



ไฮโดรไดนามิกส์และการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก

ที่บรรจุของไหลนอน-นิวโตเนียน

Hydrodynamics and Mixing in Air-lift Bioreactor Containing Non-Newtonian Fluid

สุธา เกลาจีต

Sutha Klaocheed

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Biotechnology

Prince of Songkla University

2541

เลขหมู่ QA 929.5 ลย 2541 8.2
Bib Key 152837

(1)



ชื่อวิทยานิพนธ์ ไชโคโรไดนามิกส์และการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก
ที่บรรจุของไหลนอน-นิวโตเนียน

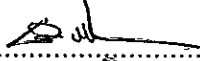
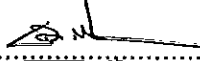
ผู้เขียน นาย สุธา เกลาฉัด


สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ

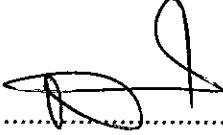
คณะกรรมการที่ปรึกษา

คณะกรรมการสอบ

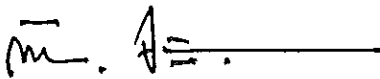
.....ประธานกรรมการ .....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ศิริพันธ์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ศิริพันธ์)

.....กรรมการ .....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข ประเสริฐสรรพ)

.....กรรมการ
(ดร. สุธรรม สุขมณี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ก้าน จันทร์พรหมมา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ไฮโดรไดนามิกส์และการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่บรรจุของไหลนอน-นิวโตเนียน
ผู้เขียน	นายสุธา เกลาณีต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีชีวภาพ
ปีการศึกษา	2541

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์และการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่บรรจุด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก ขนาดความจุ 30 ลิตร เส้นผ่าศูนย์กลางของถังหมักเท่ากับ 0.19 เมตร ความสูง 1.00 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดริฟเท่ากับ 0.13 เมตร ความสูง 0.71 เมตร มีการให้อากาศภายในท่อดริฟ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วน ไฮโดรไดนามิกส์ การผสมและการพัฒนาแบบจำลองของการผสม โดยใช้สารละลายแซนแทนกัมสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0-1.0 โดยน้ำหนัก แทนบรอทจริง ใช้อัตราการให้อากาศ 0 - 1.0 vvm ส่วนแรกเป็นการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ พบว่า การเพิ่มอัตราการให้อากาศทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเหลวเพิ่มขึ้นและเวลาในการวนครบรอบลดลง การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนทำให้การไหลวนลดลง เนื่องจากฟองอากาศที่ออกจากตัวให้อากาศเกิดการรวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่เคลื่อนที่ขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความปั่นป่วนมากขึ้นในท่อดริฟ แต่ในดาวนคัมเมอร์มีการเคลื่อนที่น้อยและสังเกตเห็นรูปแบบการไหลแบบพาราโบลา และบริเวณของเหลวอยู่นิ่งในส่วนที่ติดกับผนังของถังหมักและท่อดริฟในดาวนคัมเมอร์

ส่วนที่สองเป็นการศึกษาลักษณะการผสมโดยใช้เทคนิคการติดตามการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ชั้นแรกได้พัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ซึ่งประกอบด้วยพีเอชเซนเซอร์ 4 ตัว สามารถวัดพีเอชพร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่อง บันทึกผลการวัดด้วยคอมพิวเตอร์โดยผ่าน ADDA data acquisition card จากผลการทดลองนำไป

ศึกษาการตอบสนองของเทอร์เซอร์ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ขึ้นถัดมาใช้เครื่องมือดังกล่าวศึกษา เวลาที่ใช้ในการผสมและวิเคราะห์หลักไคการผสม พบว่า สารละลายแซนแทนความเข้มข้น ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักมีกลไกการผสมคล้ายคลึงกับการผสมในของไหลนิวโตเนียน (น้ำ) และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าน้ำ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสูงขึ้นเป็น ร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก มีกลไกการผสมที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และใช้เวลาในการผสม นานขึ้น

ส่วนที่สามได้พัฒนาแบบจำลองโครงข่ายของไซน โดยคำนึงถึงรูปแบบการไหลของ ของไหลภายในถังปฏิกรณ์และได้นำค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมีมารวม อยู่ในแบบจำลองดังกล่าวด้วย ผลการซิมูเลตพบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้มีความยืดหยุ่นกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ที่มีการพัฒนามาก่อนหน้านี้ และเมื่อนำผลการซิมูเลตมาเปรียบ เทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองการตอบสนองของเทอร์เซอร์พบว่า แบบจำลองที่พัฒนา ขึ้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แต่การซิมูเลตยังไม่จัดอยู่ในระดับที่ดีนัก จึงควรมีการพัฒนาการเขียนโปรแกรม model fitting สำหรับพีตเข้ากับข้อมูลที่ได้จากการทดลองต่อไป

Thesis Title	Hydrodynamics and Mixing in Air-lift Bioreactor Containing Non-Newtonain Fluid
Author	Mr. Sutha Klaocheed
Major Program	Biotechnology
Academic Year	1998

Abstract

In this work, hydrodynamics and mixing in an air-lift bioreactor containing non-Newtonain biopolymer was studied. The bioreactor capacity was 30 liter with 0.19 m in diameter and 1.0 m in height. The draft-tube was 0.13 m in diameter and 0.71 m in height. The air was introduced into the internal draft cavity.

This work was divided into three parts ; hydrodynamics, mixing and development of mixing models. The concentration range of xanthan solution used to represent real broth was 0 - 1.0 % by weight. The air flow rate was controlled between 0 - 1.0 vvm. Hydrodynamics observation revealed that increase in air flow rate resulted in stronger liquid movement, thus lower the circulation time. The increase in xanthan concentration reduced liquid circulation due to the coalescence of air bubble, forming fast-rising large bubbles. This resulted in an induced turbulence appearing in the draft internal, whereas the much lower movement and parabolic flow distribution across the section appeared in the downcommer. The stagnant zones were also observed at the reactor wall and the draft-tube boundary.

The second part concerned the study of mixing characteristics using tracer response technique. Firstly, data acquisition system for collecting tracer response

data was developed. It consists of four pH sensors generating signal simultaneously and continuously, fed into a microcomputer through ADDA data acquisition card. The performance of the system was impressive. Secondly, the system was used to study mixing time and analysis of mixing mechanisms. It was found that the solution containing 0.1 % xanthan behaved similarly as that of Newtonian fluid (water) but the mixing time was lower. As xanthan concentration increased (0.25 and 0.5 % by wt.) the mixing mechanisms were much more complex and the mixing time got much longer.

In the third part of the work a network-of-zone model was developed, taking into account flow pattern inside the reactor and the mass exchange rate in radial direction. The simulation showed that it is more flexible than previous model. There was a good agreement between the actual tracer response data and that obtained from simulation, though the agreement can be improved by developing a program for model fitting optimization techniques.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยรัตน์ ศิริพันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา และอุปสรรคต่าง ๆ ที่พบตลอดการวิจัย รวมทั้งคำแนะนำต่าง ๆ ในการเขียนวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาศรিত ทองอุไร กรรมการที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัย และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พูนสุข ประเสริฐสรรพ และ ดร. สุธรรม สุขมณี ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัย คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และวัสดุอุปกรณ์ ในการดำเนินงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณบุคคลากรในคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้การวิจัยดำเนินไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง ทุกคน ด้วยความเคารพรักอย่างที่สุดที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งในการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ทุก ๆ คน สำหรับกำลังใจ คำแนะนำ และการช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

สุธา เกลาณี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
<hr/>	
สารบัญ.....	(8)
รายการภาพ.....	(12)
ตัวย่อและสัญลักษณ์.....	(25)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
บทนำต้นเรื่อง.....	1
ตรวจเอกสาร.....	2
1. โครงสร้างและคุณสมบัติของแซนแธน.....	2
1.1 โครงสร้างของแซนแธนกัม.....	2
1.2 คุณสมบัติของแซนแธนกัม.....	4
2. การผลิตแซนแธนกัม.....	4
2.1 กระบวนการผลิตแซนแธนกัม.....	4
2.2 สภาวะที่ใช้ในการผลิตแซนแธนกัม.....	5
2.3 การเก็บเกี่ยวแซนแธนกัม.....	7
3. ถังหมักที่ใช้ในการผลิตแซนแธน.....	7
3.1 ถังหมักแบบไบพัคกาน.....	8

3.2	ถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์.....	8
3.3	ถังหมักแบบอากาศยก.....	10
4.	ไฮโดรไดนามิกส์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก.....	11
4.1	แก๊สโฮลด์อัป (Gas hold up).....	11
4.2	การไหลวนของของเหลว (Liquid circulation).....	13
5.	การผสม (Mixing).....	15
5.1	นิยามของการผสม.....	15
5.2	ระดับของการผสม (Degree of Mixing).....	15
5.3	รูปแบบของการผสม.....	17
5.4	การผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ.....	17
5.5	เทคนิคการตอบสนองของเทอร์เซอร์	18
5.6	สมการการคูณเทอร์เซอร์	20
6.	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการผสม	
	ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก.....	21
	วัตถุประสงค์.....	26
2	แนวคิดและการพัฒนา.....	27
1.	การพัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลการติดตาม	
	การตอบสนองของเทอร์เซอร์.....	27
1.1	ความจำเป็นในการเชื่อมต่อเครื่องวัดพีเอชกับเครื่อง	
	คอมพิวเตอร์.....	27

1.2 ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการเชื่อมต่อเครื่องวัดพีเอช กับคอมพิวเตอร์.....	28
1.3 การต่อเครื่องวัดพีเอชกับเอชทูทีการ์ดและคอมพิวเตอร์.....	28
1.4 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพีเอช.....	29
1.5 การแปลงค่าจากเครื่องวัดพีเอชเป็นค่าพีเอช.....	30
<hr/>	
2. การพัฒนาแบบจำลองการผสมสำหรับถังปฏิกรณ์ชีวภาพ	
แบบอากาศยก.....	32
2.1 แบบจำลองโครงข่ายของโชน.....	32
2.2 การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายของโชน.....	36
2.3 การหาผลเฉลยของแบบจำลอง.....	44
2.3.1 การหาค่า Q1, Q2 และ Q3 โดยวิธีเชิงวิเคราะห์.....	44
2.3.2 การหาค่า Q1, Q2 และ Q3 โดยวิธีเชิงตัวเลข.....	50
2.4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายของโชนที่พัฒนาขึ้น.....	53
3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ.....	68
วัสดุ.....	68
อุปกรณ์.....	68
วิธีการ.....	70
1. การศึกษารูปแบบการไหลและฟองอากาศ.....	70
2. การศึกษาความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว.....	72
2.1 การศึกษาความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวโดย วิธีติดตามอนุภาค.....	72

2.2 การวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวโดย	
วิธีการตอบสนองของเทอร์เซอร์.....	73
3. การศึกษาลักษณะการผสมโดยวิธีการติดตามการตอบสนอง	
ของเทอร์เซอร์.....	73
4. การศึกษากลไกการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก.....	73
4 ผลและวิจารณ์.....	76
1. ผลการศึกษารูปแบบการไหลและฟองอากาศ.....	76
1.1 ผลการศึกษารูปแบบการไหลโดยทั่วไปในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ	
แบบอากาศยก.....	76
1.2 ผลการศึกษารูปแบบการไหลในน้ำ.....	78
1.3 ผลการศึกษารูปแบบการไหลในสารละลายแซนแทน.....	83
2. ผลการศึกษาความเร็วและเวลาในการวนครบรอบ.....	96
3. ผลการศึกษาลักษณะการผสมโดยวิธีติดตามการตอบสนองเทอร์เซอร์....	102
4. ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากการชิมิวเลตแบบจำลอง	
กับข้อมูลการผสมที่ได้จากการทดลอง.....	114
4.1 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากการชิมิวเลตแบบจำลอง	
โครงข่ายของโซนกับข้อมูลการผสมที่ได้จากการทดลอง.....	114
4.2 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากการชิมิวเลตแบบจำลอง	
โครงข่ายของโซนที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลการผสมที่ได้จากการทดลอง..	120
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	137
สรุป.....	137

ข้อเสนอแนะ.....	142
เอกสารอ้างอิง.....	145
ภาคผนวก.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	172

รายการภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของแซนแนน	3
1.2 ขั้นตอนของกระบวนการหมักแซนแนน	6
1.3 ขั้นตอนในการเก็บเกี่ยวแซนแนนโดยวิธีตกตะกอนด้วยแฮลคอกซอลด์	7
1.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก	14
1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของการผสมกับเวลาในการผสม	
1.6 ระบบกระบวนการแบบต่อเนื่อง ในการศึกษารูปแบบการผสม	18
1.7 การตอบสนองของเทรชเชอริในระบบที่มีการผสมแบบปลั๊กตามทฤษฎี	19
1.8 ลักษณะการตอบสนองของเทรชเชอริในการผสมแบบต่าง ๆ	20
1.9 การวัดการตอบสนองอิมพัลส์	20
1.10 แบบจำลองของการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกของ Merchuk และ Yungger (1990)	22
1.11 แบบจำลองโครงข่ายของไซน	24
2.1 การต่อสายสัญญาณจากพีซีเอ็มไอเตอร์เข้ากับ A/D card	29
2.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการรับและบันทึกข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์	31
2.3 การเปรียบเทียบผลการซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone กับแบบจำลอง Merchuk และคณะ (1990) เมื่อ $N_1 = 1$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในไซนที่เหลือ	33
2.4 ผลการซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้น	35

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.5 การไหลของของไหลนิวโตเนียนภายในท่อทรงกระบอก	37
2.6 การไหลของของไหลนิวโตเนียนภายในท่อ 2 ชั้น	37
2.7 แบบจำลองโครงข่ายของโซนที่มีการพัฒนาแล้ว	39
2.8 แบบจำลองโครงข่ายของโซนที่มีการพัฒนาแล้ว	40
2.9 การแลกเปลี่ยนแปลงมวลที่เกิดขึ้นระหว่างเซลล์	41
2.10 การแบ่งพื้นที่ในส่วนไรเซอร์ตามแบบจำลองโครงข่ายของโซนที่พัฒนาขึ้น	45
2.11 การแบ่งพื้นที่ในส่วนดาวนดัมเมอร์ตามแบบจำลองโครงข่ายของโซนที่พัฒนาขึ้น	52
2.12 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมี	55
2.13 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมี	56
2.14 ผลการซิมูเลตเมื่อกำหนดค่า $K=1$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซน โดยที่ $N_1=N_2=N_3=N_4=n$	58
2.15 ผลการซิมูเลตเมื่อกำหนดค่า $K=1$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซน โดยที่ $N_1=N_2=1, N_3=N_4=n$	59
2.16 ผลการซิมูเลตเมื่อกำหนดค่า $K=0.007$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซน โดยที่ $N_1=N_2=N_3=N_4=n$	60
2.17 ผลการซิมูเลตเมื่อกำหนดค่า $K=0.007$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซน โดยที่ $N_1=N_2=N_3=N_4=n$	61

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.18 ผลการซิมิวเลตเมื่อกำหนดค่า $K=0.007$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซน โดยที่ $N_1=N_2=1, N_3=N_4=n$	62
2.19 ผลการซิมิวเลตเมื่อกำหนดค่า $K=0.007$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซน โดยที่ $N_1=N_2=1, N_3=N_4=n$	63
2.20 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมิวเลตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย เมื่อกำหนดค่า $K = 1, N_1$ และ $N_3 = 2, N_2$ และ $N_4 = 10$	66
2.21 ผลการซิมิวเลตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย เมื่อกำหนดค่า $K = 0.007, N_1$ และ $N_3 = 2, N_2$ และ $N_4 = 10$	67
3.1 ก. ดึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่ใช้ในงานวิจัย ข. ลักษณะตัวให้อากาศ	69
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์ในการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์	72
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการศึกษาความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวด้วยวิธีการตอบสนองของเทรซเซอร์	74
3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ในการศึกษาลักษณะการผสมด้วยวิธีติดตามการตอบสนองของเทรซเซอร์	75
4.1 รูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก	76
4.2 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm	79
4.3 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm	80

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.64 wvm	81
4.5 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ อัตราการให้อากาศ 1.0 wvm	82
4.6 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.2 wvm	88
4.7 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.46 wvm	89
4.8 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.64 wvm	90
4.9 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 1.0 wvm	91
4.10 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.2 wvm	92
4.11 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.46 wvm	93

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลาย แซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.64 wvm	94
4.13 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลาย แซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 1.0 wvm	95
4.14 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวในดาวน์คัมเมอร์กับความเร็ว ของอากาศ	97
4.15 เวลาในการวนครบรอบ (tc) กับความเร็วของอากาศ	99
4.16 เปรียบเทียบลักษณะการไหลที่เกิดจากฟองอากาศที่มีขนาดที่แตก ต่างกันได้สังเกตได้จากการทดลองในน้ำและในสารละลายแซนแทน	101
4.17 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำที่อัตราการให้อากาศ 0.2 wvm	103
4.18 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำที่อัตราการให้อากาศ 0.46 wvm	103
4.19 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำที่อัตราการให้อากาศ 0.64 wvm	104
4.20 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำที่อัตราการให้อากาศ 1.0 wvm	104
4.21 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.2 wvm	106
4.22 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.46 wvm	106
4.23 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.64 wvm	107

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.24 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m	107
4.25 รูปแบบการไหลของของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก	108
4.26 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m	110
4.27 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.64 w/m	110
4.28 รูปแบบการไหลของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	111
4.29 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m	112
4.30 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.64 w/m	112
4.31 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m	113
4.32 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของไซน กับ การทดลองในตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.2 w/m เมื่อ กำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=5$, $N_3=2$, $N_4=5$, $Q=2.4$ ลูกบาศก์เมตรต่อ ชั่วโมง	116

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.33 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=5$, $N_3=2$, $N_4=5$, $Q=2.8$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	116
4.34 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=5$, $N_3=2$, $N_4=5$, $Q=2.9$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	117
4.35 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=5$, $N_3=2$, $N_4=5$, $Q=3.0$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	117
4.36 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=4$, $N_3=2$, $N_4=4$, $Q=2.2$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	118
4.37 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=4$, $N_3=2$, $N_4=4$, $Q=2.5$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	118

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.38 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4, Q=2.7$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	119
4.39 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4, Q=2.9$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	119
4.40 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=10, N_3=2, N_4=10$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที	122
4.41 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=10, N_3=2, N_4=10$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที	122
4.42 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=10, N_3=2, N_4=10$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที	123
4.43 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=8, N_3=2, N_4=8$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	123

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.44 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=8$, $N_3=2$, $N_4=8$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	124
4.45 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=8$, $N_3=2$, $N_4=8$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	124
4.46 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=8$, $N_3=2$, $N_4=8$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	125
4.47 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=8$, $N_3=2$, $N_4=8$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	125
4.48 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=8$, $N_3=2$, $N_4=8$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	126
4.49 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=6$, $N_3=2$, $N_4=6$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	126

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.50 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=6$, $N_3=2$, $N_4=6$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	127
4.51 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=6$, $N_3=2$, $N_4=6$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที	127
4.52 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.1% แชนแธน อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=6$, $N_3=2$, $N_4=6$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 เมตรต่อวินาที	128
4.53 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ใน 0.1% แชนแธน อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=6$, $N_3=2$, $N_4=6$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 เมตรต่อวินาที	128
4.54 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ใน 0.1% แชนแธน อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=6$, $N_3=2$, $N_4=6$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 เมตรต่อวินาที	129
4.55 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.1% แชนแธน อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2$, $N_2=5$, $N_3=2$, $N_4=5$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที	129

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 4.56 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ใน 0.1% แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=5, N_3=2, N_4=5$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที 130
- 4.57 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ใน 0.1% แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=5, N_3=2, N_4=5$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที 130
- 4.58 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.1% แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=5, N_3=2, N_4=5$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.23 เมตรต่อวินาที 131
- 4.59 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ใน 0.1% แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=5, N_3=2, N_4=5$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.23 เมตรต่อวินาที 131
- 4.60 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ใน 0.1% แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=5, N_3=2, N_4=5$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.23 เมตรต่อวินาที 132
- 4.61 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.1% แชนแนล อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 เมตรต่อวินาที 132

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.62 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ใน 0.1% แชนแชน อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 เมตรต่อวินาที	133
4.63 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ใน 0.1% แชนแชน อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4$ ค่า $K=1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 เมตรต่อวินาที	133
4.64 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.25% แชนแชน อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=10, N_3=2, N_4=10$ ค่า $K=0.007$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 เมตรต่อวินาที	134
4.65 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ใน 0.25% แชนแชน อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=10, N_3=2, N_4=10$ ค่า $K=0.007$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 เมตรต่อวินาที	134
4.66 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.25% แชนแชน อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=8, N_3=2, N_4=8$ ค่า $K=0.01$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.15 เมตรต่อวินาที	135
4.67 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ใน 0.25% แชนแชน อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=8, N_3=2, N_4=8$ ค่า $K=0.01$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.15 เมตรต่อวินาที	135

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.68 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.5% แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1=1$, $N_2=6$, $N_3=1$, $N_4=6$ ค่า $K=0.007$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.018 เมตรต่อวินาที	136
4.69 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.5% แชนแนล อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1=1$, $N_2=2$, $N_3=1$, $N_4=2$ ค่า $K=0.01$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.02 เมตรต่อวินาที	136
4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการหมักและการแบ่งปัญหาออกเป็นส่วนย่อย	144

ตัวย่อและสัญลักษณ์

- A_1 = พื้นที่หน้าตัดของรูปที่ 1 , รูปที่ 2 และรูปที่ 3
- A_d = พื้นที่หน้าตัดในโซนดาวนคัมเมอร์
- A_r = พื้นที่หน้าตัดในโซนไรเซอร์
- a_b = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างของเหลวกับอากาศ เทียบกับปริมาตรของของเหลว
- a_L = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างของเหลวกับอากาศ เทียบกับปริมาตรของของเหลว
- C_i = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ในเซลล์ที่ i
- $C_{i,1}$ = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ในเซลล์ที่ i รูปที่ 1
- $C_{i,2}$ = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ในเซลล์ที่ i รูปที่ 2
- $C_{i,3}$ = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ในเซลล์ที่ i รูปที่ 3
- C_∞ = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่เวลา $t = \infty$ หลังเติมเทรซเซอร์
- ΔC = ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ กับที่เวลา $t = \infty$
- d_b = ขนาดของฟองอากาศ
- ϵ = ปริมาณแก๊สไฮโดรเจน
- ϵ_d = ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในโซนดาวนคัมเมอร์
- ϵ_r = ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในโซนไรเซอร์
- K_1 = อัตราแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมีระหว่างรูปที่ 1 กับรูปที่ 2
- K_2 = อัตราแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมีระหว่างรูปที่ 2 กับรูปที่ 3
- K_a = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

N_1	=	จำนวนเซลล์ในโซนส่วนบน
N_2	=	จำนวนเซลล์ในโซนดาวน์คัมเมอร์
N_3	=	จำนวนเซลล์ในโซนส่วนฐาน
N_4	=	จำนวนเซลล์ในโซนโรเซอ์
Q	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
Q_i	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรในรูปที่ i
t_c	=	เวลาในการวนครบรอบ
t_m	=	เวลาในการผสม
U_H	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน
U_{Lc}	=	ความเร็วในการไหลวนของของเหลว
V_G	=	ปริมาตรของอากาศ
V_i	=	ปริมาตรในเซลล์ที่ i ในแบบจำลองโครงข่ายของโซน
$V_{i,1}$	=	ปริมาตรในเซลล์ที่ i รูปที่ 1
$V_{i,2}$	=	ปริมาตรในเซลล์ที่ i รูปที่ 2
$V_{i,3}$	=	ปริมาตรในเซลล์ที่ i รูปที่ 3
V_L	=	ปริมาตรของของเหลว
x_c	=	ระยะทางในการไหลวนของของเหลว
ρ	=	ความหนาแน่น
μ	=	ความหนืด (Pa.s)

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

พอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากจุลินทรีย์ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน ซึ่งมีความซับซ้อนที่ก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างการหมักเป็นอย่างมาก แต่ในขณะเดียวกัน ความต้องการการใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์มีสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแซนแทนกัม เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้กันมากที่สุดในบรรดาพอลิเมอร์ที่ได้จากจุลินทรีย์ (Cottrell and Kang, 1978; Kennedy and Bradshaw, 1984) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่พิเศษและไม่เหมือนกับกัมชนิดอื่น

แซนแทนกัมเป็นพอลิเมอร์ประเภทเฮเทอโรโพลีแซคคาไรด์ที่ผลิตออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular heteropolysaccharide) โดยการหมักของแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* (Funahashi et al, 1988 ; Silman and Rogovin, 1970) สารละลายแซนแทนกัมจะมีทั้งความหนืดและความเป็นขูโดพลาสติกสูง มีความคงตัวในช่วงพีเอช, อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเกลือที่กว้าง เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้ จึงทำให้มีการนำแซนแทนมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมเภสัช เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความเข้มข้น (thickening agent), สารให้ความคงตัว (stabilizers) สารหล่อลื่น (lubricant) ฯลฯ ในกระบวนการหมักแซนแทนพบว่า หลังจากการหมักดำเนินไประยะหนึ่ง ความเข้มข้นของแซนแทนกัมและความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุให้อัตรากาการผลิตผลผลิตจำเพาะลดลง เนื่องจากการถ่ายโอนออกซิเจนไปยังจุลินทรีย์ถูกจำกัด (Jana and Ghosh, 1995) จึงได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนารูปแบบของถังหมักชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ได้รูปแบบที่มีความเหมาะสมและให้ผลผลิตแซนแทนที่สูงขึ้น

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการผลิตแซนแทนกัม เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ง่ายในการใช้งาน และใช้กำลังงานน้อยในการหมัก นักวิจัยหลายท่านได้พยายามศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อ

ประสิทธิภาพของการใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก แต่มักศึกษาโดยใช้ของไหลชนิด
เหนียวซึ่งมีลักษณะทางรีโอโลยีที่ไม่ซับซ้อนเหมือนของไหลชนิดนิวโตเนียน เช่น แชนแนลบรอน

งานวิจัยครั้งนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาไฮโดรไดนามิกส์และการผสมของแชนแนลแกม
ซึ่งเป็นของไหลชนิดนิวโตเนียนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก โดยศึกษาผลของอัตรา
การให้อากาศต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวและเวลาในการวนครบรอบ และ
ศึกษาลักษณะของการผสมโดยวิธีวัดการตอบสนองของความเข้มข้นของเทรเซอร์ จากนั้นนำ
ผลการศึกษาดังกล่าวมาพัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การผสมที่เกิดขึ้นภายใน
ในถังปฏิกรณ์

ผลจากการวิจัยครั้งนี้ คาดว่าจะสามารถใช้เป็นส่วนประกอบส่วนหนึ่งของข้อมูลพื้น
ฐานของการวิจัยเพื่อออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ชีว
ภาพต่อไป

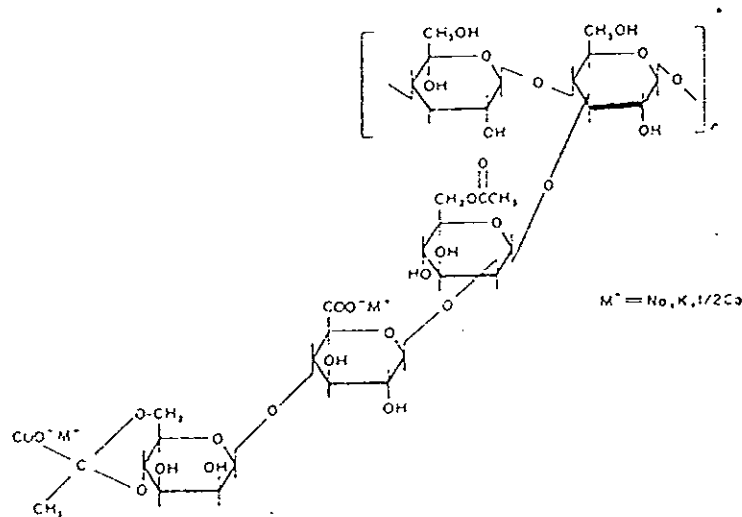
ตรวจเอกสาร

1. โครงสร้างและคุณสมบัติของแชนแนลแกม

ปี ค.ศ. 1960 USDA (United States Department of Agriculture) ได้รายงานผล
การวิจัยเพื่อพัฒนาการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยพบพอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากกระบวนการ
หมักแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคพืช หน้าที่โดย
ธรรมชาติของแชนแนลแกมมีหน้าที่เป็นตัวช่วยในการถ่ายโอน (transport agent), เป็นชั้นป้องกัน
(protective layer) และช่วยอุ้มน้ำ (water retaining agent) โดยกล่าวว่า พอลิเมอร์ดัง
กล่าวนี เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีคุณสมบัติเฉพาะตัว
ที่แตกต่างจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น หลังจากนั้นก็ได้มีการศึกษาการผลิตพอลิเมอร์ชนิดนี้กัน
อย่างมาก เพื่อที่จะนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม จนในที่สุดก็ได้ผลิตออกมาในรูปแบบของ
การค้า โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้รู้จักกันในชื่อของ แชนแนลแกม (Godet, 1973)

1.1 โครงสร้างของแซนแทนกัม

Margaritis และ Pace (1981) รายงานว่าโครงสร้างและองค์ประกอบของพอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากจุลินทรีย์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของจุลินทรีย์ แหล่งของสารตั้งต้น และสภาวะที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของแซนแทน

ที่มา : Margaritis และ Pace (1985)

ภาพที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของแซนแทนกัม ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่มีโครงสร้างที่ซ้ำกัน (repeating unit) ของโมโนเมอร์ที่ประกอบด้วย β -D-glucose จับกันที่ตำแหน่งที่ 1 และ 4 คล้ายกับโมเลกุลของเซลลูโลสและยังประกอบด้วย 2 โมเลกุลของ mannose และ 1 โมเลกุลของ gluconic acid เป็นโซ่ข้าง (side chain) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยกลุ่มของไพรุวิกปริมาณร้อยละ 2-6 และกลุ่มของอะซิติลร้อยละ 4.5 (Sandford, 1979; Margaritis and Pace, 1985) Demain และคณะ (1981) ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของโมโนเมอร์ใน

โครงสร้างของแซนแทนระหว่าง D-glucose:D-mannose:D-gluconic acid เป็น 2:2:1 และ ยังประกอบด้วยหมู่อะซิติกร้อยละ 4.7 Cadmus และคณะ (1978) พบว่าตำแหน่งของ D-mannose จะมีกลุ่มของไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 4 และ 6 ของ D-mannose ตัวสุดท้าย ส่วนกลุ่มของอะซิติกจะจับที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 6 ของ D-mannose ที่ไม่ใช่ตัวสุดท้าย

1.2 คุณสมบัติของแซนแทนกัม

แซนแทนกัมมีคุณสมบัติเป็นสารจำพวกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) ที่ละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ในของเหลวหลายชนิดเช่น กลีเซอรอล, ethylene glycol, formamide, acids, alkalis, brine และสารละลายน้ำที่ประกอบด้วย methanol, ethanol และ isopropanol ทำให้สารละลายมีความหนืดสูง คุณสมบัติของแซนแทนทำให้เกิดสารละลายที่มีความข้นสูง ทำให้เกิดการแขวนลอยของของเหลวที่ไม่ละลายน้ำรวมทั้งการแขวนลอยของของแข็ง ทำให้กรดและด่างมีความข้นและมีความหนืดที่อุณหภูมิห้อง สารละลายที่ประกอบด้วยแซนแทนจะมีลักษณะเป็นซูดพลาสติก มีความหนืดสูงที่อัตราการเขื่อนต่ำและความหนืดลดลงเมื่ออัตราการเขื่อนเพิ่มขึ้น

ในขณะที่พอลิเมอร์ชนิดอื่น มีคุณสมบัติเพียงหนึ่งหรือสองอย่างจากที่กล่าวมาทั้งหมด มีเพียงแซนแทนเท่านั้นที่มีคุณสมบัติครบทุกอย่าง (Godet, 1973) ด้วยเหตุนี้แซนแทนกัมจึงกลายเป็นพอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์ที่ใช้กันมากที่สุด

แซนแทนกัมถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมทางเคมี เพื่อทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้เกิดการแขวนลอยที่ดี ทำให้เกิดการคงตัว ทำให้เกิดเจล องค์การอาหารและยา (FDA) ได้อนุญาตให้มีการใช้แซนแทนในผลิตภัณฑ์อาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1969 (Cottrell and Kang, 1978 ; Speer and Tung ,1988)

2. การผลิตแซนแทน

2.1 กระบวนการผลิตแซนแทน

แซนแทนกัม ถูกผลิตขึ้นโดยกระบวนการหมักในถังหมักระบบเปิดที่ประกอบด้วย การให้อากาศและป้องกันการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่น วัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นแหล่ง

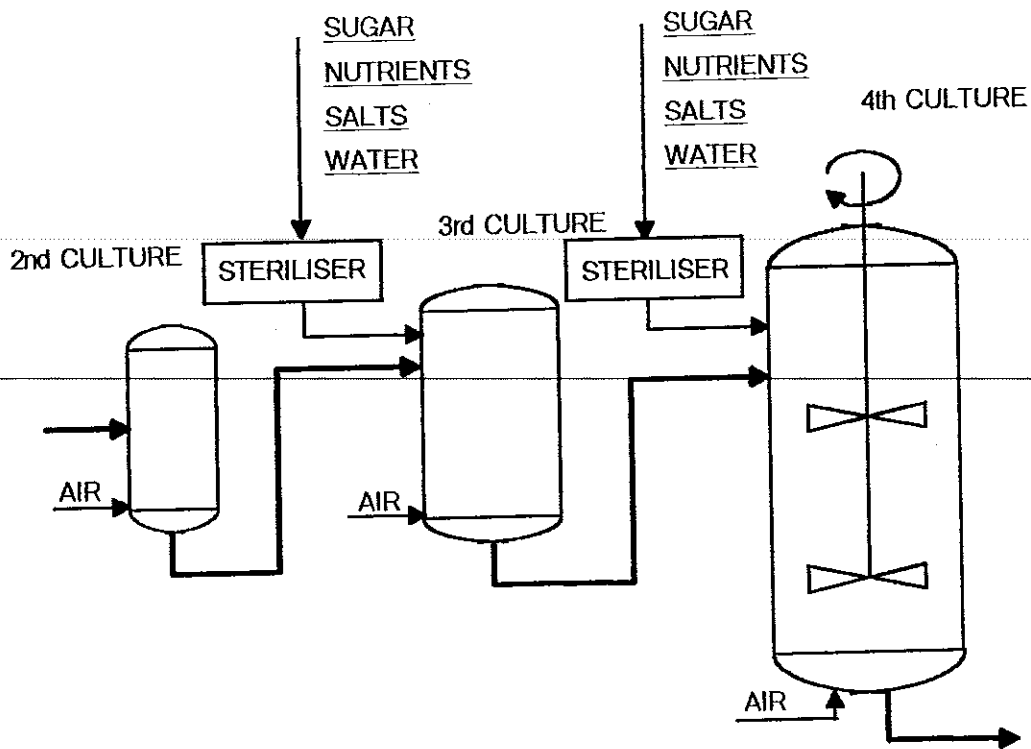
คาร์โบไฮเดรตอาจจะเป็นน้ำตาลหรือวัตถุดิบที่ให้น้ำตาลเช่น com syrups, beat หรือ cane molass, dextrose, sucrose ขึ้นอยู่กับต้นทุนเป็นพื้นฐานในการตัดสินใจ

แหล่งไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงเชื้อมีความจำเป็นในการสังเคราะห์โปรตีน ซึ่งรวมไปถึงเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของแหล่งคาร์บอนไปเป็นแซนแทนเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูง มีการพบว่า ปอยครั้งที่ไนโตรเจนที่เกินความต้องการทำให้เกิดการยับยั้งการสร้างพอลิเมอร์ (Souw and Demain, 1979)

กระบวนการหมักประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังภาพที่ 1.2 เริ่มจากการ inoculate เชื้อจาก slants ไปยังฟลาस्कขนาดประมาณ 1 ลิตร และจากฟลาस्कไปยัง seed culture จากนั้น inoculate ไปยังถังหมักขนาดใหญ่ โดยใช้หัวเชื้อประมาณร้อยละ 1 อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักคือ 28 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการหมัก 60 - 76 ชั่วโมง ปัจจัยที่เป็นสิ่งจำกัดของการหมัก คือ ความหนืดของน้ำหมักที่สูงขึ้น ทำให้การแพร่ของออกซิเจนในช่วงท้ายของการหมักเป็นไปได้ยากเมื่อสิ้นสุดการหมักน้ำหมักจะผ่านท่อที่มีการให้ความร้อนด้วยไอน้ำ (steam-sterilized) เพื่อทำให้จุลินทรีย์ทั้งหมดตาย ซึ่งพบว่า *X. campestris* ไม่ทนทานต่อความร้อน

2.2 สภาวะที่ใช้ในการหมักแซนแทน

ได้มีการศึกษาสภาวะการหมักที่เหมาะสมสำหรับ *X. campestris* ในการผลิตพอลิแซคคาไรด์กันอย่างมากมายเนื่องจากมีการใช้พอลิเมอร์ชนิดนี้ในเชิงอุตสาหกรรมแล้ว Cadmus และคณะ (1978) เลี้ยง *X. campestris* ในถังหมักขนาด 20 ลิตร สังเกตพบว่าเมื่อมีการให้อากาศในอัตราที่ต่ำ และไนโตรเจนจำกัด พอลิเมอร์ที่ได้มีไพรวุเทในปริมาณที่ต่ำ ในขณะที่พอลิเมอร์ที่ได้จากการให้อัตราการให้อากาศที่สูงกว่าและมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่า จะมีไพรวุเทเป็นองค์ประกอบในระดับปกติ ถึงแม้ว่าการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพเช่น แซนแทน จะกระทำกันภายใต้สภาวะที่มีการให้อากาศ แต่ก็ปรากฏว่ามีรายงานการหมัก *X. campestris* ภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งสามารถผลิตแซนแทนที่มีไพรวุเทต่ำได้ โดยผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มีลักษณะของความหนืดที่ใช้ประโยชน์เป็นสารเพิ่มความหนืด สำหรับการเก็บเกี่ยว (recovery) น้ำมัน



ภาพที่ 1.2 ขั้นตอนของกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

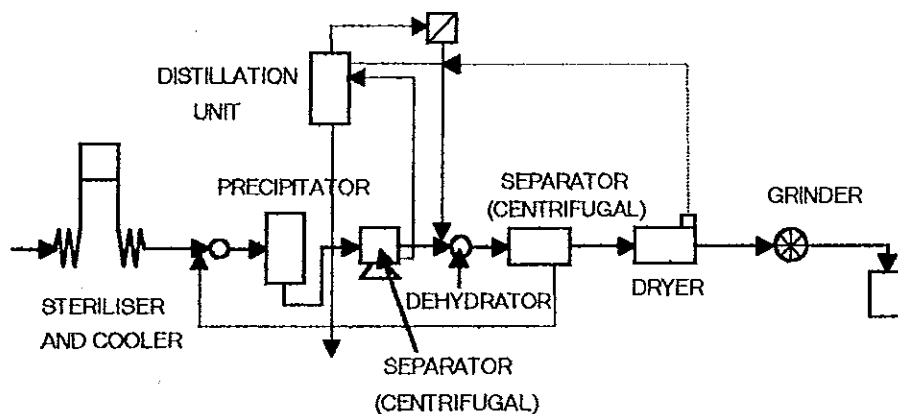
ที่มา : Godet (1973)

การผันแปรของพารามิเตอร์อีกหลายตัวที่มีผลต่อการผลิตแซนแทน เช่น พีเอชในอาหาร เมื่อไม่มีการควบคุม พีเอชจะลดลงในระหว่างการหมักเนื่องจากการเกิดขึ้นของกรดอินทรีย์ และส่วนที่เป็นอนุโมลกรดที่อยู่ในโมเลกุลของแซนแทน ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมการหมักให้มีพีเอชที่เหมาะสมที่ พีเอช 7 โดยการใช้ บัฟเฟอร์หรือการเติมเบสในระหว่างการหมัก คุณสมบัติของการหมักก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตแซนแทน คุณสมบัติที่เหมาะสมคือ 28 องศาเซลเซียส ในบางรายงานมีการกำหนดสภาวะการหมักเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก ให้พีเอชเท่ากับ 5 อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส ในช่วงที่มีการเจริญเติบโตและการสร้างมวลชีวภาพ และเมื่อมีการสร้างแซนแทนเกิดขึ้น กำหนดให้พีเอชเท่ากับ 7 และอุณหภูมิเท่ากับ 33 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่านี้จะทำให้แซนแทนมีความหนืดลดลง

2.3 การเก็บเกี่ยวแซนแทนกัม

การเก็บเกี่ยวพอลิเมอร์ชีวภาพจากน้ำหมัก แสดงในภาพที่ 1.3 ทำได้โดยการตกตะกอนกัม ด้วยการเติมแอลกอฮอล์ลงไปใต้น้ำหมัก แอลกอฮอล์ที่ละลายน้ำได้ทุกตัวสามารถใช้ตกตะกอนแซนแทนกัมได้ นำน้ำหมักที่ผสมแอลกอฮอล์แล้วเข้าเครื่องกรองหรือเซนติฟิวส์ นำตะกอนที่ได้จากการแยกล้างด้วย fresh solvent แล้วผ่านเครื่องกรองหรือเซนติฟิวส์อีกครั้งจากนั้นจึงทำให้แห้งด้วย hot air dryer

Gonzales และคณะ(1989) รายงานว่า สภาพะที่ดีที่สุดในการเก็บเกี่ยวแซนแทนกัมคือ ใช้เอทานอลร้อยละ 60 เกลือโปแตสเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส สามารถเก็บเกี่ยวแซนแทนได้ถึงร้อยละ 89-90



ภาพที่ 1.3 ขั้นตอนในการเก็บเกี่ยวแซนแทนโดยวิธีตกตะกอนด้วยแอลกอฮอล์

ที่มา : Godet (1973)

3. ถังหมักที่ใช้ในการผลิตแซนแทน

ในระยะแรก การผลิตแซนแทนกระทำกันในถังหมักแบบกวนที่มีการให้อากาศ โดยกระบวนการหมักแบบกะ จากนั้นพัฒนามาเป็นแบบต่อเนื่อง เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหารให้ดีขึ้น แต่ปรากฏว่าต้นทุนในการผลิตยังสูง จึงมีความพยายามจะลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง จึงได้พยายามใช้ถังหมักชนิดต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการ

ผลิตแซนแรน เช่น ถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์ และถังหมักแบบอากาศยก แต่จนถึงปัจจุบันก็ยังไม่สามารถสรุปได้ว่า ถังหมักชนิดใดจะมีความเหมาะสมที่สุดในการผลิตแซนแรน เนื่องจากถังหมักแต่ละชนิดนั้นมีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกันไป ซึ่งนักวิจัยหลายท่านที่สนใจในการศึกษาการผลิตแซนแรนได้พยายามทำการศึกษาเพื่อหาข้อยุติดังกล่าว

3.1 ถังหมักแบบใบพัดกวน

ในการพัฒนาประสิทธิภาพของถังหมักแบบกวนเพื่อใช้ในการผลิตแซนแรน โดยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชนิด, ขนาด และจำนวนของใบพัดชนิดต่าง ๆ Johnson และ Hubbard (1974), Hubbard และ Williams (1977) และ Deckwer และคณะ (1990) ระบุว่า ใบพัดแบบเทอร์ไบน์ที่เป็นแผ่นตรงไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตแซนแรน Solomon และคณะ (1981) พบว่า การใช้ใบพัดแบบเทอร์ไบน์ที่เรียบตรงร่วมกับใบพัดแบบแผ่นเฉียง แทนการใช้ใบพัดแบบเทอร์ไบน์สองใบทำให้กำลังในการผสมลดลงอย่างเห็นได้ชัด Balmer และคณะ (1987) ได้ออกแบบใบพัดที่เรียกว่า ใบพัดแบบโปรเคม (Prochem) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนออกซิเจน พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนได้ถึงร้อยละ 20 ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม Gbewonyo และคณะ (1987) พบว่า ใบพัดแบบโปรเคมสามารถเพิ่มความสามารถในการทำงานโดยใช้กำลังเพียงร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับที่ต้องใช้สำหรับใบพัดแบบรัสตันเทอร์ไบน์ (Rushton turbine) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ได้จากการใช้ใบพัดแบบโปรเคมมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าที่ได้จากการใช้ใบพัดแบบเทอร์ไบน์

3.2 ถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์

ในบางครั้งการหมักต้องการการกวนอย่างเบา ๆ เช่น การเพาะเนื้อเยื่อของสัตว์ ซึ่งถังหมักทั้งแบบกวนด้วยใบพัดหรือแบบชนิด ไม่สามารถใช้ได้เพราะแรงเกินไปจึงมีถังหมักอีกแบบหนึ่ง อาศัยการเคลื่อนตัวของก๊าซในของเหลวช่วยให้เกิดการผสม ตลอดจนถ่ายเทความร้อนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากถังหมักแบบนี้เรียกว่าถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์ (Bubble column)

ถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์เป็นถังหมักที่มีรูปร่างทรงกระบอกกลม อากาศจะเข้าที่ส่วนล่างของถังผ่านทางตัวให้อากาศซึ่งสามารถออกแบบได้หลายแบบ ส่วนบนของถังหมัก

จะมีขนาดใหญ่เพื่อให้ง่ายต่อการแยกก๊าซ ลักษณะของถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์จะมีกลไกต่าง ๆ น้อยชิ้น คือไม่มีการกวน อัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของถังจะพบอยู่ในระหว่าง 3 ถึง 6 ปริมาตรของถังขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตซึ่งสามารถมีขนาดใหญ่ได้ถึงล้านลูกบาศก์เมตร

ด้วยโครงสร้างที่ง่ายและประกอบด้วยกลไกน้อยชิ้น ทำให้เกิดลักษณะเฉพาะของถังหมักแบบนี้ที่แตกต่างจากถังหมักชนิดที่มีการกวน คือไม่ทำให้เกิดปัญหาเนื่องจากอุณหภูมิและความดันที่สูง ใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ สามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่ได้ มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ดี ดังนั้นจึงแน่ใจว่า การกระจายของความร้อนมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งถัง แม้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนที่รุนแรงก็ตาม ลักษณะพิเศษนี้เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการหมักที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ง่าย

Deckwer (1985) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของก๊าซกับลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์ พบว่าที่ความเร็วก๊าซต่ำ ๆ ขนาดของฟองอากาศและความเร็วในการลอยตัวค่อนข้างจะมีความสม่ำเสมอ เป็นช่วงการไหลที่เรียกว่าซูโดโฮโมจีนัส (Pseudohomogeneous) ถ้าการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น จะเกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ขนาดของฟองอากาศที่แตกต่างกันทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศต่างกัน เรียกการไหลในช่วงนี้ว่า เฮเทอโรจีนัส (Heterogeneous) ซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสจะลดลง ทำให้การถ่ายโอนมวลมีประสิทธิภาพลดลง ถ้าถังหมักมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก ฟองอากาศอาจจะมีขนาดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของถังหมัก และมีความคงตัวสูง ทำให้เกิดเป็นชั้นของก๊าซที่เคลื่อนที่ขึ้น เรียกว่า เกิดสลัก (slug) ในกรณีที่น้ำหมักมีความหนืดสูง อาจจะทำให้เกิดสลักขึ้นได้ถึงแม้ว่า เส้นผ่าศูนย์กลางของถังหมักจะมีขนาดถึง 30 เซนติเมตร นอกจากนั้นน้ำหมักที่มีความหนืดสูง อาจจะมีฟองอากาศขนาดใหญ่เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าความเร็วของก๊าซจะน้อยกว่า 5 เซนติเมตรต่อวินาที (Deckwer, 1985)

ถึงแม้ว่าถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์จะมีราคาถูกและสิ้นเปลืองกำลังน้อย แต่จะเกิดไฮโดรไดนามิกส์ที่ซับซ้อน ทำให้การหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทางไฮโดรไดนามิกส์ เช่นปริมาณอากาศที่ตกค้าง (gas hold up) และการถ่ายโอนมวลกระทำได้อย่างดี ดังนั้น จึงมีการพัฒนาถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์ให้มีรูปแบบการไหลที่ซับซ้อนน้อยลง โดย

การใส่ลูปเข้าไปข้างในทำให้ทิศทางการไหลถูกกำหนดให้แน่นอนขึ้น เรียกถังหมักแบบนี้ว่า ถังหมักแบบอากาศยก (Airlift reactor)

3.3 ถังหมักแบบอากาศยก

ถังหมักแบบอากาศยก ประกอบด้วยช่องของเหลวที่ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่เชื่อมต่อกัน ส่วนหนึ่งจะมีการให้อากาศที่ส่วนล่าง อีกส่วนหนึ่งจะไม่มีการให้อากาศ ความแตกต่างของปริมาณอากาศตกค้างในระหว่าง 2 ส่วนทำให้ของเหลวมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการไหลเวียนของของเหลวในถังหมักเนื่องจากแรงลอยตัวของอากาศ ส่วนของถังหมักประกอบด้วยส่วนของเหลวและก๊าซเคลื่อนที่ขึ้นเรียกว่า ส่วนไรเซอร์ (riser zone) และส่วนที่มีการเคลื่อนที่ลง เรียกว่า ส่วนดาวน์คัมเมอร์ (downcomer zone)

ถังหมักแบบอากาศยกได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับการหมักที่มีน้ำหมักเป็นของไหลนอน-นิวโตเนียนมานานแล้ว Malfait และคณะ (1981) ทำการเลี้ยงเชื้อรา *Monascus purpureus* พบว่าเชื้อรามีการเจริญได้ดีในถังหมักแบบอากาศยก และยังพบว่าต้นทุนในการให้อากาศและการกวนลดลงถึงร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับถังหมักแบบกวน König และคณะ (1982) ศึกษาการผลิตเพนนิซิลินในถังหมักแบบอากาศยก พบว่าพลังงานที่ใช้ในการผสมลดลงและต้นทุนในการถ่ายเทความร้อนลดลง

Erickson และคณะ (1983) รายงานว่า การเลี้ยงเชื้อรา (*Streptomyces niveus*) ในถังหมักแบบอากาศยกขนาด 100 และ 200 ลิตร ให้ผลการผลิตที่ดีกว่าการเลี้ยงในถังหมักแบบกวน และกล่าวว่า ถังหมักแบบอากาศยกเหมาะสมที่สุดในระบบการหมักที่มีการให้อากาศโดยเฉพาะในแง่ของการถ่ายโอนออกซิเจน ซึ่งมีการถ่ายโอนออกซิเจนได้ดีกว่าที่ระดับอัตราการให้อากาศเดียวกัน นอกจากนี้ Ziegler และคณะ (1980) พบว่า แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในถังหมักแบบอากาศยกทำให้แนวโน้มในการจับกันเป็นก้อนของเชื้อราลดลง และทำให้การผลิตสารเมตาโบไลต์ดีขึ้น

Barker และ Worgan (1981) เลี้ยงเชื้อ *Aspergillus oryzae* ในถังหมักแบบอากาศยก พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลลดลงเมื่อความหนืดของน้ำหมักเพิ่มขึ้น แต่ลดลงน้อยกว่าการใช้ถังหมักแบบกวน

Field และคณะ (1984) และ Young และคณะ (1987) ได้ศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ของ ถังหมักแบบอากาศยกที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแรน พบว่า มีการรวมตัวของฟองอากาศ ใกล้กับตัวให้อากาศ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของแซนแรนจะต่ำถึงร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ฟองอากาศขนาดเล็กบางส่วนที่ออกมาจากตัวให้อากาศซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.005 เมตร จะรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นฟองอากาศที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.02 เมตร เมื่อความเข้มข้นของแซนแรนเพิ่มขึ้นก็ยิ่งมีการรวมตัวกันของฟองอากาศมากขึ้น เมื่อทำการทดลองกับสารละลายแซนแรนความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่าฟองอากาศ ส่วนใหญ่รวมตัวกันเป็นฟองใหญ่ ในบริเวณใกล้ตัวให้อากาศ ซึ่งฟองอากาศขนาดใหญ่เหล่านี้ ลอยตัวขึ้นผ่านไรเซอร์ โดยไม่มีการแตกเป็นฟองขนาดเล็ก และออกจากถังหมักไปอย่างรวดเร็ว

Field และคณะ (1984) ได้ศึกษาการผสมในถังหมักแบบอากาศยกที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแรนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0 - 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่าไม่มีการเกิดบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว ในขณะที่ Young และคณะ (1987) ได้สังเกตเห็น การเกิดบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งและการเกิดโฟมของของเหลวเมื่อความเข้มข้นของแซนแรน สูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนัก ชั้นของของเหลวที่อยู่นิ่งเกิดขึ้นที่บริเวณผนังทางด้าน ดาวนัคัมเมอร์ เมื่อความเข้มข้นของแซนแรนสูงกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก อัตราการไหล ในส่วนไรเซอร์ลดลงอย่างมาก

4. ไฮโดรไดนามิกส์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก

4.1 แก๊สโฮลด์อัป (Gas hold-up)

แก๊สโฮลด์อัป คือ สัดส่วนปริมาณของก๊าซที่มีอยู่ภายในของผสมระหว่างก๊าซกับของเหลว ปริมาณแก๊สโฮลด์อัปโดยรวม (overall gas hold-up: ϵ) ในถังปฏิกรณ์หาได้จากสมการ (1.1) (Chisti, 1989)

$$\epsilon = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad (1.1)$$

เมื่อ V_G คือ ปริมาตรของก๊าซ

V_L คือ ปริมาตรของของเหลว

ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก ปริมาณแก๊สไฮลด์อัฟในแต่ละส่วนคือส่วนไรเซอร์ และส่วนดาวน์คัมเมอร์มีความแตกต่างกัน และมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\varepsilon = \frac{A_{rs} + A_{gd}}{A_r + A_d} \quad (1.2)$$

สมการนี้ใช้ได้กับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่มีลูภายใน แต่ก็สามารถประยุกต์ใช้กับชนิดลูภายนอกที่มีความสูงของของเหลวในส่วนไรเซอร์และส่วนดาวน์คัมเมอร์ใกล้เคียงกัน

แก๊สไฮลด์อัฟมีความสำคัญต่อปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัย กล่าวคือ เป็นส่วนกำหนดเวลาเรซิเดนซ์ของก๊าซในของเหลวซึ่งมีผลร่วมกับขนาดของฟองอากาศ นอกจากนี้ยังมีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการถ่ายโอนมวล ในถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดของฟองอากาศ (d_B) เท่า ๆ กัน พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซกับของเหลวเทียบกับปริมาตรของเหลว (a_L) หรือเทียบกับปริมาตรของของผสม (a_D) หาได้จากสมการ

$$a_L = \frac{6\varepsilon}{d_B(1-\varepsilon)} \quad (1.3)$$

$$a_D = \frac{6\varepsilon}{d_B} \quad (1.4)$$

จากสมการทั้งสองนี้ จะเห็นได้ว่า พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแก๊สไฮลด์อัฟเพิ่มขึ้น หรือขนาดของฟองอากาศลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สไฮลด์อัฟยังถูกกำหนดด้วยปัจจัยอื่น ๆ ด้วย เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ พื้นที่การไหลของของเหลว (flow regime) รวมทั้งขนาดของฟองอากาศ

ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของแก๊สไฮลด์อัฟจะสามารถกระทำได้ด้วยการลดขนาดของฟองอากาศลง แต่นั่นก็ไม่ใช่สิ่งที่ดีนัก เนื่องจากฟองอากาศที่มีขนาดเล็กมาก ๆ จะมีเวลาเรซิเดนซ์ยาวนาน ทำให้เกิดความสมดุลระหว่างอากาศภายในฟองอากาศกับอากาศในของเหลว เพราะฉะนั้นฟองอากาศเหล่านั้นจึงไม่ช่วยสนับสนุนให้การถ่ายโอนระหว่างของเหลวกับก๊าซดีขึ้น

4.2 การไหลวนของของเหลว (liquid circulation)

การไหลวนของของเหลวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของเหลวระหว่างส่วนโรเตอร์กับส่วนดาวนัคัมเมอร์ (Freedman and Davidson, 1969) และการไหลวนจะเกิดขึ้นในทิศทางที่แน่นอน โดยจะไหลขึ้นในส่วนโรเตอร์และไหลลงในส่วนดาวนัคัมเมอร์ ความเร็วในการไหลวนเฉลี่ย หาได้จากสมการ (Blenke, 1979)

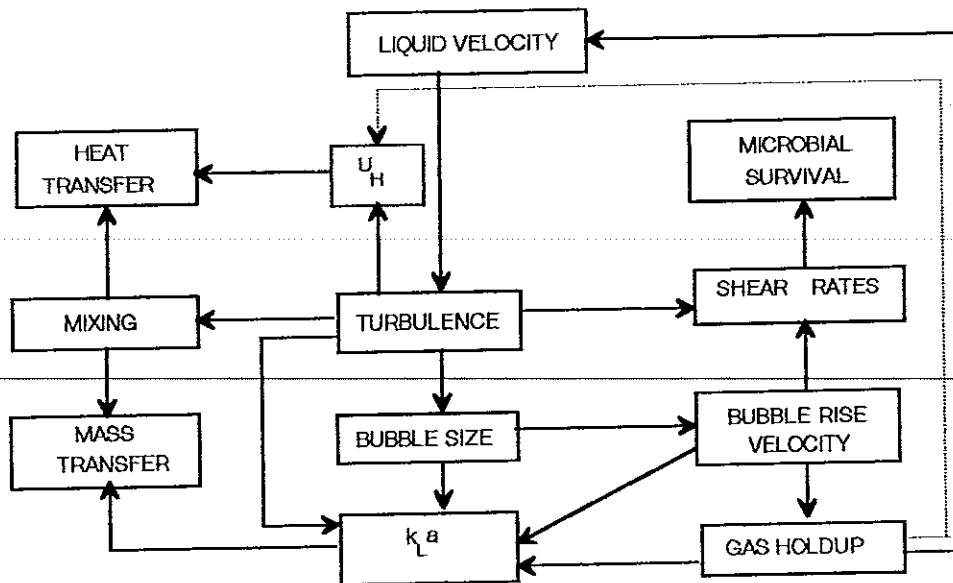
$$U_{Lo} = \frac{x_c}{t_c} \quad (1.5)$$

เมื่อ x_c คือ ระยะทางที่มีการไหลวน

t_c คือ เวลาในการวนครบรอบ

ความเร็วในการไหลวนของของเหลวถูกควบคุมโดยปริมาณแก๊สไฮลด์อัฟในโรเตอร์และดาวนัคัมเมอร์ การไหลวนที่เกิดขึ้นมีผลต่อระดับความปั่นป่วน, การส่งผ่านความร้อนจากของเหลวไปยังผนัง และการถ่ายโอนมวลระหว่างก๊าซกับของเหลวรวมทั้งมีผลต่อการเกิดแรงเฉือนกับจุลินทรีย์ด้วย

