



การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
Oil Extraction from Cashew Nut Shell

ไวภูณัฐ ฤทธิธรรม
Waigoon Rittirut


วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
Master of Engineering Thesis in Chemical Engineering
Prince of Songkla University
2538


| |
|-----------------------------------|
| เลขหมู่ TP 684.C 275 002 2538 ก.๗ |
| Bib Key 76427 |

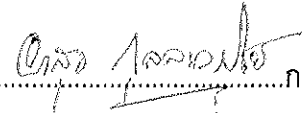
ชื่อวิทยานิพนธ์ การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ผู้เขียน นายไวกุณฐ์ ฤทธิธรรม์
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

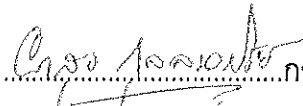
คณะกรรมการที่ปรึกษา

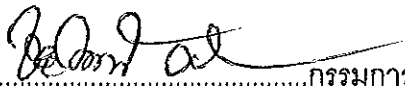
คณะกรรมการสอบ

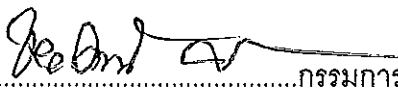

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชاکริต ทองอุไร)

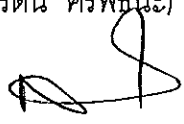

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชاکริต ทองอุไร)

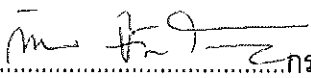

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ผาสุข กุลละวณิชย์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ผาสุข กุลละวณิชย์)

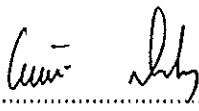

.....กรรมการ
(ดร. ชัยรัตน์ ศิริพันธ์)


.....กรรมการ
(ดร. ชัยรัตน์ ศิริพันธ์)


.....กรรมการ
(ดร. สุธรรม สุขมณี)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ก้าน จันทร์พรมมา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี


.....
(ดร. ไพรัตน์ สงวนไพร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ผู้เขียน นายไวยุทธ ฤทธิธรรม
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2537

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเบื้องต้น มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการสกัดน้ำมัน CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ จากการศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย CNSL สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 มิลลิเมตร พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการคือ $3.15 \times 10^{-9} x_i^{2.58}$, $2.89 \times 10^{-8} x_i^{3.71}$ และ $2.91 \times 10^{-7} x_i^{4.53}$ ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นี้ใช้ในการออกแบบปฏิกรณ์การสกัด

จากการศึกษาการสกัด CNSL แบบหยดในเบตนิ่งเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตรในระบบเปิดพบว่า อัตราการฉีดพ่น(หยด)เฮกเซนที่เหมาะสมคือ 1-2 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อใช้สัดส่วนวัตถุดิบต่อเฮกเซน 3: 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่ออัตราการหยดเพิ่มขึ้น % hexane recovery ลดลงเนื่องจากการระเหย ส่วน % hexane retained คงที่ เนื่องจากเฟสของแข็งอิมิตัวด้วยตัวทำละลายขนาดวัตถุดิบลดลงทำให้สกัดได้ดีขึ้น ในที่นี้เลือกความหนาเบต 4 เซนติเมตรเพราะให้ผลได้ CNSL ในแต่ละเบตเป็น 60-80 %

ในการสกัด CNSL แบบหยดในเบตนิ่งจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 มิลลิเมตร โดยใช้ความหนาเบต 4 เซนติเมตร(วัตถุดิบประมาณ 10-11 กรัม) อัตราการหยดเฮกเซน 1.67 มิลลิลิตรต่อนาที สกัดเป็นเวลา 30 นาที (ปริมาณเฮกเซน 50 มิลลิลิตร) พบว่าได้ผลได้ CNSL 71.56, 71.17 และ 67.65 % ตามลำดับ ส่วน % hexane recovery, % hexane retained และ retention time มีค่าอยู่ในช่วง 79-80 %, 24-36 % และ 82-84 วินาที ตามลำดับ ค่าเหล่านี้ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดวัตถุดิบ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไร้มิติกับเวลาไร้มิติสำหรับการสกัดแบบหยดในเบตนิ่งพบว่าไม่เป็นไปตามสมการของ Schwartzberg ซึ่งอาจจะเนื่องจากเงื่อนไขในการทดลองต่างกัน

Thesis Title Oil Extraction from Cashew Nut Shell
Author Mr. Waigoon Rittirut
Major Program Chemical Engineering
Academic Year 1994

Abstract

The objective of preliminary research was to study the process of oil extraction from cashew nut shell(CNSL). It was found that the solute diffusivity for cashew nut shell liquid from 2, 5 and 9 mm size of raw material was $3.15 \times 10^{-9} x_i^{2.5844}$, $2.89 \times 10^{-8} x_i^{3.7175}$ and $2.91 \times 10^{-7} x_i^{4.5316}$ respectively, as x_i was solute concentration. These values could be used for extractor design.

From the open system of trickling oil extraction in packed bed with diameter 2.54 long, it was shown that the appropriate flow rate of hexane solvent was 1-2 ml/min when using raw material to hexane ratio 3:5 w/v. As the solvent flow rate was decreased, % hexane recovery was accordingly decreased because of evaporation. However, % hexane retained was constant due to the saturation of solid phase. The lower the raw material size, the better the yield of CNSL obtained because of the higher the area contacted between solid particles and solvent. In these experiment, the 4 cm thickness was selected since it gave 60-80 % CNSL yield.

The oil extraction in packed bed from 2, 5 and 9 mm size of raw material using different bed thickness, solvent flow rate and resident time was investigated. It was evident that, when using 4 cm bed thickness (approximately 10-11 g of raw material), flow rate of 1.67 ml/min and resident time of 30 min (hexane quantity 50 ml), CNSL yield was 71.56, 71.17 and 67.65 %, respectively. Where as the values of % hexane recovery, % hexane retained and retention time was 79-80 %, 24-36 % and 82-84 s, respectively. These values did not depend on raw material size.

As the study of the relation between dimensionless concentration and dimensionless time in packed bed, the result showed that the relation did not

followed Schwartzberg's equation, supposing the conditions in the experiment were different.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาศริต ทองอุไร ประธานกรรมการ
ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ผาสุข กุลละวณิช และ ดร. ชัยรัตน์ ศิริพันธ์ ที่กรุณาให้คำ
แนะนำในการค้นคว้าวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึง ดร. สุธรรม สุขมณี กรรมการผู้
แทนภาควิชาชีพวิศวกรรมเคมี รองศาสตราจารย์ ดร. ก้าน จันทน์พรหมมา กรรมการผู้แทนจาก
บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณข้าราชการภาควิชาชีพวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุกท่านที่ให้ความช่วย
เหลือในการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามที่ให้ความช่วยเหลือ

ไวคุณฐ์ ฤทธิธมม์

สารบัญ

| | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อ | (3) |
| Abstract | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ | (6) |
| สารบัญ | (7) |
| รายการตาราง | (9) |
| รายการตารางผนวก | (13) |
| รายการรูป | (16) |
| รายการรูปผนวก | (20) |
| ตัวย่อและสัญลักษณ์ | (21) |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| การตรวจเอกสาร | 3 |
| วัตถุประสงค์ | 27 |
| 2 วิธีการวิจัย | 28 |
| วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง | 28 |
| 3 ผลและวิจารณ์ผล | 35 |
| การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น | 35 |
| การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของของแข็งในส่วนสกัด | 46 |
| การออกแบบปฏิกรณ์ในการสกัด | 55 |
| การสกัดCNSLแบบหยด | 70 |
| 4 สรุป | 125 |
| บรรณานุกรม | 128 |
| ภาคผนวก | 132 |
| ภาคผนวก ก การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ ของตัวละลาย | 132 |
| ภาคผนวก ข การสกัดCNSLแบบหยด | 180 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| ภาคผนวก ค การออกแบบปฏิกรณ์ในการสกัด | 215 |
| ประวัติผู้เขียน | 222 |

รายการตาราง

| ตาราง | | หน้า |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | คุณสมบัติทางเคมีของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 4 |
| 2 | คุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ในCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 3 สายพันธุ์ | 4 |
| 3 | มาตรฐานCNSL | 6 |
| 4 | ผลได้จากการใช้เทคนิคต่างๆในการสกัดด้วยตัวทำละลาย | 11 |
| 5 | ปริมาณCNSLในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 35 |
| 6 | ความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เฮกเซนและCNSLที่อุณหภูมิห้อง | 35 |
| 7 | ความหนืดของเฮกเซนและCNSLที่อุณหภูมิห้อง | 35 |
| 8 | คุณสมบัติทางเคมี-กายภาพของเฮกเซนและเอทานอล | 36 |
| 9 | ความหนาแน่นของของผสมเฮกเซนกับCNSL | 38 |
| 10 | พื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm | 39 |
| 11 | ความพรุนระหว่างอนุภาคของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบดนิ่ง | 40 |
| 12 | รัศมีสมมูลย์ของแผ่นแบนและครึ่งหนึ่งของความหนาแผ่นแบนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 40 |
| 13 | สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลายCNSL | 40 |
| 14 | ความเข้มข้นของCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm ที่เวลาต่างๆของการสกัดแบบแบทช์ | 42 |
| 15 | ความเข้มข้นของCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm ที่เวลาต่างๆของการสกัดแบบแบทช์ | 43 |
| 16 | ความเข้มข้นของCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm ที่เวลาต่างๆของการสกัดแบบแบทช์ | 44 |
| 17 | สัมประสิทธิ์การแพร่ของCNSLในเฮกเซนสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงขนาด 2, 5 และ 9 mm | 45 |
| 18 | ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแพร่CNSLที่เวลา 60 S ของการสกัดแบบแบทช์ | 52 |
| 19 | ไบออเทคนิกของการถ่ายโอนมวล(<i>Bi</i>)จากการสกัดCNSLแบบแบทช์ | 54 |
| 20 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดเฮกเซนกับเปอร์เซ็นต์CNSLที่ได้ต่อน้ำหนัก | 70 |

รายการตาราง(ต่อ)

| ตาราง | หน้า | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | | |
| | เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | |
| 21 | เปอร์เซ็นต์CNSLต่อน้ำหนักเปลือกที่อ่านจากรูป 19 ที่อัตราการหยดแตกต่างกัน | 71 |
| 22 | การเปรียบเทียบผลได้CNSLเมื่อใช้เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแตกต่างกัน | 72 |
| 23 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยดเฮกเซนกับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีโคเวอรี (% hexane recovery) | 73 |
| 24 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยดเฮกเซนกับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีเทน (% hexane retained) | 74 |
| 25 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับCNSLที่ได้ | 75 |
| 26 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดในการสกัดแบบหยดกับCNSLที่สกัด ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 77 |
| 27 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดในการสกัดแบบหยดกับCNSLที่สกัด ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 78 |
| 28 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดในการสกัดแบบหยดกับCNSLที่สกัด ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 79 |
| 29 | สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบดจาก การสกัดแบบหยดกับเปอร์เซ็นต์CNSLที่ได้โดยใช้ข้อมูลจากราย 26, 27 และ 28 | 82 |
| 30 | สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบดจาก การสกัดแบบหยดกับปริมาณCNSLที่ได้โดยใช้ข้อมูลจากราย 26, 27 และ 28 | 82 |
| 31 | ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับเปอร์เซ็นต์ CNSLที่สกัดได้ที่อ่านจากรูป 23 หรือจากสมการในตาราง 29 สำหรับเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 83 |
| 32 | ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับเปอร์เซ็นต์ CNSLที่สกัดได้ที่อ่านจากรูป 23 หรือจากสมการในตาราง 29 สำหรับเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 85 |
| 33 | ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับเปอร์เซ็นต์ CNSLที่สกัดได้ที่อ่านจากรูป 23 หรือจากสมการในตาราง 29 สำหรับเปลือกเมล็ด | 87 |

รายการตาราง(ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| มะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | |
| 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณCNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ขนาด 2 mm | 89 |
| 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณCNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ขนาด 5 mm | 90 |
| 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณCNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ขนาด 9 mm | 91 |
| 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีโคเวอรี(% hexane recovery)เปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีเทน(% hexane retained)และเวลารีเทนชัน(retention time) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 93 |
| 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับ % hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ 2 mm | 95 |
| 39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีโคเวอรี(% hexane recovery)เปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีเทน(% hexane retained)และเวลารีเทนชัน(retention time) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 96 |
| 40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับ % hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ 5 mm | 98 |
| 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีโคเวอรี(% hexane recovery)เปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีเทน(% hexane retained)และเวลารีเทนชัน(retention time) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 99 |
| 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับ % hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ 9 mm | 101 |
| 43 %CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ขนาด 2 mm | 102 |
| 44 %CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ขนาด 5 mm | 103 |

รายการตาราง(ต่อ)

| ตาราง | | หน้า |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 45 | %CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ขนาด 9 mm | 104 |
| 46 | ความเข้มข้นของCNSLที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดในเบดนิ่งสำหรับ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 108 |
| 47 | ความเข้มข้นของCNSLที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดในเบดนิ่งสำหรับ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 109 |
| 48 | ความเข้มข้นของCNSLที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดในเบดนิ่งสำหรับ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 110 |
| 49 | สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $1-S = y_{out} / Mx_0$ กับ θ จากการสกัดCNSL แบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm | 112 |
| 50 | ค่า D_s ที่ความเข้มข้นของเอ็กแทรกต์ต่างกันสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm | 115 |
| 51 | ค่า τ_s ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm | 116 |
| 52 | ความสัมพันธ์ระหว่าง $1-S$ กับ θ จากการคำนวณจากสมการ(69) หรือ(73) ในการสกัดตัวละลายCNSLในเบดนิ่งสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm | 120 |
| 53 | เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $1-S$ กับ θ ที่คำนวณจากการทดลองและ ที่คำนวณจากสมการ (69)หรือ (73) | 120 |
| 54 | ผลการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายเฮกเซนในการสกัดCNSLแบบหยด | 122 |

รายการตารางผนวก

| ตารางผนวก | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 การทดลองเพื่อหาปริมาณCNSLทั้งหมดที่มีในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 132 |
| 2 ข้อมูลการทดลองหาความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 133 |
| 3 ข้อมูลการทดลองหาความหนาแน่นของของผสมCNSLกับเฮกเซน | 135 |
| 4 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 136 |
| 5 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 139 |
| 6 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 142 |
| 7 การหาความพรุนระหว่างอนุภาคเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบตนิง | 146 |
| 8 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของทรงกระบอกและครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นแบนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 147 |
| 9 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของทรงกระบอกและครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นแบนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 149 |
| 10 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของทรงกระบอกและครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นแบนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 151 |
| 11 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของตัวละลายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 154 |
| 12 ผลการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของตัวละลายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 155 |
| 13 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของตัวละลายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 158 |
| 14 ผลการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของตัวละลายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 159 |
| 15 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของตัวละลายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 162 |

รายการตารางผนวก(ต่อ)

| ตารางผนวก | | หน้า |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 16 | ผลการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของตัวละลายของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 163 |
| 17 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่เวลาต่างๆของการสกัดแบบแบทช์สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 169 |
| 18 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่เวลาต่างๆของการสกัดแบบแบทช์สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 170 |
| 19 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่เวลาต่างๆของการสกัดแบบแบทช์สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 171 |
| 20 | ผลของอัตราการหยดเฮกเซนที่อัตราการหยดต่างๆกัน | 180 |
| 21 | ผลของความหนาเบดต่อการสกัดโดยเฮกเซนแบบหยด | 182 |
| 22 | ผลของความหนาเบดต่อการสกัดโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 184 |
| 23 | ผลของความหนาเบดต่อการสกัดโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 187 |
| 24 | ผลของความหนาเบดต่อการสกัดโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 190 |
| 25 | % hexane recovery, % hexane retained และ retention time จากการทดลองศึกษาผลของความหนาเบดในการสกัดCNSLโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 195 |
| 26 | % hexane recovery, % hexane retained และ retention time จากการทดลองศึกษาผลของความหนาเบดในการสกัดCNSLโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 198 |
| 27 | % hexane recovery, % hexane retained และ retention time จากการทดลองศึกษาผลของความหนาเบดในการสกัดCNSLโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 201 |
| 28 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ | 204 |

รายการตารางผนวก(ต่อ)

| ตารางผนวก | | หน้า |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| | เปลี่ยนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm(ครั้งที่ 1) | |
| 29 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ เปลี่ยนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm(ครั้งที่ 2) | 205 |
| 30 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ เปลี่ยนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm(ครั้งที่ 1) | 206 |
| 31 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ เปลี่ยนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm(ครั้งที่ 2) | 207 |
| 32 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ เปลี่ยนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm(ครั้งที่ 1) | 208 |
| 33 | ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ เปลี่ยนเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm(ครั้งที่ 2) | 209 |
| 34 | ผลของการเพิ่มปริมาณเฮกเซนในการสกัดCNSLแบบหยด | 210 |
| 35 | ผลได้CNSLจากการขยายพื้นที่หน้าตัดในการสกัดแบบหยด | 212 |
| 36 | ความสัมพันธ์ระหว่างเพคตินัมเบอร์ ไบออกทนิมเบอร์และความเข้มข้นที่ได้ ของระบบการสกัดCNSLด้วยเฮกเซน | 218 |

รายการรูป

| รูป | หน้า |
|-----|------|
| 1 | 5 |
| 2 | 6 |
| 3 | 18 |
| 4 | 20 |
| 5 | 29 |
| 6 | 32 |
| 7 | 34 |
| 8 | 39 |
| 9 | 45 |
| 10 | 48 |
| 11 | 49 |
| 12 | 50 |
| 13 | 52 |
| 14 | 56 |
| 15 | 58 |
| 16 | 58 |
| 17 | 60 |
| 18 | 67 |
| 19 | 71 |
| 20 | 73 |

รายการรูป(ต่อ)

| รูป | | หน้า |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 21 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยดเฮกเซนกับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีเทน (% hexane retained) | 74 |
| 22 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดในการสกัดแบบหยดกับเปอร์เซ็นต์ CNSL ที่สกัดได้(ข้อมูลจากตาราง 25) | 76 |
| 23 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm ในการสกัดแบบหยดกับ% CNSL ที่ได้ | 80 |
| 24 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm ในการสกัดแบบหยดกับปริมาณ CNSL ที่ได้ | 81 |
| 25 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในแต่ละเบดกับเปอร์เซ็นต์ CNSL ที่สกัดได้สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm โดยข้อมูลจากตาราง 36 | 84 |
| 26 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในแต่ละเบดกับเปอร์เซ็นต์ CNSL ที่สกัดได้สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm โดยข้อมูลจากตาราง 37 | 86 |
| 27 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในแต่ละเบดกับเปอร์เซ็นต์ CNSL ที่สกัดได้สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm โดยข้อมูลจากตาราง 38 | 88 |
| 28 | ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับเบดกับ% CNSL ที่สกัดได้ในแต่ละเบด(%w/w) | 92 |
| 29 | ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับเบดกับปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ในแต่ละเบด | 92 |
| 30 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีโคเวอรี (% hexane recovery) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 94 |
| 31 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเวลารีเทนชัน(retention time) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 94 |
| 32 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีเทน (% hexane retained) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm | 95 |
| 33 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีโคเวอรี (% hexane recovery) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 97 |

