	6.30	7.80	5.90	6.90	4.80	5.20	3.70	5.20	1.40	4.60	6.20	3.80	6.30	11.20
150	6.40	7.30	6.00	6.80	4.80	5.40	3.80	4.80	1.40	4.80	6.40	3.80	6.40	10.10
160	6.50	7.80	6.10	7.00	4.90	5.80	3.80	5.20	1.60	5.40	6.60	3.50	6.60	10.40
170	6.70	7.40	6.20	7.10	5.00	5.40	4.00	4.50	1.60	5.00	6.80	3.80	6.90	12.00
180	6.80	7.60	6.20	6.80	5.10	5.60	4.00	5.10	1.70	4.80	6.90	3.90	7.00	10.40
190	6.90	7.10	6.20	6.50	5.00	6.20	4.10	4.80	1.80	4.70	7.10	4.20	7.20	10.20
200	7.00	7.60	6.20	6.90	5.00	5.80	4.20	5.20	1.80	4.40	7.10	3.70	7.20	11.50
210	7.00	7.40	6.10	6.70	5.10	5.90	4.20	5.10	1.80	4.50	7.20	3.90	7.30	9.60
220	7.00	7.50	6.20	6.80	5.00	5.40	4.20	5.00	1.80	4.40	7.10	3.60	7.20	10.20
230	7.00	7.60	6.20	6.50	5.10	5.60	4.20	4.80	1.80	4.60	7.10	3.90	7.20	9.60
240	7.00	7.30	6.20	7.00	5.10	5.40	4.20	5.20	1.80	4.70	7.10	3.80	7.30	10.40
avg.conc (brix)	7.00	7.48	6.18	6.78	5.06	5.62	4.20	5.06	1.80	4.52	7.12	3.78	7.24	10.22
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	70.69	70.77	62.41	63.10	51.10	51.67	42.41	46.24	18.18	41.07	71.90	34.09	73.11	96.99

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มคั้น	
ของแข็ง	85.18	83.40	1006.78
ของเหลว			1009.80

การทดสอบที่ 22 (RT=50 min 3.76 rpm draft=1.62 temp.=70 C)  
 starting time (take sample) 1.25 hr later  
 finish time 4:50 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.40	6.20	2.20	5.90	1.90	5.00	1.20	4.50	0.20	3.60	2.30	3.50	2.40	10.80
10	2.60	6.40	2.40	6.00	2.00	5.10	1.40	4.40	0.20	3.80	2.40	3.20	2.60	10.20
15	2.90	6.50	2.60	6.00	2.20	4.80	1.60	4.20	0.20	3.80	2.60	3.30	2.80	9.90
20	3.00	6.30	2.70	6.20	2.40	4.90	1.80	4.00	0.40	3.00	2.80	3.40	3.00	10.20
25	3.00	6.70	2.70	6.30	2.60	4.60	1.80	4.30	0.40	3.70	2.80	3.10	3.00	10.80
30	3.30	6.50	3.00	6.10	2.70	4.70	1.80	4.60	0.40	3.90	3.10	3.00	3.20	10.80
35	3.50	6.00	3.10	5.90	2.80	4.90	1.80	4.20	0.40	3.80	3.20	2.80	3.50	9.60
40	3.60	6.50	3.30	6.30	3.00	5.00	1.80	4.00	0.40	3.60	3.40	2.70	3.50	11.80
45	3.70	6.70	3.40	6.20	3.00	5.00	1.80	5.00	0.40	3.50	3.40	3.00	3.60	12.00
50	3.90	6.30	3.50	6.40	3.20	5.20	2.00	5.20	0.40	3.80	3.60	3.50	3.80	10.40
55	3.90	7.00	3.50	6.50	3.20	5.30	2.00	4.90	0.50	3.90	3.60	3.10	3.80	11.40
60	4.00	7.00	3.60	6.10	3.30	5.40	2.20	4.80	0.50	4.50	3.80	2.80	3.80	10.20
65	4.10	7.50	3.80	6.00	3.40	5.00	2.20	4.10	0.50	4.50	3.90	2.90	4.10	11.10
70	4.20	7.30	4.00	7.00	3.60	5.60	2.40	5.00	0.60	4.60	4.00	3.50	4.10	11.50
75	4.30	6.90	4.00	6.40	3.70	5.80	2.40	4.90	0.60	3.50	4.20	3.40	4.20	8.70
80	4.50	6.80	4.30	6.10	3.70	4.90	2.60	4.20	0.60	3.70	4.40	3.20	4.40	10.20
90	4.80	7.50	4.40	6.80	4.00	5.00	2.60	4.60	0.70	3.90	4.60	3.10	4.60	10.80
100	4.80	7.40	4.50	6.60	4.00	5.20	2.80	4.60	0.80	3.50	4.60	3.60	4.80	10.80
110	5.00	7.60	4.80	6.30	4.30	5.40	2.80	4.70	0.70	4.20	4.80	3.70	5.00	12.00
120	5.20	7.80	5.00	6.40	4.40	5.60	2.80	4.80	0.80	4.60	5.10	3.20	5.20	11.00
130	5.20	8.00	5.00	7.00	4.60	5.90	3.00	4.90	0.90	4.20	5.20	3.40	5.30	10.40
140	5.20	7.30	5.10	6.50	4.90	5.80	3.00	4.60	0.90	4.00	5.30	3.60	5.30	10.20
150	5.40	7.60	5.20	6.60	4.60	5.40	3.00	4.80	1.00	4.80	5.50	3.80	5.50	9.60
160	5.60	7.50	5.40	6.80	4.80	5.60	3.00	4.70	1.00	3.90	5.60	3.40	5.60	12.40
170	5.80	7.60	5.30	6.40	4.80	5.80	3.20	5.00	1.00	4.50	5.70	3.70	5.70	11.40
180	5.80	7.80	5.50	6.60	4.80	5.90	3.20	4.80	1.00	4.00	5.80	3.80	5.80	12.20
190	5.80	7.80	5.40	6.70	4.80	5.80	3.10	5.10	1.00	3.80	5.80	3.60	5.80	10.20
200	5.90	7.90	5.50	6.50	4.80	5.70	3.10	4.90	1.00	4.20	5.80	3.80	5.80	12.40
210	5.90	7.70	5.50	6.60	4.80	5.80	3.10	5.00	1.00	4.00	5.80	4.00	5.90	10.20
avg.conc (brix)	5.84	7.76	5.44	6.56	4.80	5.80	3.14	4.96	1.00	4.10	5.78	3.78	5.80	10.80
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	58.81	73.27	54.78	61.14	48.33	53.62	31.62	45.45	10.07	37.23	58.20	34.21	58.40	104.28

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
ของแห้ง	86.42	83.23	1007.78
ของเหลว			1006.95



การทดลองที่ 23 (RT=70 min 2.69 rpm draft=1.52 temp. =70 C)  
 starting time (take sample) 1.40 hr later  
 finish time 5:10 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	llq(y1)	sol(x1)	llq(y2)	sol(x2)	llq(y3)	sol(x3)	llq(y4)	sol(x4)	llq(y5)	sol(x5)	llq(y6)	sol(x6)	llq(y7)	sol(x7)
5	3.40	6.50	3.20	5.80	2.80	4.60	1.40	4.70	0.30	3.50	3.00	2.20	3.00	9.00
10	3.50	6.60	3.30	5.90	2.80	4.80	1.40	4.60	0.30	3.60	3.20	2.60	3.40	10.80
15	3.70	6.50	3.40	5.70	3.00	5.00	1.60	4.50	0.40	3.40	3.30	2.60	3.40	9.60
20	4.00	6.80	3.50	5.60	3.20	5.00	1.60	4.30	0.40	3.80	3.50	2.80	3.80	9.80
25	4.00	6.80	3.50	6.00	3.20	5.00	1.50	4.60	0.50	3.90	3.60	3.00	4.00	9.60
30	4.20	6.90	3.70	6.00	3.30	5.30	1.70	4.80	0.50	3.50	3.80	3.20	4.00	9.80
35	4.30	6.90	3.90	6.20	3.40	5.40	1.70	4.90	0.60	3.60	4.00	3.30	4.10	11.00
40	4.40	7.00	4.00	6.50	3.40	5.00	1.80	4.80	0.60	3.20	4.00	3.50	4.20	10.80
45	4.60	7.00	4.00	6.30	3.50	5.10	1.80	4.60	0.60	3.00	4.00	3.40	4.20	10.60
50	4.70	7.60	4.20	6.10	3.50	5.60	1.80	4.70	0.60	3.20	4.00	2.80	4.20	10.70
55	4.80	7.10	4.20	6.00	3.60	5.20	2.00	4.30	0.70	3.50	4.20	3.00	4.50	11.00
60	4.80	7.20	4.30	6.40	3.80	5.10	2.00	4.50	0.70	3.40	4.30	3.50	4.50	11.80
65	5.00	7.50	4.40	6.20	3.80	5.30	2.10	4.70	0.70	3.60	4.50	3.40	4.80	10.40
70	5.00	7.20	4.60	6.10	3.90	5.40	2.30	5.00	0.80	3.70	4.50	3.60	4.80	11.30
75	5.10	8.40	4.60	6.00	4.00	5.20	2.30	4.60	0.80	3.80	4.60	3.50	4.80	10.20
80	5.20	7.60	4.80	6.90	4.00	5.70	2.40	4.20	0.80	4.00	4.80	4.00	5.00	12.20
90	5.20	7.30	4.90	5.90	4.20	5.30	2.60	4.30	0.90	4.20	4.90	3.90	5.10	11.20
100	5.40	7.10	5.00	6.00	4.30	5.70	2.60	4.80	0.90	3.90	5.00	3.30	5.10	10.80
110	5.40	8.00	5.00	6.30	4.30	5.60	2.70	4.60	1.00	3.50	5.10	3.50	5.20	10.70
120	5.60	7.30	5.10	6.40	4.50	5.40	2.70	4.80	1.00	3.70	5.20	3.40	5.30	9.80
130	5.60	7.60	5.10	6.50	4.60	5.80	2.80	4.60	1.10	3.80	5.30	3.80	5.50	12.20
140	5.80	7.00	5.20	6.00	4.70	5.60	2.80	4.20	1.10	3.80	5.50	3.60	5.80	9.60
150	5.90	7.20	5.40	6.20	4.80	5.70	2.90	4.70	1.30	4.00	5.60	3.50	5.80	9.80
160	6.00	7.10	5.40	6.40	4.80	6.00	2.90	5.20	1.30	3.50	5.80	3.70	6.00	11.90
170	6.10	7.20	5.50	6.30	4.90	5.60	3.00	4.90	1.40	3.80	6.00	3.50	6.20	14.00
180	6.00	7.80	5.50	6.50	4.90	5.90	3.00	4.70	1.50	4.00	6.00	3.90	6.10	12.00
190	6.10	7.00	5.40	6.60	4.80	5.70	3.00	4.80	1.50	4.30	5.90	3.40	6.20	10.20
200	6.10	7.10	5.50	6.40	4.90	5.60	3.00	5.00	1.40	3.80	6.00	3.80	6.10	10.10
210	6.10	7.30	5.50	6.20	4.90	5.60	3.00	4.80	1.40	4.00	6.00	3.60	6.20	10.20
avg.conc (brlx)	6.08	7.24	5.48	6.40	4.88	5.68	3.00	4.84	1.44	3.98	5.98	3.64	6.16	10.73
avg.conc(kg/m^3)	61.30	68.00	55.25	59.57	49.21	52.47	30.25	44.31	14.52	36.11	60.30	32.91	62.11	103.67

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
ของแข็ง	85.9	83.78	1014.29
ของเหลว			1008.30

การทดสอบที่ 24 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.52 temp. =70 C)  
 starting time (take sample) 2.00 hr later  
 finish time 5:20 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	3.30	6.20	3.00	5.70	2.70	5.00	1.40	4.20	0.40	3.00	3.20	2.40	3.20	10.80
10	3.40	6.30	3.10	5.40	2.80	5.10	1.60	4.40	0.40	3.50	3.20	2.60	3.40	11.60
15	3.80	6.50	3.30	5.80	3.00	5.30	1.60	4.30	0.50	3.60	3.40	2.70	3.60	10.40
20	3.80	6.90	3.50	5.90	3.00	5.00	1.60	4.50	0.50	3.00	3.50	2.80	3.60	11.50
25	3.80	6.40	3.50	6.00	3.00	5.40	1.60	4.60	0.50	3.20	3.50	3.50	3.70	10.10
30	4.00	6.00	3.80	5.70	3.20	5.60	1.60	4.70	0.60	3.80	3.60	2.90	3.70	9.00
35	4.10	6.80	3.80	5.30	3.20	5.00	1.80	4.60	0.60	4.00	3.80	3.00	3.90	9.80
40	4.20	6.90	3.80	5.40	3.30	5.10	1.80	4.90	0.60	3.90	3.80	3.40	4.10	12.50
45	4.20	6.30	4.00	5.90	3.50	5.30	1.80	4.80	0.60	4.00	4.00	3.60	4.20	11.00
50	4.40	6.70	4.10	6.00	3.60	5.20	2.00	5.00	0.60	4.20	4.20	3.20	4.20	10.80
55	4.60	6.50	4.20	6.20	3.80	5.40	2.00	5.30	0.70	3.50	4.40	3.00	4.40	10.00
60	4.60	7.00	4.20	5.90	3.80	6.00	2.00	5.70	0.70	3.60	4.40	3.00	4.60	9.80
65	4.60	7.30	4.30	6.30	3.90	4.90	2.20	4.80	0.70	3.10	4.50	3.00	4.60	10.00
70	4.80	7.00	4.40	6.50	4.00	4.80	2.40	4.20	0.80	3.70	4.60	3.40	4.70	12.40
75	4.80	6.90	4.40	5.80	4.10	6.00	2.40	4.30	0.80	3.60	4.60	3.20	4.80	10.40
80	4.90	7.30	4.60	5.70	4.10	5.10	2.60	4.60	0.80	3.90	4.80	3.70	4.80	9.60
90	5.00	7.10	4.70	6.00	4.20	5.20	2.70	4.50	0.90	3.60	4.90	3.50	5.00	12.40
100	5.20	7.00	4.80	6.10	4.20	5.20	2.80	4.80	0.90	4.00	5.00	3.40	5.20	10.00
110	5.40	6.50	5.00	6.30	4.30	5.40	2.80	4.60	1.00	4.10	5.20	3.80	5.40	9.60
120	5.50	8.20	5.00	6.50	4.30	5.80	2.90	4.80	1.20	4.30	5.40	3.90	5.60	9.80
130	5.60	7.40	5.00	6.20	4.40	5.00	3.00	4.50	1.20	4.00	5.60	3.60	5.80	11.50
140	5.80	7.00	5.10	6.00	4.50	5.30	3.00	4.80	1.30	3.80	5.80	3.70	6.00	9.80
150	6.00	7.20	5.30	6.20	4.70	5.20	3.20	4.50	1.40	3.80	6.00	3.40	6.20	11.60
160	6.20	7.00	5.50	6.40	4.80	5.40	3.30	4.70	1.40	3.90	6.20	3.60	6.40	9.80
170	6.40	7.40	5.70	6.50	4.80	5.50	3.40	4.90	1.60	4.20	6.40	3.80	6.50	8.80
180	6.40	7.00	5.80	6.30	4.90	5.60	3.40	4.90	1.60	4.20	6.30	3.60	6.50	10.00
190	6.50	7.20	5.70	6.20	4.80	5.40	3.40	5.00	1.60	3.60	6.40	3.40	6.60	10.10
200	6.40	7.10	5.80	6.60	4.90	5.50	3.40	4.40	1.60	4.00	6.40	3.50	6.50	10.80
210	6.50	6.90	5.80	6.00	4.80	6.00	3.40	4.60	1.60	3.70	6.40	3.80	6.50	12.50
220	6.50	7.00	5.80	6.40	4.90	5.40	3.40	4.80	1.60	4.00	6.40	3.70	6.50	11.20
avg.conc (brix)	6.46	7.04	5.78	6.30	4.86	5.58	3.40	4.74	1.60	3.90	6.38	3.60	6.52	10.59
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	65.07	66.95	58.22	59.44	48.95	52.24	34.25	43.99	16.12	35.88	64.27	33.01	65.68	100.50

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
ของแข็ง	86.89	83.1	1017.43
ของเหลว			1007.30

การทดลองที่ 25 (RT=50 min 3.76 rpm draft=2.10 temp. =70 C)  
 starting time (take sample) 1.20 hr later  
 finish time 4:30 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	2.00	6.50	1.90	5.50	1.70	4.80	1.20	4.50	0.20	2.60	2.00	2.60	2.00	11.50
10	2.30	6.40	2.00	5.80	1.80	5.00	1.20	4.60	0.20	3.20	2.20	3.00	2.20	11.00
15	2.30	6.30	2.20	5.60	1.90	5.10	1.40	4.80	0.20	4.00	2.20	3.00	2.20	9.60
20	2.40	6.50	2.20	5.70	2.00	4.70	1.50	4.70	0.20	3.50	2.20	3.20	2.40	10.20
25	2.50	7.00	2.20	5.90	2.00	5.00	1.50	4.30	0.20	3.60	2.40	3.30	2.40	10.00
30	2.80	6.30	2.50	5.00	2.20	5.10	1.50	4.60	0.20	3.80	2.60	3.00	2.70	10.50
35	2.80	7.00	2.50	5.30	2.20	5.00	1.70	4.90	0.20	3.90	2.60	3.40	2.80	9.70
40	2.80	6.50	2.60	5.60	2.20	5.20	1.70	4.70	0.20	4.00	2.60	3.20	2.80	10.00
45	2.90	6.80	2.70	5.90	2.40	5.00	1.70	4.80	0.40	4.10	2.60	3.00	2.80	9.60
50	3.00	6.70	2.70	6.20	2.40	5.40	1.80	4.50	0.40	3.50	2.70	3.20	2.90	12.50
55	3.20	7.30	2.90	6.30	2.60	5.60	1.80	4.30	0.40	3.60	2.90	3.00	3.00	9.40
60	3.20	6.60	2.90	5.90	2.60	5.20	2.00	4.60	0.40	4.20	2.90	3.20	3.10	10.20
65	3.30	6.90	3.00	6.40	2.70	5.50	2.00	4.90	0.60	3.60	3.00	3.50	3.20	9.60
70	3.40	7.20	3.10	6.20	2.70	5.20	2.00	5.00	0.60	3.80	3.00	3.40	3.30	10.20
75	3.40	6.70	3.20	5.90	2.80	5.60	2.00	5.10	0.60	3.90	3.20	4.00	3.30	11.40
80	3.60	7.00	3.40	5.80	2.90	5.40	2.20	4.60	0.70	4.00	3.40	3.60	3.50	11.50
90	3.70	7.20	3.40	5.70	2.90	5.30	2.20	4.90	0.70	4.20	3.40	3.50	3.60	9.60
100	3.90	7.00	3.50	6.50	3.00	5.20	2.40	4.80	0.80	3.90	3.70	3.70	3.80	10.20
110	4.00	7.30	3.60	6.00	3.20	5.70	2.60	4.60	0.80	3.90	3.70	3.20	3.90	10.40
120	4.20	7.10	3.70	6.20	3.30	5.20	2.70	4.80	0.70	4.20	4.00	3.00	4.10	10.70
130	4.20	7.20	3.80	5.90	3.40	5.60	2.70	4.50	0.80	3.80	4.00	3.50	4.20	9.80
140	4.40	7.50	3.90	6.00	3.50	5.70	2.80	4.90	0.90	4.00	4.20	3.40	4.30	10.20
150	4.40	7.20	3.90	5.90	3.60	5.60	2.80	4.80	0.90	4.00	4.30	3.10	4.40	9.80
160	4.50	7.30	4.00	5.80	3.50	5.30	2.80	4.90	0.80	4.00	4.40	3.50	4.40	10.20
170	4.50	7.00	4.00	5.90	3.50	5.40	2.80	4.70	0.90	4.00	4.40	3.20	4.50	10.10
180	4.50	7.60	4.00	6.20	3.50	5.60	2.80	4.90	0.90	3.90	4.40	3.00	4.50	9.60
190	4.50	6.80	4.00	6.00	3.50	5.50	2.80	5.00	0.90	3.80	4.50	3.40	4.50	12.20
avg.conc (brtx)	4.48	7.18	3.98	5.96	3.52	5.48	2.80	4.86	0.88	3.94	4.40	3.24	4.46	10.96
avg.conc(kg/m³)	45.18	68.25	40.13	55.92	35.50	51.15	28.24	45.07	8.87	36.19	44.37	29.54	44.97	98.58