Chisti (1989) ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกดังแสดงในภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก

ที่มา : Chisti (1989)

เมื่อมีการให้อากาศในส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ทำให้มีอากาศตกค้างอยู่ในถังปฏิกรณ์ ความสำคัญของปริมาณอากาศที่ตกค้างมีหลายประการ เช่น เป็นตัวกำหนดเวลาเรซิเดนซ์ของอากาศในของเหลว และมีผลร่วมกับขนาดของฟองอากาศในการกำหนดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับของเหลว นอกจากนี้ยังเป็นตัวควบคุมความเร็วในการไหลวนของของเหลว ความเร็วของของเหลวที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความปั่นป่วนในถังปฏิกรณ์ ซึ่งความปั่นป่วนนี้ก่อให้เกิดกลไกการผสมและการถ่ายโอน ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้เกิดแรงเฉือนซึ่งมีผลต่อความอยู่รอดของเซลล์ ขนาดของฟองอากาศที่ปรากฏก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ ฟองอากาศที่มีขนาดแตกต่างกันจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างกัน และมีผลต่อเวลาเรซิเดนซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

นอกจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกิดจากรูปทรงเรขาคณิตของถังปฏิกรณ์ ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์คือ คุณสมบัติของของเหลวภายในถังหมัก ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

5. การผสม (Mixing)

5.1 นิยาม

การผสมคือ กระบวนการลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของระบบ ระบบมีการผสมอย่างสมบูรณ์ถ้าองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะพิจารณาปริมาตรย่อยของระบบซึ่งมีขนาดเล็กเท่าใด ตราบเท่าที่ปริมาตรดังกล่าวไม่เล็กจนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของโมเลกุล การผสมระบุได้ด้วยตัวแปร 2 ตัวคือ ขนาดของการผสม (scale of mixing) และความเข้มของการผสม (intensity of mixing) (Van't Riet and Tramper, 1991)

ขนาดของการผสมคือ หน่วยที่เล็กที่สุดที่ยอมให้อยู่ในลักษณะที่เป็นเนื้อเดียว ขนาดมักจะเล็กกว่าหน่วยของระบบและใหญ่กว่าอนุภาคที่เล็กที่สุดที่ปรากฏอยู่ในระบบ ขนาดของการผสมที่จะถือเป็นเกณฑ์ในการผสมขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ต้องการศึกษา

ความเข้มในการผสม คือ ค่าที่เบี่ยงเบนจากการผสมที่สมบูรณ์ โดยทฤษฎี การผสมที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาเข้าสู่อนันต์ จากภาพที่ 1.5 ที่เวลา $t=0$ ใช้กรดเป็นเทรเซอร์ ฉีดลงไปในถังที่มีการไหลวน เมื่อเทรเซอร์ไหลผ่านท่อด้านล่าง พีเอชเซนเซอร์จะวัดความเข้มข้นของเทรเซอร์ที่ไหลผ่านในแต่ละรอบของการไหลวน ความเข้มข้นของเทรเซอร์จะลดลงเรื่อย ๆ ด้วยกระบวนการผสมและสามารถหาความเข้มของการผสมได้จากสมการ

$$\text{ความเข้มของการผสม} = \frac{c_{(\infty)} - 0.5\Delta c}{c_{(\infty)}} \times 100\%$$

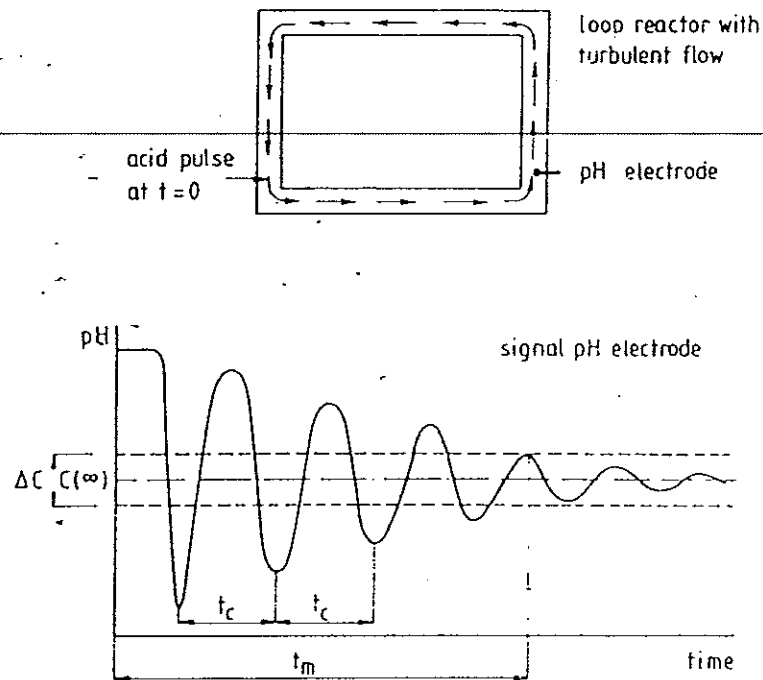
เมื่อ $c_{(\infty)}$ คือ ความเข้มข้นสุดท้าย

Δc คือ ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ กับความเข้มข้นสุดท้าย

5.2 ระดับของการผสมแบ่งออกได้เป็น 2 ระดับ คือ

การผสมระดับจุลภาค (micromixing) คือการผสมระดับโมเลกุล เป็นการผสมที่เกิดจากการแพร่ในระดับโมเลกุล หรือโดยการแตกย่อยของเจ็ดตัวขึ้นปลาย

การผสมระดับมหภาค (macromixing) คือการผสมในระดับที่ใหญ่กว่าระดับโมเลกุล ที่เกิดจากการพาธรรมชาติหรือการพาบังคับ โดยการแพร่เชิงโมเลกุลนั้นไม่มีนัยสำคัญ



ภาพที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของการผสมกับเวลาในการผสม

ที่มา : Riet และ Tramper (1991)

การศึกษาการผสมในการหมักแชนแธนส่วนใหญ่เน้นการผสมระดับมหภาคเป็นหลัก ทั้งนี้เพราะ *X. campestris* ใช้อาหารได้ค่อนข้างช้า การผสมในระดับจุลภาคจึงไม่เป็นขั้นตอนจำกัดการใช้สารอาหารของจุลินทรีย์ ผลการทดลองของ Funahashi และคณะ (1987) และ Peter และคณะ (1989) มีความสอดคล้องกับสมมติฐานดังกล่าว トラバเท่าที่ความรุนแรงของการกวนสูงเพียงพอ การเพิ่มความรุนแรงในการกวนไม่ทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้น นั่นคือการเพิ่มการผสมระดับจุลภาคโดยการเพิ่มความปั่นป่วนรุนแรงมากขึ้น จะไม่ช่วยทำให้อัตราการใช้อากาศดีขึ้น

5.3 รูปแบบของการผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. การผสมแบบปลั๊ก (plug flow)

การผสมแบบปลั๊กเป็นการผสมที่มีการผสมในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลโดยสมบูรณ์ ความเข้มข้นของตัวละลายในแนวตั้งฉากกับการไหลจะเท่ากันทุกจุด ไม่มีการผสมในแนวแกน พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงระดับการผสมในแนวแกนเรียกว่า สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน (axial dispersion coefficient) ในกรณีการไหลแบบปลั๊กจะไม่มี การผสมในแนวแกน นั่นคือ สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกนเป็นศูนย์

2. การผสมสมบูรณ์ (well-mixed or perfect mixing)

การผสมจะเกิดขึ้นในทุกทิศทาง ความเข้มข้นของตัวละลายมีค่าเท่ากันทุกจุด สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกนมีค่าอนันต์

3. การผสมย้อนกลับ (backmixing)

เป็นการผสมที่อยู่ระหว่างการผสมแบบปลั๊กกับการผสมสมบูรณ์ คือ มีการผสมกันในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลอย่างสมบูรณ์ และมีการผสมในแนวแกนเกิดขึ้นด้วย แต่การผสมในแนวแกนเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์

5.4 การผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

ลักษณะการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ ลักษณะของการผสมมีผลมาจากความปั่นป่วนและพฤติกรรมการถ่ายโอนโมเมนตัม การผสมมีผลต่อแรงขับในการถ่ายโอนมวลและความร้อน ในการควบคุมพีเอช โดยการเติมกรดหรือด่างลงไป ต้องการการกระจายตัวและการผสมที่รวดเร็วเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดบริเวณที่มีความเข้มข้นของกรดหรือด่างสูงเกินไป เช่นเดียวกันกับการให้ออกซิเจนและสารอาหารแก่จุลินทรีย์ที่ต้องการการผสมอย่างรวดเร็วเพื่อให้จุลินทรีย์ได้รับอาหารและออกซิเจนทันตามความต้องการ

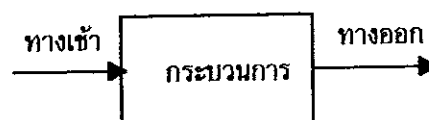
ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแต่ละชนิดพบว่าจะมีลักษณะการผสมเข้าใกล้การผสมแบบปลั๊กหรือเข้าใกล้การผสมที่สมบูรณ์ ไม่สามารถที่มีการผสมแบบปลั๊กที่สมบูรณ์หรือเป็นการผสมที่สมบูรณ์จริง ๆ ได้ เพราะในถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบปลั๊กอย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎี

นั้น โมเลกุลทุกชนิดเคลื่อนที่ไปในแนวแกนด้วยความเร็วที่เท่ากันและมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว ในขณะที่จริง ๆ แล้ว เกิดการผสมที่ปั่นป่วน การแพร่ของโมเลกุลเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลด้วยความเร็วและทิศทางที่ไม่แน่นอน ส่วนถึงปฏิกรณ์แบบกวน ซึ่งมีการผสมอย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎีนั้น จะต้องมีความเข้มข้นของตัวละลายเท่ากันทุก ๆ ส่วนของถัง ในขณะที่ในความเป็นจริงอาจมีส่วนของบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งเกิดขึ้นในบริเวณที่ห่างออกไปจากการหมุนของใบพัด

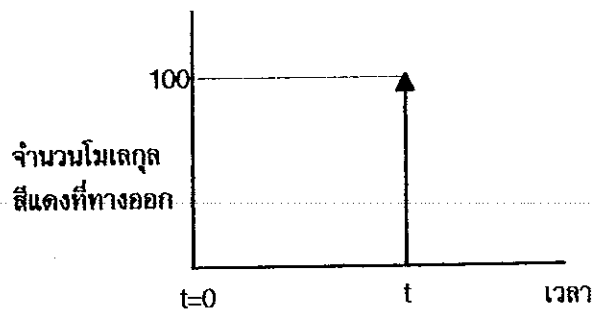
5.5 เทคนิคการตอบสนองของเทรเซอร์ (The tracer response technique)

เทคนิคการตอบสนองของเทรเซอร์ เป็นวิธีที่จะบอกได้ว่า การไหลและการผสมที่เกิดขึ้นภายในระบบเป็นแบบใด

สมมติว่าหน่วยของกระบวนการที่มีการไหลแบบต่อเนื่องตามภาพที่ 1.6 อยู่ในภาวะคงตัว และสามารถวัดอัตราที่โมเลกุลของของไหลที่ทางออกได้ ภายในระบบมีการไหลของโมเลกุลสีขาวอย่างต่อเนื่อง และมีการเติมโมเลกุลสีแดงจำนวน 100 โมเลกุลลงไปอย่างรวดเร็วที่ทางเข้าของระบบ อัตราที่โมเลกุลสีแดงไหลออกมาที่ทางออกขึ้นอยู่กับ การไหลและการผสมภายในระบบ ถ้าเป็นการผสมแบบปลັกอย่างสมบูรณ์ โมเลกุลสีแดงทั้งหมดจะเคลื่อนที่ออกมาด้วยความเร็วที่เท่ากัน และจะไหลออกมาพร้อมกันทีเดียวหลังจากเวลาผ่านไปเท่ากับเวลาเรซิเดนซ์ของระบบดังภาพที่ 1.7

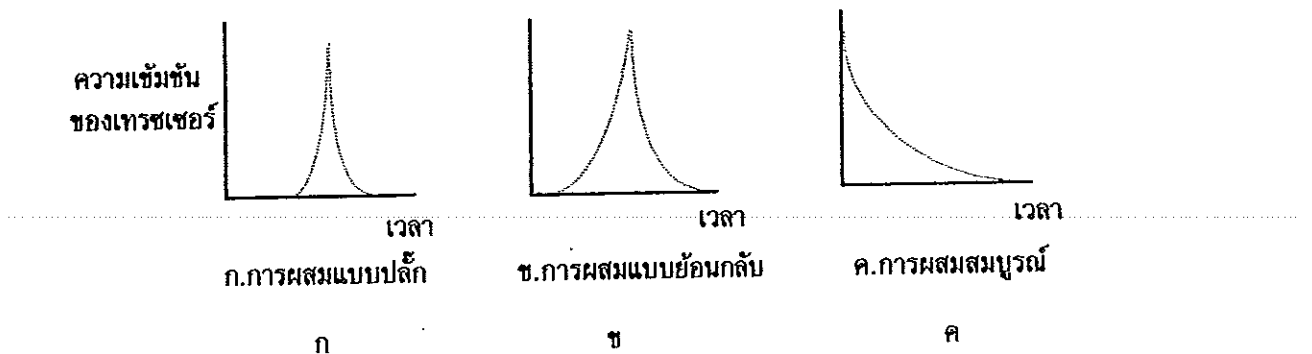


ภาพที่ 1.6 ระบบกระบวนการแบบต่อเนื่อง

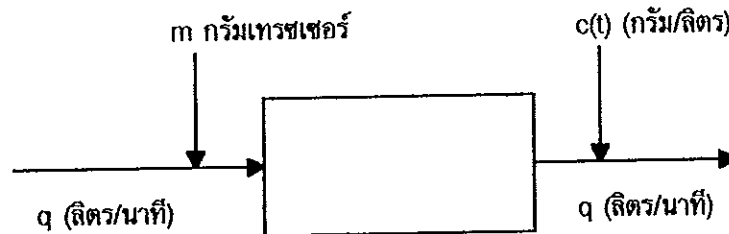


ภาพที่ 1.7 การตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ในระบบที่มีการผสมแบบปลັกตามทฤษฎี

ถ้าการผสมไม่เป็นแบบปลັกอย่างสมบูรณ์ จะมีการกระจายของเวลาเรชเดนซ์ โมเลกุลสีแดงบางส่วนอาจถึงทางออกอย่างรวดเร็วและไหลออกมาในเวลาที่น้อยกว่าเวลาเรชเดนซ์ของระบบ ในขณะที่บางส่วนอยู่ในระบบยาวนานกว่าเวลาเรชเดนซ์ของระบบ ลักษณะของกราฟการตอบสนองดังแสดงที่ภาพ 1.8 ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการผสมในถังหมัก ในถังหมักที่มีการผสมเพียงเล็กน้อย มีบางโมเลกุลที่เคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วเฉลี่ยของไหลและบางส่วนเคลื่อนที่ช้ากว่าความเร็วเฉลี่ย แต่ส่วนใหญ่มีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยและมีการกระจายของเวลาเรชเดนซ์อย่างแคบ ๆ ในระบบที่มีการผสมดี (well-mixed) โมเลกุลสีแดงจะกระจายตลอดถังหมักอย่างรวดเร็ว และออกมาในอัตราที่เป็นสัดส่วนกับจำนวนที่เหลือในถังหมัก ในตอนเริ่มต้นจะมีอัตราที่สูงเนื่องจากมีจำนวนโมเลกุลเหลืออยู่มากและลดลงเรื่อย ๆ เมื่อจำนวนโมเลกุลที่เหลืออยู่ลดลง (ภาพที่ 1.8ค) สำหรับถังหมักที่ไม่ใช่เป็นการไหลแบบปลັกและไม่ใช่มีการผสมที่สมบูรณ์ จะมีการตอบสนองดังภาพที่ 1.8ข



ภาพที่ 1.8 ลักษณะการตอบสนองของเทรเซอร์ในการผสมแบบต่าง ๆ



ภาพที่ 1.9 แสดงการวัดการตอบสนองของอิมพัลส์

การทดสอบการตอบสนองของอิมพัลส์ (impulse response test) คือวิธีอธิบายเชิงปริมาณ อิมพัลส์ (impulse) คือ การเติมลงไปอย่างทันทีในช่วงเวลาที่จำกัด สิ่งที่ถูกเติมลงไปทำหน้าที่เป็นเทรเซอร์ ในการทดลองจริง เทรเซอร์ที่ใช้ อาจเป็น radioactive หรือ สี หรือ สารอื่นที่สามารถวัดความเข้มข้นที่ทางออกได้ง่าย

5.6 สมการการดุลเทรเซอร์ (the tracer balance equation)

ให้พิจารณาระบบแบบต่อเนื่องที่มีทางออกและทางเข้าทางเดียวในภาพที่ 1.9 ที่เวลา $t = 0$ เทรเซอร์ปริมาตร m กรัม ถูกเติมลงไปในกระแสด้านหน้าเข้าระบบ และวัดความเข้มข้นของเทรเซอร์ที่ทางออกเป็นฟังก์ชันกับเวลา โดยมีข้อกำหนดว่า เทรเซอร์มีความสมบูรณ์ แยกออกต่างหากจากโมเลกุลของของไหล ไม่มีการสูญเสียในระบบ ด้วยการทำปฏิกิริยาหรือการดูดซับ

อัตราการไหลของมวลของเทรเซอร์ที่ทางออกหาได้จากสมการ

$$Q[L/min] c(t)[g/L] = Qc(t) [g/min]$$

ในช่วงเวลาที่จำกัดจาก t ถึง $(t+dt)$ ปริมาณของเทรเซอร์ที่ทางออกเท่ากับ

$$Qc(t)dt [g \text{ tracer}]$$

ถ้าทำการอินทิเกรตสมการ โดยกำหนดช่วงเวลาจาก t ถึง $t \rightarrow \infty$ ผลลัพธ์ที่ได้จะเท่า

กับปริมาณของเทรเซอร์ทั้งหมดที่ถูกใส่ลงไป ดังแสดงในสมการ

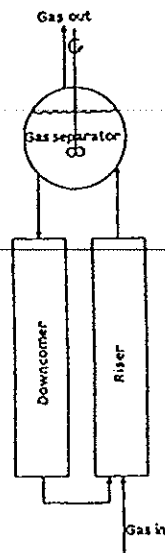
$$\int_0^{\infty} Qc(t)dt = Q \int_0^{\infty} c(t)dt = m$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ถือเป็นหลักในการวิเคราะห์การตอบสนองของเทรเซอร์ตามวิธีการทำดุลมวล

6. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

Merchuk และ Yungler (1990) ได้เสนอแบบจำลองของการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกโดยการแบ่งโซนต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 1.10 ซึ่งแม้ว่าจะจะเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุด แต่ก็มี การพิสูจน์แล้วว่าสามารถอธิบายการผลิตในกระบวนการผลิตโปรตีนเซลล์เดียวได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

แบบจำลองนี้มีแนวคิดที่ ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่ 1 คือส่วนที่มีการเคลื่อนที่ของของเหลวเป็นแบบปลั๊ก (plug flow) ได้แก่ ส่วนไรเซอร์ และส่วนดาวน์คัมเมออร์ ส่วนที่ 2 คือ ส่วนที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ (perfectly mixed section) ได้แก่ ส่วนบน (gas separation zone) หรือเรียกว่า CSTR (continue stirred tank reactor)



ภาพที่ 1.10 แบบจำลองของ Merchuk และ Yungler (1990)

ที่มา : Merchuk และ Yungler (1990)

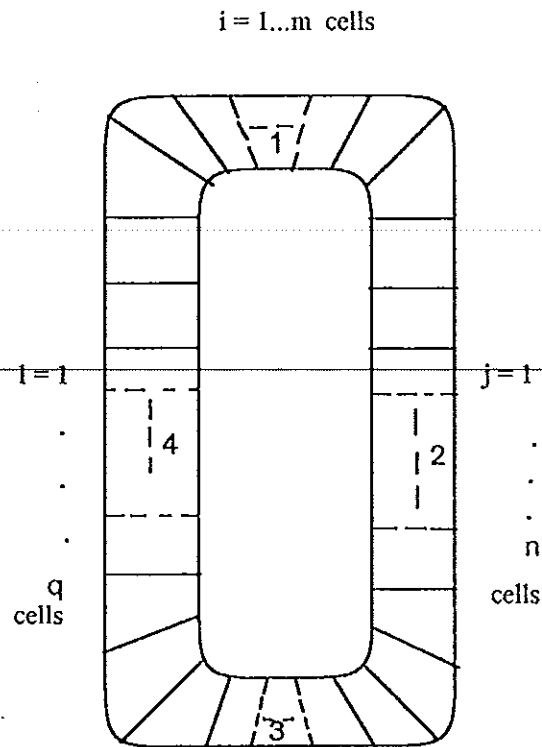
ผลการซิมูเลชันพบว่า การเพิ่มปริมาตรในส่วนที่มีการไหลแบบปลັ๊ก ทำให้เวลาในการผสมนานขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าเพิ่มปริมาตรในส่วนบน มีผลทำให้เวลาในการผสมเร็วขึ้น และมีข้อสรุปที่สำคัญอยู่ประการหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในส่วนบน มีอิทธิพลอย่างมากต่อเวลาในการผสม ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวนี้ ไม่สามารถพิสูจน์ได้จากแบบจำลอง single dispersion coefficient ที่เสนอโดย Fields และ Slator (1983) ที่ไม่มีการพิจารณาในส่วนบน

ยุพดี สันติวุฒน์ (2538) ได้ให้ความเห็นว่าแบบจำลองของ Merchuk และ Yungler (1990) ดังกล่าวไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ได้อย่างกว้างขวางพอ เนื่องจากข้อจำกัดของสมมติฐานที่ตั้งไว้ไม่ครอบคลุมปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งมีความซับซ้อนและเกิดขึ้นได้หลายกรณี เช่น พบว่าลักษณะการผสมที่เกิดขึ้นภายในส่วนบนไม่ได้มีการผสมอย่างสมบูรณ์ ตามที่แบบจำลองดังกล่าวเสนอ แต่มีการผสมในระดับที่จำกัดระดับ

หนึ่ง ในส่วนดาวน์คัมเมอร์และส่วนไรเซอร์ ที่กำหนดให้มีการไหลแบบปลั๊กฟลาว์ที่มีการผสมแบบย้อนกลับด้วย ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวไม่ได้กล่าวถึง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองที่มีการผสมแบบย้อนกลับขึ้น เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความยืดหยุ่นสูงสำหรับอธิบายปรากฏการณ์การผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก โดยมีการพัฒนามาเป็นลำดับดังนี้

ในขั้นแรกได้มีการพัฒนาแบบจำลองการผสมแบบย้อนกลับเชิงปริมาตร (volumetric backmixing model) ซึ่งการผสมแบบย้อนกลับที่นักวิจัยหลายท่านนิยมใช้กันอยู่มีข้อจำกัดอยู่ประการหนึ่งคือ มักจะกำหนดให้ความเร็วของของไหลคงที่ตลอดคอลัมน์ นั่นคือการกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดถังปฏิกรณ์คงที่ตลอด แม้ว่าข้อจำกัดอันนี้จะสามารถแก้ไขได้โดยการแบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็นส่วยย่อยหลาย ๆ ส่วนโดยในแต่ละส่วนมีความเร็วเฉลี่ยคงที่ แต่การใช้งานจะยุ่งยากมาก แนวทางการแก้ไขอันนี้ คือ การพัฒนาแบบจำลองใหม่ที่ใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรแทนการใช้ความเร็วเป็นแนวคิดเริ่มต้นในการพัฒนา ทั้งนี้ก็เพราะถึงแม้ว่าความเร็วของการไหลในถังปฏิกรณ์จะผันแปรตามตำแหน่งอันเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลง แต่อัตราการไหลเชิงปริมาตรในทุกตำแหน่งนั้นคงที่ จากนั้นจึงได้พัฒนาแบบจำลองการผสมแบบย้อนกลับที่มีการหมุนเวียน โดยได้แบ่งถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกออกเป็น 4 โซน ดังนี้ โซนที่ 1 คือ ส่วนบนหรือส่วนที่มีการแยกก๊าซ (gas separation zone) โซนที่ 2 คือ ส่วนดาวน์คัมเมอร์ (downcomer zone) โซนที่ 3 คือ ส่วนฐาน (base zone) โซนที่ 4 คือ ส่วนไรเซอร์ (riser zone) โดยมีสมมติฐานต่อไปนี้

1. ในโซนหนึ่ง ๆ ขนาดของการผสมย้อนกลับมีค่าคงที่
2. ไม่มี liquid channeling เกิดขึ้น และการผสมในแนวขวาง (transverse mixing) อาจเกิดขึ้นในระดับที่จำกัดและปรากฏการณ์เช่นนั้น ซึ่งพิจารณารวมไว้ในแบบจำลองการผสมย้อนกลับเชิงปริมาตร (volumetric back-mixing model) โดยพิจารณาให้เทียบเท่ากับขนาดของเซลล์ที่เล็กลง
3. ให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่ โดยไม่ต้องให้พื้นที่หน้าตัดคงที่ ซึ่งใกล้เคียงกับความเป็นจริงสำหรับการไหลในถังปฏิกรณ์แบบลูกปัด ในบริเวณการไหลที่เสถียรแล้ว (well-developed flow region)



ภาพที่ 1.11 แบบจำลองโครงข่ายของโซน

ที่มา : ยุพดี สันติวุฒน์ (2538)

ต่อมายุพดี สันติวุฒน์ (2538) ได้มีการพัฒนามาแบบจำลองโครงข่ายของโซน (network-of-zone model) แบบจำลองนี้มีการแบ่งถึงปฏิกรณ์ชีวภาพออกเป็น 4 โซนดังกล่าวข้างต้น แต่ละโซนจะแบ่งเป็นเซลล์ที่มีขนาดเท่ากันเรียงต่อกันเป็นอนุกรม โดยในแต่ละเซลล์มีความเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากการผสมที่สมบูรณ์ภายในเซลล์เดียวกัน เมื่อทำดุลมวลของแต่ละเซลล์จะได้ดังสมการ

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = Q(c_{i-1} - c_i)$$

V_i เป็นปริมาตรของเซลล์ที่ i

c_i เป็นความเข้มข้นของเทรซเซอร์ในเซลล์ที่ i

c_{i-1} เป็นความเข้มข้นของเทรเซอร์ในเซลล์ที่ $i-1$

Q เป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร

การเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ เป็นการกำหนดลักษณะและระดับการผสมเพื่อแทนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ในกรณีต่าง ๆ ถ้าจำนวนเซลล์ของโชนใดเป็น 1 หมายความว่าในโชนนั้นมีการผสมอย่างสมบูรณ์ และเมื่อจำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้นแสดงถึงลักษณะการไหลที่เข้าใกล้แบบปลັก ซึ่งแบบจำลองโครงข่ายของโชนนี้มีความยืดหยุ่นสูงกว่าแบบจำลองของ Merchuk และ Yungler (1990) โดยที่แบบจำลองของ Merchuk และ Yungler (1990) จะเป็นแค่กรณีหนึ่งของแบบจำลองนี้ โดยกำหนดให้จำนวนเซลล์ในส่วนบนเป็น 1 และจำนวนเซลล์ในส่วนดาวน์คัมเมอร์ และไรเซอร์ มีค่ามากเพื่อให้มีการไหลแบบปลັก

เมื่อชิมิวเลตแบบจำลองโครงข่ายของโชน โดยกำหนดให้จำนวนเซลล์ในส่วนบนเป็น 1 และค้อย ๆ เพิ่มจำนวนเซลล์ในส่วนที่เหลือ พบว่า จำนวนเซลล์ในโชนส่วนล่างเพิ่มมากขึ้น ลักษณะของ tracer response curve ที่ได้จะใกล้เคียงกับที่ได้จากแบบจำลองของ Merchuk และ Yungler (1990) ทั้งนี้เป็นเพราะ เมื่อจำนวนเซลล์ในโชนส่วนล่างมากขึ้น ลักษณะการผสมในโชนส่วนล่างจะเข้าใกล้การผสมแบบปลັกมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของ Merchuk และ Yungler (1990)

แม้ว่างานวิจัยของยูพตี สันติคุณณ์ (2538) นั้นจะได้มีการเสนอแบบจำลองโครงข่ายของโชนที่ความยืดหยุ่นสูงกว่าแบบจำลองของนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน และผลการชิมิวเลตที่ได้ก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจในการผสมของของเหลวนิวโตเนียนที่มีความหนืดต่ำ แต่ในงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการชิมิวเลตแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงที่กว้างขวาง เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ดังนั้นจึงยังสรุปไม่ได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวจะสามารถนำไปใช้ได้จริงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก เพื่อเป็นการพิสูจน์ข้อสงสัยนี้ ในงานวิจัยนี้ จึงได้มีการพัฒนาวิธีการเก็บข้อมูลการตอบสนองของเทรเซอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูล มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองดังกล่าว และนอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแบบจำลองเพิ่มเติมเพื่อให้มีความครอบคลุมปรากฏการณ์การผสมที่ซับซ้อนได้มากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราการให้อากาศและความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนที่มีผลต่อลักษณะทางไฮโดรไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก
2. ศึกษาลักษณะการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแทน โดยวิธีการตอบสนองของทรงเพชรเซอร์
3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายกลไกการผสมที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก
4. เพื่อหาแนวทางในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพ

บทที่ 2

แนวคิดและการพัฒนา

1. การพัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลติดตามการตอบสนองของเทอร์เซอร์

วิธีการติดตามการตอบสนองของเทอร์เซอร์เป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาความเร็วของของเหลวและการศึกษาลักษณะของการผสมในถังปฏิกรณ์ โดยการใส่เทอร์เซอร์ลงไปในถังปฏิกรณ์ แล้วใช้ตัวตรวจวัดเทอร์เซอร์ติดตามการเปลี่ยนแปลงของเทอร์เซอร์ สิ่งที่น่าสนใจเป็นเทอร์เซอร์มีได้หลายชนิด เช่น เกลือ ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องวัดการนำไฟฟ้า, สี ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงโดยการสังเกต, กรดหรือด่างซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงโดยใช้พีเอชมิเตอร์ ในการทดลองนี้ใช้กรด HCl เป็นเทอร์เซอร์และใช้พีเอชมิเตอร์ติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรด Verlaan และคณะ (1989) กล่าวว่า การใช้กรดหรือด่างเป็นเทอร์เซอร์ และใช้พีเอชมิเตอร์ ในการติดตามการตอบสนองของเทอร์เซอร์จะไม่ถูกรบกวนด้วยฟองอากาศ ในขณะที่การใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้า ในระบบที่ประกอบด้วยของเหลวและก๊าซจะไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากฟองอากาศทำให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาด ถึงแม้ว่าเครื่องวัดการนำไฟฟ้า จะมีข้อดีคือมีการตอบสนองเป็นเส้นตรงในขณะที่การตอบสนองของพีเอชมิเตอร์ไม่เป็นเส้นตรง

1.1 ความจำเป็นในการเชื่อมต่อพีเอชมิเตอร์กับเครื่องคอมพิวเตอร์

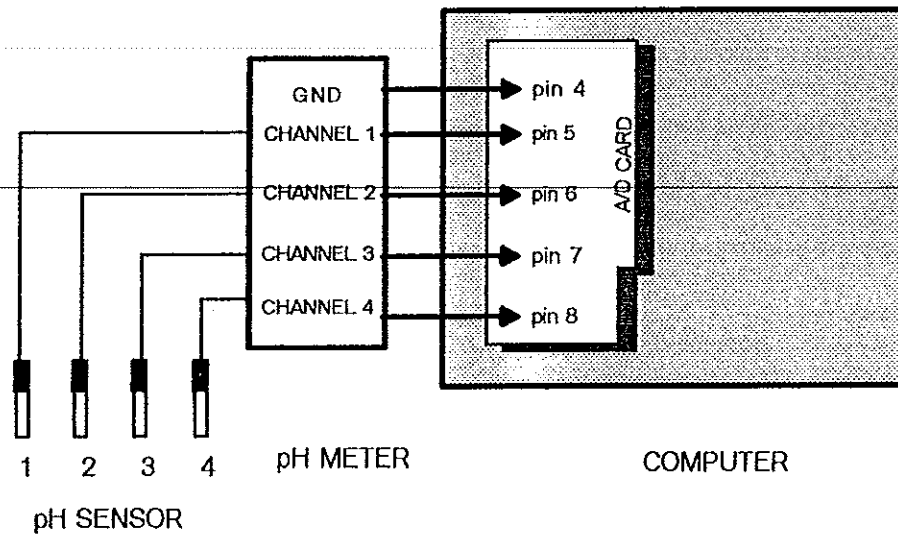
ในการวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทอร์เซอร์ด้วยเครื่องวัดพีเอชที่มีอยู่ต้องบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดพีเอช แล้วป้อนข้อมูลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ทางแป้นพิมพ์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลตามที่ต้องการ ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ไม่สามารถบันทึกข้อมูลได้ทันตามเวลาที่ต้องการ เสียเวลาในการป้อนข้อมูลจำนวนมาก และไม่สามารถวัดค่าพีเอชที่หลายตำแหน่งในเวลาเดียวกันได้

1.2 ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการเชื่อมต่อเครื่องวัดพีเอชกับคอมพิวเตอร์

การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่าปริมาณทางกายภาพนั้น คอมพิวเตอร์ไม่สามารถที่จะรับค่าปริมาณเหล่านั้นได้โดยตรง เช่น คอมพิวเตอร์ไม่สามารถทราบค่าความเป็นกรดต่างในสารละลายได้โดยตรง จะต้องมีส่วนแปลงสัญญาณ (transducer หรือ sensor) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเสียก่อน เช่น เครื่องวัดพีเอช ทำหน้าที่แปลงปริมาณทางกายภาพไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องหรือ สัญญาณอะนาลอก หลังจากนั้นจะต้องมี ตัวแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital converter) เพื่อส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ เนื่องจากคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือที่ทำงานด้วยระบบดิจิทัลในรูปของระบบเลขฐานสอง ในปัจจุบันมีการผลิตตัวแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลเป็นแผงวงจรสำเร็จรูป เรียกว่า เหนือตี การ์ด (A/D card) สามารถเสียบเข้ากับช่องเสียบ (slot) ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ ได้โดยตรง (รายละเอียดการแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแสดงในภาคผนวก ก)

1.3 การต่อเครื่องวัดพีเอชเข้ากับเหนือตีการ์ดและคอมพิวเตอร์

เครื่องวัดพีเอชที่นำมาใช้ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ใช้เครื่องวัดพีเอชยี่ห้อมงคลสุขโมเดล DPH3 สร้างขึ้นโดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งปกติจะมีการแสดงผลเป็นตัวเลขที่หน้าจอ นำมาแยกส่วนแสดงผลออกแล้วนำสัญญาณที่วัดได้ออกสู่ภายนอกเพื่อนำเข้าคอมพิวเตอร์ต่อไป สัญญาณที่ออกจากเครื่องวัดพีเอชนั้นเป็นสัญญาณอะนาลอก ดังนั้นเพื่อที่จะนำสัญญาณนี้เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงต้องใช้ตัวแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลเสียก่อน คุณสมบัติของตัวแปลงสัญญาณที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงในภาคผนวก ข



ภาพที่ 2.1 การต่อสายสัญญาณจากพีเอชมิเตอร์เข้ากับเอชดีการ์ด

การต่อสายสัญญาณจากเครื่องวัดพีเอชเข้ากับเอชดีการ์ด แสดงในภาพที่ 2.1 เครื่องวัดพีเอชได้รับการดัดแปลงให้สามารถวัดพีเอชได้ 4 จุดในเวลาเดียวกัน ประกอบด้วยสายสัญญาณ 5 เส้น เส้นที่ 1 เป็นสายกราวด์ ต่อเข้ากับ pin ที่ 4 ของเอชดีการ์ด อีก 4 เส้นเป็นสายนำแรงดันของพีเอชอิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัว ต่อเข้ากับ pin ที่ 5 ถึง pin ที่ 8 ของเอชดีการ์ด จากนั้นจึงนำเอชดีการ์ดเสียบเข้ากับช่องเสียบของเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการรับและบันทึกข้อมูลตามที่ต้องการ

1.4 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพีเอช

เมื่อทำการต่ออุปกรณ์เสร็จแล้ว จึงพัฒนาโปรแกรมเพื่อรับข้อมูลจากเครื่องวัดพีเอชผ่านมาสู่เอชดีการ์ด และเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ การรับส่งข้อมูลภายในคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีสายแอดเดรสในการกำหนดตำแหน่งภายในคอมพิวเตอร์ ในกรณีที่มีการสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกก็ต้องการถอดรหัสแอดเดรสให้หมายเลขแก่อุปกรณ์นั้น การถอดรหัสแอดเดรสก็ต้องไม่มีการซ้ำซ้อนกับแอดเดรสที่ใช้สื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกตัวอื่น สำหรับ

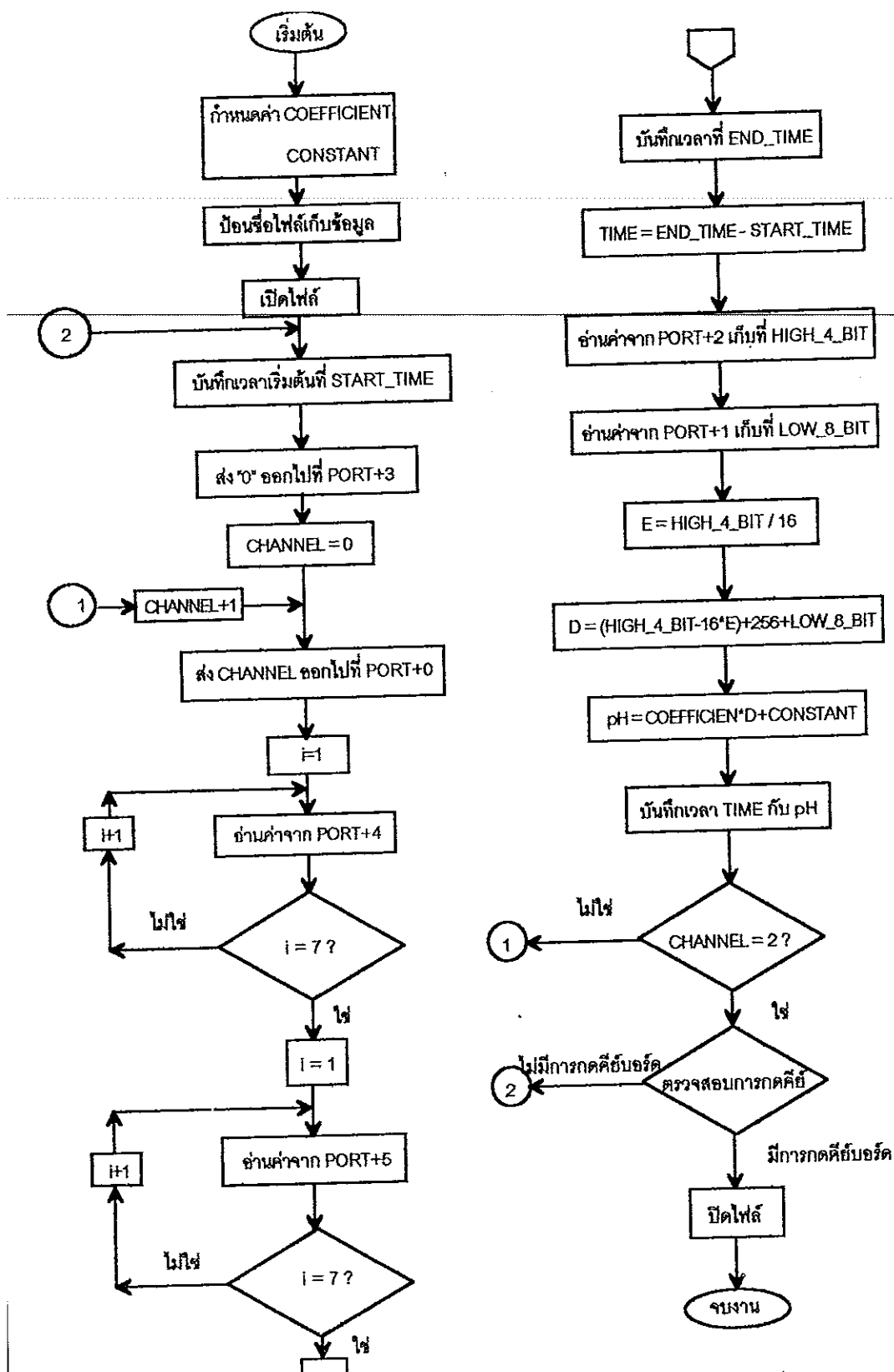
เหตุผลการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดแอดเดรสเพื่อเลือกพอร์ตในการติดต่อไว้ 2 ตำแหน่ง พอร์ต 632-639 และพอร์ต 760-767 การใช้งานพอร์ตสามารถทำได้โดยการเขียน โปรแกรมควบคุมพอร์ตนั้น ๆ โดยใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการรับข้อมูล ณฝั่งการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการรับและบันทึกข้อมูลจากเครื่องวัดพีเอชแสดงไว้ในภาพที่ 2.2

1.5 การแปลงค่าที่ได้รับจากเครื่องวัดพีเอชเป็นค่าพีเอช

ในการรับค่าจากเครื่องวัดพีเอช เหตุผลการจะรับค่าที่เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่อยู่ในช่วง 0-9 โวลต์ และจะแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นเลขฐานสองขนาด 12 หลัก ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 0 - 4095 จากนั้นจะเปลี่ยนค่าที่ได้นี้เป็นค่าพีเอช โดยการทำข้อมูลมาตรฐานระหว่างพีเอชกับค่าที่เป็นตัวเลขระหว่าง 0-4095 ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลำดับชั้นที่รับจากเครื่องวัดพีเอชที่พีเอชระดับต่าง ๆ

pH	ลำดับชั้น
3.84	1251
4.40	1231
4.85	1208
5.47	1192
5.95	1170
6.45	1151
7.04	1131
7.51	1110
8.07	1096



ภาพที่ 2.2 แผนผังการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการรับและบันทึกข้อมูลจากเครื่องวัดพีเอช

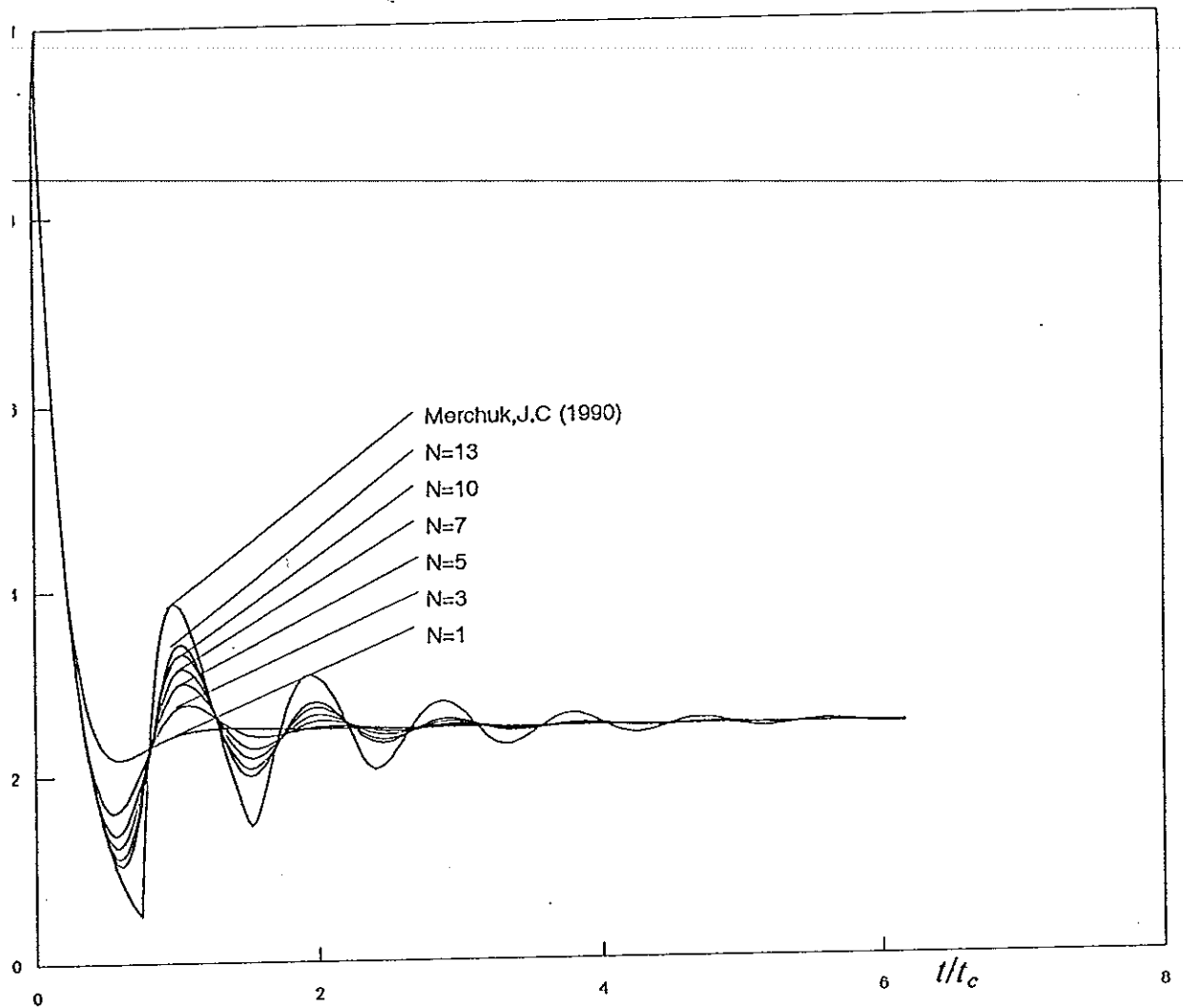
การพัฒนาแบบจำลองการผสมสำหรับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก

2.1 แบบจำลองโครงข่ายของโซน (พัฒนาโดยยุพดี สันติคุณณ์ 2538)

ยุพดี สันติคุณณ์ (2538) ได้ศึกษาลักษณะการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก และได้พัฒนาแบบจำลองโครงข่ายของโซน (Network of zones) โดยแบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็น 4 โซนตามลักษณะและทิศทางการไหลของของเหลว (ภาพที่ 1.11) แต่ละโซนแบ่งเป็นเซลล์ย่อย ซึ่งภายในเซลล์มีการผสมอย่างสมบูรณ์ มีความเป็นเนื้อเดียวกันทุก ๆ จุด การผสมแบบย้อนกลับเกิดขึ้นภายในขอบเขตของเซลล์ จำนวนเซลล์ในแต่ละโซนแบ่งบอกลักษณะของการผสมในโซนนั้น ๆ ถ้าจำนวนเซลล์ในโซนใดเป็น 1 แสดงว่าในโซนนั้นมีการผสมอย่างสมบูรณ์ โดยส่วนใหญ่จะกำหนดให้โซนส่วนบน (gas separation zone) เป็นโซนที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์หรือค่อนข้างสมบูรณ์โดยกำหนดให้มีจำนวนเซลล์เป็น 1 หรือ 2 ถ้าจำนวนเซลล์มากขึ้นแสดงถึงระดับการผสมที่ลดลง และลักษณะการผสมจะเข้าใกล้แบบปลັกมากยิ่งขึ้น

2.1.1 ผลการซิมูเลตแบบจำลองโครงข่ายของโซน

ก่อนหน้าที่จะมีการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายของโซนโดยยุพดี สันติคุณณ์ (2538) นั้น Merchuk และ Younger (1990) ได้เสนอแบบจำลองการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก โดยกำหนดให้โซนส่วนบนมีการผสมที่สมบูรณ์ และในโซนส่วนล่างคือโซนดาวนัคัมเมอร์และโซนโรเชอร์มีการไหลแบบปลັก ดังนั้นแบบจำลองของ Merchuk และ Younger (1990) จึงสามารถแทนได้ด้วยแบบจำลองโครงข่ายของโซนของยุพดี สันติคุณณ์ (2538) โดยกำหนดให้จำนวนเซลล์ในโซนส่วนบนมีค่าเป็น 1 และเพิ่มจำนวนเซลล์ในโซนดาวนัคัมเมอร์และโซนโรเชอร์ขึ้นไปเรื่อย ๆ เมื่อนำผลการซิมูเลตแบบจำลองทั้งสองมาเปรียบเทียบกันจะได้ผลดังแสดงในภาพที่ 2.3 จากภาพจะเห็นว่า เมื่อซิมูเลตแบบจำลองโครงข่ายของโซนที่กำหนดให้ จำนวนเซลล์ในส่วนบนเป็น 1 พบว่าเมื่อจำนวนเซลล์ในโซนส่วนล่างเพิ่มมากขึ้น ลักษณะของกราฟการตอบสนองของเทรชเชอร์ที่ได้จะใกล้เคียงกับที่ได้จากแบบจำลองของ Merchuk และ Younger (1990) ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ในโซนส่วนล่างมากขึ้น ลักษณะการผสมในโซนส่วนล่างจะเข้าใกล้การผสมแบบปลັกมากขึ้น



ภาพที่ 2.3 การเปรียบเทียบผลการซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone กับแบบจำลอง Merchuk และคณะ (1990) เมื่อจำนวนเซลล์ในโซนที่ $1=1$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในโซนที่เหลือ

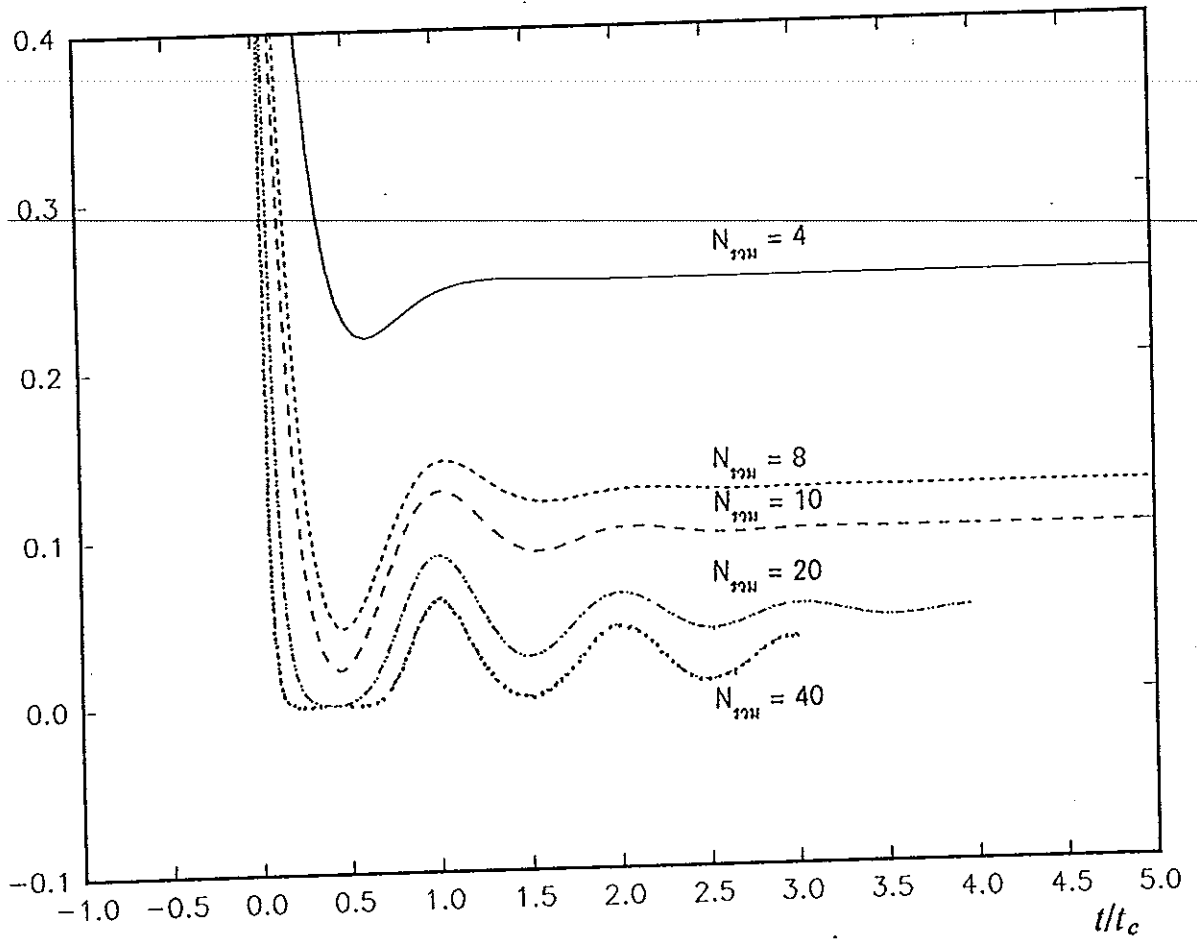
ที่มา : ยุกติ สันติคุณ (2538)

ยที่ลักษณะการผสมในโซนส่วนบนมีการผสมอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับข้อสมมติของแบบจำลองของ Merchuk และ Younger (1990)

ผลการซิมิวเลตแบบจำลองโครงข่ายของโซนโดยการเพิ่มจำนวนเซลล์ในทุก ๆ โซนมากขึ้น พบว่าต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้นเมื่อจำนวนเซลล์รวมมากขึ้น สืบเนื่องจากอัตราการลดลงของพีคจะช้าลง ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อจำนวนเซลล์รวมมากขึ้น ลักษณะการผสมเป็นแบบปลັกมากขึ้น

นอกจากนี้ จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ของแบบจำลองโครงข่ายของโซน พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในส่วนต่าง ๆ ของถังและการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงปริมาตรมีผลต่อเวลาในการผสม จากการซิมิวเลตโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในส่วนบน พบว่าเมื่อกำหนดให้โซนส่วนบนมีการผสมอย่างสมบูรณ์ แล้วทำการเพิ่มปริมาตรในส่วนนี้ให้มากขึ้น พบว่า เมื่อปริมาตรในโซนส่วนบนมากขึ้นทำให้เวลาในการผสมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Russell และคณะ (1994) ที่กล่าวว่า ในโซนส่วนบนเป็นบริเวณที่มีความปั่นป่วนมาก เนื่องจากการแยกตัวของฟองอากาศและการแตกตัวของฟองอากาศขนาดใหญ่ทำให้ส่วนนี้เกิดการผสมที่ดี การเพิ่มปริมาตรของส่วนนี้ทำให้สัดส่วนของบริเวณที่มีการผสมดีเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาในการผสมโดยรวมทั้งถังลดลง และจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในส่วนดาวน์คัมเมอร์และส่วนไรเซอร์พบว่าเมื่อกำหนดให้ส่วนดาวน์คัมเมอร์และส่วนไรเซอร์มีการผสมเข้าใกล้แบบปลັก การเพิ่มปริมาตรในส่วนดังกล่าวทำให้ต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงปริมาตรในแบบจำลองโครงข่ายของโซน พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงปริมาตรทำให้เวลาในการผสมลดลง

จากข้อมูลดังกล่าวสรุปได้ว่า แบบจำลองโครงข่ายของโซนนั้นให้ผลการซิมิวเลตที่สอดคล้องกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก และยังมีความยืดหยุ่นที่ดีกว่าแบบจำลองของ Merchuk และ Younger (1990) แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มี การนำแบบจำลองดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง จึงยังสรุปไม่ได้ว่าจะสามารถอธิบายลักษณะการผสมได้อย่างถูกต้องแม่นยำเป็นที่น่าพอใจหรือไม่



ภาพที่ 2.4 ผลการซิมูเลตแบบจำลอง network-of-zone เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์รวมมากขึ้น

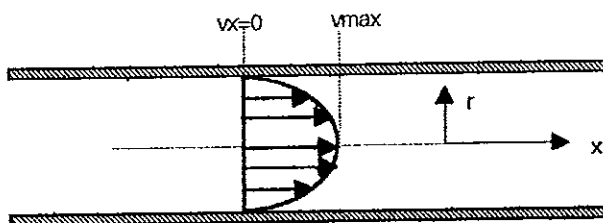
ที่มา : ยุกติ สันติวัฒน์ (2538)

2.1.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงข่ายของโชนกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง การตอบสนองของเทอร์เซอร์

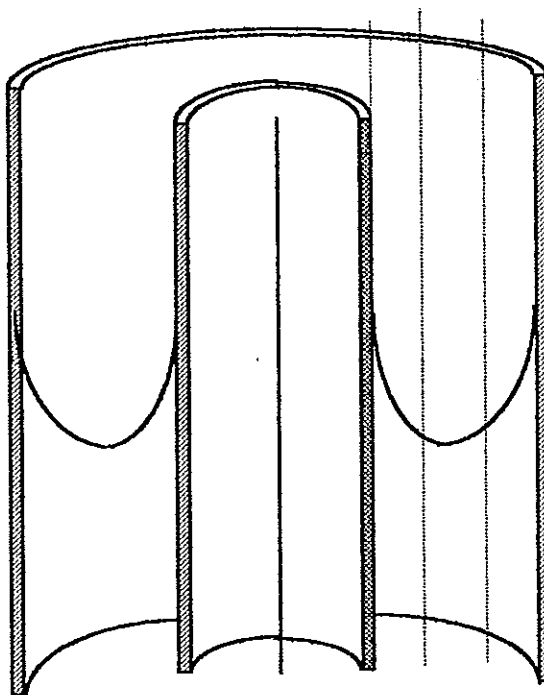
จากการศึกษาลักษณะการผสมด้วยวิธีการติดตามการตอบสนองของเทอร์เซอร์แล้วนำ ข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโชนที่ปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสม พบว่า ที่สารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 (น้ำ) และความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักผลการเทียบเคียงมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเดียวกัน หากมีการใช้เทคนิค optimization ที่เหมาะสมคาดว่าจะสามารถหา พารามิเตอร์ของการผสมจากแบบจำลองดังกล่าวได้ ส่วนในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักนั้น เส้นกราฟการตอบสนองของเทอร์เซอร์มีลักษณะที่แตกต่างไปจากกราฟของสารละลายแซนแทนที่มีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากลักษณะทางไฮโดรไดนามิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลาย

2.2 การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายของโชน

แบบจำลองโครงข่ายของโชนที่พัฒนาโดยยุติ สันติวุฒน์ (2538) ได้แบ่งถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกเป็น 4 ส่วนตามลักษณะทิศทางการไหลของของเหลว ในแต่ละส่วน จะแบ่งเป็นเซลล์ขนาดเล็ก โดยกำหนดให้แต่ละเซลล์มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ การผสมแบบย้อนกลับสามารถเกิดขึ้นได้ภายในขอบเขตของเซลล์นั้น ซึ่งแสดงว่าในบริเวณดาร์วินคัมเมอร์นั้นมีการผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกับในส่วนไรเซอร์ เนื่องจากในแนวรัศมีประกอบด้วยเซลล์ขนาดเล็กเพียงเซลล์เดียว แต่หากพิจารณาถึงรูปทรงของถังแล้วจะเห็นว่าของเหลวในส่วนไรเซอร์เป็นของเหลวที่ถูกบรรจุอยู่ในท่อทรงกระบอก ดังนั้นรูปแบบการไหลในส่วนไรเซอร์น่าจะคล้ายคลึงกับการไหลของของไหลนิวโตเนียนในท่อทรงกระบอก ซึ่งมีการกระจายของความเร็วเป็นรูปพาราโบลาที่จุดศูนย์กลางมีความเร็วสูงสุดและมีความเร็วลดลงเมื่อห่างจากจุดศูนย์กลางมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.5 เช่นเดียวกันในส่วนดาร์วินคัมเมอร์ที่ของไหลถูกบรรจุอยู่ในท่อ 2 ชั้น ดังนั้นรูปแบบการไหลจะเป็นไปตามทฤษฎีการไหลในท่อ 2 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.6