รายการรูป(ต่อ)

| รูป | | หน้า |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 34 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเวลารีเทนชัน(retention time)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 97 |
| 35 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีเทน (% hexane retained)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm | 98 |
| 36 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีโคเวอรี (% hexane recovery)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 100 |
| 37 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเวลารีเทนชัน(retention time)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 100 |
| 38 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm)กับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนรีเทน (% hexane retained)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm | 101 |
| 39 | %CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบดรวม(w/w)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2,5 และ 9 mm | 105 |
| 40 | %CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่สกัดได้ในแต่ละเบด(w/w)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2,5 และ 9 mm | 105 |
| 41 | ความสัมพันธ์ระหว่าง θ กับ $1 - S = y_{out} / Mx_0$ สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm | 111 |
| 42 | ความสัมพันธ์ระหว่าง θ กับ $S = \left(\frac{Y_{out} - Mx_0}{Y_{in} - Mx_0} \right)$ สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm | 113 |
| 43 | $\log(y_{out} / Mx_0)$ กับ θ จากการสกัดซูโครสจากผงกาแฟขนาด -6+8 mesh โดยใช้น้ำปราศจากตัวละลายป้อนจากล่างขึ้นบนและเริ่มต้นการสกัดโดยไม่มีเอ็กแทรกเต็มเต็มอยู่ในเบด | 117 |
| 44 | $\log(y_{out} / Mx_0)$ กับ t และ θ จากการสกัดซูโครสจากทรงกลมอลูมินาที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.67 mm โดยใช้น้ำปราศจากตัวละลายป้อนจากล่างขึ้นบนและเริ่มต้นการสกัดโดยมีเอ็กแทรกที่สมดุลกับทรงกลมเต็มเต็มอยู่ในเบด | 118 |
| 45 | $\log(y_{out} / Mx_0)$ กับ t และ θ จากการสกัดซูโครสจากทรงกลมอลูมินาที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.67 mm โดยใช้น้ำปราศจากตัวละลายป้อนจากบนลง | 119 |

รายการรูป(ต่อ)

| รูป | | หน้า |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| | ล้างและเริ่มต้นการสกัดโดยมีเอ็กแทรกที่สมดุลกับทรงกลมเต็มเต็มอยู่ในเบด | |
| 46 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัดCNSLกับเปอร์เซ็นต์CNSLที่สกัดได้ | 122 |
| 47 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัดCNSLกับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนตรีโคเวอรี (% hexane recovery) | 123 |
| 48 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัดCNSLกับเปอร์เซ็นต์เฮกเซนที่ค้างอยู่ในเบด | 123 |
| 49 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัดCNSLกับเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเฮกเซน(% hexane loss) | 124 |

รายการรูปผนวก

| รูปผนวก | | หน้า |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | การดูแลมวลสารในการสกัดCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้เฮกเซน | 166 |
| 2 | ตัวอย่างการดูแลมวลสารเพื่อคำนวณความเข้มข้นของCNSLในเฟสของแข็งแบบคิดรวมของแข็งเฉื่อย | 177 |

ตัวย่อและสัญลักษณ์

| | |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------|
| A | =พื้นที่ที่ใช้ถ่ายโอนมวล, m^2 |
| A_e | =พื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, m^2/m^3 |
| A_x, A_y | =พื้นที่ตัดขวางของการไหลของเฟสของแข็งและของเหลวตามลำดับ, m^2 |
| a | =รัศมีของทรงกลม ทรงกระบอกหรือครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นแบน, m |
| a_s | = a สำหรับแผ่นแบนไม่จำกัดขนาด, m |
| a_c | = a สำหรับทรงกระบอกไม่จำกัดขนาด, m |
| Bi | =ไบออตน์เบอร์ของการถ่ายโอนมวล, kMa/D_s |
| C | =ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของไหล, mol/m^3 |
| C_i | =ฟังก์ชันของเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น |
| C_{ic} | = C_i สำหรับทรงกระบอกไม่จำกัดขนาด |
| C_{is} | = C_i สำหรับแผ่นแบนไม่จำกัดขนาด |
| D_a | =สัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวแกนของตัวละลายในส่วนสกัดในเบตนิ่ง, m^2/s |
| D_l | =สัมประสิทธิ์การแพร่ตามยาว, m^2/s |
| D_s | =สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายในเฟสของแข็ง, m^2/s |
| D_x | =สัมประสิทธิ์การแพร่ปรับเปลี่ยนในเฟสของแข็ง, m^2/s |
| D_y | =สัมประสิทธิ์การแพร่ปรับเปลี่ยนในเฟสส่วนสกัด, m^2/s |
| E' | =มวลของส่วนสกัด, kg |
| k, k_s | =สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของตัวละลาย, m/s |
| L | =ความลึกของเบต, m |
| L_o | =อัตราการผลิตเชิงปริมาตรของส่วนสกัดเมื่อเริ่มต้น, m^3/s |
| \tilde{L}_i | =อัตราการผลิตเชิงปริมาตรของส่วนสกัดที่เวลาใดๆตามความยาวปฏิกรณ์, m^3/s |

ตัวย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

| | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| l | =รัศมีของทรงกลม ทรงกระบอกหรือครึ่งหนึ่งของ ความหนาของแผ่นแบน, m |
| M | =สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย, $(Y/X)^*$ |
| m | =สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย, $(y/x)^*$ |
| N_s | =ฟลักซ์ของการถ่ายโอนมวล |
| q_i | =ความเข้มข้นภายในอนุภาค, mol/ m ³ |
| q'' | =ความเข้มข้นเฉลี่ยต่อปริมาตรในอนุภาค, mol/ m ³ |
| R | =เพคเลทนัมเบอร์, LL_i / D_y |
| R' | =มวลของของแข็ง, kg |
| Re_p | =เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค, $2apv_b / \mu$ |
| r | =ระยะทางตามแนวรัศมี, m |
| S | =ความเข้มข้นไร้มิติ, $(y_{out} - Mx_0)/(y_{in} - Mx_0)$ |
| Sc | =ชmidt นัมเบอร์, $\mu / D_i \rho$ |
| S_0 | =อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อเริ่มต้น, m ³ /s |
| S_f | =อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็งที่ออกจากปฏิกรณ์, m ³ /s |
| t | =เวลาการสกัด, s |
| t_f | =เวลาที่ส่วนสกัดไหลผ่านเบดตลอดความยาวเบดหรือเวลา เรลซีเดนซ์, s |
| | =ความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยในรูพรุน, m/s |
| V_b | =ความเร็วของของไหลในเบด, m/s |
| V_s | =ปริมาตรของของแข็ง, m ³ |
| v | =ดัชนีรูปทรง มีค่าเป็นหนึ่งสำหรับแผ่นแบน สองสำหรับทรง กระบอกและสามสำหรับกลม |
| v_b | =ความเร็วของของไหล, m/s |
| X | $= (x - x^*) / (x_0 - x^*)$ |
| x, x_i | =ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง, kg/ m ³ , g/cm ³ |

ตัวย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

| | |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| x_0 | =ค่าเริ่มต้นของ x , kg/m^3 , g/cm^3 |
| x^* | =ค่าสมดุลของ x , kg/m^3 , g/cm^3 |
| \bar{x} | =ความเข้มข้นเฉลี่ยของตัวละลายในของแข็งที่จุดใดๆตามความยาวปฏิกรณ์, kg/m^3 |
| x_f | =ความเข้มข้นของตัวละลายในของแข็งที่ออกจากปฏิกรณ์, kg/m^3 |
| x_{\max} | =ความเข้มข้นสูงสุดที่เวลาใดๆ, kg/m^3 |
| x_s | =ความเข้มข้นที่ผิว, kg/m^3 |
| x_i | =ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งแบบคิดรวม วัสดุเฉื่อย, kg/m^3 , g/cm^3 |
| Y | $= (y - y^*) / (y_0 - y^*)$ |
| y | =ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสส่วนสกัด, kg/m^3 |
| y_0, y_{in} | =ค่าเริ่มต้นของ y หรือ y ที่เข้าเฟสของแข็งเมื่อเริ่มต้น, kg/m^3 |
| y^* | =ค่าสมดุลของ y , kg/m^3 |
| \bar{y} | =ความเข้มข้นเฉลี่ยของตัวละลายในส่วนสกัดที่จุดใดๆตามความยาวปฏิกรณ์, kg/m^3 |
| y_f | =ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนสกัดที่ออกจากปฏิกรณ์, kg/m^3 |
| y_{out} | = y ของส่วนสกัดที่ออกจากเฟสของแข็ง, kg/m^3 |
| z | =ระยะทางตามแนวการไหล, m =ปัจจัยการชะละลาย, mE'/R' |
| β | $= M\varepsilon / (1 - \varepsilon)$ |
| ε | =ความพรุนระหว่างอนุภาค, m^3/m^3 =เวลาไร้มิติ, $(t - t_f) / t_f$ |
| μ | =ความหนืดของส่วนสกัด, kg/m.s |
| ρ | =ความหนาแน่นของส่วนสกัด, kg/m^3 |
| τ, τ_f | =พิคส์นัมเบอร์, $D_s t / a^2$ หรือ $D_s t_f / a^2$ |

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชพื้นเมืองของบราซิล มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Anacardium Occidentale* Linn. อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยโดยชาวโปรตุเกสในคริสต์ศตวรรษที่ 16 เป็นพืชเขตร้อนที่เขียวตลอดปี และเติบโตที่ระดับความสูงต่ำกว่า 1000 ฟุต นอกจากนั้นพืชชนิดนี้ก็แพร่หลายในเกาะอันดามัน ออฟริกาตะวันออก โมซัมบิก แทนซาเนีย ฟิลิปปินส์และประเทศในเขตร้อนอื่นๆ (Aggarwal, 1972) สำหรับมะม่วงหิมพานต์ในประเทศไทยนั้น ไม่มีหลักฐานยืนยันที่แน่นอนว่าเข้ามาตั้งแต่เมื่อไร แต่พอสันนิษฐานได้ว่า ประมาณปีพุทธศักราช 2444 พระยารัษฎานุประดิษฐ์ (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ขณะที่ย้ายตำแหน่งเทศาภิบาลเป็นคนแรกที่นำเอาเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาจากมาเลเซีย มาปลูกที่จังหวัดตรัง (พัน มาสิวรรณและทุน อารีย์, 2522)

มะม่วงหิมพานต์เป็นไม้ผลเมืองร้อนที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่งและเป็นพืชขอเนกประสงค์ ทั้งนี้เพราะสามารถนำส่วนต่างๆของต้นมาใช้ประโยชน์ได้มากตั้งแต่ ราก ลำต้น เปลือก ใบ ยอดอ่อน ผลจริง ผลปลอม น้ำมันจากเปลือกผล เยื่อหุ้มเมล็ดในและเมล็ดใน (วิจิตต์วรรณชิต, 2528) แต่ส่วนที่สำคัญที่มีค่าในเชิงการค้าขณะนี้มีเพียงสองส่วนคือ เมล็ดในสำหรับบริโภคเป็นอาหาร และน้ำมันจากเปลือกผล เพื่อประโยชน์ทางการแพทย์และวงการอุตสาหกรรม

ผลจริงของมะม่วงหิมพานต์คือส่วนที่เรียกว่าเมล็ดติดอยู่ตรงปลายก้านดอก ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่าเปลือก (Cashew nut shell) เยื่อหุ้มเปลือก (Cashew testa) และเมล็ดใน (cashew kernel) เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นำมาบดและสกัด จะได้น้ำมันเหลวชั้นสีน้ำตาลเข้มเรียกว่า cashew nut shell liquid (CNSL) (ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี, 2534) ในน้ำมันจะมีสารหลักๆ สองตัวคือ กรดอนาคาร์ดิค (Anacardic acid) 80-90% และคาร์ดอล (Cardol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่งอีก 10-20% นอกจากนี้ยังมียังมีอนุพันธ์ต่างๆของสารหลักทั้งสองตัวนี้อีกเล็กน้อยผสมอยู่ด้วย (สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต, 2532) น้ำมันที่ได้จะนำไปใช้ในทางการแพทย์โดยจะใช้ทำยาแก้โรคเหน็บชา เลือดคั่ง โรคเท้าช้าง โรคผิวหนังและโรคเท้าแตก ส่วนในทาง

อุตสาหกรรม นิยมใช้ทำผ้าเบรคและผ้าครัช เพราะมีคุณสมบัติทนต่อความร้อน ทนต่อแรงเสียดทานได้ดี ใช้เป็นฉนวนป้องกันไฟฟ้า กระเบื้อง ยางปูพื้น น้ำมันชักเงา ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก ผสมกับน้ำมันพืชบางชนิดสามารถทำเป็นกาว ผสมกับน้ำมันก๊าด ใช้กำจัดตัวอ่อนยุง เป็นต้น (ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี, 2532)

จะเห็นว่านอกจากเนื้อในของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมในตลาดโลกแล้ว น้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ก็เป็นส่วนที่มีความสำคัญในเชิงการค้าอีกด้วย และเป็นที่ยอมรับกันว่า น้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นแหล่งหนึ่งของฟินอลที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Aggarwal, 1979)

การนำเอาเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ซึ่งได้จากการกะเทาะเมล็ดในมาสกัดน้ำมันนั้น เป็นการนำเอาเศษเหลือจากการผลิตเนื้อในมาใช้ประโยชน์นั่นเอง ในปัจจุบันโรงงานกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีอยู่หลายโรงโดยเฉพาะที่ภาคใต้ของประเทศ ซึ่งส่งผลให้เปลือกที่เหลือจากโรงงานเหล่านี้มีเป็นจำนวนมาก ในอนาคตอันใกล้นี้ น้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะเป็นอุตสาหกรรมที่ทำเงินให้กับประเทศ โดยในปัจจุบันอินเดียเป็นประเทศที่ส่งออกน้ำมันจากเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นอันดับหนึ่งของโลก ตลาดนำเข้าที่สำคัญได้แก่ สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย เกาหลีใต้ ฝรั่งเศส เนเธอร์แลนด์ เซดโกสโลวาเกียและเบลเยียม (สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต, 2532)

การตรวจเอกสาร

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

กองเกษตรเคมีได้ทำการศึกษากกรรมวิธีการผลิตน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) ผลจากการบีบด้วยเครื่องไฮดรอลิก เพรส (Hydraulic Press) ในห้องปฏิบัติการตีควิจัฟิช น้ำมัน กองเกษตรเคมีพบว่า CNSL เป็นของเหลวสีน้ำตาลคล้ำ เหนียวข้น มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) ทุกชนิด เป็นสารพิษ ทำให้ผิวหนังพุพองและเปื่อยได้ เมื่อน้ำมันดังกล่าวได้รับความร้อนสูง บางส่วนจะระเหยเป็นไอ มีกลิ่นฉุนจัด กัดเยื่อจมูกและนิยน์ตา (ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี, 2534)

Aggarwal (1972) พบว่า CNSL มีอยู่ในเปลือกเมล็ดประมาณ 32-34% โดยน้ำหนัก โดยที่เปลือกเมล็ดนี้คิดเป็นประมาณ 67% ของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ด CNSL จะเป็นตัวป้องกันแมลงโดยธรรมชาติ ไม่ให้เข้าไปทำลายเมล็ดใน (Cashew nut kernel) ซึ่งเป็นส่วนที่มีลักษณะโค้งเล็กน้อย มีเนื้อสัมผัสละเอียด และมีกลิ่นรสเป็นที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ (2534) พบว่า CNSL มีอยู่ในเปลือกเมล็ด ประมาณร้อยละ 18-30 โดยน้ำหนัก ซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์ของมะม่วงหิมพานต์ ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี (2534) รายงานว่า น้ำมันชนิดนี้ประกอบด้วยสารเคมีต่างๆดังนี้คือ กรดอนาคาร์ดิค (Anacardic acid) 82% คาร์ดอล(Cardol) 13.8% คาร์ดานอล (Cardanol) 1.6% และเมทิลคาร์ดอล (Methylcardol)อีก 2.6% ซึ่งสารเหล่านี้เมื่อนำไปผสมกับสารเคมีอื่นๆจะเกิดสารใหม่ขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆได้

Tychopoulos และ Tyman (1990) ได้แสดงองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ดังตาราง 1

กองเกษตรเคมี (2534) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี -ฟิสิกส์ของ CNSL ดังแสดงในตาราง 2 ตัวเลขเหล่านี้จะเป็นข้อมูลในการนำ CNSL ไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่อไป

ตาราง 1 องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
(General Chemical Composition)

| องค์ประกอบ(Chemical Composition) | ร้อยละ(%) |
|----------------------------------|-----------|
| ความชื้น(moisture) | 8-10 |
| น้ำมันCNSL(oil) | 40-48 |
| โปรตีน(protein) | 18-20 |
| คาร์โบไฮเดรต(carbohydrate) | 38-40 |
| เส้นใย(fiber) | 1-1.5 |

ที่มา: Tychopoulos and Tymour (1990)

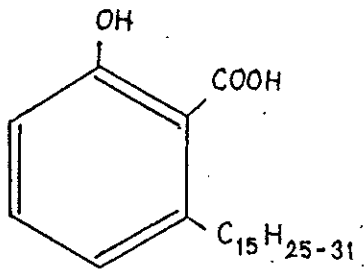
ตาราง 2 คุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ในCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 3 สายพันธุ์

| รายการ | ศก.60-1 | ศก.60-2 | พันธุ์ SKA |
|------------------------------------|---------|---------|------------|
| CNSL(%) (Hydraulic Press) | 23.00 | 18.70 | 21.10 |
| Specific gravity 25/25 °C | 0.9845 | 0.9900 | 0.9858 |
| Refractive index 25 °C | 1.5220 | 1.5420 | 1.5245 |
| Iodine value | 197 | 201 | 196 |
| Saponifiable matter | 91 | 95 | 95 |
| Unsaponifiable matter | 0.55 | 0.54 | 0.43 |
| Loss of heating ที่ 250 °C 30 นาที | 88.38 | * | * |
| IS 840-1964 | | | |

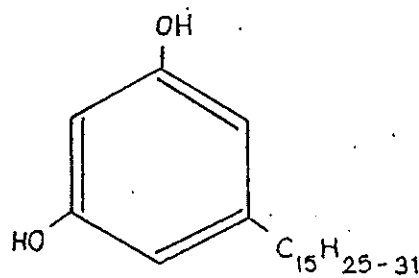
*ไม่รายงานผลการวิเคราะห์

ที่มา: กองเกษตรเคมี (2534)