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	เริ่มต้น	
ของแข็ง	86.9	83.21	1015.28
ของเหลว			1008.40

การทดสอบที่ 26 (RT=70 min 2.69 rpm draft=1.75 temp. =70 C)  
 starting time (take sample) 1.45 hr later  
 finish time 4:30 hr

Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	llq(y1)	sol(x1)	llq(y2)	sol(x2)	llq(y3)	sol(x3)	llq(y4)	sol(x4)	llq(y5)	sol(x5)	llq(y6)	sol(x6)	llq(y7)	sol(x7)
5	3.00	6.20	2.80	5.00	2.00	4.50	1.20	4.00	0.20	3.40	2.80	2.20	3.00	10.80
10	3.10	6.30	2.80	5.30	2.20	4.80	1.40	4.20	0.30	3.60	3.10	2.00	3.10	11.60
15	3.20	6.50	3.00	5.60	2.40	5.00	1.40	4.50	0.40	3.80	3.10	2.60	3.10	10.00
20	3.30	6.40	3.00	5.90	2.50	5.00	1.40	4.30	0.40	4.00	3.10	2.30	3.20	10.40
25	3.40	6.30	3.00	5.70	2.70	4.90	1.60	4.60	0.40	4.10	3.30	2.80	3.40	9.60
30	3.60	6.00	3.10	5.00	2.80	4.80	1.60	4.00	0.40	3.90	3.30	2.90	3.50	9.80
35	3.60	6.50	3.30	5.60	2.90	5.40	1.70	4.90	0.50	3.80	3.50	3.00	3.60	10.00
40	4.00	7.00	3.40	5.20	2.90	5.00	1.80	4.20	0.50	4.20	3.60	3.50	3.80	10.40
45	4.00	6.80	3.40	5.40	3.00	5.20	1.80	4.50	0.60	4.00	3.60	3.10	3.80	9.00
50	4.00	6.30	3.60	6.00	3.20	5.30	1.80	4.10	0.60	4.00	3.60	3.20	4.00	10.60
55	4.10	6.00	3.70	5.30	3.20	5.10	1.80	4.60	0.60	3.80	3.80	3.40	4.00	9.40
60	4.20	6.40	3.70	5.60	3.20	5.60	1.80	4.80	0.60	3.50	3.80	3.00	4.00	10.10
65	4.20	6.90	3.90	5.40	3.30	5.00	2.00	4.70	0.60	3.70	4.00	3.10	4.20	11.00
70	4.30	6.80	4.00	5.70	3.50	4.90	2.00	4.60	0.70	3.90	4.00	3.20	4.20	8.60
75	4.50	7.00	4.00	5.90	3.50	5.30	2.00	4.90	0.70	4.30	4.10	2.60	4.30	9.40
80	4.50	7.20	4.00	5.80	3.60	5.60	2.20	4.50	0.70	4.60	4.30	2.90	4.40	10.60
90	4.60	7.50	4.30	5.90	3.70	5.20	2.20	4.70	0.80	3.80	4.30	3.00	4.50	9.60
100	4.80	6.90	4.60	6.00	4.00	5.00	2.40	4.60	0.80	4.00	4.60	3.10	4.80	11.20
110	5.00	6.80	4.70	5.80	4.20	5.40	2.60	4.90	0.90	3.70	4.60	3.20	4.80	10.60
120	5.20	7.00	4.80	5.00	4.30	5.10	2.70	4.80	1.00	4.00	4.80	3.40	5.00	10.00
130	5.40	7.10	5.00	5.90	4.50	5.20	2.80	4.70	0.90	3.70	5.00	3.60	5.30	10.20
140	5.50	6.90	5.10	6.00	4.60	5.00	3.00	4.70	0.90	4.10	5.30	3.00	5.30	9.20
150	5.40	7.00	5.00	5.70	4.60	5.60	3.00	4.50	1.00	4.20	5.30	3.10	5.40	9.00
160	5.50	6.80	5.00	5.80	4.60	5.20	3.00	4.90	1.00	3.60	5.30	3.20	5.40	9.60
170	5.50	7.00	5.10	6.00	4.60	5.60	3.00	4.80	1.00	3.50	5.30	3.10	5.40	10.20

avg.conc (brix)	5.46	6.96	5.04	5.88	4.58	5.32	2.96	4.72	0.96	3.82	5.24	3.20	5.36	10.04
avg.conc(kg/m <sup>3</sup> )	54.89	64.12	50.67	53.55	46.04	48.16	29.76	42.46	9.65	34.04	52.68	28.34	53.89	96.26

	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	วิธีคั้น	
ของแข็ง	86	83.7	996.68
ของเหลว			1005.32

การวัดของที่ 27 (RT=90 min 2.09 rpm draft=1.51 temp. =70 C)  
 starting time (take sample) 2.05 hr later  
 finish time 5:00 hr

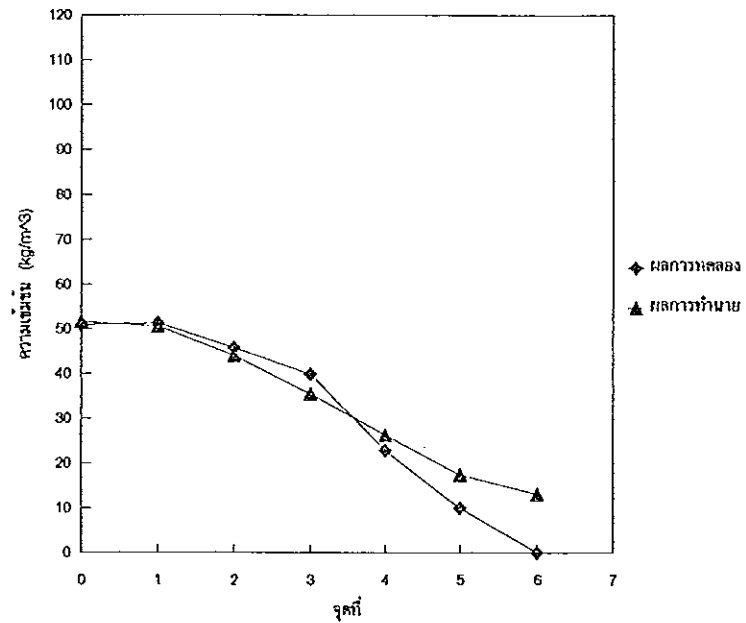
Time(min)	point 1		point 2		point 3		point 4		point 5		point 6		point 7	
	liq(y1)	sol(x1)	liq(y2)	sol(x2)	liq(y3)	sol(x3)	liq(y4)	sol(x4)	liq(y5)	sol(x5)	liq(y6)	sol(x6)	liq(y7)	sol(x7)
5	4.00	6.20	3.50	5.40	3.10	4.50	1.80	4.30	0.30	3.20	4.00	2.60	4.00	9.60
10	4.00	6.20	3.60	5.60	3.10	4.80	1.80	4.20	0.40	3.60	4.00	2.50	4.00	8.70
15	4.20	6.30	3.80	5.30	3.20	4.60	1.80	4.30	0.40	3.40	4.00	2.60	4.00	10.00
20	4.50	6.50	4.00	5.80	3.30	4.30	2.00	4.50	0.40	3.50	4.10	2.90	4.30	10.20
25	4.50	6.40	4.00	5.90	3.40	4.70	2.00	4.60	0.40	3.90	4.20	2.80	4.30	10.60
30	4.60	6.60	4.00	5.20	3.50	5.00	2.00	5.00	0.40	3.80	4.30	2.30	4.30	9.60
35	4.80	6.50	4.20	6.00	3.60	5.30	2.00	4.10	0.50	3.60	4.30	2.50	4.30	8.40
40	5.00	6.30	4.20	5.70	3.60	4.90	2.10	4.00	0.50	3.50	4.40	2.70	4.50	8.00
45	5.00	6.80	4.20	5.30	3.60	4.80	2.10	4.80	0.50	3.40	4.40	3.00	4.50	10.60
50	5.20	7.00	4.40	5.60	3.70	5.20	2.10	4.30	0.50	4.00	4.60	3.10	4.70	11.70
55	5.20	7.00	4.00	5.38	3.80	5.60	2.20	4.60	0.60	4.30	4.80	3.20	4.90	9.60
60	5.40	7.30	4.70	5.90	4.00	5.00	2.20	4.20	0.70	3.80	5.00	2.90	5.10	10.20
65	5.40	6.80	4.80	6.30	4.00	5.20	2.40	4.50	0.70	3.50	5.10	3.50	5.30	11.20
70	5.50	6.80	4.80	6.40	4.00	5.10	2.40	4.60	0.80	4.00	5.20	3.00	5.40	10.20
75	5.60	6.60	5.00	5.90	4.20	5.30	2.40	4.00	0.80	3.60	5.30	3.10	5.50	9.80
80	5.80	7.60	5.00	5.80	4.40	5.40	2.50	4.20	1.00	4.30	5.40	3.00	5.50	10.20
90	5.80	7.00	5.10	5.70	4.40	5.20	2.60	4.30	1.00	3.70	5.40	3.20	5.70	10.60
100	6.00	6.90	5.20	5.60	4.40	4.90	2.80	4.70	1.10	3.90	5.60	3.00	5.90	10.70
110	6.00	6.70	5.20	5.40	4.50	5.10	2.80	4.60	1.20	3.80	6.00	3.20	6.00	9.60
120	6.20	7.00	5.30	5.90	4.50	5.70	3.00	4.80	1.20	4.00	6.10	3.50	6.20	10.90
130	6.20	6.80	5.30	6.20	4.60	5.00	3.10	4.50	1.20	3.80	6.20	3.00	6.20	11.70
140	6.30	6.50	5.30	5.80	4.70	5.00	3.20	4.40	1.30	3.50	6.20	3.10	6.30	12.00
150	6.20	6.90	5.40	5.70	4.70	5.20	3.20	4.80	1.30	4.00	6.20	3.00	6.40	11.70
160	6.30	7.10	5.30	6.00	4.70	5.60	3.20	4.70	1.30	4.20	6.10	3.40	6.40	9.80
170	6.30	7.00	5.40	6.10	4.60	5.20	3.20	4.80	1.30	3.70	6.20	3.10	6.30	11.20
180	6.30	7.00	5.40	5.60	4.70	5.30	3.20	4.50	1.30	3.40	6.20	3.10	6.40	10.40
avg conc (brix)	6.28	6.60	5.36	5.84	4.68	5.26	3.20	4.64	1.30	3.76	6.18	3.14	6.36	10.28
avg conc(kg/m <sup>3</sup> )	63.21	65.53	53.95	54.84	47.11	49.09	32.21	43.02	13.09	34.54	62.21	28.66	64.02	98.37

ของแข็ง ของเหลว	ความชื้น		ความหนาแน่น
	จุด 1-6	ทั้งหมด	
	87.05	87.05	1015.70
			1006.59

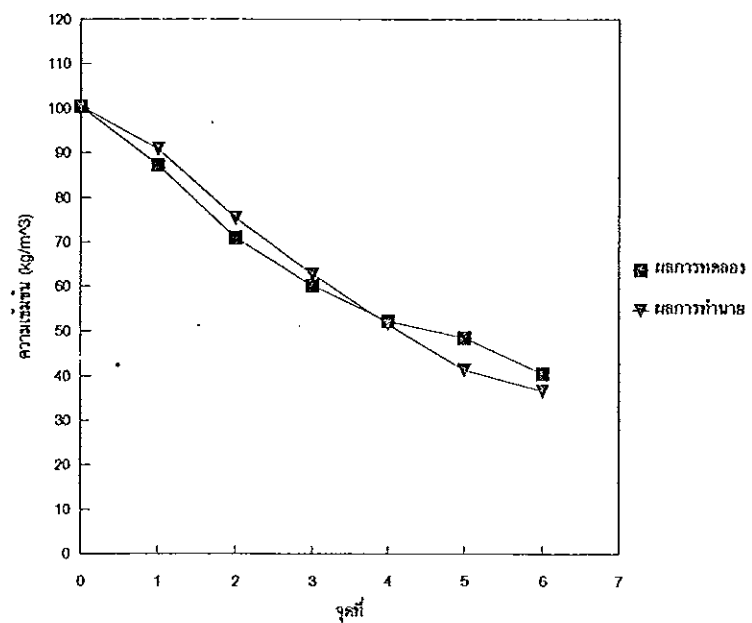
ภาคผนวก ฉ.2 ข้อมูลการติดตามผลการทดลองกับแบบจำลอง Diffusion - Backmixing

การทดลองที่ 1

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	50.89	51.30	45.66	39.83	22.93	10.06	0.00
liq conc. (pred)	51.63	50.50	44.05	35.38	26.26	17.39	13.13
sol conc. (exp)	100.29	87.29	71.04	60.18	52.34	48.56	40.53
sol conc. (pred)	100.29	90.87	75.52	62.79	51.59	41.42	36.65



(ก) เฟสของเหลว

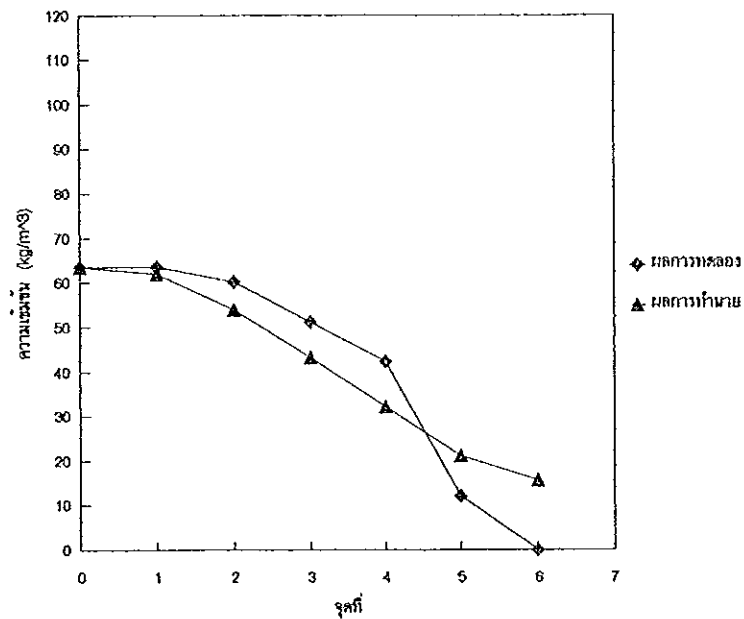


(ข) เฟสของแข็ง

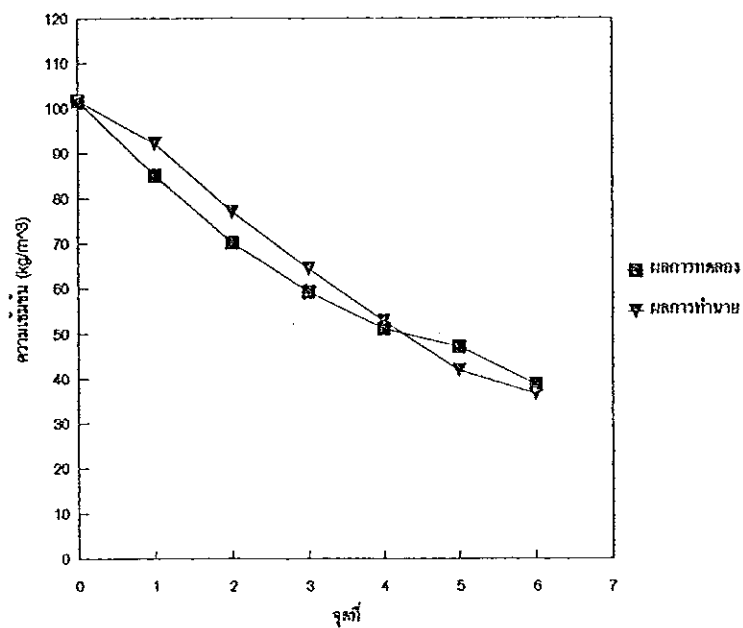
ภาพประกอบ ๑.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 2

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	63.46	63.46	60.22	51.13	42.44	12.13	0.00
liq conc. (pred)	63.44	61.98	53.94	43.31	32.14	21.11	15.72
sol conc. (exp)	101.67	85.02	70.18	59.19	51.01	47.08	38.73
sol conc. (pred)	101.67	92.18	77.03	64.32	52.74	41.84	36.60