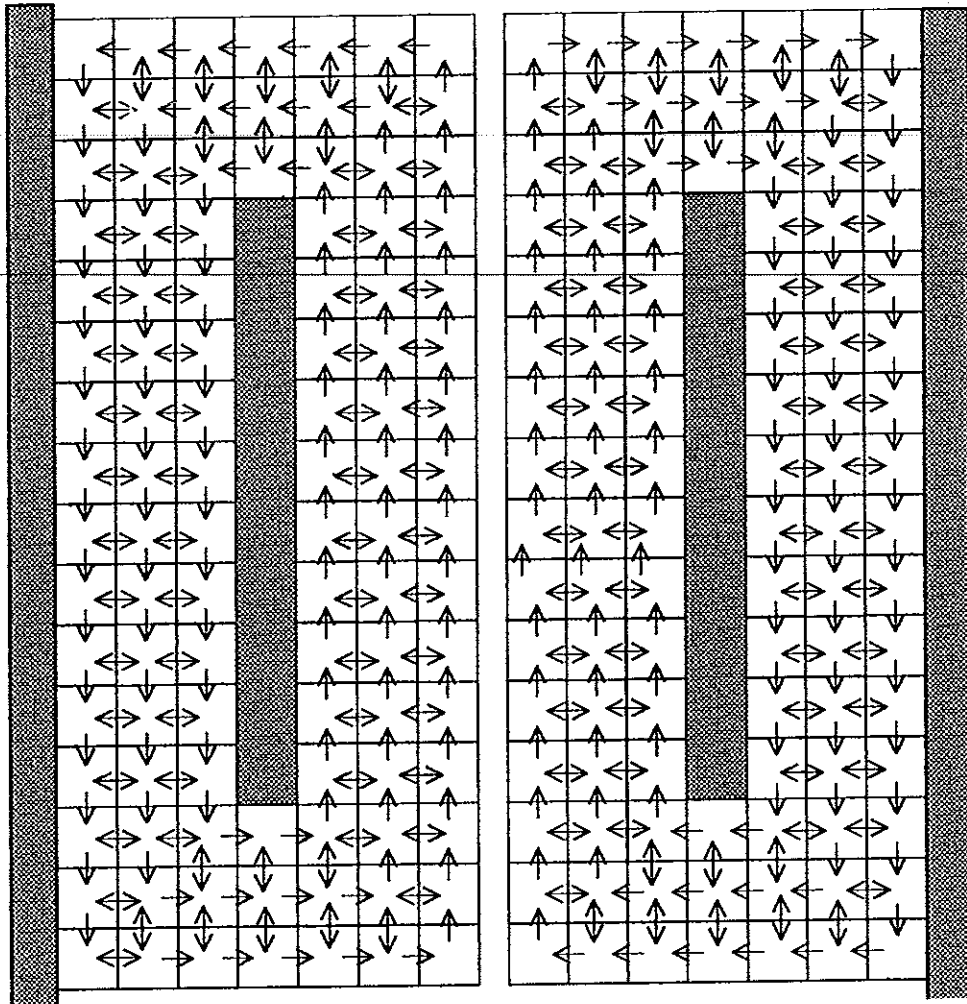


ภาพที่ 2.5 การไหลของของไหลภายในท่อทรงกระบอก

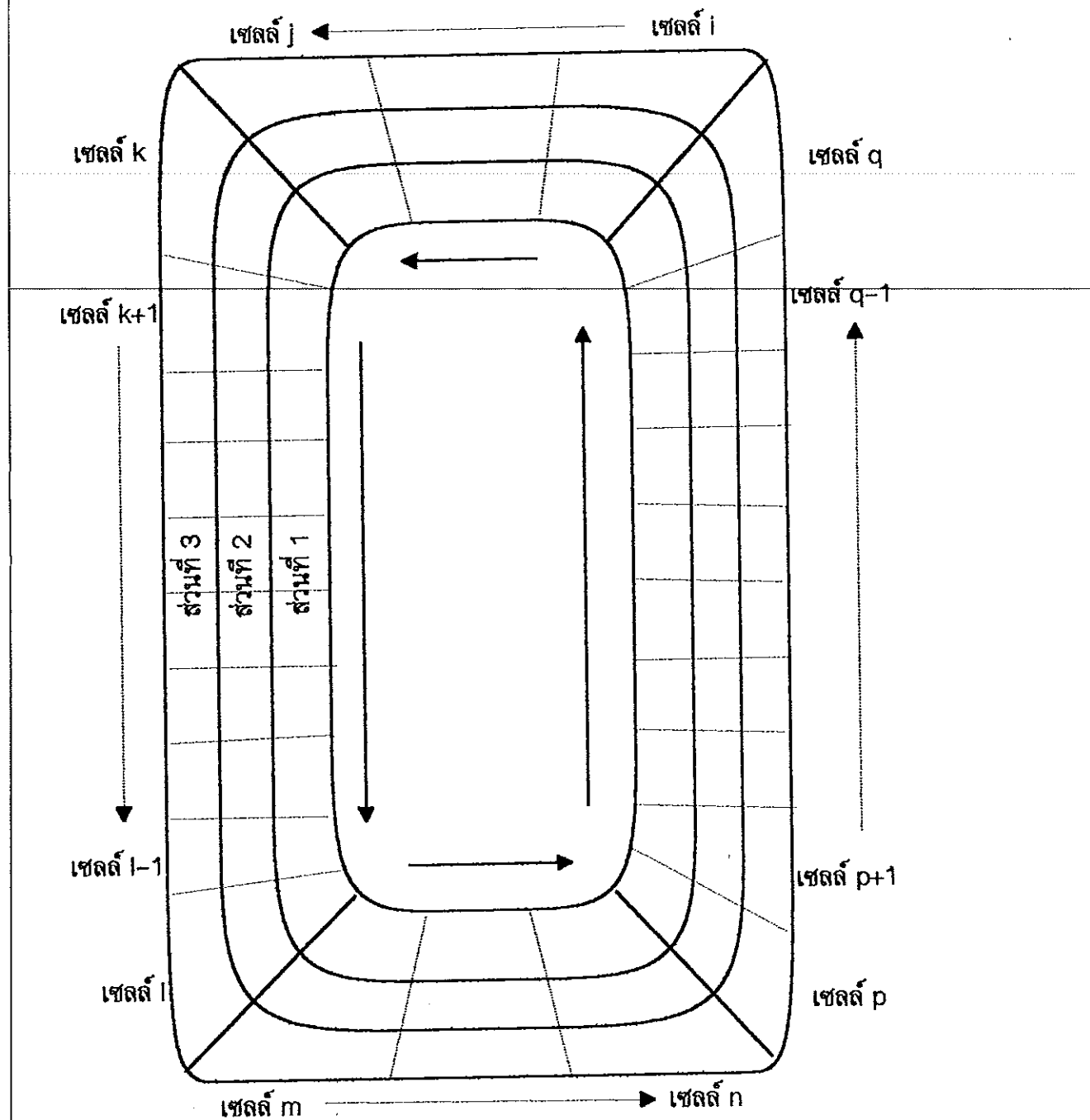


ภาพที่ 2.6 การไหลของของไหลภายในท่อ 2 ชั้น

นอกจากนี้ ข้อมูลจากการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์และลักษณะการผสมโดยการติดตามการตอบสนองของเทรซเซอร์ยังพบว่า เมื่อของเหลวมีความหนืดสูง การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ ในบริเวณที่ติดผนังจะมีการผสมเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณส่วนกลาง นอกจากนี้ยังพบบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งเมื่อสารละลายมีความหนืดสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะอธิบายถึงลักษณะการผสมที่เกิดขึ้นจากกรณีต่าง ๆ ได้ครอบคลุมหลายกรณี ซึ่งแบบจำลองของ Merchuk และ Younger (1990) และแบบจำลองของยุพดี สันติคุณันท์ (2538) ไม่สามารถจำลองสถานะการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ได้ จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นใหม่จากแบบจำลองโครงข่ายของไซน โดยแบ่งแบบจำลองโครงข่ายของไซนออกเป็น 3 ส่วนตามแนวแกน จะได้แบบจำลองที่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองโครงข่ายของโซนที่มีการพัฒนาแล้ว

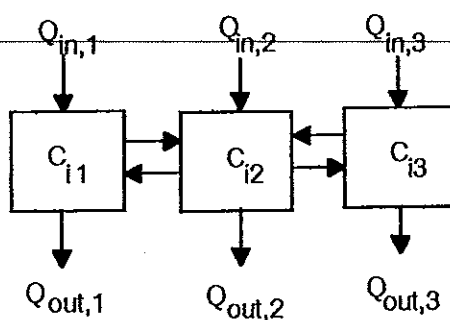


ภาพที่ 2.8 แบบจำลองโครงข่ายของโหนดที่มีการพัฒนาแล้ว
 เซลล์ i เป็นเซลล์แรกของโหนดที่ 1 เซลล์ j เป็นเซลล์สุดท้ายของโหนดที่ 1
 เซลล์ k เป็นเซลล์แรกของโหนดที่ 2 เซลล์ l เป็นเซลล์สุดท้ายของโหนดที่ 2

เซลล์ m เป็นเซลล์แรกของโซนที่ 3 เซลล์ n เป็นเซลล์สุดท้ายของโซนที่ 3

เซลล์ p เป็นเซลล์แรกของโซนที่ 4 เซลล์ q เป็นเซลล์สุดท้ายของโซนที่ 4

แต่ละเซลล์มีการแลกเปลี่ยนมวลเกิดขึ้น 2 ทิศทาง คือการแลกเปลี่ยนมวลไปข้างหน้า กับ การแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมีกับเซลล์ที่อยู่ข้าง ๆ



ภาพที่ 2.9 การแลกเปลี่ยนมวลที่เกิดขึ้นระหว่างเซลล์

วิธีการวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายของโซนนี้ โดยการแบ่งตั้งปฏิกรณ์แบบอากาศยกออกเป็น 4 โซน

โซนที่ 1 โซนส่วนบน (gas separation zone) ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนในแนวแกน แต่ละส่วนจะมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรต่างกัน แต่มีค่าเท่ากับในทุกเซลล์ที่อยู่ในส่วนเดียวกัน แต่ละส่วนถูกแบ่งเป็นเซลล์ย่อยจำนวนเท่ากัน ทำตุลมวลในแต่ละเซลล์

อัตราการมวลสะสม = อัตรามวลที่ไหลเข้า - อัตรามวลที่ไหลออก

-มวลที่แลกเปลี่ยนกับเซลล์ข้างเคียง

$$V_{i,1} \frac{dc_{i,1}}{dt} = Q_1 C_{(i-1),1} - Q_1 C_{i,1} - K_{i,1} (C_{i,1} - C_{i,2}) \quad (2.1)$$

$$V_{i,2} \frac{dc_{i,2}}{dt} = Q_2 C_{(i-1),2} - Q_2 C_{i,2} - K_{i,1} (C_{i,2} - C_{i,1}) - K_{i,2} (C_{i,2} - C_{i,3}) \quad (2.2)$$

$$V_{i,3} \frac{dc_{i,3}}{dt} = Q_3 C_{(i-1),3} - Q_3 C_{i,3} - K_{i,2} (C_{i,3} - C_{i,2}) \quad (2.3)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, j$$

$V_{i,1}$ = ปริมาตรของเซลล์ที่ i ส่วนที่ 1

$V_{i,2}$ = ปริมาตรของเซลล์ที่ i ส่วนที่ 2

$V_{i,3}$ = ปริมาตรของเซลล์ที่ i ส่วนที่ 3

$C_{i,1}$ = ความเข้มข้นของเซลล์ i ส่วนที่ 1

$C_{i,2}$ = ความเข้มข้นของเซลล์ i ส่วนที่ 2

$C_{i,3}$ = ความเข้มข้นของเซลล์ i ส่วนที่ 3

$C_{(i-1),1}$ = ความเข้มข้นของเซลล์ $i-1$ ส่วนที่ 1

K_1 = อัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างเซลล์ในส่วนที่ 1 กับส่วนที่ 2

K_2 = อัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างเซลล์ในส่วนที่ 2 กับส่วนที่ 3

Q_1 = อัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนที่ 1

Q_2 = อัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนที่ 2

Q_3 = อัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนที่ 3

โซนที่ 2 ดาร์วินคัมเมอร์

$$V_{k,1} \frac{dc_{k1}}{dt} = Q_1 C_{(k-1),1} - Q_1 C_{k,1} - K_{k,1} (C_{k,1} - C_{k,2}) \quad (2.4)$$

$$V_{k,2} \frac{dc_{k2}}{dt} = Q_2 C_{(k-1),2} - Q_2 C_{k,2} - K_{k,1} (C_{k,2} - C_{k,1}) - K_{k,2} (C_{k,2} - C_{k,3}) \quad (2.5)$$

$$V_{k,3} \frac{dc_{k3}}{dt} = Q_3 C_{(k-1),3} - Q_3 C_{k,3} - K_{k,2} (C_{k,3} - C_{k,2}) \quad (2.6)$$

$$k = 1, 2, 3 \dots l$$

โซนที่ 3 ส่วนฐาน

$$V_{m,1} \frac{dc_{m,1}}{dt} = Q_1 C_{(m-1),1} - Q_1 C_{m,1} - K_{m,1}(C_{m,1} - C_{m,2}) \quad (2.7)$$

$$V_{m,2} \frac{dc_{m,2}}{dt} = Q_2 C_{(m-1),2} - Q_2 C_{m,2} - K_{m,1}(C_{m,2} - C_{m,1}) - K_{m,2}(C_{m,2} - C_{m,3}) \quad (2.8)$$

$$V_{m,3} \frac{dc_{m,3}}{dt} = Q_3 C_{(m-1),3} - Q_3 C_{m,3} - K_2(C_{m,3} - C_{m,2}) \quad (2.9)$$

$$m = 1, 2, 3 \dots n$$

โซนที่ 4 ส่วนโพรเซส

$$V_{p,1} \frac{dc_{p,1}}{dt} = Q_1 C_{(p-1),1} - Q_1 C_{p,1} - K_{p,1}(C_{p,1} - C_{p,2}) \quad (2.10)$$

$$V_{p,2} \frac{dc_{p,2}}{dt} = Q_2 C_{(p-1),2} - Q_2 C_{p,2} - K_{p,1}(C_{p,2} - C_{p,1}) - K_{p,2}(C_{p,2} - C_{p,3}) \quad (2.11)$$

$$V_{p,3} \frac{dc_{p,3}}{dt} = Q_3 C_{(p-1),3} - Q_3 C_{p,3} - K_{p,2}(C_{p,3} - C_{p,2}) \quad (2.12)$$

$$p = 1, 2, 3 \dots q$$

สมการที่ (2.1 - 2.12) สามารถหาค่าเฉลยเชิงตัวเลขได้โดยใช้ตัวอินทิเกรตมาตรฐาน

เช่น Runge Kutta, Multistep method

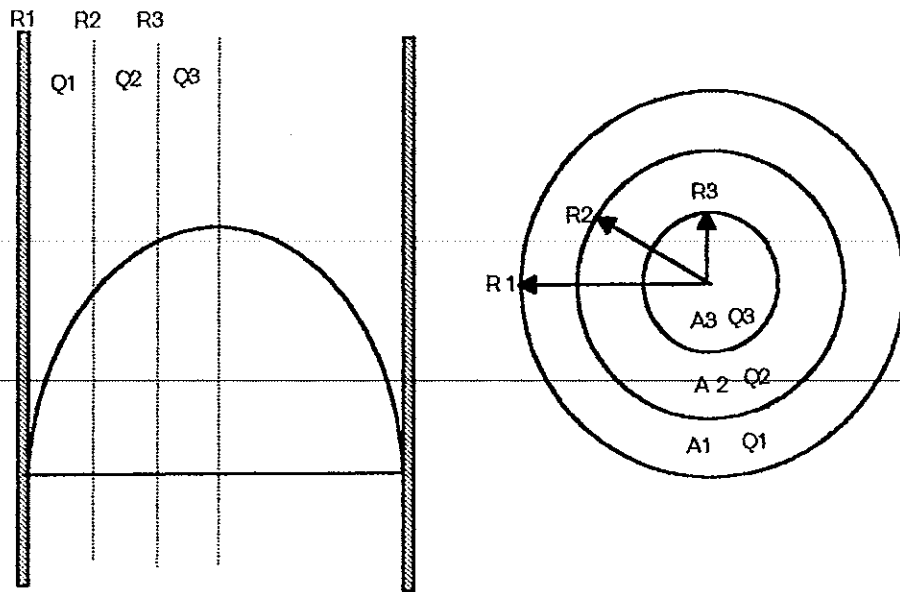
2.3 การหาผลเฉลยของแบบจำลอง

การหาผลเฉลยของสมการ (2.1) ถึง (2.12) จะต้องใช้การอินทิเกรตโดยวิธีเชิงเลข ซึ่งอาจเริ่มต้นโดยกำหนดปริมาตร (V) ของทุกเซลล์ตามลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของของไหลในถัง กำหนดค่า K ส่วน Q_1 , Q_2 และ Q_3 สามารถหาได้จากสมการต่อเนื่องโดยมีเงื่อนไขว่าโปรไฟล์ของการไหลเป็นแบบพาราโบลา และเราทราบความเร็วเฉลี่ย

2.3.1 การหาค่า Q_1 , Q_2 และ Q_3 โดยวิธีเชิงวิเคราะห์

1. การกำหนดพื้นที่การไหลในโซนโรเตอร์

ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองตามสมการ (2.1) - (2.12) ต้องทราบปริมาตรในแต่ละเซลล์และอัตราการไหลเชิงปริมาตรในแต่ละส่วน อัตราการไหลเชิงปริมาตรขึ้นอยู่กับความเร็ว เนื่องจากภายในโซนโรเตอร์มีรูปแบบการไหลเป็นแบบพาราโบลา ซึ่งมีความเร็วที่จุดต่าง ๆ แตกต่างกัน ดังนั้นจึงอาจจะแบ่งพื้นที่ในโซนโรเตอร์ออกเป็นสามส่วนตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว โดยการแบ่งเส้นรัศมีออกเป็นสามส่วนเท่า ๆ กัน จะได้พื้นที่สามส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดต่างกัน ดังแสดงในภาพ R_1 , R_2 และ R_3 คือ รัศมีของส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 A_1 , A_2 และ A_3 คือ พื้นที่หน้าตัดของส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 Q_1 , Q_2 และ Q_3 คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (2.13) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรภายในท่อที่มีของไหลนิวโตเนียน



ภาพที่ 2.10 การแบ่งพื้นที่ในส่วนของเรเซอร์หรือออกเป็นสามส่วน

$$Q = \int_{R_i}^{R_{H1}} \left(\frac{p_0 - p_L}{4\mu L} \right) R^2 \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) 2\pi r dr \quad (2.13)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร

R คือ รัศมีของท่อทรงกระบอก

p_0 คือ ความหนาแน่นที่จุดเริ่มต้นของท่อ

p_L คือ ความหนาแน่นที่ส่วนปลายของท่อ

L คือ ความยาวของท่อ

μ คือ ความหนืดของของไหล

และทราบว่า

$$V = Q/A \quad (2.14)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของของไหลในท่อ

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร

A คือ พื้นที่หน้าตัด

ดังนั้น จากสมการที่ (2.13) และ (2.14) สามารถหาความเร็วในส่วนต่าง ๆ ได้ ด้วยสมการ

(2.15)

$$V = \frac{1}{A} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \left(\frac{p_0 - p_L}{4\mu L} \right) R^2 \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) 2\pi r dr \quad (2.15)$$

ในการไหลของของไหลภายในท่อ พบว่า ความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณจุดกึ่งกลางของท่อนั้นคือ R เท่ากับ 0 เมื่อแทน R ด้วย 0 ลงในสมการ (2.15) จะได้ค่าความเร็วสูงสุด

$$V_{\max} = \left(\frac{p_0 - p_L}{4\mu L} \right) R^2 \quad (2.16)$$

และหาความเร็วเฉลี่ย (V_{av}) ได้เท่ากับ

$$V_{\max} = 2 * V_{av} \quad (2.17)$$

เพราะฉะนั้น

$$\left(\frac{p_0 - p_L}{4\mu L} \right) R^2 = 2 * V_{av} \quad (2.18)$$

แทนค่าของสมการ (2.18) ลงในสมการ (2.15)

$$V = \frac{2 * V_{av}}{A} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) 2\pi r dr \quad (2.19)$$

สามารถหาผลเฉลยของสมการที่ (2.19) ได้ดังนี้

$$V = \frac{2 * V_{av}}{A} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) 2\pi r dr$$

$$V = \frac{4\pi * V_{av}}{A} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) r dr$$

$$V = \frac{4\pi * V_{av}}{A} \left[\int_{R_i}^{R_{i+1}} r dr - \int_{R_i}^{R_{i+1}} \frac{r^3}{R^2} dr \right]$$

$$V = \frac{4\pi * V_{av}}{A} \left[\left(\frac{R_i^2}{2} - \frac{R_{i+1}^2}{2} \right) - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_i^4}{4} - \frac{R_{i+1}^4}{4} \right) \right]$$

$$\frac{V}{V_{av}} = \frac{4\pi}{A} \left[\left(\frac{R_i^2}{2} - \frac{R_{i+1}^2}{2} \right) - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_i^4}{4} - \frac{R_{i+1}^4}{4} \right) \right] \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) เมื่อทราบค่าความเร็วเฉลี่ยในโซนไรเซอร์ก็จะสามารถหาความเร็วในแต่ละส่วนได้ และเมื่อทราบความเร็วของแต่ละส่วนแล้วก็จะสามารถหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแต่ละส่วนได้ด้วยสมการที่ (2.14) เพราะฉะนั้น จะได้สมการที่ใช้ในการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแต่ละส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1

$$Q_1 = V_1 A_1 \quad (2.21)$$

$$V_1 = \frac{4\pi * V_{av}}{A_1} \left[\left(\frac{R_1^2}{2} - \frac{R_2^2}{2} \right) - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_1^4}{4} - \frac{R_2^4}{4} \right) \right] \quad (2.22)$$

$$A_1 = \pi R^2 - \pi R_2^2 \quad (2.23)$$

ส่วนที่ 2

$$Q_2 = V_2 A_2 \quad (2.24)$$

$$V_2 = \frac{4\pi * V_{av}}{A_2} \left[\left(\frac{R_2^2}{2} - \frac{R_3^2}{2} \right) - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_2^4}{4} - \frac{R_3^4}{4} \right) \right] \quad (2.25)$$

$$A_2 = \pi R_2^2 - \pi R_3^2 \quad (2.26)$$

ส่วนที่ 3

$$Q_3 = V_3 A_3 \quad (2.27)$$

$$V_3 = \frac{4\pi * V_{av}}{A_3} \left[\frac{R_3^2}{2} - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_3^4}{4} \right) \right] \quad (2.28)$$

$$A_3 = \pi R_3^2 \quad (2.29)$$

2. การกำหนดพื้นที่การไหลในโซนดาวน์คัมเมอร์

ในโซนดาวน์คัมเมอร์ กำหนดให้มีรูปแบบการไหลคล้ายกับการไหลของของไหลนิวโตเนียนในท่อสองชั้น จึงแบ่งพื้นที่ออกเป็นสามส่วนเช่นเดียวกันดังแสดงในภาพ โดยกำหนดให้แต่ละส่วนนั้นมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับอัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนโรเซอร์ R , คือ รัศมีของท่อชั้นใน R คือ รัศมีของท่อชั้นนอก สมการในการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรในของไหลที่มีการไหลในท่อสองชั้นแสดงในสมการ (2.30) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลนิวโตเนียนในท่อสองชั้น

$$Q = \left(\frac{p_0 - p_L}{4\mu L} \right) R^2 \int_{R_1}^R \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \left(\frac{1-k^2}{\ln \frac{1}{k}} \right) \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] 2\pi r dr \quad (2.30)$$

และสมการที่ (2.31) เป็นสมการที่ใช้ในการหาความเร็วของของไหลนิวโตเนียนที่ไหลในท่อสองชั้น

$$V_{av} = \left(\frac{p_0 - p_L}{8\mu L} \right) R^2 \left[\frac{1-k^4}{1-k^2} - \left(\frac{1-k^2}{\ln \left(\frac{1}{k} \right)} \right) \right] \quad (2.31)$$

โดยที่ $k = R_1/R$

$$\left(\frac{p_0 - p_L}{4\mu L} \right) R^2 = 2 * \frac{V_{av}}{\left[\frac{1-k^4}{1-k^2} - \left(\frac{1-k^2}{\ln \left(\frac{1}{k} \right)} \right) \right]} \quad (2.32)$$

เอาสมการที่ (2.32) แทนลงในสมการที่ (2.30)

$$Q = 2 * \frac{V_{av}}{\left[\frac{1-k^4}{1-k^2} - \left(\frac{1-k^2}{\ln \left(\frac{1}{k} \right)} \right) \right]} \int_{R_1}^R \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \left(\frac{1-k^2}{\ln \frac{1}{k}} \right) \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] 2\pi r dr \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) สามารถหาผลเฉลยได้ดังนี้

$$Q = 4\pi * \frac{V_{av}}{\left[\frac{1-k^4}{1-k^2} - \left(\frac{1-k^2}{\ln \left(\frac{1}{k} \right)} \right) \right]} \int_{R_1}^R \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \left(\frac{1-k^2}{\ln \frac{1}{k}} \right) \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] r dr$$

$$Q = 4\pi * \frac{V_{av}}{\left[\frac{1-k^4}{1-k^2} - \left(\frac{1-k^2}{\ln \left(\frac{1}{k} \right)} \right) \right]} \left[\int_{R_1}^R r dr - \frac{1}{R^2} \int_{R_1}^R r^2 dr + \left(\frac{1-k^2}{\ln \frac{1}{k}} \right) \int_{R_1}^R r \ln \left(\frac{r}{R} \right) dr \right]$$

$$Q = 4\pi * \left[\frac{V_{av}}{\frac{1-k^4}{1-k^2} \left(\frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right)} \right] \left[\int_{R_1}^R r dr - \frac{1}{R^2} \int_{R_1}^R r^2 dr + \left(\frac{1-k^2}{\ln\frac{1}{k}} \right) \left[\int_{R_1}^R r \ln r - \ln R \int_{R_1}^R r dr \right] \right]$$

$$Q = 4\pi * \left[\frac{V_{av}}{\frac{1-k^4}{1-k^2} \left(\frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right)} \right] \left[\frac{R^2-R_1^2}{2} - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R^4-R_1^4}{4} \right) + \left(\frac{1-k^2}{\ln\frac{1}{k}} \right) \left[\frac{R^2}{2} (\ln R - \frac{1}{2}) - \frac{R_1^2}{2} (\ln R_1 - \frac{1}{2}) - \ln R \left(\frac{R^2-R_1^2}{2} \right) \right] \right] \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) สามารถนำมาใช้ในการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนต่าง ๆ ของโหนดดาวน์คัมเมอร์ได้ดังนี้

ส่วนที่ 1

$$Q_1 = 4\pi * \left[\frac{V_{av}}{\frac{1-k^4}{1-k^2} \left(\frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right)} \right] \left[\frac{R_2^2-R_1^2}{2} - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_2^4-R_1^4}{4} \right) + \left(\frac{1-k^2}{\ln\frac{1}{k}} \right) \left[\frac{R_2^2}{2} (\ln R_2 - \frac{1}{2}) - \frac{R_1^2}{2} (\ln R_1 - \frac{1}{2}) - \ln R \left(\frac{R_2^2-R_1^2}{2} \right) \right] \right]$$

ส่วนที่ 2

$$Q_2 = 4\pi * \left[\frac{V_{av}}{\frac{1-k^4}{1-k^2} \left(\frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right)} \right] \left[\frac{R_3^2-R_2^2}{2} - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_3^4-R_2^4}{4} \right) + \left(\frac{1-k^2}{\ln\frac{1}{k}} \right) \left[\frac{R_3^2}{2} (\ln R_3 - \frac{1}{2}) - \frac{R_2^2}{2} (\ln R_2 - \frac{1}{2}) - \ln R \left(\frac{R_3^2-R_2^2}{2} \right) \right] \right]$$

ส่วนที่ 3

$$Q_3 = 4\pi * \left[\frac{V_{av}}{\frac{1-k^4}{1-k^2} \left(\frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right)} \right] \left[\frac{R^2-R_3^2}{2} - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R^4-R_3^4}{4} \right) + \left(\frac{1-k^2}{\ln\frac{1}{k}} \right) \left[\frac{R^2}{2} (\ln R - \frac{1}{2}) - \frac{R_3^2}{2} (\ln R_3 - \frac{1}{2}) - \ln R \left(\frac{R^2-R_3^2}{2} \right) \right] \right]$$

2.3.2 การหาค่า Q_1 , Q_2 และ Q_3 โดยวิธีเชิงตัวเลข

1. ผลการกำหนดพื้นที่การไหลในโซนโรเซอร์

ดังปฏิกรณชีวภาพแบบอากาศยกที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีรัศมีของท่อครีฟเท่ากับ 6.5 เซนติเมตร เมื่อทำการแบ่งพื้นที่การไหลออกเป็น 3 ส่วน โดยแบ่งเส้นรัศมีออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน จะได้ $R_1 = 6.5$ เซนติเมตร $R_2 = 4.2$ เซนติเมตร และ $R_3 = 2.1$ เซนติเมตร และสามารถหาอัตราส่วนระหว่างความเร็วในส่วนต่าง ๆ ต่อความเร็วเฉลี่ยได้

โดยใช้สมการ

$$V_1 = \frac{4\pi V_{av}}{A_1} \left[\left(\frac{R_1^2}{2} - \frac{R_2^2}{2} \right) - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_1^4}{4} - \frac{R_2^4}{4} \right) \right] \Rightarrow V_1 = 0.55624 V_{av}$$

$$V_2 = \frac{4\pi V_{av}}{A_2} \left[\left(\frac{R_2^2}{2} - \frac{R_3^2}{2} \right) - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_2^4}{4} - \frac{R_3^4}{4} \right) \right] \Rightarrow V_2 = 1.44553 V_{av}$$

$$V_3 = \frac{4\pi V_{av}}{A_3} \left[\frac{R_3^2}{2} - \frac{1}{R^2} \left(\frac{R_3^4}{4} \right) \right] \Rightarrow V_3 = 1.88906 V_{av}$$

ดังนั้นเมื่อเราทราบความเร็วเฉลี่ยก็จะสามารถหาความเร็วในส่วนต่าง ๆ และเมื่อทราบความเร็วก็สามารถหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรในแต่ละส่วนได้

สมมุติว่าความเร็วเฉลี่ยจากการทดลองวัดได้เท่ากับ 20 เซนติเมตรต่อวินาที ความเร็วในส่วนต่าง ๆ จะเท่ากับ

$$V_1 = 11.125 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

$$V_2 = 28.906 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

$$V_3 = 37.781 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

เพื่อทดสอบความถูกต้อง โดยการคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนต่าง ๆ (Q_1 , Q_2 และ Q_3) จากความเร็วที่คำนวณได้คูณกับพื้นที่หน้าตัด เทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) ที่คำนวณได้จากความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้คูณกับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ถ้า $Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q$ แสดงว่าการคำนวณถูกต้อง

$$Q_1 = V_1 A_1 \Rightarrow Q_1 = 8.21352 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$Q_2 = V_2 A_2 \Rightarrow Q_2 = 0.00128 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$Q_3 = V_3 A_3 \Rightarrow Q_3 = 5.56341 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0.00265 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$Q = V_{av} (\pi R^2) \Rightarrow Q = 0.00265 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$$

3.2.2. ผลการแบ่งพื้นที่การไหลในโซนดาวน์คัมเมอร์

ในโซนดาวน์คัมเมอร์ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ในการทดลองมีขนาดรัศมีของท่อชั้นในเท่ากับ 6.5 เซนติเมตร และรัศมีของท่อชั้นนอกเท่ากับ 9.5 เซนติเมตร ให้ R_1 คือรัศมีของท่อชั้นใน และ R_2 คือรัศมีของท่อชั้นนอก ทำการแบ่งพื้นที่การไหลระหว่าง R_1 กับ R_2 ออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้สมการ โดยกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรในแต่ละส่วนมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนนั้น ๆ ในโซนโรเซออร์

ในส่วนที่ 1 $Q_1 = 8.21352 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ ได้สมการดังนี้

$$8.21352 \times 10^{-4} = 2 * \frac{V_{av}}{\left[\frac{1-k^4}{1-k^2} \left(\frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right) \right]} \int_{R_1}^{R_2} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \left(\frac{1-k^2}{\ln\frac{1}{k}} \right) \ln\left(\frac{r}{R} \right) \right] 2\pi r dr$$

หาค่า R_2 โดยใช้ฟังก์ชัน root() จากโปรแกรมสำเร็จรูป Mathcad PLUS 6.0 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. สมมติค่า R_2

2. ใช้ฟังก์ชัน root() หาค่า R_2 ที่ถูกต้อง โดยมีรูปแบบดังนี้

$$R_2 = \text{root} \left(Q_1 - 2 * \frac{V_{av}}{\left[\frac{1-k^4}{1-k^2} \left(\frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right) \right]} \int_{R_1}^{R_2} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \left(\frac{1-k^2}{\ln\frac{1}{k}} \right) \ln\left(\frac{r}{R} \right) \right] 2\pi r dr, R_2 \right)$$

$$R_2 = 0.07661 \text{ m}$$

3. ทดสอบค่าที่ได้โดยใช้สมการ (12)

ในส่วนที่ 2 $Q_2 = 0.00128 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ ได้สมการดังนี้

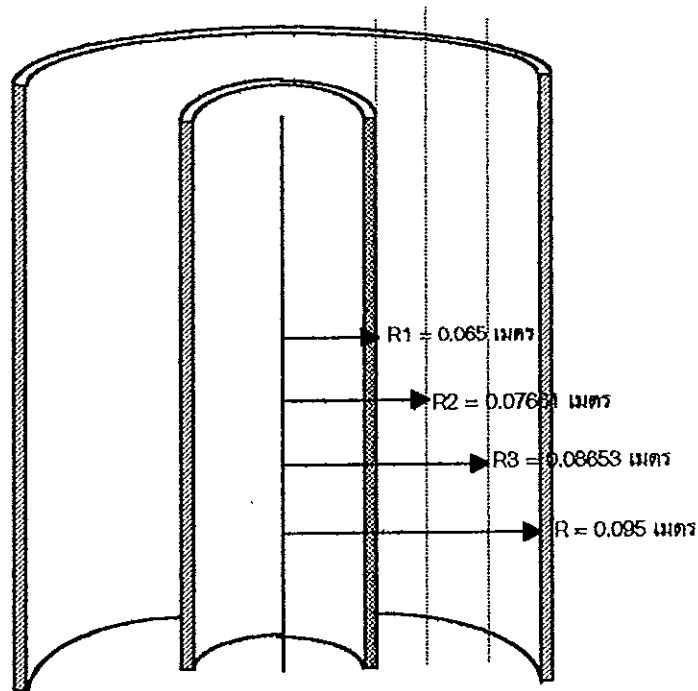
$$0.00128 = 2 * \frac{V_{av}}{\left[\frac{1-k^4}{1-k^2} \left(\frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right) \right]} \int_{R_2}^{R_3} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \left(\frac{1-k^2}{\ln\frac{1}{k}} \right) \ln\left(\frac{r}{R} \right) \right] 2\pi r dr$$

หาค่า R_3 ด้วยวิธีการเช่นเดียวกันในการหาค่า R_2

ได้ $R_3 = 0.08653$ m

เพราะฉะนั้น การแบ่งดาวนั้คัมเมอร์เป็นสามส่วนตามภาพที่ จะได้ $R_1 = 0.065$ เมตร

$R_2 = 0.07661$ เมตร $R_3 = 0.08653$ เมตร และ $R = 0.095$ เมตร ซึ่งสัดส่วนนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงถ้าขนาดของถังหมักไม่เปลี่ยนแปลง จึงสามารถใช้ค่าเหล่านี้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองเพื่อการตอบสนองของทรานเชอร์ตามสมการ (2.1 - 2.12)



ภาพที่ 2.11 การแบ่งพื้นที่ในส่วนดาวนั้คัมเมอร์

2.4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายของโชนที่พัฒนาขึ้น

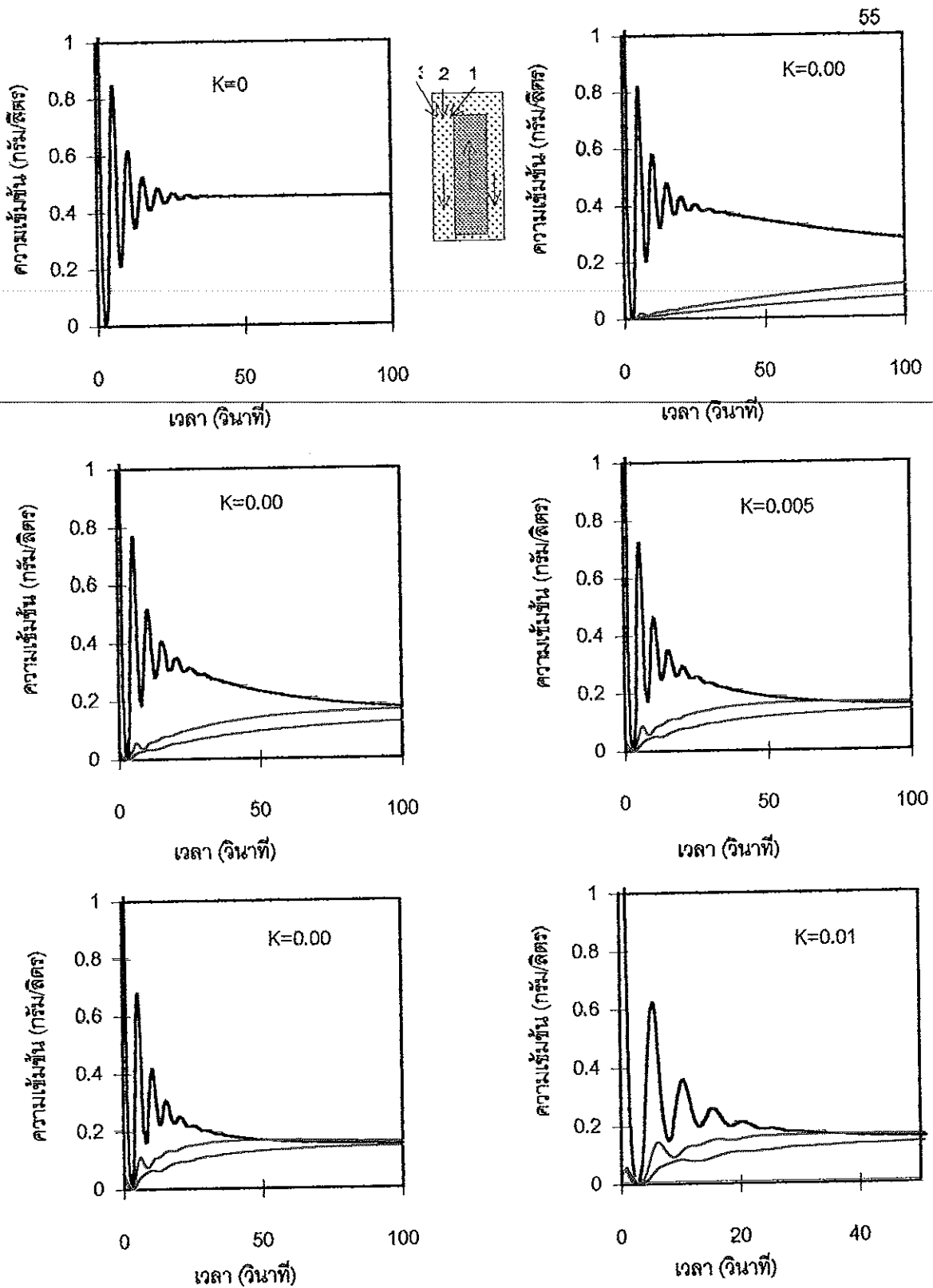
แบบจำลองโครงข่ายของโชนที่พัฒนาขึ้นโดยยุพดี สันติวุฒน์ (2538) นั้น แม้ว่าจะสามารถจำลองสถานการณ์ได้กว้างขวางกว่าแบบจำลองของ Merchuk และ Younger (1990) แต่จากการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าว พบว่า สามารถให้ผลการซิมิวเลตใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสารละลายแซนแรนที่ช่วงที่มีความเข้มข้นต่ำ (0.1 %) ซึ่งยังมีคุณสมบัติคล้ายของไหลนิวโตเนียน แต่ไม่สามารถเทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสารละลายแซนแรนที่มีความเข้มข้นสูงกว่านั้นได้ เนื่องจากสารละลายแสดงคุณสมบัติเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนมากขึ้น ทำให้เกิดไฮโดรไดนามิกส์ที่ซับซ้อนมากขึ้น แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในที่นี้ได้พิจารณาผลของโปรไฟล์ของความเร็วในแนวรัศมีและการผสมในแนวขวาง (transverse mixing)

ผลการซิมิวเลตแบบจำลองโครงข่ายของโชนที่มีการพัฒนาแล้ว

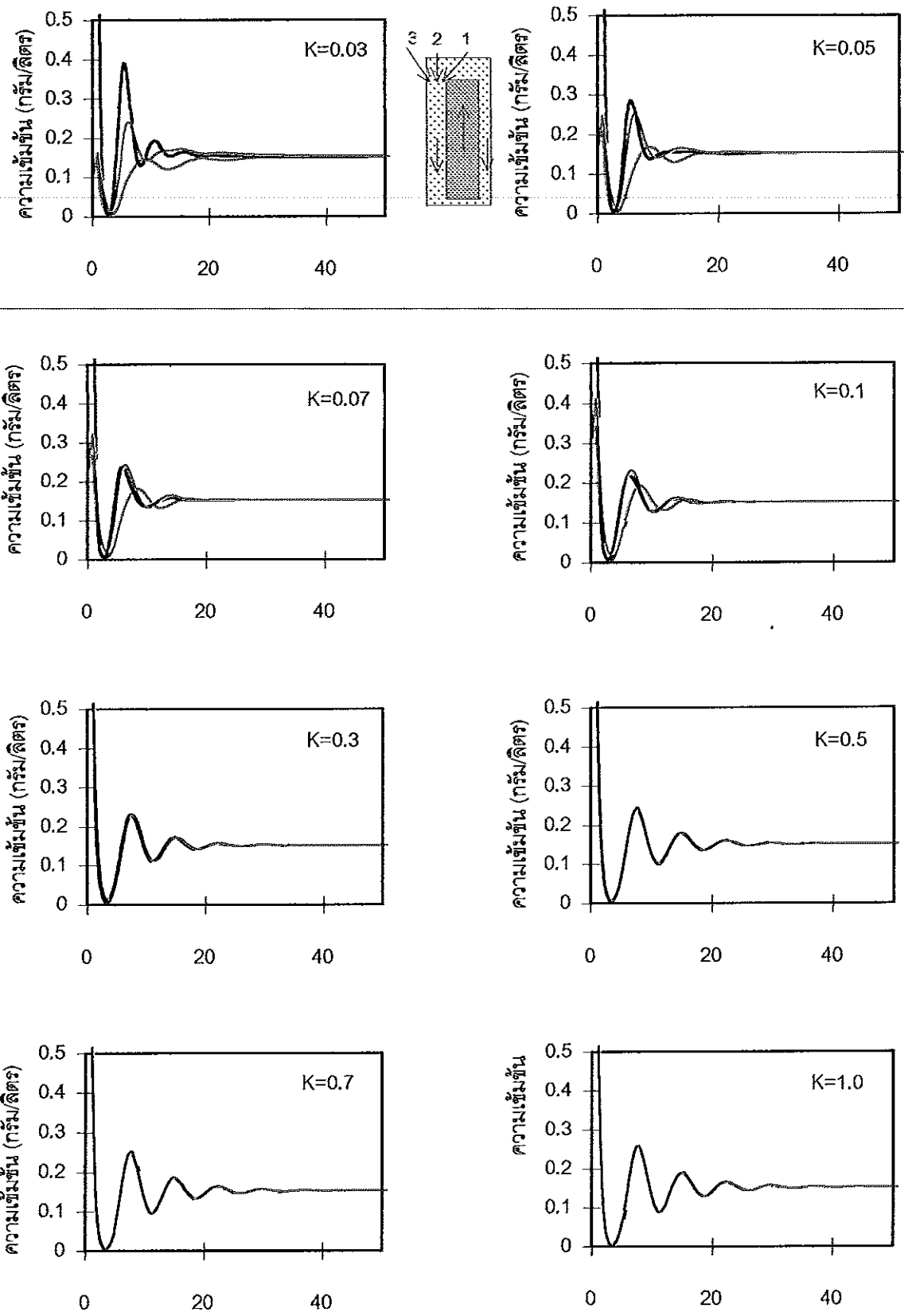
กรณีที่ 1 ผลของอัตราการแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมี (ค่า K)

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมี โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นคงที่ ผลการซิมิวเลตเป็นดังภาพที่ 2.12-2.13 ซึ่งแต่ละภาพแสดงกราฟการตอบสนองของเทรเซอร์ในเซลล์ที่ 1 ของดาวนัคัมเมอร์โชนในรูปที่ 1 รูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่าเมื่อค่า K เป็น 0 ซึ่งหมายถึงไม่มีการแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมีเลย การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเฉพาะในรูปที่มีการใส่เทรเซอร์ลงไปเท่านั้น ในที่นี้คือรูปที่ 2 ซึ่งเป็นรูปที่อยู่บริเวณกึ่งกลาง ส่วนในรูปที่ 1 และรูปที่ 3 นั้นจะมีความเข้มข้นของเทรเซอร์เป็น 0 ตลอดเมื่อค่า K เพิ่มขึ้น จะสังเกตเห็นว่าในรูปที่ 2 จะเป็นพีคในช่วงต้นหลังจากนั้นกราฟจะเป็นเส้นตรงแต่จะค่อย ๆ ลดลงจนเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย ในขณะที่ในรูปที่ 1 และรูปที่ 3 เส้นกราฟจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้ายซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับค่าสุดท้ายในรูปที่ 2 นั้นแสดงว่าการผสมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว เมื่อค่า K เพิ่มขึ้น ทำให้เส้นกราฟของรูปทั้งสามเข้าใกล้กันเร็วขึ้น จนในที่สุดกราฟทั้งสามกลายเป็นเส้นเดียวกันเมื่อค่า K สูงขึ้นถึงระดับหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ทำให้การผสมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในแนวรัศมี เพราะฉะนั้น ค่า K จึงเป็นค่าที่กำหนดระดับการผสมในแนวรัศมี (transverse mixing) ค่า K ที่มีค่าน้อย แสดงว่าการผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้ความเข้มข้นของเทรเซอร์มีความแตกต่างกันบนพื้นที่หน้าตัด

เดียวกัน ค่า K ที่มีค่ามากแสดงถึงการผสมในแนวรัศมีที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันบนพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน ในแบบจำลองของยุพดี สันติคุณ (2538) นั้น ได้กำหนดให้การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น ถ้าต้องการชิมิวดแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้สอดคล้องกับแบบจำลองของยุพดี ก็กำหนดให้ค่า K มีค่าในระดับที่ทำให้เกิดการผสมที่สมบูรณ์ในแนวรัศมี



ภาพที่ 2.12 Tracer response curve ที่ได้จากการขีมิวเลตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิต
เปลี่ยนมวลในแนวรัศมี — ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 — ตำแหน่งที่ 3



ภาพที่ 2.13 Tracer response curve ที่ได้จากการขีมิวเลต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการแลกเปลี่ยนมวลในแนวรัศมี (K) — ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 — ตำแหน่งที่ 3

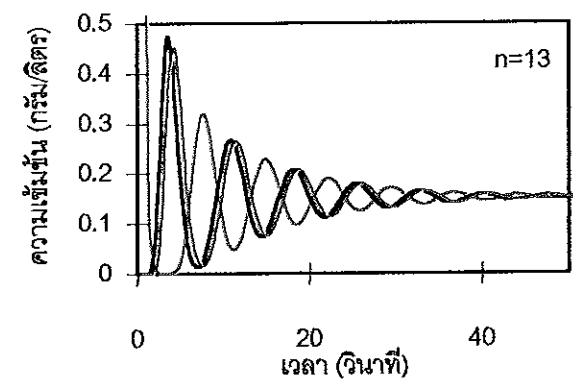
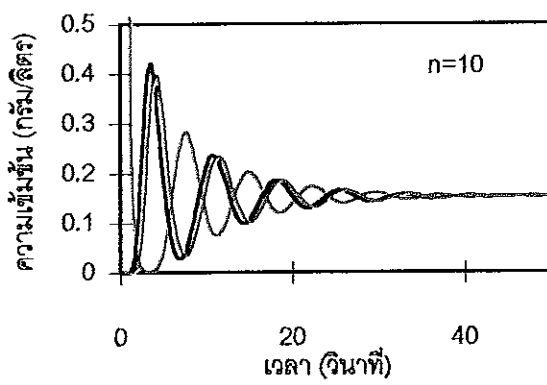
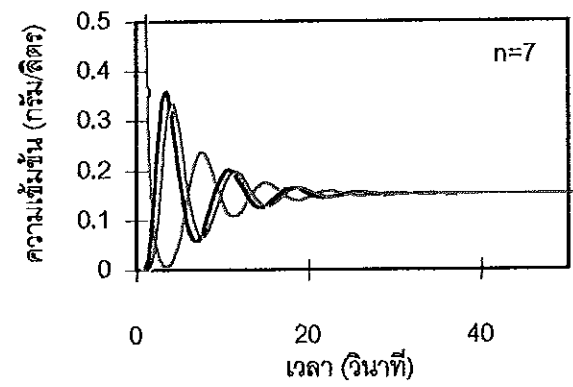
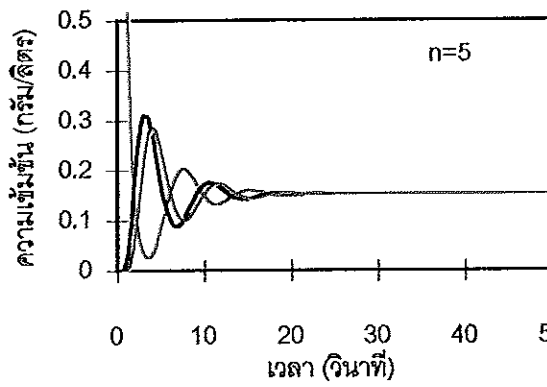
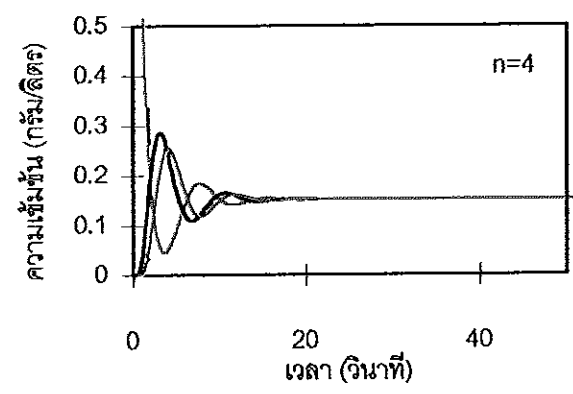
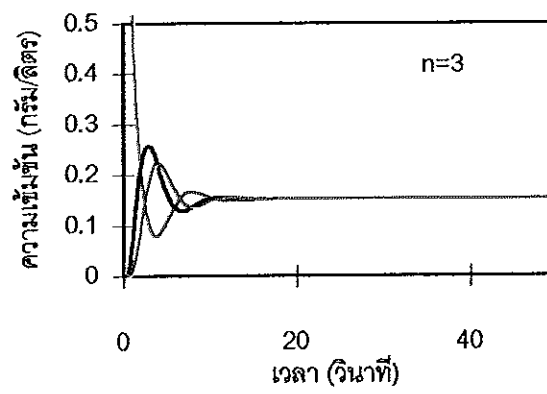
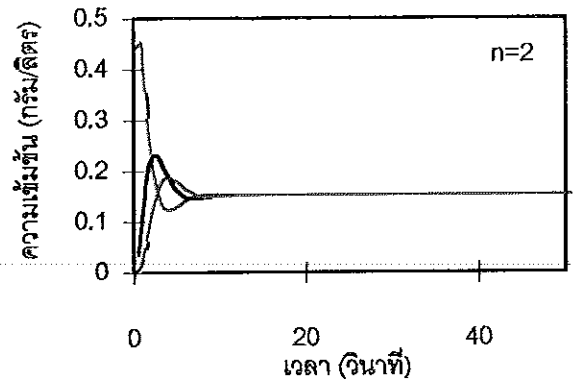
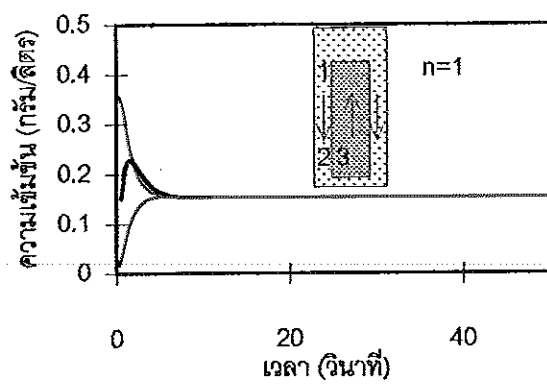
กรณีที่ 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ (N) เมื่อกำหนดให้การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

ผลการซิมิวเลตจากการเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซน โดยกำหนดให้ค่า K คงที่เท่ากับ 1 และ $N_1 = N_2 = N_3 = N_4$ และค่อย ๆ เพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งเป็นกรณีเดียวกันกับการใช้แบบจำลองของยูปดี เนื่องจากกำหนดให้ K มีค่ามาก ทำให้การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ กราฟทั้ง 3 เส้นซึ่งแสดงการตอบสนองของความเข้มข้นของเทรเซอร์ทั้ง 3 รูปในเซลล์แรกของดาวนัมคัมเมอริโซนให้ผลออกมาเป็นเส้นเดียวกัน พบว่าเมื่อจำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้นกราฟจะเข้าสู่ค่าคงที่ได้ช้าลง นั่นคือต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการได้แบบจำลองของยูปดี สันติวุฒน์ (2538) เช่นกัน และด้วยเหตุผลเดียวกันคือ เมื่อจำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้น ลักษณะการผสมจะเข้าใกล้แบบปลั๊กมากขึ้น ทำให้ต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้น

กรณีที่ 3 ผลการเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ (N) ในกรณีที่การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์

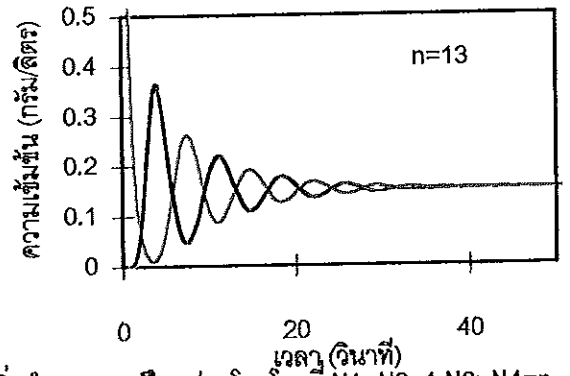
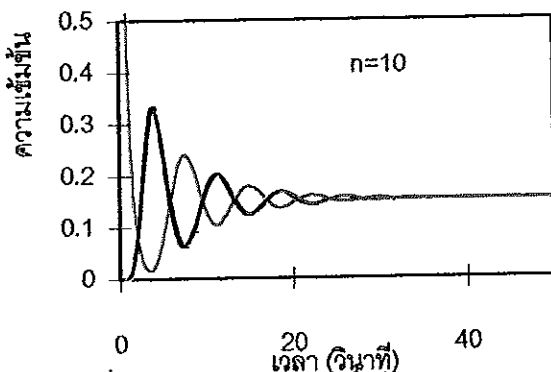
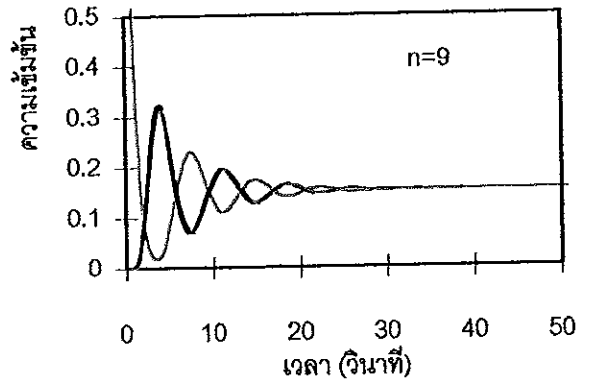
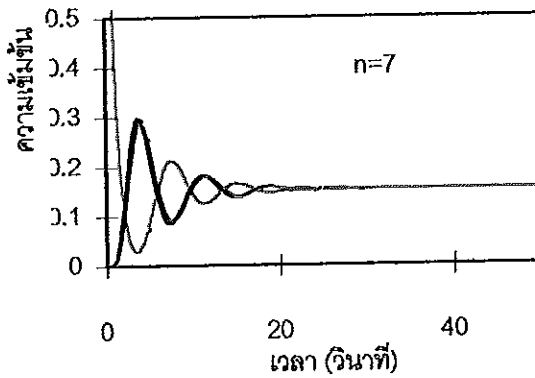
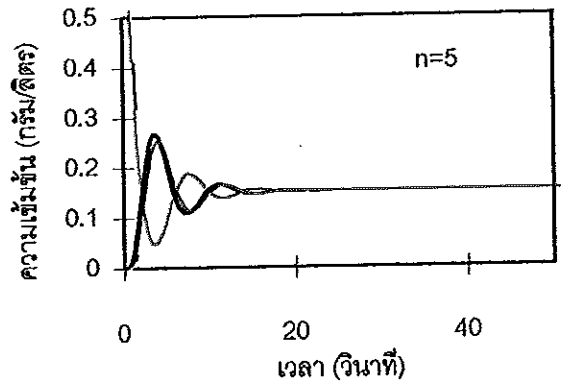
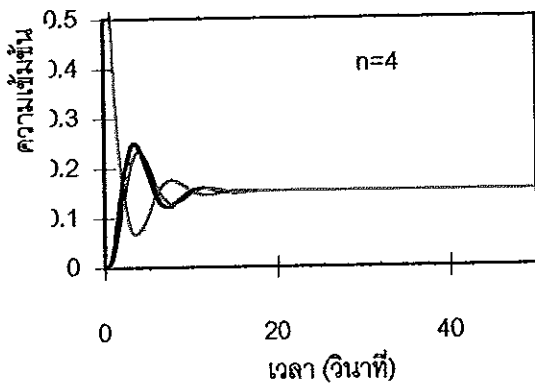
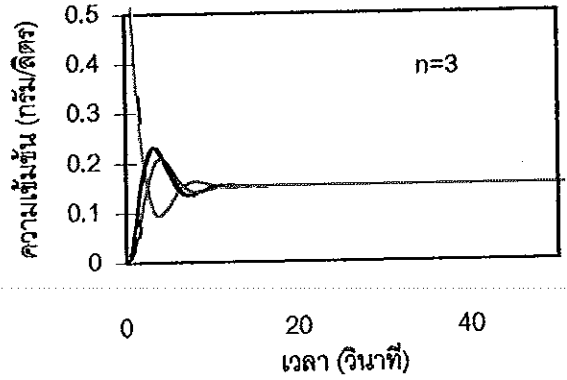
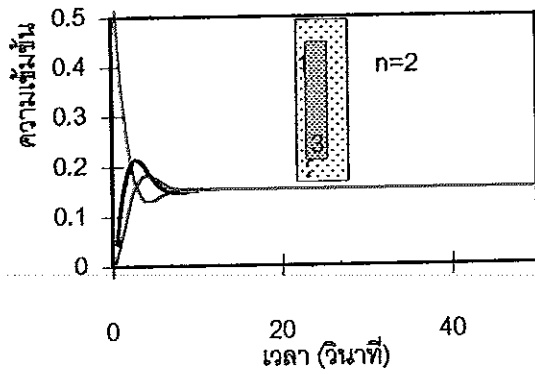
กำหนดให้ค่า K คงที่ ที่ 0.007 และเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ในโซนต่าง ๆ โดยที่ $N_1 = N_2 = N_3 = N_4$ และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 13 ผลการซิมิวเลตให้ผลที่แตกต่างจากการใช้แบบจำลองของยูปดี สันติวุฒน์ (2538) กล่าวคือ เส้นกราฟทั้งสามเส้นมีความแตกต่างกัน โดยที่กราฟของรูปที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงลดลง และกราฟในรูปที่ 1 และรูปที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้มีผลมาจากการผสมในแนวรัศมีที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ที่ส่วนต้นของกราฟทุกเส้นจะมีลักษณะเป็นพีคเกิดขึ้น โดยพีคที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนเซลล์ เมื่อจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นก็จะเกิดพีคมากขึ้น จำนวนพีคที่เกิดขึ้นบ่งบอกถึงการผสมที่เกิดขึ้นในแนวแกนภายในรูปเดียวกัน ถ้าจำนวนพีคมากหรือเมื่อจำนวนเซลล์มากแสดงว่าต้องใช้เวลามากในการผสมภายในรูปเดียวกัน

ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่า K เป็นตัวกำหนดระดับการผสมในแนวรัศมี การเพิ่มค่า K ทำให้กราฟทั้งสามเส้นเข้าหากันได้เร็วขึ้น นั่นคือ การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นเร็วขึ้น ส่วนจำนวนเซลล์เป็นตัวกำหนดการผสมในแนวแกน จำนวนเซลล์น้อยแสดงว่า เกิดการผสมภายในรูปได้เร็ว ถ้าจำนวนเซลล์มากทำให้การผสมภายในรูปเกิดได้ช้าขึ้น การผสมโดยรวมทั้ง



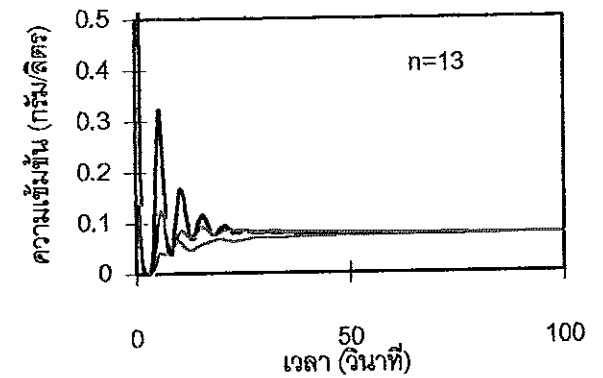
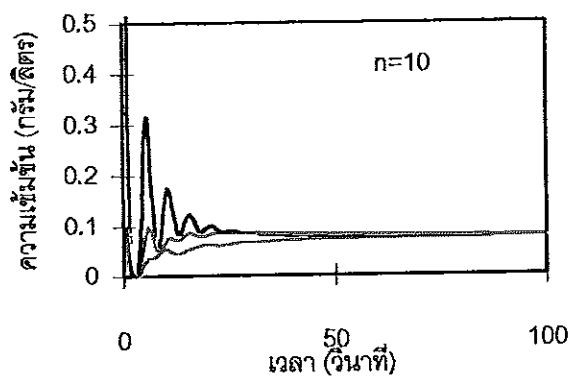
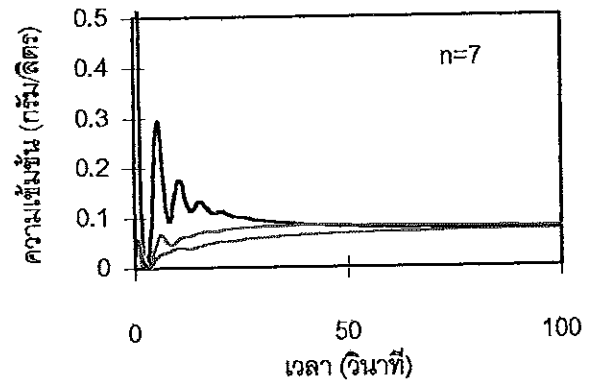
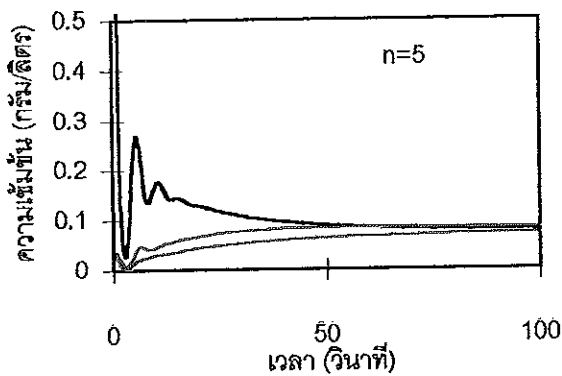
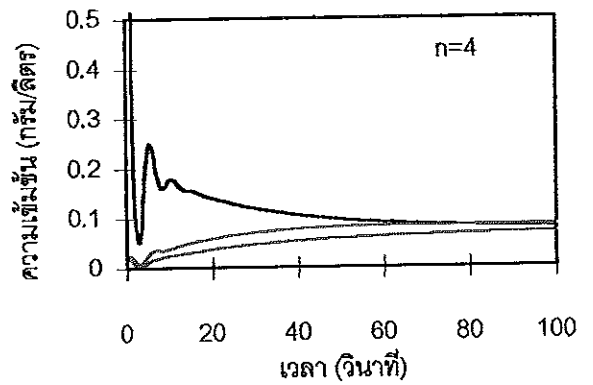
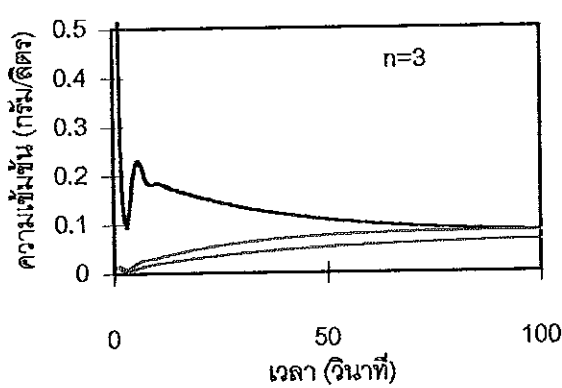
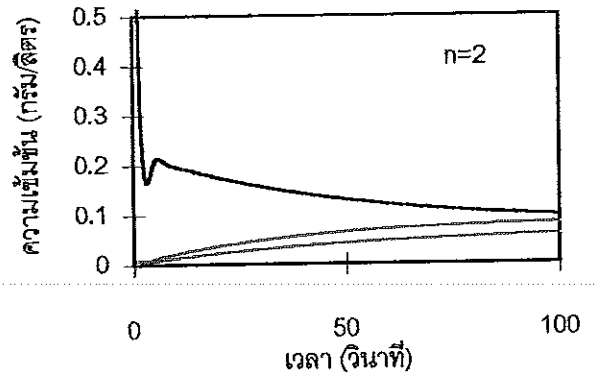
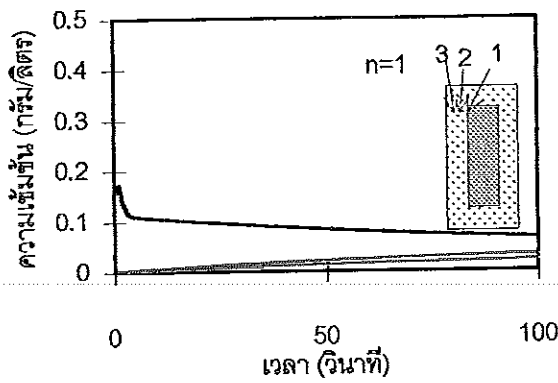
ภาพที่ 12.14 ผลการซิมูเลตเมื่อกำหนดค่า $k=1$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซนโดยที่ $N_1=N_2=N_3=N_4=n$

— ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 — ตำแหน่งที่ 3

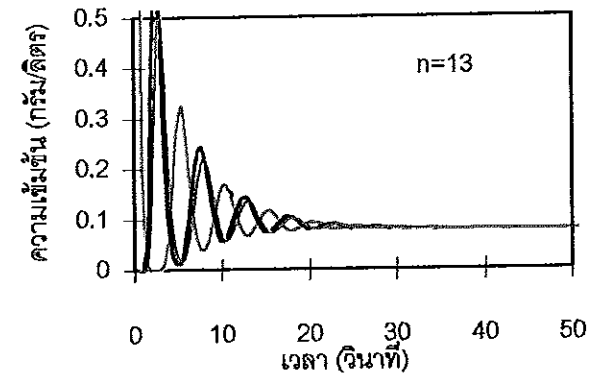
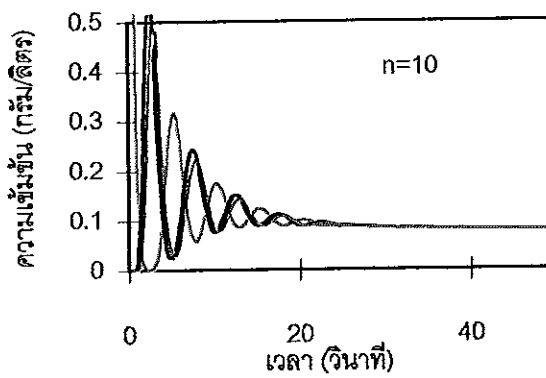
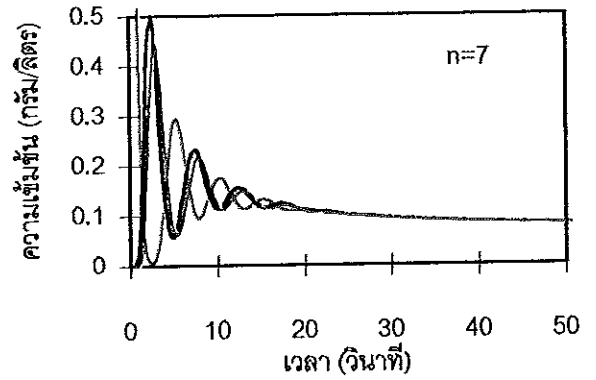
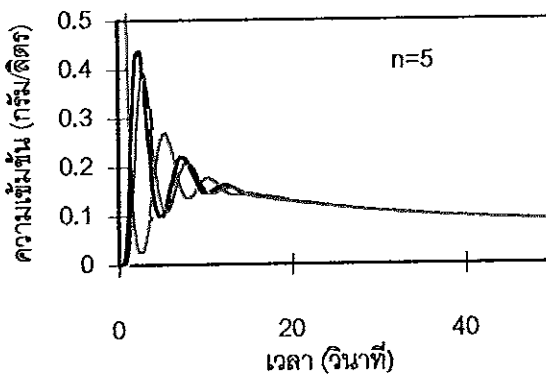
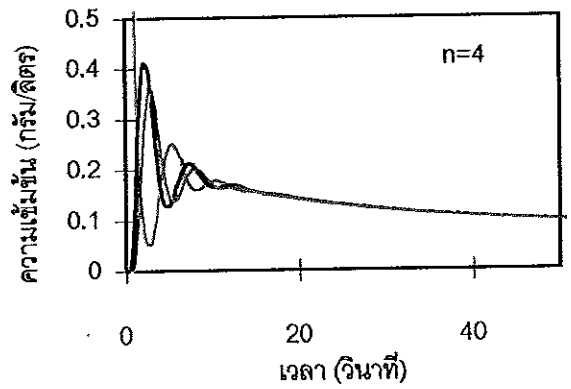
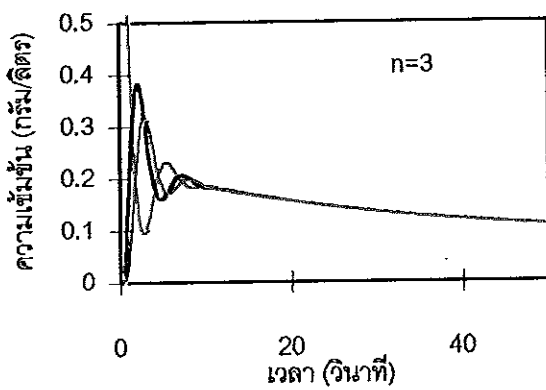
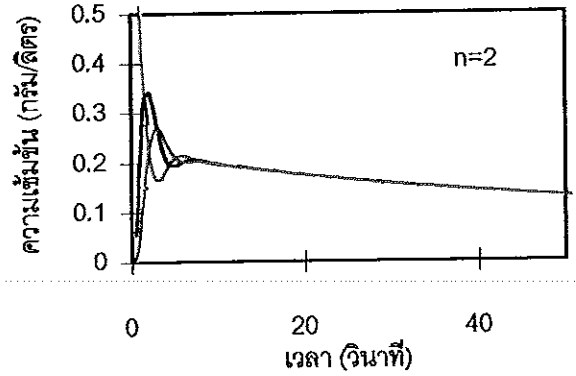
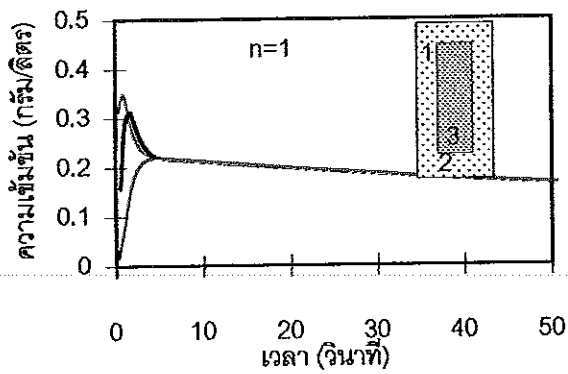


ภาพที่ 12.15 ผลการซิมูเลตเมื่อกำหนดค่า $k=1$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซนโดยที่ $N_1=N_2=1, N_3=N_4=n$

— ตำแหน่งที่ 1 - - - - - ตำแหน่งที่ 2 ······ ตำแหน่งที่ 3

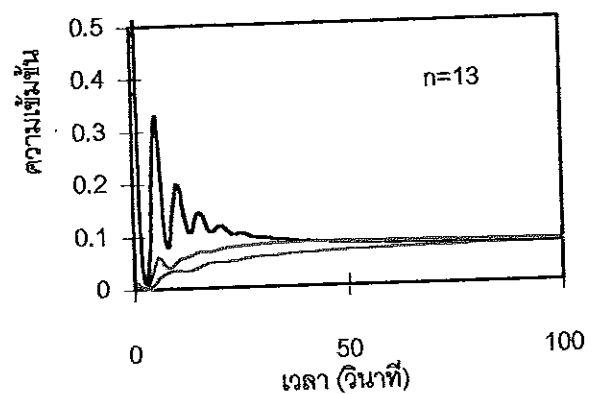
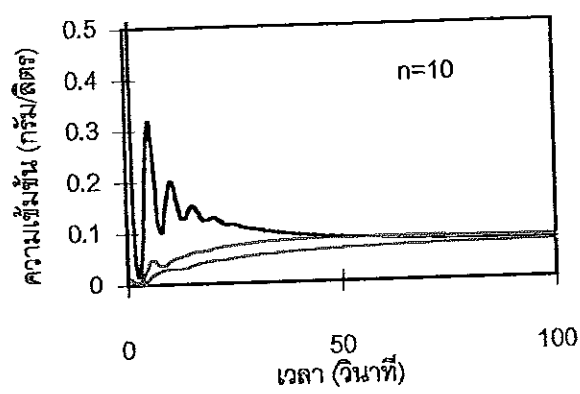
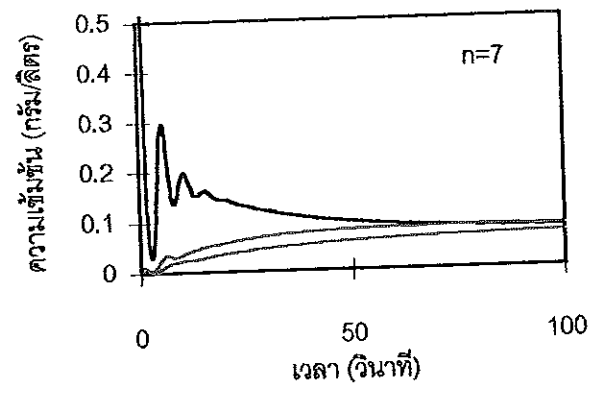
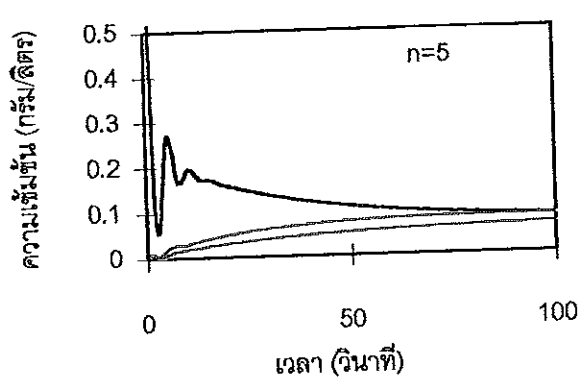
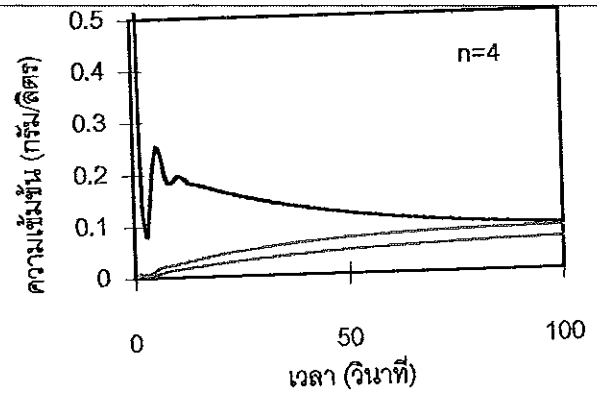
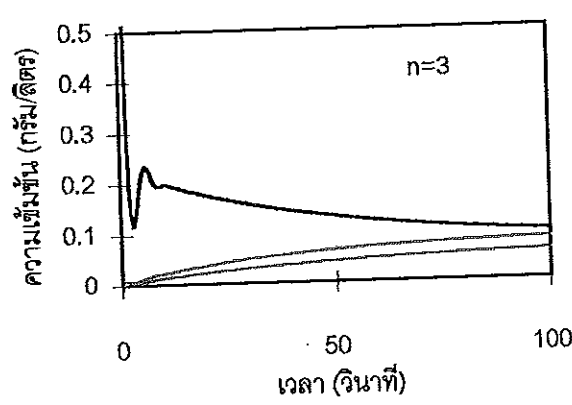
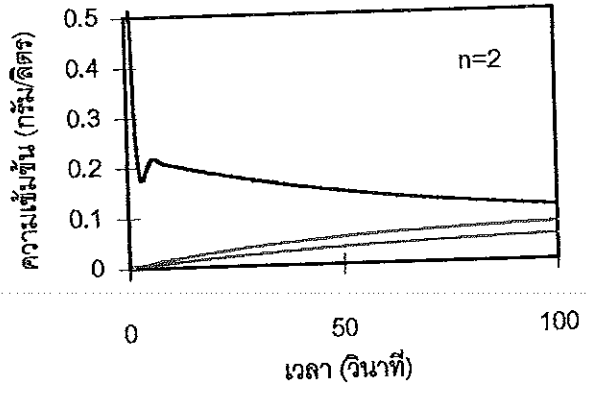
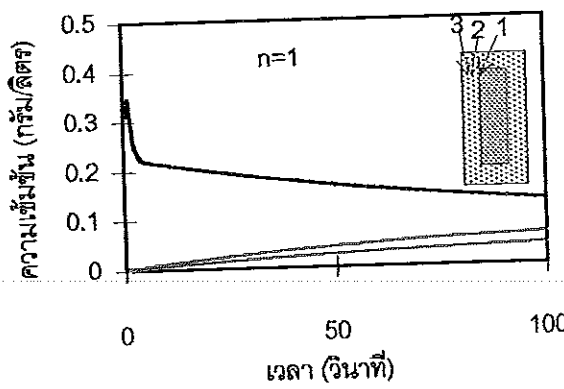


ภาพที่ 2.16 ผลการซิมูเลตเมื่อ $k=0.007$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซนโดยที่ $N_1=N_2=N_3=n$
 — ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 — ตำแหน่งที่ 3

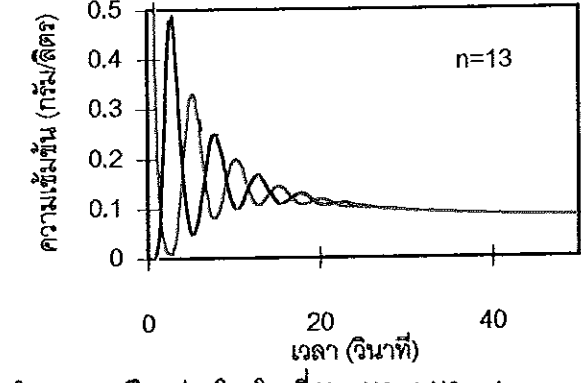
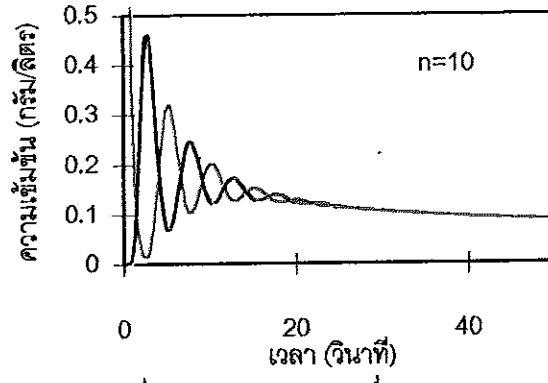
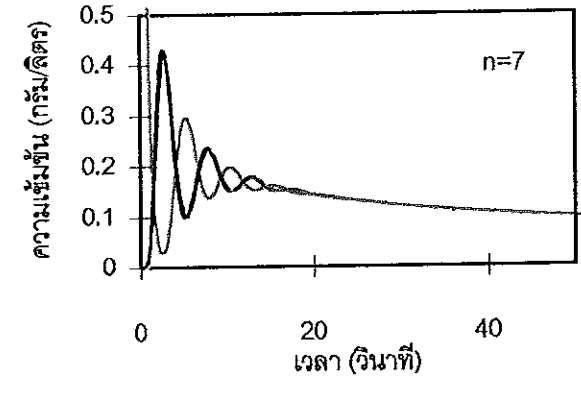
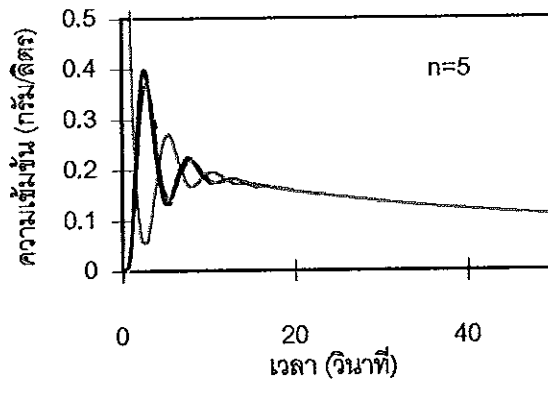
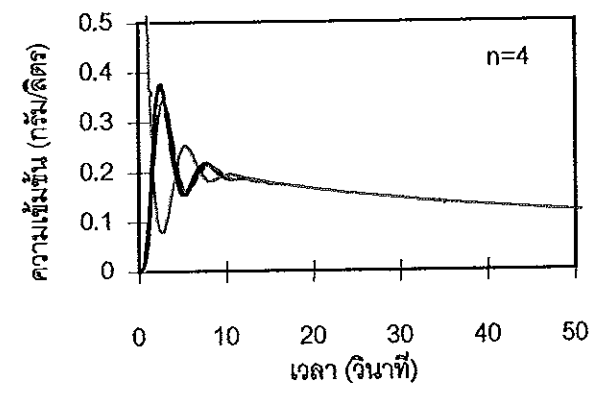
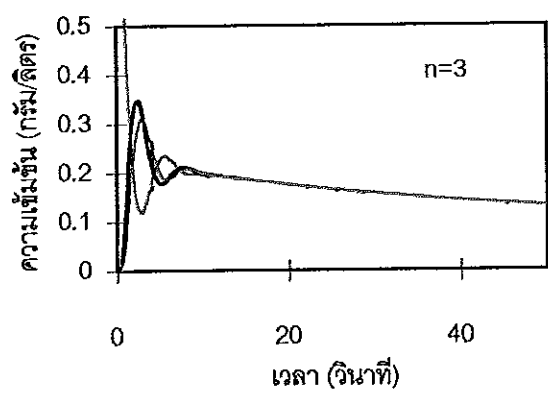
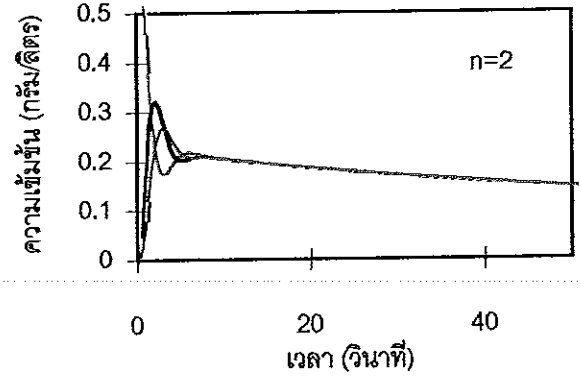
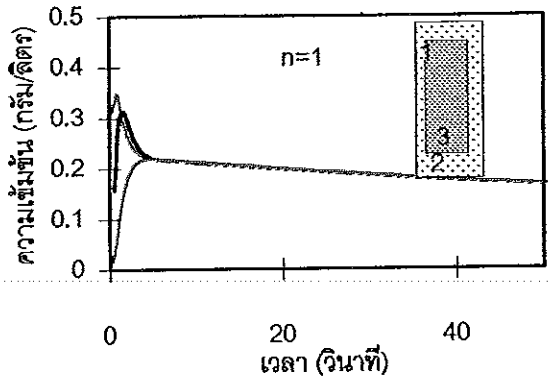


ภาพที่ 2.17 ผลการซิมูเลตเมื่อ $k=0.007$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซนโดยที่ $N_1=N_2=N_3=n$

— ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 — ตำแหน่งที่ 3



ภาพที่ 2.18 ผลการซิมูเลตเมื่อ $k=0.007$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซนโดยที่ $N_1=N_2=1, N_3=n_4=n$
 — ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 — ตำแหน่งที่ 3



ภาพที่ 2.19 ผลการข้มงวดเมื่อ $k=0.007$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในแต่ละโซนโดยที่ $N_1=N_2=1, N_3=n_4=n$
— ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 — ตำแหน่งที่ 3

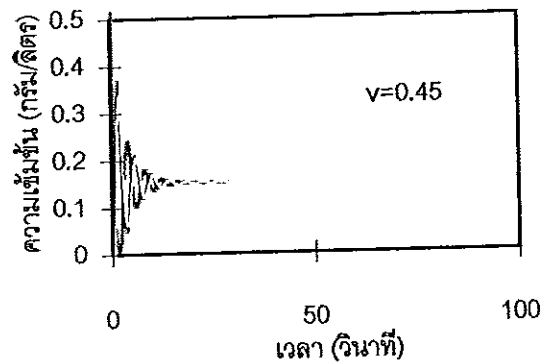
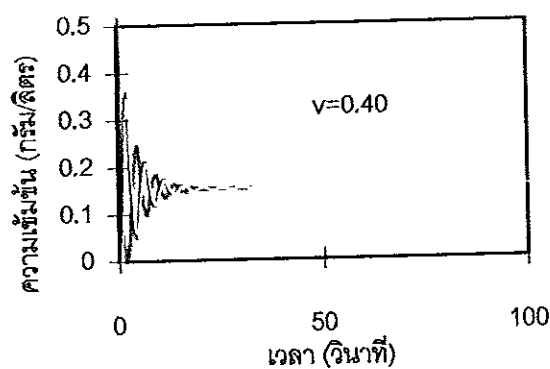
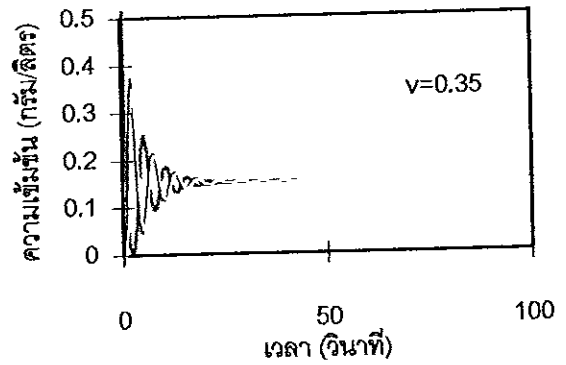
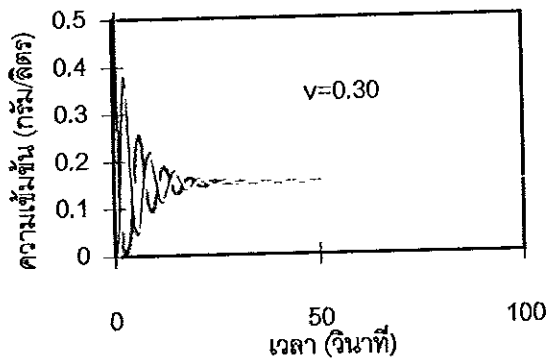
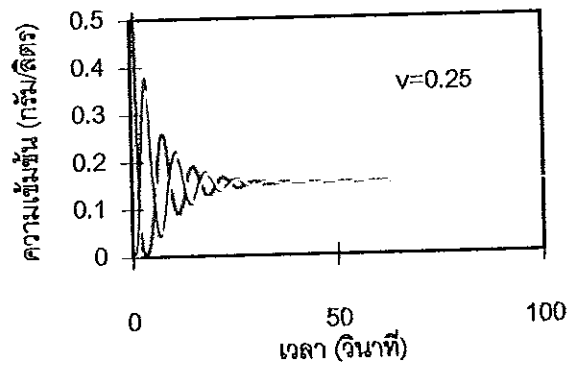
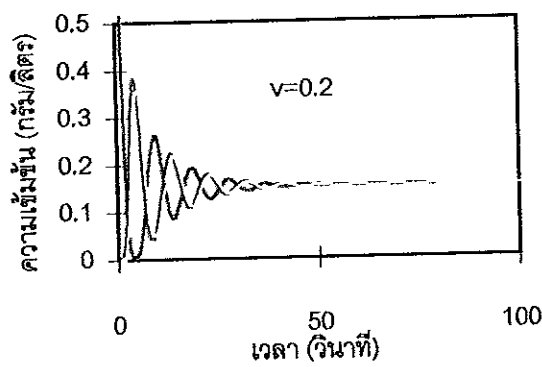
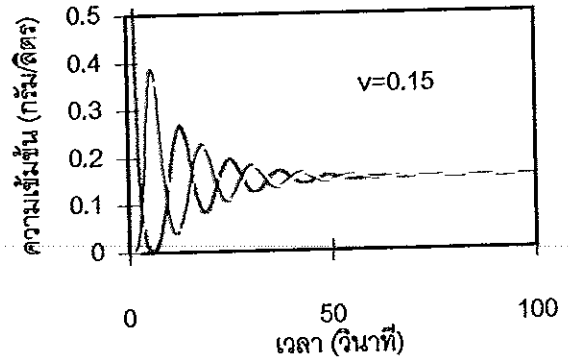
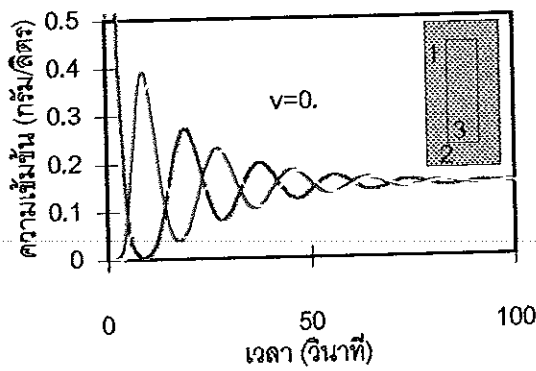
ถึงจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อการผสมทั้งสองส่วนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว ซึ่งในบางกรณีเมื่อกำหนดให้มีจำนวนน้อยและค่า K น้อย การผสมภายในรูปจะเสร็จสิ้นก่อนการผสมในแนวกว้าง ลักษณะของกราฟจะเห็นพีคลดลงจนเป็นเส้นตรงแล้วจะเคลื่อนเข้าหากันจนเป็นเส้นเดียวกัน กรณีที่กำหนดให้มีจำนวนเซลล์มากและค่า K มาก การผสมในแนวกว้างจะเสร็จสิ้นก่อนการผสมภายในรูป กราฟทั้งหมดจะซ้อนทับกันก่อนที่พีคจะหมดไป

กรณีที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว

การไหลวนของของเหลวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างดาวน์คัมเมอร์กับไรเซอร์ เมื่อมีการให้อากาศในไรเซอร์ทำให้เกิดปริมาณอากาศตกค้างในไรเซอร์มากกว่าในดาวน์คัมเมอร์ ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างดาวน์คัมเมอร์กับไรเซอร์ จึงทำให้เกิดการไหลวนของของเหลวและอากาศเกิดขึ้น ดังนั้นอัตราการให้อากาศจึงมีผลโดยตรงต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว ความเร็วมีผลต่อการผสม ถ้าความเร็วสูงทำให้เกิดความปั่นป่วนได้มากและระดับการผสมดีขึ้น เวลาที่ใช้ในการผสมจะน้อยลง

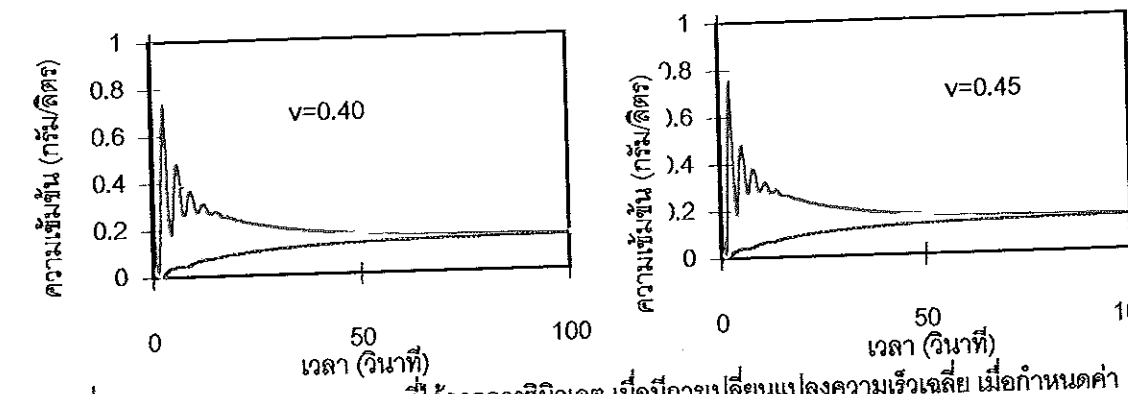
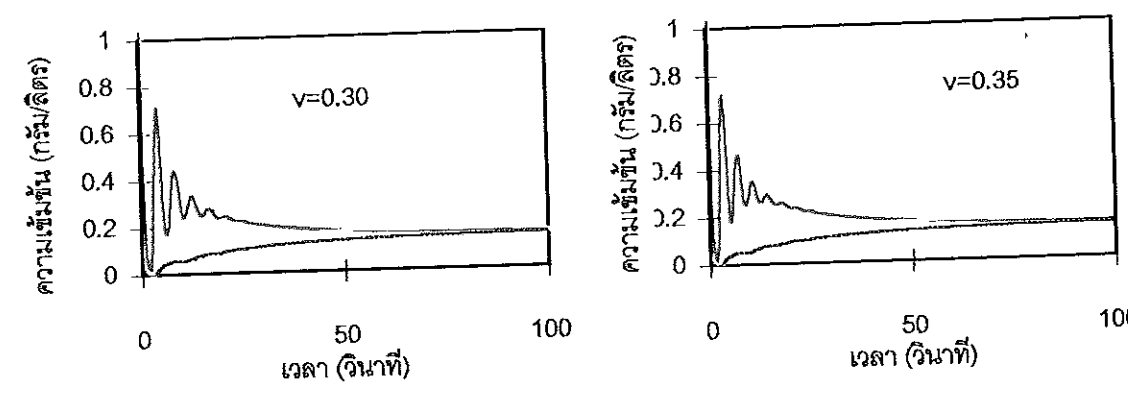
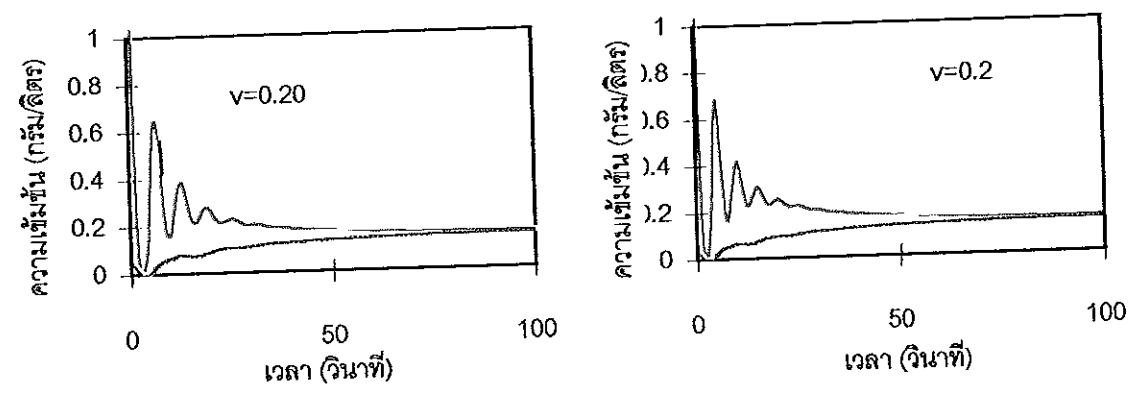
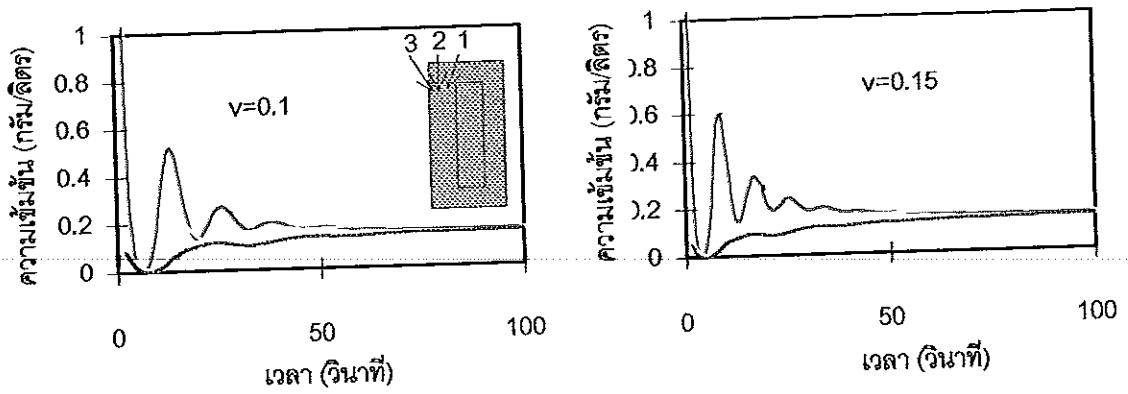
เมื่อจำลองสถานการณ์ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว ในกรณีที่มีเกิดการผสมในแนวกว้างเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาในการผสมน้อยลง และเวลาในการวนครบรอบของของเหลวน้อยลง สังเกตได้จากระยะห่างระหว่างพีคของเส้นกราฟน้อยลง ในกรณีที่กำหนดให้การผสมในแนวกว้างเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ การเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวทำให้เวลาในการวนครบรอบน้อยลง และเวลาในการผสมในรูปที่ 2 น้อยลง แต่ไม่ได้ทำให้เวลาที่ใช้ในการผสมที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ทั้งถังน้อยลงด้วย เนื่องจากในขณะที่การผสมในรูปที่ 2 เสร็จสิ้นแล้ว สังเกตจากกราฟเปลี่ยนจากลักษณะพีคเป็นเส้นตรง การผสมในแนวกว้างยังไม่เสร็จสิ้นเนื่องจากกราฟทั้งสามเส้นยังไม่เป็นเส้นเดียวกัน ดังนั้น สรุปได้ว่า จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวในแบบจำลอง ทำให้เวลาในการวนครบรอบน้อยลงและเกิดการผสมเร็วขึ้นในกรณีที่มีการผสมในแนวกว้างเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่ในกรณีที่มีการผสมในแนวกว้างเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ การเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวไม่มีผลต่อระดับการผสม (degree of mixing)

จากการศึกษาลักษณะการผสมโดยวิธีการติดตามการตอบสนองของเทรซเซอร์ พบว่า เมื่อใช้สารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.50 โดยน้ำหนักต้องใช้เวลาในการผสมนานมาก ในขณะที่ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนักใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าน้ำ ลักษณะของกราฟที่แสดงการผสมในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.50 โดยน้ำหนักค่อย ๆ สูงขึ้นโดยไม่เกิดพีคที่ชัดเจน นอกจากนี้ การเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวโดยการเพิ่มอัตราการให้อากาศก็ไม่สามารถทำให้เวลาในการผสมเร็วขึ้น ซึ่งผลที่ได้เหล่านี้ สอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลอง



ภาพที่ 2.20 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย เมื่อกำหนดค่า

$K=1$ $N_1=2, N_2=10, N_3=2, N_4=10$ — ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3



ภาพที่ 2.21 Tracer response curv ที่ได้จากการซิมูเลต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย เมื่อกำหนดค่า $K=0.007$ $N_1=2, N_2=10, N_3=2, N_4=10$ — ตำแหน่งที่ 1 — ตำแหน่งที่ 2 — ตำแหน่งที่ 3

บทที่ 3

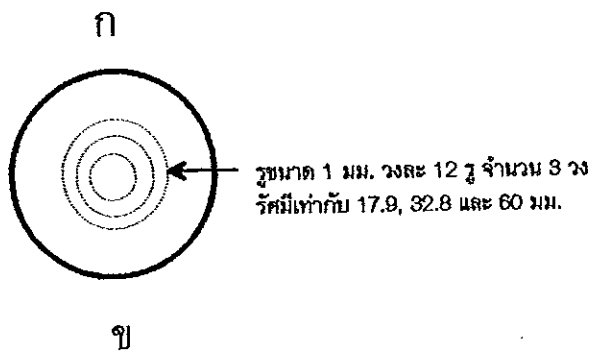
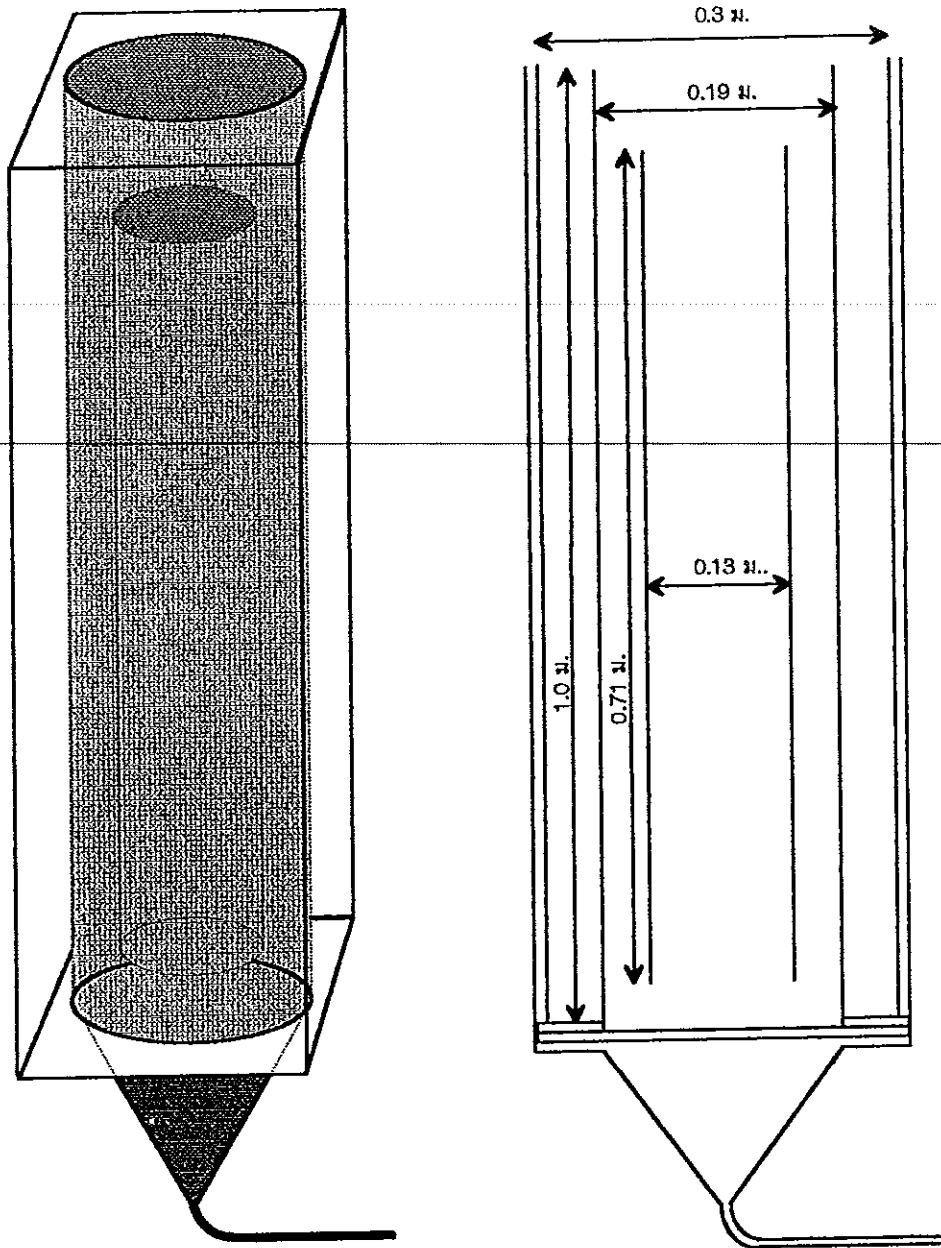
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุ

1. แผงขนแทนกัมสำเร็จรูป KTL 73223A ความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 12.3 โดยน้ำหนัก จากรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. สารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โซเดียมเอไซด์ เกรดห้องปฏิบัติการ
3. สารยับยั้งการเกิดฟอง Silicon antifoam บริษัท Fluka
4. สารละลาย HCl ความเข้มข้น 2 โมลาร์
5. สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 2 โมลาร์

อุปกรณ์

1. ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกดูภายใน พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยของ ยุพดี สันติวัฒน์ (2538) ตัวถังสร้างจาก พลาสติกใสอคริลิก เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพภายใน ถังได้ ปริมาตรของถังเท่ากับ 30 ลิตรขึ้นอยู่กับความสูงของของเหลว ลักษณะของถังแสดงใน ภาพที่ 3.1 ประกอบด้วยท่อทรงกระบอก 2 ชั้น ชั้นนอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 200 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 190 มิลลิเมตร ความสูงเท่ากับ 1.00 เมตร ทรงกระบอกชั้นในหรือท่อดริฟมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 142 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 130 มิลลิเมตร ความสูงเท่ากับ 0.71 เมตร ท่อดริฟถูกติดตั้งไว้ในท่อชั้นนอก โดยขอบล่างของท่อดริฟอยู่เหนือขอบล่างของท่อชั้นนอก 7 เซนติเมตร ตัวให้อากาศ ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกหนา 0.8 เซนติเมตร ประกอบด้วยรูให้อากาศขนาดเส้นผ่า



ภาพที่ 3.1 ก ถึงปฏิกิริยาชีวภาพแบบอากาศยทที่ใช้ในงานวิจัย ข ลักษณะตัวให้อากาศ

ศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จำนวน 36 รู ติดตั้งไว้ที่ส่วนล่างของถังหมัก แล้วต่อเข้ากับท่อนำอากาศจากเครื่องอัดอากาศผ่านโรตารีมิเตอร์วัดอัตราการให้อากาศ

ถังหมักถูกวางไว้ในถังสี่เหลี่ยมขนาด 30 x 30 x 100 เซนติเมตร ทำด้วยพลาสติกชนิดเดียวกัน เติมน้ำในช่องว่างระหว่างถังสี่เหลี่ยมกับถังหมักเพื่อให้มองภาพภายในถังหมักชัดเจนยิ่งขึ้นและลดการเบี่ยงเบนของแสงซึ่งทำให้มองเห็นภาพภายในผิดเพี้ยน

2. เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ยี่ห้อ TIGER โมเดล MK 100

3. โรตารีมิเตอร์ ขนาด 0.1-1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

4. ไมโครคอมพิวเตอร์ 80486 หน่วยความจำ 8 เมกกะไบต์ HARDDISK ขนาด 1 จิกะไบต์ ระบบปฏิบัติการ windows 95

5. เครื่องวัด pH ที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ (รายละเอียดแสดงในบทที่ 2)

6. ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อก-ดิจิทัล (ADDA card IBM VERSION) ขนาด 12 บิต โมเดล MCT 02362 ประเทศไต้หวัน (Electronic source Co.,Ltd. ตัวแทนจำหน่าย)

7. แผ่นบันทึกข้อมูล

วิธีการ

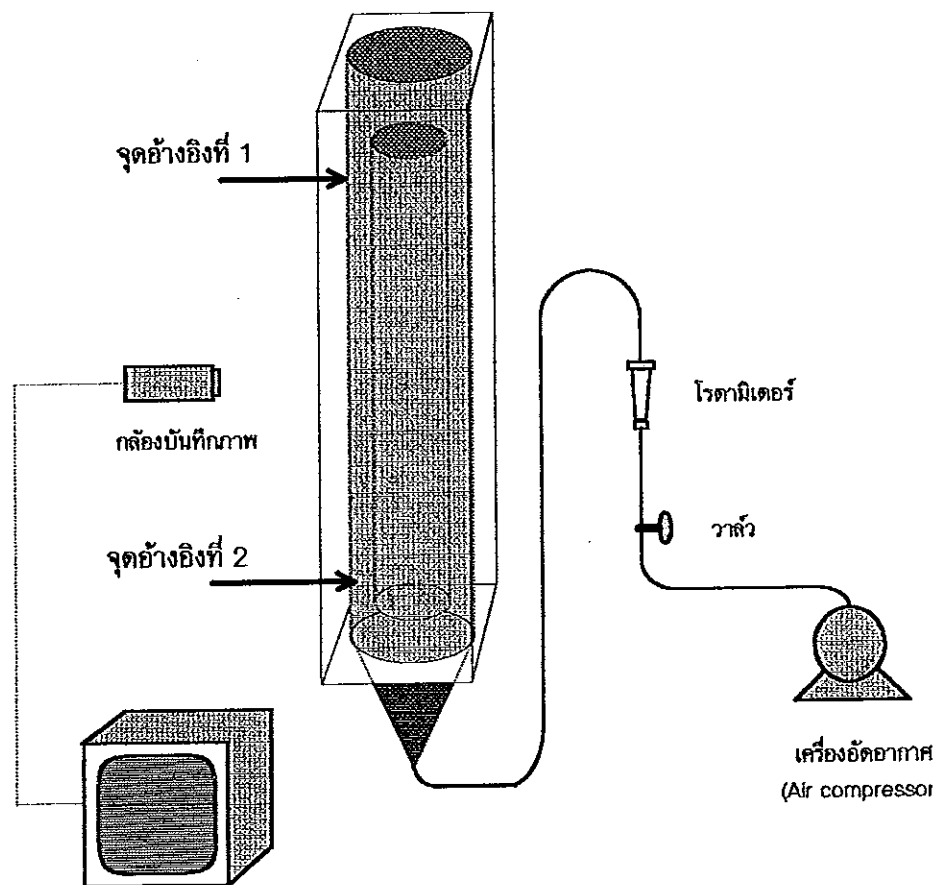
1. การศึกษารูปแบบการไหลของของเหลวและฟองอากาศโดยวิธีการสังเกตด้วยตาและบันทึกภาพด้วยกล้องวิดีโอ มีการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.2 สารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ น้ำ และสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ให้อากาศในท่อดริฟท์ โดยให้อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.2, 0.46, 0.64 และ 1.0 vvm (0.3, 0.5, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนและอัตราการใช้อากาศที่ใช้ในการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ การศึกษาความเร็วและการศึกษาลักษณะการผสม

ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราการใช้อากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)
0	0.3
	0.5
	1.0
	1.5
0.1	0.3
	0.5
	1.0
	1.5
0.25	0.3
	0.5
	1.0
	1.5
0.5	0.3
	0.5
	1.0
	1.5
1.0	0.3
	0.5
	1.0
	1.5

2. การศึกษาความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว

2.1 การวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวโดยวิธีติดตามอนุภาค ใช้วิธีที่คล้ายคลึงกับ Philip และคณะ (1990) ใช้วัตถุที่ใช้ในการติดตามการไหลและอัตราการให้อากาศจากตารางที่ 3.1 โดยใช้แผ่นพลาสติกสีดำ ที่มีความหนาแน่น 0.98 ขนาด 2 x 2 มิลลิเมตร เป็นอนุภาคที่ใช้ในการติดตามความเร็วไหลลงไปในถังหมัก กำหนดจุดอ้างอิงสองจุดในส่วนด้านบนคัมเมอร์มีระยะห่างในแนวตั้งเท่ากับ 50 เซนติเมตร ให้อากาศจนระบบเข้าสู่ภาวะเสถียร จับเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากจุดอ้างอิงที่ 1 ไปยังจุดอ้างอิงที่ 2 คำนวณความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่จากการจับเวลาทั้งหมด 50 ครั้ง



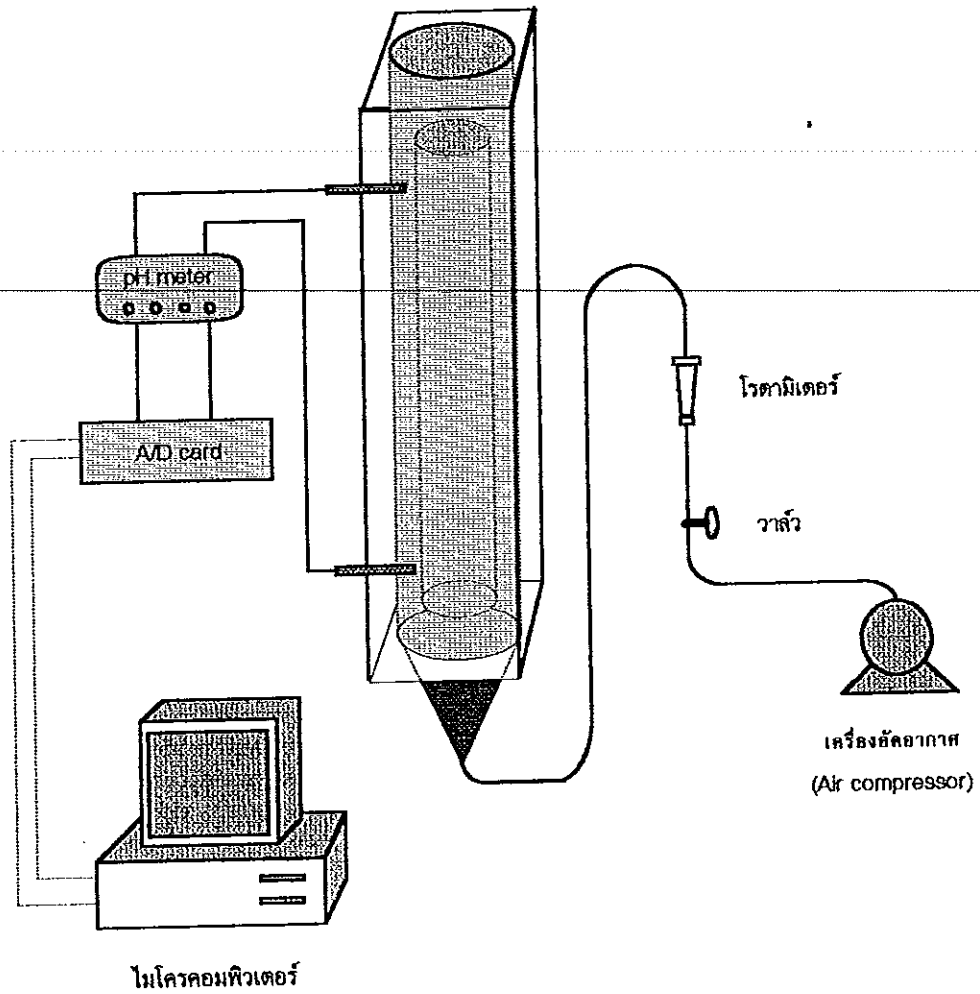
ภาพที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์ในการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์

2.2 การวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวโดยใช้วิธีการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สารละลาย HCl เป็นเทอร์เซอร์ เนื่องจากมีความเหมาะสมกว่าเทอร์เซอร์ชนิดอื่น เพราะไม่ถูกรบกวนด้วยฟองอากาศ วิธีการทดลองมีการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.3 ใช้พีเอชเซนเซอร์ 2 ตัว ติดตั้งไว้ในส่วนดาวนคัมเมอร์ที่บริเวณส่วนบนและส่วนล่าง มีระยะห่างในแนวตั้งเท่ากับ 50 เซนติเมตร ใช้สารตัวอย่างและอัตราการให้อากาศดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อให้อากาศจนระบบเข้าสู่ภาวะที่เสถียรแล้ว ฉีดเทอร์เซอร์ลงไปบริเวณส่วนบนของถังหมัก (gas separation zone) บันทึกการเปลี่ยนแปลงของพีเอชกับเวลา นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงไปเขียนกราฟระหว่างพีเอชกับเวลา ระยะห่างของพีคของกราฟทั้ง 2 เส้นคือเวลาในการเคลื่อนที่ของของเหลวจากเซนเซอร์ที่ 1 ไปยัง เซนเซอร์ ที่ 2