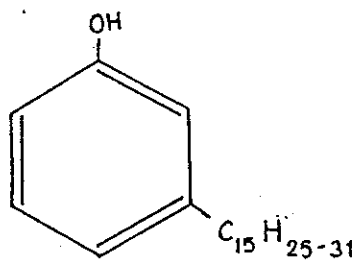
สูตรโครงสร้างสารเคมีที่มีอยู่ใน CNSL คือ



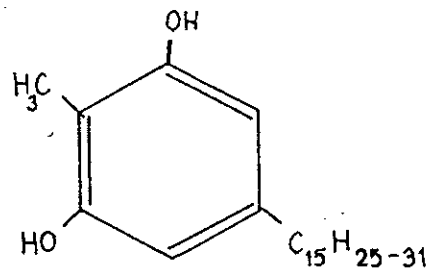
Anacardic Acid



Cardol



Cardanol



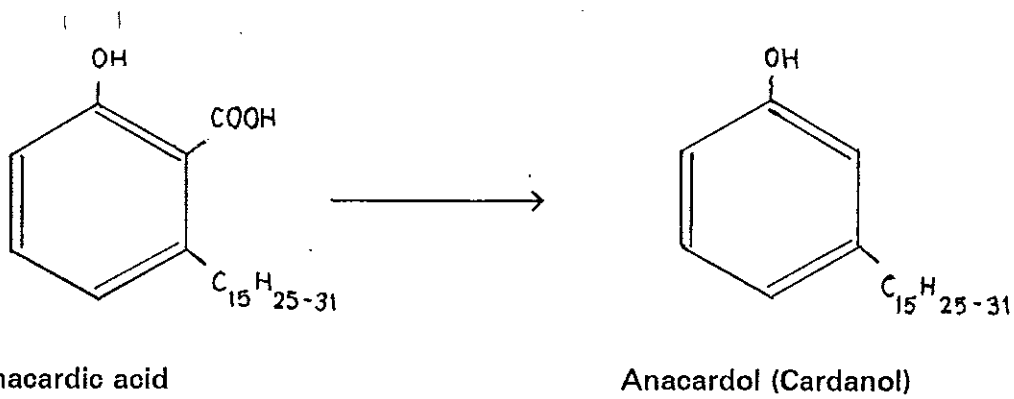
2-Methylcardol

รูป 1 สูตรโครงสร้างสารเคมีใน CNSL

ที่มา : Tychopoulos และ Tyman (1990)

Gonsaves และ Costa (1975) กล่าวว่ากรดอนุคาร์ดิกเป็นส่วนประกอบสำคัญของ CNSL และเป็นสารที่มีความคงตัวสูง กรดอนุคาร์ดิกนี้เมื่อถูกความร้อนจะเกิดการดีคาร์บอกซิเลท (Decarboxylation) ไปเป็นคาร์ดานอลหรืออนุคาร์ดอล (Anacardol) กระบวนการดีคาร์บอกซิเลทจะยิ่งเกิดง่ายที่อุณหภูมิสูงถึง 220 °C

ดังนั้นน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผลิตด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย จะมีคุณสมบัติต่างจากน้ำมันที่ได้จากการเคี้ยวหรือทอดซึ่งมีการให้ความร้อน น้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน มีมาตรฐานที่ใช้ทั่วไปสองมาตรฐานคือ มาตรฐาน BP และมาตรฐาน IRVINGTON ดังแสดงในตารางที่ 3 (กรรณิการ์ สถาปัตตานนท์ และคณะ, 2532)



รูปที่ 2 Decarboxylation of Anacardic acid

ที่มา : Tychopoulos และ Tyman (1990)

ตาราง 3 มาตรฐานน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

| รายการ | มาตรฐาน BP | มาตรฐาน IRVINGTON |
|---------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| 1. สีสกปรกร้อยละ | ไม่เกิน 1.0 | ไม่เกิน 1.0 |
| 2. ความถ่วงจำเพาะ 25 °C | 0.955-0.975 | 0.943-0.968 |
| 3. ความหนืดที่ 25 °C (cp) | ไม่เกิน 600 | ไม่เกิน 600 |
| 4. ค่าไอโอดีน | ไม่น้อยกว่า 220 | -- |
| 5. ความชื้นร้อยละ | ไม่เกิน 1.0 | -- |
| 6. เถ้าร้อยละ | ไม่เกิน 1.0 | -- |
| 7. สารที่ระเหยเป็นไอได้ร้อยละ | -- | ไม่เกิน 2.0 |
| 8. Polymerization Hardening time 7.5--16 (min) | -- | -- |
| 9. Test Tube gel (min) | -- | ไม่เกิน 7 |

ที่มา: กรรณิการ์ สถาปิตานนท์ และคณะ (2532)

ประโยชน์ของน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์(CNSL)

จากรายงานของสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต (2532) ได้กล่าวถึงประโยชน์ของ CNSL ดังนี้

1. ใช้ทำกาวชนิดดี เมื่อผสมของเหลวที่ได้จากการสกัดกับเคซีน (casein) จะได้กาวชนิดที่มีคุณสมบัติสามารถแข็งตัวทั้งในสภาพให้และไม่ให้ความร้อนเช่น กาวสำหรับไม้อัดและถ้าเติมสารเพิ่มความแข็ง(Hardener) เช่นคอปเปอร์คลอไรด์(CuCl_2) ลงไป จะทำให้กาวเพิ่มคุณสมบัติด้านกันน้ำ กาวประเภทนี้อาจเตรียมได้จากการโพลีเมอไรเซชัน(Polymerization)ของCNSLกับฟีนอลหรือยูเรียกับฟอร์มอลดีไฮด์และโซดาไฟ

2. ใช้ทำน้ำยาเคลือบไม้อัด ถ้าใช้CNSLผสมกับโซเดียมโอเลอเอท จะได้สารที่เมื่อใช้ทาเคลือบลงบนแผ่นไม้อัด แล้วพ่นทับด้วยสารละลายโซดาไฟ 4% ที่มีฟอร์มอลดีไฮด์ปนอยู่ด้วย นำไปอบที่อุณหภูมิไม่เกิน $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ฟิล์มเคลือบที่มีความยืดหยุ่นตัวสูง เหนียว ไม่ลอกและเปราะง่าย และCNSLที่ผสมกับโซเดียมโอเลอเอท เมื่อเติมติตาเนียมออกไซด์ สามารถใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษได้

3. ใช้ทำสีทาโลหะ CNSLผสมกับฟอร์มาลินและน้ำมันชักแห้ง เป็นสีทาโลหะที่สามารถป้องกันฤทธิ์กัดกร่อนของน้ำเค็ม ฤทธิ์กรดต่างได้ดี

4. ใช้ปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในCNSLมีสารอนุภาคคาร์บอนอยู่เล็กน้อยประมาณ 1.5% ถ้าสกัดสารตัวนี้ออกมาแล้วผสมในเนื้ออย่างสังเคราะห์ จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติต่างๆเช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงฉีกและตัวทำละลาย รวมทั้งคุณสมบัติในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น

5. ใช้ทำน้ำยาแช่หนังฟอก ผสมCNSLลงในน้ำยาฟอกหนัง (resistant fat licouring agent) จะช่วยให้หนังที่ฟอกแล้วมีคุณสมบัติดีขึ้น ทนทานต่อฤทธิ์ทำลายของสารต่างๆ

6. ใช้ในอุตสาหกรรมทำผ้าเบรคและผ้าครีษรถยนต์ สารในCNSLใช้ทำยางลดแรงเสียดสีในอุปกรณ์ใช้งานที่ต้องผจญการสัมผัสพื้นผิวบ่อยๆเช่น ผ้าเบรค แผ่นครีษในรถยนต์ ฯลฯ ได้ดี จากสถิติพบว่า CNSLที่ประเทศต่างๆส่งเข้าปริมาณถึง 80-90% ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าวนี้ เนื่องจากCNSL จะช่วยให้สารต่างๆเกาะกันได้ดีขึ้น มีความยืดหยุ่น สามารถทนความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานเวลาเบรค ผ้าเบรคและผ้าครีษจะคงทนไม่สึกง่าย และมีประสิทธิภาพในการห้ามล้อ

7. ใช้เป็นส่วนผสมของสีเคลือบชนิดต่างๆ สีจะมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมเช่น ความชื้น ได้ดียิ่งขึ้น

8. ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันวาร์นิช(Varnish)และแลคเกอร์(Lacquer) จะทำให้ วาร์นิชและแลคเกอร์ที่ได้มีคุณสมบัติดีขึ้น น้ำยาเคลือบจะมีความยืดหยุ่น ติดแน่นไม่ลอกหลุด ไม่แตกหักหรือเปราะง่ายเมื่อแห้งเช่น น้ำมันวาร์นิชหรือแลคเกอร์ที่ใช้ทาเรือ เคลือบแห อวน จักรเย็บผ้า จักรยานยนต์ หรือใช้ทาไม้กั้นปลวกได้อีกด้วย

9. ใช้เป็นส่วนผสมของเรซิน พลาสติก สายพาน กาว กระเบื้อง ยางปูพื้น และผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ

10. ใช้ในทางการแพทย์ ทางด้านการแพทย์ศัลยกรรมตกแต่งใช้เป็นยาลอกฝ้า กระที่ ผิวน้ำ ใช้เป็นยารักษาโรคเรื้อน โรคเท้าช้าง วัณโรคผิวน้ำ โรคหูด ตาปลาและโรคเท้าแตก

11. ใช้ประโยชน์ทางการเกษตร กองเกษตรเคมีได้พัฒนาสูตรที่เข้ามาตราฐานในการใช้ปราบศัตรูพืชซึ่งได้แก่ แมลงและเชื้อจุลินทรีย์ ที่ทำลายพืชและผลิตผลเกษตร นอกจากนี้ยังใช้กำจัดตัวอ่อนของยุงด้วย

Tyman และคณะ (1989) รายงานว่า CNSLธรรมชาติ (Natural CNSL) เป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์ในการใช้งานหลายๆอย่าง โดยกรดอนุคาร์บิกจะเป็นตัวเสริมหน้าที่ที่คาร์บอนอลไม่สามารถทำได้

CNSLธรรมชาติ เมื่อนำไปผ่านการโพลีเมอไรเซชัน(Polymerization)ด้วยพาราฟอร์มัลดีไฮด์ (Paraformaldehyde)ในสารละลายต่าง จะใช้เป็นวัสดุในการเตรียมพาร์ติเคิลบอร์ด (Particle Board) (European Patent 001561, 1980) มันสามารถที่จะเปลี่ยนไปเป็นอัลดอกไซม์ (Aldoxime)ซึ่งเป็นสารละลายที่มีค่าในการสกัดทองแดง (Unit Kingdom Patent, 1981) และหลังจากเปลี่ยนแปลงทางเคมีต่อไปอีก มันสามารถที่จะใช้เป็นตัวสกัดแอนไอออนอื่นๆ(Tyman and Mehet ,privated communication,cited by Tyman et al., 1989)

จากประโยชน์ต่างๆดังกล่าวจะเห็นว่า CNSL สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมายในวงการอุตสาหกรรม ในประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น ได้สั่งซื้อ CNSL จากประเทศอินเดียและประเทศแถบอเมริกากลางปีหนึ่งๆนับเป็นเงินหลายร้อยล้านบาท ประเทศไทยเรามีภูมิอากาศที่จะปลูกมะม่วงหิมพานต์ได้เป็นอย่างดี ปัจจุบันรัฐบาลได้สนับสนุนและส่งเสริมให้มีการปลูกต้นมะม่วงหิมพานต์มากขึ้นในแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนี้เรายังสามารถผลิต CNSLได้อย่างเพียงพอ (ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี, 2534)

วิธีการสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

1. การหีบหรือการบีบอัดด้วยเครื่องอัด เช่น ไฮดรอลิค เพรส (Hydraulic Press) หรือสกรูว์ เพรส (Screw Press) วิธีนี้ยังคงมีน้ำมันเหลือในกากประมาณ 10-15%

2. การให้ความร้อนเช่น การอบด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 250 °C การย่าง

3. การสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยมีการบดละเอียดก่อนผ่านตัวทำละลาย

วิธีที่ปรับปรุงแล้วเพื่อใช้ในทางการค้าคือ การสกัดด้วยน้ำมันร้อน (Hot-Oil Process) โดยการผ่านเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปยังน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีอุณหภูมิ 180-190 °C ใน singer layer บนสายพานความเร็ว 3 เมตรต่อนาที กระบวนการนี้ให้ผลได้ 50% ของน้ำมันที่มีทั้งหมด และเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันมากกว่านี้ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะถูกนำไปผ่านกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

1. การไล่น้ำมันออก (Expeller method) น้ำมันที่เหลือเกือบทั้งหมดจะถูกสกัดออกจากเปลือกโดยวิธีการหีบโดยใช้ Screw Type Oil Expeller

2. การให้ความร้อนอย่างง่าย (Simple Heating) การให้ความร้อนแก่เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยตรงจะทำให้ได้ CNSL ส่วนที่เหลือเป็นจำนวนมาก CNSL จะไหลลงทางด้านล่างของถังเก็บ (container) แล้วถูกแยกออกไป

3. การให้ความร้อนโดยไอน้ำ (Steam heating) เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะถูกให้ความร้อนในไอน้ำอย่างรวดเร็ว น้ำมันจะถูกแยกออกจากน้ำที่ควบแน่น

4. การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะถูกนำมาสกัดด้วยตัวทำละลาย

เทคนิคต่างๆในการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Method of solvent extraction)

1. การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบแช่ (Static Solvent Extraction)

Tyman และคณะ (1989) ใช้ตัวทำละลายสามชนิดคือ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbontetrachloride), ไลท์ ปีโตรเลียม (Light petroleum) และไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether) ในการสกัดแบบแช่โดยใช้วัตถุดิบคือ เปลือกครึ่งซีกจากการผ่าโดยใช้เครื่องมือกล เปลือกครึ่งซีกจากการผ่าโดยใช้เครื่องมือกลแล้วบดลดขนาดและเปลือกที่ลดขนาดโดยใช้ค้อนทุบ ในการทดลองนั้นใช้วัตถุดิบ 200 กรัมต่อตัวทำละลาย 400 กรัม และปล่อยให้วัตถุดิบแช่อยู่ในตัวทำละลายเป็นเวลา 1 สัปดาห์ที่อุณหภูมิห้อง

พบว่า เมื่อใช้เปลือกฝ้ายที่กลบขนาดลงในการสกัดแบบแช่อย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 16 ชั่วโมงด้วยตัวทำละลายทั้งสามชนิดให้ผลได้ไม่แตกต่างกันคือประมาณ 35 % ของวัตถุดิบ ตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของการทดลองอื่น ๆ ในการสกัดแบบแช่คือตัวอย่างที่ใช้ไดเอทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลายดังแสดงในตาราง 4

Tyman และคณะ (1989) พบว่าเมื่อใช้เครื่องบดบดลดขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แล้วนำไปแช่ในตัวทำละลาย กับเมื่อใช้เปลือกครึ่งซีกในตอนเริ่มต้นแล้วบดลดขนาดในภายหลัง จะให้ผลได้ไม่แตกต่างกัน ส่วนเปลือกที่ใช้ค้อนทุบนั้นก่อนทุบจะต้องแช่เย็น (chilling) เปลือกเสียก่อนเพื่อให้พินอลแข็งตัว ป้องกันการไหลเยิ้มของ CNSL ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะได้ชิ้นส่วนของเปลือกที่ยังมีขนาดใหญ่ แต่พบว่าแรงกลจากการทุบทำให้โครงสร้างภายในเปลือกมีการแตกร้าวเพียงพอที่จะให้ตัวทำละลายจำนวนมากซึมผ่านไปได้

อย่างไรก็ตามในทุกๆ การทดลองนั้นพบว่าการกรอง CNSL ที่ได้ทำได้ช้าและต้องใช้ปริมาณตัวทำละลายจำนวนมาก ดังนั้นการทดลองสกัด CNSL ในซอกเคิลท์ (Soxhlet Solvent Extraction) จึงเป็นวิธีที่ดีกว่า

จันทนา คงสังข์และมลฤดี ประภากรรัตน (2536) รายงานว่า เมื่อใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย จะให้ผลได้สูงกว่าเอทานอล และพบว่าเวลาในการแช่ไม่มีผลต่อ % hexane recovery โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 79-80 % เมื่อใช้สัดส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 30 กรัมต่อตัวทำละลาย 150 มิลลิลิตร ในขณะที่ปริมาณเฮกเซนที่ค้างในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะมีค่าประมาณ 6.75 % ของปริมาณเฮกเซนที่ใช้ทั้งหมด และเมื่อลดขนาดเปลือกลง จะได้ผลได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาแช่ไปนานๆ ผลได้จะไม่แตกต่างกันเนื่องจากเกิดสมดุลในระหว่างการแช่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการลดขนาดเปลือกโดยการทุบด้วยค้อนทำให้โครงสร้างภายในของเปลือกร้าว ตัวทำละลายจึงซึมเข้าไปสกัด CNSL ได้ดีถึงแม้ว่าเปลือกเมล็ดอาจจะมีขนาดใหญ่อยู่ก็ตาม นอกจากนี้ก็ได้พบว่า การแช่เปลือกเมล็ดพร้อมกับการเขย่าจะทำให้ได้ CNSL เร็วขึ้นและสามารถลดปริมาณการใช้ตัวทำละลายลงได้

เมื่อทดลองเปรียบเทียบการสกัดแบบหยดโดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซน 50 มิลลิลิตร ด้วยอัตราการหยด 1.22 มิลลิลิตรต่อนาที กับการสกัดแบบแช่ โดยการแช่เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในตัวทำละลายเฮกเซน 100 มิลลิลิตร พร้อมทำการเขย่าเป็นเวลา 5 นาที กับการแช่เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในตัวทำละลายเฮกเซน 150 มิลลิลิตร พร้อมทำการเขย่าเป็นเวลา 30 นาที พบว่าให้ผลได้ไม่ต่างกันมากนักคือประมาณ 25-30 % แต่การสกัดแบบหยดจะใช้ตัวทำละลายน้อยกว่า

ตาราง 4 การสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้เทคนิคต่างๆสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ผ่าซีก
ด้วยมือและเครื่องมือกล

| | Experiment 1 | Experiment 2 | Experiment 3 | Experiment 4 |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Type of extraction | static | Soxhlet | Ultrasonic | Soxhlet |
| Shell weight (g) | 100 | 800 | 45.2* | 43.08** |
| Treatments | | | | |
| 1st extraction | Intact half shells | Intact half shells | Manually shelled (10-20mm) | Manually shelled (10-20mm) |
| 2nd extraction | Disintegrated (1-2mm) | Disintegrated (1-2mm) | Disintegrated (2-3mm) | Disintegrated (1-2mm) |
| Solvent type | Diethyl ether | Light petroleum | Light petroleum | Light petroleum |
| Solvent volume (ml) | 400+400 | 3000 | 120+120 | 120+120 |
| Extract times (hr) | 168+168 | 12+10 | 17+17 | 6+16 |
| Yield (g) | 10.29+24.01 | 48.5+22.60 | 11.04+4.61 | 11.15+4.06 |
| Yield (%) | 10.29+24.01 | 6.1+28.3 | 24.4+10.2 | 26.0+9.4 |
| total yield (%) | 34.3 | 34.4 | 34.6 | 35.4 |

*Weight of intact raw cashew nut, 62.90 g ; **Weight of intact raw cashew nut, 63.39 g.