(ก) เฟสของเหลว



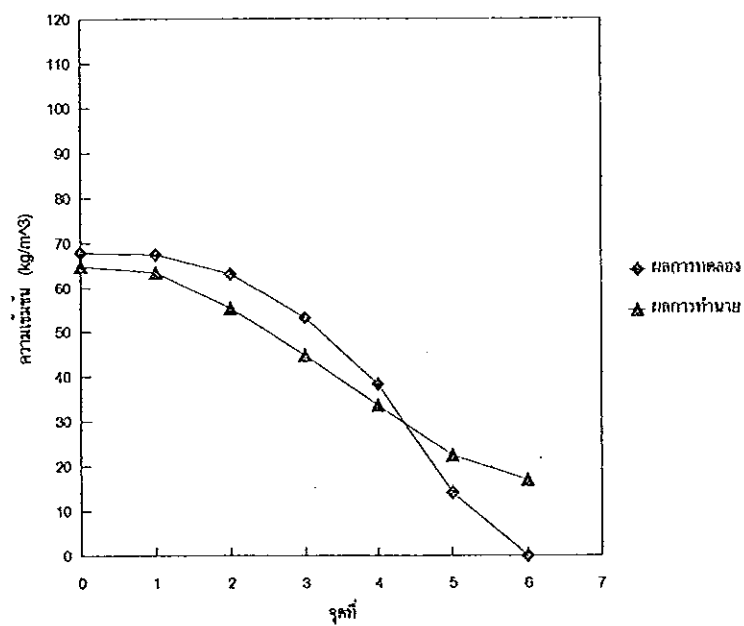
(ข) เฟสของแข็ง

ภาพประกอบ ๑.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 2

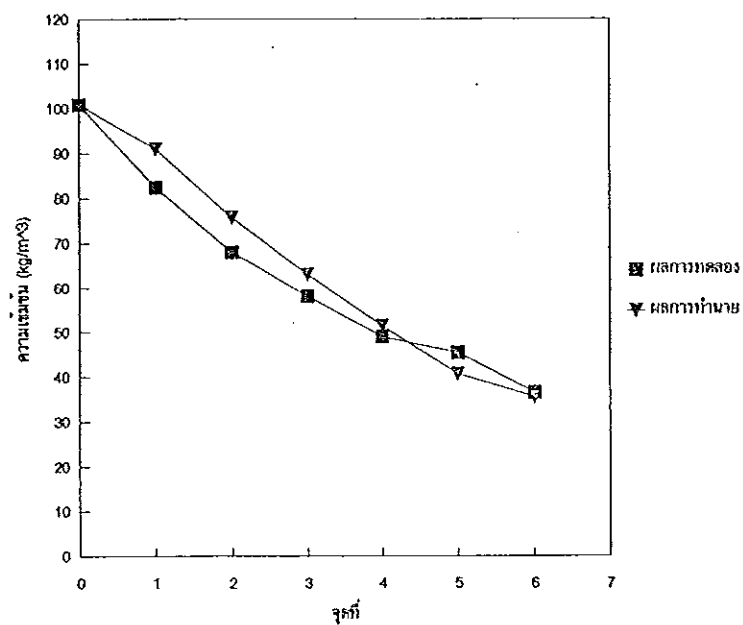


## การทดลองที่ 3

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	67.78	67.38	63.14	53.26	38.33	14.12	0.00
liq conc. (pred)	64.77	63.33	55.33	44.74	33.57	22.50	17.08
sol conc. (exp)	100.86	82.35	67.99	58.04	49.09	45.56	36.65
sol conc. (pred)	100.86	90.98	75.60	62.95	51.50	40.72	35.53



(ก) เฟสของเหลว

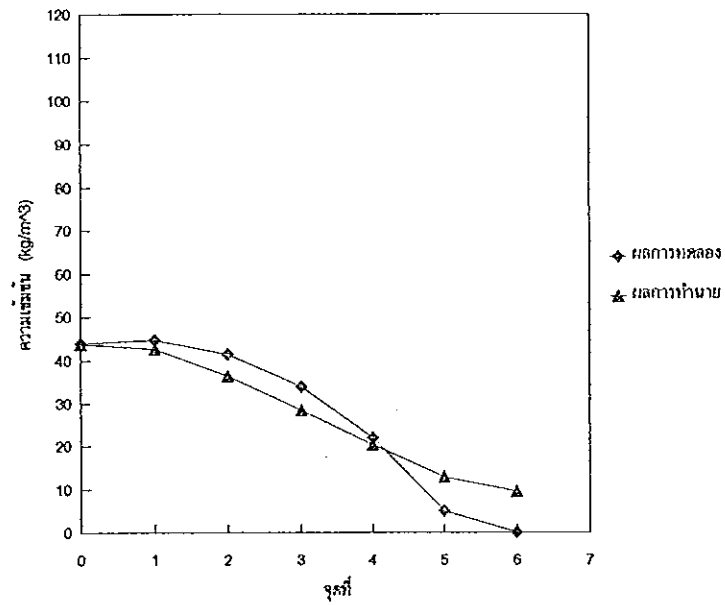


(ข) เฟสของแข็ง

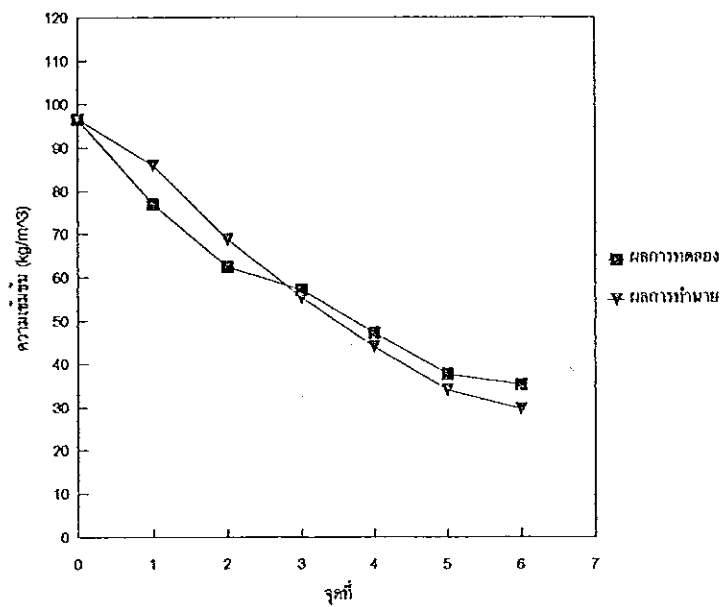
ภาพประกอบ ๑.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 4

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	43.88	44.68	41.46	33.82	21.94	5.03	0.00
liq conc. (pred)	43.76	42.63	38.40	28.40	20.40	12.98	9.54
sol conc. (exp)	96.61	76.79	62.40	57.04	47.08	37.71	35.07
sol conc. (pred)	96.61	85.84	68.76	55.21	43.83	34.00	29.56



(ก) เฟสของเหลว

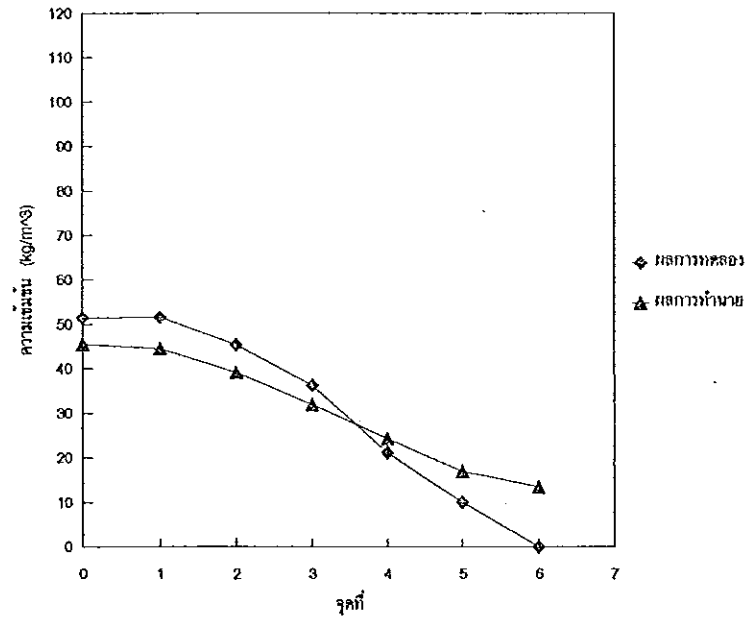


(ข) เฟสของแข็ง

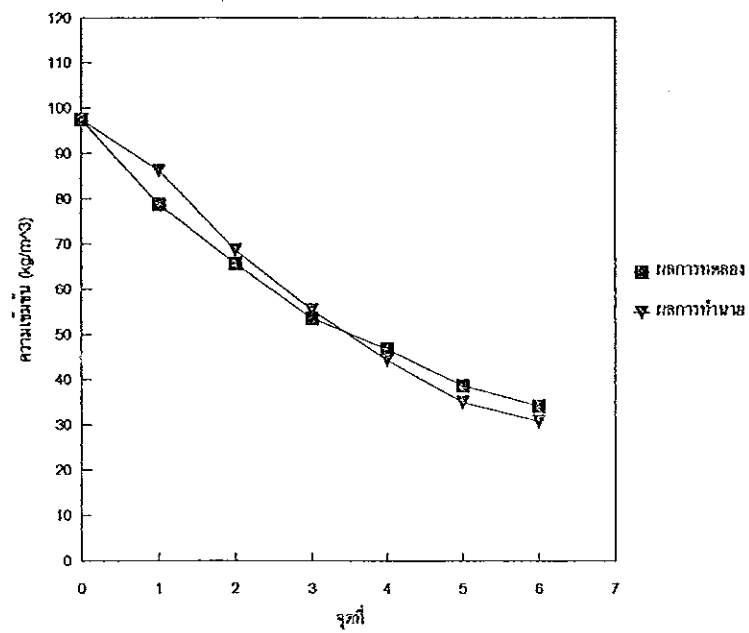
ภาพประกอบ ๑.4 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลองกับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 4

การทดลองที่ 5

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	51.38	51.58	45.33	36.27	21.16	10.07	0.00
liq conc. (pred)	45.48	44.56	39.20	31.93	24.32	17.01	13.55
sol conc. (exp)	97.54	78.60	65.60	53.54	46.72	38.63	34.16
sol conc. (pred)	97.54	86.14	68.62	55.26	44.31	34.92	30.67



(ก) เฟสของเหลว

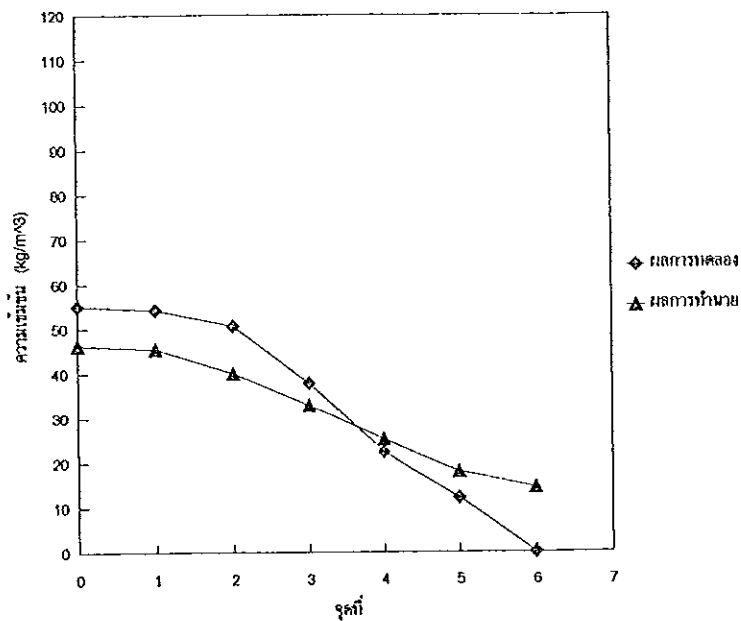


(ข) เฟสของแข็ง

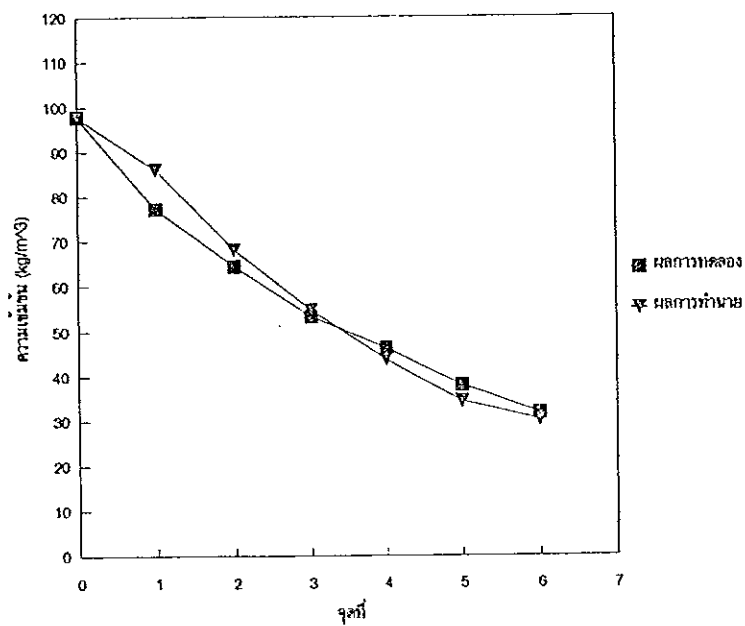
ภาพประกอบ ๑.5 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลองกับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 5

การทดลองที่ 6

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	55.05	54.25	50.62	37.91	22.51	12.10	0.00
liq conc. (pred)	46.35	45.44	40.13	32.89	25.29	17.98	14.51
sol conc. (exp)	97.85	77.22	64.27	53.26	46.26	37.98	31.79
sol conc. (pred)	97.85	85.97	68.01	54.58	43.69	34.42	30.23



(ก) เฟสของเหลว

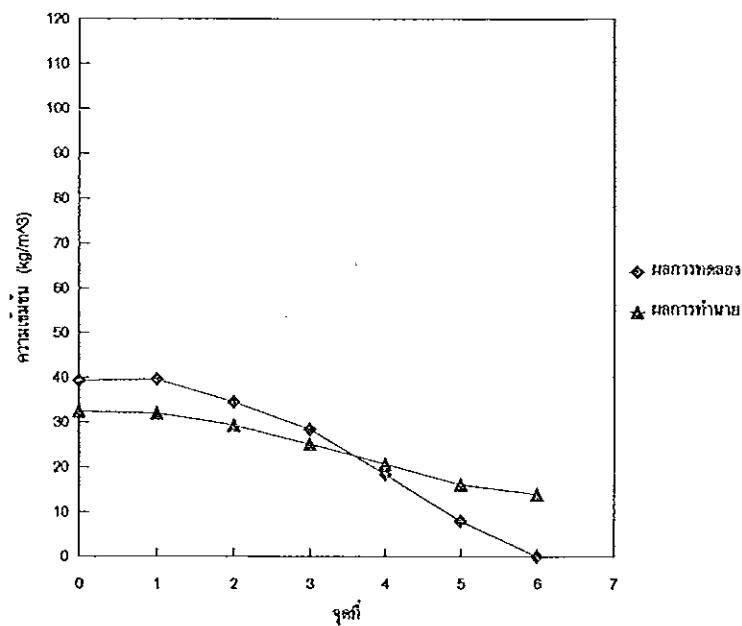


(ข) เฟสของแข็ง

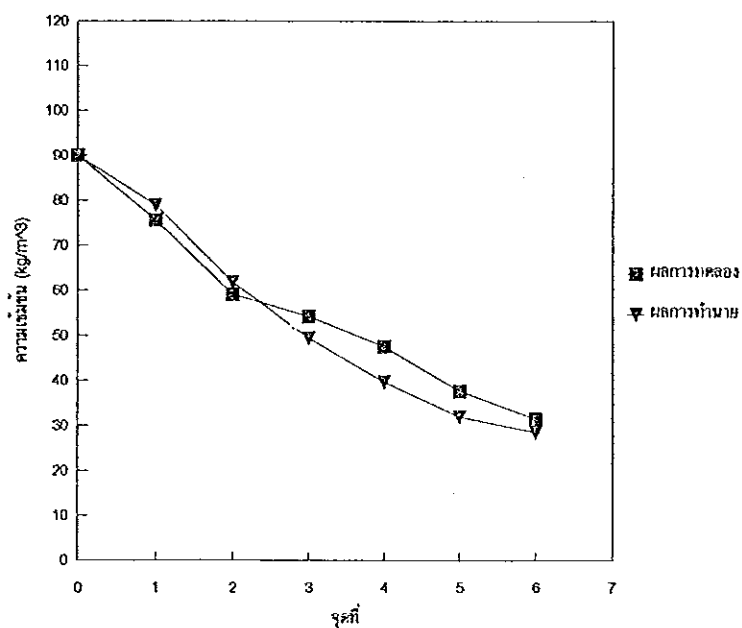
ภาพประกอบ จ.6 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 6

การทดลองที่ 7

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	39.30	39.50	34.48	28.47	18.45	8.02	0.00
liq conc. (pred)	32.44	32.00	29.25	25.22	20.73	16.23	14.05
sol conc. (exp)	89.97	75.64	59.02	54.15	47.52	37.66	31.45
sol conc. (pred)	89.97	78.84	61.77	49.29	39.66	31.90	28.53



(ก) เฟสของเหลว

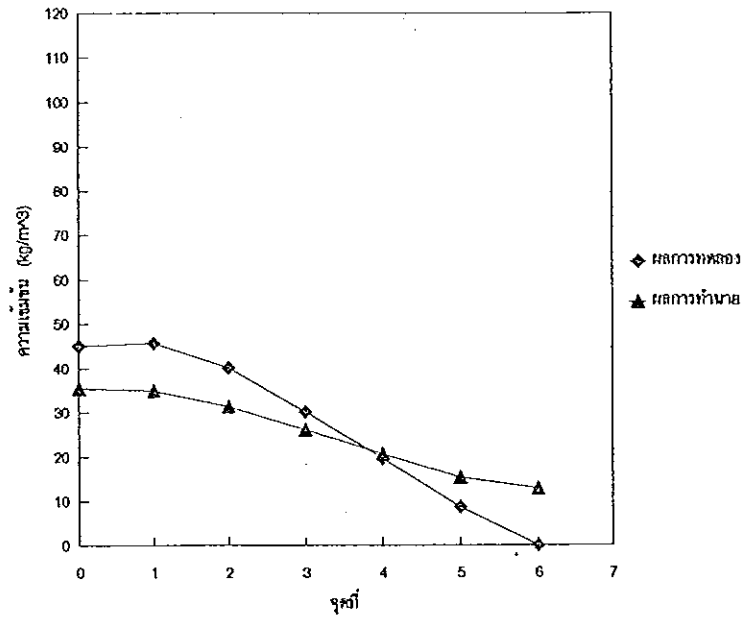


(ข) เฟสของแข็ง

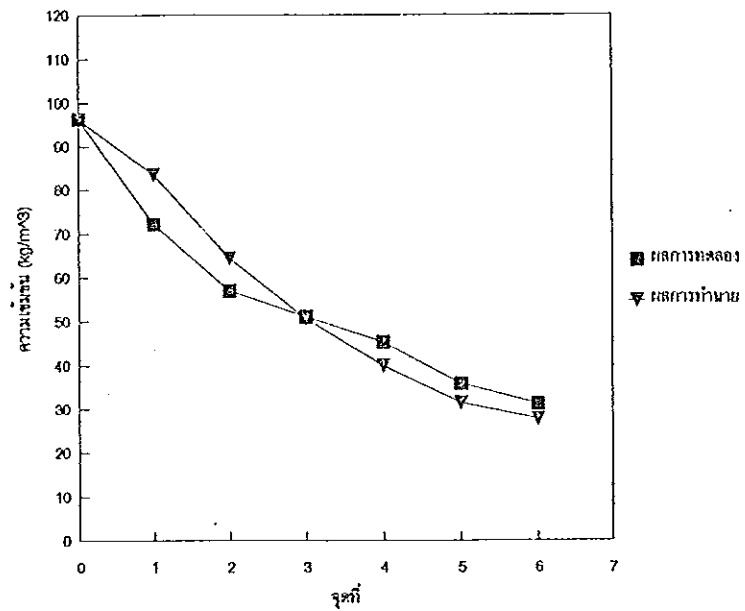
ภาพประกอบ ๑.7 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 7

การทดลองที่ 8

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	45.02	45.62	40.19	30.15	19.69	8.64	0.00
liq conc. (pred)	35.60	34.99	31.33	26.19	20.70	15.40	12.90
sol conc. (exp)	96.33	72.17	56.96	51.02	45.34	35.90	31.16
sol conc. (pred)	96.33	83.61	64.44	50.59	39.96	31.39	27.68