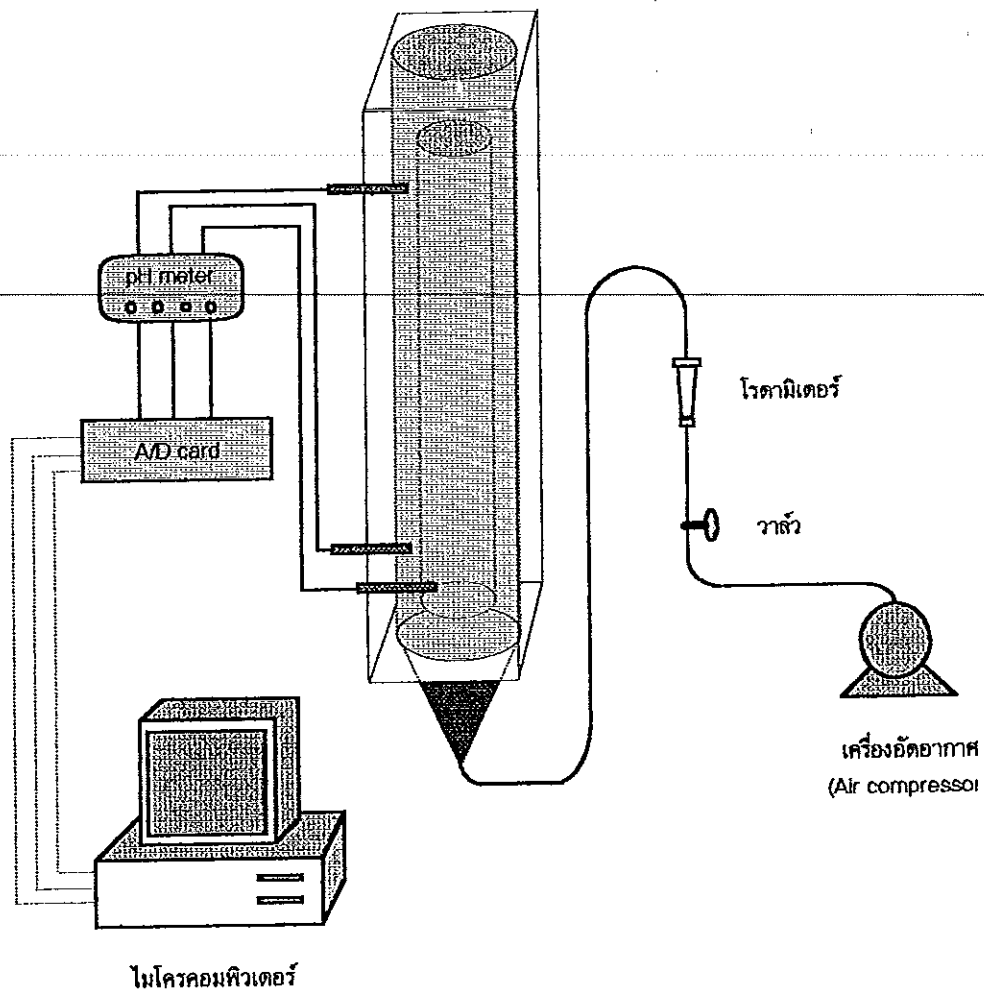
3. การศึกษาลักษณะการผสม

ใช้วิธีการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในการศึกษาลักษณะการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก โดยใช้สารละลาย HCl ความเข้มข้น 2 โมลาร์เป็นเทอร์เซอร์ ติดตั้งพีเอชเซนเซอร์จำนวน 3 ตัว ในตำแหน่งต่าง ๆ ของถังหมัก การติดตั้งอุปกรณ์แสดงในภาพที่ 3.4 ใช้สารตัวอย่างและอัตราการให้อากาศจากตารางที่ 3.1 ให้อากาศจนระบบเข้าสู่ภาวะที่เสถียร ฉีดเทอร์เซอร์ลงไปบริเวณส่วนบน (gas separation zone) ของถัง บันทึกการเปลี่ยนแปลงของพีเอชกับเวลา นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟพีเอชกับเวลา เพื่อศึกษาลักษณะการผสมที่เกิดขึ้นและเวลาที่ใช้ในการผสม

4. ศึกษากลไกการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก โดยการนำผลการทดลองจากการตอบสนองของเทอร์เซอร์ที่ 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.4 มาเทียบเคียงกับผลการทำนายของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (รายละเอียดมีอยู่ในบทที่ 2) นำผลการทำนายที่คล้อยจองกับผลการทดลองมากที่สุดมาใช้ในการอธิบายกลไกของการผสม



ภาพที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการศึกษาความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวด้วย
วิธีติดตามการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์



ภาพที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ในการศึกษาลักษณะการผสมด้วยวิธีติดตามการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรซเซอร์

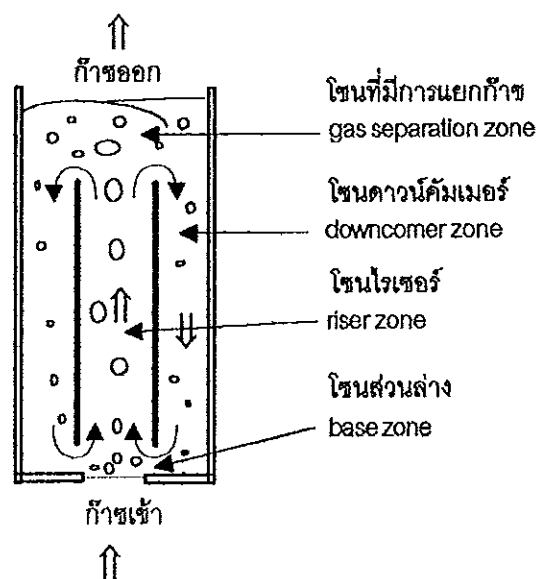
บทที่ 4

ผลและวิจารณ์

1. ผลการศึกษารูปแบบการไหลและฟองอากาศ

1.1 ผลการศึกษารูปแบบการไหลโดยทั่วไป

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกประกอบด้วยของเหลวที่ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยท่อค้ำ โดยมีส่วนที่ติดต่อกันที่ส่วนบนและส่วนล่าง ในส่วนหนึ่งของของเหลวมีการให้อากาศที่ด้านล่าง อีกส่วนหนึ่งไม่มีการให้อากาศ ความแตกต่างของปริมาณอากาศตกค้างในระหว่าง 2 ส่วนทำให้ของเหลวมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน และเกิดการไหลวนของของเหลวในถังปฏิกรณ์เนื่องจากแรงลอยตัวของอากาศ จากรูปแบบการไหลที่ต่างกันอย่างนี้ ทำให้สามารถแบ่งส่วนต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกออกเป็น 4 โซนคือ (ภาพที่ 4.1)



ภาพที่ 4.1 รูปแบบการไหลโดยทั่วไปภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

1. โซนไรเซอร์ (riser zone) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการให้อากาศที่ด้านล่าง มีการเคลื่อนที่ขึ้นของของเหลวและฟองอากาศ

2. โซนบน หรือ โซนที่มีการแยกตัวของก๊าซ (gas separation zone) เป็นส่วนที่มีการแตกตัวของฟองอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้นมาจากริเซอร์ ผลของการแตกตัวทำให้อากาศบางส่วนออกไปจากถังปฏิกรณ์ และอีกบางส่วนกลายเป็นฟองอากาศที่มีขนาดเล็กลง

3. โซนดาวนคัมเมอร์ (downcomer zone) เป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ลงของของเหลวและฟองอากาศขนาดเล็กจากการแตกตัวในโซนที่มีการแยกก๊าซ

4. โซนส่วนล่าง (base zone) ในส่วนนี้ของเหลวและก๊าซจากโซนดาวนคัมเมอร์ไหลกลับเข้าสู่โซนไรเซอร์

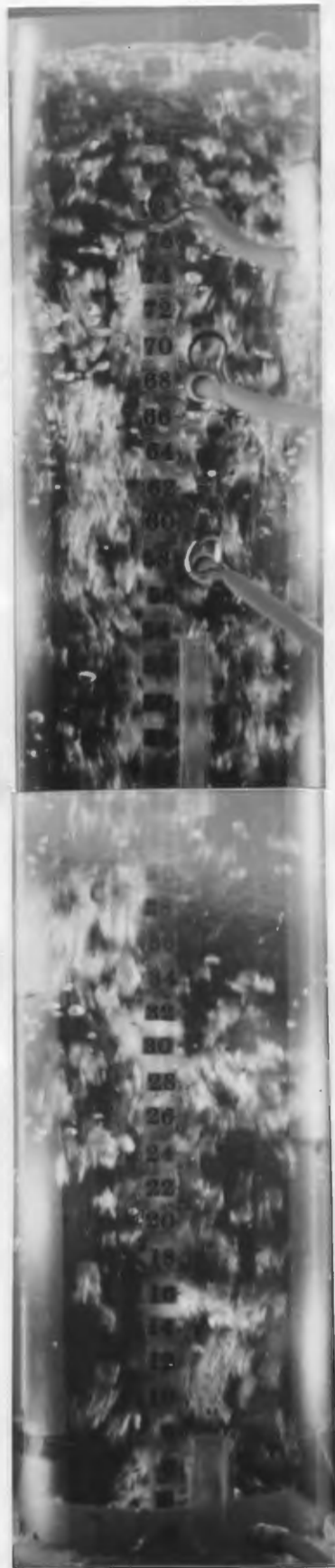
ลักษณะการไหลในแต่ละโซนของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีความแตกต่างกันไปในแต่ละโซน การไหลในโซนไรเซอร์ มีความคล้ายคลึงกับการไหลขึ้นของถังปฏิกรณ์แบบบับเบิ้ลคอลัมน์ ก๊าซจะเข้าสู่ระบบที่ส่วนล่างผ่านทางตัวให้อากาศ ทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ ลักษณะการไหลในโซนไรเซอร์ที่สังเกตได้มี 2 ลักษณะคือ การไหลตรง ซึ่งสอดคล้องกับการไหลวนเนื่องจากแรงขับของความหนาแน่น และการไหลวนที่เรียกว่า ลูป (loop) ที่เกิดขึ้นโดยการวนกลับของของเหลวในส่วนไรเซอร์เองเมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้น และครอบคลุมตลอดทั้งความยาวของคอลัมน์ การเกิดลูปจะเกิดเมื่อโซนดาวนคัมเมอร์เกิดความต้านทานต่อการไหลหรือเกิดการสะท้อนกลับด้วยแรงที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของฟองอากาศขนาดใหญ่ที่บริเวณโซนส่วนบนของถัง

ในโซนดาวนคัมเมอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ลงของของเหลวและก๊าซ มีรูปแบบการไหลที่ชัดเจนกว่าในโซนไรเซอร์ จำนวนของฟองอากาศจะน้อยกว่าในโซนไรเซอร์ เนื่องจากอากาศบางส่วนหลุดออกจากถังปฏิกรณ์ที่โซนส่วนบน และขนาดของฟองอากาศในโซนดาวนคัมเมอร์จะมีขนาดเล็กกว่าในโซนไรเซอร์เนื่องจากฟองอากาศเหล่านี้เกิดจากการแตกตัวของฟองอากาศขนาดใหญ่ในส่วนบน

1.2 ผลการศึกษารูปแบบการไหลในน้ำ

ภาพที่ 4.2 - 4.5 แสดงลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ ที่อัตราการให้อากาศระดับต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอัตราการให้อากาศทำให้จำนวนฟองอากาศในโรเตอร์เพิ่มขึ้น อัตราการไหลวนของของเหลวเพิ่มขึ้นและมีจำนวนฟองอากาศที่ปรากฏในดาวน์คัมเมอร์เพิ่มขึ้นด้วย ที่อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm พบว่ามีฟองอากาศเข้าสู่โซนดาวน์คัมเมอร์น้อยมาก โดยฟองอากาศที่ปรากฏในดาวน์คัมเมอร์จะมีรูปร่างเป็นวงรีวางตัวในแนวนอนมีความยาวประมาณ 0.005 - 0.01 เมตร กระจัดกระจายอยู่บริเวณส่วนบนของดาวน์คัมเมอร์ขนาดของฟองอากาศในดาวน์คัมเมอร์จะเล็กกว่าในโรเตอร์ เนื่องจากของเหลวมีอัตราการไหลวนต่ำไม่สามารถดึงเอาฟองอากาศขนาดใหญ่ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นมาด้วยความเร็วสูงลงไปสู่ดาวน์คัมเมอร์ได้ ฟองอากาศส่วนใหญ่จะออกไปจากถังหมักที่บริเวณส่วนบน ระดับความลึกของฟองอากาศที่ปรากฏอยู่ในดาวน์คัมเมอร์มีการกระจายตามขนาดของฟองอากาศ ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจะถูกพัดพาลงไปได้ลึกกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ อันเกิดจากความสมดุลของแรงระหว่างแรงลอยตัวของฟองอากาศกับแรงพัดพาจากการเคลื่อนที่ลงของของเหลว เมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้นเป็น 0.46 vvm อัตราการไหลเวียนของของเหลวจะเพิ่มขึ้น ทำให้ฟองอากาศถูกพัดพาลงไปใวดาวน์คัมเมอร์ได้มากยิ่งขึ้น จนเกิดการไหลเวียนของฟองอากาศจากดาวน์คัมเมอร์เข้าสู่โรเตอร์ตามการไหลเวียนของของเหลว ความหนาแน่นของฟองอากาศในดาวน์คัมเมอร์ยังคงน้อยกว่าและมีขนาดเล็กกว่าในโรเตอร์ ระดับความปั่นป่วนของของเหลวในโรเตอร์เกิดขึ้นมากกว่าในดาวน์คัมเมอร์ ซึ่งมีการไหลของของเหลวอย่างเรียบ ๆ ความปั่นป่วนของของเหลวในโรเตอร์และดาวน์คัมเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น เวลาเรซิเดนซ์ของฟองอากาศที่ปรากฏอยู่ในดาวน์คัมเมอร์จะมีค่ามากเนื่องจากฟองอากาศมีการเคลื่อนที่ช้า และบางส่วนติดอยู่กับที่ที่ผนังของถังหมัก ในบริเวณส่วนฐานของถังมีฟองอากาศปรากฏเพียงเล็กน้อยและมีของเหลวบางส่วนที่อยู่กับที่ซึ่งเป็นส่วนมุมของถังหมัก

เมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้นเป็น 0.64 และ 1.0 vvm จำนวนฟองอากาศมีความหนาแน่นมากขึ้นทั้งในโรเตอร์และในดาวน์คัมเมอร์ การเคลื่อนที่ของฟองอากาศในโรเตอร์เริ่มมีทิศทางที่ไม่แน่นอน มีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวอย่างชัดเจนที่อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm



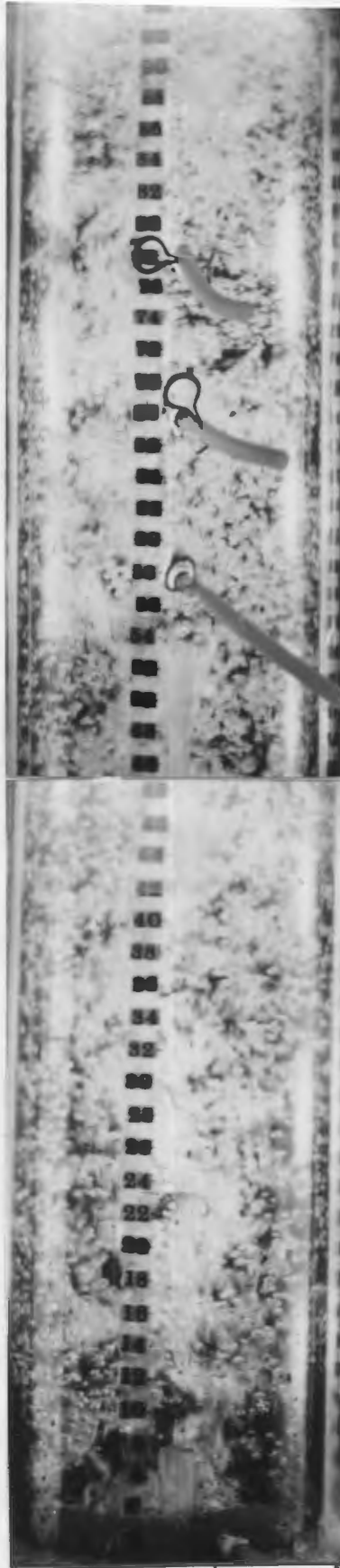
ภาพที่ 4.2 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ อัตราการให้
อากาศ 0.2 vvm



ภาพที่ 4.3 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ อัตราการให้
อากาศ 0.46 μm



ภาพที่ 4.4 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ อัตราการให้
อากาศ 0.64 μm



ภาพที่ 4.5 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในน้ำ อัตราการให้
อากาศ 1.0 w/m

จากการสังเกตในทุกระดับของการให้อากาศพบว่า ในบริเวณส่วนบนของถังมีความปั่นป่วนมากที่สุดเนื่องจากการแตกออกของฟองอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งการแตกของฟองอากาศนี้จะมีผลดีต่อการผสม จากรายงานของ Weiland (1984) พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาตรในส่วนบนของถังทำให้ระดับการผสมโดยรวมดีขึ้น

Mercer (1981) ซึ่งได้ศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ของน้ำในถังหมักแบบอากาศยก รายงานว่า ขนาดของฟองอากาศเฉลี่ยจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้อากาศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในครั้งนี เมื่ออัตราการให้อากาศต่ำ ๆ ฟองอากาศจะหลุดจากตัวให้อากาศอย่างช้า ๆ ทำให้มีขนาดใหญ่ ในขณะที่เมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น ฟองอากาศจะหลุดจากตัวให้อากาศอย่างรวดเร็ว ทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลง อย่างไรก็ตาม การทดลองครั้งนี้ ไม่มีการวัดขนาดของฟองอากาศ ผลการทดลองที่ได้เกิดจากการสังเกต นอกจากนี้ Mercer (1981) ยังได้รายงานว่า เวลาในการไหลวนของของเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อมีการเพิ่มความเร็วจำเพาะของอากาศ (superficial gas velocity) และความเร็วเชิงเส้นโดยเฉลี่ยในส่วนไรเซอร์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความปั่นป่วนและการเกิดการผสมย้อนกลับที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วในการให้อากาศ

1.3 ผลการศึกษาลักษณะการไหลในสารละลายแซนแทน

ภาพที่ 4.6 - 4.13 แสดงลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1-0.5 โดยน้ำหนัก ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm การเคลื่อนที่ของฟองอากาศในส่วนไรเซอร์มีการเคลื่อนที่ขึ้นบริเวณศูนย์กลางของไรเซอร์ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 1-2 เซนติเมตรจะเคลื่อนที่ขึ้น ส่วนฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก (< 3 มิลลิเมตร) จะปรากฏอยู่บริเวณใกล้ผนังของท่อดริฟ ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจะอยู่กับที่และมีการไหลวนเป็นรูปเมื่อมีฟองอากาศขนาดใหญ่เคลื่อนที่ผ่าน การเคลื่อนที่ในดาวน์คัมเมอร์ ฟองอากาศมีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อย และมีขนาดเล็กกว่าที่ปรากฏในส่วนไรเซอร์ ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ลงบริเวณตรงกลาง ในขณะที่ฟองอากาศขนาดใหญ่จะค่อย ๆ ลอยตัวสูงขึ้นที่บริเวณใกล้ผนังของดาวน์คัมเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กมีแรงต้านต่อการเคลื่อนที่ของของเหลวน้อยกว่า ในขณะที่ฟองอากาศ

ขนาดใหญ่มีแรงลอยตัวสูงกว่า ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่นี้เกิดจากการรวมตัวกันของฟองอากาศขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ลง แล้วเกิดการชนกัน จึงรวมตัวกันเป็นฟองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนฟองอากาศในส่วนบนของดาวนัคัมเมอร์มีจำนวนหนาแน่นกว่าบริเวณส่วนล่าง เมื่ออัตราการให้อากาศสูงขึ้นพบว่าขนาดของฟองอากาศที่เกิดจากตัวให้อากาศเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และอัตราการไหลเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น และการเคลื่อนที่ของฟองอากาศในส่วนดาวนัคัมเมอร์ เปลี่ยนจากการเคลื่อนที่แบบตรงเป็นการเคลื่อนที่แบบสั่น จำนวนฟองอากาศที่ไหลวนเข้าสู่ส่วนโรเตอร์มีมากขึ้น การไหลเข้าสู่ส่วนโรเตอร์ทำให้เกิดแรงผลักดันให้ฟองอากาศที่ออกจากตัวให้อากาศเข้าสู่ส่วนกลางของท่อดริฟ ในขณะเดียวกันก็เกิดบริเวณที่ฟองอากาศไม่ไหลผ่าน เป็นบริเวณเล็กน้อยที่ส่วนล่างของโรเตอร์

ที่ระดับความเข้มข้นของแซนเทนร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm ฟองอากาศที่เกิดจากตัวให้อากาศเกิดการรวมตัวกันทันทีที่เป็นฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าที่ปรากฏในความเข้มข้นร้อยละ 0.1 การเคลื่อนที่ของฟองอากาศเกิดขึ้นเป็น 2 สาย คล้ายกับเกิดจากรูให้อากาศ 2 รู มีการเคลื่อนที่ลงเกิดเป็นรูปหลายรูปภายในโรเตอร์ การเคลื่อนที่ลงของของเหลวมีความเร็วและรุนแรงกว่าการเคลื่อนที่ในส่วนดาวนัคัมเมอร์ แต่มีระยะทางสั้น ๆ

ในส่วนดาวนัคัมเมอร์ พบการกระจายตัวของฟองอากาศมีความหนาแน่นกว่าที่พบในความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักที่ระดับการให้อากาศระดับเดียวกัน ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ลงตามทิศทางการไหลของของเหลว ลักษณะการไหลเป็นแนวเส้นตรง มีฟองอากาศรูปร่างกลมที่มีขนาดใหญ่กว่าเกาะอยู่ตามผนังบริเวณที่สูง ๆ จะมีจำนวนของฟองอากาศเกาะอยู่มากกว่าด้านล่าง ไม่มีการไหลขึ้นของของเหลวและฟองอากาศในส่วนดาวนัคัมเมอร์ การเคลื่อนที่ที่มีความเร็วที่สม่ำเสมอ ๆ ส่วนดาวนัคัมเมอร์ เนื่องจากของเหลวมีการเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ดังนั้นเมื่อไหลวนเข้าสู่ส่วนโรเตอร์ จึงไม่ทำให้เกิดแรงผลักดันให้ฟองอากาศเข้าสู่ศูนย์กลาง ไม่พบลักษณะของฟองอากาศที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม เมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้นเป็น 0.7 เกิดฟองอากาศขนาดเล็กปรากฏอยู่มากขึ้น ทั้งในส่วนโรเตอร์ และส่วนดาวนัคัมเมอร์ ในส่วนดาวนัคัมเมอร์มีทั้งฟองอากาศขนาดเล็กและฟองอากาศขนาดใหญ่ ที่ไหลลงตามกระแสการไหลของของเหลว ที่บริเวณส่วนต้นของดาวนัคัมเมอร์ เกิดความปั่นป่วนเกิดขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของฟองอากาศในส่วนบนมีความแรงมากขึ้น

ฟองอากาศที่อยู่ในส่วนนี้จะเคลื่อนที่แบบสั้น ต่ำลงไปกว่านี้ จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและมีความสม่ำเสมอรอบถัง ที่ผนังดาวนัมคัมเมอร์มีฟองอากาศที่จับตัวกันเป็นกลุ่มเกาะอยู่ที่ตอนล่างของดาวนัมคัมเมอร์กลุ่มของฟองอากาศประกอบด้วยฟองอากาศขนาดเล็กมากกว่า 10 ฟองขึ้นไป เคลื่อนที่สูงขึ้นอย่างช้า ๆ และเกิดการรวมตัวกับฟองอากาศที่ไหลสวนลงมา กลายเป็นกลุ่มของฟองอากาศที่ประกอบด้วยฟองอากาศหลาย ๆ ฟอง เมื่อกลุ่มของฟองอากาศนี้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มีความปั่นป่วนจะถูกทำให้แตกตัวเป็นฟองขนาดเล็กตามเดิมและบางส่วนกลายเป็นโฟม บางส่วนเคลื่อนกลับลงมาอีกครั้ง

เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศให้สูงขึ้น จะปรากฏฟองอากาศขนาดเล็กในส่วนของดาวนัมคัมเมอร์มากขึ้น การจับกลุ่มกันของฟองอากาศเกิดมาขึ้นตลอดความยาวของถัง ปริมาณอากาศที่ไหลวนเข้าสู่ส่วนไรเซอร์มีมากขึ้น ทำให้มีปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กในส่วนไรเซอร์มากขึ้นด้วย

เมื่อแซนแรนมีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ฟองอากาศที่ออกจากตัวให้อากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น การเคลื่อนที่ของของเหลวช้าลงอย่างมากโดยเฉพาะที่ผนังของดาวนัมคัมเมอร์ แต่มีฟองอากาศตกค้างอยู่มาก ที่ความเข้มข้นของแซนแรนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ที่เรียกว่า สลัค (slug) เคลื่อนที่ขึ้นอย่างรวดเร็ว การแตกตัวมีความรุนแรง จนทำให้การไหลในส่วนดาวนัมคัมเมอร์ไม่มีความสม่ำเสมอ มีการไหลเป็นจังหวะตามการแตกตัวของฟองอากาศในส่วนบน

จากการศึกษาของ Field และคณะ (1984) และ Young และคณะ (1987) ได้ศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแรนพบว่าเกิดการรวมตัวของฟองอากาศใกล้กับตัวให้อากาศถึงแม้ว่าความเข้มข้นของแซนแรนจะต่ำถึงร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก และเมื่อสารละลายแซนแรนมีความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่าฟองอากาศส่วนใหญ่รวมตัวกันเป็นฟองใหญ่ในบริเวณใกล้กับตัวให้อากาศซึ่งฟองอากาศเหล่านี้ลอยตัวขึ้นไปผ่านไรเซอร์ โดยไม่มีการแตกตัวเป็นฟองขนาดเล็กและออกไปจากถังหมักอย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้ Young และคณะ (1987) ได้สังเกตเห็นบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งเมื่อความเข้มข้นของแซนแรนสูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนัก ชั้นของของเหลวที่อยู่นิ่งเกิดขึ้นที่

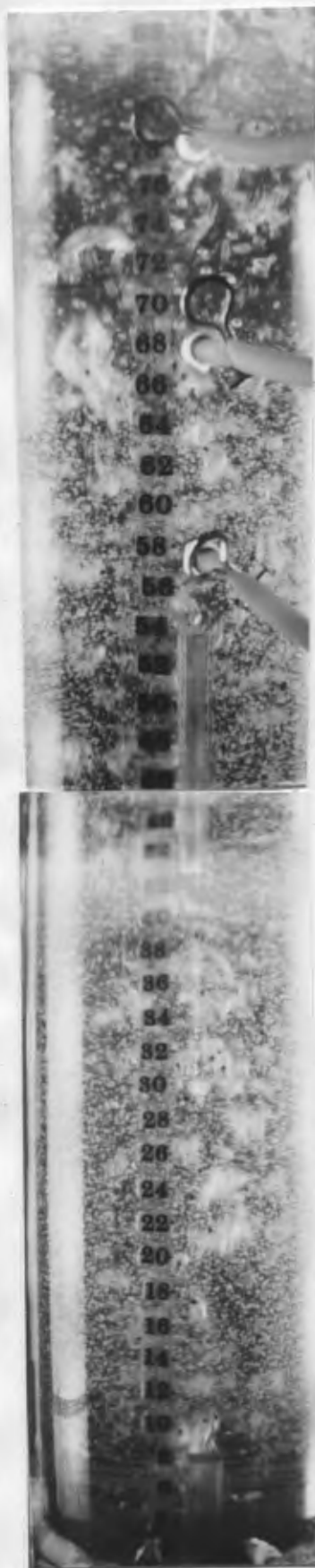
บริเวณผนังของดาวนํัคมเมอร์ของถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.14 เมตร ซึ่งจากงานวิจัยนี้ไม่พบบริเวณที่ของเหลวอยู่หนึ่งที่ระดับความเข้มข้นของแซนแทนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก แต่จะเกิดขึ้นในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะสังเกตพบได้ใน 2 บริเวณคือ บริเวณผนังของดาวนํัคมเมอร์ และบริเวณส่วนล่างของโรเตอร์ และจากรายงานของ Field และคณะ (1984) ซึ่งทำการศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่บรรจุสารละลายแซนแทนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0-0.5 โดยน้ำหนัก พบว่าไม่มีการเกิดบริเวณที่ของเหลวอยู่หนึ่งในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว

จากผลการศึกษาพอจะสรุปได้ว่า ในสารละลายแซนแทนทุกความเข้มข้นจะมีความปั่นป่วนน้อยกว่าน้ำเมื่อให้อากาศในระดับเดียวกัน และฟองอากาศที่ออกจากตัวให้อากาศมีขนาดใหญ่กว่า และจะยิ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้อากาศหรือเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแซนแทน ฟองอากาศที่ออกจากตัวให้อากาศเคลื่อนที่ขึ้นในบริเวณตรงกลางของถังหมักเนื่องจากแรงผลักรวมของของเหลวที่เข้ามาจากส่วนดาวนํัคมเมอร์ ในส่วนโรเตอร์สังเกตพบการไหลวนของของเหลวเป็นรูปจากบริเวณส่วนกลางออกไปสู่บริเวณผนัง ลักษณะของฟองอากาศที่ปรากฏในดาวนํัคมเมอร์มีขนาดเล็กกว่าในกรณีของน้ำ และมีฟองอากาศขนาดเล็กเกาะอยู่ที่ผนังอย่างหนาแน่นกว่าในน้ำ และฟองอากาศเหล่านี้จะรวมตัวกับฟองอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านลงมา จนกระทั่งมีขนาดเพิ่มขึ้นและลอยตัวขึ้น จนมีการเคลื่อนที่สวนทางกับการไหลของของเหลว ดังนั้นในส่วนดาวนํัคมเมอร์จะปรากฏฟองอากาศทั้งที่มีการเคลื่อนที่ลง อยู่กับที่ และฟองอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้น โดยฟองอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้นจะเคลื่อนที่ในแนวติดกับผนัง เนื่องจากบริเวณใกล้ผนังจะมีความเร็วของของเหลวที่เคลื่อนที่ลงช้ากว่าบริเวณตรงกลางทำให้แรงที่ต้านทานการลอยตัวของฟองอากาศมีค่าน้อยกว่าบริเวณตรงกลาง เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศสูงขึ้นจะเกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่เกิดขึ้นซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วนในส่วนบนมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังปรากฏบริเวณของเหลวที่อยู่หนึ่งที่บริเวณส่วนต้นของโรเตอร์ และมีบริเวณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น

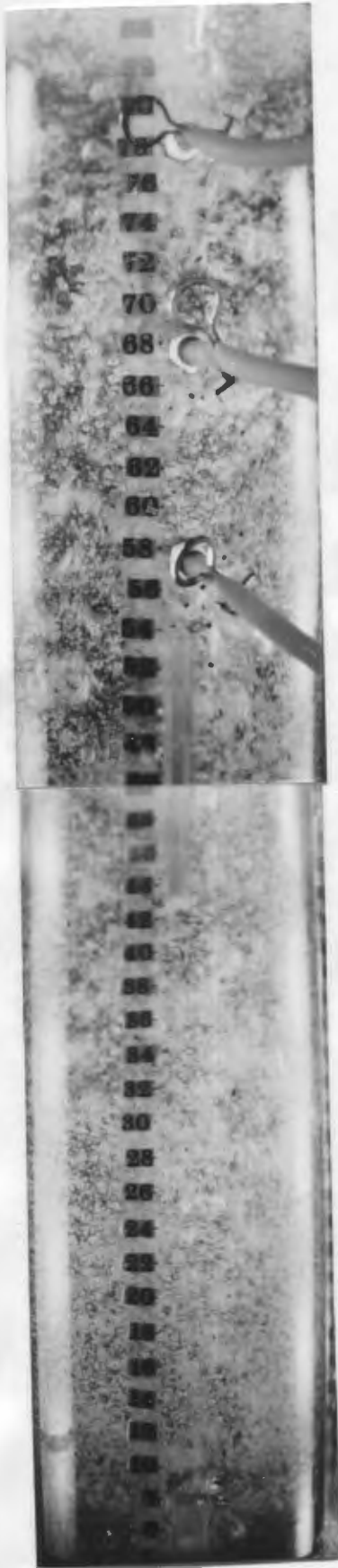
Erickson (1983) ได้กล่าวว่า ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ ดังนั้น ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนที่ดีกว่า และเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วกว่า จากการทดลองในครั้งนี้สังเกตได้ว่าในความเข้มข้นของแซนแทนที่สูงขึ้นจะมีฟองอากาศขนาดเล็กตกค้างอยู่มากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเกาะติดอยู่ที่ผนังของถัง

หมัก และอยู่ในถังหมักเป็นเวลานาน Erickson (1983) กล่าวว่า น้ำหมักที่มีความหนืดจะมี ฟองอากาศขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากและมีเวลาเวสิเคิลชันยาวนาน ฟองอากาศขนาดเล็กที่ไม่มีการแตกตัวหรือรวมตัวกับฟองอากาศอื่น จะเป็นฟองอากาศที่ไม่มีประโยชน์ เนื่องจากไม่มีการถ่ายเทของออกซิเจน เพราะออกซิเจนถูกใช้ไปหมดแล้ว

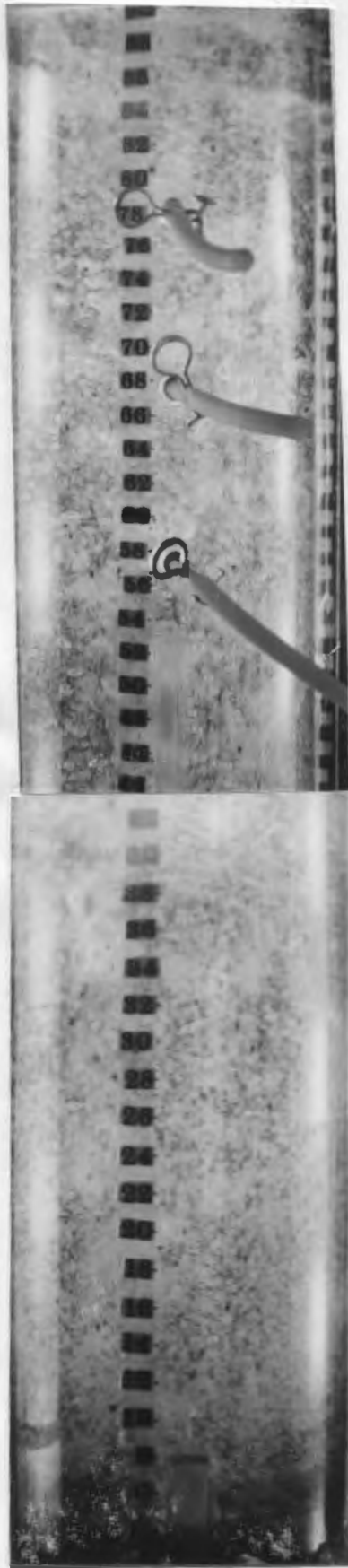
การปรากฏอยู่ของฟองอากาศขนาดเล็ก นอกจากจะเป็นการเพิ่มค่า $K_L a$ แล้วยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางรีโอโลยีด้วย แต่อย่างไรก็ตามบางรายงานบอกว่าไม่มีผลต่อความหนืด แต่มีผลต่อคุณสมบัติไดนามิก (dynamic properties) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง G' ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ viscoelasticity ดังนั้น การปรากฏอยู่ของฟองอากาศขนาดเล็กในของเหลวที่มีคุณสมบัติ viscoelasticity อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลและลักษณะการผสมได้ (Charles, 1978)



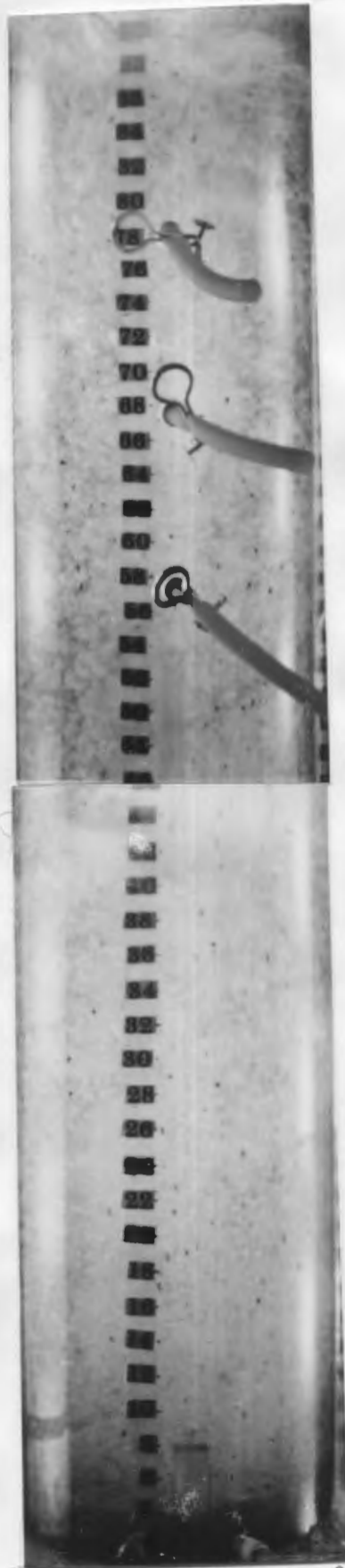
ภาพที่ 4.6 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนธัน ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm



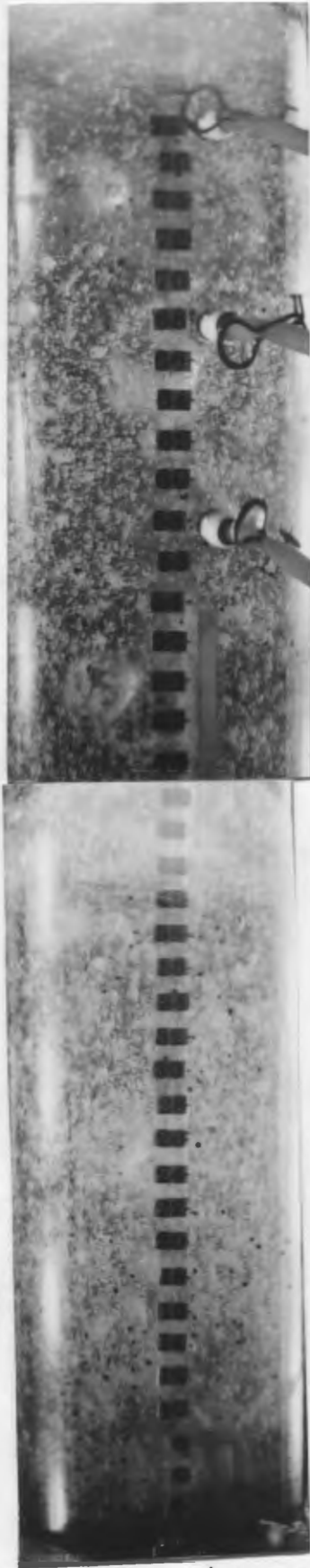
ภาพที่ 4.7 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทน ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm



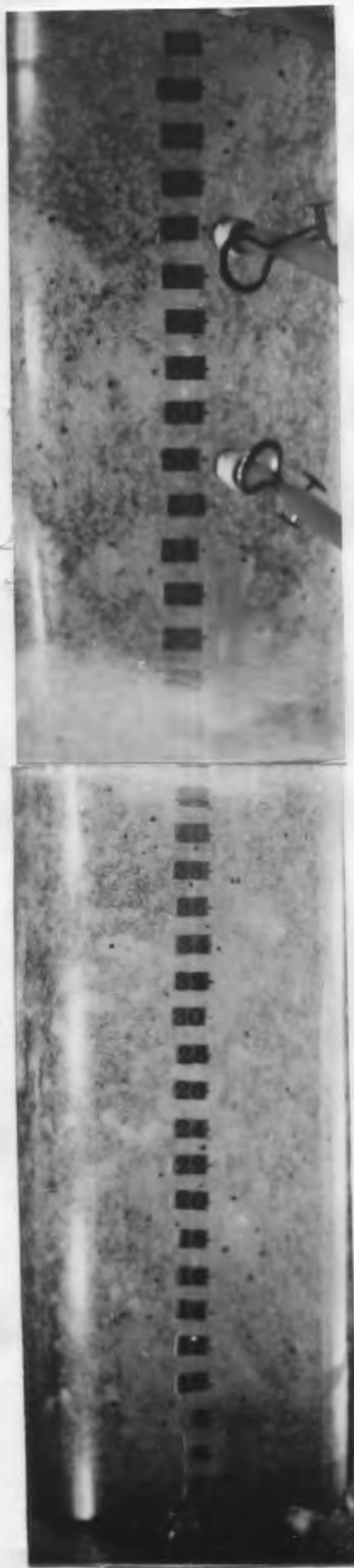
ภาพที่ 4.8 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายขนแธน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.64 w/m



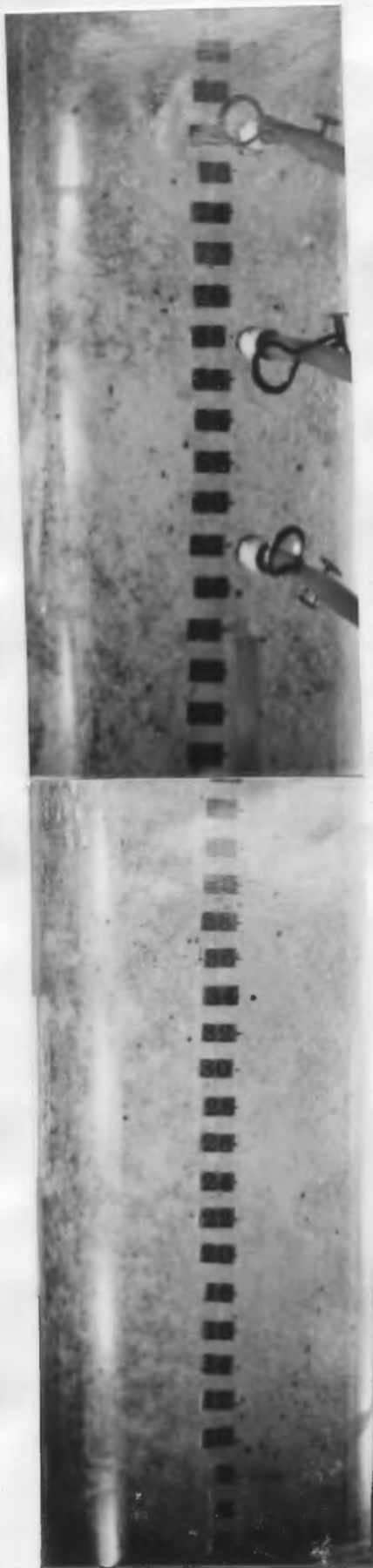
ภาพที่ 4.9 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm



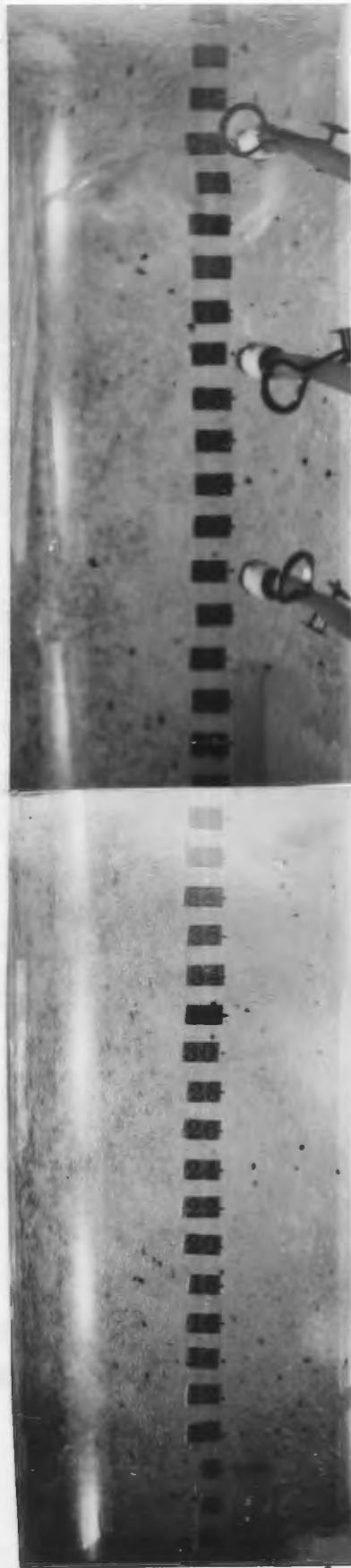
ภาพที่ 4.10 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนธาน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm



ภาพที่ 4.11 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแรน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm



ภาพที่ 4.12 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm



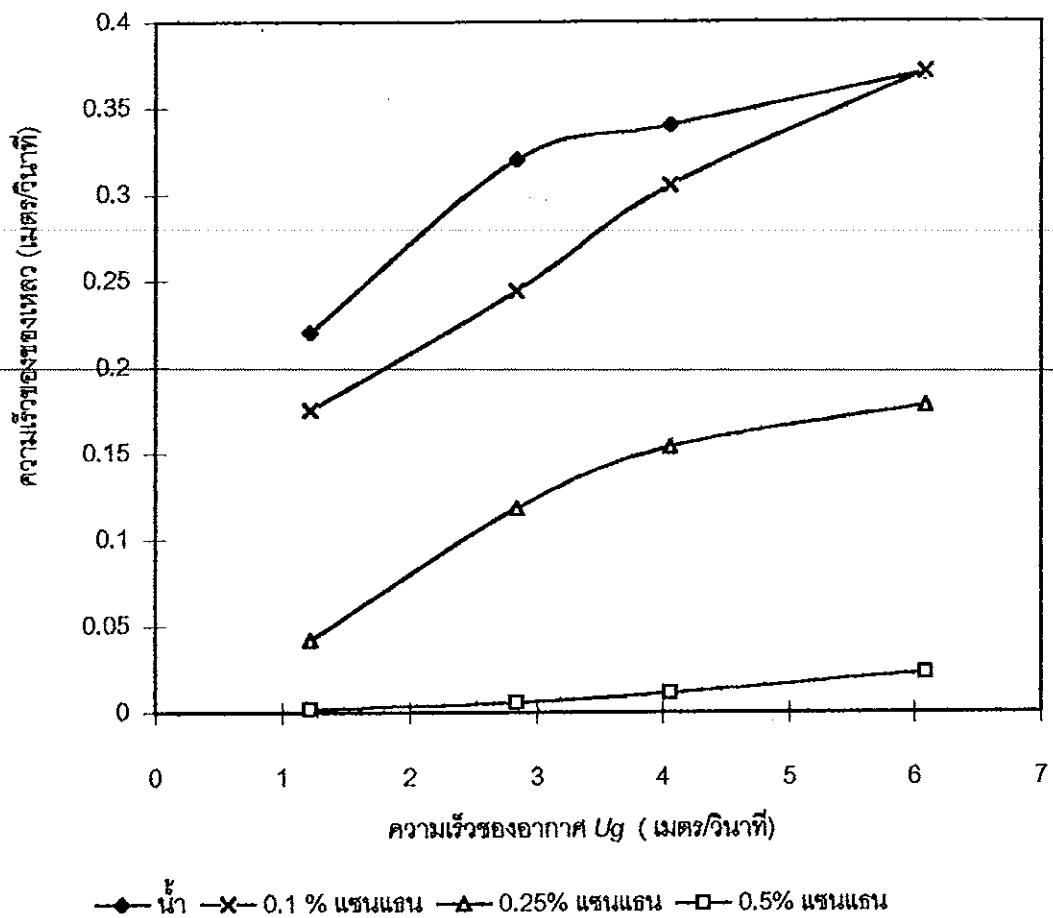
ภาพที่ 4.13 ลักษณะการไหลและการกระจายของฟองอากาศในสารละลายแซนแทน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm

2. ผลการศึกษาความเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหล โดยวิธีคิดตามอนุภาค

จากผลการวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหล ที่อัตราการให้อากาศที่ระดับต่าง ๆ และที่ความเข้มข้นของเซนแธนต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาความเร็วของของไหลกับอัตราการให้อากาศ

สารละลาย	อัตราการให้อากาศ (vvm)	ความเร็วของก๊าซ (U_0) (m/sec)	ความเร็วของของผสม (m/sec)	อัตราไหลเชิงปริมาตร (Q) (m^3/sec)	เวลาในการวนครบ (sec)
น้ำ	0.2	1.22	0.22	0.0033	7.27
		2.84	0.32	0.0048	5.58
		4.06	0.34	0.0051	4.71
		6.09	0.37	0.0055	4.36
แซนแธน	0.46	1.22	0.175	0.00263	9.125
		2.84	0.244	0.00366	6.557
		4.06	0.305	0.00457	5.252
		6.09	0.371	0.00557	4.309
ความเข้มข้นร้อยละ 0.1	0.64	1.22	0.0418	0.00627	38.277
		2.84	0.118	0.00177	13.559
		4.06	0.1536	0.00230	10.417
		6.09	0.1174	0.00266	9.019
ความเข้มข้นร้อยละ 0.25	1	1.22	0.001695	0.00254	948.82
		2.84	0.005619	0.00843	285.88
		4.06	0.011086	0.00166	145.18
		6.09	0.022634	0.00340	70.88



ภาพที่ 4.14 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวในดาวนัมคัมเมอร์กับความเร็วของอากาศ

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.14 ซึ่งแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวในดาวนัมคัมเมอร์ที่วัดโดยวิธีติดตามอนุภาคกับอัตราการให้อากาศต่อพื้นที่หน้าตัด (U_g) พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ในทุกระดับความเข้มข้นของแชนแนลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น (1.22 - 6.09 เมตรต่อวินาที) เนื่องจากการเพิ่มอัตราการให้อากาศทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างส่วนดาวนัมคัมเมอร์กับส่วนโรเตอร์เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงยกตัวผลักดันให้ของเหลวเคลื่อนวนมากขึ้น

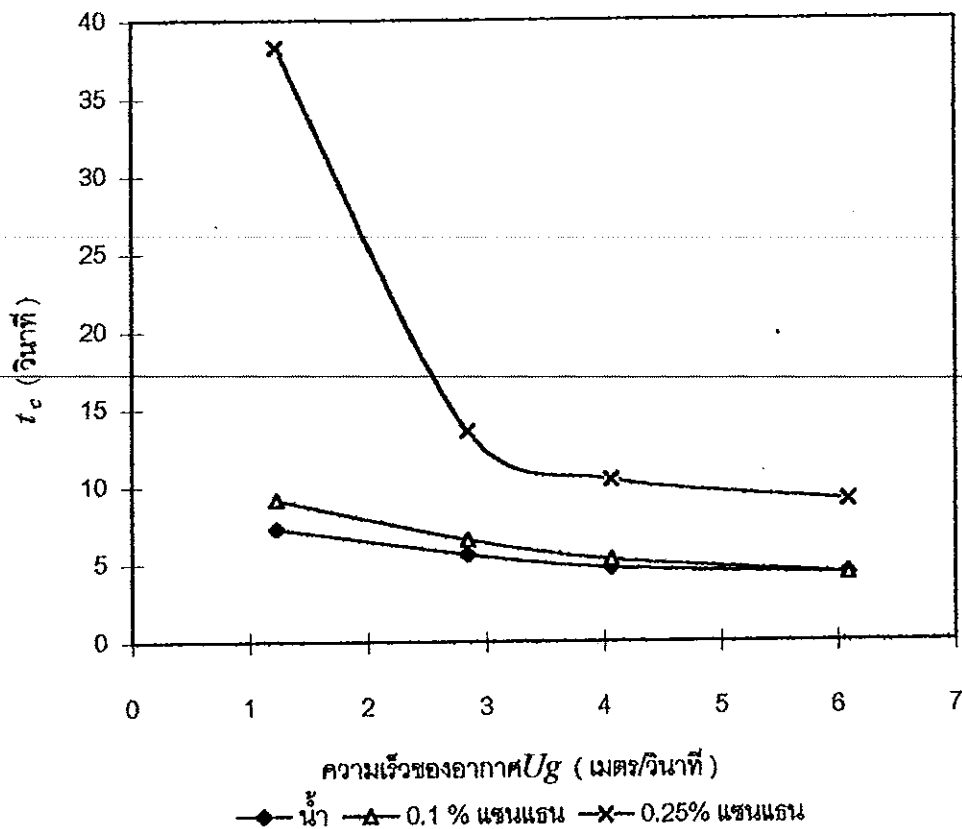
เมื่ออัตราการให้อากาศคงที่ ความเข้มข้นของสารละลายแชนแนลที่สูงขึ้น ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลง จากภาพจะเห็นได้ว่า น้ำมีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงที่สุด และมีการเพิ่มความเร็วย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้อากาศในช่วงต้น จากนั้นเมื่อ

มีการเพิ่มอัตราการให้อากาศขึ้นไปอีก การเพิ่มขึ้นของความเร็วจะช้าลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมีความหนืดน้อย เมื่อให้อากาศมาก ๆ ทำให้เกิดความปั่นป่วนที่รุนแรง และมีการผสมกลับเกิดขึ้น (back mixing) การเคลื่อนที่ของอนุภาคและฟองอากาศเปลี่ยนจากการเคลื่อนที่แบบตรงเป็นการเคลื่อนแบบสั่น ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกนลดลง

ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก มีความเร็วที่ใกล้เคียงกับน้ำ และมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้อากาศที่สูงขึ้น จนกระทั่งเมื่ออัตราการให้อากาศต่อพื้นที่หน้าตัดเป็น 6.09 เมตรต่อวินาที ความเร็วของสารละลายแซนแทนมีค่าเท่ากับความเร็วของน้ำ

ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักมีความเร็วเท่ากับ 0.04 เมตรต่อวินาที ที่ U_g เท่ากับ 1.22 เมตรต่อวินาที และความเร็วเพิ่มเป็น 0.12 เมตรต่อวินาที เมื่อ U_g เพิ่มเป็น 6.09 เมตรต่อวินาที ส่วนในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักมีความเร็วต่ำมาก

สรุปได้ว่า การเพิ่มอัตราการให้อากาศทำให้ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างส่วนโรเตอร์กับส่วนดาวนั้คัมเมอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงขับให้ของเหลวเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ในสารละลายที่มีความหนืดต่ำ ๆ เช่น น้ำ การเพิ่มอัตราการให้อากาศมากขึ้น ทำให้เกิดความปั่นป่วนที่รุนแรงและเกิดการผสมแบบย้อนกลับมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนในแนวแกนลดลง และในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง การเพิ่มอัตราการให้อากาศทำให้ความเร็วในการเคลื่อนเพิ่มขึ้นได้ไม่มากนัก เนื่องจากเกิดสลัก (slug) ของก๊าซเกิดขึ้นซึ่งเป็นฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ เคลื่อนที่ขึ้นอย่างรวดเร็วและแตกตัวออกจากถังหมักในเวลาอันรวดเร็ว ทำให้มีปริมาณอากาศตกค้างภายในถังหมักน้อย แรงขับในการเคลื่อนที่วนลูปมีน้อย



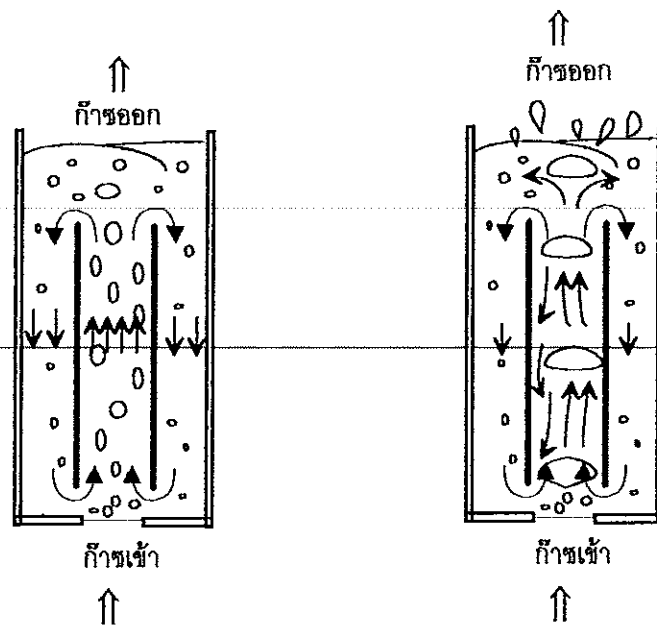
ภาพที่ 4.15 เวลาในการวนครบรอบ (t_c) กับความเร็วของอากาศ

จากภาพที่ 4.15 แสดงเวลาในการวนครบรอบกับอัตราการใช้อากาศ พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายแชนแรนร้อยละ 0.1 มีค่า t_c ใกล้เคียงกับน้ำ โดยที่ t_c ของน้ำมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย โดยเริ่มต้นที่ t_c ของน้ำเท่ากับ 7.27 วินาที ที่ U_g เท่ากับ 1.22 เมตรต่อวินาที และลดลงเป็น 4.36 วินาที ที่ U_g 6.09 เมตรต่อวินาที ในขณะที่สารละลายแชนแรนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก มีค่า t_c เท่ากับ 38.28 วินาที ที่ U_g 1.22 เมตรต่อวินาที และลดลงอย่างมากเมื่อ U_g เพิ่มขึ้นเป็น 2.84 เมตรต่อวินาที t_c เท่ากับ 13.56 วินาที จากนั้นเมื่อเพิ่ม U_g เป็น 4.06 และ 6.09 เมตรต่อวินาที t_c จะลดลงเล็กน้อยเป็น 10.42 และ 9.02 วินาที

Kawase และ Moo-Young (1989) ทำการศึกษาเวลาในการวนครบรอบของ carboxymethylcellulose (CMC) ซึ่งเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อระบายภายใน พบว่า เวลาในการวนครบรอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการใช้อากาศให้สูงขึ้น Phillip และคณะ (1994) อธิบายว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราการใช้อากาศทำให้

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องจากแก๊สไฮลด์อัฟในโรเซอ์เพิ่มขึ้น ค่าความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างโรเซอ์กับดาวนัมเมอร์สูงขึ้นทำให้เกิดแรงผลักดันในการเคลื่อนที่สูงขึ้น