ที่มา: Tyman และคณะ (1989)

2. การสกัดโดยใช้ซอกเล็ต (Soxlet Solvent Extraction)

Tyman และคณะ(1989) นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาบดด้วยเครื่องบดให้ได้อนุภาค 1-2 มิลลิเมตร และ 5-15 มิลลิเมตร ที่มีอนุภาคละเอียดปนอยู่ด้วย แล้วนำไปสกัดด้วยไลท์ ปีโตรเลียม ปริมาณ 3000 มิลลิลิตร ในซอกเล็ตเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลได้ 33.7 และ 31 % ตามลำดับ นอกจากนี้เขายังได้ทดลองนำเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ดมาแช่เย็นในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 2-3 นาที แล้วทุบเบาๆด้วยค้อนเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนของเปลือกเมล็ดขนาด

ประมาณ 10-20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำไปสกัดในซอกเล็ทโดยใช้ไลท์ ปีโตรเลียม (40-60 °C) ปริมาณ 120 มิลลิตรเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลได้รวมทั้งหมด 36.4 %

จากหลักฐานการทดลองพบว่า การ बदลดขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ลง มีผลให้เกิดการแตกตัวของไขมันอย่างมากเนื่องจากเปลือกผ่าซีกให้ผลได้เพียง 6.1 % ดังแสดงใน ตัวอย่างการทดลองที่ 2 ตาราง 4 ซึ่งต้องการการ बदลดขนาดลงอีกทำให้ได้ผลได้เพิ่มเป็น 34.4 %

Tyman และคณะ (1989) สรุปว่า การสกัด CNSL โดยวิธีการแช่และโดยวิธีการใช้ ซอกเล็ทให้ผลได้ไม่แตกต่างกัน แต่วิธีการแช่มีความยุ่งยากในขั้นตอนการกรองและต้องใช้ตัวทำ ละลายจำนวนมาก วิธีการใช้ซอกเล็ทจึงประหยัดตัวทำละลายได้ดีกว่าในแง่เศรษฐศาสตร์ อย่างไรก็ตาม Karnovsky (1986) ได้แสดงว่า การสกัดน้ำมันและไขมันนั้น อัตราการละลายของ น้ำมันขณะทำการสกัดมีความสำคัญมากกว่าความต้านทานในการแพร่ของมัน ดังนั้นการสกัด ด้วยซอกเล็ทโดยใช้สารละลายอุณหภูมิเหมือนว่าจะดีกว่าวิธีการแช่ที่อุณหภูมิห้อง ถึงแม้ว่าจะต้อง เสียค่าใช้จ่ายในการเพิ่มอุณหภูมิตัวทำละลายและต้องป้องกันการระเหยของตัวทำละลายโดยใช้ ระบบปิด

ประธาน วงศ์ศรีเวชและสุรียพร สุรัตน์ (2533) ได้ทดลองหาตัวทำละลายที่เหมาะสม ในการสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้ตัวทำละลายสามชนิดคือ เอทานอล เฮกเซน และปีโตรเลียมอีเทอร์ จากนั้นทำการทดลองหาอัตราส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ต่อปริมาตรตัวทำละลายที่เหมาะสม ระยะเวลาในการสกัดที่เหมาะสม และอุณหภูมิในการสกัดที่ เหมาะสมสำหรับการสกัดโดยใช้ซอกเล็ท

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนปริมาณวัตถุดิบ 30 กรัมต่อตัวทำ ละลายเอทานอล เฮกเซน และปีโตรเลียมอีเทอร์ 300 มิลลิตร สกัดเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 89 °C จะได้ผลได้ CNSL 25.67, 23.30 และ 22.17 % ตามลำดับ ตัวทำละลายที่เหมาะสมคือเอทา นอล เพราะให้ผลได้สูงกว่าการใช้เฮกเซนและปีโตรเลียมอีเทอร์ และมีปริมาณที่สูญเสียระหว่าง recovery น้อยมาก เนื่องจากมีจุดเดือดสูงกว่า อัตราส่วนการสกัดที่เหมาะสมคือ น้ำหนักเปลือกที่ बदลดขนาดแล้ว ปริมาณ 30 กรัมต่อเอทานอล 300 มิลลิตร สกัดเป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 89 °C ซึ่งที่สภาวะนี้จะได้ CNSL 90.78 % ของ CNSL ทั้งหมดและคิดเป็น 34.17 % ของเปลือก เมล็ด

3. การสกัดในตัวทำละลายร่วมกับการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียง

(Ultrasound/Solvent Extraction)

Tymanและคณะ(1989) นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปแช่เย็นแล้วใช้ค้อนทุบเพื่อลดขนาดจากนั้นจึงนำไปใส่ในขวดก้นกลม (Round bottom flask) ที่ต่อกับเครื่องควบแน่นน้ำ (Water condenser) โดยใช้ไลท์ ปีโตรเลียมปริมาณ 120 มิลลิลิตร เป็นตัวทำละลายแล้วให้คลื่นความถี่เหนือเสียงเป็นเวลา 17 ชั่วโมง ระหว่างช่วงเวลานี้พบว่าอุณหภูมิของน้ำในอ่าง(bath)เพิ่มขึ้นจาก 15 °C เป็น 20 °C ของผสมที่ได้จะถูกนำมากรองและได้CNSLธรรมชาติปริมาณ 24 % ดังแสดงในตัวอย่างการทดลองที่ 3 ตาราง 4 ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับCNSLธรรมชาติที่ได้ในขั้นตอนแรกของการทดลองโดยใช้ซอคเล็ท (26%) ดังแสดงในตัวอย่างที่ 4 ตาราง 4 หลังจากนั้นจึงนำเปลือกเมล็ดไปบดลดขนาดลงอีกจนมีขนาด 2-3 มิลลิเมตร แล้วให้คลื่นความถี่เหนือเสียงต่อโดยใช้ไลท์ ปีโตรเลียม 120 มิลลิลิตร ซึ่งจะทำให้กรองยากขึ้นแต่จะได้CNSLธรรมชาติเพิ่มเป็น 34.6 %

นอกจากนี้ Tymanและคณะ (1989)ได้ทดลองใช้วิธีการเขย่าเชิงกล (Mechanical agitation technique)ในตัวทำละลายกับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ค้อนทุบ พบว่าได้ผลได้เพียงครึ่งหนึ่ง (15.6 %) ของCNSLธรรมชาติที่มีอยู่ ถึงแม้ว่าวิธีการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงและวิธีใช้ซอคเล็ทจะให้ผลได้ถึง 24 และ 26 % ตามลำดับ ในการที่จะให้ได้ผลได้สูงจึงต้องบดลดขนาดให้เล็กลงไปอีก

Weidner (1989) ได้ใช้เทคนิคคลื่นความถี่เหนือเสียงกับชิ้นส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์CNSLธรรมชาติที่ได้จะถูกดีคาร์บอกซีเลท(Decarboxylated) โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 135 °C เพื่อให้ได้คาร์บอนอลปริมาณเท่ากับคาร์บอนอลในเทคนิคอล CNSL (Technical CNSL) การใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C (ซึ่งเป็นอุณหภูมิธรรมดาในทางอุตสาหกรรม) ก็เพื่อให้เกิดโพลิเมอร์น้อยที่สุดและให้ผลได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการสกัดโดยใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงที่อุณหภูมิห้องกับวิธีใช้ซอคเล็ท พบว่าให้ผลได้ไม่แตกต่างกันและต่างประหยัดการใช้ตัวทำละลายได้มากกว่าวิธีการสกัดแบบแช่ ทั้งวิธีการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงและวิธีใช้ซอคเล็ทจะมีความไวต่อการเขย่าเชิงกลมาก

4. การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบหยด (Trickling)

จันทนา คงสังข์และมลฤดี ประภากรรัตน (2536) ใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายในการสกัดแบบหยด และพบว่าวิธีการสกัดแบบหยดให้ผลได้ไม่แตกต่างกับการสกัดแบบแช่ แต่จะใช้ปริมาณตัวทำละลายน้อยกว่า ในการสกัดแบบหยดได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ขนาด

เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 มิลลิเมตรให้ผลได้สูงกว่าขนาด 5 และ 9 มิลลิเมตร อัตราการหยุดแยกเซนที่ช้าลงจะให้ผลได้สูงขึ้น และเมื่อความหนาของเบด (bed) เพิ่มขึ้นผลได้จะลดลง จากการสกัดแบบหยุดพบว่า เมื่อใช้เฮกเซนปริมาณ 50 มิลลิลิตร อัตราการหยุด 1.22 มิลลิลิตรต่อ นาที สกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 มิลลิเมตรปริมาณ 30 กรัมในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหนึ่งนิ้วจะให้ผลได้ 29.65 %

การสกัด CNSL โดยวิธีการทอด

ปริมาตี สุวิทยารัตน์และวชิระ เสาวภาคย์ (2537) ใช้ไฮดรอลิค เพรส ที่ความดัน 20 ตันต่อตารางนิ้ว หนีบน้ำมันออกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พบว่าได้น้ำมันประมาณ 21 % ของน้ำหนักเปลือกปราศจากความชื้น จากนั้นจึงนำน้ำมันที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C แล้วใส่เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ยังไม่ผ่านการสกัดลงไป ทำการทอดที่อุณหภูมิต่างๆ กันเป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงนำไปหนีบ พบว่าจะได้เปอร์เซ็นต์น้ำมันสูงสุดที่อุณหภูมิ 140 °C ประมาณ 23 % เพราะที่อุณหภูมิสูงกว่านี้อัตราการสูญเสียน้ำมันเนื่องจากการระเหยสูงมาก อย่างไรก็ตามพบว่า การทอดที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะได้น้ำมันมากขึ้น แต่ปริมาณการดีคาร์บอกซีเลทของน้ำมันก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้น้ำมันที่ได้มีคุณสมบัติต่างจากน้ำมันที่ได้จากการสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย สำหรับการทอดในระบบปิดเพื่อลดปัญหาการระเหยจะได้แนวโน้มการได้มาของน้ำมันสูงขึ้นตามอุณหภูมิเช่นเดียวกัน

การชะละลาย (Leaching)

การชะละลายเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลสารแบบหนึ่ง โดยใช้ตัวทำละลายของเหลวเข้าไปสกัดส่วนประกอบที่ต้องการออกจากสารผสมของแข็ง เป็นหนึ่งในหน่วยดำเนินการที่เก่าแก่ที่สุดในอุตสาหกรรมเคมีและอาหาร เมื่อเริ่มแรกนั้นใช้อ่างถึงการนำเอาส่วนประกอบที่ละลายน้ำได้ออกจากเบดนิ่ง (fixed bed) แต่ในปัจจุบันนี้นำมาประยุกต์ใช้กับของแข็ง-ของเหลวทั่วไป (Treybal, 1980)

การพิจารณาการออกแบบ (Design Considerations)

การสกัดของของแข็ง-ของเหลว นั้นจะเกี่ยวข้องกับสองขั้นตอนคือ

1. การสัมผัสของตัวทำละลายของเหลวกับของแข็ง เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนตัวละลายจากของแข็งไปยังตัวทำละลาย
2. การแยกสารละลายที่ได้จากการชะละลายออกจากของแข็งที่ถูกชะละลาย

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการช่วยการดำเนินการที่เกี่ยวข้องอีกสองประการคือ

1. การเตรียมของแข็งเพื่อการสกัด
2. การนำเอาตัวละลายออกจากตัวทำละลาย โดยมักจะใช้การระเหย (Evaporation) หรือ การกลั่น (Distillation)

เพื่อให้ได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ นักออกแบบต้องเลือกวิธีการสัมผัสของของแข็งกับของเหลวที่กระทำได้ในทางปฏิบัติและคุ้มค่า รวมถึงเครื่องมือที่จะใช้ การเลือกเครื่องมือและวิธีการดำเนินการสำหรับการสกัดเฉพาะอย่างหนึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น

1. ลักษณะทางกายภาพของของแข็งที่จะชะ
2. ปริมาณและขนาดของของแข็งซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณตัวละลายที่มี

ลักษณะทางกายภาพของของแข็ง (Physical Characteristics of Solid)

การชะละลายและเทคนิคในการชะละลายจะเป็นผลสำเร็จมากขึ้นอยู่กับการเตรียมของแข็งก่อนการทดลอง (Treybal, 1980) ความรู้เกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของของแข็งจะช่วยในการตัดสินใจว่า ควรนำของแข็งมาเตรียมการอย่างไรก่อนนำไปชะละลายเพื่อให้ตัวละลายกับตัวทำละลายสัมผัสถึงกันได้ดียิ่งขึ้น การเตรียมของแข็งนั้นจะเกี่ยวข้องกับการบดหยาบ การบดละเอียด การตัดออกเป็นชิ้นหรือการทำให้มีรูปร่างเฉพาะแบบเช่น เป็นแผ่นแบน (flake)

อนุภาคตัวละลายจะอยู่ในของแข็งเฉื่อย (inert solid) ในหลายลักษณะเช่น อาจอยู่บนผิวของของแข็ง อาจถูกล้อมรอบด้วยเนื้อวัสดุเฉื่อย อาจเกิดพันธะทางเคมีหรืออาจอยู่ในเซลล์ในกรณีที่เป็นเนื้อเยื่อพืชและสัตว์

ตัวละลายที่ติดอยู่บนผิวของของแข็งสามารถนำออกมาได้ทันทีด้วยตัวทำละลาย ส่วนตัวละลายที่อยู่ในรูพรุนซึ่งล้อมรอบด้วยวัสดุเฉื่อยนั้น ตัวทำละลายจะแพร่เข้าไปภายในเนื้อของของแข็งเพื่อจับกับตัวละลาย แล้วแพร่ออกก่อนการแยกระหว่างตัวทำละลายกับตัวละลายจะเกิดขึ้นในกรณีเช่นนี้ การลดขนาดของของแข็งโดยการบดหยาบ การบดละเอียด การตัดออกเป็นชิ้นจะเพิ่มพื้นที่ผิวของของแข็งในการสัมผัสกับตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามการลดขนาดไปเป็นอนุภาคละเอียดก็มีขีดจำกัด ในบางตัวอย่างปริมาณตัวละลายที่จะได้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณวัสดุที่นำมาสกัด ในกรณีเช่นนี้การบดละเอียดจะทำให้ไม่คุ้มค่า นอกจากนี้การลดขนาดละเอียดจนเกินไป ทำให้เกิดการเกาะกันแน่นของของแข็งระหว่างการสกัด ซึ่งจะขัดขวางการเกิดการไหลแบบอิสระ (free flow) ของตัวทำละลายผ่านชั้นของแข็ง ทำให้การสกัดทำได้ยากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเมื่อสกัดของแข็งละเอียดในสภาวะที่ปราศจากการกวนหรือเขย่า

เมื่อมีการกวนหรือเขย่าจะทำให้เกิดการแพร่ของอนุภาคในตัวทำละลายได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ตัวทำละลายสัมผัสกับของแข็งโดยตรง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการกวนหรือเขย่าจะทำให้การสกัดเกิดขึ้นได้ดี แต่ก็อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแขวนลอยของอนุภาคละเอียดในสารละลายที่ไหลออกมา ซึ่งต้องนำมาผ่านขั้นตอนการกรอง (Filtration) หรือการทำให้ใส (Clarification) ที่ยุ่งยากต่อไป

ในกรณีที่วัสดุมีโครงสร้างเป็นเซลล์ ถ้าผนังเซลล์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงกระบวนการชะละลายจะเกี่ยวข้องกับเคลื่อนที่ของตัวละลายด้วยแรงดันออสโมติกผ่านผนังเซลล์ อย่างไรก็ตามก็ไม่จำเป็นต้องใช้การบดละเอียดเพื่อให้ผนังเซลล์แตก เพราะจะทำให้อนุภาคหรือวัสดุที่ไม่ต้องการติดมากับตัวละลายที่ต้องการ ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) ดังนั้นแทนที่จะใช้วิธีการลดขนาดมากเกินไป ของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนหลายชนิดจะถูกตัดเป็นชิ้นบางรูปสามเหลี่ยม (Wedge-shaped slices) ที่เรียกว่า "Cossettes" ตัวอย่างเช่นในกรณีของชูการ์บีท (Sugar beet) หรืออาจถูกบดแล้วทำให้มีรูปร่างเป็นแผ่นแบน เช่นในกรณีของเมล็ดพืช (Vegetable seed) เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสและทำให้เกิดการไหลแบบอิสระผ่านของแข็งและทำให้เกิดการเลือกสกัด (Selective extraction) ได้ดียิ่งขึ้น

กลไกของการชะละลายอาจเกี่ยวข้องกับการละลายทางกายภาพอย่างง่ายหรืออาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นอัตราการแพร่ของตัวทำละลายไปยังเนื้อของแข็งที่จะชะ หรืออัตราการแพร่ของตัวละลายไปยังตัวทำละลาย หรือสารละลายที่สกัดได้ออกจากของแข็งเฉื่อย หรือการรวมกันของอัตราการแพร่เหล่านี้จะมีนัยสำคัญต่ออัตราการสกัดรวม (Overall rate of extraction) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction rate) หรือความต้านทานของเยื่อหุ้มเซลล์ (Membranous resistant) พบว่า บ่อยครั้งเราสามารถที่จะกำหนดความสัมพันธ์ของสมดุลรวมหรือความสัมพันธ์ของสมดุลเทียมรวมบางประการ (Some overall equilibrium or Pseudoequilibrium relationship) ซึ่งจะนำไปสู่การหาประสิทธิภาพรวมของขั้นตอน (Overall stage efficiency) ของระบบการสกัดโดยไม่ต้องคำนวณหาอัตราเฉพาะขั้นตอน (Individual rates) และความสัมพันธ์สมดุลทุกชั้น (Equilibrium relationships)

การเลือกตัวทำละลาย (Solvent selection)