(ก) เฟสของเหลว

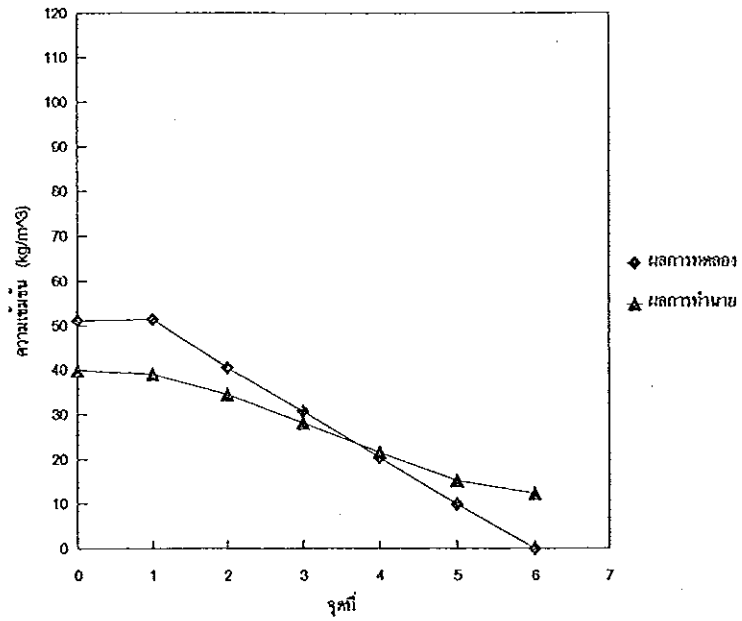


(ข) เฟสของแข็ง

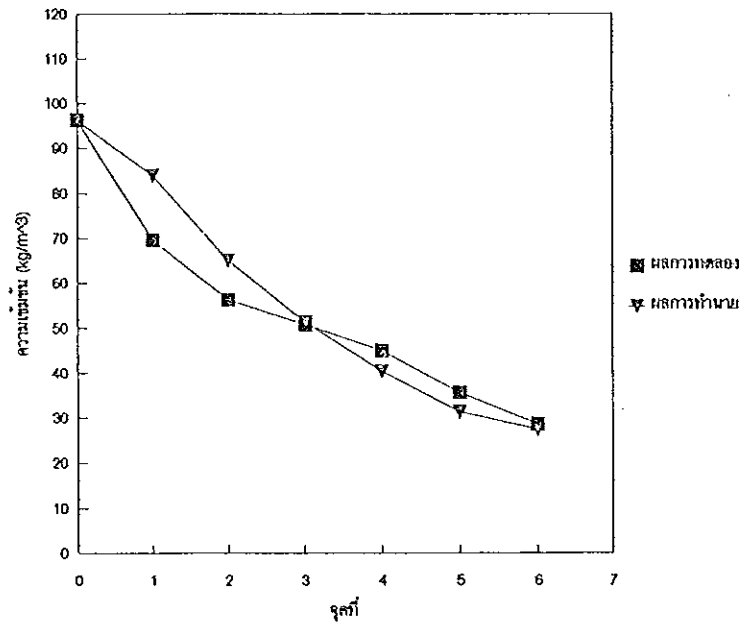
ภาพประกอบ ๘.8 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลองกับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 8

การทดลองที่ 9

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	51.03	51.43	40.48	30.74	20.29	9.84	0.00
liq conc. (pred)	39.82	39.03	34.38	28.06	21.49	15.26	12.34
sol conc. (exp)	96.37	69.56	56.22	50.67	44.99	35.74	28.74
sol conc. (pred)	96.37	83.87	65.05	51.26	40.41	31.46	27.53



(ก) เฟสของเหลว

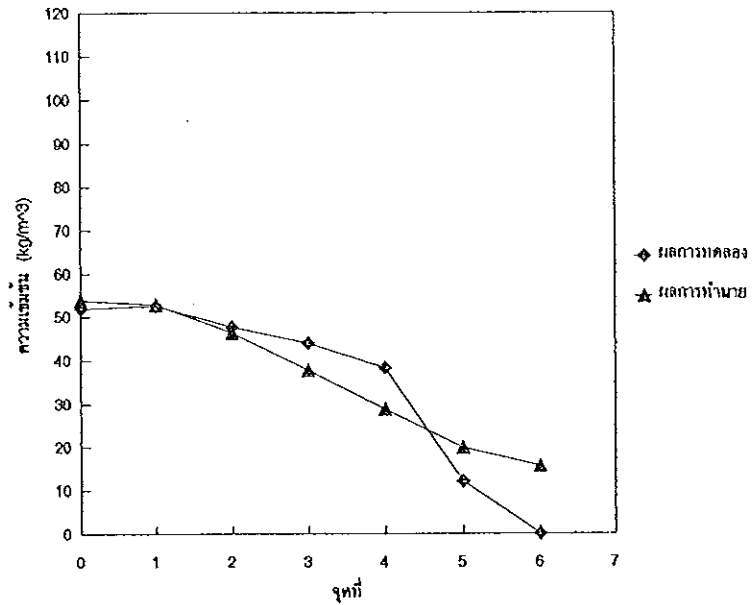


(ข) เฟสของแข็ง

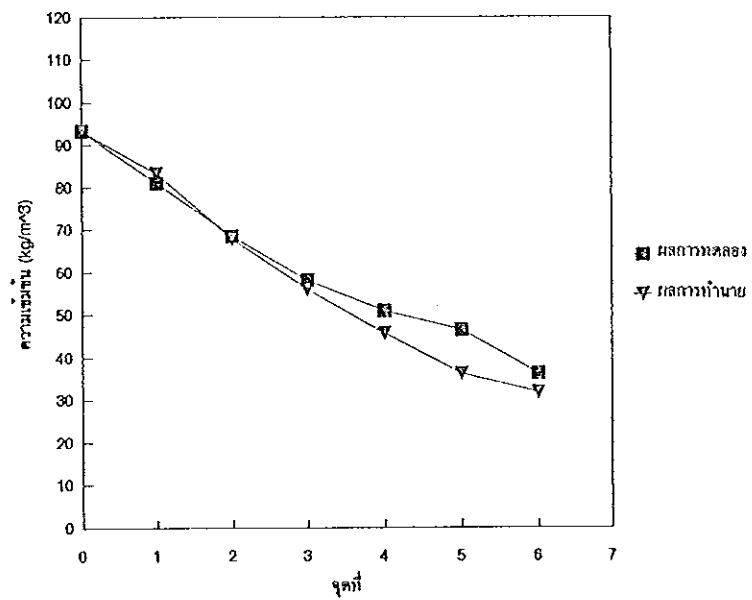
ภาพประกอบ ๑.๙ เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 9

การทดลองที่ 10

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	51.92	52.53	47.70	44.07	38.24	12.08	0.00
liq conc. (pred)	53.90	52.78	46.42	37.86	28.84	19.99	15.70
sol conc. (exp)	93.32	81.10	68.56	58.15	50.94	46.39	36.27
sol conc. (pred)	93.32	83.31	68.05	56.05	45.64	36.18	31.72



(ก) เฟสของเหลว



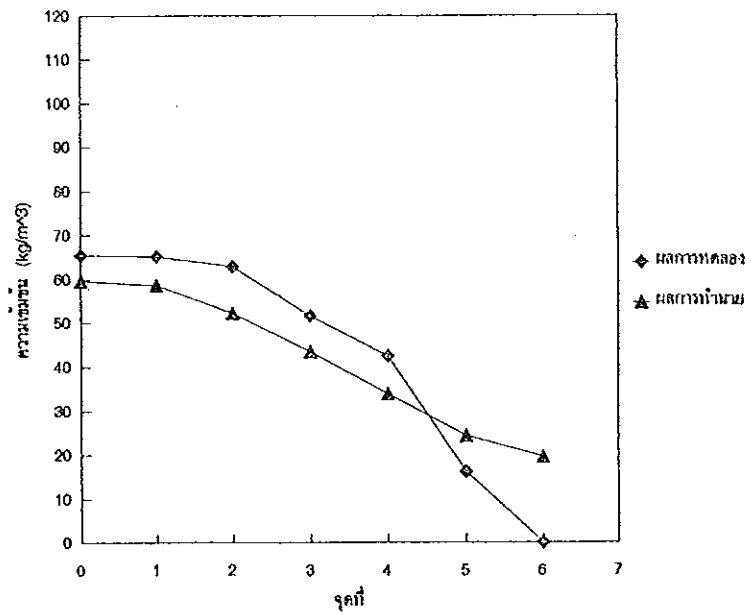
(ข) เฟสของแข็ง

ภาพประกอบ ๑.10 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลองกับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 10

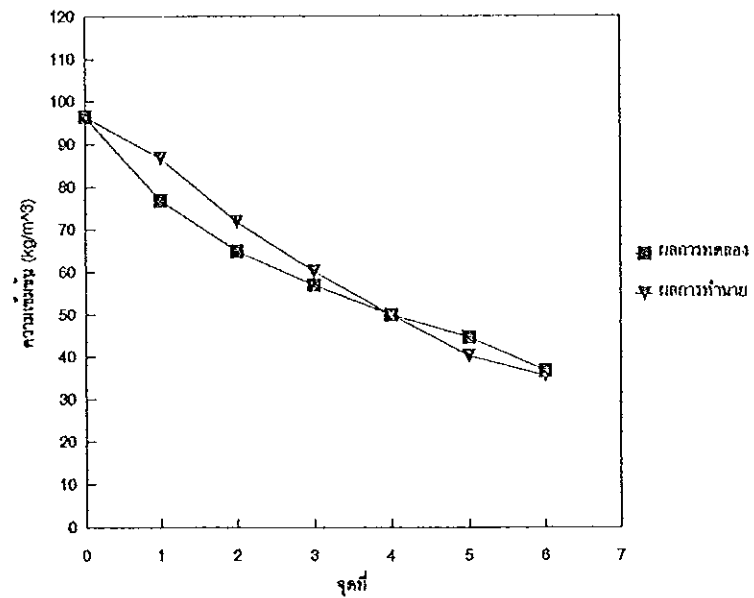


การทดลองที่ 11

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	65.47	65.27	62.85	51.73	42.44	16.17	0.00
liq conc. (pred)	59.70	58.60	52.22	43.44	33.94	24.36	19.62
sol conc. (exp)	96.44	76.79	64.74	56.74	49.67	44.43	36.59
sol conc. (pred)	96.44	86.62	71.75	60.01	49.67	40.05	35.42



(ก) เฟสของเหลว

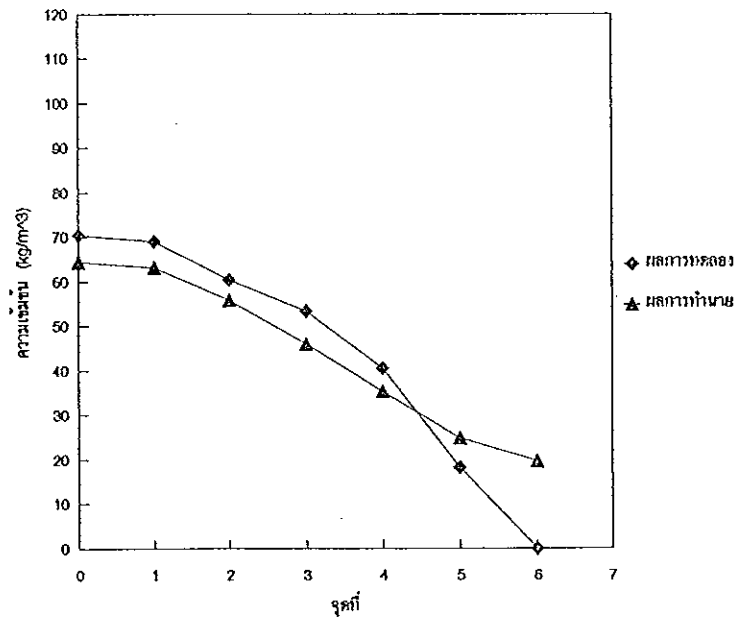


(ข) เฟสของแข็ง

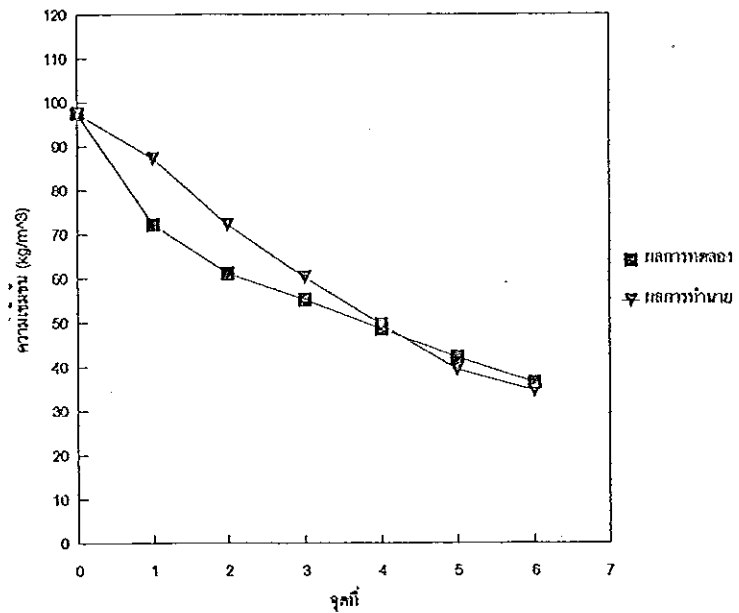
ภาพประกอบ ๑.11 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 11

การทดลองที่ 12

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	70.47	69.05	60.37	53.30	40.58	18.17	0.00
liq conc. (pred)	64.49	63.18	55.82	45.95	35.43	24.86	19.64
sol conc. (exp)	97.52	72.25	61.24	55.23	48.52	42.09	36.32
sol conc. (pred)	97.52	87.33	72.23	60.25	49.51	39.34	34.40



(ก) เฟสของเหลว

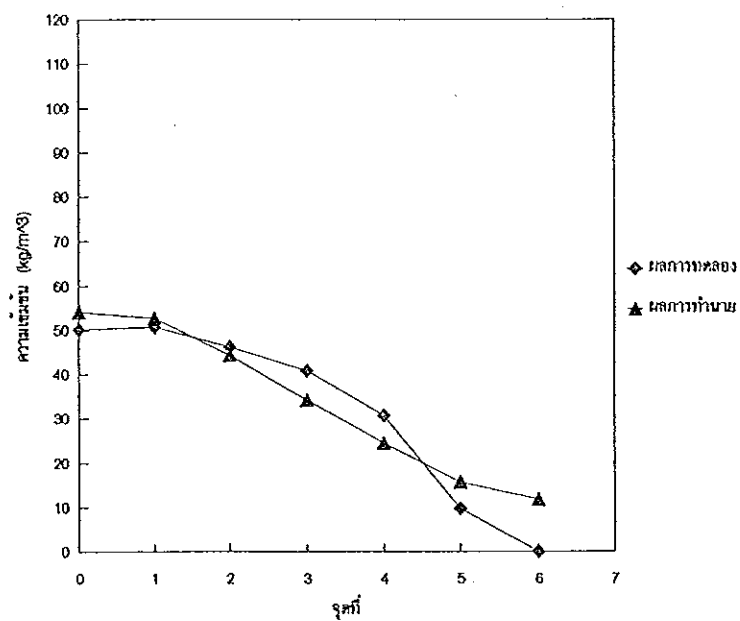


(ข) เฟสของแข็ง

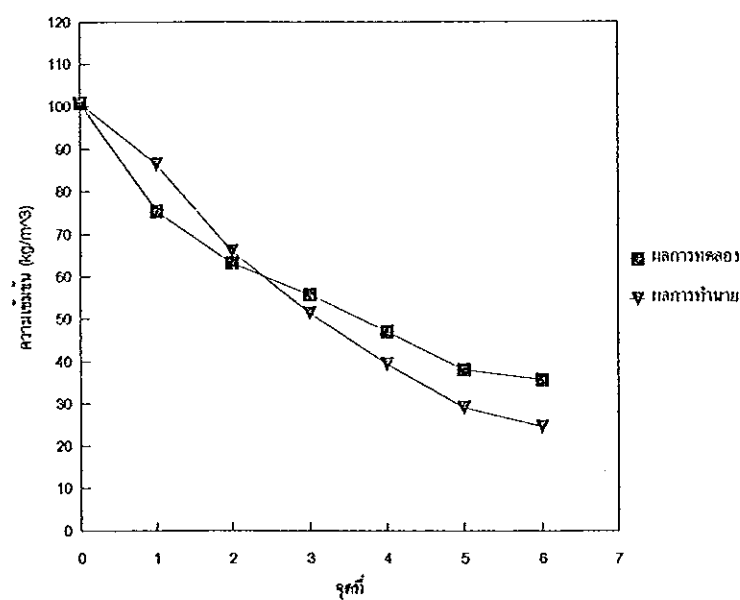
ภาพประกอบ ข.12 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 12

## การทดลองที่ 13

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	50.08	50.69	46.26	40.83	30.77	9.86	0.00
liq conc. (pred)	54.24	52.65	44.37	34.29	24.58	15.80	11.78
sol conc. (exp)	100.72	75.37	63.13	55.54	46.90	37.85	35.37
sol conc. (pred)	100.72	86.30	65.98	51.20	39.20	28.99	24.41



(ก) เฟสของเหลว

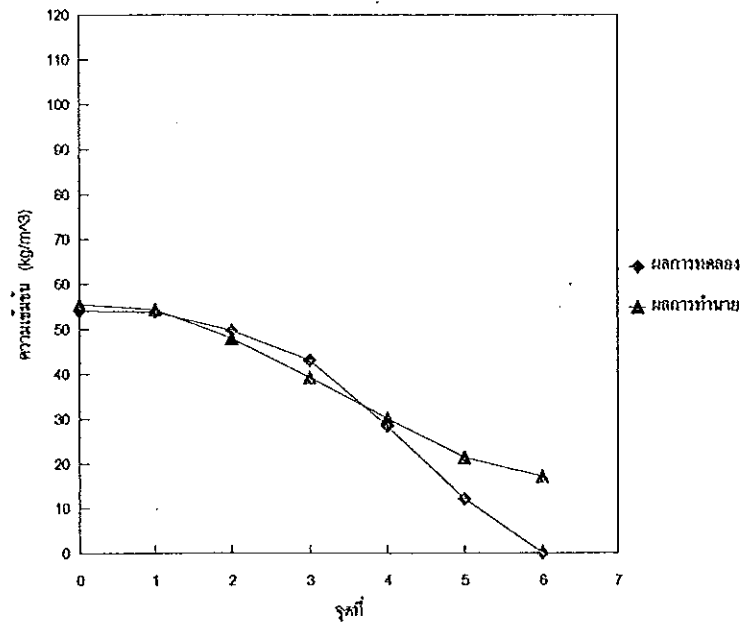


(ข) เฟสของแข็ง

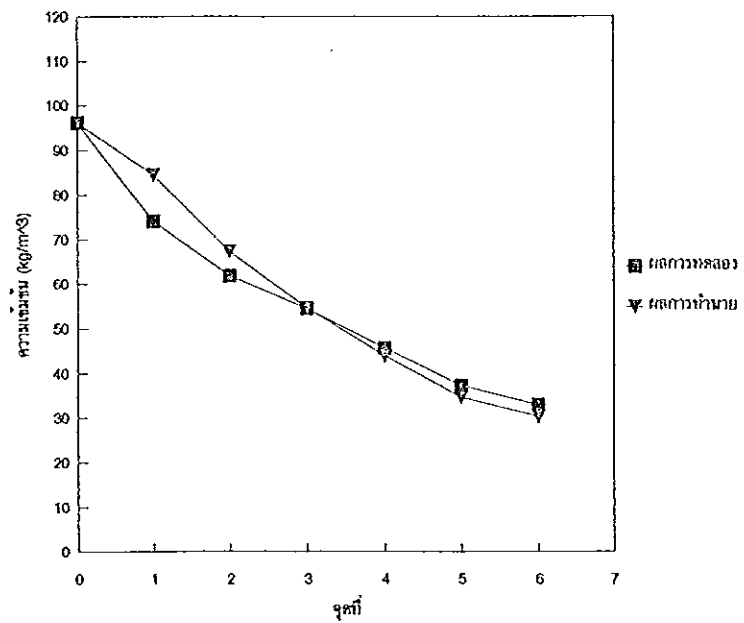
ภาพประกอบ ฉ.13 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง  
กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 13