นอกจากนี้ จากการทดลองสังเกตเห็นว่าขนาดของฟองอากาศที่แตกต่างกัน มีผลทำให้เกิดลักษณะการไหลของของเหลวที่แตกต่างกันไปด้วย ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะการไหลที่เกิดจากขนาดของฟองอากาศที่ต่างกันระหว่างน้ำกับสารละลายแซนแทนที่มีความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก) ที่ระดับอัตราการให้อากาศเดียวกันพบว่า ในน้ำจะเกิดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกว่าในสารละลายแซนแทน ฟองอากาศเหล่านี้จะกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ และเคลื่อนที่ขึ้นทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ และฟองอากาศเหล่านี้ยังกระจายไปในดาวนัมเมอร์ด้วย ทำให้ลักษณะการผสมในดาวนัมเมอร์และในโรเซอ์มีลักษณะที่แตกต่างกัน ในขณะที่ในสารละลายแซนแทนจะเกิดการรวมตัวของฟองอากาศที่ออกจากตัวให้อากาศกลายเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ ทำให้ฟองอากาศกระจายไม่ทั่วถึง ฟองอากาศขนาดใหญ่นี้จะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดความปั่นป่วนในบริเวณที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่าน ทำให้การเคลื่อนที่ของของเหลวไม่สม่ำเสมอ และฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่นี้จะแตกตัวที่ส่วนบนของถังหมัก และอากาศส่วนใหญ่จะออกจากถังหมักไปในเวลาอันรวดเร็ว โดยมีฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดจากการแตกตัวเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เคลื่อนที่ลงสู่ดาวนัมเมอร์ ทำให้เกิดความแตกต่างของกลไกของการผสมระหว่างส่วนโรเซอ์และส่วนดาวนัมเมอร์ ข้อดีของฟองอากาศขนาดใหญ่คือทำให้เกิดความปั่นป่วนสูงในโรเซอ์ซึ่งจะทำให้การผสมเกิดขึ้นได้ดี แต่มีข้อเสียคือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับของเหลวน้อยและมีเวลาเรซิเดนซ์สั้น ทำให้การถ่ายโอนออกซิเจนเกิดได้น้อย



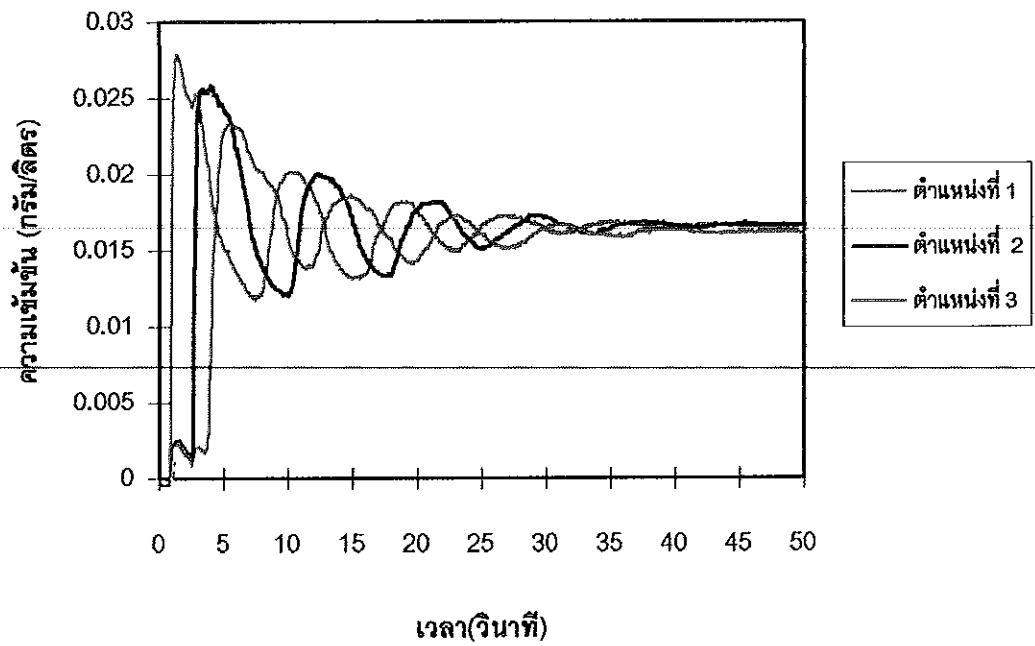
ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากฟองอากาศที่มีขนาดแตกต่างกันที่สังเกตได้จากการทดลองในน้ำ และในสารละลายแซนแทน

3. ผลการศึกษาลักษณะการผสมโดยวิธีติดตามการตอบสนองของเทรซเซอร์

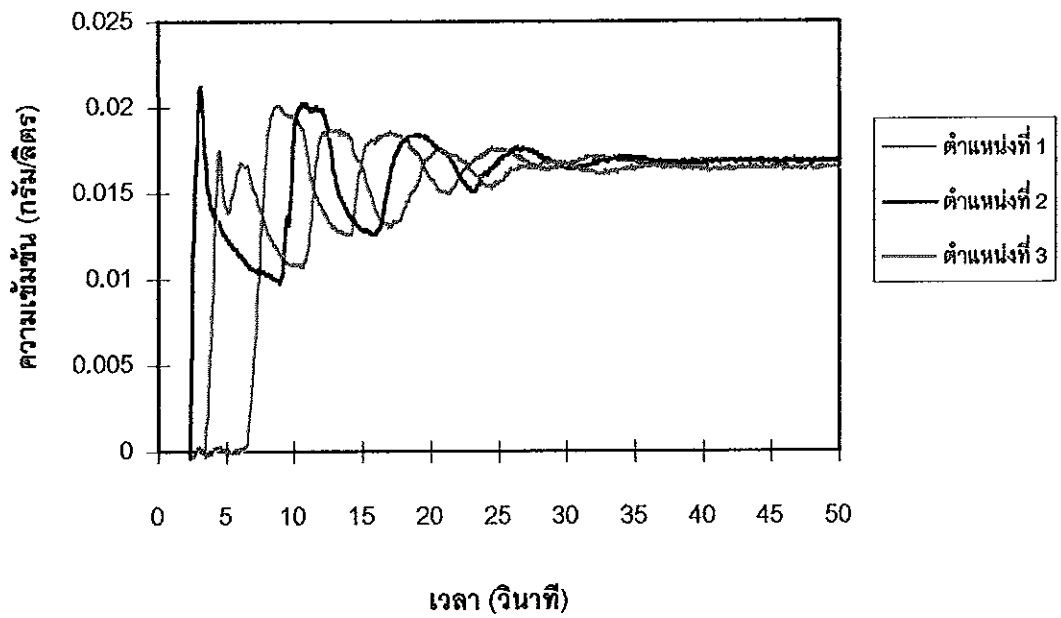
3.1 การตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำ

ผลการศึกษาการผสมโดยวิธีการตอบสนองของเทรซเซอร์ โดยใช้พีเอชเซนเซอร์ 3 ตัว ติดตั้งบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของดาวน์คัมเมอร์ ตำแหน่งละ 1 ตัว อีก 1 ตัวติดตั้งไว้ที่ ส่วนล่างของโรเตอร์ เมื่อให้อากาศจนระบบเข้าสู่ภาวะที่เสถียรแล้ว ฉีดกรด HCl ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงไปในถังหมัก (ความเข้มข้นสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณ 0.0152 กรัมต่อลิตร)

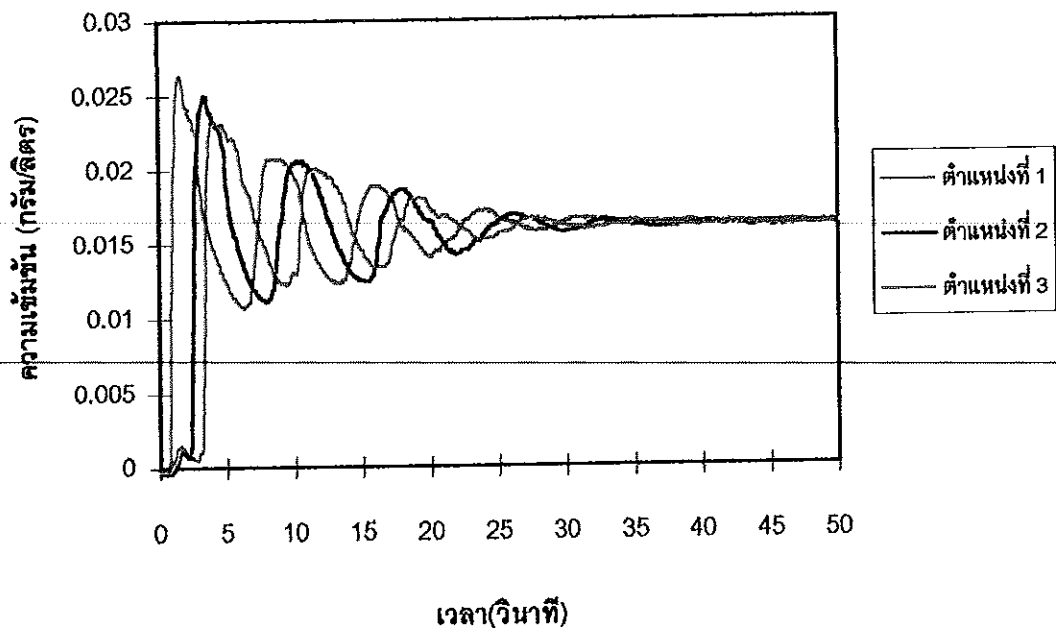
ผลการศึกษาในกรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารตัวอย่างแสดงในภาพที่ 4.17-4.20 จากผลการทดลองโดยใช้ช่วงของอัตราการให้อากาศตั้งแต่ระดับ 0.2, 0.46, 0.64 และ 1.0 vvm สังเกตพบว่าเวลาในการผสมไม่แสดงให้เห็นความแตกต่างที่สามารถสังเกตได้ทั้ง 4 ระดับของอัตราการให้อากาศ



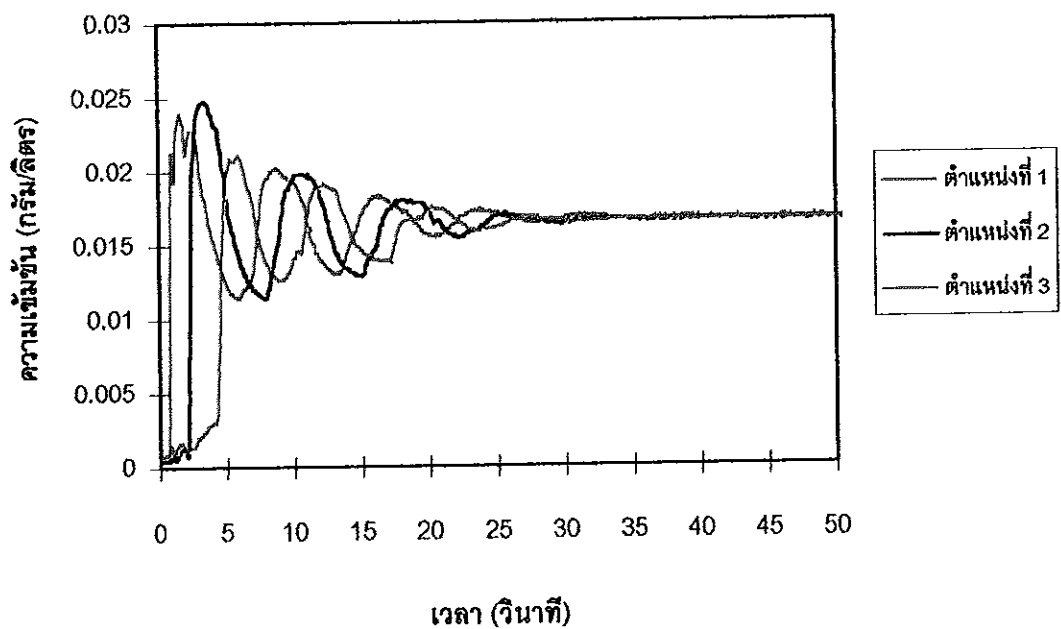
ภาพที่ 4.17 การตอบสนองของเทอร์เซอร์ในน้ำที่อัตราการให้อากาศ 0.2 ppm



ภาพที่ 4.18 การตอบสนองของเทอร์เซอร์ในน้ำที่อัตราการให้อากาศ 0.46 ppm



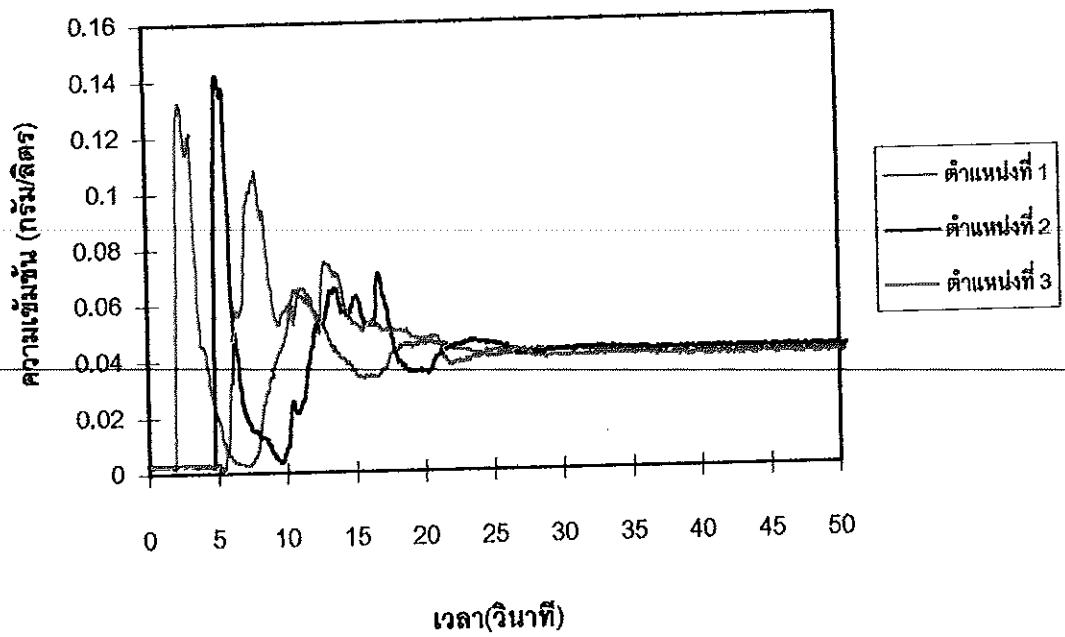
ภาพที่ 4.19 ผลการตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำที่อัตราการใช้กำลัง 0.64 w/m



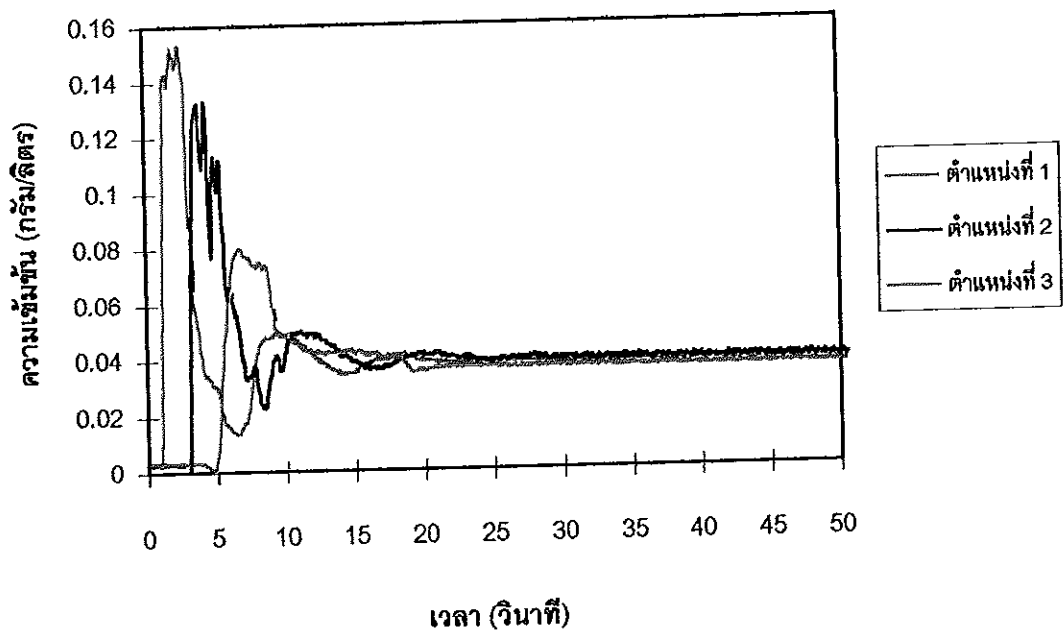
ภาพที่ 4.20 ผลการตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำที่อัตราการใช้กำลัง 1.0 w/m

3.2 ผลการตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1

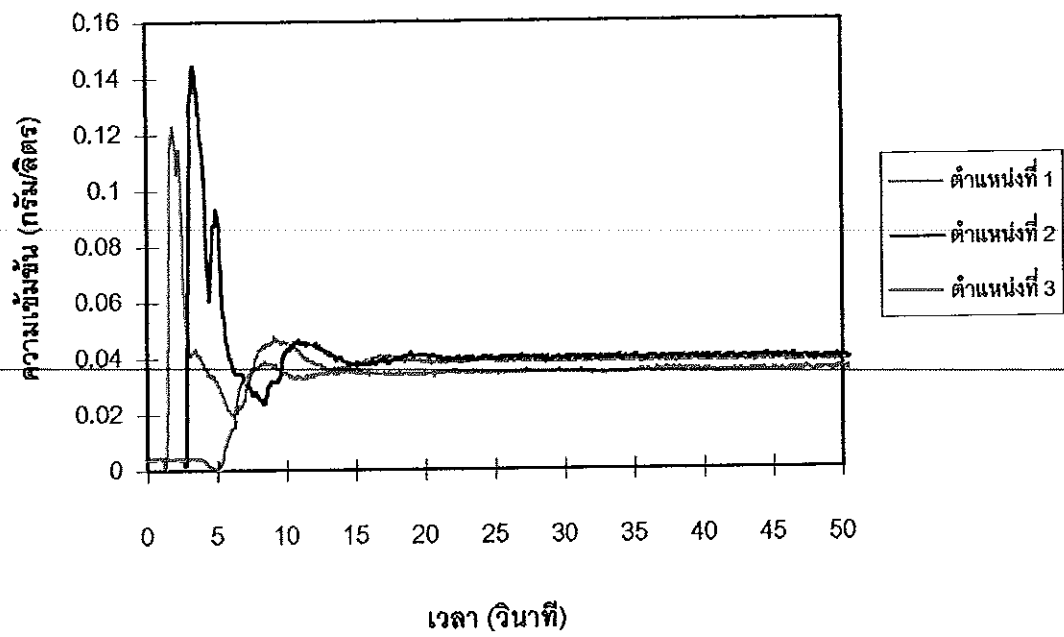
ผลการตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทน ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักที่ระดับการให้อากาศต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 4.21 - 4.24 เมื่อให้อากาศจนระบบเข้าสู่สภาวะที่เสถียรแล้ว ฉีดกรด HCl ความเข้มข้น 5.5 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงไปในห้องหมัก (ความเข้มข้นสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณ 0.0418 กรัมต่อลิตร) จากการสังเกตพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศ จะมีผลทำให้เวลาในการผสม ($t_{mix,95\%}$) ลดลง ที่อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm ใช้เวลาในการผสมในช่วง 20-25 วินาที ที่อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เวลาในการผสมอยู่ในช่วง 15-20 วินาที หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศให้สูงขึ้นอีกเป็น 0.64 และ 1.0 vvm เวลาในการผสมไม่เปลี่ยนแปลงมากนักโดยจะคงอยู่ในช่วงประมาณ 15 วินาที และเป็นที่น่าสังเกตว่าสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าเวลาในการผสมของน้ำในทุกๆ ระดับอัตราการให้อากาศ ทั้ง ๆ ที่ในน้ำมีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงกว่า จากการสังเกตลักษณะของกราฟ สารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 จะมีระดับการผสมย้อนกลับสูงกว่าน้ำ เนื่องจากการลดลงของพีคเร็วกว่า หรือกล่าวได้ว่าน้ำมีการผสมเข้าใกล้การผสมแบบปลั๊ก (plug flow) มากกว่าสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1



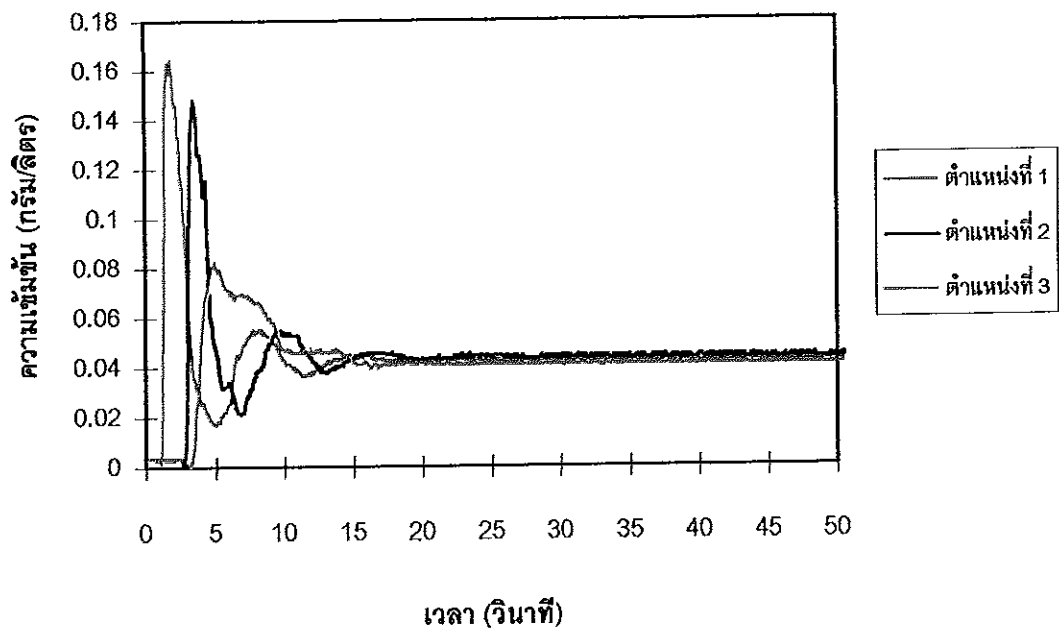
ภาพที่ 4.21 ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในแขนแขน 0.1 % อัตราการให้อากาศ 0.2 wvm



ภาพที่ 4.22 ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในแขนแขน 0.1 % อัตราการให้อากาศ 0.46 wvm



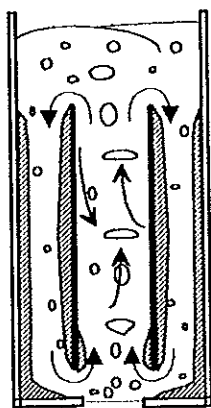
ภาพที่ 4.23 ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์โม แชนแนล 0.1% อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm



ภาพที่ 4.24 ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์โม แชนแนล 0.1% อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm

3.3 ผลการตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25

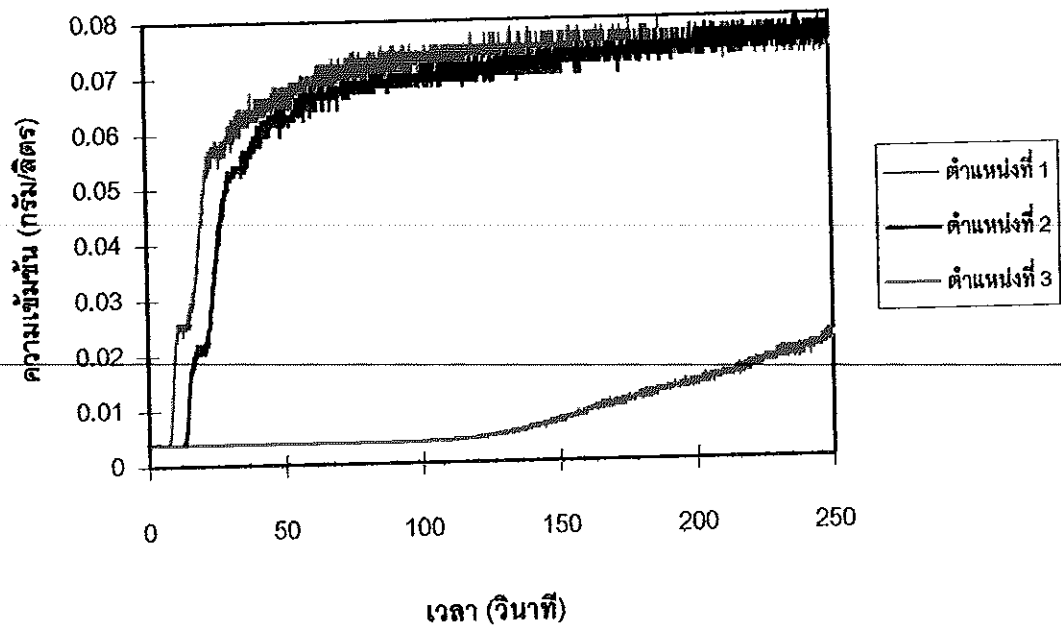
ผลการทดลองการตอบสนองของความเข้มข้นของเทรซเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 เมื่อให้อากาศจนระบบเข้าสู่สภาวะที่เสถียรแล้ว ฉีดกรด HCl ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงไปในถังหมัก (ความเข้มข้นสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณ 0.0835 กรัมต่อลิตร) การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเทรซเซอร์ไม่เหมือนกับที่เกิดขึ้นในน้ำและแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 เนื่องจากการไหลของแซนแทนมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น จากการสังเกตพบว่า ความเร็วของของไหลเป็นแบบพาราโบลา ในส่วนที่ติดผนังจะไหลช้ากว่าบริเวณส่วนกลาง การแพร่ในแนวรัศมีเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นที่ติดกับผนังจึงมีการเปลี่ยนแปลงช้า ลักษณะของกราฟที่ได้จึงเป็นดังภาพที่ 4.26 - 4.27 นอกจากนี้ในบริเวณส่วนล่างของ ไโรเซอร์ ซึ่งเป็นส่วนของเหลวจากดาวนคัมเมอร์วกเข้าสู่ไโรเซอร์ และมีการติดตั้งพีเอชเซนเซอร์ ไว้ที่จุดนี้ด้วย สังเกตพบบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นการผสมจึงเกิดขึ้นได้ช้า



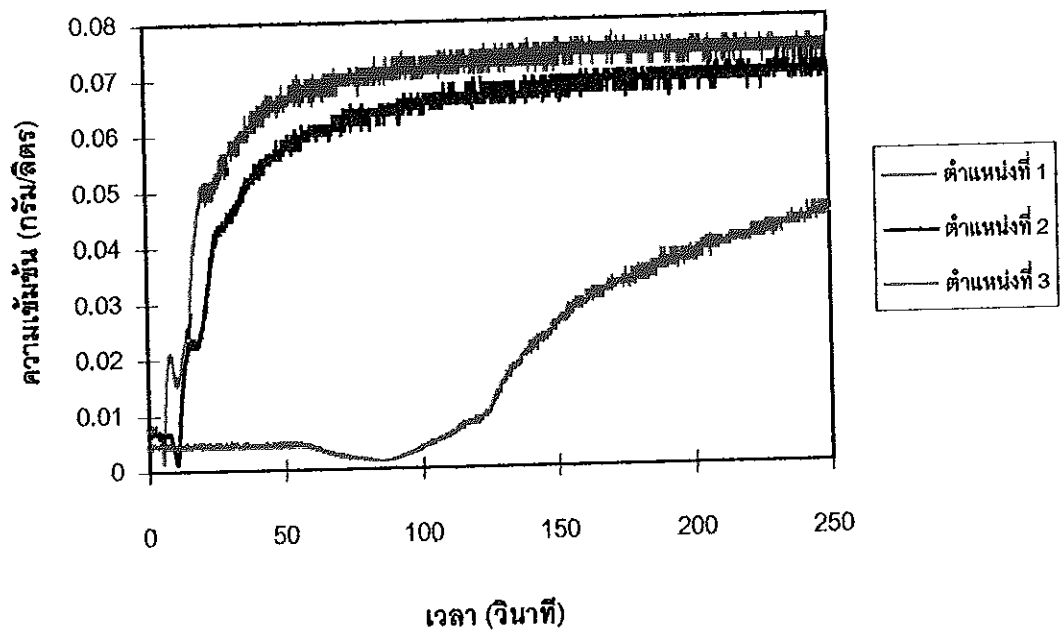
ภาพที่ 4.25 รูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25

จากกราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ สอดคล้องกับภาพอธิบายลักษณะการไหลของของไหลดังภาพที่ 4.25 ซึ่งได้จากการสังเกต จากภาพจะเห็นได้ว่าในโซนดาวนคัมเมอร์วกจะเกิดบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งที่ผนังด้านนอกและด้านใน ในพื้นที่หน้าตัดเดียวกันในโซน

ดาวนัมคัมเมอร์ สารละลายแซนแทนจะมีความหนืดไม่เท่ากันเนื่องจากได้รับแรงเฉือนไม่เท่ากัน ในบริเวณตรงกลางได้รับแรงเฉือนมากกว่าจะมีความหนืดน้อยกว่า ดังนั้นจึงเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า ส่วนบริเวณที่อยู่ติดกับผนังทั้งสองด้าน ได้รับแรงเฉือนน้อยกว่าจึงมีความหนืดสูงกว่า ประกอบกับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับผนังทั้งสองด้านทำให้ของเหลวบริเวณดังกล่าวอยู่กับที่ การผสมในบริเวณนี้เกิดขึ้นได้จากการแพร่ กราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์จึงค่อย ๆ สูงขึ้น โดยไม่ปรากฏพีคเกิดขึ้น แสดงว่าไม่มีการไหลวนของของไหลผ่านบริเวณนี้



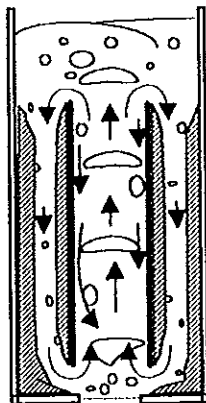
ภาพที่ 4.26 ผลการตอบสนองของเทรซเซอร์ในเซนแทรน 0.25% อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m



ภาพที่ 4.27 ผลการตอบสนองของเทรซเซอร์ในเซนแทรน 0.25% อัตราการให้อากาศ 0.64 w/m

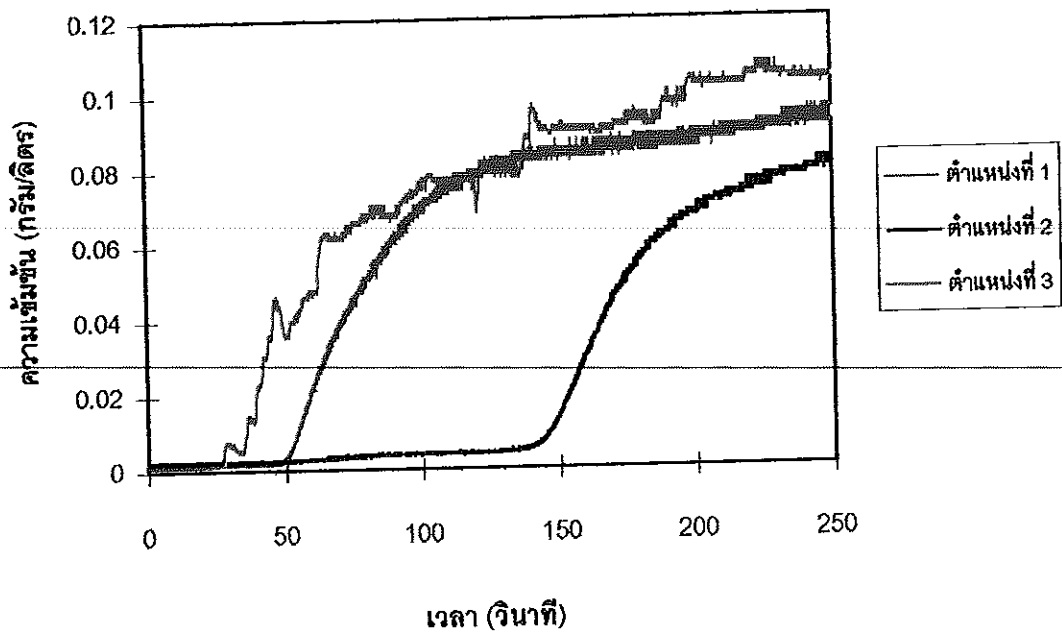
3.4 ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5

ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักที่อัตราการให้อากาศระดับต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 4.29 - 4.31 จากภาพการตอบสนองของเทอร์เซอร์พบว่า ไม่ปรากฏฟีดของการตอบสนองเกิดขึ้นตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ลักษณะของกราฟจะค่อย ๆ สูงขึ้นจนเข้าสู่ค่าคงที่ ส่วนในตำแหน่งที่ 3 นั้นพบว่าเกิดการผสมได้เร็วกว่าตำแหน่งที่ 1 และ 2 และลักษณะกราฟของตำแหน่งที่ 3 นั้นเกิดฟีดที่มีระยะห่างกันไม่แน่นอน จากกราฟการตอบสนองดังกล่าวสามารถอธิบายกลไกการไหลได้ด้วยภาพที่ 4.28

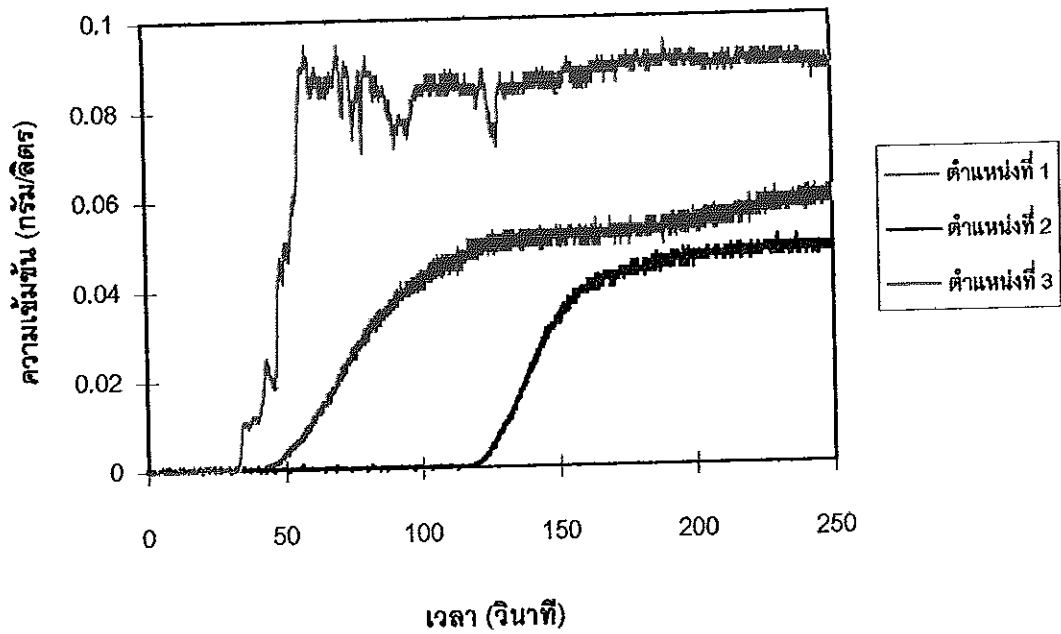


ภาพที่ 4.28 รูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5

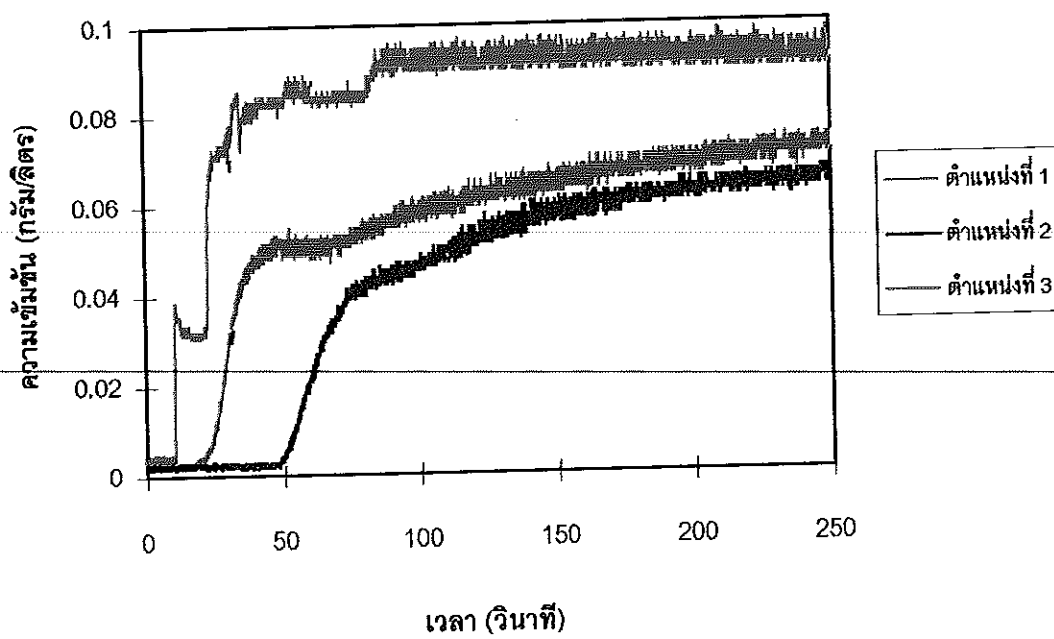
จากภาพจะเห็นได้ว่า ในโซนดาวน์คัมเมอร์จะเกิดบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งที่ผนังทั้งสองด้าน และเกิดเป็นบริเวณที่กว้างกว่าที่พบในระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ทำให้ในบริเวณดาวน์คัมเมอร์เกิดแรงต้านต่อการไหลเนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดในการไหลแคบลง ทำให้ลักษณะการไหลในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีลักษณะเข้าใกล้การไหลในถังปฏิกรณ์แบบบับเบิ้ลคอลัมน์มากขึ้น โดยจะเกิดการไหลวนของของเหลวภายในโซนโรเตอร์ ทำให้ในโซนโรเตอร์มีความปั่นป่วนมากขึ้น และมีทิศทางการไหลที่ไม่แน่นอน ลักษณะของฟีดการตอบสนองที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ 3 น่าจะเกิดจากการไหลวนของของเหลวภายในโซนโรเตอร์เอง ซึ่งมีขนาดไม่แน่นอน ดังนั้นฟีดที่ปรากฏจึงไม่มีความสม่ำเสมอ



ภาพที่ 4.29 ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในแขนแขน 0.5% อัตราการให้อากาศ 0.46 wvm



ภาพที่ 4.30 ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในแขนแขน 0.5% อัตราการให้อากาศ 0.64 wvm



ภาพที่ 4.31 ผลการตอบสนองของเทอร์เซอร์ในแขนแกน 0.5% อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m

4. ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากการชิมิวเลตแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

4.1 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงข่ายของโซนที่พัฒนาโดย ยุพดี สันติวุฒน์ (2538) กับข้อมูลจากการทดลอง

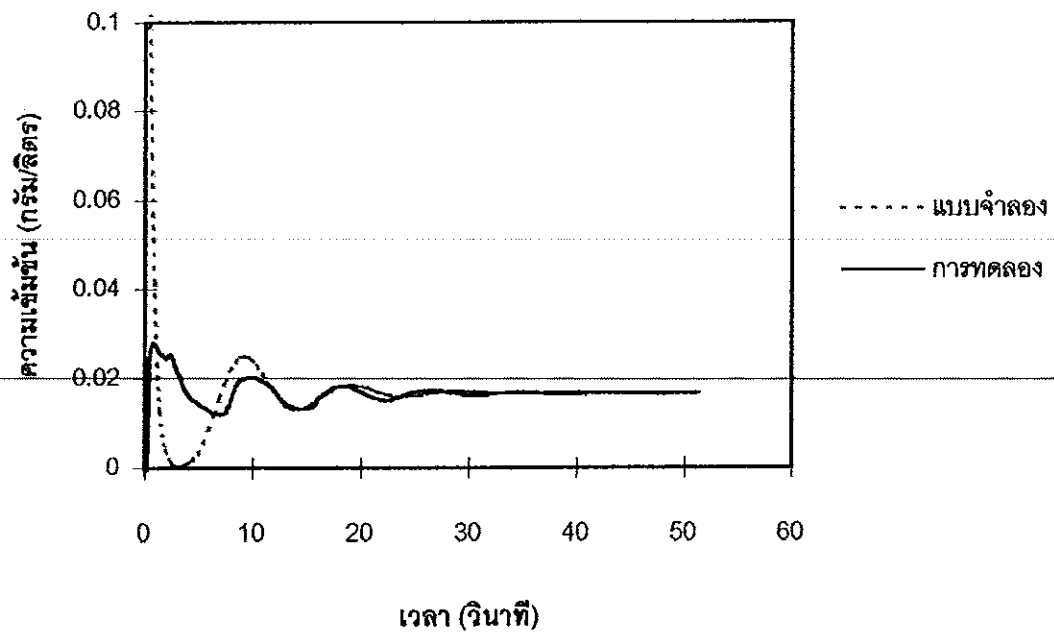
ทำการชิมิวเลตแบบจำลองโครงข่ายของโซนโดยการผันแปรจำนวนเซลล์ในแต่ละโซนเพื่อให้ได้ค่าที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากผลการกระทำดังกล่าว พบว่า ในกรณีของน้ำ กำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลวเท่ากับ 2.4, 2.8, 2.9 และ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สำหรับอัตราการให้อากาศ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง การกำหนดจำนวนเซลล์รวมเท่ากับ 14 เซลล์ โดยที่จำนวนเซลล์ในโซนส่วนบนเท่ากับ 2 จำนวนเซลล์ในโซนดาวนัคัมเมอร์เท่ากับ 5 จำนวนเซลล์ในโซนส่วนล่างเท่ากับ 2 และจำนวนเซลล์ในโซนไรเซอร์เท่ากับ 5 สามารถให้ผลการชิมิวเลตได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.32 - 4.35 จากการที่จำนวนเซลล์รวมในทุกระดับอัตราการให้อากาศมีจำนวนเท่ากัน แสดงว่าการผสมในทุกระดับอัตราการให้อากาศไม่แตกต่างกัน ซึ่งจากข้อมูลการตอบสนองของเทรซเซอร์พบว่า เวลาในการผสมของน้ำเท่ากับ 33, 30, 29 และ 28 วินาที ที่ระดับอัตราการให้อากาศเท่ากับ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ

ในกรณีของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาเวลาในการผสมโดยวิธีติดตามการตอบสนองของเทรซเซอร์พบว่า ใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าน้ำในทุกระดับอัตราการให้อากาศเมื่อเปรียบเทียบในระดับอัตราการให้อากาศเดียวกัน โดยมีเวลาการผสมเท่ากับ 22, 20, 19 และ 18 วินาที สำหรับอัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ จากการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง พบว่า การกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลวเท่ากับ 2.2, 2.4, 2.7 และ 2.9 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สำหรับอัตราการให้อากาศเท่ากับ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ โดยกำหนดให้จำนวนเซลล์ในโซนส่วนบนเท่ากับ 2 จำนวนเซลล์ในโซนดาวนัคัมเมอร์เท่ากับ 4 จำนวนเซลล์ในโซนส่วนล่างเท่ากับ 4 สามารถให้ผลการเปรียบเทียบใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในทุกระดับอัตราการให้อากาศ แสดงว่าในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก มี

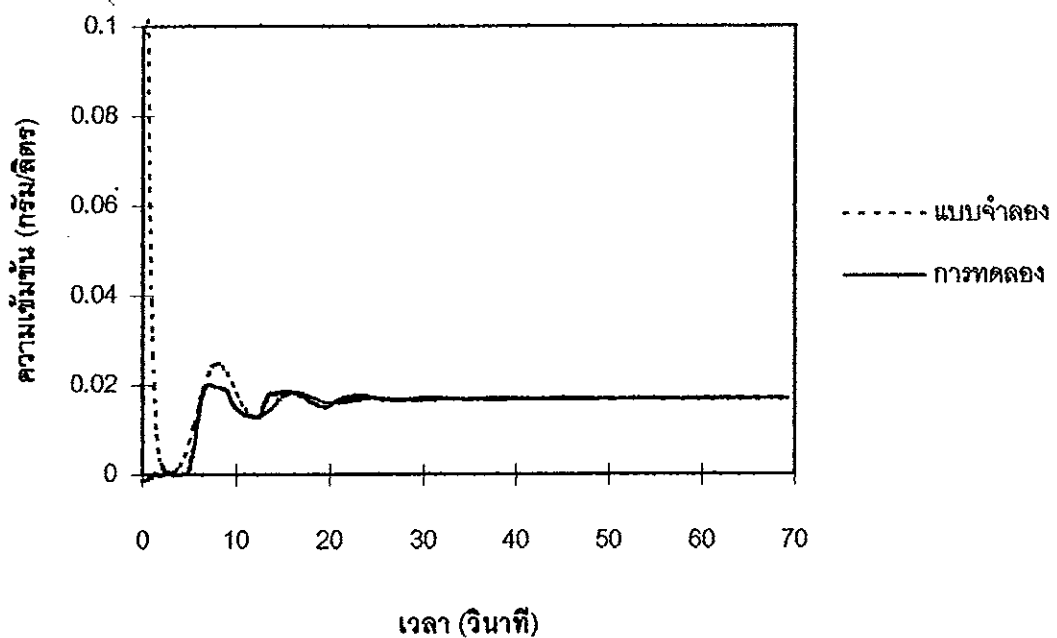
ระดับการผสมที่ไม่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับอัตราการให้อากาศ เวลาการผสมที่แตกต่างกัน เกิดจากอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่แตกต่างกัน และพบว่าจำนวนเซลล์รวมที่ใช้ในการชิมิวเลตเท่ากับ 12 เซลล์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าจำนวนเซลล์รวมที่ใช้ในกรณีของน้ำ แสดงว่าการผสมในน้ำมีลักษณะเข้าใกล้การผสมแบบปลັกมากกว่าในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 เพราะจำนวนเซลล์รวมที่ใช้บ่งบอกถึงลักษณะการผสม ถ้าจำนวนเซลล์น้อยแสดงว่ามีลักษณะเข้าใกล้การผสมที่สมบูรณ์ ถ้าจำนวนเซลล์มากแสดงว่ามีลักษณะการผสมเข้าใกล้การผสมแบบปลັก

สำหรับในกรณีที่ความเข้มข้นของแซนแทนสูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการตอบสนองของเทรเซอร์ดังภาพที่ 4.26 - 4.31 การตอบสนองไม่มีลักษณะฟัดเกิดขึ้นแต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ค่าคงที่ ซึ่งลักษณะการตอบสนองแบบนี้ไม่สามารถใช้แบบจำลองโครงข่ายของไซนในการอธิบายได้ เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวได้แบ่งไซนต่าง ๆ ของดั่งปฏิกรณ์แบบอากาศยกออกเป็นเซลล์เล็กขนาดเล็ก โดยกำหนดให้ในแต่ละเซลล์มีการผสมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ทั้งแนวแกนและแนวรัศมี ดังนั้นเมื่อแนวรัศมีประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียวจึงเป็นการกำหนดว่ามีการผสมในแนวรัศมี (transverse mixing) เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นจริงในน้ำและสารละลายแซนแทนที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนสูงขึ้น พบว่าไฮโดรไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทำให้การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรกำหนดระดับการผสมในแนวรัศมีด้วย โดยการแบ่งเซลล์ในแนวรัศมีออกเป็นเซลล์ย่อยตามระดับของการผสม เช่นเดียวกับการแบ่งเซลล์ในแนวแกน

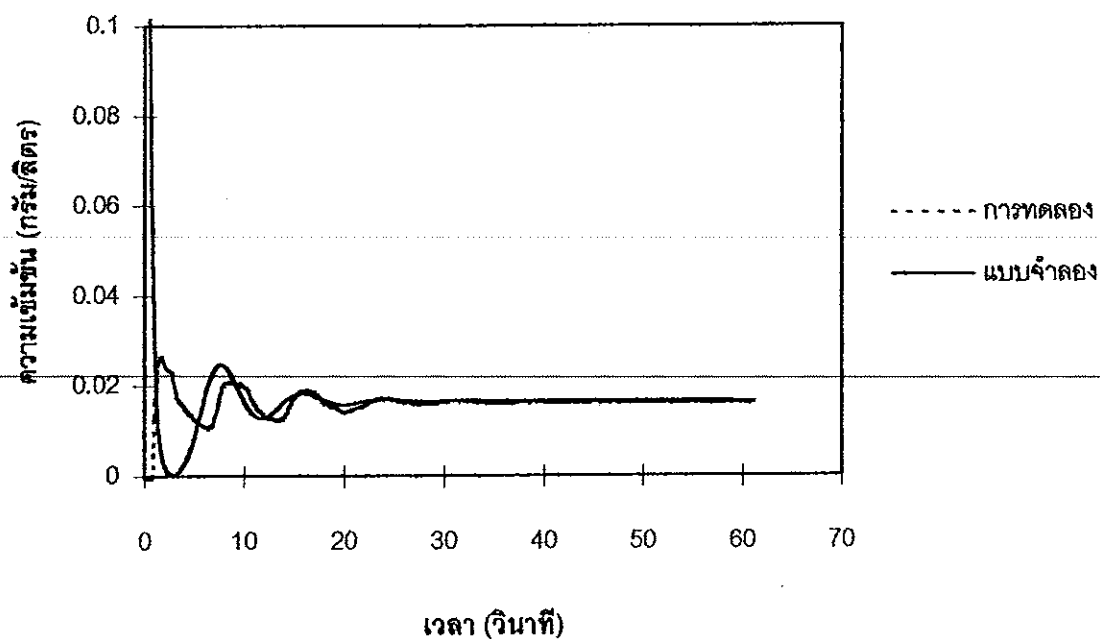
จากการใช้แบบจำลองโครงข่ายของไซนเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่า แบบจำลองดังกล่าวให้ผลการชิมิวเลตเป็นที่น่าพอใจและสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของน้ำและสารละลายแซนแทนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ซึ่งมีการผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่ไม่สามารถให้ผลการชิมิวเลตที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสารละลายแซนแทนที่ความเข้มข้นสูงได้ เนื่องจากการผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ทำให้รูปแบบของการผสมเปลี่ยนไป ซึ่งอยู่นอกเหนือข้อสมมติของแบบจำลองดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายของไซนเพิ่มเติมโดยคำนึงถึงโปรไฟล์ (profile) การไหลและลักษณะทางไฮโดรไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นดังรายละเอียดในบทที่ 2



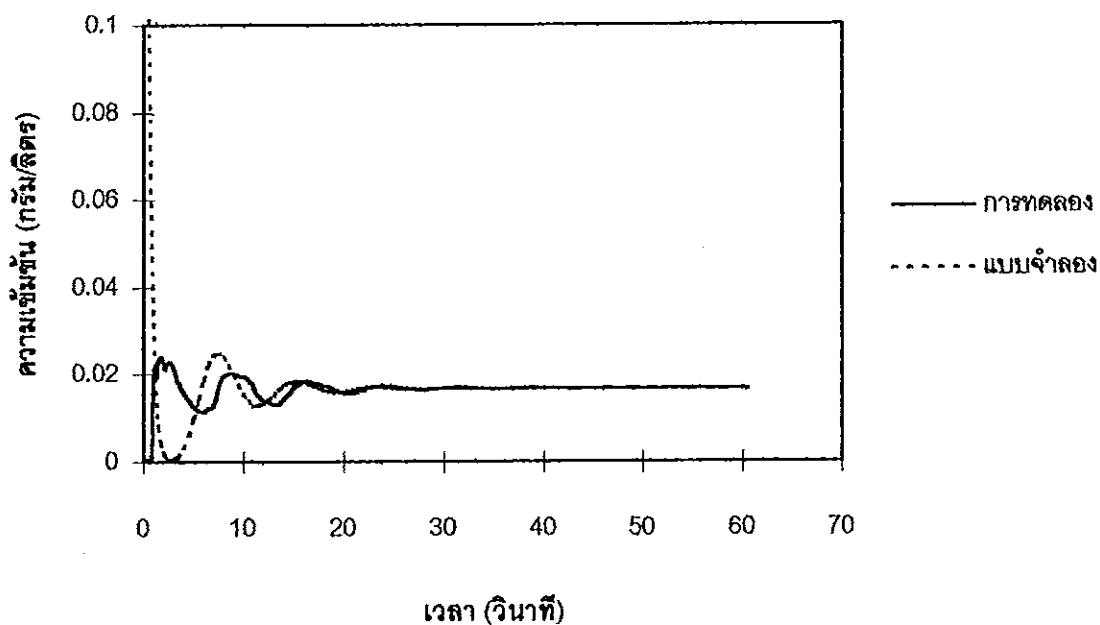
ภาพที่ 4.32 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโหนดกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1
 ใน น้ำ อัตรากาการให้อากาศ 0.2 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=5, N_3=2, N_4=5$ $Q = 2.4$
 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



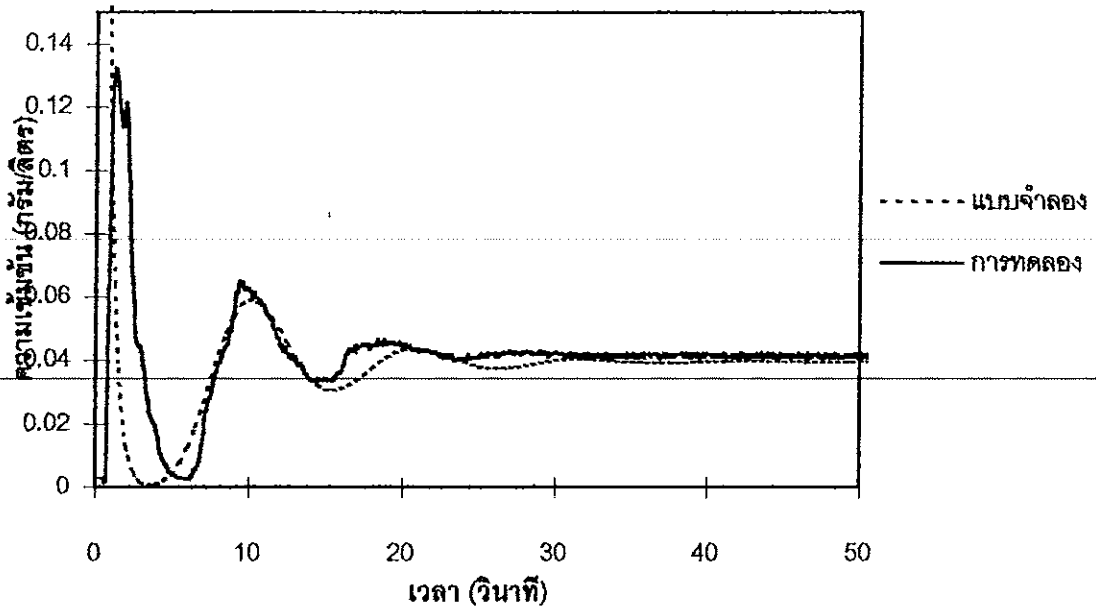
ภาพที่ 4.33 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโหนดกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1
 ใน น้ำ อัตรากาการให้อากาศ 0.46 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=5, N_3=2, N_4=5$ $Q = 2.8$
 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



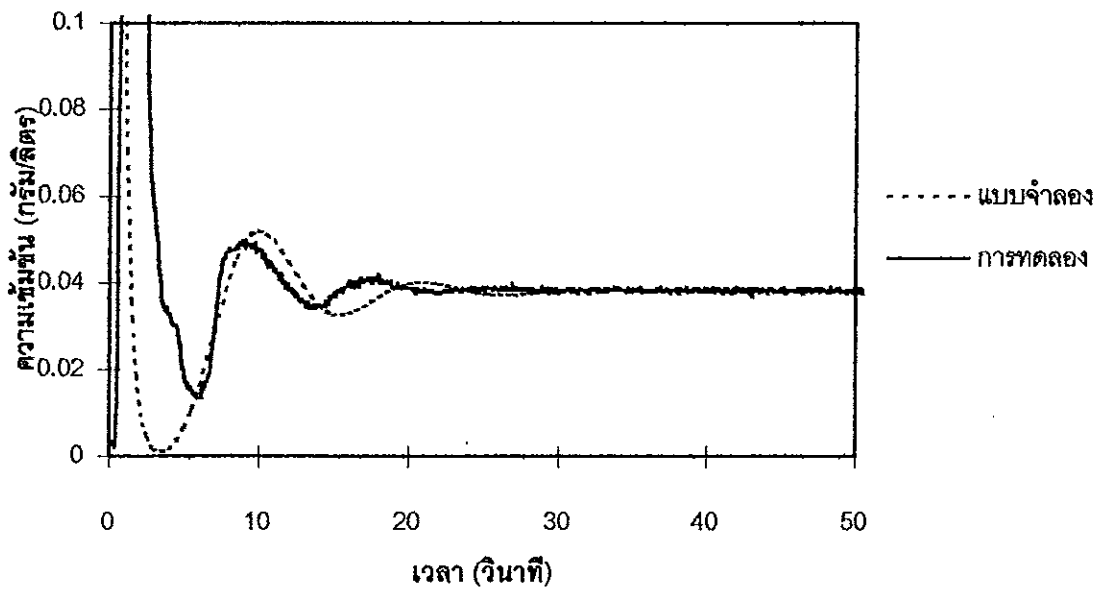
ภาพที่ 4.34 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1
 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.64 w/m เมื่อกำหนดให้ $N1=2, N2=5, N3=2, N4=5$ $Q = 2.9$
 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



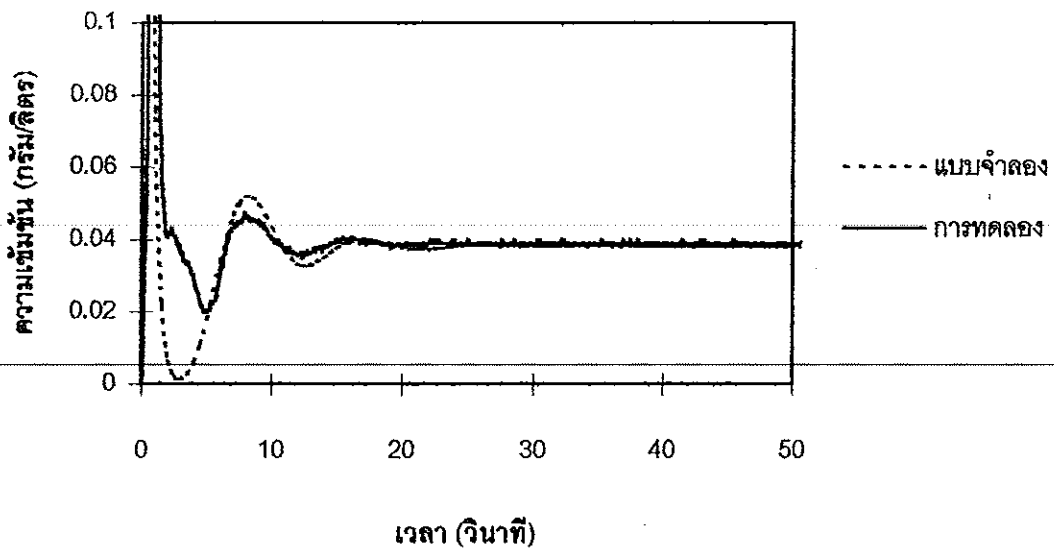
ภาพที่ 4.35 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1
 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m เมื่อกำหนดให้ $N1=2, N2=5, N3=2, N4=5$ $Q = 3.0$
 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