คุณสมบัติของตัวทำละลายเช่น จุดเดือด ความหนาแน่น และความหนืด มีผลต่อความเหมาะสมและความสามารถในการเลือกจับตัวละลาย (Selectivity) เพื่อให้การสกัดตัวละลายที่ต้องการทำได้สมบูรณ์และคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ปริมาณและอัตราของสารละลายของตัวละลายที่ต้องการและสิ่งเจือปนอื่นๆในของแข็งอันเนื่องจากตัวทำละลายมีอิทธิพลอย่างมากต่อ

ขนาดของเครื่องสกัด (Extractor) ค่าดำเนินการรวม(Overall operating cost) และชนิดและต้นทุนในการแยก (Type and cost of separation) เช่นเดียวกันกับเครื่องมือที่ใช้ในการนำเอาตัวทำละลายและตัวละลายกลับมาใช้ใหม่ (Solvent and solute recovery equipment) และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ตัวทำละลายที่ใช้ควรมีความเหมาะสมในการชะละลาย(selectivity) ราคาถูก ไม่เป็นพิษและใช้ประโยชน์ได้ทันที พบว่า บ่อยครั้งที่ต้องอาศัยความเหมาะสมหลายๆด้านเกี่ยวกับความต้องการเหล่านี้ระหว่างตัวทำละลายแต่ละชนิดก่อนการเลือกใช้ (Schweitzer, 1979)

อุณหภูมิในการชะละลาย (Temperature of Leaching)

โดยทั่วไปมักจะชะละลายที่อุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่าทำให้ตัวละลายละลายในตัวทำละลายได้ดีกว่า (Streybal, 1980) จึงทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนที่สกัดได้สูงขึ้น อัตราการชะละลายจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนืดของของเหลวลดลงและการแพร่ของตัวละลายและตัวทำละลายสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงในผลิตภัณฑ์ธรรมชาติบางชนิด เช่น ชา กาแฟ และชูการ์ บีท จะทำให้วัสดุที่ไม่ต้องการออกมาระหว่างการสกัดมากเกินไปและเกิดการเสื่อมเสียทางเคมีของผลิตภัณฑ์ อนึ่งการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงอาจไม่สามารถทำได้เนื่องจากการสูญเสียตัวทำละลายมากเกินไปและด้วยเหตุผลทางด้านความปลอดภัย ดังนั้นจึงต้องอาศัยการพิจารณาความเหมาะสมในหลายๆประการในการเลือกอุณหภูมิที่จะใช้

วิธีการสัมผัสของของแข็ง-ของเหลวและการแยกของแข็งออกจากสารละลาย

(Method of solid-liquid contacting and solid-solution separation)

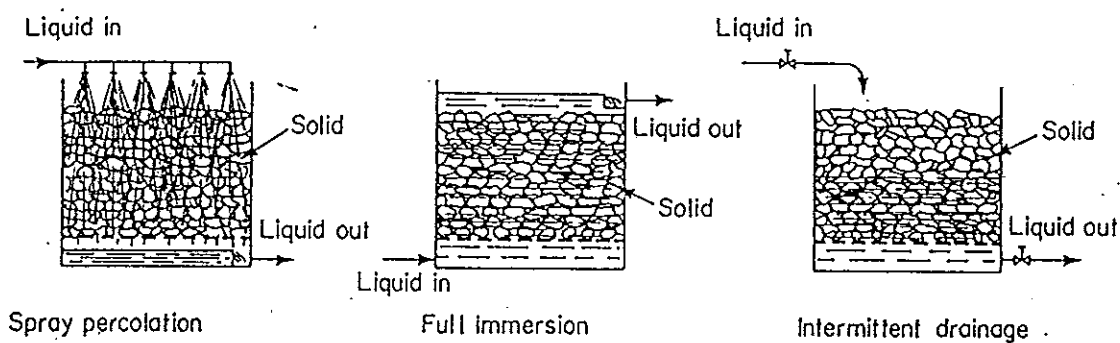
กระบวนการชะละลายอาจจำแนกได้ตามความต่อเนื่องของกระบวนการกล่าวคือ อาจดำเนินการแบบเบตซ์หรือแบบต่อเนื่อง สำหรับแบบต่อเนื่องนั้นอาจจำแนกเป็นแบบขั้น (Stepwise) หรือแบบไม่เป็นขั้น(Stepless) (Schwartzberg, 1980) วิธีการสัมผัสของของแข็ง-ของเหลว จำแนกได้ 2 ชนิดคือการสัมผัสในเบตซ์ (Fixed-bed contacting) ซึ่งอนุภาคของแข็งจะอยู่กับที่ กับวิธีการสัมผัสแบบกระจาย (Dispersed contact) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งสัมผัสกับอนุภาคของแข็งด้วยกัน และสัมผัสกับของเหลว

สำหรับการสัมผัสในเบตซ์นั้น ตัวทำละลายจะสัมผัสกับเบตซ์ของแข็งใน 3 ลักษณะต่าง ๆ กัน (รูป 3) ดังต่อไปนี้คือ

1. การซึมผ่านจากการฉีดพ่น (Spray percolation)
2. การแช่ (Full immersion)

3. การระบายของเหลวออกเป็นระยะ (Intermittent drainage)

วิธีการซึมผ่านจากการฉีดพ่นนั้น ตัวทำละลายจะถูกฉีดพ่นบนของแข็งและปล่อยให้ของเหลวระบายออกอย่างต่อเนื่อง วิธีนี้อาจใช้การหยด(trickling) แทนก็ได้ (Treybal, 1980) สำหรับวิธีการเช่นนั้นของแข็งจะจมอยู่ในของเหลว โดยตัวทำละลายที่ใช้อาจนำมาดำเนินการแบบแบทช์หรือเป็นการไหลแบบต่อเนื่อง ส่วนในวิธีที่สามจะเกี่ยวข้องกับกับการระบายตัวทำละลายออกจาก



รูป 3 วิธีการสัมผัสของของแข็งกับของเหลว

ที่มา : Schwartzberg (1980)

ของแข็งเป็นระยะ สำหรับวิธีการสัมผัสแบบกระจายนั้นมักจะมีผลจากการเขย่าหรือการกวนที่เหมาะสม (Schweitzer, 1979)

การเลือกเครื่องมือที่ใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของของแข็ง และความยากและต้นทุนในการจัดการของแข็งในหลายๆกรณีมักจะนำไปสู่เครื่องมือที่มีลักษณะเฉพาะสำหรับอุตสาหกรรมนั้น ๆ (Treybal, 1980)

เครื่องมือสัมผัสแบบเบตหนึ่งอย่างง่ายที่สุดประกอบด้วยถังเปิดที่มีรูพรุนตรงส่วนล่าง ตัวทำละลายจะไหลผ่านชั้นของแข็งด้วยแรงโน้มถ่วงโดยไม่ละลายของแข็ง ส่วนตัวอย่างเครื่องมือสัมผัสแบบกระจายนั้นได้แก่ถังชะละลายที่ของแข็งจะแผ่กระจายอยู่ในตัวทำละลายเนื่องจากการกวน แล้วปล่อยให้ของแข็งตกตะกอนเพื่อแยกเอาส่วนของสารละลายที่สกัดได้ออก การตกตะกอนอาจทำในถังเดียวกันหรือให้หน่วยตกตะกอนอื่นที่แยกออกมาหรืออาจใช้เครื่องมือกรองแบบต่างๆ ถ้าตัวทำละลายที่ใช้ระเหยง่ายหรือการไหลชะละลายเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเป็นไปอย่างเชื่องช้า อาจใช้ถังปิดที่มีปั๊มเพื่อให้เกิดการไหลเวียนของตัวทำละลาย

ส่วนการแยกตัวทำละลายและตัวละลายออกจากกันอาจใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น การทำให้ใส (Clarification) การระเหย (Evaporation) และการกลั่น (Distillation) (Schweitzer, 1979)

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The development of mathematical model)
แบบจำลองอย่างง่ายพาราโบลา (Parabolic simplified model)

:กรณีพิเศษ เมื่อการถ่ายโอนมวลสารถูกควบคุมโดยการแพร่ภายในของของแข็ง (in-solid diffusion)

ในกรณีที่การแพร่ภายในของของแข็งเป็นความต้านทานจำกัด (limiting resistance) ซึ่งสำหรับกรณีนี้ เราจะตั้งสมมุติฐานดังนี้

1. ไอโซเทอรั่มของการดูดกลืนเป็นเส้นตรง (Linear adsorption isotherm)
2. สัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็งมีค่าคงที่ (Constant effective diffusivity in solid)
3. ไม่เกิดการผสมกลับในของแข็งและของเหลว (No backmixing in the liquid and solid)
4. ไม่พิจารณาความต้านทานภายนอกต่อการถ่ายโอนมวลสาร (External resistance to mass transfer is negligible)
5. ปัจจัยการชะละลายมีค่าคงที่ (Constant draft (stripping factor), α)

$$\alpha = m \frac{E'}{R'}$$

โดยที่ m : สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย
(solute equilibrium distribution coefficient, $(y/x)^*$)

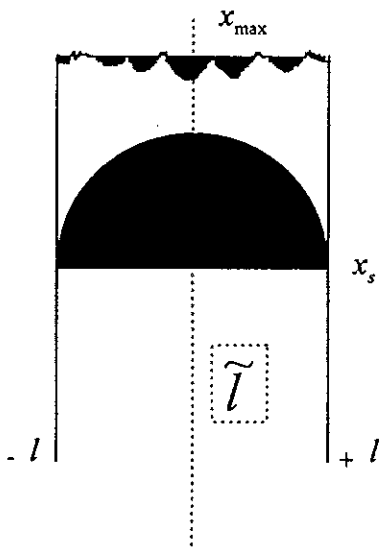
E' : มวลของส่วนที่สกัดได้ (extract mass, kg)

R' : มวลของของแข็งที่เป็นวัตถุดิบ (solid mass, kg)

6. โปรไฟล์ของความเข้มข้นในอนุภาคของแข็งมีลักษณะเป็นพาราโบลา (The concentration profile in a solid particle is parabolic)

สมมุติฐานข้อที่ 6 ตั้งขึ้นเพื่อกำจัดความผันแปรของเวลา (time variable) จากสมการการแพร่ (diffusion equation) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า สำหรับการสกัดตัวละลายจากของแข็งที่มีรูปร่างปกติเช่นเป็นแผ่นแบน (slab) ทรงกระบอก (cylinder) และทรงกลม (sphere) สามารถที่จะแสดงได้ว่าการกระจายความเข้มข้นของตัวละลาย (solute concentration distribution) มีลักษณะเป็นพาราโบลาโดยประมาณ (approximately parabolic)

พิจารณารูป 4 ซึ่ง



- x_s : ความเข้มข้นที่ผิว, kg/m^3
(surface concentration)
- x_{max} : ความเข้มข้นสูงสุดที่เวลาใดๆ, kg/m^3
(maximum concentration at any time)
- l : ครึ่งหนึ่งของความหนาสำหรับแผ่นบาง
รัศมีสำหรับทรงกระบอกและทรงกลม
(half of thickness for infinite slab,
radius for infinite cylinder and sphere)

รูป 4 การกระจายความเข้มข้นโดยประมาณในแผ่นแบนที่เวลาใดๆ
(approximate concentration distribution in slab at any time)

ที่มา : Siripatana (1986)

สมการพาราโบลาคือ

$$x = x_{max} - [(x_{max} - x_s)/l^2] \tilde{l}^2 \dots\dots\dots(1)$$

ดิฟเฟอเรนเชียล(differentiate) x เทียบกับ \tilde{l} จะได้เกรเดียนของความเข้มข้น (concentration gradient)คือ

$$\frac{\partial x}{\partial \tilde{l}} = \frac{-2(x_{max} - x_s) \tilde{l}}{l^2} \dots\dots\dots(2)$$

ที่พื้นผิว(surface) จะได้ว่า $\tilde{l} = l$ จะได้

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \tilde{l}}\right)_{surface} = \frac{-2(x_{max} - x_s)}{l} \dots\dots\dots(3)$$

สำหรับค่า \bar{x} จะพิจารณาได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{l} \int_0^l x d\tilde{l} \dots\dots\dots(4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{l} \int_0^l \left[x_{max} - \left(\frac{x_{max} - x_s}{l^2} \right) \tilde{l}^2 \right] d\tilde{l} \dots\dots\dots(5)$$

$$x_{max} = \frac{3\bar{x} - x_s}{2} \dots\dots\dots(6)$$

แทน x_{max} ลงใน (3)

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \tilde{l}}\right)_{surface} = \frac{-3(\bar{x} - x_s)}{l} \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อนำกฎข้อที่หนึ่งของฟิคส์ (Fick's first law) เข้าไปประยุกต์ พบว่าจะได้อัตราการถ่ายโอนตัวละลาย(rate of solute transfer) ระหว่างเฟส (Rousseau, 1987) ดังนี้

จาก

$$J_s = -D_s \left(\frac{dx}{dl} \right) \dots \dots \dots (8)$$

จาก (7) จะได้

$$J_s = D_s \frac{3(\bar{x} - x_s)}{l} \dots \dots \dots (9)$$

โดยที่ J_s : ฟลักซ์ของมวลตัวละลาย (mass flux of solute, Kg/m².s)

ดังนั้น

$$\frac{-dV_s}{dA} \frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{D_s \cdot 3(\bar{x} - x_s)}{l} \dots \dots \dots (10)$$

$$-dV_s \frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{dA \cdot 3D_s(\bar{x} - x_s)}{l} \dots \dots \dots (11)$$

หรือ

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{3A_e D_s (\bar{x} - x_s)}{l} \dots \dots \dots (12)$$

ที่ซึ่ง

V_s : ปริมาตรของของแข็ง(volume of solid, m³)

A : พื้นที่ที่ใช้ถ่ายโอนมวล(area available to mass transfer, m²)

A_e : พื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร(area per unit volume, m²/m³)

D_s : สัมประสิทธิ์การแพร่ตัวละลายในของแข็ง(solute diffusivity in solid, m²/s)

จากสมการการถ่ายโอนมวล(mass transfer equation) :-

$$N_s = k_s (\bar{x} - x_s) \dots \dots \dots (13)$$

$$N_s A_e = K_s A_e (\bar{x} - x_s) \dots \dots \dots (14)$$

เทียบสมการ 12 กับ 14 จะได้ว่า

$$\frac{-d\bar{x}}{dt} = A_e \cdot k_s \cdot (\bar{x} - x_s) \dots \dots \dots k_s = \frac{3D_s}{l}$$

k_s : สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนตัวละลาย (solute mass transfer coefficient)

N_s : ฟลักซ์ของการถ่ายโอนมวล(mass transfer flux,

Moles transferred/(area.time.mole fraction))

การแก้สมการสำหรับกฎข้อที่สองของฟิคส์(Fick's second law) ในการชะละลายที่ซึ่งส่วนสกัดได้(extract) ที่มีความเข้มข้นขาเข้าคงตัว(constant inlet concentration, Y_{in}) ไหลผ่านเบดนิ่ง(fixed bed) ที่มีของแข็งความเข้มข้นคงตัว(X_0) ตลอดคอลัมน์ สมการนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Rosen, Babcock et. al., Neretnieks, Rasmussen and Neretnieks (Rousseau, 1987) ดังต่อไปนี้

ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนระหว่างการไหลผ่านเบดนิ่ง(pack bed) ถูกนำไปใช้เป็นอย่างมากในโรงงานทางกระบวนการเคมี การศึกษาทฤษฎีการแพร่ตามแนวยาว(Longitudinal dispersion) ทั้งของพลังงานความร้อนและการแพร่ของสาร ทำให้ได้ข้อมูลที่สามารถแลกเปลี่ยนกันได้โดยการวิเคราะห์ (Rasmussen and Neretnieks, 1980) กลุ่มสมการต่อไปนี้ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Deister and wilhelm (1953) ได้ถูกนำไปใช้เป็นอย่างมากโดยนักวิจัยหลายท่าน

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{\partial y}{\partial z} - D_1 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{-1}{m} \left(\frac{\partial q^*}{\partial t} \right) \dots \dots \dots (15)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = D_s \left(\frac{\partial^2 q_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q_i}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (16)$$

$$C(z,t) = y - y^*$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial y}{\partial z}$$

$$U = \frac{C}{C_0} = \frac{y - y^*}{y_0 - y^*}$$

$$q_i(r,z,t) \neq \infty = x - x_0$$

$$q_i(r,z,0) = x_0 - x_0 = 0, \frac{\partial q_i}{\partial r} = \frac{\partial x}{\partial r}$$

จะได้

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial z} - D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = \frac{-1}{m} \left(\frac{\partial q^*}{\partial t} \right) \dots \dots \dots (17)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = D_s \left(\frac{\partial^2 q_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q_i}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (18)$$

เทอมต่างๆในสมการที่ (17) หมายถึง การสะสมในเฟสของไหล การถ่ายโอนโดยการพา การถ่ายโอนโดยการแพร่ตามแนวแกน(axial dispersion) และอัตราการสะสมเฉลี่ยในอนุภาคทรงกลมที่มีรูพรุนตามลำดับ ส่วนเทอมต่างๆในสมการที่ (18) หมายถึง การสะสมในอนุภาคและการแพร่ในแนวรัศมีตามลำดับ ซึ่งเงื่อนไขขอบเขต(boundary conditions) ที่ใช้ได้แก่

$$C(0, t) = y_0 - y^* = -y^* = C_0 \dots \dots \dots (19)$$

$$C(\infty, t) = y^* - y^* = 0 \dots \dots \dots (20)$$

$$C(z, 0) = y^* - y^* = 0 \dots \dots \dots (21)$$

$$q_i(0, z, t) \neq \infty \dots \dots \dots (22)$$

$$q_i(r, z, 0) = 0 \dots \dots \dots (23)$$

โดยที่

y : ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนที่สกัดได้(extract)

V : ความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยในรูพรุน(average linear pore velocity, m/s)

t : เวลา, s

z : ระยะทางตามแนวการไหล, m

D_l : สัมประสิทธิ์การแพร่ตามยาว, m^2/s (Longitudinal dispersion coefficient)

r : ระยะทางตามแนวรัศมี, m

$$m = \varepsilon / (1 - \varepsilon)$$

ε : ความพรุน, m^3/m^3 (porosity)

q'' : ความเข้มข้นเฉลี่ยต่อปริมาตรในอนุภาค, mol/m^3

x_0 : ความเข้มข้นของตัวละลายในของแข็งเมื่อเริ่มต้น, g/cm^3

x_i : ความเข้มข้นของตัวละลายในของแข็ง, g/cm^3

D_s : สัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง, m^2/s

q_i : ความเข้มข้นภายในอนุภาค, mol/m^3

C : ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของไหล, mol/m^3

y^* : ค่าสมดุลของ y

y_0 : ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนสกัดได้เมื่อเริ่มต้น

D_a : สัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวแกนของส่วนสกัดได้, m^2/s

จากสมการและเงื่อนไขขอบเขต(boundary conditions) จะได้สมการอันเป็นคำตอบ(solution)