การทดลองที่ 14

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	54.03	53.83	49.59	43.14	28.42	12.10	0.00
liq conc. (pred)	55.43	54.31	47.88	39.22	30.15	21.38	17.18
sol conc. (exp)	96.19	74.02	61.83	54.47	45.47	37.22	32.86
sol conc. (pred)	96.19	84.59	67.40	54.53	43.89	34.58	30.30



(ก) เฟสของเหลว

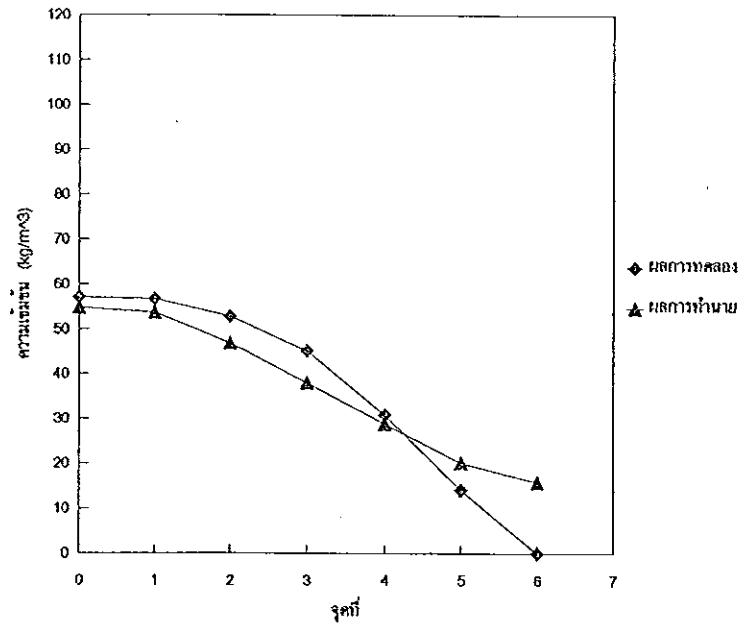


(ข) เฟสของแข็ง

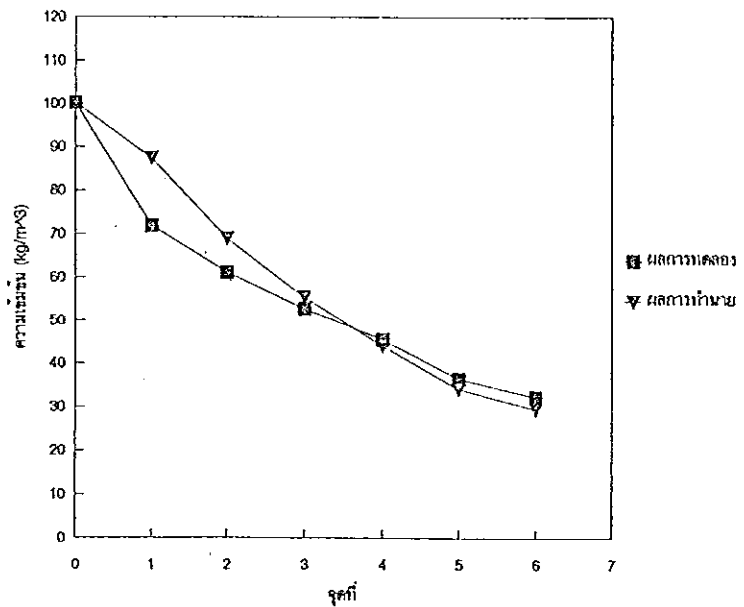
ภาพประกอบ ฉ.14 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 14

การทดลองที่ 15

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	57.06	56.66	52.83	45.16	30.85	14.11	0.00
liq conc. (pred)	54.92	53.70	46.90	37.98	28.82	20.08	15.94
sol conc. (exp)	100.18	71.84	61.04	52.66	45.59	36.52	32.33
sol conc. (pred)	100.18	87.36	68.66	55.22	43.97	34.15	29.63



(ก) เฟสของเหลว

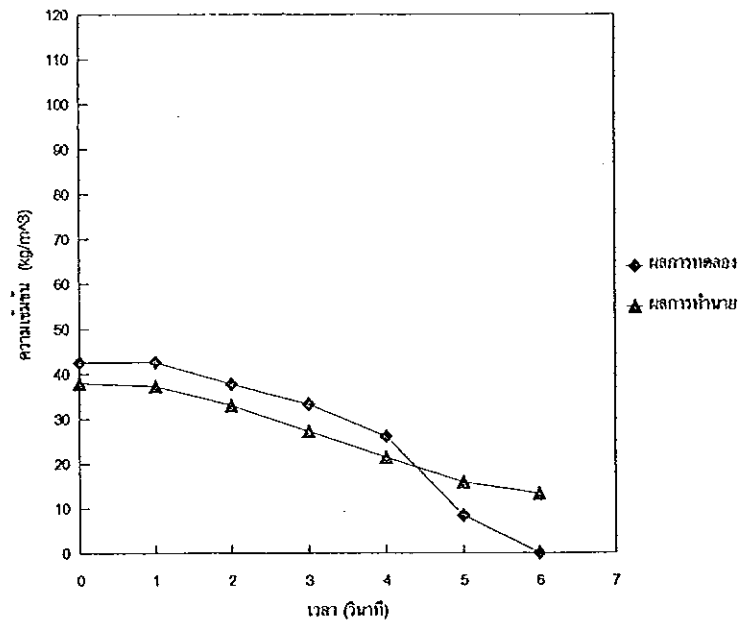


(ข) เฟสของแข็ง

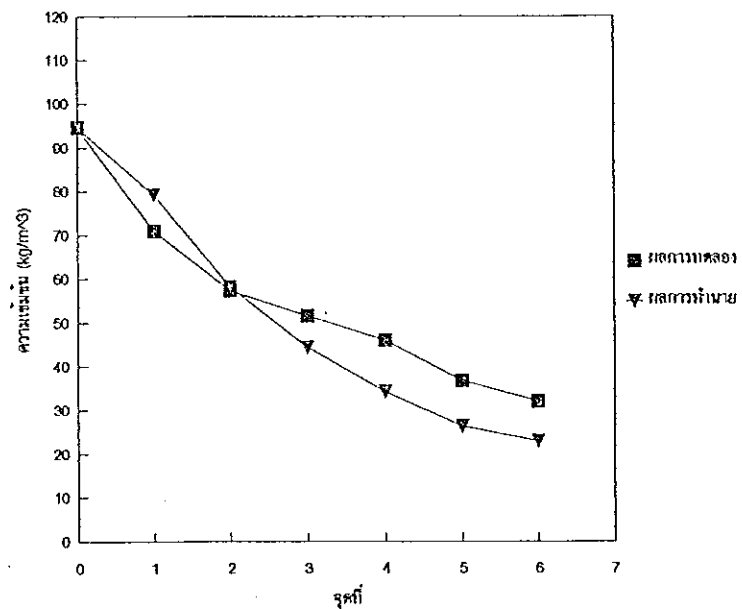
ภาพประกอบ ฉ.15 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 15

การทดลองที่ 16

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	42.52	42.52	37.70	33.29	26.07	8.42	0.00
liq conc. (pred)	38.00	37.25	32.96	27.23	21.36	15.86	13.31
sol conc. (exp)	94.70	71.02	57.23	51.47	45.78	36.71	31.95
sol conc. (pred)	94.70	79.28	58.11	44.22	34.14	26.28	22.91



(ก) เฟสของเหลว

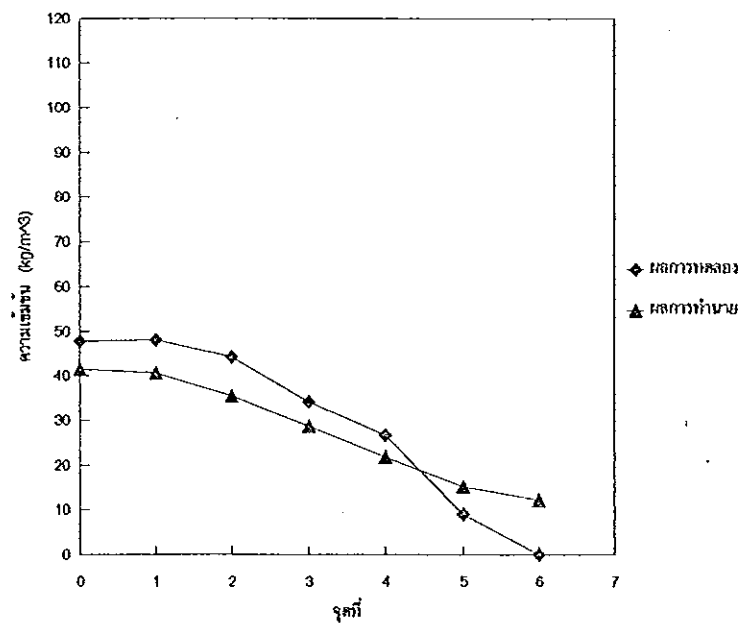


(ข) เฟสของแข็ง

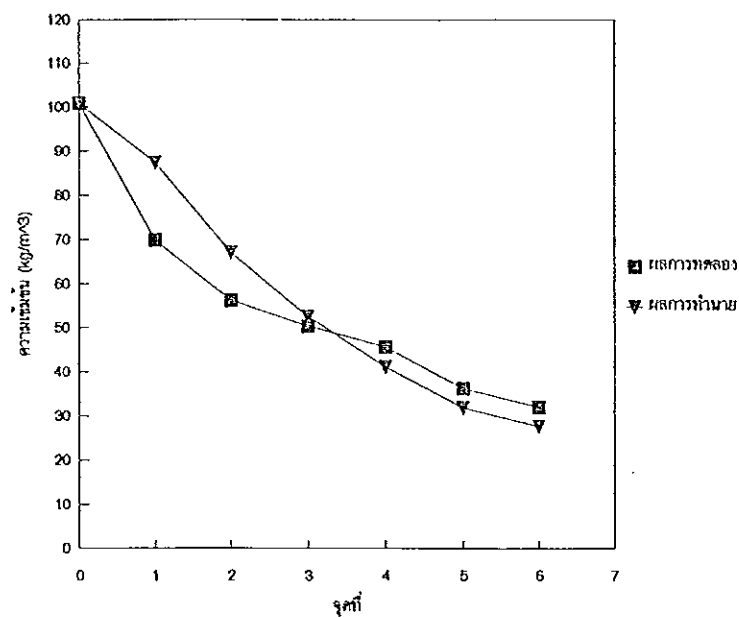
ภาพประกอบ ๑.16 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 16

## การทดลองที่ 17

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	47.80	48.00	44.19	34.14	26.71	9.04	0.00
liq conc. (pred)	41.45	40.57	35.50	28.72	21.77	15.26	12.24
sol conc. (exp)	100.99	69.96	56.21	50.27	45.57	36.12	31.94
sol conc. (pred)	100.99	87.41	67.21	52.56	41.11	31.71	27.59



(ก) เฟสของเหลว

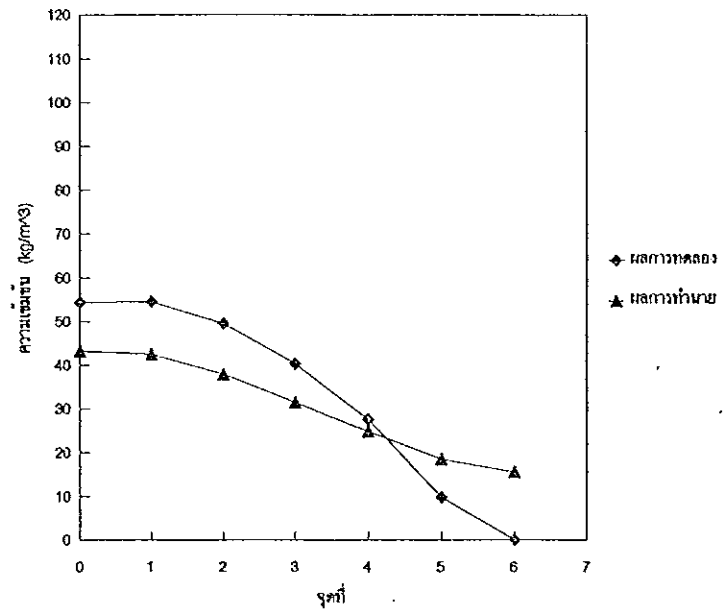


(ข) เฟสของแข็ง

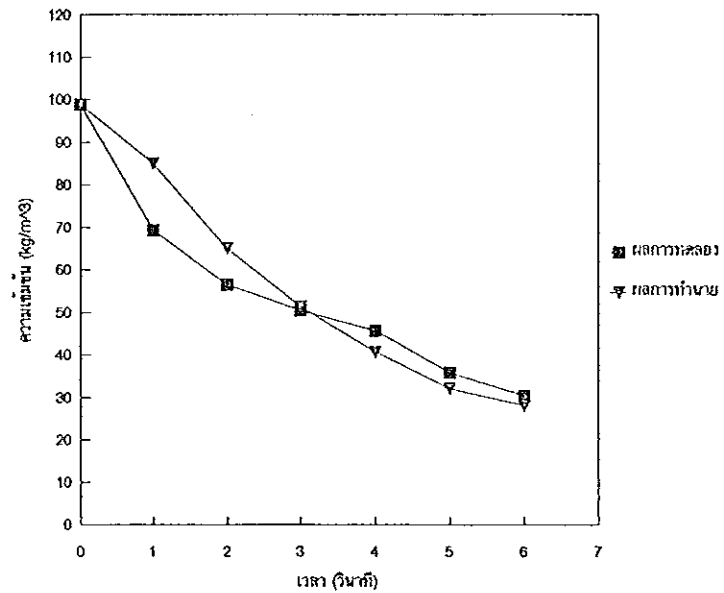
ภาพประกอบ ฉ.17 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 17

การทดลองที่ 18

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	54.30	54.53	49.50	40.25	27.77	9.86	0.00
liq conc. (pred)	43.28	42.50	37.89	31.57	24.93	18.55	15.53
sol conc. (exp)	98.88	69.40	56.39	50.21	45.48	35.59	30.25
sol conc. (pred)	98.88	85.00	65.06	51.14	40.50	31.82	27.99



(ก) เฟสของเหลว



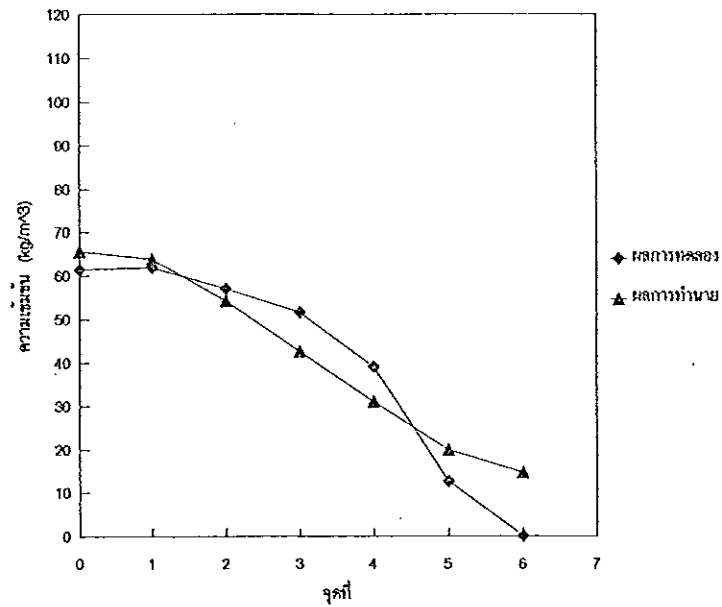
(ข) เฟสของแข็ง

ภาพประกอบ ๑.18 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 18

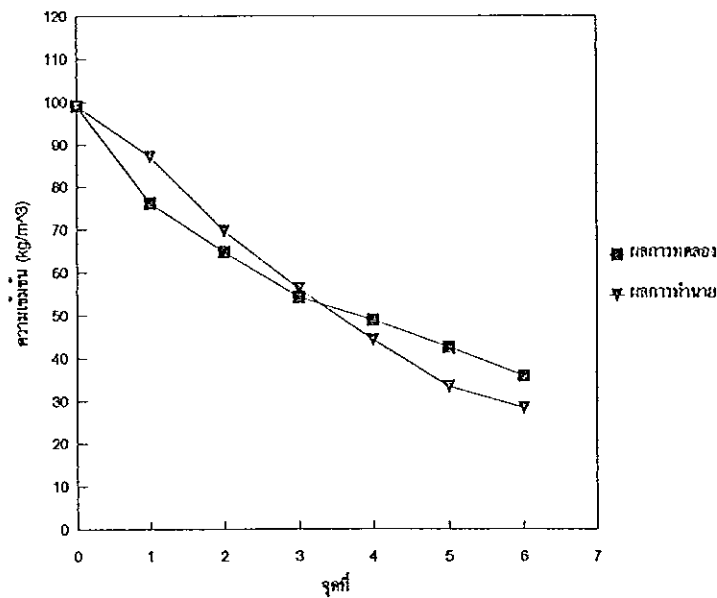


การทดลองที่ 19

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	61.50	61.90	57.06	51.62	39.12	12.70	0.00
liq conc. (pred)	65.64	63.80	54.33	42.66	31.01	19.92	14.64
sol conc. (exp)	99.08	76.17	64.79	54.28	49.01	42.47	35.64
sol conc. (pred)	99.08	87.09	69.79	56.21	44.25	33.27	28.09