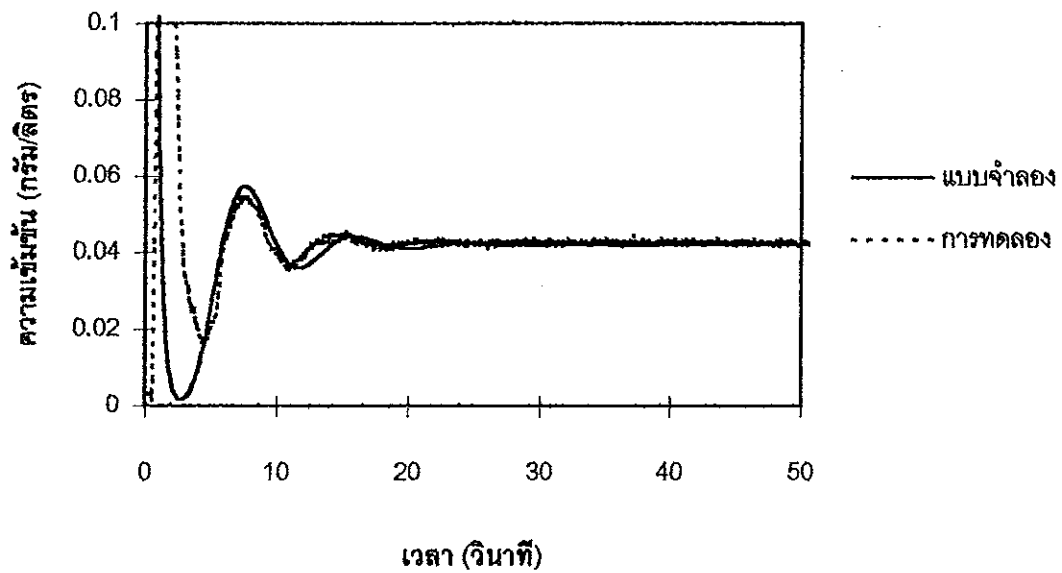
ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโหนดกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1
 ในแกนแกน 0.1% อัตราการให้อากาศ 0.2 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4$
 $Q = 2.2$ อุณหภูมิที่เมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.37 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโหนดกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1
 ในแกนแกน 0.1% อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4$
 $Q = 2.5$ อุณหภูมิที่เมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.38 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1
 ในแขนแขน 0.1% อัตราการให้อากาศ 0.64 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4$
 $Q = 2.7$ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.39 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายของโซนกับการทดลองในตำแหน่งที่ 1
 ในแขนแขน 0.1% อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1=2, N_2=4, N_3=2, N_4=4$ $Q = 2.9$
 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

4.2 การเปรียบเทียบผลการซิมิวเลตแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

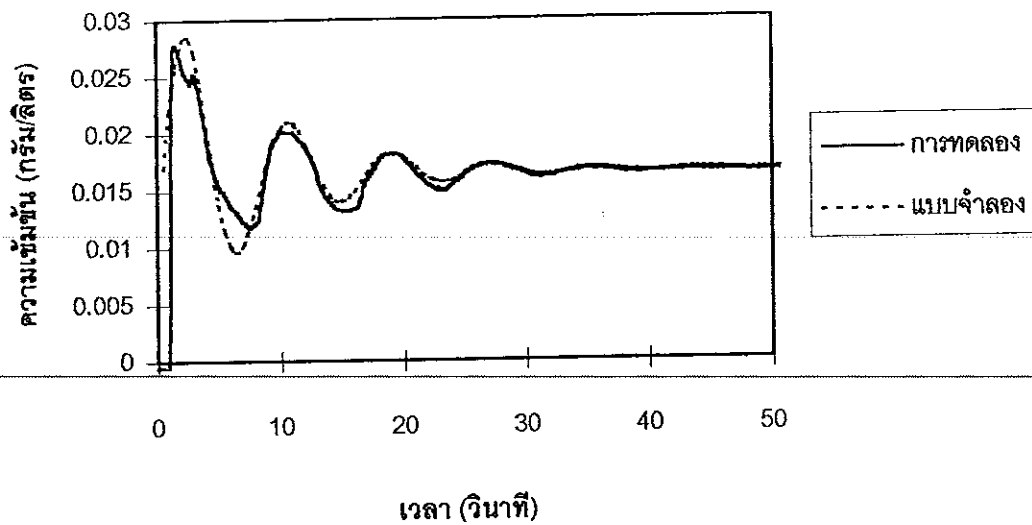
จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการซิมิวเลตแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลที่ได้จากการตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำและสารละลายแซนแทนที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ผลการซิมิวเลตที่ได้มีความสอดคล้องกับกราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ในน้ำและในสารละลายแซนแทนทุกระดับความเข้มข้น รวมทั้งที่ระดับความเข้มข้นของแซนแทนร้อยละ 0.25 และ 0.50 โดยน้ำหนัก ซึ่งแบบจำลองโครงข่ายของไซนที่พัฒนาโดยยุพดี สันดีวุฒน์ (2538) ไม่สามารถให้ผลการซิมิวเลตที่สอดคล้องได้ แต่การซิมิวเลตนี้ก็ไม่ได้ให้ผลการซิมิวเลตที่ถูกต้องนัก เพียงแต่อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงเท่านั้น เพราะเป็นเพียงการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยประมาณเพื่อให้ได้กราฟการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองเท่านั้น ถ้าจะทำการซิมิวเลตให้ได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำแล้วควรพัฒนาโปรแกรม model fitting สำหรับการซิมิวเลชัน ที่จะต้องนำ optimization technique เข้ามาใช้ ซึ่งจะมีการพัฒนาต่อไป

ภาพที่ 4.40 - 4.51 แสดงผลการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการซิมิวเลตกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในน้ำที่อัตราการให้อากาศ 0.2, 0.46 และ 0.64 vvm ตามลำดับ พบว่าในทุกระดับอัตราการให้อากาศ การผสมในแนวนั้นมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงแทนค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนมวลในแนวนั้นมี (K) ด้วย 1 และจำนวนเซลล์รวมที่ใช้ในการซิมิวเลตลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น แสดงว่าระดับการผสมไม่แตกต่างกันมากนัก

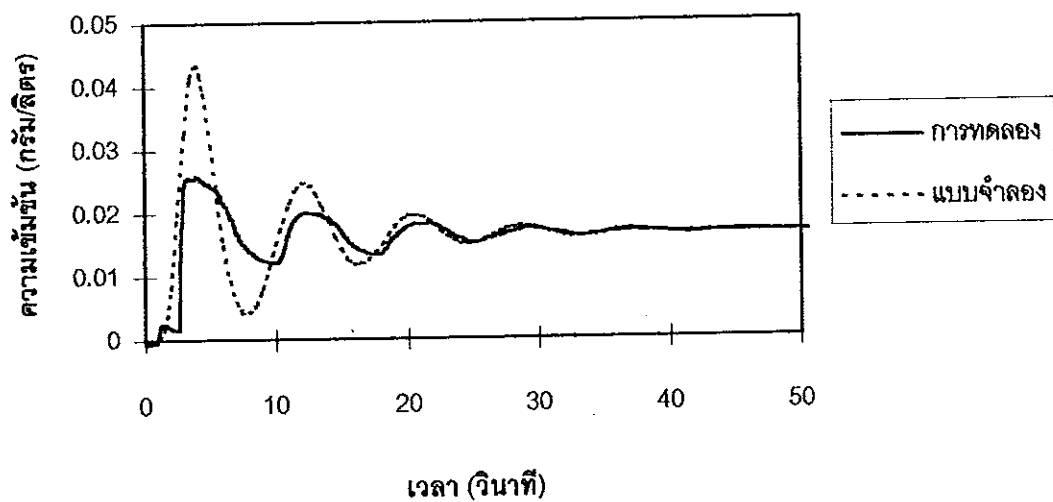
ภาพที่ 4.52 - 4.63 แสดงผลการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการซิมิวเลตกับข้อมูลการตอบสนองของเทรซเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.2, 0.46 และ 0.64 vvm พบว่าการผสมในแนวนั้นมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จึงกำหนดค่า K เท่ากับ 1 และพบว่า จำนวนเซลล์รวมที่ใช้ลดลงเมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่า จำนวนเซลล์รวมที่ใช้ในการซิมิวเลตมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนเซลล์รวมของน้ำ ซึ่งแสดงว่า สารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักมีระดับการผสมดีกว่าน้ำ และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าน้ำ

ภาพที่ 4.64 - 4.69 แสดงผลการเปรียบเทียบการซึมวิเวตแบบจำลองกับข้อมูลการตอบสนองของเทรเซอร์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.46 และ 0.64 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าลักษณะกราฟที่เกิดแตกต่างจากที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก การกำหนดให้ค่า K เป็น 1 ไม่สามารถให้ผลการซึมวิเวตที่สอดคล้องกับการทดลองดังกล่าวได้ ซึ่งพบว่าค่า K ที่เหมาะสมคือ 0.007 และ 0.01 สำหรับอัตราการให้อากาศ 0.46 และ 0.64 ตามลำดับ

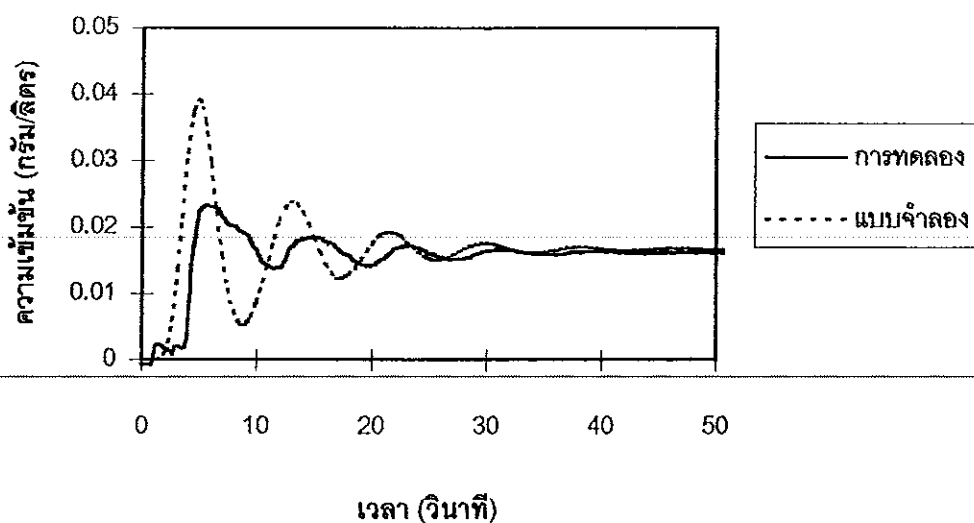
จากผลการเปรียบเทียบผลการซึมวิเวตแบบจำลองกับข้อมูลการตอบสนองของเทรเซอร์ที่ได้จากการทดลอง พบว่า การผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก ซึ่งมีทิศทางการไหลที่แน่นอน สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองโครงข่ายของโซนที่มีการแบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ โดยแต่ละเซลล์นั้นเกิดการผสมที่สมบูรณ์ การกำหนดจำนวนเซลล์เป็นการกำหนดระดับของการผสม ถ้าจำนวนเซลล์ในสไลด์เป็น 1 แสดงว่าการผสมในส่วนนั้นเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ถ้าจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นแสดงว่าระดับการผสมลดลง แบบจำลองโครงข่ายของโซนที่มีการกำหนดให้แวนรัศมีประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว แสดงว่าได้กำหนดให้การผสมในแวนรัศมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถให้ผลการซึมวิเวตสอดคล้องกับการผสมในน้ำ และสารละลายแซนแทนที่มีความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก) แต่ไม่สามารถให้ผลการซึมวิเวตที่สอดคล้องกับการผสมในสารละลายแซนแทนที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นได้ เนื่องจากพบว่าการผสมในแวนรัศมีเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังแบบจำลองที่จะสามารถจำลองการผสมดังกล่าวได้ต้องเป็นแบบจำลองที่สามารถกำหนดระดับการผสมได้ 2 ทิศทาง คือ การผสมในแนวแกนและการผสมในแวนรัศมี ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนมวลในแวนรัศมีเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดระดับการผสมในแวนรัศมี และจำนวนเซลล์ในแต่ละโซนเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดการผสมในแนวแกน สามารถให้ผลการซึมวิเวตได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการตอบสนองของเทรเซอร์ในสารละลายแซนแทนที่มีระดับความเข้มข้นสูงได้



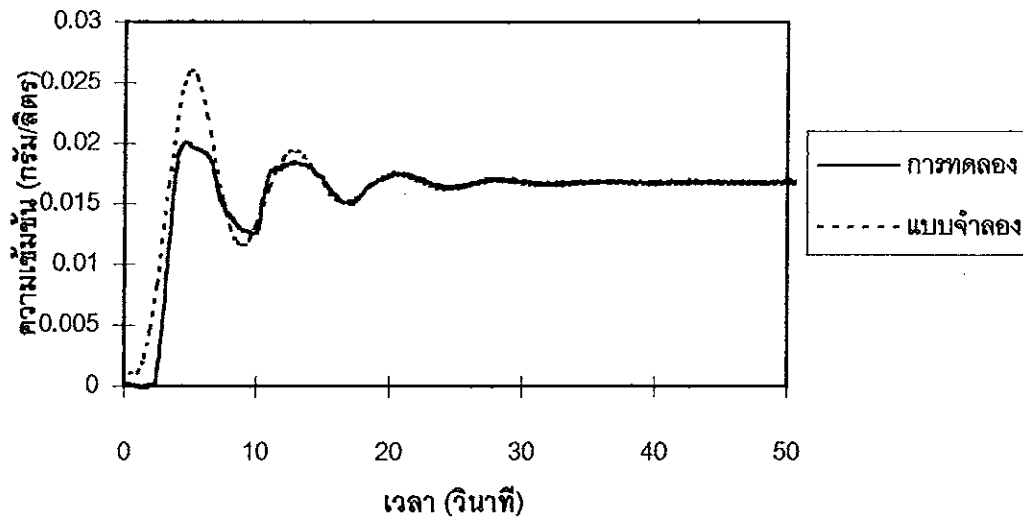
ภาพที่ 4.40 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ
อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 10$, $N_3 = 2$, $N_4 = 10$, ค่า $K = 1$
ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที



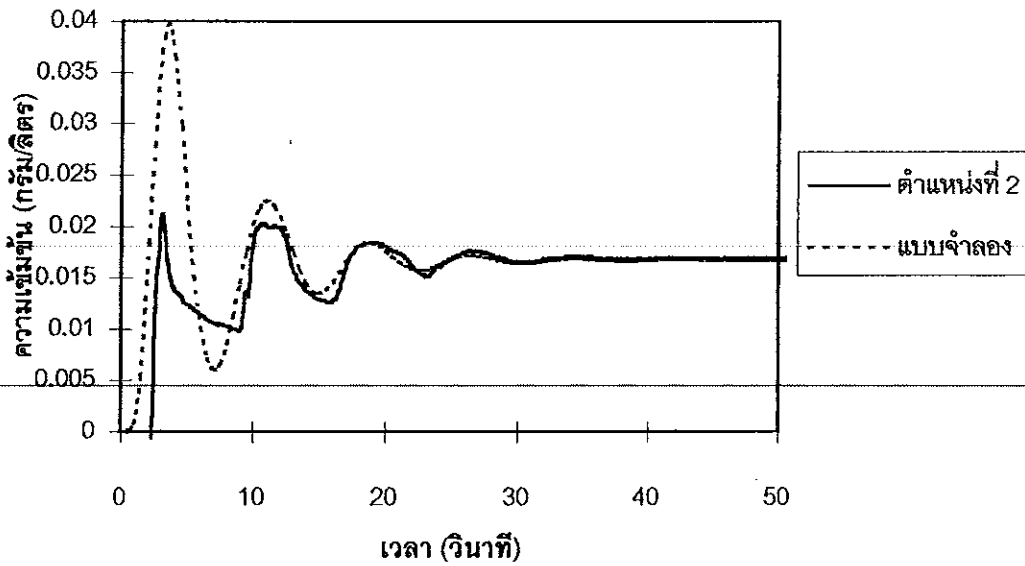
ภาพที่ 4.41 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2
ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 10$, $N_3 = 2$, $N_4 = 10$,
ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที



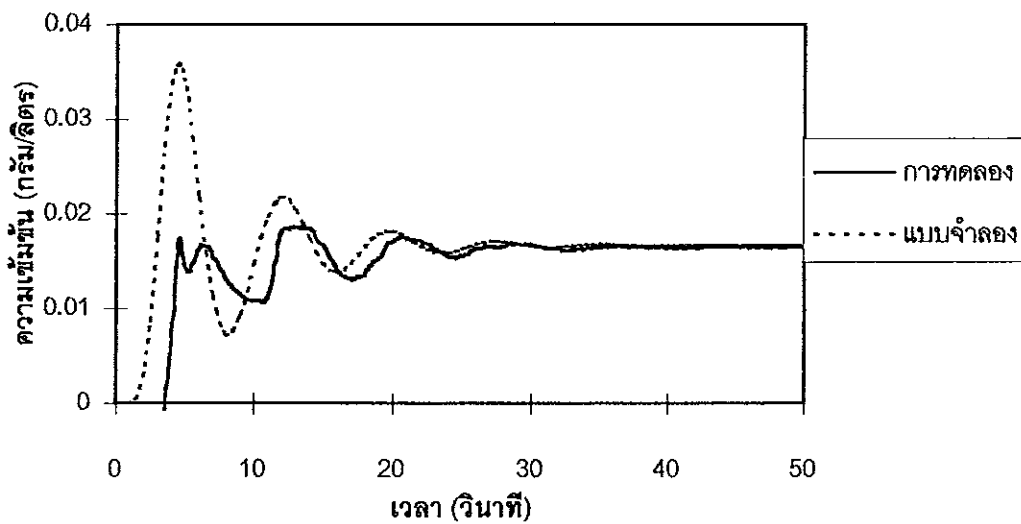
ภาพที่ 4.42 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ในน้ำ
อัตราการให้อากาศ 0.2 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 10$, $N_3 = 2$, $N_4 = 10$,
ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที



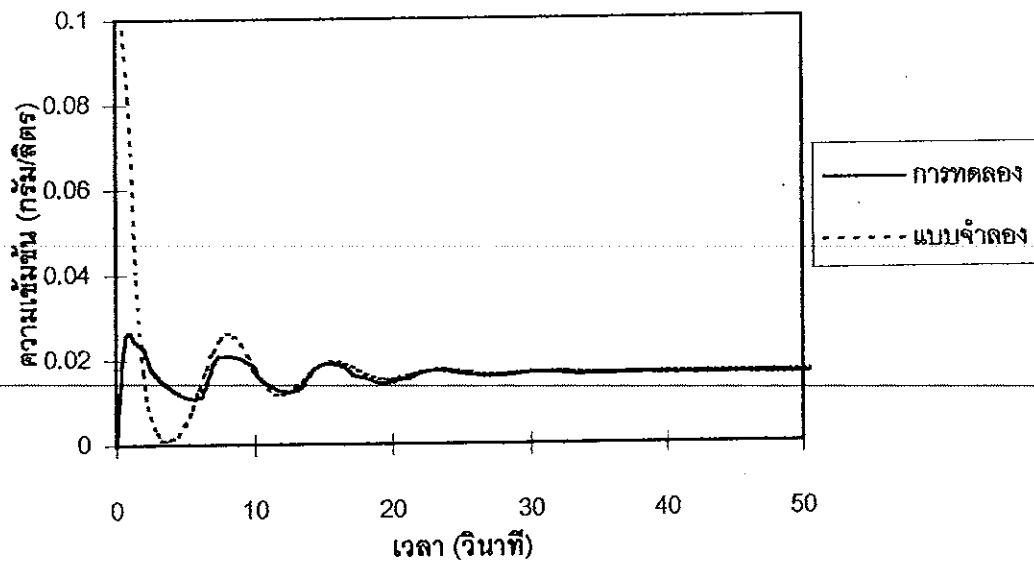
ภาพที่ 4.43 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ
อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 8$, $N_3 = 2$, $N_4 = 8$
ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



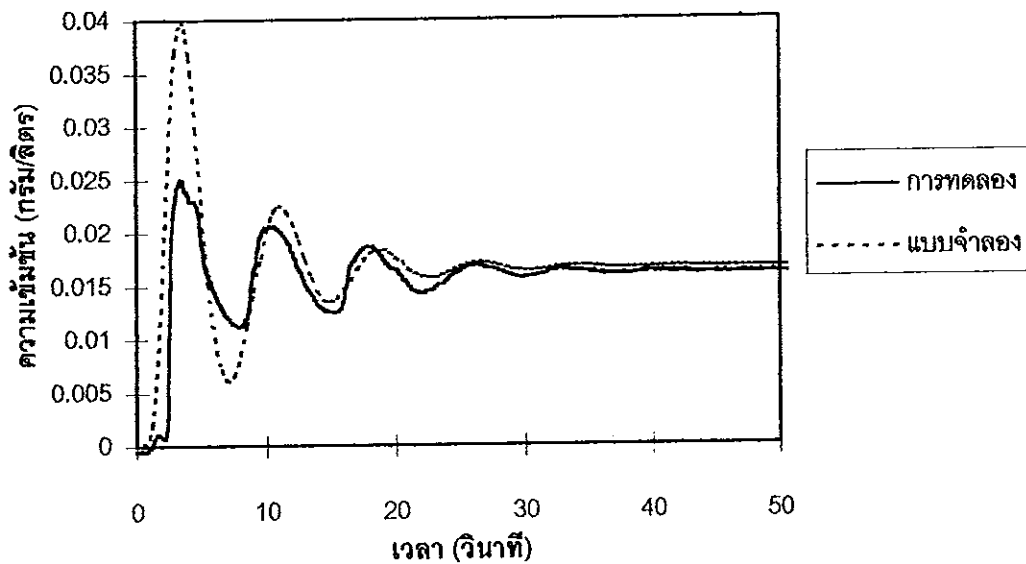
ภาพที่ 4.44 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ในน้ำ
อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 8$, $N_3 = 2$, $N_4 = 8$
ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



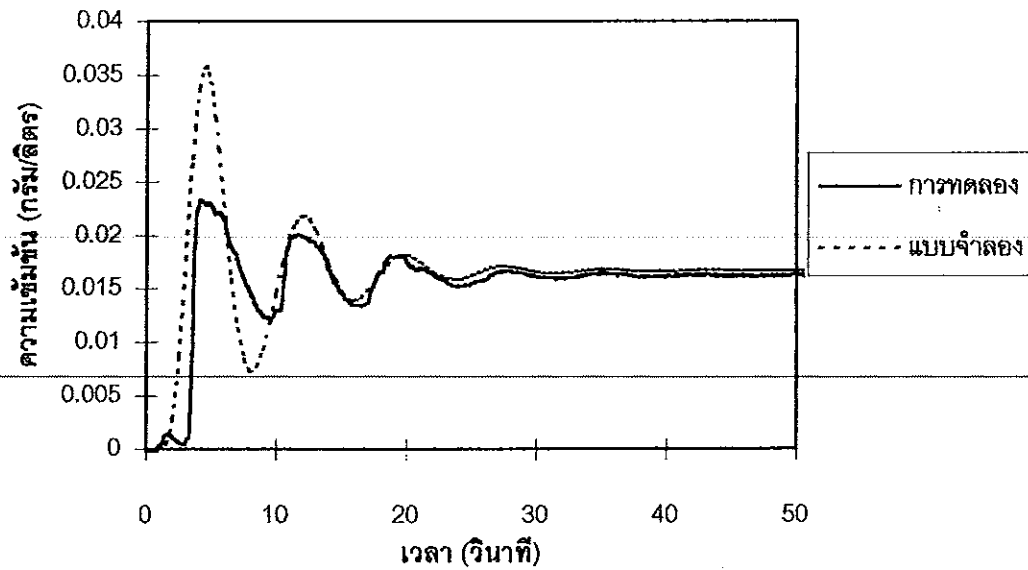
ภาพที่ 4.45 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ในน้ำ
อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 8$, $N_3 = 2$, $N_4 = 8$
ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



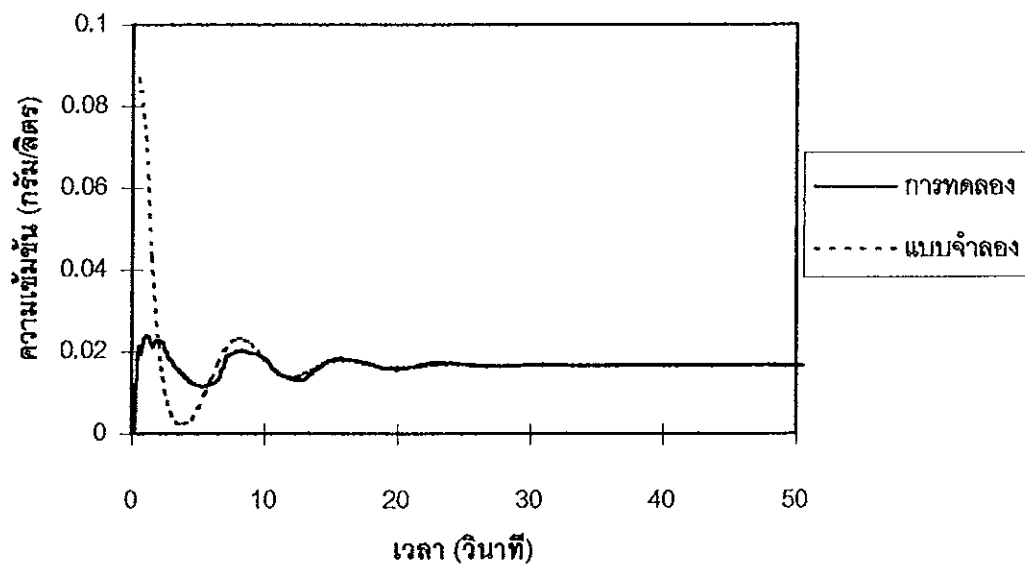
ภาพที่ 4.46 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1
 ในน้ำ อัตรากาให้อากาศ 0.64 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 8$, $N_3 = 2$, $N_4 = 8$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



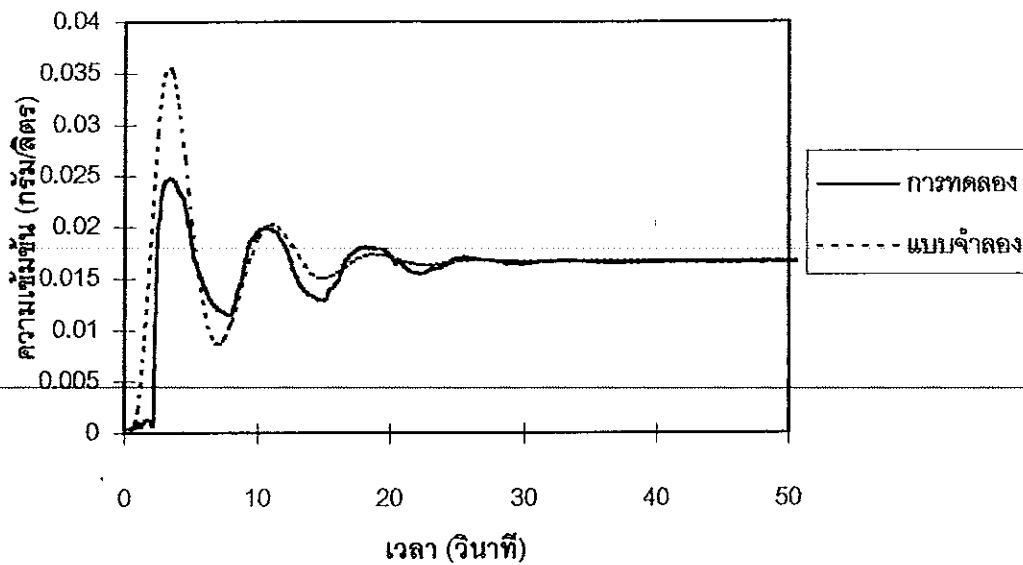
ภาพที่ 4.47 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2
 ในน้ำ อัตรากาให้อากาศ 0.64 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 8$, $N_3 = 2$, $N_4 = 8$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



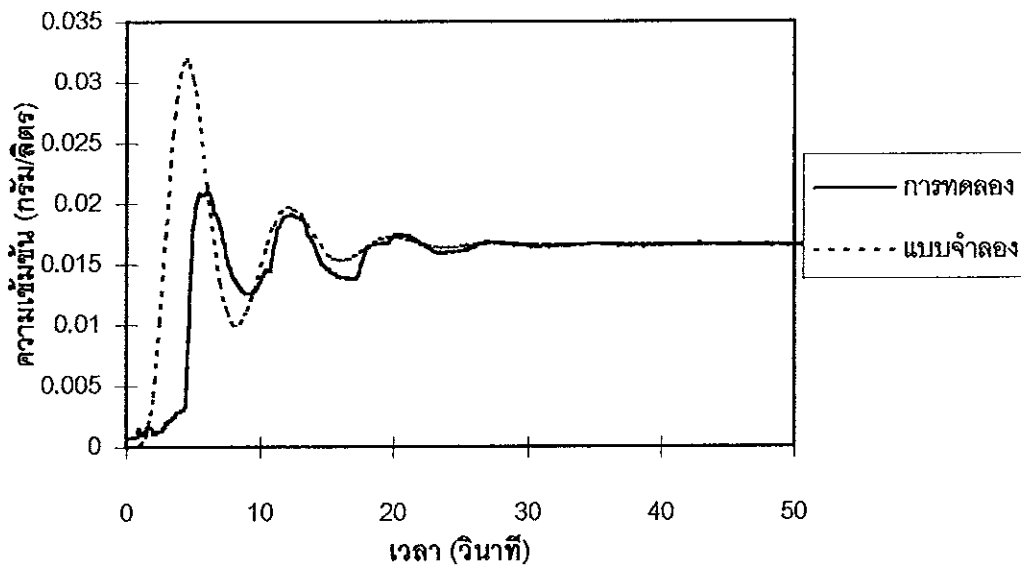
ภาพที่ 4.48 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3
 ในน้ำ อัตราการให้อากาศ 0.64 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2, N_2 = 8, N_3 = 2, N_4 = 8$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



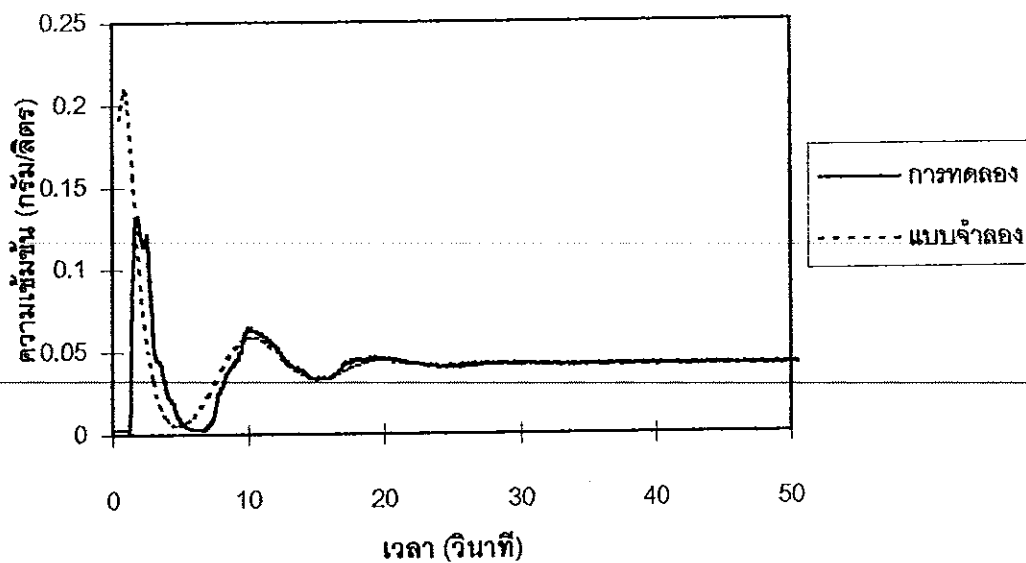
ภาพที่ 4.49 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ในน้ำ
 อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2, N_2 = 6, N_3 = 2, N_4 = 6$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



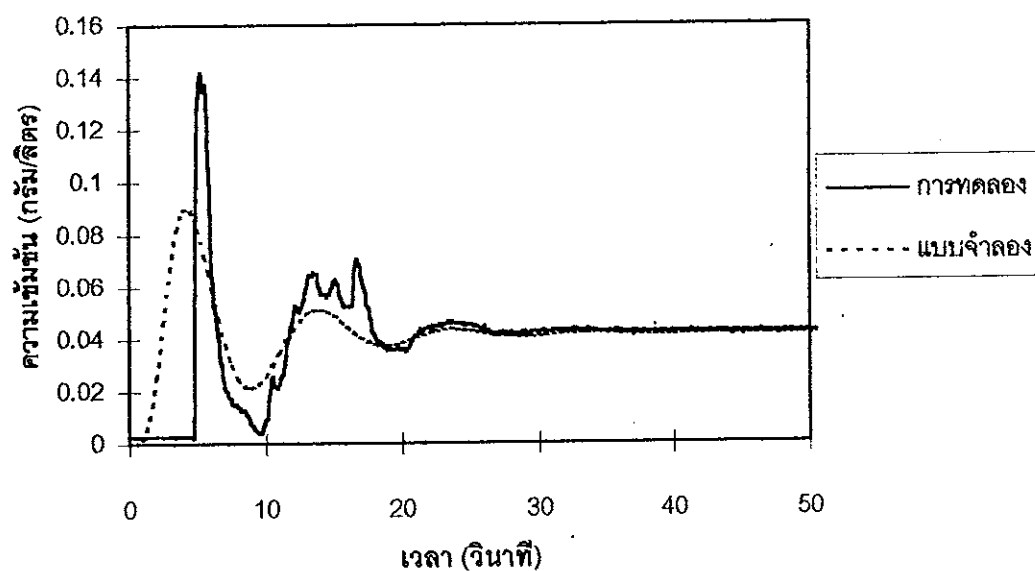
ภาพที่ 4.50 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ในน้ำ
 อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 6$, $N_3 = 2$, $N_4 = 6$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



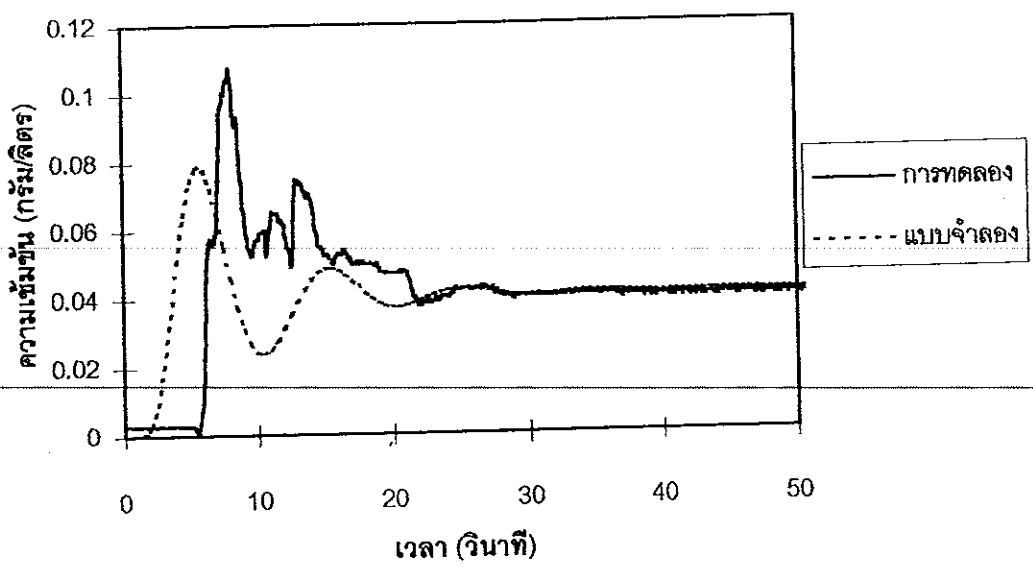
ภาพที่ 4.51 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ในน้ำ
 อัตราการให้อากาศ 1.0 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 6$, $N_3 = 2$, $N_4 = 6$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 เมตรต่อวินาที



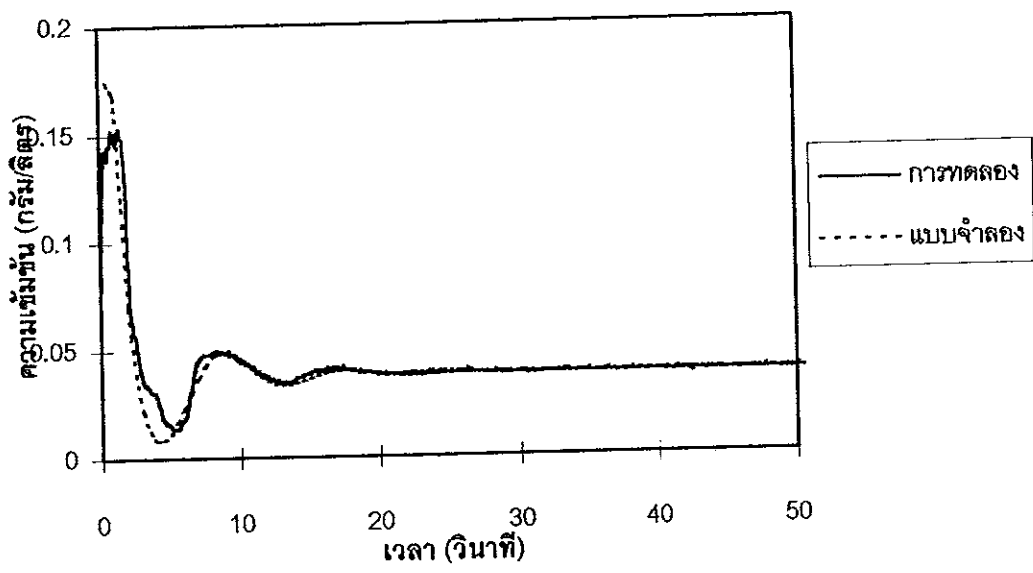
ภาพที่ 4.52 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 1 ใน 0.1 % แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 6$, $N_3 = 2$, $N_4 = 6$ ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 เมตรต่อวินาที



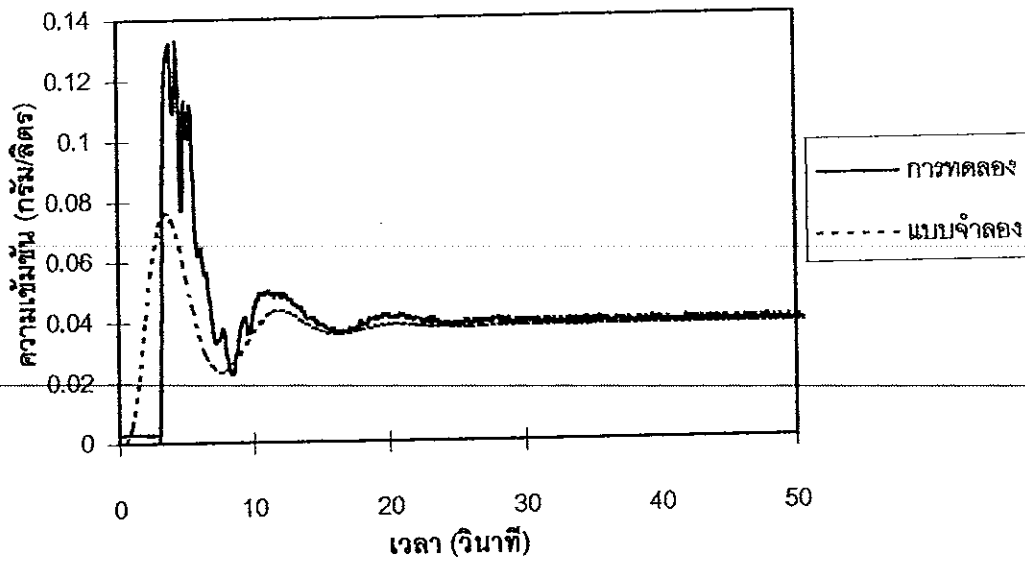
ภาพที่ 4.53 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 2 ใน 0.1 % แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.2 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 6$, $N_3 = 2$, $N_4 = 6$ ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 เมตรต่อวินาที



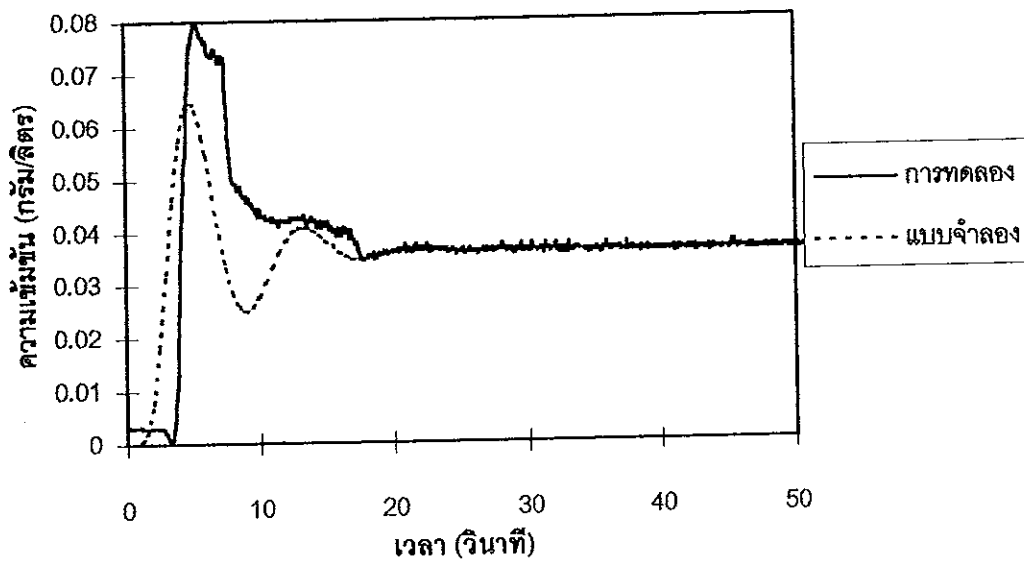
ภาพที่ 4.54 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองตำแหน่งที่ 3 ใน 0.1 % แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.2 w/m เมื่อกำหนดให้ $N1 = 2, N2 = 6, N3 = 2, N4 = 6$ ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 เมตรต่อวินาที



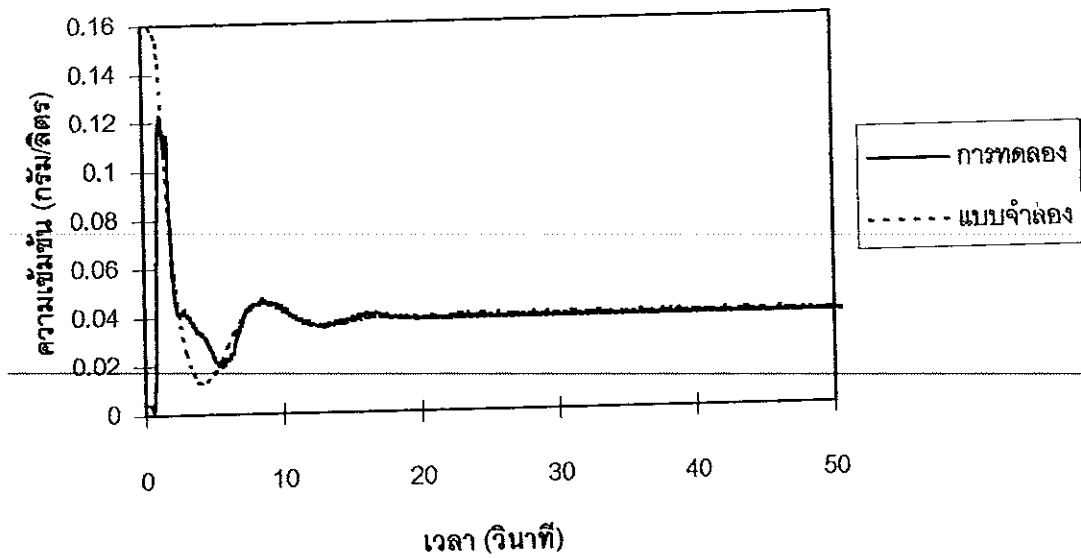
ภาพที่ 4.55 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ใน 0.1 % แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m เมื่อกำหนดให้ $N1 = 2, N2 = 5, N3 = 2, N4 = 5$ ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที



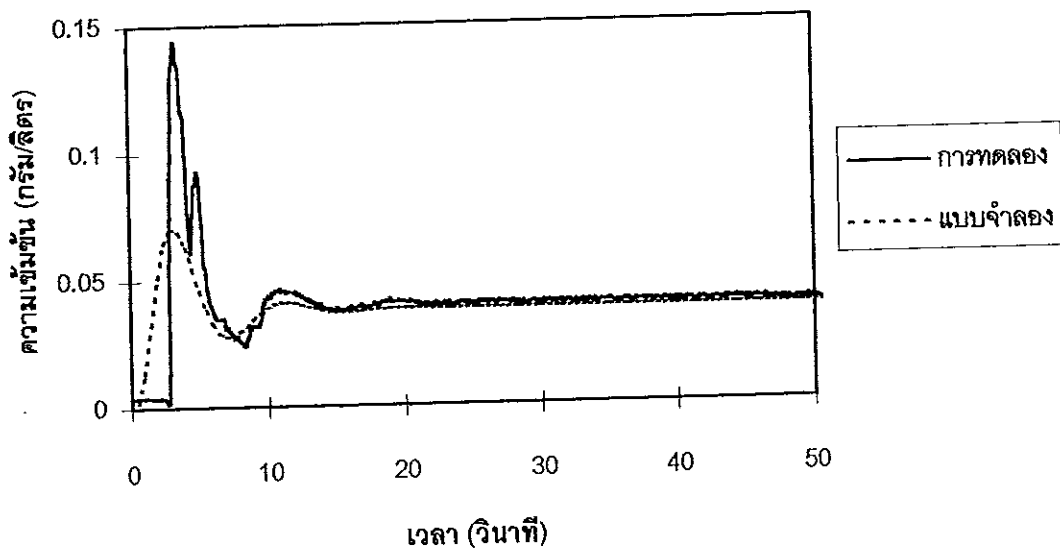
ภาพที่ 4.56 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 2 ใน 0.1 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 5$, $N_3 = 2$, $N_4 = 5$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที



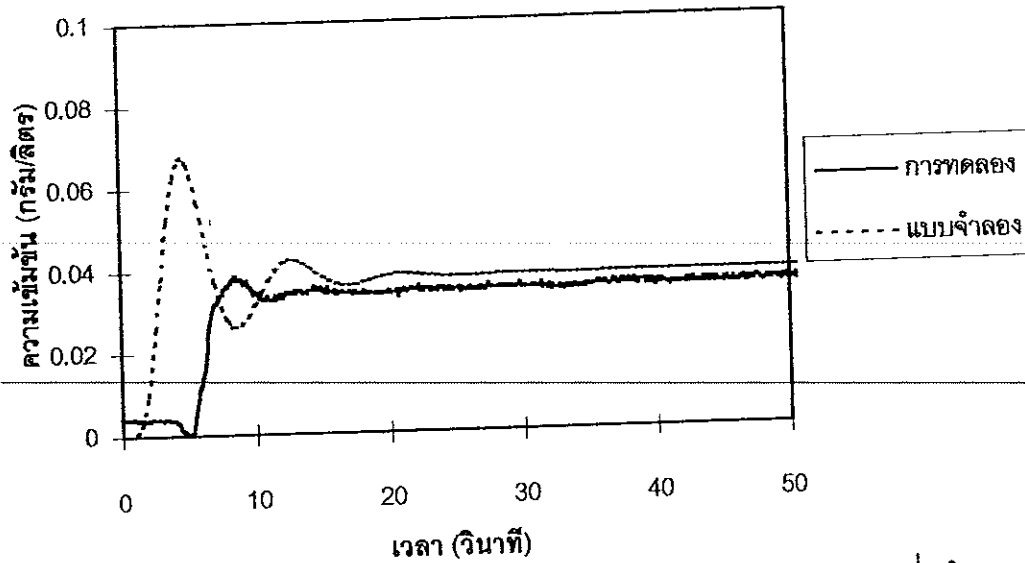
ภาพที่ 4.57 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 3 ใน 0.1 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.46 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 5$, $N_3 = 2$, $N_4 = 5$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที



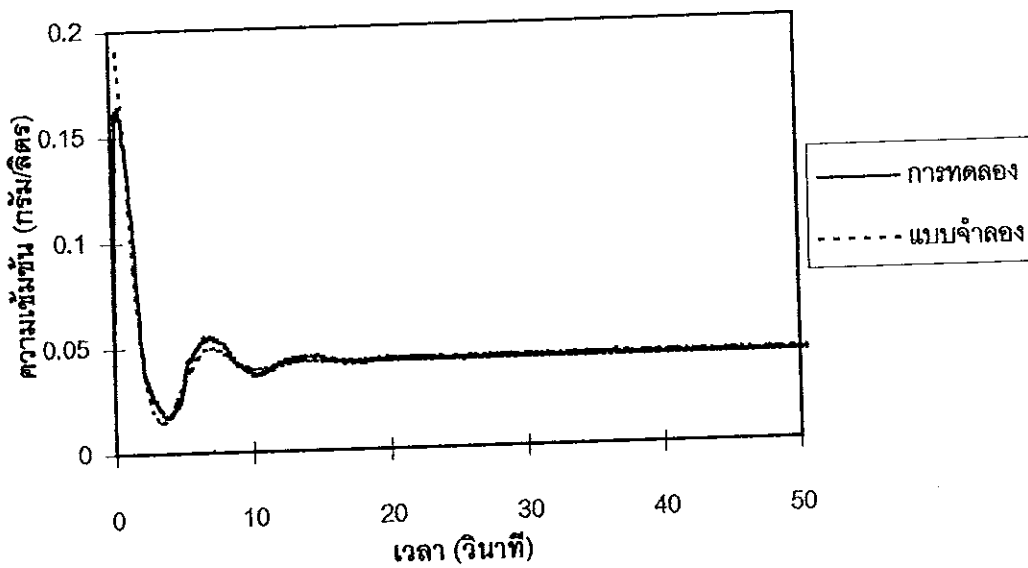
ภาพที่ 4.58 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ใน 0.1 % แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2, N_2 = 5, N_3 = 2, N_4 = 5$ ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.23 เมตรต่อวินาที



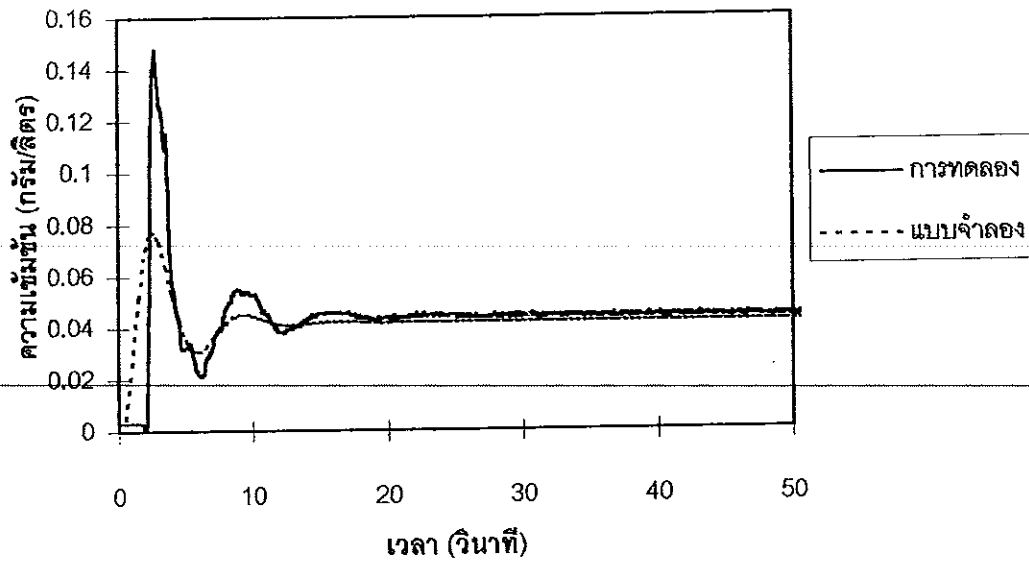
ภาพที่ 4.59 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 2 ใน 0.1 % แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2, N_2 = 5, N_3 = 2, N_4 = 5$ ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.23 เมตรต่อวินาที



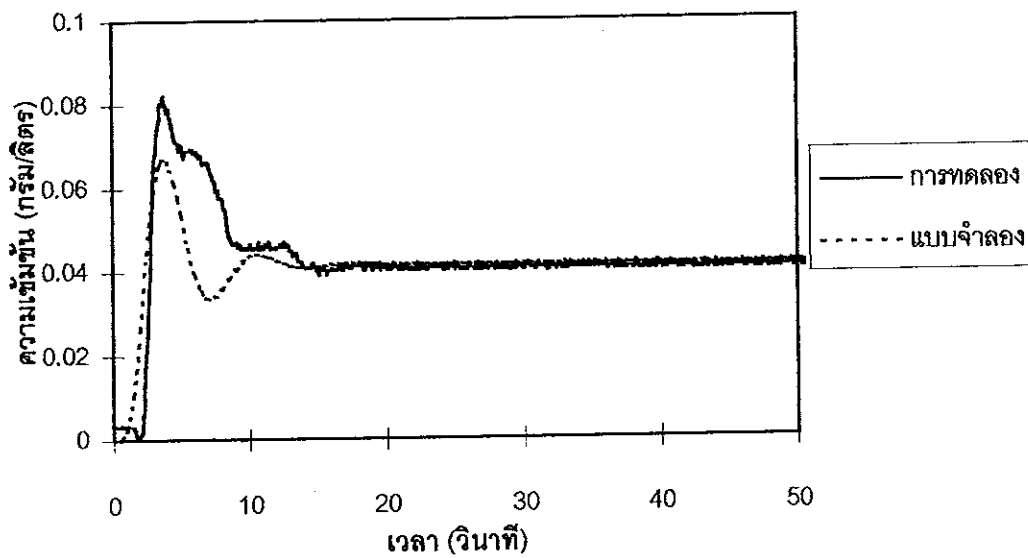
ภาพที่ 4.60 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 3 ใน 0.1 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 5$, $N_3 = 2$, $N_4 = 5$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.23 เมตรต่อวินาที



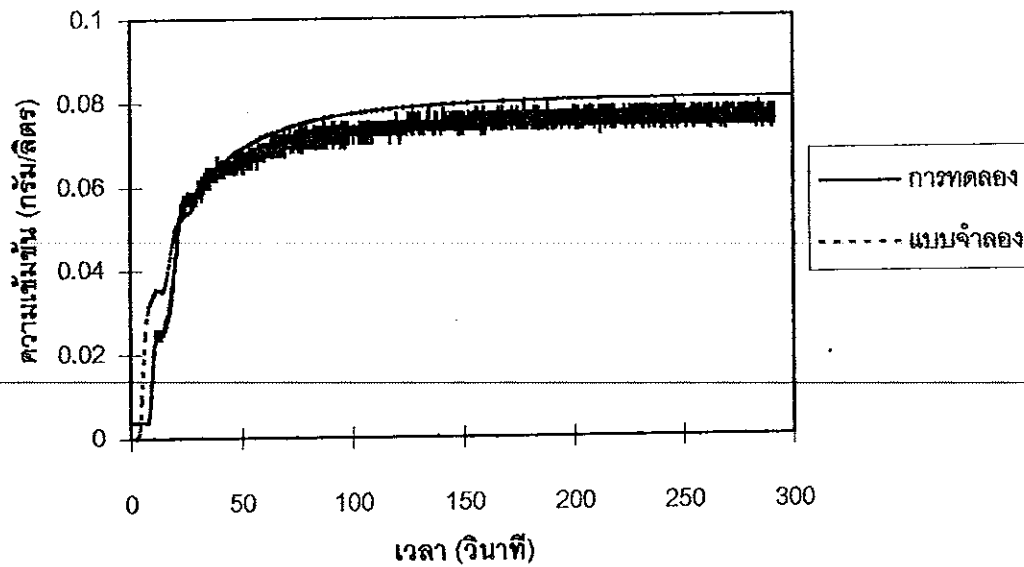
ภาพที่ 4.61 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ใน 0.1 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 4$, $N_3 = 2$, $N_4 = 4$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 เมตรต่อวินาที



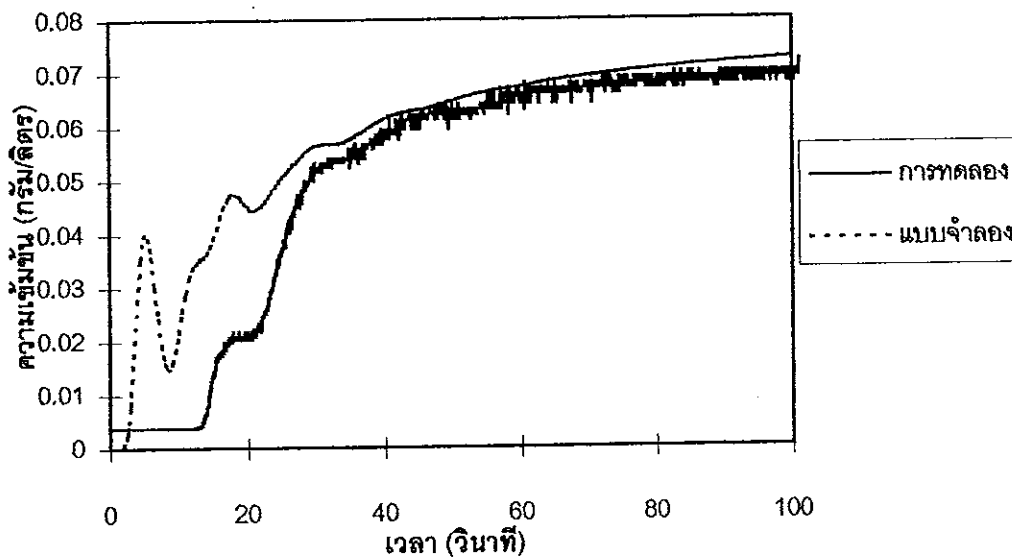
ภาพที่ 4.62 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 2 ใน 0.1 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 4$, $N_3 = 2$, $N_4 = 4$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 เมตรต่อวินาที



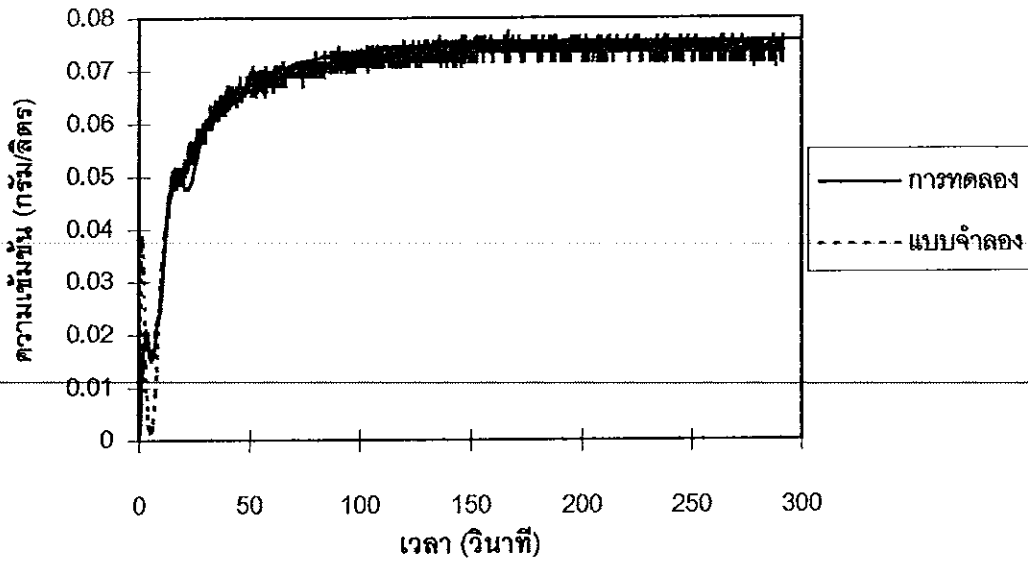
ภาพที่ 4.63 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 3 ใน 0.1 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 4$, $N_3 = 2$, $N_4 = 4$
 ค่า $K = 1$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 เมตรต่อวินาที