ดังต่อไปนี้คือ

$$U(z,t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \exp\left[-\delta H_1 + \frac{\delta^2}{Pe} \left(\frac{4\lambda^4}{9R^2} + \frac{4\lambda^2 H_2}{3R} + H_2^2 + H_1^2\right)\right] \sin\left[\sigma\theta\lambda^2 - \delta H_1 + \frac{2\delta^2}{Pe} \left(\frac{2\lambda^2 H_1}{3R} + H_1 H_2\right)\right] \frac{d\lambda}{\lambda} \dots (24)$$

เนื่องจาก $D_i \rightarrow 0$ เพราะไม่มีการผสมกลับ(back mixing) \therefore

$$Pe = \frac{zV}{D_i} = \infty$$

ดังนั้นจะได้

$$(z,t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \exp(-\delta H_1) \sin(\sigma\theta\lambda^2 - \delta H_2) \frac{d\lambda}{\lambda} \dots (25)$$

โดยที่

$U = C/C_0$: ความเข้มข้นของของไหลแบบไร้มิติ (dimensionless concentration in fluid)

ซึ่งเทอมขวามือสุดของสมการที่ (25) ก็คือ เออร์เรอร์ฟังก์ชัน (error function) สมการคำตอบ (solution) นี้เป็นสมการเดียวกันกับกับสมการของ Rosen(1952) เมื่อ D_a มีค่าน้อยดังนี้

$$S = 0.5(1 + \text{erf}[F(\beta\theta - 1)]) \quad , \tau_f > 50 \dots (26)$$

โดยที่

$$S = U = \left(\frac{y_{out} - Mx_0}{y_{in} - Mx_0} \right) \dots (27)$$

$$\beta = M\varepsilon/(1-\varepsilon) \dots (28)$$

$$= \left(\frac{t - t_f}{t_f} \right) \dots (29)$$

$$F = \left[\frac{15Bi\tau_f}{4\beta(Bi+5)} \right]^{1/2} \dots (30)$$

$$\tau_f = \frac{D_s t_f}{a^2} \dots (31)$$

โดยที่

y_{out} : y ของส่วนสกัดได้(extract)ที่ออกจากเบดนิ่งของแข็ง(fixed bed of solid), kg/m^3

y_{in} : y ของส่วนสกัดได้ที่เข้าเบดนิ่งของแข็ง, kg/m^3

M : สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย, $(Y/X)^*$

(solute equilibrium distribution coefficient)

x : ความเข้มข้นของตัวละลายในของแข็งอิ่มตัว(saturated solid), kg/m^3

x_0 : ค่าเริ่มต้นของ x , kg/m^3

- t : เวลาที่ใช้ในการสกัด(extraction time หรือ solids holdup time, s)
- t_f : เวลาที่ส่วนสกัดไหลผ่านเบดตลอดทั้งเบด(extract transit time through bed, L/V_b หรือ z/V_b), s
- L : ความลึกของเบด(depth of bed, m)
- V_b : ความเร็วของของไหลในเบด, m/s
- Bi : ไบออทานัมเบอร์ของการถ่ายโอนมวล(mass transfer biot number, kMa/D_s)
- k : สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของตัวละลายในเฟสส่วนสกัด (solute mass transfer coefficient in extract phase), m/s
- a : รัศมีของทรงกลม ทรงกระบอกหรือครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นแบน, m

ถ้า Bi มีค่ามาก F จะลดรูปเป็น $(15\tau_f/4\beta)^{1/2}$ และพบว่าในการชะละลายของเบดนี้ ส่วนใหญ่ τ_f มักจะมีค่าน้อยกว่า 1.0 และบ่อยครั้งที่มีค่าน้อยกว่า 0.1

เมื่อ $\tau_f < 50$ สมการแก้ปัญหา(solutions)ทั้งหมดเพื่อที่จะให้ได้ค่า S ตามที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้ นี้จะมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นและต้องอาศัยการคำนวณที่ยุ่งยากอย่างมาก Rosen ได้แสดงตารางระหว่างค่า S กับ τ_f และ θ สำหรับ Bi ค่าต่างๆ แต่ค่า S ในช่วง τ_f น้อยๆมีอยู่น้อย กราฟระหว่าง S กับ θ มักจะมีลักษณะเป็นซิกมอยดอล(sigmoidal)และขยายออก(spread out) มากขึ้นเมื่อ τ_f ลดลง ที่ค่า τ_f สูงๆ จะได้กราฟเส้นตรงเมื่อพลอต(plot)ระหว่างค่า S กับ θ ที่ θ ต่างๆเกือบทั้งหมด และที่ค่า τ_f ต่ำๆก็จะได้กราฟเกือบเป็นเส้นตรงเมื่อพลอตระหว่างค่า S กับ θ บนกระดาษลอการิทึม(log probability paper) ที่ θ ต่างๆเกือบทั้งหมด

ค่าระหว่าง S กับ θ ที่ได้จากการทดลองมักจะไม่เป็นซิกมอยดอล(sigmoidal) และดังนั้นจะไม่สอดคล้องกับสมการแก้ปัญหา(solutions)ที่ได้จากผู้แต่งที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ การขาดความสอดคล้องนั้นอาจจะเนื่องมาจาก ความไม่คงที่ของการแทนที่สาร(unstable displacement) รูปร่างของกราฟที่ได้จากการทดลองขึ้นอยู่กับอย่างมากว่า เมื่อเริ่มต้นนั้นเบดที่ใช้ถูกเติมเต็มด้วยส่วนสกัด(extract)ที่สมดุลกับของแข็งที่จะสกัดหรือไม่ และขึ้นอยู่กับว่าการป้อน(feed)ส่วนสกัดเป็นการป้อนจากบนลงล่าง(downflow)หรือจากล่างขึ้นบน(upflow)

โดยปกติสำหรับช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่พบในการสกัดในเบดนิ่ง จะสามารถประมาณค่า k ได้โดยสมการต่อไปนี้

$$k = \frac{1.09v_b}{Sc^{2/3} Re_p^{2/3}} \dots\dots\dots(32)$$

เมื่อ

$$0.0016 < Re_p < 55$$

$$k = \frac{0.250v_b}{Sc^{2/3} Re_p^{0.31}} \dots\dots\dots(33)$$

เมื่อ

$$5 < Re_p < 1500$$

โดยที่

v_b : ความเร็วของของไหล, m/s

Sc : สมิตทึ้นัมเบอร์ (Schmidt Number, $\mu/D_i\rho$)

μ : ความหนืดของส่วนสกัด, kg/m.s

D_i : สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายในสารละลายที่จุดตันอยู่ในของแข็ง
(solute diffusivity in occluded solution, m^2/s)

ρ : ความหนาแน่นของส่วนสกัด, kg/m^3

Re_p : เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค (particle Reynold Number, $2apv_b/\mu$)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
2. เพื่อศึกษาแฟกเตอร์ของกระบวนการสกัดน้ำมัน แฟกเตอร์ที่กล่าวนี้ได้แก่ วิธีการสกัดที่เหมาะสม ชนิดและปริมาณของสารละลายที่ควรใช้ % solvent recovery สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย เป็นต้น
3. เพื่อเสนอแนวทางในการศึกษาต่อและแนวทางประยุกต์ถึงขั้นที่เป็นไปได้ในทางอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์การทดลอง

- ปีกเกอร์ขนาด 100, 250, 500 และ 1,000 ml
- บิวเรตขนาด 50, 100, 200 ml
- กระจกตวง(cylinder) 100, 150, 200 ml
- ปิเปต 1, 5 ml
- ขวดต้มกลั่น(boiling flask)
- ขวดรูปชมพู่(erlenmayer flask)
- ปากคีบ(forceps)
- กรวยกรอง(funnel)
- แท่งแก้วคน(glass rod)
- ช้อนตักสาร(spatula)
- ชุดขาตั้งและแคลมป์(clamp)จับอุปกรณ์
- จานเพาะเชื้อ(petri dish)
- กระดาษกรอง whatman paper no. 4
- จุกยาง
- ม้วนยาง
- ม้วนเหล็ก

- นาฬิกาจับเวลา
- เดสสิเคเตอร์(dessicator)
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ(water bath)
- เตาให้ความร้อน(heating mantle)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก Shinko Denshi DIGPET SH-200
- เครื่องเขย่า(Shaker) รุ่น Orbital Mixer, DENLEY

- ตะแกรงร่อนขนาดรูตะแกรง 1, 3, 5, 7, 8 และ 10 mm
- ท่อแก้วใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 inch ยาว 20 cm
- หัวดูดท่อPVCขนาด 1 inch
- ตะแกรงละเอียดขนาด 2X2 inch² หน้า 5 cm

- เฮกเซน commercial grade
- เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm

(เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้รับจากโรงงานกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา รับมาเมื่อพฤศจิกายน 2536)

วิธีการทดลอง

-การเตรียมวัตถุดิบ(เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์)

1. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
2. ลดขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยฉ้อน
3. คัดขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm ด้วยตะแกรง
4. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการคัดขนาดแล้วมาอบที่ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น
5. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปทำการทดลอง

-การหาปริมาณCNSL(total CNSL)ทั้งหมดในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

-สกัดCNSLโดยใช้ซอกเล็ต(soxhlet extraction) ปริมาณตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 30 กรัม ปริมาณเฮกเซน 300 มิลลิลิตร สกัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

-การหาพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

จากการพิจารณาเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์พบว่ามีลักษณะเป็นแผ่นแบนตัวอย่าง
เช่นดังรูป 5



รูป 5 แบบจำลองลักษณะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์หลังการลดขนาด
กล่าวคือ มีพื้นที่ส่วนบนหรือล่างมาก มีลักษณะแบน มีความหนาแน่นน้อย ในที่นี้

พิจารณาให้พื้นที่ด้านบนเท่ากับพื้นที่ด้านล่าง

1. ชั่งน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แต่ละขนาด(2, 5 และ 9 mm)ขนาดละ 30 ตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักแต่ละตัวอย่าง
2. คำนวณหาปริมาตรตัวอย่างแต่ละชิ้น จากการทราบน้ำหนักและความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
3. ใช้ปากคีบ(forceps)คีบตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักและปริมาตรแต่ละชิ้นไปจุ่มในน้ำหมึก แล้วนำมาพิมพ์บนกระดาษขาว
4. วัดพื้นที่ เส้นรอบรูป แล้วคำนวณหาความหนาของตัวอย่างแต่ละชิ้น จากความหนาที่คำนวณได้ นำมาคูณกับเส้นรอบรูป จะได้พื้นที่ด้านข้าง รวมพื้นที่ด้านบนและพื้นที่ด้านล่างเข้ากับพื้นที่ด้านข้าง จะได้พื้นที่รวมแต่ละตัวอย่าง
5. คำนวณหาพื้นที่รวมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของแต่ละตัวอย่างแต่ละขนาด แล้วหาพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรโดยเฉลี่ย

-การหาความพรุนระหว่างอนุภาคของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบดนิ่ง (interparticle porosity, ϵ)

1. วัดปริมาตรของท่อแก้วโดยการแทนที่น้ำหรือคำนวณเมื่อทราบความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อแก้ว
2. ใส่เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ลงในท่อแก้วจนเต็ม
3. ชั่งน้ำหนักของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ แล้วคำนวณหาปริมาตรจากการทราบความหนาแน่น
4. คำนวณหาปริมาตรว่างที่มีในเบดนิ่ง(ท่อแก้ว)ที่เติมเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ลงไปแล้ว
5. คำนวณหาความพรุนระหว่างอนุภาคในท่อแก้วจากการทราบปริมาตรว่างในเบดนิ่งหลังการใส่เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมื่อเทียบกับปริมาตรท่อแก้วทั้งหมด

-การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย(solute equilibrium distribution coefficient, $(y/x)^*$ หรือ m)

1. ชั่งน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm แต่ละขนาดจำนวน 50 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่(erlenmayer flask) ขนาด 250 ml

- 2.เติมเฮกเซนปริมาณ 150 ml ปิดจุกแล้วนำไปเขย่าโดยใช้ความถี่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3.รินสารละลายหรือเอ็กแทรก(ส่วนสกัด)ที่ได้ แล้วนำไปวัดปริมาตรและชั่งน้ำหนัก ระเหยเฮกเซนออก ชั่งน้ำหนัก CNSLที่ได้
- 4.นำตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่รินเอ็กแทรกออกแล้วไปชั่งน้ำหนัก ระเหยเฮกเซนออกแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง
- 5.คำนวณหา (y/x)

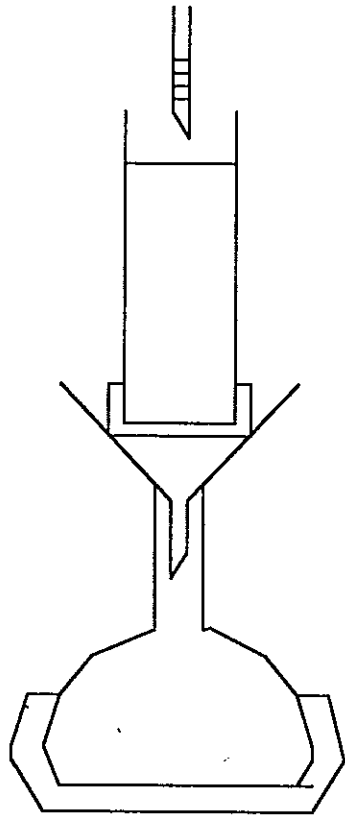
-การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายCNSL(solute diffusivity)สำหรับ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แต่ละขนาด

- 1.ชั่งเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm แต่ละขนาดจำนวน 50 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
- 2.เติมเฮกเซนปริมาณ 150 ml แล้วนำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้อง ใช้ความถี่ในการเขย่า 150 รอบต่อนาที
- 3.เก็บตัวอย่างปริมาณ 1 ml ที่เวลา 1,2,3,4,5,8,10,13,15,18,20,25,30,40,50,60,120, 180 นาทีและ 24 ชั่วโมงตามลำดับ โดยเมื่อเก็บตัวอย่าง 1 ml จะเติมเฮกเซนกลับ ลงไป 1 ml ทุกครั้ง
- 4.นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณCNSLในเอ็กแทรกที่เวลาต่างๆ แล้วนำข้อมูลที่คำนวณได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายต่อไป

การสกัดแบบหยดในเบตนิ่ง

-ขั้นตอนการหาผลของอัตราการหยดเฮกเซนต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จาก เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

- 1.จัดอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบหยดดังรูป 6



รูป 6 อุปกรณ์การสกัดCNSLแบบหยด

- 2.เติมเฮกเซนลงในบิวเรต(buret)ปริมาณ 50 ml
- 3.ซั่งเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm จำนวน 30 g แล้วนำมาใส่ในเบดนิ่ง (ท่อแก้ว)
- 4.หยดเฮกเซน ณ จุดกึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัดของเบดนิ่ง พร้อมทั้งปรับอัตราการไหล(flow rate)ของเฮกเซนเป็น 0.42,0.53,0.71,1.67,2.38,3.33 และ 4.545 ml/min
- 5.นำสารละลายที่ได้ในขวดต้มกัลัน(boiling flask)มาซั่งน้ำหนัก แล้วจึงนำไประเหยในอ่างควบคุมอุณหภูมิ(water bath)
- 6.เก็บขวดต้มกัลันในเดสสิเคเตอร์(dessicator)เป็นเวลา 30 นาที ซั่งน้ำหนักหาปริมาณ CNSL คำนวน % hexane recovery
- 7.นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดแล้วมาซั่งน้ำหนัก แล้วระเหยเฮกเซนที่ค้างอยู่ในเปลือกบนอ่างควบคุมอุณหภูมิ ทิ้งไว้ในเดสสิเคเตอร์ 30 นาที ซั่งน้ำหนัก คำนวนหาปริมาณเฮกเซนที่ค้างอยู่ในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (hexane retained)

-ขั้นตอนการหาผลของความหนาเบดต่อการสกัดแบบหยด

1. จัดอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบหยดดังรูป 6
2. เติมหะกุกในบิวเรตปริมาณ 50 ml
3. ชั่งเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm ให้ได้ความหนาเบด 1 cm (จำนวนเฉลี่ย 2.737 g)
4. ทำการหยดเฮกเซน พร้อมทั้งปรับอัตราการไหล(หยด)เฮกเซนให้ได้ 1.67 ml/min (เวลาการสกัด 30 นาที)
5. นำสารละลายที่ได้จากขวดต้มกลั่น(boiling flask)ไประเหยเฮกเซนออกจากน้ำมัน CNSL ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ(water bath)
6. ตั้งน้ำมันที่ได้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เก็บไว้ในเดสสิเคเตอร์แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความหนาเบดเป็น 2, 3, 4, 9, 10, 11, 18, 19 และ 20 cm ตามลำดับ

-ขั้นตอนการหาผลของความหนาเบดต่อการสกัดแบบหยดสำหรับขนาดวัตถุดิบแตกต่างกัน

ในการทำงานเดียวกันกับขั้นตอนการหาผลของความหนาเบดต่อการสกัดแบบหยด แต่ในขั้นนี้ใช้ความหนาเบด 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 11cm พร้อมทั้งหา % hexane recovery, % hexane retained และ retention time ในแต่ละเบดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm

-ขั้นตอนการศึกษาความเข้มข้นของน้ำมันที่สกัดได้โดยตัวทำละลายเฮกเซนที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดในเบดนิ่ง

1. จัดอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบหยดดังรูป 6
2. เติมหะกุกในบิวเรตปริมาณ 50 ml
3. ชั่งเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm ให้มีความหนาเบด 4 cm(จำนวนเฉลี่ย 10.951 g)ในท่อแก้วเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 inch
4. หยดเฮกเซนโดยปรับอัตราการไหลเฮกเซนเป็น 1.67 ml/min (เวลาการสกัด 30 นาทีจากการหยดเฮกเซน 50 ml)
5. บันทึกเวลาที่ใช้ไปตั้งแต่เริ่มหยดเฮกเซนจนได้สารละลายน้ำมันหยดแรกในขวดต้ม

- กลั่น พร้อมกับบันทึกปริมาณเฮกเซนที่ใช้ไป
6. เก็บตัวอย่างทุกๆ 4 ml ของเฮกเซนที่ใช้ไปจนหมด แล้วคำนวณเทียบกลับไปเป็นเวลาที่ใช้ในการสกัด
 7. นำสารละลายที่ได้ในขวดต้มกลั่นมาทำการแยกเฮกเซนออกโดยระเหยในอ่างควบคุมอุณหภูมิ
 8. ตั้งน้ำมันที่ได้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
 9. คำนวณปริมาณน้ำมันที่ได้เทียบกับระยะเวลาต่างๆในการสกัด
 10. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนขนาดเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็น 5 และ 9 mm ตามลำดับ

-ขั้นตอนการศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายเฮกเซนในการสกัด CNSL แบบหยด