(ก) เฟสของเหลว

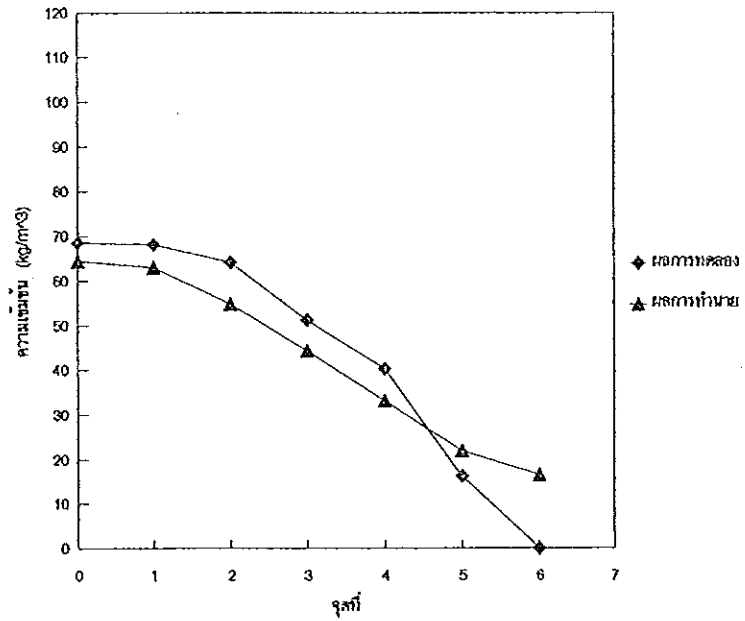


(ข) เฟสของแข็ง

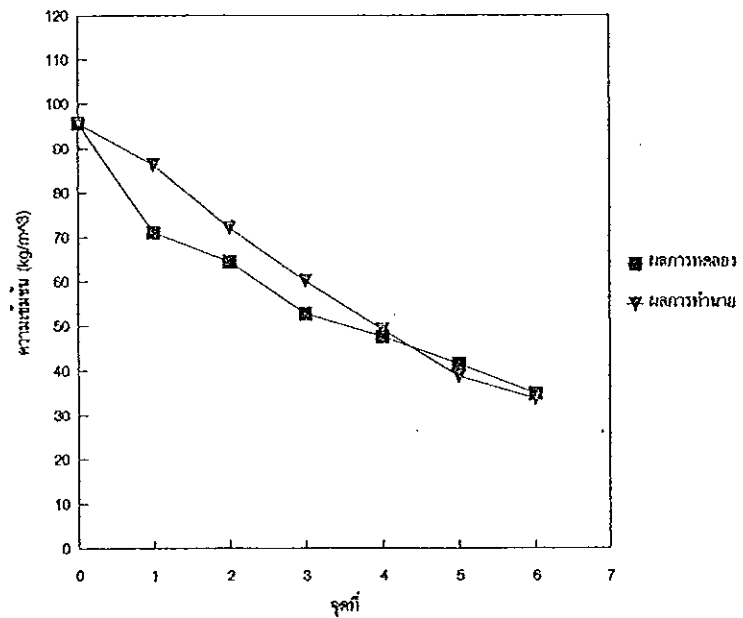
ภาพประกอบ ฉ.19 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 19

การทดลองที่ 20

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	68.57	68.17	64.13	51.23	40.34	16.13	0.00
liq conc. (pred)	64.41	62.93	54.86	44.26	33.10	21.98	16.50
sol conc. (exp)	95.73	71.14	64.48	52.82	47.58	41.44	34.82
sol conc. (pred)	95.73	86.45	72.07	60.12	49.13	38.64	33.54



(ก) เฟสของเหลว

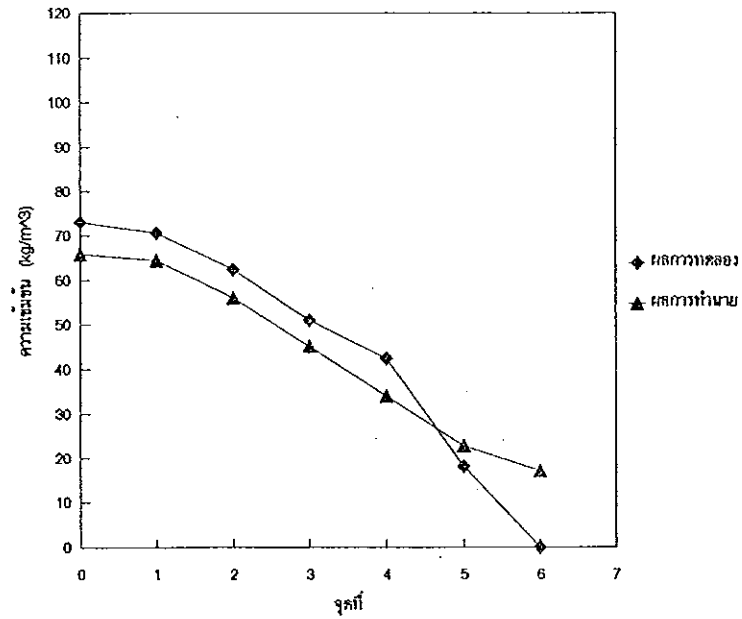


(ข) เฟสของแข็ง

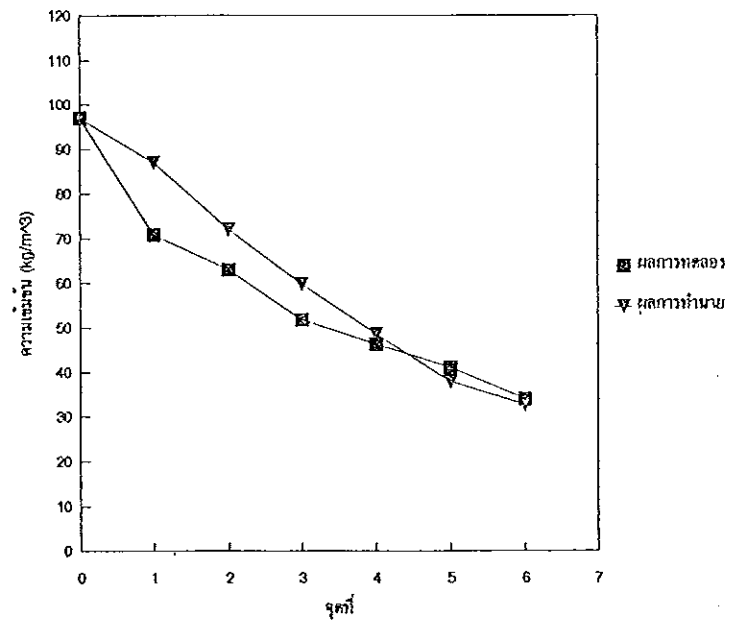
ภาพประกอบ ๑.20 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 20

การทดลองที่ 21

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	73.11	70.69	62.41	51.10	42.41	18.18	0.00
liq conc. (pred)	65.90	64.37	56.06	45.24	33.90	22.66	17.14
sol conc. (exp)	96.99	70.77	63.10	51.67	46.24	41.07	34.09
sol conc. (pred)	96.99	87.04	72.00	59.72	48.54	37.92	32.77



(ก) เฟสของเหลว

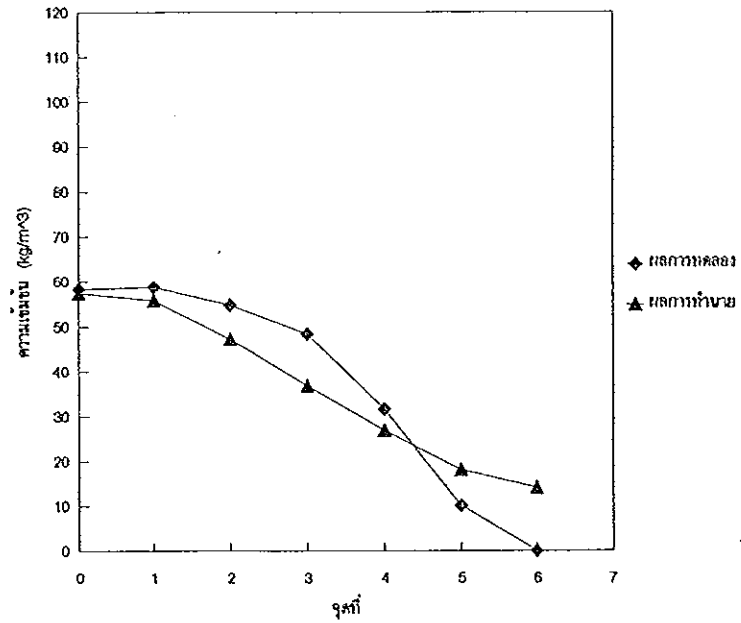


(ข) เฟสของแข็ง

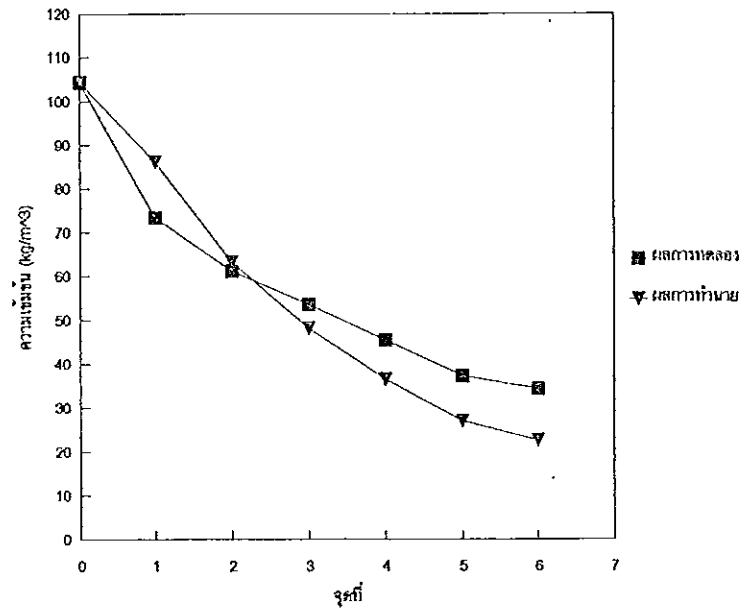
ภาพประกอบ จ.21 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 21

การทดลองที่ 22

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	58.40	58.81	54.78	48.33	31.62	10.07	0.00
liq conc. (pred)	57.52	55.83	47.15	36.78	26.92	18.11	14.11
sol conc. (exp)	104.28	73.27	61.14	53.62	45.45	37.23	34.21
sol conc. (pred)	104.28	86.14	63.22	48.18	36.55	26.97	22.58



(ก) เฟสของเหลว

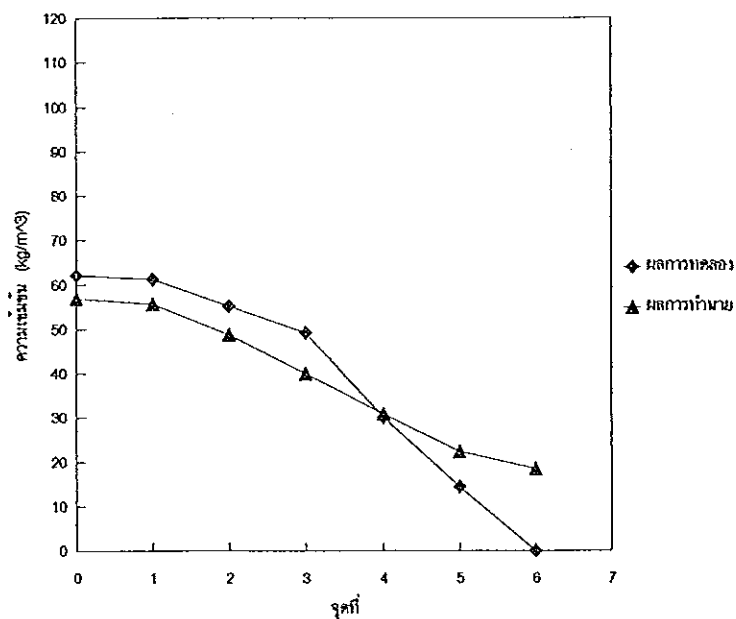


(ข) เฟสของแข็ง

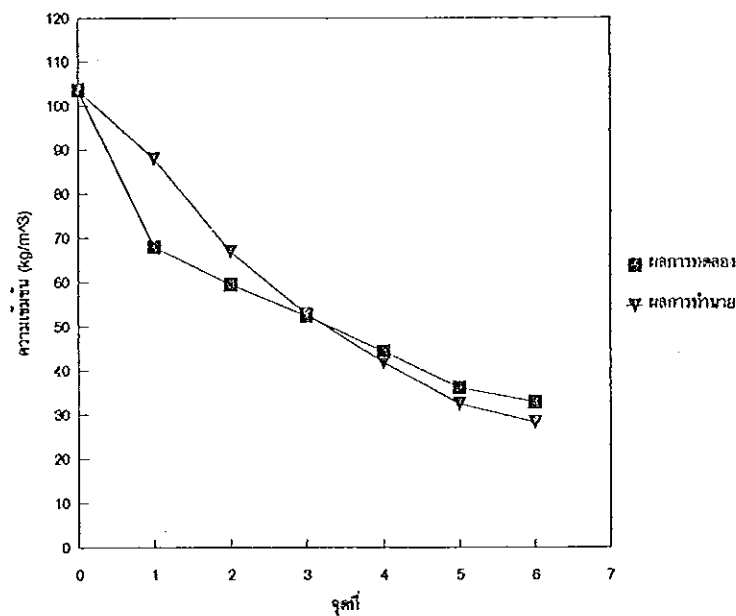
ภาพประกอบ ฉ.22 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 22

การทดลองที่ 23

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	62.11	61.30	55.25	49.21	30.25	14.52	0.00
liq conc. (pred)	56.86	55.63	48.81	39.95	30.95	22.44	18.42
sol conc. (exp)	103.67	68.00	59.57	52.47	44.31	36.11	32.91
sol conc. (pred)	103.67	87.98	67.04	52.90	41.85	32.48	28.23



(ก) เฟสของเหลว

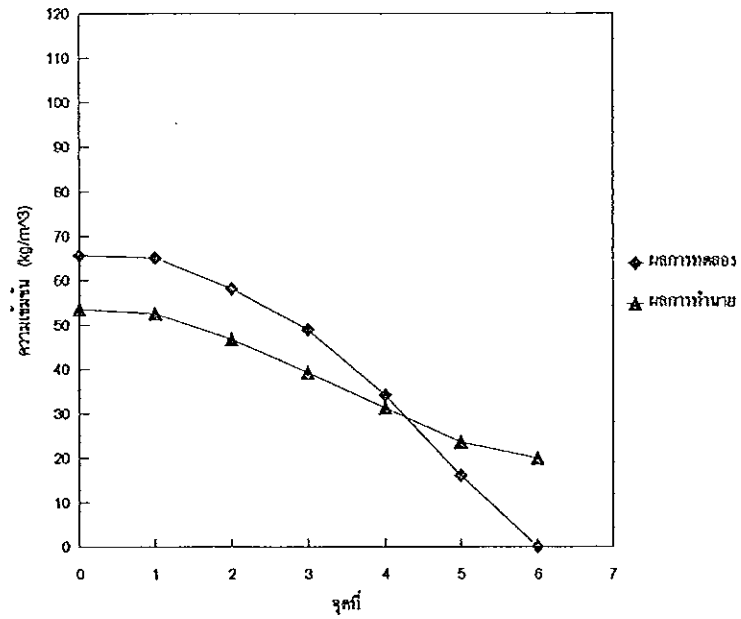


(ข) เฟสของแข็ง

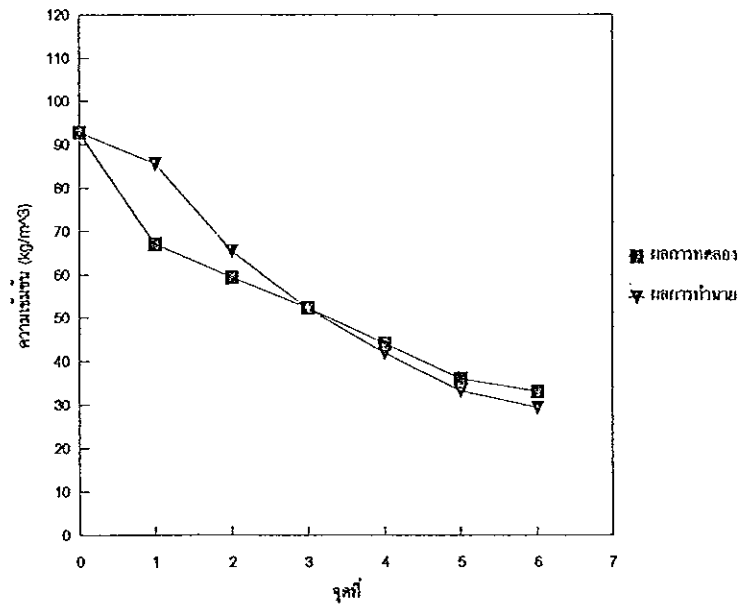
ภาพประกอบ ๑.23 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 23

การทดลองที่ 24

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	65.68	65.07	58.22	48.95	34.25	16.12	0.00
liq conc. (pred)	53.46	52.47	46.81	39.22	31.30	23.66	20.01
sol conc. (exp)	92.78	66.95	59.44	52.24	43.99	35.88	33.01
sol conc. (pred)	92.78	85.56	65.48	52.07	41.78	33.14	29.23



(ก) เฟสของเหลว

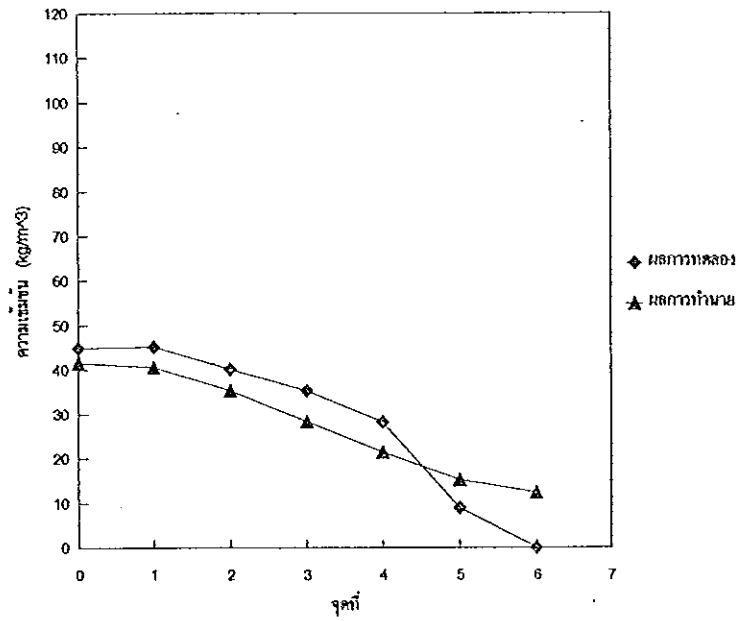


(ข) เฟสของแข็ง

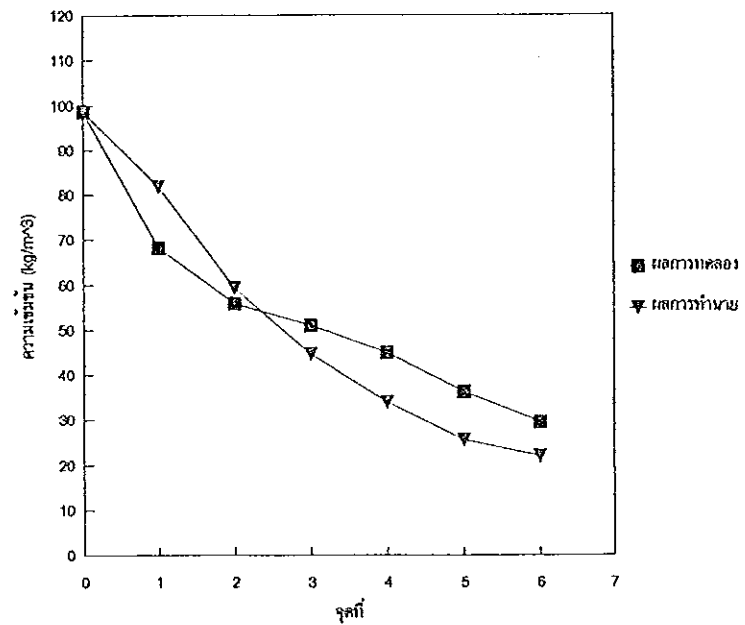
ภาพประกอบ ฉ.24 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 24