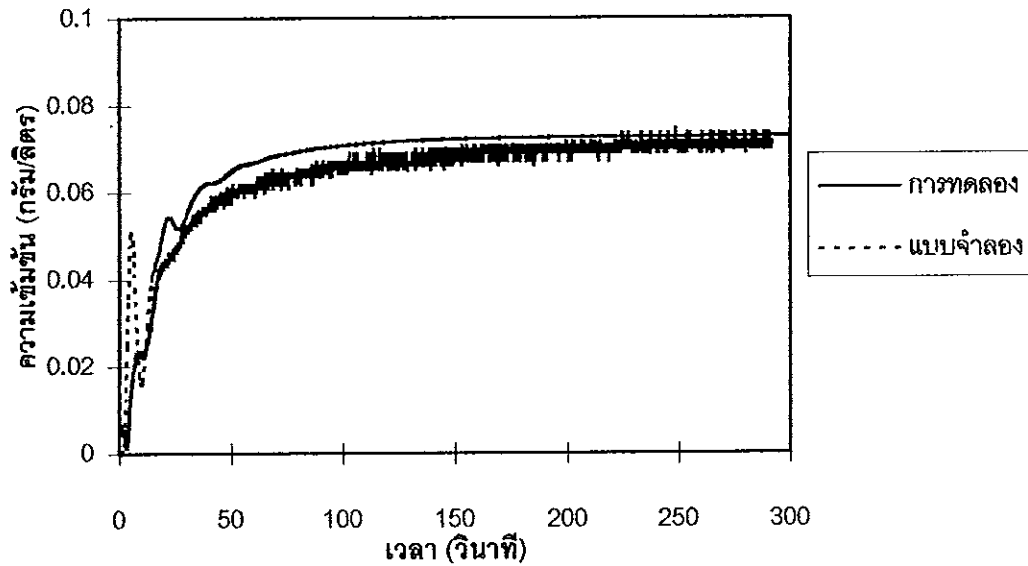
ภาพที่ 4.64 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ใน 0.25 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 10$, $N_3 = 2$, $N_4 = 10$
 ค่า $K = 0.007$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 เมตรต่อวินาที



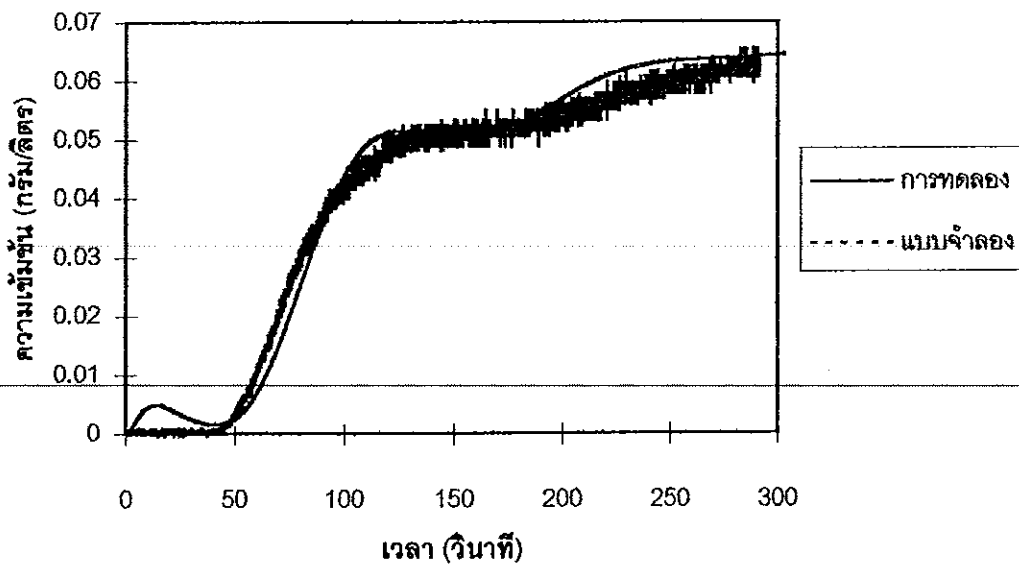
ภาพที่ 4.65 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 2 ใน 0.25 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.46 w/m เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 10$, $N_3 = 2$, $N_4 = 10$
 ค่า $K = 0.007$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 เมตรต่อวินาที



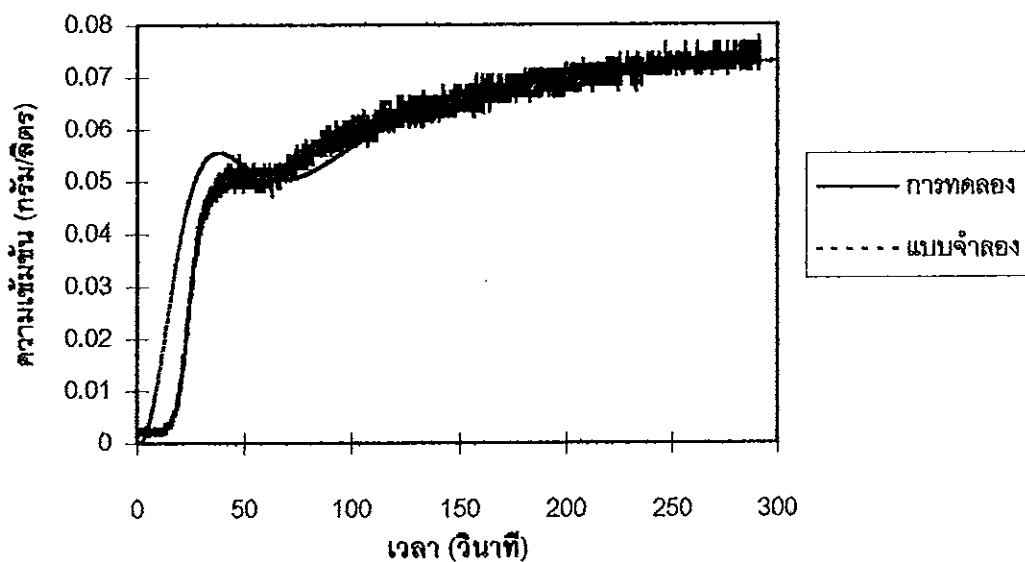
ภาพที่ 4.66 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ใน 0.25 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 8$, $N_3 = 2$, $N_4 = 8$
 ค่า $K = 0.01$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.15 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4.67 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 2 ใน 0.25 %
 แชนแนล อัตราการให้อากาศ 0.64 vvm เมื่อกำหนดให้ $N_1 = 2$, $N_2 = 8$, $N_3 = 2$, $N_4 = 8$
 ค่า $K = 0.01$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.15 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4.68 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ใน 0.5 %
 แชนแนล อัตรารังสีให้อากาศ 0.64 w/m เมื่อกำหนดให้ $N1 = 1, N2 = 6, N3 = 1, N4 = 6$
 ค่า $K = 0.007$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.018 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4.69 ผลการเทียบเคียงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองในตำแหน่งที่ 1 ใน 0.5 %
 แชนแนล อัตรารังสีให้อากาศ 1.0 w/m เมื่อกำหนดให้ $N1 = 1, N2 = 2, N3 = 1, N4 = 2$
 ค่า $K = 0.01$ ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.02 เมตรต่อวินาที

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ส่วนที่หนึ่ง การพัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลการตอบสนองของเทรเซอร์

สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับเทคนิคการเก็บและบันทึกข้อมูลในการศึกษาเกี่ยวกับการติดตามการตอบสนองของเทรเซอร์ ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่สำคัญในการศึกษาการผสมโดยวิธีการติดตามการตอบสนองของเทรเซอร์ ในถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่เกิดขึ้นในงานวิจัยของยุพดี สันติวัฒน์ (2538) เนื่องจากในการวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรเซอร์ด้วยเครื่องวัดพีเอชที่มีอยู่ต้องจดบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดพีเอช แล้วป้อนข้อมูลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ทางแป้นพิมพ์ ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ไม่สามารถบันทึกข้อมูลได้ทันตามเวลาที่ต้องการ เสียเวลาในการป้อนข้อมูลจำนวนมาก และไม่สามารถวัดพีเอชได้หลายตำแหน่งในเวลาเดียวกัน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้พัฒนาเครื่องวัดพีเอชที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะสามารถรับและบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของพีเอชได้ โดยอาศัยตัวแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D card) เป็นตัวกลางในการรับสัญญาณจากเครื่องวัดพีเอชและส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นตัวควบคุมการรับและบันทึกข้อมูล

จากผลการพัฒนาดังกล่าวคาดว่าจะประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยที่จำเป็นต้องติดตามการเปลี่ยนแปลงของพีเอชที่ต้องการความสะดวกและรวดเร็วและต้องกระทำในหลาย ๆ จุดพร้อมกัน และสามารถเป็นแบบอย่างในการอินเทอร์เฟสเครื่องมือวัดปริมาณทางกายภาพชนิดอื่นเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อความสะดวกและรวดเร็ว นอกจากนี้ข้อมูลที่บันทึกได้ยังสามารถเก็บในรูปของไฟล์ข้อมูลที่สามารถนำไปประมวลผลได้โดยไม่ต้องป้อนข้อมูลใหม่

ส่วนที่สอง การศึกษารูปแบบการไหลและความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว

ผลการศึกษารูปแบบการไหลในน้ำพบว่า ความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศสูงขึ้น ฟองอากาศส่วนใหญ่จะออกจากถังหมักที่ส่วนบนของถัง มีจำนวนไม่มากที่ไหลเข้าสู่ดาวน์คัมเมอร์ ระดับความลึกของฟองอากาศที่ปรากฏอยู่ในดาวน์คัมเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการให้อากาศสูงขึ้น ไม่ปรากฏบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งในทุกอัตราการให้อากาศ

การศึกษารูปแบบการไหลในสารละลายแซนแทนพบว่า ความเร็วของสารละลายแซนแทนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากตัวให้อากาศมีขนาดใหญ่กว่าในน้ำ ฟองอากาศเหล่านี้จะแตกตัวที่ส่วนบนของถังหมัก กลายเป็นฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วถัง ฟองอากาศขนาดเล็กเหล่านี้จะคงตัวอยู่ได้นาน ไม่มีการแตกตัวและรวมตัวกับฟองอากาศอื่น ยิ่งความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น ความหนาแน่นของจำนวนฟองอากาศขนาดเล็กยิ่งมากขึ้น การเคลื่อนที่ของของเหลวในไรเซอร์มีความปั่นป่วนมากกว่าในดาวน์คัมเมอร์ เนื่องจากมีฟองอากาศขนาดใหญ่เคลื่อนที่ผ่านตลอดเวลา ในขณะที่ในดาวน์คัมเมอร์ประกอบด้วยฟองอากาศขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ลงอย่างเรียบๆ เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก สังเกตเห็นความแตกต่างของความเร็วในแนวรัศมีเกิดขึ้น โดยที่บริเวณส่วนกลางระหว่างผนังทั้งสองของดาวน์คัมเมอร์จะมีความเร็วสูงและความเร็วลดลงในบริเวณใกล้ผนัง และมีส่วนที่ของเหลวอยู่นิ่งที่ผนังของดาวน์คัมเมอร์ เมื่อระดับความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก เกิดบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งมากขึ้นในดาวน์คัมเมอร์ ทำให้เกิดแรงต้านทานการไหลเกิดขึ้นในดาวน์คัมเมอร์ ทำให้ลักษณะการไหลภายในไรเซอร์มีลักษณะคล้ายการไหลในถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์ เกิดการไหลวนกลับของของเหลวภายในไรเซอร์เอง ทำให้ในส่วนไรเซอร์มีความปั่นป่วนมากขึ้น

ส่วนที่สาม การศึกษาลักษณะการผสมและเวลาในการผสม

การศึกษาลักษณะการผสมและเวลาในการผสม โดยวิธีการติดตามการตบสของของเทรซเซอร์ด้วยเทคนิคการเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้น พบว่ามีลักษณะการผสมเกิดขึ้น 2 แบบ คือ แบบที่หนึ่ง เกิดขึ้นในการผสมในน้ำและในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1

โดยน้ำหนัก กราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นพีคหลาย ๆ พีค โดยความสูงของพีคค่อย ๆ ลดลงจนเข้าสู่ค่าคงที่ อันเกิดจากการที่เทรซเซอร์ไหลวนไปกับการไหลวนของของเหลวและมีความเข้มข้นลดลงในแต่ละรอบของการไหลวน ลักษณะการผสมแบบที่ 2 เกิดขึ้นในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก กราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้ายโดยไม่มีลักษณะของพีคเกิดขึ้น การผสมแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการผสมในแนวนอนมีเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เนื่องจากสังเกตเห็นบริเวณที่ของเหลวอยู่หนึ่งที่บริเวณผนังของดาวนัมเมอร์และส่วนล่างของโรเตอร์ซึ่งเป็นบริเวณที่ของเหลวจากดาวนัมเมอร์วนเข้าสู่โรเตอร์ เมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการผสมพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนร้อยละ 0 (น้ำ) และ 0.1 โดยน้ำหนัก เวลาในการผสมลดลงเมื่ออัตราการให้อากาศสูงขึ้น และเป็นที่น่าสังเกตว่า ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าน้ำ ทั้งที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลวน้อยกว่า

ส่วนที่สี่ การพัฒนาแบบจำลองการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก

ในขั้นแรกได้ทำการศึกษาแบบจำลองที่ได้มีการศึกษามาก่อนแล้ว โดยศึกษาแบบจำลองของ Merchuk และ Yunger (1990) ซึ่งได้แบ่งส่วนของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีการผสมที่สมบูรณ์ประกอบด้วยส่วนบนของถังที่มีการแตกตัวของฟองอากาศ และส่วนที่สองเป็นส่วนที่มีการผสมแบบปลัก ประกอบด้วยส่วนดาวนัมเมอร์และส่วนโรเตอร์ ถึงแม้จะมีการพิสูจน์แล้วว่า แบบจำลองดังกล่าวนี้สามารถหามิวเลตการผลิตในกระบวนการผลิตโปรตีนเซลล์เดี่ยวได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่จะเห็นได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวมีข้อสมมติที่จำกัดเกินไป กล่าวคือ ลักษณะการผสมที่เกิดขึ้นภายในส่วนบนไม่ได้มีการผสมอย่างสมบูรณ์ตามแบบจำลองดังกล่าวเสนอ แต่มีการผสมในระดับที่จำกัดระดับหนึ่งในส่วนดาวนัมเมอร์และส่วนโรเตอร์ ที่กำหนดให้มีการผสมแบบปลักพบว่ามี การผสมแบบย้อนกลับเกิดขึ้นด้วย ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวไม่ได้กล่าวถึง

ต่อมาได้ทำการศึกษาแบบจำลองโครงข่ายของโซนที่พัฒนาโดย ยุพดี สันติวุฒน์ (2538) ซึ่งได้แบ่งส่วนต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนบน ส่วนดาวนัมเมอร์

ส่วนฐาน และส่วนไรเซอร์ แต่ละส่วนจะแบ่งออกเป็นเซลล์ย่อย ๆ แต่ละเซลล์จะกำหนดให้มีการผสมอย่างสมบูรณ์ ลักษณะการผสมในแต่ละส่วนจะถูกกำหนดด้วยจำนวนเซลล์ในส่วนนั้น ๆ ถ้าจำนวนเซลล์น้อยแสดงว่าส่วนนั้นมีการผสมเข้าใกล้การผสมสมบูรณ์ ถ้าจำนวนเซลล์มากแสดงว่าส่วนนั้นเข้าใกล้การผสมแบบปลัก ซึ่งผลการชิมิวเลตพบว่าแบบจำลองดังกล่าวใช้ได้กว้างขวางและมีความยืดหยุ่นกว่าแบบจำลองของ Merchuk และ Yunger (1990) แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองโครงข่ายของโชนยังไม่ได้เทียบเคียงกับข้อมูลการผสมที่ได้จากการทดลองจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการชิมิวเลตแบบจำลองดังกล่าวกับข้อมูลการผสมที่ได้จากการทดลองโดยวิธีการตอบสนองของเทรชเซอร์

จากผลการเทียบเคียงผลการชิมิวเลตแบบจำลองโครงข่ายของโชนกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่า แบบจำลองโครงข่ายของโชนสามารถให้ผลการชิมิวเลตที่สอดคล้องกับข้อมูลการผสมในน้ำและในสารละลายแซนแรนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีลักษณะการผสมที่ไม่ซับซ้อน แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนสูงขึ้นเป็นร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งกราฟการตอบสนองของเทรชเซอร์จากการทดลองเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการผสมในแนวนั้นมีเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถให้ผลการชิมิวเลตที่สอดคล้องกับกราฟการตอบสนองของเทรชเซอร์ในระดับความเข้มข้นดังกล่าวได้ เนื่องจากแบบจำลองกำหนดให้ในแนวนั้นมีประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว ซึ่งเป็นการกำหนดให้การผสมในแนวนั้นมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จึงเป็นข้อจำกัดของแบบจำลองดังกล่าว

เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การผสมที่กว้างขวางขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองขึ้นใหม่ โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์การไหลในแนวนั้นและระดับการผสมในแนวนั้น โดยแบ่งส่วนต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ออกเป็น 4 ส่วนตามแบบจำลองโครงข่ายของโชน แต่ละส่วนประกอบด้วยเซลล์เล็ก ๆ ที่มีการผสมที่สมบูรณ์ และได้มีการแบ่งส่วนต่าง ๆ ออกเป็น 3 ส่วนในแนวนั้น ซึ่งแต่ละส่วนมีความเร็วที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการสังเกตพบว่าความเร็วในแต่ละส่วนบนพื้นที่หน้าตัดเดียวกันมีความแตกต่างกัน โดยบริเวณติดผนังมีความเร็วช้ากว่าบริเวณตรงกลาง ดังนั้นในแนวนั้นของแต่ละส่วนจะประกอบด้วยเซลล์ย่อย 3 เซลล์ แล้วกำหนดให้ค่า K คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนมวลในแนวนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกระดับการผสมในแนวนั้น เพราะฉะนั้นแบบจำลอง

ดังกล่าวนี้จะสามารถกำหนดระดับการผสมได้ 2 ทิศทางคือ ค่า K กำหนดระดับการผสมในแนวรัศมี จำนวนเซลล์ในแนวแกนเป็นตัวกำหนดการผสมในแนวแกน

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถให้ผลการซิมิวเลตได้หลายกรณี เช่น กรณีที่ 1 การกำหนดให้ส่วนบนมีการผสมที่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้จำนวนเซลล์ในส่วนบนเป็น 1 และค่า K เป็น 1 และกำหนดให้ส่วนไรโซร์และดาวนคัมเมอร์มีการผสมแบบปลักและมีการผสมในแนวรัศมีที่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้จำนวนเซลล์มากขึ้นและค่า K เป็น 1 ซึ่งกรณีดังกล่าวนี้สอดคล้องกับข้อสมมติของแบบจำลองของ Merchuk และ Yunger (1990)

กรณีที่ 2 กำหนดให้การผสมในแนวรัศมีทุกส่วนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยการกำหนดค่า K ในทุกส่วนเท่ากับ 1 การผสมในส่วนบนเกิดขึ้นในระดับที่จำกัด โดยการกำหนดจำนวนเซลล์ในส่วนบนให้มากกว่า 1 และการผสมในไรโซร์และดาวนคัมเมอร์ผันแปรไปตามจำนวนเซลล์ ซึ่งกรณีดังกล่าวนี้สอดคล้องกับข้อสมมติของแบบจำลองโครงข่ายของไซนของยูพตี สันติคุณ (2538)

นอกจากนี้ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นยังสามารถให้ผลการซิมิวเลตได้อีกหลายกรณีเช่น กรณีที่การผสมในแนวรัศมีเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ โดยการกำหนดให้ค่า K น้อยลง และการกำหนดให้ความเร็วในบริเวณผนังเป็นศูนย์ในกรณีที่เกิดบริเวณของเหลวที่อยู่นิ่งเกิดขึ้น เป็นต้น

ขั้นตอนสุดท้าย ได้มีการเทียบเคียงผลการซิมิวเลตแบบจำลองกับผลการทดลองที่ได้จากวิธีการตอบสนองของเทรเซอร์ พบว่าผลการซิมิวเลตแบบจำลองให้ผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองทุกระดับความเข้มข้นของแซนแรน โดยที่ระดับความเข้มข้นของแซนแรนร้อยละ 0 และ 0.1 โดยน้ำหนัก กำหนดให้ค่า K เป็น 1 และที่ระดับความเข้มข้นของแซนแรนร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก กำหนดให้ค่า K น้อยกว่า 1 นั่นคือเกิดการผสมในแนวรัศมีที่ไม่สมบูรณ์ จะเห็นได้ว่า แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น สามารถซิมิวเลตได้กว้างขวางกว่าแบบจำลองของ Merchuk และ Yunger (1990) และแบบจำลองโครงข่ายของไซนของยูพตี สันติคุณ (2538) ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้เป็นเพียงกรณีหนึ่งของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และผลการเทียบเคียงผลการซิมิวเลตจากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองก็ให้ผลที่สอดคล้องกัน แต่อย่างไรก็ตาม การซิมิวเลตยังไม่จัดอยู่ในระดับที่ดีนัก เนื่องจาก

เป็นเพียงการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้กราฟการตอบสนองของทรานซเซอ์ที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเท่านั้น ถ้าจะให้ได้ผลการซิมูเลตที่ถูกต้องแม่นยำ ควรพัฒนาโปรแกรม model fitting สำหรับการทำซิมูเลชั่น ที่จะต้องนำ optimization technique เข้ามาใช้ ซึ่งจะมีการพัฒนาต่อไป

ข้อเสนอแนะ

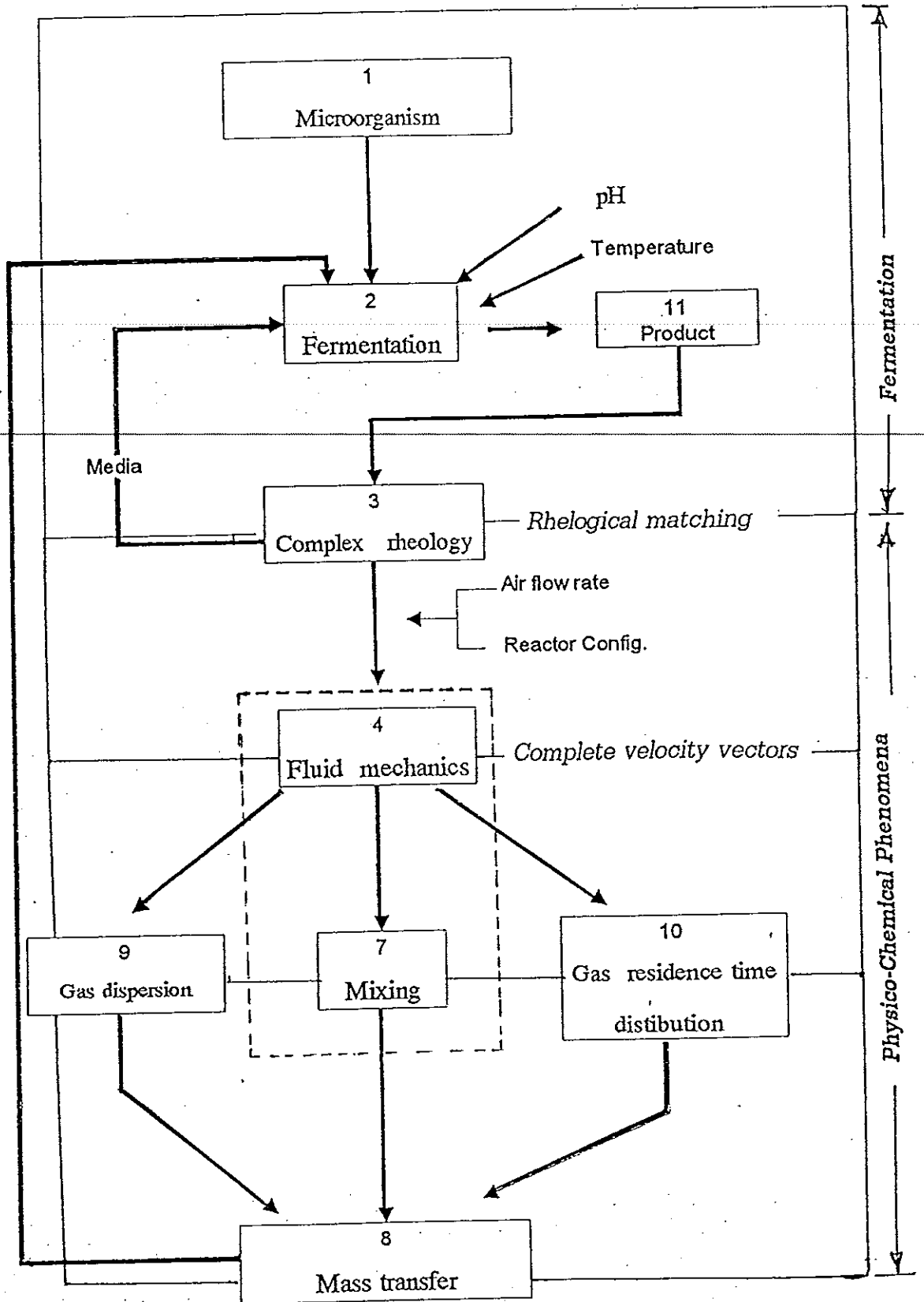
งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาการพัฒนาการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยใช้วิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น ซึ่งแบ่งปัญหาทั้งหมดออกเป็นส่วนย่อย ดังแสดงในภาพที่ 6.70 แล้วศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละส่วนย่อยของปัญหา หลังจากที่ได้ผลของแต่ละปัจจัยต่อสิ่งที่ต้องการศึกษานั้นชัดเจนแล้ว จึงค่อยรวมความซับซ้อนเหล่านั้นเข้าด้วยกัน ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ศึกษาถึงสมบัติทางรีโอโลยีของระบบของไหลจำลองที่ใช้ในการศึกษาแทนบรธจริง และการเทียบเคียงสมบัติทางรีโอโลยีกับบรธจริง และในงานวิจัยได้ศึกษาต่อในส่วนของไฮโดรไดนามิกส์และกลไกการผสมที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่า การศึกษาที่ได้ทำมาแล้วนั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของปัญหาทั้งหมดที่ต้องศึกษา ดังนั้นควรจะต้องมีการศึกษาในส่วนต่าง ๆ ต่อไปให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจน แล้วนำทั้งหมดไปใช้ในการออกแบบและขยายขนาดถังหมักสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพต่อไป

สำหรับในส่วนของการศึกษาการผสมนี้ ยังมีประเด็นต่าง ๆ ที่ควรแก้ไขเพื่อให้ผลการศึกษาสสมบูรณ์ขึ้น คือ

1. การพัฒนาเครื่องมือในการเก็บข้อมูลการตอบสนองของทรานซเซอ์ ถึงแม้ว่าจะสามารถพัฒนาเครื่องมือที่สามารถบันทึกข้อมูลได้ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดความสะดวกในการเก็บข้อมูลได้มากแล้ว แต่ยังมีปัญหาคือ เครื่องมือดังกล่าว มักถูกรบกวนด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก จึงควรที่จะมีการพัฒนาเครื่องมือดังกล่าวให้มีความเสถียรมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เครื่องมือดังกล่าวมีประโยชน์ต่องานวิจัยต่าง ๆ ได้มากขึ้นในโอกาสต่อไป

2. ผลการซิมูเลตแบบจำลองของการผสมในงานวิจัยนี้ ยังไม่จัดอยู่ในระดับที่ดีนัก เนื่องจากเป็นเพียงการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองเท่า

นั่น จึงควรมีการพัฒนาการเขียนโปรแกรม model fitting สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุด ซึ่งจะต้องนำ optimization technique เข้ามาใช้ จึงจะทำให้การพัฒนาแบบจำลองได้ข้อสรุปที่ชัดเจนยิ่งขึ้น



ภาพที่ 6.70 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการหมัก และการแบ่งปัญหาออกเป็นส่วนย่อย

เอกสารอ้างอิง

ยุพดี สันติวุฒิ. 2538. รีโอดีโยของของไหลนอน-นวดอดเนอดและการผสมในดงปฏอกกรณชวดภาพแบบอากาศยก. วดทยานพนธวดศากรมศาสตรมหาบงนชวด. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร.

Balmer, G.J., Moore, I.P.T. and Nienow, A.W. 1987. Aerated and unaerated power and mass transfer characteristics of Prochem agitators. In:Biotechnology progress:Scale-up and mixing, Ho, C.S. and Oldshue, J.Y. (eds), AIChE, 116-127.

Blenke, H. 1979. Loop reactors. Adv. Biochem. Eng. 13,121-214.

Cadmus, M.C., Knutson, C.A., Lagoda, A.A., Plttsey, J.E. and Burton, K.A. 1978. Synthetic media for production of quality xanthan gum 20 liters fermenters. Biotechnol. Bioeng. 20:1003-1014.

Charles, M. 1978. Technical aspects of the rheological properties of microbial culture. Adv. Biochem. Eng. 8, 1-61.

Chisti, M.Y. 1989. Airlift Bioreactors, Elsevier Science Publishers Ltd.

Cottrell, I.W. and Kang, K.S. 1978. Xanthan gum, a unique bacterial polysaccharide for food application, Dev, Ind, Microbiol. 19, 117-131.

Decdwer, W.D. Yonsel, S., Schluter, V. and Suh, I.S. 1990. Bubble column (airlift) vs. stirred tank reactor:comparision of various bioprocesses, Proc. APBioCheC'90, Kyungju, Korea, 461-466.

Deckwer, W-D. 1985. Bubble column reactors, In:Biotechnology vol. 2, Rehm, H-J. and Reed, G. (eds.), VCH. Weinheim, 444-464.

- Demain, A.L., Mass, W. and Muenster, P.S. 1981. Process for the fermentation production of xanthan gum with organic acid. U.S. Patent. 4,245-246.
- Erickson, L.E., Patel, S.A., Glasgow, L.A. and Lee, C.H. 1983. Effect of viscosity and small bubble segregation on mass transfer in airlift fermenters. *Process Biochemistry*. May/June.
- Fields, P.R., Mitchell, F.R.G. and Slater, N.K.H. 1984. Study of mixing in a concentric tube air-lift reactor containing xanthan gum by means of an improved flow follower. *Chem. Eng. Commun.* 25:93-104.
- Freedman, W and Davidson, J.F. 1969. Hold-up and liquid circulation in bubble column. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 47,T251-T262.
- Funahashi, H., Hirai, K-I., Yoshida, T. and Taguchi, H. 1988. Mechanistic analysis of xanthan gum production in a stirred tank. *J. Ferment. Technol.* 66:355-364.
- Gbewonyo, K., Dimasi, D. and Buckland, B.C. 1987. Characterization of oxygen absorption of hydrofoil impeller in viscous mycelial fermentation, In : *Biotechnology progress : Mixing and scale-up*, Ho, C.S. and Oldshue, J.Y. (eds.), AIChE, 128-134.
- Godet, P. 1973. Fermentation of polysaccharide gums. *Process Biochemistry*, January, 33-34.
- Gonzales, R., John, M.R., Greenfield, P.F. and Pace, G.W. 1989. Xanthan gum precipitation using ethanol. *Process Biochem.* 200-203.
- Hubbard, D.W. and Williams, C.N. 1977. Continuous fermentors for polysaccharide production. *Process Biochem.* 12(10):11-13.
- Jana, A.K. and Ghosh, P. 1995. Xanthan biosynthesis in continuous culture : Citric acid as an energy source. *J. Ferment. Bioeng.* 80:485-491.

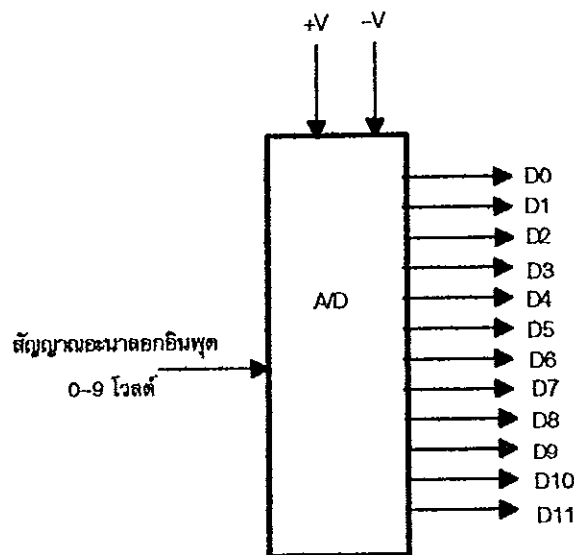
- Johnson, D.N. and Hubbard, D.W. 1974. Mixing by impeller agitation in continuous flow system containing polysaccharide solution. *Biotechnol. Bioeng.* 16:1283-1297.
- Kawase, Y. and Moo-Young, M. 1989. Liquid circulation time in concentric-tube airlift columns with non-newtonian fermentation broths. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 46:267-274.
-
- Kennedy, J.F. and Bradshaw, I.J. 1984. Production, properties and application of xanthan, *Progress in Industrial Microbiology.* 19,319-371.
- Margaritis, A. and Pace, G.W. 1985. Microbial polysaccharide. In *Comprehensive Biotechnology* (ed. M. Moo-Young). pp. 1005-1044. PergamonPress.
- Mercer, D.G. 1981. Flow characteristics of a pilot-scale airlift fermentor. *Biotechnol. Bioeng.* 23. 2421-2431.
- Merchuk, J.C. and Yungler, R. 1990. The role of the gas-liquid separator of airlift reactor in mixing process. *Chem. Eng. Sci.* 45:2973-2975.
- Peter, H-U, Herbst, H., Hesselink, P.G.M., Lunsdon, H., Schumpe, A. and Deckwer, W-D. 1989. The influence of agitation rate on xanthan production by *Xanthomonas campestris*. *Biotechnol. Bioeng.* 34:1393-1397.
- Phillip, J., Proctor, J.M., Niranjan, K. and Davison, J.F. 1990. Gas hold-up and liquid circulation in internal loop reactors containing highly viscous newtonian and non-newtonian liquids. *Chem. Eng. Sci.* 45(3):651-664.
- Riet, Klass VAN'T and Tramper, J. 1991. *Basic Bioreactor Design*. New York:Marcel Dekker, Inc.
- Russell, A.B., Thomas, C.R. and Lilly, M.D. 1994. The influence of vessel height and top-section size on the hydrodynamic characteristics of airlift fermentors. *Biotechnol. Bioeng.*

- Sandford, P.A. 1979. Exocellular microbial polysaccharide. *Adv. Carbohydrate. Chem. Biochem.* 36:265-313.
- Silman, R.W. and Rogovin, P. 1970. Continuous fermentation to produce xanthan biopolymer : Laboratory investigation. *Biotechnol. Bioeng.* 7:75-83.
-
- Solomon, J., Nienow, A.W. and Pace, G.W. 1981. Flow patterns in agitated plastic and psuedoplastic viscoelastic fluids, *Inst. Chem. End. Symp. Ser.* 64,A1-A13.
- Souw, P. and Demain, A.L. 1979. Nutrition studies on xanthan production by *xanthomonas campestris* NRRL B 1459. *Appl. Environ. Microbiol.* 37:1186-1192.
- Speers, R.A. and Tung, M.A. 1986. Concentration and temperature dependence of flow behavior of xanthan gum dispersions.
- Verlaan, P., VAN Eijs, A.M.M., Tramper, J. and VAN'T Riet, K. 1989. Estimation of axial dispersion in individual sections of an airlift-loop reactor. *Chem. Eng. Sci.*, 44(5),1139-1146.
- Weiland, P. 1984. Influence of draft tube diameter on operation behavior of airlift loop reactor, *Ger. Chem. Eng.* 7:374-385.
- Young, M.A., Carbonell, R.G. and Ollis, D.O. 1987. Non-newtonian broth in airlift bioreactor, In : *Biotechnology Progress: Scale-up and mixing*, AIChE symp., Ho, C.S. and Oldshue, J.Y. (eds.)

ภาคผนวก

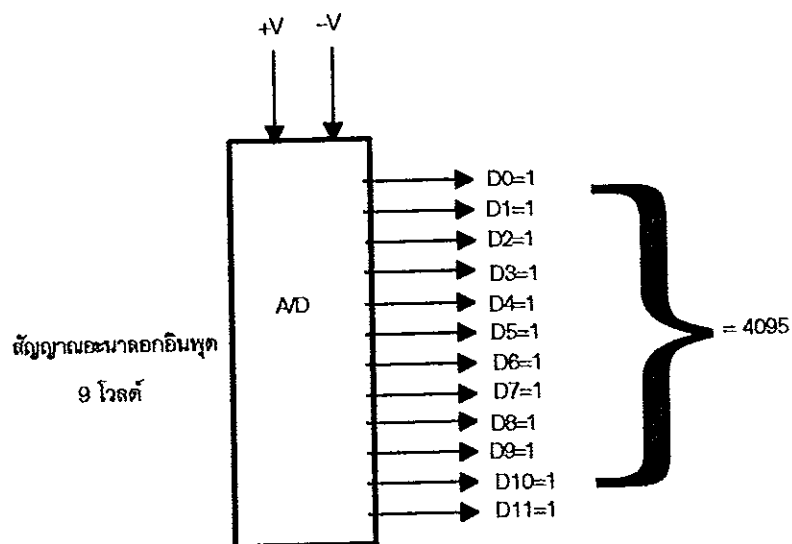
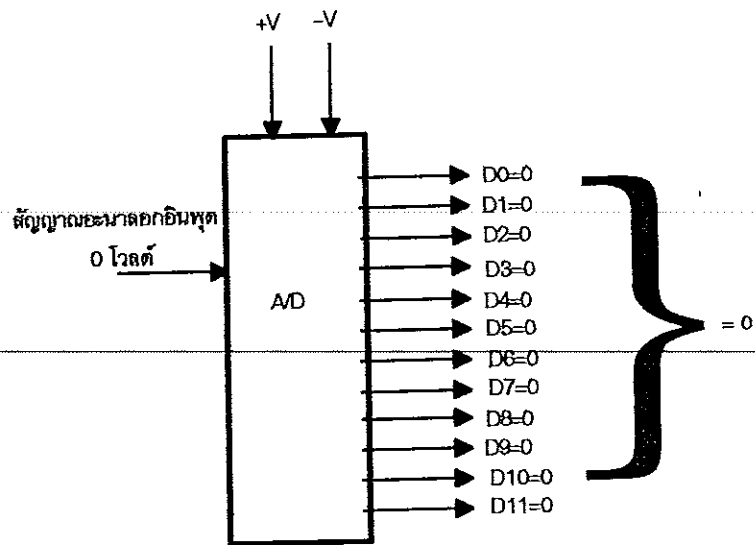
ภาคผนวก ก การแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

การแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D) เป็นการแปลงแรงดันในช่วงใด ๆ เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำเข้าสู่คอมพิวเตอร์ สมมติ A/D มีช่วงแรงดันอินพุตมีค่า 0 ถึง 9 โวลต์ เปลี่ยนเป็นดิจิทัล ขนาด 12 บิต (เลขฐานสองจำนวน 12 หลัก) มีค่าจาก 0 ถึง 4095



ภาพผนวกที่ ก1 แสดงไดอะแกรมของ A/D แรงดันอินพุต 0-9 โวลต์ เอาพุต 12 บิต

จากภาพผนวกที่ ก1 แสดงว่า ถ้าแรงดันอินพุตมีค่าต่ำสุดเป็น 0 โวลต์ค่าดิจิทัล 12 บิตจะเท่ากับ 0 แต่ถ้าแรงดันอินพุตมากที่สุดคือ 9 โวลต์ ค่าของดิจิทัลสูงสุดจะเท่ากับ 4095



ภาพผนวกที่ ก2 การแปลงสัญญาณอนาลอกอินพุตขนาด 0 โวลต์ และ 9 โวลต์ เป็นสัญญาณอนาลอก

ฉะนั้น ช่วงของแรงดันอินพุตที่ทำให้ค่าดิจิทัลเปลี่ยนไป 1 ค่า มีค่าเท่ากับ $9/4095 = 0.002$ โวลต์ เมื่อคอมพิวเตอร์รับค่าที่เป็นสัญญาณดิจิทัลไปแล้วต้องมีการแปลงสัญญาณนั้นเป็นค่าแรงดันอินพุตด้วยสมการ

ค่าแรงดันอินพุต = ค่าดิจิทัล \times 0.002 แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปประมวลผลต่อไป

ภาคผนวก ข คุณสมบัติของตัวแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

SPECIFICATION;

D/A: - 12 bit, 1 channel.

- output voltage 0-9V

- Unipolar or bipolar

- Current setting time 500nsec

- Nonlinearity 0.2%

A/D: -12 bit, 16 channel

- input voltage range 0-9V

- Unipolar

- Successive approximation method

- conversion time 60usec

D-Type CONNECTOR PINOUT

PIN	SIGNAL
1	GND
2	D/A OUT
3	5V
4	GND
5	CH0
6	CH1
7	CH2
8	CH3
9	CH4
10	CH5
11	CH6
12	CH7
13	12V
14	GND
15	-5V
16	GND
17	CH15
18	CH14
19	CH13
20	CH12
21	CH11
22	CH10
23	CH9
24	CH8
25	-12V

ภาคผนวก ค ข้อมูลที่ใช้ในการแปลงค่าพีเอชเป็นความเข้มข้นของ HCl ในสารละลาย
แซนแทนก็้มสำเร็จที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางผนวกที่ ค1 เปรียบเทียบค่าพีเอชกับความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายแซนแทนที่
ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้น 0.1 % (w/w)		ความเข้มข้น 0.25 % (w/w)		ความเข้มข้น 0.5 % (w/w)	
pH	[HCl]	pH	[HCl]	pH	[HCl]
7.29	0.000	6.79	0.000	6.37	0.000
6.02	0.072	5.55	0.072	5.60	0.072
5.69	0.145	4.7	0.145	5.01	0.145
5.44	0.217	4.2	0.217	4.36	0.217
5.27	0.289	3.6	0.289	3.95	0.289
5.03	0.360	3.3	0.360	3.46	0.360
4.76	0.432	3.18	0.432	3.23	0.432
4.34	0.500	3.11	0.500	3.02	0.500

ภาคผนวก ง โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการรับและบันทึกข้อมูลจากเครื่องวัดพีเอช

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <conio.h>
#include <bios.h>
#include <time.h>
#define PORT 632
float CONSTANT = 30.64596;
float COEFFICIEN = -0.02201;
int LOOP= 100;
void menu(void);
void showpara(void);
void ph_meter();
void TextWindow(int x1,int y1,int x2,int y2,int fcolor,int bcolor);

main (void)
{
    menu();
    clrscr();
    return 0;
}

void menu(void)
{
    int choice;
    clrscr();
    TextWindow(1,1,79,25,LIGHTRED,LIGHTGRAY);
    TextWindow(4,4,76,10,BLUE,BLUE);
```

```

TextWindow(3,3,75,9,YELLOW,GREEN);
TextWindow(4,13,76,19,RED,RED);
TextWindow(3,12,75,18,LIGHTCYAN,BROWN);
TextWindow(4,22,76,24,BLUE,BLUE);
TextWindow(3,21,75,23,YELLOW,GREEN);
gotoxy(33,5);
textcolor(BLUE);
textbackground(GREEN);
cprintf("PHADDA 12");
printf("\n");
gotoxy(29,6);
cprintf("คิจิตอล ทีเอชเอ็มเตอร์");
gotoxy(29,7);
cprintf("=====");
gotoxy(15,22);
cprintf("by....Sutha Klaocheed Department of Agroindustry PSU");
textcolor(BLUE);
textbackground(BROWN);
gotoxy(32,13);
cprintf("1. เริ่มวัดทีเอช");
gotoxy(32,14);
cprintf("2. แก้วไขพารามิเตอร์");
gotoxy(32,15);
cprintf("3. แสดงพารามิเตอร์");
gotoxy(32,16);
cprintf("4. ออกจากโปรแกรม");
gotoxy(32,17);
cprintf("เลือกหัวข้อที่ต้องการทำงาน : ");
scanf("%d",&choice);
switch(choice)

```

```
{
  case 1 :
    clrscr();
    ph_meter();
    menu();
    break;
  case 2 :
    TextWindow(3,12,75,18,LIGHTCYAN,BROWN);
    gotoxy(32,14);
    cprintf("Enter New COEFFICIEN : ");
    gotoxy(56,14);
    cscanf("%f",&COEFFICIEN);
    gotoxy(32,15);
    cprintf("Enter New CONSTANT : ");
    gotoxy(56,15);
    cscanf("%f",&CONSTANT);
    getch();
    menu();
    break;
  case 3 : showpara();
    getch();
    menu();
    break;
  case 4 :
    textcolor(WHITE);
    textbackground(BLACK);
    clrscr();
    exit(1);
  default: printf("\n\n\tPlease enter value between 1 to 2\n");
} }
```

```
void showpara(void)
{
    TextWindow(3,12,75,18,LIGHTCYAN,BROWN);
    textcolor(BLUE);
    textbackground(BROWN);
    gotoxy(32,14);
    cprintf("PORT NUMBER = 632\n\n");
    gotoxy(32,15);
    cprintf("COEFICIEN = %f\n\n",COEFFICIEN);
    gotoxy(32,16);
    cprintf("CONSTANT = %f\n\n",CONSTANT);
}

void ph_meter(void)
{
    int i; /* convert 7 time individually in port + 4, port + 5 */
    int j; /* number of channel */
    int a=0,HIGHBIT=0,LOWBIT=0,d=0,e,x;
    long int sum;
    int average;
    float pH;
    long int k;
    clock_t start,end;
    FILE *fp;
    char file_name[80];
    printf("\nEnter file name : ");
    gets(file_name);
    gets(file_name);
    if((fp=fopen(file_name,"w"))==NULL)
    {
        printf("\nError on open file ");
        exit(1);
    }
```

```

start = clock();
while (kbhit()==0){
for(j=0;j<=2;j++)      /* read in channel 0 only */
{ sum = 0;
for (x=1;x<=100;x++)
{ outp(PORT+3,0);
outp(PORT+0,j);      /* output channel number to port+0 */
for (i=1;i<=7 ;i++)   /* 7 time convert in port+4*/
{
for (k=0;k<LOOP;k++);
a=inp(PORT+4);
}
for (i=1;i<=7 ;i++)   /* 7 time convert in port+5 */
{
for (k=0;k<LOOP;k++);
a=inp(PORT+5);
}
end = clock();
HIGHBIT=inp(PORT+2);   /* read data in port+2 for high 4 bit */
LOWBIT=inp(PORT+1);   /* read data in port+1 for low 8 bit */
e=HIGHBIT/16;
d=(HIGHBIT-16*e)*256+LOWBIT;
sum = sum + d;
}
average = sum/100;
pH = COEFFICIEN*average+CONSTANT;
switch (j)
{
case 0:
fprintf(fp, "\n %5.2f %3.2f", (end-start)/CLK_TCK, pH);

```

```

printf("\nTime=%5.2f pH= %3.2f",(end-start)/CLK_TCK,pH);
break;
case 1:
fprintf(fp," %5.2f %3.2f",(end-start)/CLK_TCK,pH);
printf(" Time=%5.2f pH= %3.2f",(end-start)/CLK_TCK,pH);
break;
case 2:
fprintf(fp," %5.2f %3.2f",(end-start)/CLK_TCK,pH);
printf(" Time=%5.2f pH= %3.2f",(end-start)/CLK_TCK,pH);
break;
case 3:
fprintf(fp," %5.2f %3.2f",(end-start)/CLK_TCK,pH);
printf(" Time=%5.2f pH= %3.2f",(end-start)/CLK_TCK,pH);
break;
default:
break;
} /* endswitch */
} }
fclose(fp);
}

void TextWindow(int x1,int y1,int x2,int y2,int fcolor,int bcolor)
/* TextWindow : Draw text window on screen */
/* (x1,y1) : Top-left co-ordinate of windows */
/* (x2,y2) : Bottom-right co-ordinate of windows */
/* fcolor : Foreground color */
/* bcolor : Background color */
{
int x,y;
/* Set foreground and background color */
textcolor(fcolor);

```

```
extbackground(bcolor);
* Draw background */
for(y=y1+1;y<y2;y++)
{
  for(x=x1+1;x<x2;x++)
  {
    gotoxy(x,y);
    putchar(0x20); /* Put Space character to screen */
  }
  gotoxy(x1,y);putchar(0xb3); /* Vertical line */
  gotoxy(x2,y);putchar(0xb3);
}
gotoxy(x1+1,y1);
for(x=x1+1;x<x2;x++) putchar(0xc4); /* Horizontal line */
gotoxy(x1+1,y2);
for(x=x1+1;x<x2;x++) putchar(0xc4); /* Horizontal line */
gotoxy(x1,y1); putchar(0xda);
gotoxy(x2,y1); putchar(0xbf);
gotoxy(x1,y2); putchar(0xc0);
gotoxy(x2,y2); putchar(0xd9);
}
```

ภาคผนวก จ โปรแกรมที่ใช้ในการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขสำหรับแบบจำลองโครงข่ายของโซน

```

#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include "get.h"

float t_end_step;

FILE *output;
int channel = 3;
int y_show[3];
float tc;
int p1,p2,p3,p4;
void openfile()
{
    if(( output = fopen(filename,"wt")) == NULL)
    {
        printf("error open output file, please turn off your computer");
        exit(1);
    }
}
void rhs(int n, float t, float y[])
{
    float x[NVAR];
    int i;
    float a;
    for (i=1;i<=NVAR;i++)
        x[i]=y[i];
    a=x[NVAR-2]-x[1];
    y[1]= (Q*(x[NVAR]-x[1]))/v[0];
}

```



```

for (i=2;i<=p1;i++){
    y[i]= (Q*(x[i-1]-x[i]))/v[0];
};
for (i=p1+1;i<=p2;i++){
    y[i]= (Q*(x[i-1]-x[i]))/v[1];
};
for (i=p2+1;i<=p3;i++){
    y[i]= (Q*(x[i-1]-x[i]))/v[2];
};
for (i=p3+1;i<=p4;i++){
    y[i]= (Q*(x[i-1]-x[i]))/v[3];
};
}
void info(int n, float start_time, float t_end_step, float y[], float data[])
{
    int i;
    if (start_time==t_end_step)
    {
        iff(normalize)
        {
            /* tc = (v1+v2+v3+v4)/((Q1+Q2+Q3)/3);
            start_time=start_time/tc;
            for (i=1;i<=NVAR;i++)
                y[i]=y[i]/conc; */
        }
        for(i=0;i<3;i++)
        {
            iff(printdata)
            printf("%7.2f\t%7.5f\t",start_time,y[y_show[i]]);
            fprintf(output,"%7.2f\t%7.5f\t",start_time,y[y_show[i]]);
        }
    }
}

```

```
printf("\n");
fprintf(output, "\n");
}
}
void netzone()
{
    void rke(float *, float *, int, float [],
    void (*)(int, float, float[]), float [], int,
    void (*)(int, float, float, float [], float []));
    float *y, data[7], n;
    int i;
    clrscr();

    get();
    openfile();
    p1=n1;
    p2=(n1+n2);
    p3=(n1+n2+n3);
    p4=(n1+n2+n3+n4);
    v[0]=v[0]/n1;
    v[1]=v[1]/n2;
    v[2]=v[2]/n3;
    v[3]=v[3]/n4;

    NVAR=(n1+n2+n3+n4);
    y=allocate_real_vector(0,NVAR);
    for (i=0;i<3;i++)
        y_show[i] = (zone_show[i])+(cell_show[i]-1);
```

```

/***** initial values definition *****/

for (i=1;i<=NVAR;++i)
    y[i] = 0.0;
if (start_zone == 1)
    y[start_cell]=conc;
if (start_zone ==2)
    y[n1+start_cell]=conc;
if (start_zone ==3)
    y[n1+n2+start_cell]=conc;
if (start_zone ==4)
    y[n1+n2+n3+start_cell]=conc;

/*****/

t_end_step = start_time+step_size; /* end time of each step */
data[1]=data[2]=1.0e-5;

for (n=start_time;n< max_time;n=n+step_size){
    rke(&start_time,&t_end_step,NVAR,y,rhs,data,1,info);
    start_time = t_end_step;
    t_end_step = t_end_step+step_size;
}
fclose(output);
}

main ()
{
    int ch;
/* getinput()*/
do
{

```

```
netzone();  
clrscr();  
printf("Do you want to run again (0/1) : ");  
scanf("%d",&ch);  
}while (ch !=0);  
}
```

ภาคผนวก จ โปรแกรมที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

```

#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include "get.h"

float t_end_step;

FILE *output;
int channel = 3;
int y_show[3];
float tc;
int p[5];
void openfile()
{
    if ((output = fopen(filename,"wt")) == NULL)
    {
        printf("error open output file, please turn off your computer");
        exit(1);
    }
}
void rhs(int n, float t, float y[])
{
    float x[NVAR];
    int i;
    float a;
    for (i=1;i<=NVAR;i++)
        x[i]=y[i];

    a=x[NVAR-2]-x[1];
    y[1]=(Q1*(x[NVAR-2]-x[1])-K1*(x[1]-x[2]))/voll;

```

$$y[2] = (Q2*(x[NVAR-1]-x[2]) - K1*(x[2]-x[1]) - K2*(x[2]-x[3]))/vol1;$$

$$y[3] = (Q3*(x[NVAR]-x[3]) - K2*(x[3]-x[2]))/vol1;$$

```
for (i=4;i<=p[1];i++){
```

$$y[i] = (Q1*(x[i-3]-x[i]) - K1*(x[i]-x[i+1]))/vol1;$$

```
  i++;
```

$$y[i] = (Q2*(x[i-3]-x[i]) - K1*(x[i]-x[i+1]) - K2*(x[i]-x[i-1]))/vol1;$$

```
  i++;
```

$$y[i] = (Q3*(x[i-3]-x[i]) - K2*(x[i]-x[i-1]))/vol1;$$

```
};
```

```
for (i=p[1]+1;i<=p[2];i++){
```

$$y[i] = (Q1*(x[i-3]-x[i]) - K1*(x[i]-x[i+1]))/vol21;$$

```
  i++;
```

$$y[i] = (Q2*(x[i-3]-x[i]) - K1*(x[i]-x[i+1]) - K2*(x[i]-x[i-1]))/vol22;$$

```
  i++;
```

$$y[i] = (Q3*(x[i-3]-x[i]) - K2*(x[i]-x[i-1]))/vol23;$$

```
};
```

```
for (i=p[2]+1;i<=p[3];i++){
```

$$y[i] = (Q1*(x[i-3]-x[i]) - K1*(x[i]-x[i+1]))/vol3;$$

```
  i++;
```

$$y[i] = (Q2*(x[i-3]-x[i]) - K1*(x[i]-x[i+1]) - K2*(x[i]-x[i-1]))/vol3;$$

```
  i++;
```

$$y[i] = (Q3*(x[i-3]-x[i]) - K2*(x[i]-x[i-1]))/vol3;$$

```
};
```

```
for (i=p[3]+1;i<=p[4];i++){
```

$$y[i] = (Q1*(x[i-3]-x[i]) - K1*(x[i]-x[i+1]))/vol41;$$

```
  i++;
```

$$y[i] = (Q2*(x[i-3]-x[i]) - K1*(x[i]-x[i+1]) - K2*(x[i]-x[i-1]))/vol42;$$

```
        i++;
        y[i]= (Q3*(x[i-3]-x[i])-K2*(x[i]-x[i-1]))/vol43;
    };
}

void info(int n, float start_time, float t_end_step, float y[], float data[])
{
    int i;

    if(start_time==t_end_step)
    {
        if(normalize)
        {
            /* tc = (v1+v2+v3+v4)/((Q1+Q2+Q3)/3);
            start_time=start_time/tc;
            for (i=1;i<=NVAR;i++)
                y[i]=y[i]/conc; */
        }
        for(i=0;i<3;i++)
        {
            if(printdata)
                printf("%7.2f\t%7.5f\t",start_time,y[y_show[i]]);
            fprintf(output,"%7.2f\t%7.5f\t",start_time,y[y_show[i]]);
        }
        printf("\n");
        fprintf(output,"\n");
    }
}
```

```
void netzone()
{
    void rke(float *, float *, int, float [],
    void (*)(int, float, float[]), float [], int,
    void (*)(int, float, float, float [], float []));
    float *y,data[7],n;

    int i;

    clrscr();

    get();
    openfile();

    p[0]=0;
    p[1]=n1*3;
    p[2]=(n1+n2)*3;
    p[3]=(n1+n2+n3)*3;
    p[4]=(n1+n2+n3+n4)*3;

    vol1 = vol1/(n1*channel);
    vol21 = vol21/n2;
    vol22 = vol22/n2;
    vol23 = vol23/n2;
    vol3 = vol3/(n3*channel);
    vol41 = vol41/n4;
    vol42 = vol42/n4;
    vol43 = vol43/n4;

    NVAR=(n1+n2+n3+n4)*channel;
    y=allocate_real_vector(0,NVAR);
    for (i=0;i<3;i++)
        y_show[i] = (p[zone_show[i]-1]+(channel*(cell_show[i]-1))+channel_show[i]);
```



```

/***** initial values definition *****/

for (i=1;i<=NVAR;++i)
    y[i] = 0.0;
if (start_zone == 1)
    y[start_cell+1]=conc;

if(start_zone ==2)
    y[n1+start_cell+1]=conc;
if(start_zone ==3)
    y[n1+n2+start_cell+1]=conc;
if(start_zone ==4)
    y[n1+n2+n3+start_cell+1]=conc;

/*****/

t_end_step = start_time+step_size; /* end time of each step */
data[1]=data[2]=1.0e-5;

for (n=start_time;n< max_time;n=n+step_size){
    rke(&start_time,&t_end_step,NVAR,y,rhs,data,1,info);
    start_time = t_end_step;
    t_end_step = t_end_step+step_size;
}
fclose(output);
}
main ()
{
    int ch;
/* getinput();*/

```

```
do
{
netzone();
clrscr();
printf("Do you want to run again (0/1) : ");
scanf("%d",&ch);
}while (ch !=0);
}
```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายสุธา เกลาฉืด

วัน เดือน ปี เกิด 11 พฤศจิกายน 2515

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรศาสตร์)	คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2538

ทุนการศึกษาที่ได้รับระหว่างการศึกษา

- ทุนสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
- ทุนพัฒนาบุคลากรของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
(คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)