1. จัดอุปกรณ์ในการสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบหยดดังรูป 6
2. ชั่งเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm ให้มีความหนาเบด 4 cm ในท่อแก้ว เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 inch
3. ทำการหยดเฮกเซน ณ จุดกึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัดของเบดพร้อมทั้งปรับอัตราการไหลเป็น 1.67 ml/min
4. หยดเฮกเซนปริมาณ 30.0 ml แล้วนำสารละลายที่ได้ในขวดต้มกลั่นมาชั่งน้ำหนัก นำไประเหยในอ่างควบคุมอุณหภูมิ เก็บไว้ในเดสสิเคเตอร์ 30 นาที ชั่งน้ำหนัก คำนวณหา % hexane recovery % CNSL ที่สกัดได้
5. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการสกัดแล้วมาชั่งน้ำหนัก ระเหยเฮกเซนออก เก็บไว้ในเดสสิเคเตอร์ 30 นาที ชั่งน้ำหนัก คำนวณ % hexane retained
6. ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนปริมาณเฮกเซนเป็น 50.0, 80.0, 100.0, 130.0 และ 150.0 ml ตามลำดับ

บทที่ 3

ผลและการวิจารณ์ผล

การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

ตาราง 5 ปริมาณ CNSL ทั้งหมดที่มีในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

สภาวะ - เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm จำนวน 30 กรัม

- เฮกเซน 300 ml

- เวลาในการสกัดโดยใช้ซอคเล็ต(soxhlet) 3 ชั่วโมง

| ครั้งที่ | น้ำหนัก CNSL ที่สกัดได้, g | % น้ำมันที่สกัดได้ ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 10.092 | 33.623 |
| 2 | 9.925 | 33.099 |
| 3 | 9.946 | 32.893 |
| เฉลี่ย | 9.988 | 33.205 |

ตาราง 6 ความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตัวทำละลายเฮกเซนและ

ตัวละลาย CNSL ที่อุณหภูมิห้อง (26 °C)

| สาร | ความหนาแน่น(ρ), g/cm ³ |
|---------------------------|------------------------------------------|
| เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 1.5343 |
| เฮกเซน | 0.6646 |
| CNSL | 0.9725 |

ตาราง 7 ความหนืดของเฮกเซนและ CNSL ที่อุณหภูมิห้อง (27 °C)

| สาร | ความหนืด(μ), centipoises |
|--------|--------------------------------|
| เฮกเซน | 50 |
| CNSL | 990 |

จากผลการทดลองตาราง 5 พบว่าปริมาณ CNSL ทั้งหมดที่มีในเปลือกเมล็ดมะม่วง

หิมพานต์มีค่าเป็น 33.205% ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของAggarwal(1972) ซึ่งรายงานว่ CNSLมีอยู่ในเปลือกเมล็ด 32-34%โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามประเทืองศรี สิ้นชัยศรี (2535) กล่าวว่า ปริมาณCNSLที่มีในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น แหล่งปลูก พันธุ์ สภาพภูมิอากาศ เป็นต้น

ในการทดลองนี้เลือกใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายถึงแม้ว่าได้พิจารณาระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนกับเอทานอลและพบว่าคุณสมบัติเฮกเซนกับเอทานอลเป็นดังต่อไปนี้คือ

ตาราง 8 คุณสมบัติทางเคมี-กายภาพของเฮกเซนและเอทานอล

| คุณสมบัติทางเคมี-กายภาพ | เฮกเซน | เอทานอล |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| จุดเดือด(boiling point) | 69 °C | 78.3 °C |
| จุดหลอมเหลว(melting point) | -95.6 °C | -130 °C |
| ความหนาแน่น(density) | 0.66 g/cm ³ ที่ 20 °C | 0.7893 g/cm ³ ที่ 20 °C |
| ความหนาแน่นของไอ(vapour density) | 2.97 | 1.59 |
| ความดันไอ(vapour pressure) | 100 mmHg ที่ 15.8 °C | 59 mmHg ที่ 20 °C |
| จุดวาบไฟ(flash point) | -22 °C | 12 °C |
| ช่วงการระเบิด(explosive limits) | 1.2-7.5% | 3.3-19% |
| อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง(autoignition temperature) | 223 °C | 363 °C |
| USA TLV (TWA) (Threshold Limit value-Time Weighted Averaged) | 50ppm (180 mg/m ³) | 1,000ppm (1900mg/m ³) |

ที่มา : ดัดแปลงจาก Chemical Safety Data Sheets Volume I : Solvents(1989)

เอทานอลและเฮกเซนต่างก็เป็นสารพิษและมีความไวไฟ อย่างไรก็ตามเฮกเซนเป็นสารที่มีความไวไฟสูงกว่าโดยพิจารณาได้จากจุดเดือด จุดวาบไฟ ช่วงการเกิดระเบิดและอุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง ยิ่งไปกว่านั้นเนื่องจากเฮกเซนหนักกว่าอากาศ จึงสามารถลอยเรียตามพื้นดินและกระตุ้นให้เกิดการติดไฟที่ต่อเนื่องเป็นระยะทางไกลๆ ปัญหายิ่งเลวร้ายยิ่งขึ้นเมื่อพบความเป็นจริงที่ว่า มันมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำจึงสามารถทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิต (electrostatic charges) นอกจากนี้เฮกเซนยังสามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุออกซิไดซ์ (oxidizing material) เช่น ไดไนโตรเตตรอกไซด์อย่างรุนแรง

เมื่อพิจารณาด้านความเป็นพิษพบว่า เอทานอลและเฮกเซนต่างก็มีความเป็นพิษ ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ดวงตาหรือระบบทางเดินหายใจ อย่างไรก็ตามผลจากการหายใจเอาไอระเหยของเอทานอลเข้าไปดูเหมือนว่าไม่ได้เป็นเรื่องที่ร้ายแรง ไม่มีหลักฐานว่าการสัมผัสกับไอระเหยของเอทานอลบ่อยครั้งมีผลให้เกิดโรคตับแข็ง ยกเว้นการหายใจเอาไอระเหยความเข้มข้นสูงเป็นเวลานานๆ (สูงกว่า 5,000 ppm) จึงจะทำให้เกิดการระคายเคืองของนิ้วนตาและทางเดินหายใจส่วนบน ในขณะที่ถ้าหายใจเอาไอระเหยหรือสัมผัสกับเฮกเซนแม้ในปริมาณความเข้มข้นต่ำก็จะเสี่ยงต่ออาการหรือผลที่ไม่สามารถทำให้เป็นปกติอย่างเดิม (irreversible effects) สูงกว่าเช่น ภาวะระบบขนส่งกระแสประสาทเป็นพิษ (neurotoxic effect) ถ้าสัมผัสไอระเหยเป็นเวลาหลายเดือน การกลับคืนเป็นปกติของระบบประสาทจะช้าลง การสัมผัสกับผิวหนังอาจทำให้เกิดผื่นแดงและนำไปสู่การเป็นโรคผิวหนัง ในขณะที่การสัมผัสกับเอทานอลมีผลเพียงทำให้เกิดรอยเหี่ยวย่นเนื่องจากไขมันที่ผิวหนังถูกทำลาย (defat) (Chemical Safety Data Sheets volume I : Solvents, 1989)

การพิจารณาความเป็นพิษนี้อาจดูได้จากค่า TLV (TWA) ในตารางที่ 8 ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นเฉลี่ยต่อเวลา (time-weighted average) สำหรับเวลาทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวันและ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ซึ่งคนงานที่สัมผัสกับสารเคมีอยู่ทุกวันจะไม่นับเป็นอันตราย จะเห็นว่าค่า TLV ของเฮกเซนต่ำกว่าเอทานอลแสดงว่าเฮกเซนมีความเป็นพิษสูงกว่า

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในด้านราคาพบว่า ราคาของเฮกเซนที่ขายในท้องตลาด (22.74 บาทต่อลิตร) ถูกกว่าราคาของเอทานอล (49.93 บาทต่อลิตร) (มูลค่าจากร้านเคมีภัณฑ์ ในปีพุทธศักราช 2537) อนึ่งเฮกเซนมักถูกเลือกเป็นตัวทำละลายในการสกัดพืชน้ำมันเนื่องจากให้ผลได้สูงและราคาถูกกว่าตัวทำละลายอื่นที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ในขณะที่เอทานอลจะถูกเลือกเป็นตัวทำละลายในการสังเคราะห์สารเคมีหลายชนิดและในการเก็บรักษาเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตและตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์ (physiological and pathological specimens) ส่วน

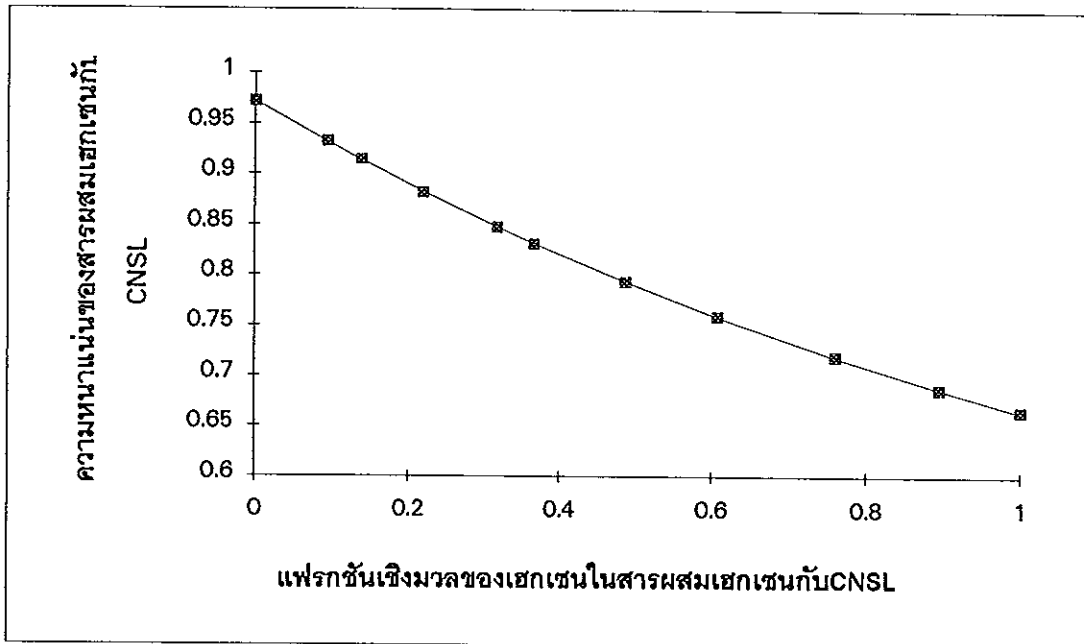
คุณสมบัติในการสกัดนั้น จันทนา คงสังข์และมลฤดี ประภากรรัตน (2536) รายงานว่า เมื่อใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายจะให้ผลได้ CNSL สูงกว่าเมื่อใช้เอทานอล

จากการพิจารณาความหนาแน่นของสารผสมระหว่างเฮกเซนกับ CNSL พบว่า เมื่อสัดส่วนของเฮกเซนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของของผสมจะลดลง อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นเส้นตรงเสียทีเดียวดังแสดงในตาราง 9 หรือรูป 8 ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากปฏิริยาสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างโมเลกุลของเฮกเซนกับ CNSL

ตาราง 9 ความหนาแน่นของของผสมเฮกเซนกับ CNSL

| แฟรกชันเชิงมวลของเฮกเซนในสารผสมเฮกเซนกับ CNSL (w/w) | ความหนาแน่น(ρ)ของของผสมเฮกเซนกับ CNSL, g/cm^3 |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 0 | 0.9725 |
| 0.0951 | 0.9315 |
| 0.1373 | 0.9143 |
| 0.2201 | 0.8825 |
| 0.3177 | 0.8477 |
| 0.3656 | 0.8316 |
| 0.4872 | 0.7934 |
| 0.6082 | 0.7589 |
| 0.7597 | 0.7193 |
| 0.8955 | 0.6873 |
| 1.0 | 0.6646 |

จากการทดลองได้มีการลดขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็น 3 ระดับคือขนาด 2, 5 และ 9 mm พบว่าเมื่อลดขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ลงจะทำให้พื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร(α)เพิ่มขึ้น(ตาราง 10) ส่วนในตาราง 11 นั้นเมื่อลดขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ลงจะทำให้ความพรุนระหว่างอนุภาค(interparticle porosity)ลดลง ทั้งนี้เพราะการใส่เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ลงไปนั้นไม่มีการอัดให้ขึ้นส่วนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ติดกันแน่น อนึ่งขึ้นส่วนขนาดเล็กสามารถกินพื้นที่ในเบตได้ดีกว่าขึ้นส่วนขนาดใหญ่ ความพรุนระหว่างอนุภาคจึงน้อยกว่า พื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร(α) และค่าความ



รูป 8 แฟรกชันเชิงมวลของเฮกเซนในสารผสมเฮกเซนกับCNSL(w/w)กับความหนาแน่นของสารผสม(g/cm^3)

พุนระหว่างอนุภาค (ϵ) นี้ จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ CNSL ที่ได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดต่อไป

ตาราง 10 พื้นที่รวมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (α) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5, และ 9 mm

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | พื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (α), mm^{-1} |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 2 | 4.67 ± 0.94 |
| 5 | 3.03 ± 0.73 |
| 9 | 1.63 ± 0.28 |

ตาราง 12 แสดงรัศมีสมมูลของแผ่นแบน (α_c) และครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นแผ่นแบน (α_s) การที่พิจารณาชิ้นส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นแผ่นแบน (slab) นั้นเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้เป็นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ผ่าซีกจากโรงงาน มีลักษณะเป็นแผ่นแบน มีความโค้งเล็กน้อย เมื่อลดขนาดลงก็ยังคงลักษณะนี้อยู่ อนึ่งการพิจารณาชิ้นส่วนวัตถุดิบเป็นแผ่น

ตาราง 11 ความพรุนระหว่างอนุภาค(interparticle porosity)ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ในเบดนิ่ง(ϵ)

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | ความพรุนระหว่างอนุภาคในเบดนิ่ง(ϵ) |
|-----------------------------------|----------------------------------------------|
| 2 | 0.71 |
| 5 | 0.74 |
| 9 | 0.75 |

แบนนั้นใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าความเป็นทรงกลม(sphere)หรือทรงกระบอก(cylinder) สำหรับค่า a_s และ a_c นี้ จะนำไปใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย(solute diffusivity)ต่อไป

ตาราง 12 รัศมีสมมูลของแผ่นแบน(half of equivalent diameter, a_c)และครึ่งหนึ่งของความหนาแผ่นแบน(half of thickness, a_s)ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | รัศมีสมมูลของแผ่นแบน (a_c), mm | ครึ่งหนึ่งของความหนาแผ่นแบน (a_s), mm |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|
| 2 | 1.22±0.27 | 0.15±0.05 |
| 5 | 2.58±0.29 | 0.21±0.07 |
| 9 | 2.48±0.22 | 0.56±0.17 |

ตาราง 13 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย CNSL
(solute equilibrium distribution coefficient, $(y/x)^*$ or m)

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย CNSL, $(y/x)^*$ |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 2 | 0.9852 |
| 5 | 0.9833 |
| 9 | 0.9887 |
| เฉลี่ย | 0.9857 |

จากตาราง 13 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย CNSL (m หรือ $(y/x)^*$) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่านี้ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดวัตถุติบและที่จุดสมดุลความเข้มข้นของตัวละลาย CNSL ในของแข็งอิ่มตัว (saturated solid) จะต้องสมดุลกับความเข้มข้นของ CNSL ในส่วนสกัด(extract) ในที่นี้จะเห็นว่าค่า m หรือ $(y/x)^*$ มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า ความเข้มข้นของ CNSL ในของแข็งอิ่มตัวใกล้เคียงกับความเข้มข้นของ CNSL ในส่วนสกัดนั่นเอง ค่า m หรือ $(y/x)^*$ นี้ เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่เช่นเดียวกัน

การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย(Solute Diffusivity)

สภาวะ - ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

-ปริมาณตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 50 g ต่อเฮกเซน 150 ml

-ความถี่ในการเขย่า 150 รอบต่อนาที(อุณหภูมิห้อง 26 °C)

ตาราง 14 ความเข้มข้นของ CNSL ที่สกัดได้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่เวลาต่างๆ

| เวลา (time) | | ความเข้มข้น CNSL $y, \text{g/cm}^3$ | $Y = \frac{y - y^*}{y_0 - y^*}$ $y_0 = 0$ $y^* = 0.1027$ | $\ln Y$ | x_1 (คิดรวม inert material), g/cm^3 |
|-------------|-----------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------|
| นาที, min | วินาที, S | | | | |
| 1 | 60 | 0.0719 | 0.2999 | -1.2043 | 0.1785 |
| 2 | 120 | 0.0743 | 0.2765 | -1.2854 | 0.1675 |
| 3 | 180 | 0.0786 | 0.2347 | -1.4496 | 0.1477 |
| 4 | 240 | 0.0816 | 0.2055 | -1.5825 | 0.1339 |
| 5 | 300 | 0.0848 | 0.1743 | -1.7470 | 0.1191 |
| 8 | 480 | 0.0858 | 0.1646 | -1.8045 | 0.1145 |
| 10 | 600 | 0.0899 | 0.1246 | -2.0824 | 0.0957 |
| 13 | 780 | 0.0896 | 0.1276 | -2.0592 | 0.0970 |
| 15 | 900 | 0.0906 | 0.1178 | -2.1386 | 0.0924 |
| 18 | 1080 | 0.0925 | 0.0993 | -2.3094 | 0.0837 |
| 20 | 1200 | 0.0921 | 0.1032 | -2.2710 | 0.0855 |
| 25 | 1500 | 0.0933 | 0.0915 | -2.3911 | 0.0800 |
| 30 | 1800 | 0.0941 | 0.0837 | -2.4800 | 0.0763 |
| 40 | 2400 | 0.0927 | 0.0974 | -2.3292 | 0.0828 |
| 50 | 3000 | 0.0940 | 0.0847 | -2.4685 | 0.0768 |
| 60 | 3600 | 0.0951 | 0.0740 | -2.6037 | 0.0717 |
| 120 | 7200 | 0.0964 | 0.0613 | -2.7920 | 0.0657 |
| 180 | 10800 | 0.0964 | 0.0613 | -2.7920 | 0.0657 |
| 24hour | | 0.1027 | 0 | | |

สภาวะ -ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 5 mm

-ปริมาณตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 50 g ต่อเฮกเซน 150 ml

-ความถี่ในการเขย่า 150 รอบต่อนาที(อุณหภูมิห้อง 26 °C)