การทดลองที่ 25

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	44.97	45.18	40.13	35.24	28.24	8.87	0.00
liq conc. (pred)	41.63	40.66	35.28	28.35	21.50	15.26	12.43
sol conc. (exp)	98.58	68.25	55.92	51.15	45.07	36.19	29.54
sol conc. (pred)	98.58	81.92	59.39	44.67	33.94	25.53	21.93



(ก) เฟสของเหลว

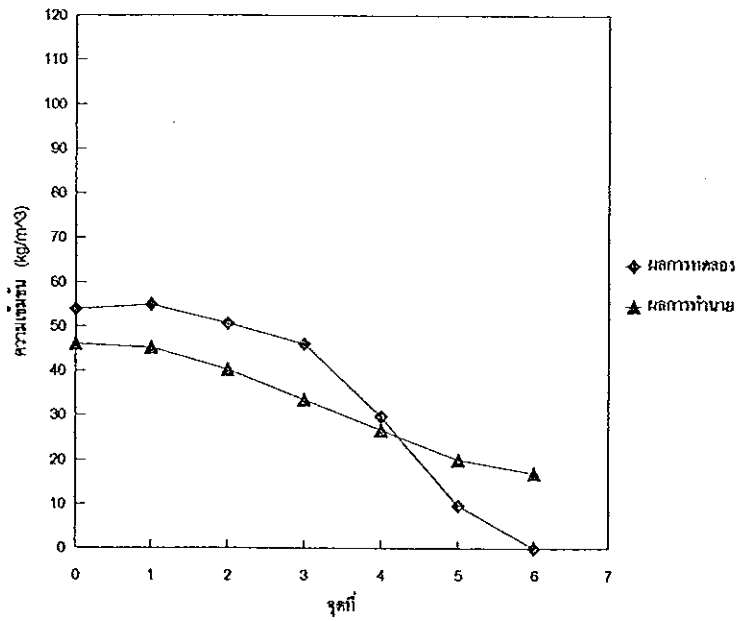


(ข) เฟสของแข็ง

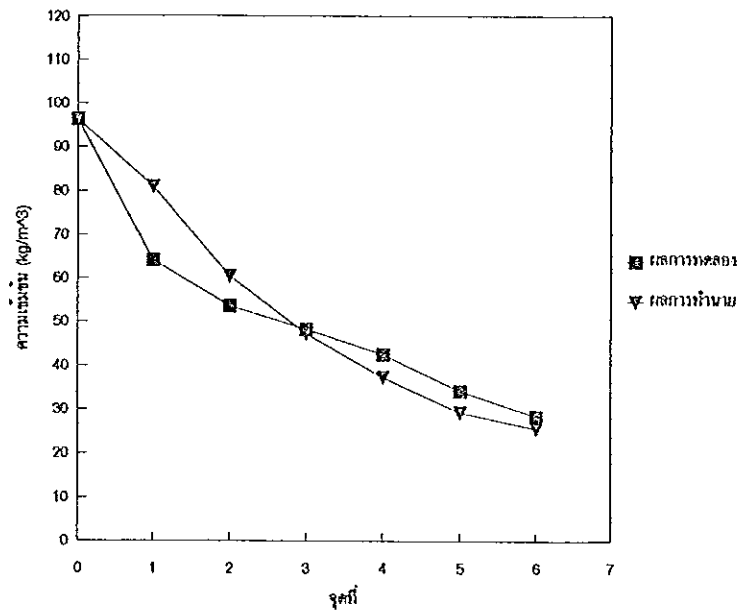
ภาพประกอบ ฉ.25 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 25

การทดลองที่ 26

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	53.89	54.89	50.67	46.04	29.76	9.65	0.00
liq conc. (pred)	46.11	45.24	40.25	33.58	26.69	20.13	17.05
sol conc. (exp)	96.26	64.12	53.55	48.16	42.46	34.04	28.34
sol conc. (pred)	96.26	80.99	60.51	47.14	37.23	29.21	25.67



(ก) เฟสของเหลว



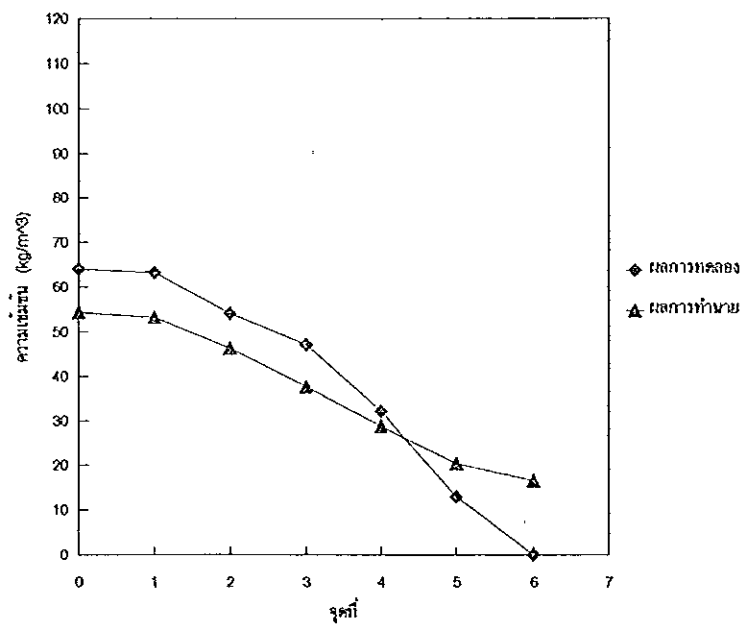
(ข) เฟสของแข็ง

ภาพประกอบ ๑.26 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลอง กับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 26

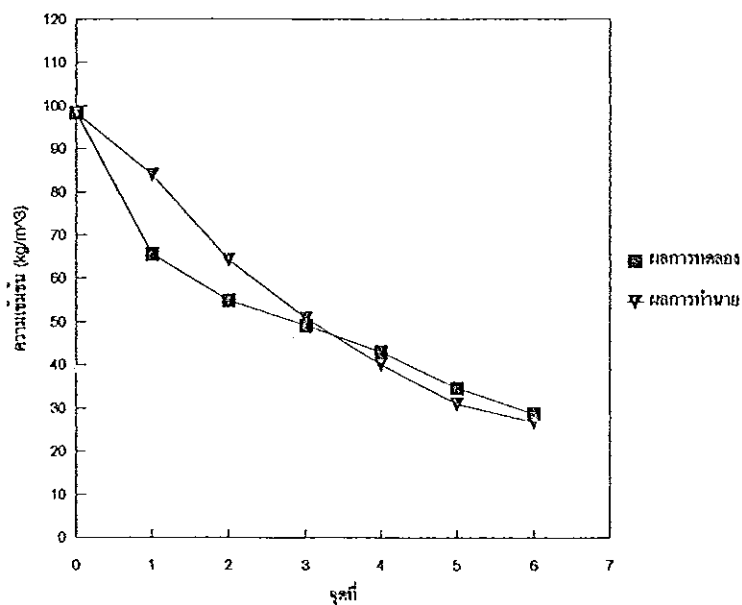


การทดลองที่ 27

จุดที่	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
liq conc. (exp)	64.02	63.21	53.95	47.11	32.21	13.09	0.00
liq conc. (pred)	54.33	53.10	46.35	37.64	28.82	20.51	16.60
sol conc. (exp)	98.37	65.53	54.84	49.09	43.02	34.54	28.68
sol conc. (pred)	98.37	83.90	64.28	50.74	40.02	30.86	26.70



(ก) เฟสของเหลว



(ข) เฟสของแข็ง

ภาพประกอบ ๑.27 เปรียบเทียบความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลวจากผลการทดลองกับผลการทำนายโดยแบบจำลอง Diffusion - Backmixing ของการทดลองที่ 27

ภาคผนวก ข ผลการประเมินค่าพารามิเตอร์ และความเข้มข้นโดยใช้โปรแกรม  
ของการทดลองชุดที่ 1

ภาคผนวก ข.1 ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม โดยใช้โปรแกรมใน  
ภาคผนวก ง.2 ของการทดลองชุดที่ 1

```

RUN NO. 1
NUMBER OF DATA POINTS= 5
a( 0 )= 60.95398
a( 1 )=-2.684757
a( 2 )= .1691976
a( 3 )=-3.505445E-03
a( 4 )=-4.29608E-05
a( 5 )= 1.207914E-06
TIME(T)= 7      Y(t)= 49.16615
TIME(T)= 9      Y(t)= 47.73017
TIME(T)= 11     Y(t)= 46.79436
TIME(T)= 13     Y(t)= 46.16656
TIME(T)= 15     Y(t)= 45.66358
TIME(T)= 17     Y(t)= 45.11591
TIME(T)= 19     Y(t)= 44.37231
TIME(T)= 21     Y(t)= 43.30449
TIME(T)= 23     Y(t)= 41.81172
TIME(T)= 25     Y(t)= 39.82547
TIME(T)= 27     Y(t)= 37.31405
TIME(T)= 29     Y(t)= 34.28728
TIME(T)= 31     Y(t)= 30.80107
TIME(T)= 33     Y(t)= 26.96212
TIME(T)= 35     Y(t)= 22.93248
TIME(T)= 37     Y(t)= 18.9343
TIME(T)= 39     Y(t)= 15.25436
TIME(T)= 41     Y(t)= 12.24876
TIME(T)= 43     Y(t)= 10.34755
TIME(T)= 45     Y(t)= 10.05945
INITIAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)= 100.29
DISTRIBUTION COEFFICIENT (m)= 1.1471
TOTAL EXTRATION TIME (MIN)= 50
MASS TRANSFER COEFFICIENT (1/MIN)= .033
Xf(FROM FIT CURVE EQUATION) (KG/M^3)= 40.52
FINAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)= 38.76426
MASS TRANSFER COEFFICIENT (1/MIN)= .032
Xf(FROM FIT CURVE EQUATION) (KG/M^3)= 40.52
FINAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)= 39.64803
MASS TRANSFER COEFFICIENT (1/MIN)= .031
Xf(FROM FIT CURVE EQUATION) (KG/M^3)= 40.52
FINAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)= 40.56772
EVALUATE MASS TRANSFER COEFFICIENT(1/SEC)= 5.166667E-04

```

ภาคผนวก ข.2 ผลการประเมินจำนวนเพลต โดยการใช้โปรแกรมในภาคผนวก ง.3  
ของการทดลองชุดที่ 1

RUN NO. 1  
 YO= 0  
 XO= 100.29  
 m= 1.1471  
 TOTAL EXTRACTION TIME (TA)(SEC)= 3000  
 DRAFT (A)= 1.4141  
 KX= .000517  
 Xf (FROM FIT CURVE)(KG/M<sup>3</sup>)= 40.52  
 PECLET NUMBER (R)= 6  
 FINNAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M<sup>3</sup>)= 38.07755  
 PECLET NUMBER (R)= 5  
 FINNAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M<sup>3</sup>)= 38.7229  
 PECLET NUMBER (R)= 4  
 FINNAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M<sup>3</sup>)= 39.58325  
 PECLET NUMBER (R)= 3  
 FINNAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M<sup>3</sup>)= 40.7745  
 PECLET NUMBER (R)= 3.1  
 FINNAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M<sup>3</sup>)= 40.63564  
 PECLET NUMBER (R)= 3.2  
 FINNAL SOLUTE CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M<sup>3</sup>)= 40.50174  
 EVALUATE PECLET NUMBER= 3.2  
 NUMBER OF DATA= 7  
 \*\*\*\*\* CONCENTRATION PROFILE ALONG THE EXTRACTOR (KG/M<sup>3</sup>)\*\*\*\*\*  

TIME (SEC)	SOLID(ACTUAL)	SOLID (PRED)	LIQUID(PRED)
.001	100.29	100.29	48.49947
300	87.29	91.9106	47.49779
900	71.04	77.79806	41.6782
1500	60.18	65.78294	33.68129
2100	52.34	55.02753	25.14117
2700	48.56	45.1609	16.70994
3000	40.43	40.50174	12.62072

 MEAN SQUARE ERROR OF SOLID PHASE= 16.74229

ภาคผนวก ข.3 ผลการประเมินความเข้มข้นในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว

โดยใช้โปรแกรมในภาคผนวก ง.4 ของการทดลองชุดที่ 1

RUN NO. 1  
 EFFECTIVE DRAFT= 1.4141  
 DISTRIBUTION COEFFICIENT= 1.1471  
 DIFFUSIVITY= 4.91E-09  
 FICK'S NUMBER= .8267734  
 F-FACTOR= 2.837087  
 BIOT NUMBER= 4.247496  
 KB= .66123  
 F(P0)=-.1346107  
 F(P1)= .7163327  
 P= .5790949  
 F(P0)= .7163327  
 F(P1)=-4.292483E-02  
 P= .6028909  
 F(P0)=-4.292483E-02  
 F(P1)=-1.287906E-02  
 P= .613091  
 F(P0)=-1.287906E-02  
 F(P1)= 3.570344E-04  
 P= .6128159  
 F(P0)= 3.570344E-04  
 F(P1)=-2.833247E-06  
 P= .612818  
 F(P0)=-2.833247E-06  
 F(P1)=-2.726528E-08  
 P= .612818  
 q= .612818  
 q1= .612818  
 C= .9390007  
 C1= .9788902  
 C1^3= .937998  
 T0= .1704385  
 TIME LEAD (SEC)= 618.4468  
 REAL EXTRACTION TIME (SEC)= 3419.447  
 F0= 2.755912E-07  
 F1= 9.423692E-02  
 F2= .2827108  
 F3= .4711846  
 F4= .6596585  
 F5= .8481323  
 F6= .9423692  
 CONCENTRATION IN BOTH PHASE (KG/M^3)  

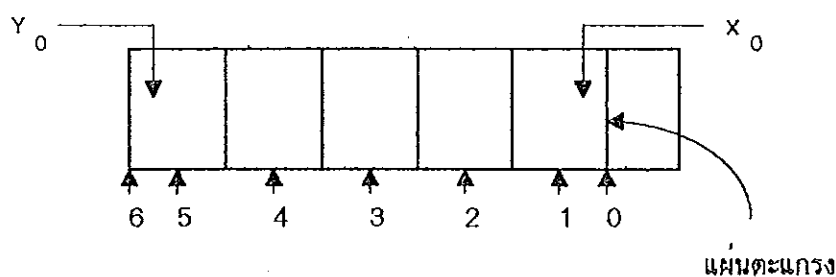
TIME (SEC)	SOLID(ACT)	SOLID(PRED)	LIQUID(ACT)	LIQUID(PRED)
.001	100.29	100.29	50.89	50.80122
341.9447	87.29	91.14249	51.3	49.70685
1025.834	71.04	76.12114	45.66	43.43374
1709.723	60.18	63.58234	39.83	34.94083
2393.613	52.34	52.48647	22.93	25.98079
3077.502	48.56	42.38837	10.06	17.2221
3419.447	40.53	37.64424	0	13.00121

 MEAN SQUARE OF ERROR FOR SOLID PHASE= 14.09624  
 MEAN SQUARE OF ERROR FOR LIQUID PHASE= 37.29154

### ภาคผนวก ข. การเปลี่ยนระยะทางในรางสก็ดเป็นเวลา

เนื่องจากข้อมูลความเข้มข้นของเฟสของแข็งและ เฟสของเหลวที่สถานะคงตัวของ การทดลองชุดต่าง ๆ ดังในภาคผนวก ฉ. ยังไม่สามารถจะนำมาใช้ในการทำนายความเข้มข้นโดยใช้โปรแกรมคำนวณ ในภาคผนวก ง.4 ได้ จะต้องเปลี่ยนระยะทางที่เฟสทั้งสองเคลื่อนที่ไปในรางสก็ด เป็นเวลาที่ใช้ในการสก็ด จากนั้นจึงจับคู่ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาที่ใช้ในการสก็ด ซึ่งมีวิธีการ ดังนี้

จุดเก็บตัวอย่างภายในรางสก็ดที่ใช้ทดลอง ดังภาพประกอบ ข.1 สำหรับข้อมูลจากการทดลองชุดที่ 1 ดังในภาคผนวก ฉ.



ภาพประกอบ ข.1 จุดเก็บตัวอย่างภายในรางสก็ดเพื่อใช้ทำนายความเข้มข้นของตัวละลาย

#### การเทียบระยะทางที่เก็บตัวอย่างเป็นเวลา

สมมติว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการสก็ดเท่ากับ 3000 วินาที

รางสก็ดถูกแบ่งออกเป็น 5 ช่องดังภาพประกอบ ข.1 ดังนั้นระยะเวลาที่เข็มเคลื่อนที่ผ่านแต่ละช่อง เท่ากับ  $\frac{3000}{5} = 600$  วินาที

ระยะทางตั้งแต่จุด 0 ถึง จุด 1 คิดเป็น 300 วินาที

ระยะทางตั้งแต่จุด 0 ถึง จุด 2 คิดเป็น 900 วินาที

ระยะทางตั้งแต่จุด 0 ถึง จุด 3 คิดเป็น 1500 วินาที

ระยะทางตั้งแต่จุด 0 ถึง จุด 4 คิดเป็น 2100 วินาที

ระยะทางตั้งแต่จุด 0 ถึง จุด 5 คิดเป็น 2700 วินาที

ระยะทางตั้งแต่จุด 0 ถึง จุด 6 คิดเป็น 3000 วินาที

จากข้อมูลจากภาคผนวก ฉ. สำหรับการทดลองชุดที่ 1 สามารถนำมาเขียนเป็นความเข้มข้นในเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวที่เวลาต่าง ๆ ดังตาราง ซ.1 ได้ดังนี้

ตาราง ซ.1 ตัวอย่างการจับคู่ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสทั้งสองกับเวลาที่ใช้สกัด

จุดเก็บตัวอย่าง (ในภาพประกอบ ซ.1)	0	1	2	3	4	5	6
เวลา (วินาที)	0	300	900	1500	2100	2700	3000
ตำแหน่งเฟสของเหลว	$Y_7$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$
ตำแหน่งเฟสของแข็ง (ในภาคผนวก ฉ.)	$X_7$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$

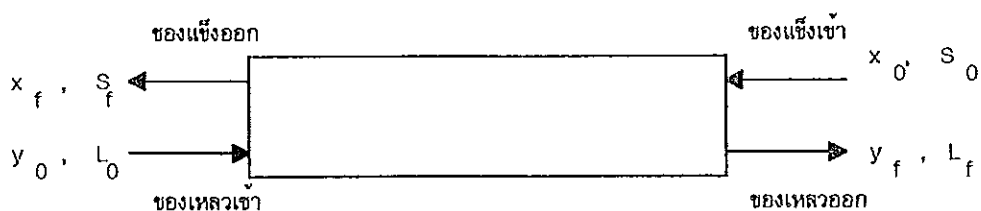
หมายเหตุ  $X_7$  คือความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเริ่มต้นก่อนสัมผัสกับเฟสของเหลว  
 $Y_7$  คือความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่ออกมาจากเครื่องสกัด  
 $Y_6$  คือความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของเหลวที่เริ่มปล่อยเข้าสู่เครื่องสกัด มีค่าประมาณ 0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ในความเป็นจริงจุดเก็บตัวอย่างที่ 0 สำหรับทั้งสองเฟสควรเป็นข้อมูลที่เก็บได้จากจุดที่อยู่ภายในเครื่องสกัดดังภาพประกอบ ซ.1 แต่ในการทดลองจริงไม่ได้เก็บข้อมูลตรงจุดนี้เอาไว้

ภาคผนวก ฉ. การทำดุลมวลและการหาผลได้สำหรับการสกัด

แบบไหลสวนทางย้อนกลับ

สำหรับการสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับ การไหลเข้าออกของเฟสของแข็งและเฟสของเหลวดังภาพประกอบ ฉ.1



ภาพประกอบ ฉ.1 การทำดุลมวลสารของระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง  
สำหรับการคำนวณผลได้

ดุลมวลของระบบการสกัด

$$x_0 S_0 + y_0 L_0 = x_f S_f + y_f L_f$$

ในที่นี้  $L_0$  มีค่าเท่ากับ ศูนย์ จะได้

$$y_f = \frac{(x_0 S_0 - x_f S_f)}{L_f} \quad (\text{ฉ1})$$

การคำนวณหาปริมาณผลได้ (yield)

การคิดปริมาณผลได้ สามารถคิดได้จากทั้งในเฟสของแข็งและเฟสของเหลว โดยการคิดจากสมการดุลมวลของระบบการสกัดแบบไหลสวนทาง ดังนี้

$$x_0 S_0 + y_0 L_0 = x_f S_f + y_f L_f$$

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ค่า  $S_0 \neq S_f$  และ  $L_0 \neq L_f$  จึงกำหนดให้

$$S = \frac{S_0 + S_f}{2} \quad \text{และ} \quad L = \frac{L_0 + L_f}{2}$$

แทนค่า จะได้  $x_0 - x_f = \frac{y_f L}{S}$

เมื่อ ดริฟท์ ( $\alpha$ ) =  $\frac{mL}{S}$  จะได้

$$x_0 - x_f = \frac{\alpha y_f}{m}$$

คูณด้วย  $\frac{x_0}{100}$  ทั้งสองข้างจะได้

$$\text{ผลได้ (ร้อยละ)} = \frac{(x_0 - x_f)}{x_0} \times 100 = \frac{\alpha y_f}{m x_0} \times 100 \quad (\text{ฉ2})$$



ภาคผนวก ญ. การคำนวณหาพารามิเตอร์เพื่อใช้ควบคุมระบบการสกัด  
แบบไหลสวนทางย้อนกลับ

1. การคำนวณหาระยะเวลาในการสกัด (retention time)

สมมติให้การเคลื่อนที่ของของแข็งภายในเครื่องสกัดโดยอาศัยการหมุนของสกรูลำเลียงเป็นแบบปลั๊ก (plug flow) โดยสมบูรณ์ นั่นคือไม่มีการเลื่อนไหลของของแข็งในระหว่างการลำเลียงในรางสกัด พบว่าระยะเวลาในการสกัด จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วย้อนของสกรู ระยะเวลาที่สกรูหมุนไปข้างหน้า และถอยหลัง จำนวนใบสกรู และร้อยละการหมุนไปข้างหน้าของสกรู ดังสมการ

$$RT = \frac{(NF)(TB+TF)}{[(SPF)(TF)-(SPB)(TB)]} \quad (\text{ญ.1})$$

หาร้อยละการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของของแข็ง (% forward progression) ได้ดัง

สมการ

$$\%FP = \frac{[(SPF)(TF)-(SPB)(TB)]100}{[(SPF)(TF)+(SPB)(TB)]} \quad (\text{ญ.2})$$

เมื่อ RT คือ ระยะเวลาที่ของแข็งอยู่ในระบบสกัด (นาที)

%FP คือ ร้อยละการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของของแข็ง

NF คือ จำนวนใบสกรูของเครื่องสกัด

TF คือ ระยะเวลาที่สกรูหมุนไปข้างหน้าในหนึ่งช่วงการหมุน (วินาที)

TB คือ ระยะเวลาที่สกรูหมุนถอยหลังในหนึ่งช่วงการหมุน (วินาที)

SPF คือ ความเร็วการหมุนของสกรูไปข้างหน้า (รอบต่อนาที)

SPB คือ ความเร็วการหมุนของสกรูถอยหลัง (รอบต่อนาที)

จากสมการ (ญ.1) และ (ญ.2) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$RT = \frac{(NF)(TB+TF)(100)}{\%FP[(SPF)(TF)+(SPB)(TB)]} \quad (\text{ญ.3})$$

2. ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วย้อนการหมุนของสกรูลำเลียง

กำหนดให้ ระยะเวลาในการสกัด (RT) เท่ากับ 50 , 70 และ 90 นาที

จำนวนใบสกรู (NF) 12 ใบ

ระยะเวลาที่สกรูหมุนไปข้างหน้า (TF) 25 วินาที

ระยะเวลาที่สกรูหมุนถอยหลัง (TB) 22 วินาที

ความเร็วการหมุนของสกรูไปข้างหน้า = ความเร็วการหมุนของสกรูถอยหลัง

จากสมการ (ญ.1)

$$RT = \frac{(NF)(TB+TF)}{[(SPF)(TF)-(SPB)(TB)]}$$

แทนค่า  $50 = \frac{(12)(25+22)}{SPF(25-22)}$

$$SPF = SPB = 3.76 \text{ รอบต่อนาที}$$

ในการทำงานเดียวกัน สามารถหาความเร็วรอบของสกรูลำเลียงเมื่อใช้เวลาในการสกัด 70 และ 90 นาที ได้เท่ากับ 2.69 และ 2.09 รอบต่อนาที ตามลำดับ

### 3. ตัวอย่างการหาร้อยละการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเปลือกสับปะรด

จากการที่ทราบค่าความเร็วรอบของสกรูลำเลียง เมื่อใช้เวลาในการสกัด 50 , 70 และ 90 นาที คือ 3.76 , 2.69 และ 2.09 รอบต่อนาที ความเร็วการหมุนของสกรูลำเลียงไปข้างหน้าเท่ากับความเร็วการหมุนของสกรูถอยหลัง และ ระยะเวลาหมุนของสกรูไปข้างหน้าต่อระยะเวลาการหมุนถอยหลังเท่ากับ 25/22 วินาที สามารถคำนวณหาร้อยละการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเฟสของแข็งได้ดังนี้

เมื่อความเร็วรอบการหมุนของสกรูเท่ากับ 3.76 รอบต่อนาที

จากสมการ (ญ.2)

$$\%FP = \frac{[(SPF)(TF)-(SPB)(TB)]100}{[(SPF)(TF)+(SPB)(TB)]}$$

แทนค่า  $\%FP = \frac{3.76(25-22)100}{3.76(25+22)}$

$$\%FP = 6.38$$

ในการทำงานเดียวกัน เมื่อใช้ความเร็วรอบการหมุนของสกรูเท่ากับ 2.69 และ 2.09 รอบต่อนาที จะได้ร้อยละการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของของแข็งเท่ากับ 6.38 เช่นเดียวกัน

ภาคผนวก ก. การจับกลุ่มสภาวะในการทดลอง สำหรับการประเมิน  
จำนวนไบออกท

ตาราง ฎ. 1 การจับกลุ่มความสัมพันธ์ระหว่างเวลา ตรวจจับ และอุณหภูมิในการสกัด ต่อจำนวนใบออก

การทดลองที่	ระยะเวลาสกัด (นาที)	ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	ตรวจจับ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	จำนวนใบออก จากการทดลองจริง	จำนวนใบออก จากสมการ (4.3)
1	50	3.76	1.0	55	4.25	8.95
4	50	3.76	1.5	55	5.80	8.95
7	50	3.76	2.0	55	5.14	8.95
10	50	3.76	1.0	62.5	5.13	8.95
13	50	3.76	1.5	62.5	14.6	8.95
16	50	3.76	2.0	62.5	9.58	8.95
19	50	3.76	1.0	70	8.75	8.95
22	50	3.76	1.5	70	22.8	8.95
25	50	3.76	2.0	70	7.81	8.95
2	70	2.69	1.0	55	3.21	4.18
5	70	2.69	1.5	55	3.21	4.18
8	70	2.69	2.0	55	3.67	4.18
11	70	2.69	1.0	62.5	2.73	4.18
14	70	2.69	1.5	62.5	2.94	4.18
17	70	2.69	2.0	62.5	2.74	4.18
20	70	2.69	1.0	70	2.26	4.18
23	70	2.69	1.5	70	3.89	4.18
26	70	2.69	2.0	70	3.38	4.18
3	90	2.09	1.0	55	2.40	1.50
6	90	2.09	1.5	55	2.25	1.50
9	90	2.09	2.0	55	2.25	1.50
12	90	2.09	1.0	62.5	2.23	1.50
15	90	2.09	1.5	62.5	2.29	1.50
18	90	2.09	2.0	62.5	2.02	1.50
21	90	2.09	1.0	70	1.71	1.50
24	90	2.09	1.5	70	2.15	1.50
27	90	2.09	2.0	70	2.30	1.50

ภาคผนวก ฎ. ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง

ตาราง ฎ.1 ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ ของเฟสของแข็ง สำหรับการทดลองชุดที่ 1 เมื่อใช้ค่า R ต่าง ๆ กัน

$l'/L'$	$x/x_0$			
	R=3.2 (ผลการทดลอง)	R=3.2 (ผลการทำนาย)	R=0.5	R=20
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.1	0.8704	0.9061	0.8770	0.9132
0.3	0.7083	0.7530	0.7002	0.7563
0.5	0.6000	0.6261	0.5825	0.6142
0.7	0.5219	0.5144	0.4996	0.4855
0.9	0.4842	0.4130	0.4372	0.3688
1.0	0.4041	0.3654	0.4109	0.3147

ตาราง ฎ.2 ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ ของเฟสของเหลว สำหรับการทดลองชุดที่ 1 เมื่อใช้ค่า R ต่าง ๆ กัน

$l'/L'$	$x/x_0$			
	R=3.2 (ผลการทดลอง)	R=3.2 (ผลการทำนาย)	R=0.5	R=20
0	0.4424	0.4488	0.4165	0.4846
0.1	0.4459	0.4390	0.4144	0.4494
0.3	0.3969	0.3829	0.3998	0.3393
0.5	0.3462	0.3075	0.3770	0.2363
0.7	0.1993	0.2283	0.3496	0.1430
0.9	0.0874	0.1512	0.3201	0.0584
1.0	0.0000	0.1141	0.3049	0.0192

ตาราง ฎ.3 ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ ของเฟสของแข็ง สำหรับการทดลองชุดที่ 1  
เมื่อใช้ค่า Bi ต่าง ๆ กัน

$l'/L'$	$x/x_0$			
	Bi=3.97 (ผลการทดลอง)	Bi=3.97 (ผลการทำนาย)	Bi=0.33	Bi= $\infty$
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.1	0.8704	0.9061	0.9735	0.8399
0.3	0.7083	0.7530	0.9223	0.6348
0.5	0.6000	0.6261	0.8731	0.4949
0.7	0.5219	0.5144	0.8252	0.3746
0.9	0.4842	0.4130	0.7783	0.2726
1.0	0.4041	0.3654	0.7552	0.2261

ตาราง ฎ.4 ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ ของเฟสของเหลว สำหรับการทดลองชุดที่ 1  
เมื่อใช้ค่า Bi ต่าง ๆ กัน

$l'/L'$	$x/x_0$			
	Bi=3.97 (ผลการทดลอง)	Bi=3.97 (ผลการทำนาย)	Bi=0.33	Bi= $\infty$
0	0.4424	0.4488	0.1731	0.5470
0.1	0.4459	0.4390	0.1704	0.5299
0.3	0.3969	0.3829	0.1532	0.4439
0.5	0.3462	0.3075	0.1275	0.3433
0.7	0.1993	0.2283	0.0977	0.2476
0.9	0.0874	0.1512	0.0662	0.1610
1.0	0.0000	0.1141	0.0502	0.1211

ตาราง ฏ5 ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ เมื่อ  $\alpha = 1.5$  เวลาในการสกัด 50 นาที  
 $D_S = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที (อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส)  
 $Bi \rightarrow \infty$  โดยที่ R ต่างกัน

เวลาในการสกัด (นาที)	ผลได้ (ร้อยละ)			
	R=1	R=2	R=20	R=100
1	41.20	42.01	44.86	45.34
5	49.32	49.32	52.83	53.40
10	56.09	56.52	60.48	61.20
30	67.40	69.97	77.80	79.04
50	70.87	75.20	85.88	87.43
70	72.44	77.83	90.36	92.03
90	73.34	79.39	93.08	94.78
110	73.92	80.41	94.85	96.49

ตาราง ฏ6 ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ เมื่อ  $\alpha = 1.5$  เวลาในการสกัด 50 นาที  
 $D_S = 6.08 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที (อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส)  
 $R=20$  โดยที่  $Bi$  ต่างกัน

เวลาในการสกัด (นาที)	ผลได้ (ร้อยละ)			
	$Bi=0.59$	$Bi=1.02$	$Bi=30.89$	$Bi=\infty$
1	5.23	8.22	42.85	44.86
5	9.44	14.10	50.52	52.83
10	14.28	20.60	58.01	60.48
30	29.86	39.90	75.53	77.80
50	41.23	52.56	84.05	85.88
70	49.88	61.44	88.88	90.36
90	56.65	67.98	91.90	93.08
110	62.09	72.97	93.88	94.85

ภาคผนวก ร การหาการกระจายของเวลาที่อยู่ในรางสก็ดของเฟสของแข็ง (residence time distribution)

การหาการกระจายของเวลาที่เฟสของแข็งอยู่ในรางสก็ด เป็นการทดสอบสมมติฐานของแบบจำลอง ที่สมมติให้การไหลของเฟสของแข็งผ่านรางสก็ดเป็นแบบปลั๊ก ซึ่งการหมุนของสกรูไปข้างหน้าและถอยหลังสลับกัน จะทำให้ของแข็งออกจากเครื่องสก็ดไม่พร้อมกัน

#### วิธีการทดลอง

นำชิ้นตัวอย่างเปลือกสับประดจำนวน 20 ชิ้น ทำเครื่องหมายโดยการผูกเชือกให้สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน เริ่มจับเวลาเมื่อป้อนเข้าสู่เครื่องสก็ด บันทึกเวลาที่ตัวอย่างแต่ละชิ้นออกจากเครื่องสก็ด นำเวลามาหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย

จากผลการทดลองการสก็ด เมื่อใช้เวลาในการสก็ด 70 นาที ดังตาราง ร.1

ตาราง ร.1 เวลาที่ชิ้นเปลือกสับประดอยู่ในรางสก็ด

ชิ้นที่	เวลาที่เปลือกสับประดอยู่ในรางสก็ด (นาที)
1	61.16
2	62.09
3	62.32
4	63.25
5	63.45
6	64.05
7	64.05
8	64.05
9	64.05
10	64.05
11	64.05
12	64.05
13	64.05
14	64.05
15	64.05
16	65.19
17	66.49
18	69.20
19	70.15
20	72.14



จากข้อมูลในตาราง รุ.1 พบว่าเวลาที่ของแข็งอยู่ในรางสกัดโดยเฉลี่ยประมาณ 64.80 นาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.73 นาที จะเห็นว่ามีเปลือกสับปะรดถึงร้อยละ 50 ที่ใช้เวลาอยู่ในรางสกัดเท่ากับคือ ประมาณ 64 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Siripatana (1986) ซึ่งพบว่ามีของแข็งร้อยละ 51.16 ที่ออกจากเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับพร้อมกัน ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่า การไหลของเฟสของแข็งในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางย้อนกลับเป็นแบบปลั๊ก ตรงกับข้อสมมติของแบบจำลอง Diffusion - Backmixing

### ภาคผนวก ข. การหา Number of transfer unit (NTU)

NTU คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบขนาดของอุปกรณ์ชนิด ดีฟเฟอเรนเชียล คอนแทคเตอร์ (differential contactor)

สามารถหาประสิทธิภาพในการสกัดของเครื่องสกัด โดยการหา NTU และ HTU ในที่นี้พิจารณาที่เฟสของแข็ง ดังนี้

$$NTU = \int \frac{dx}{x-x^*} \quad (๑๑)$$

หาความยาวเครื่องสกัดจาก

$$Z_T = HTU \times NTU \quad (๑๒)$$

เมื่อ  $Z_T$  คือ ความยาวของเครื่องสกัด

NTU คือ number of transfer unit

HTU คือ height of transfer unit

$$HTU = \frac{S/A}{K_x} \quad (๑๓)$$

ในที่นี้ S คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสของแข็งต่อพื้นที่หน้าตัด

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเครื่องสกัด

$K_x$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม

#### วิธีการหา NTU

เนื่องจากการสกัดเป็นแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง เราจึงหาประสิทธิภาพของเครื่องสกัดที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ โดยใช้หลักการของกระบวนการดูดซับ

$$NTU = \frac{x_0 - x_f}{\bar{\Delta x}_s} \quad (๑๔)$$

$$\bar{\Delta x}_s = \frac{(x_0 - x_0^*) - (x_f - x_f^*)}{\ln[(x_0 - x_0^*) / (x_f - x_f^*)]} \quad (๑๕)$$

$$y^* = mx^* \quad , \quad m = 1.14 \quad (๑๖)$$

ข้อมูลความเข้มข้นในเฟสของแข็ง และเฟสของแข็ง เฟสละ 7 จุด ดังนั้นจึงแบ่งการอินทิเกรตสำหรับหาค่า NTU ออกเป็น 6 ช่วง นำค่า NTU ที่ได้ในแต่ละช่วงมารวมกัน จะได้ NTU ของการทดลองแต่ละชุด

## ตัวอย่างการคำนวณหา NTU ของการทดลองชุดที่ 1

ตาราง ท.1 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการคำนวณ NTU

x	x*	x - x*	$\bar{\Delta x}_s$	$\Delta NTU$
100.29	45.00	55.29	48.50	0.2680
87.29	45.00	42.29	36.35	0.4471
71.04	40.05	30.99	28.02	0.3876
60.18	34.94	25.24	28.59	0.2742
52.34	20.11	32.23	35.85	0.1054
48.56	8.82	39.74	40.13	0.2001
40.53	0.00	40.53	-	-
				$\Delta NTU = 1.6825$