ตาราง 15 ความเข้มข้นของ CNSL ที่สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm
ที่ระยะเวลาต่างๆ

| เวลา (time) | | ความเข้มข้น CNSL | $Y = \frac{y - y^*}{y_0 - y^*}$ $y_0 = 0$ $y^* = 0.1010$ | $\ln Y$ | x_i (คิดรวม inert material) g/cm ³ |
|-------------|-----------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------|
| นาที, min | วินาที, s | y , g/cm ³ | | | |
| 1 | 60 | 0.0712 | 0.2950 | -1.2206 | 0.1817 |
| 2 | 120 | 0.0749 | 0.2584 | -1.3532 | 0.1647 |
| 3 | 180 | 0.0779 | 0.2287 | -1.4753 | 0.1509 |
| 4 | 240 | 0.0809 | 0.1990 | -1.6144 | 0.1371 |
| 5 | 300 | 0.0846 | 0.1624 | -1.8178 | 0.1201 |
| 8 | 480 | 0.0841 | 0.1673 | -1.7878 | 0.1224 |
| 10 | 600 | 0.0883 | 0.1257 | -2.0735 | 0.1030 |
| 13 | 780 | 0.0884 | 0.1248 | -2.0814 | 0.1026 |
| 15 | 900 | 0.0889 | 0.1198 | -2.1219 | 0.1003 |
| 18 | 1080 | 0.0892 | 0.1168 | -2.1470 | 0.0989 |
| 20 | 1200 | 0.0899 | 0.1099 | -2.2082 | 0.0957 |
| 25 | 1500 | 0.0911 | 0.0980 | -2.3226 | 0.0901 |
| 30 | 1800 | 0.0900 | 0.1089 | -2.2172 | 0.0952 |
| 40 | 2400 | 0.0940 | 0.0693 | -2.6692 | 0.0768 |
| 50 | 3000 | 0.0927 | 0.0822 | -2.4989 | 0.0828 |
| 60 | 3600 | 0.0951 | 0.0584 | -2.8402 | 0.0717 |
| 120 | 7200 | 0.0937 | 0.0723 | -2.6272 | 0.0782 |
| 180 | 10800 | 0.0935 | 0.0743 | -2.6002 | 0.0791 |
| 24hour | | 0.1010 | 0 | | |

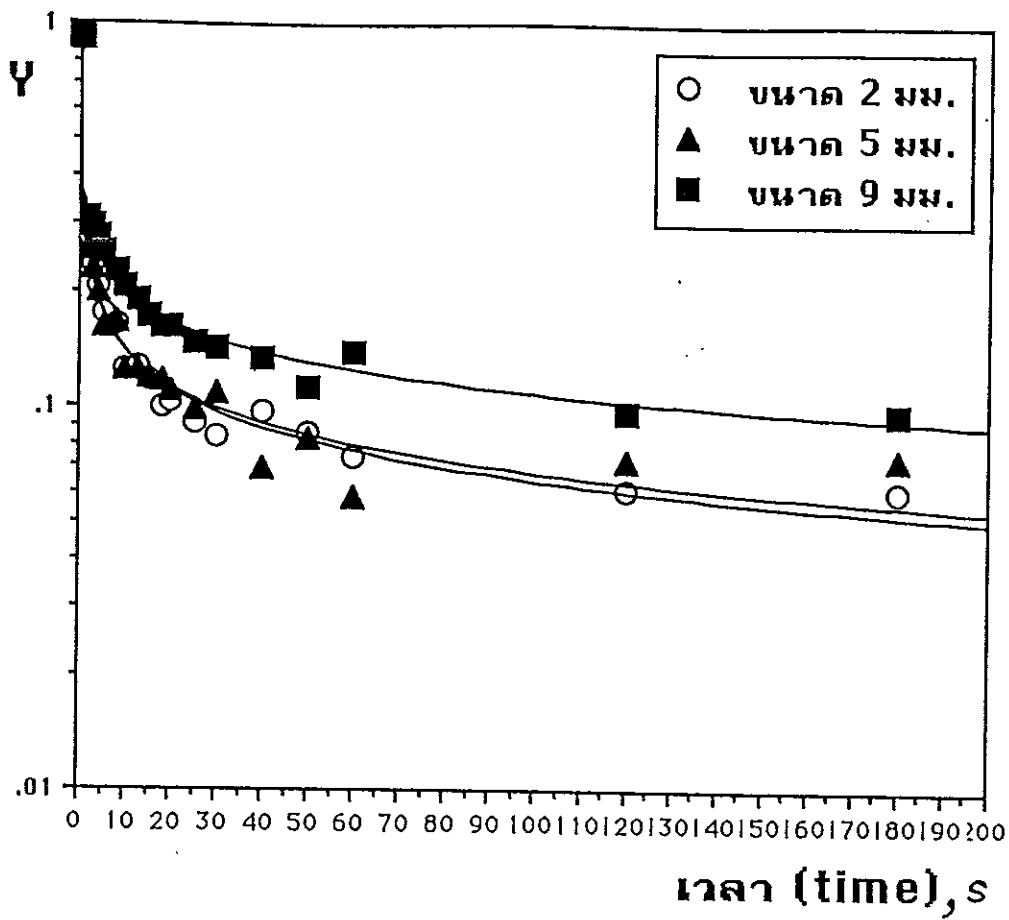
สภาวะ -ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 9 mm

-ตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 50 g ต่อเฮกเซน 150 ml

-ความถี่ในการเขย่า 150 รอบต่อนาที(อุณหภูมิห้อง 26 °C)

ตาราง 16 ความเข้มข้นของ CNSL ที่สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm
ที่ระยะเวลาต่างๆ

| เวลา (time) | | ความเข้มข้น CNSL, y g/cm ³ | $Y = \frac{y - y^*}{y_0 - y^*}$ $y_0 = 0$ $y^* = 0.1005$ | ln Y | x_i (คิดรวม inert material), g/cm ³ |
|-------------|-----------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------|
| นาที, min | วินาที, s | | | | |
| 1 | 60 | 0.0698 | 0.3051 | -1.1872 | 0.1882 |
| 2 | 120 | 0.0691 | .03125 | -1.1632 | 0.1914 |
| 3 | 180 | 0.0708 | 0.2955 | -1.2190 | 0.1836 |
| 4 | 240 | 0.0727 | 0.2766 | -1.2851 | 0.1748 |
| 5 | 300 | 0.0749 | 0.2547 | -1.3676 | 0.1647 |
| 8 | 480 | 0.0779 | 0.2249 | -1.4922 | 0.1509 |
| 10 | 600 | 0.0799 | 0.2053 | -1.5832 | 0.1417 |
| 13 | 780 | 0.0814 | 0.1897 | -1.6624 | 0.1348 |
| 15 | 900 | 0.0832 | 0.1718 | -1.7617 | 0.1265 |
| 18 | 1080 | 0.0842 | 0.1619 | -1.8206 | 0.1219 |
| 20 | 1200 | 0.0844 | 0.1603 | -1.8306 | 0.1211 |
| 25 | 1500 | 0.0857 | 0.1476 | -1.9135 | 0.1150 |
| 30 | 1800 | 0.0861 | 0.1433 | -1.9429 | 0.1132 |
| 40 | 2400 | 0.0871 | 0.1333 | -2.0149 | 0.1086 |
| 50 | 3000 | 0.0892 | 0.1124 | -2.1854 | 0.0989 |
| 60 | 3600 | 0.0867 | 0.1373 | -1.9855 | 0.1104 |
| 120 | 7200 | 0.0907 | 0.0975 | -2.3278 | 0.0920 |
| 180 | 10800 | 0.0907 | 0.0975 | -2.3278 | 0.0920 |
| 24hour | | 0.1005 | 0 | 0 | |



รูป 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ CNSL (Y) ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบเบทซ์จากการสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5, 9 mm

ตาราง 17 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity) ของ CNSL ในตัวทำละลายเฮกเซนสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดต่างๆที่อุณหภูมิห้อง

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย CNSL (solute diffusivity, D_s), m^2/s |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | $3.15 \times 10^{-9} x_i^{2.58}$ |
| 5 | $2.89 \times 10^{-8} x_i^{3.72}$ |
| 9 | $2.91 \times 10^{-7} x_i^{4.53}$ |

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง(CNSL)ในส่วนสกัด
(Diffusivity of solid(CNSL) in extract)

กฎข้อที่หนึ่งและสองของฟิคส์(Fick first and second laws)ใช้อธิบายการถ่ายโอนตัว
ละลายในของแข็งโดยการแพร่ อย่างไรก็ตามกฎข้อที่สองของฟิคส์จะถูกใช้บ่อยกว่าและสมการ
แก้ปัญห (solutions)มักจะแสดงในรูปทั่วไปดังนี้

$$X = Y = \sum_{i=0}^{\infty} C_i \exp(-q_i^2 \tau) \dots \dots \dots (34)$$

q_i : ฟังก์ชันของเงื่อนไขขอบเขต(functions of the boundary conditions)

C_i : ฟังก์ชันของเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น(functions of the boundary conditions and the initial conditions)

สำหรับแผ่นแบนจำกัดขนาด(finite slab) จะได้

$$Y = X = X_s X_c = \left[\sum_{i=0}^{\infty} C_{is} \exp(-q_{is}^2 \tau) \right] \left[\sum_{i=0}^{\infty} C_{ic} \exp(-q_{ic}^2 \tau) \right] \dots \dots (35)$$

สำหรับแผ่นแบนจำกัดขนาดให้ $i=1$ เท่านั้น ดังนั้น

$$Y = X = X_s X_c = (C_{is} C_{ic}) \exp[-(q_{is}^2 + q_{ic}^2) \tau]$$

$$Y = C \exp \left[- \left(\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2} \right) D_s t \right]$$

$$\log Y = \log C - \left(\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2} \right) D_s t \log e \dots \dots \dots (36)$$

$$\ln Y = \ln C - \left(\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2} \right) D_s t \dots \dots \dots (37)$$

$$Y = \frac{y - y^*}{y_0 - y^*} \dots \dots \dots (38)$$

$$X = \frac{x - x^*}{x_0 - x^*} \dots \dots \dots (39)$$

โดยที่

x : ความเข้มข้นของตัวละลายในของแข็งอิ่มตัว, kg/m^3

y : ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนสกัด, kg/m^3

x_0 : ค่าเริ่มต้นของ x , kg/m^3

y_0 : ค่าเริ่มต้นของ y , kg/m^3

- x^* : ค่าสมดุลของ x , kg/m^3
 y^* : ค่าสมดุลของ y , kg/m^3
 C_{is} : C_i สำหรับแผ่นแบนไม่จำกัดขนาด(infinite slab)
 C_{ic} : C_i สำหรับทรงกระบอกไม่จำกัดขนาด(infinite cylinder)
 q_{is} : q_i สำหรับแผ่นแบนไม่จำกัดขนาด
 q_{ic} : q_i สำหรับทรงกระบอกไม่จำกัดขนาด
 τ : ฟิคส์นัมเบอร์(Fick's number), $D_s t/a^2$
 D_s : สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย(solute diffusivity), m^2/s
 t : เวลาที่ใช้ในการสกัด(extraction time or solid holdup time), s
 a : ค่ารัศมีสำหรับอนุภาคทรงกลมและทรงกระบอกและความหนาครึ่งหนึ่งสำหรับแผ่นแบน, m
 a_s : a สำหรับแผ่นแบนไม่จำกัดขนาด
 a_c : a สำหรับทรงกระบอกไม่จำกัดขนาด
 C : ค่าคงที่ = $C_{is} C_{ic}$

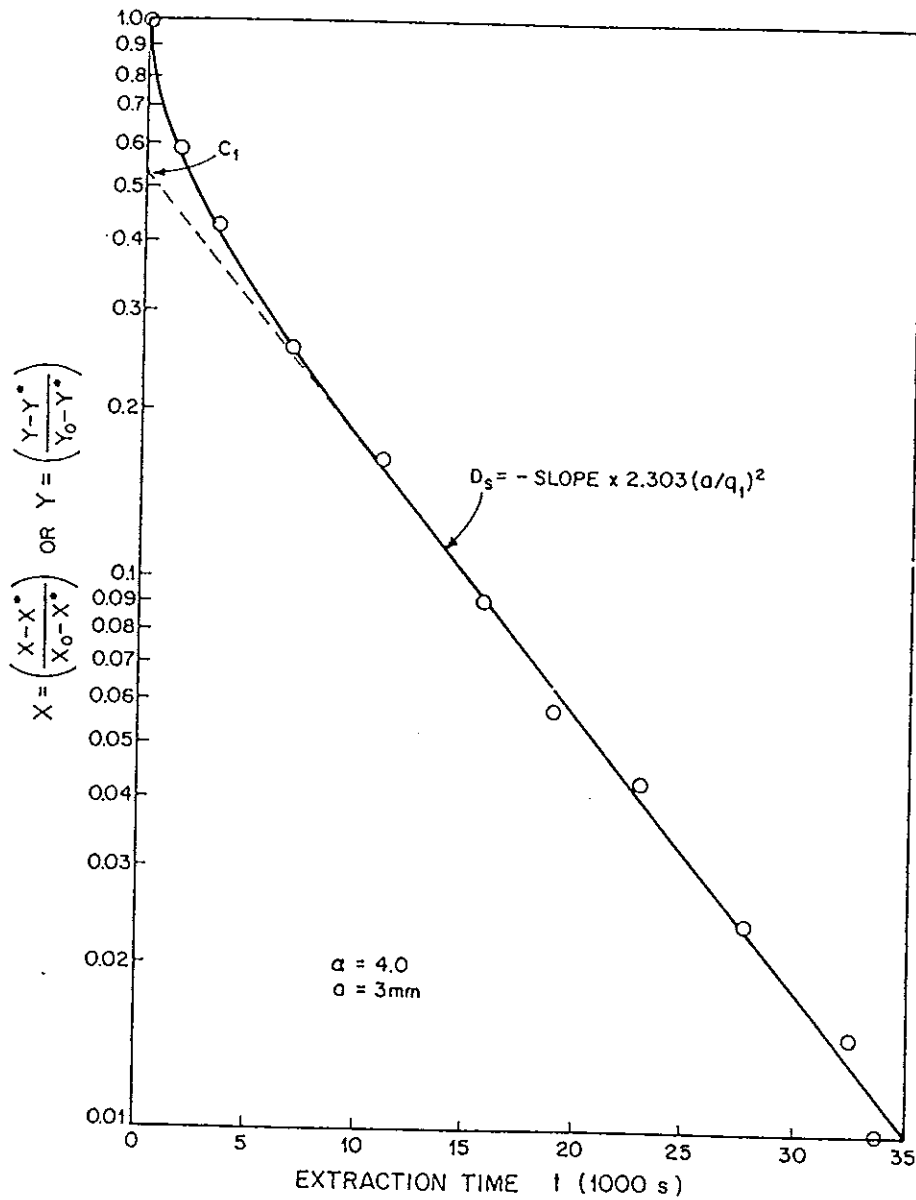
หมายเหตุ : สมการแก้ปัญหสำหรับแผ่นแบนจำกัดขนาด(finite slab)คือ

$$Y = X = X_s X_c \quad (\text{Rousseau, 1987})$$

- α : แฟคเตอร์การสกัด(stripping factor = mE'/R')
 E' : มวลของเอ็กแทรก(extract mass), kg
 R' : มวลของของแข็ง(solid mass), kg
 m : สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย
 (solute equilibrium distribution coefficient, $(y/x)^*$)

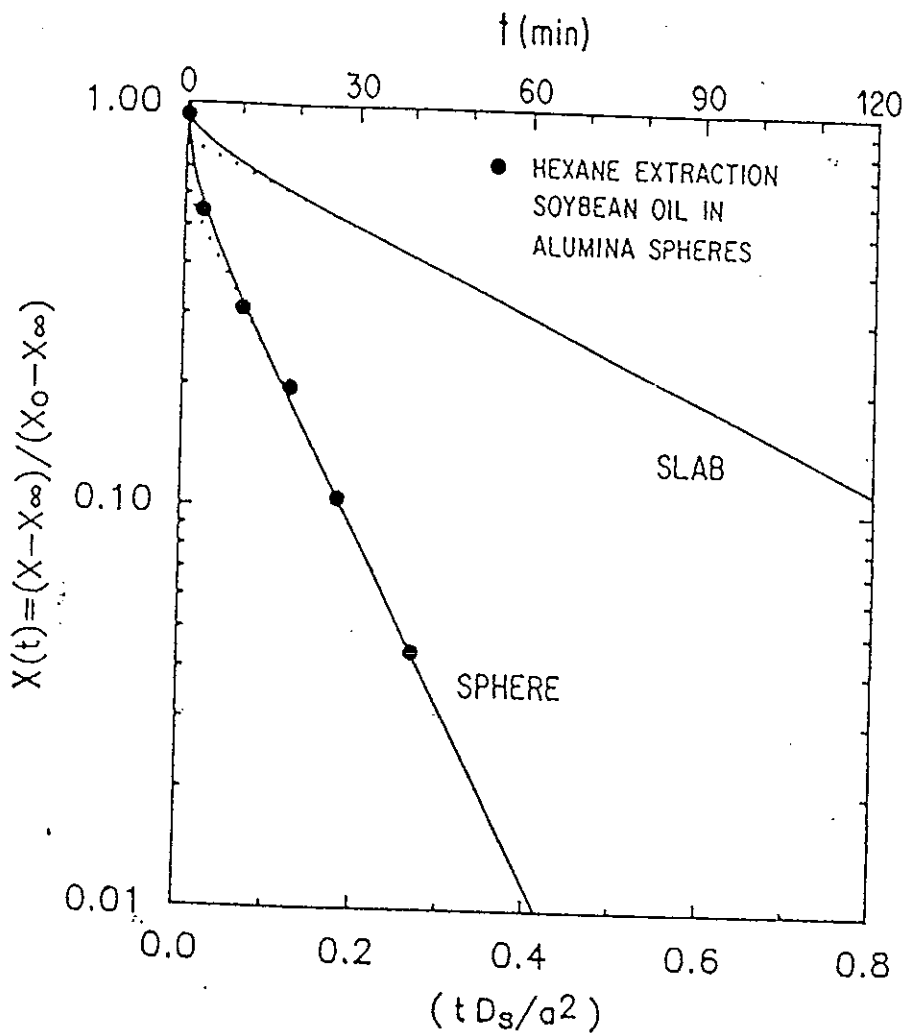
จากการคำนวณพบว่า D_s กับ x_i สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดต่างกันมีความสัมพันธ์ดังตาราง 17

รูป 10 และรูป 11 แสดงลักษณะกราฟที่เป็นไปตามสมการ (34) กราฟจะมีลักษณะโค้งเมื่อเวลา t มีค่าน้อยๆและเป็นเส้นตรงเมื่อ t มีค่ามากๆ ค่า D_s สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟที่ค่า t มากๆ



รูป 10 $\log Y$ หรือ $\log X$ กับเวลา t สำหรับการสกัดน้ำตาลแบบแบทช์ในผงกาแฟขนาด -6+8 mesh ($\log Y$ or $\log X$ versus time for the batch extraction of infused sucrose from -6+8 mesh spent coffee grounds)

ที่มา : Schwartzberg (1980)

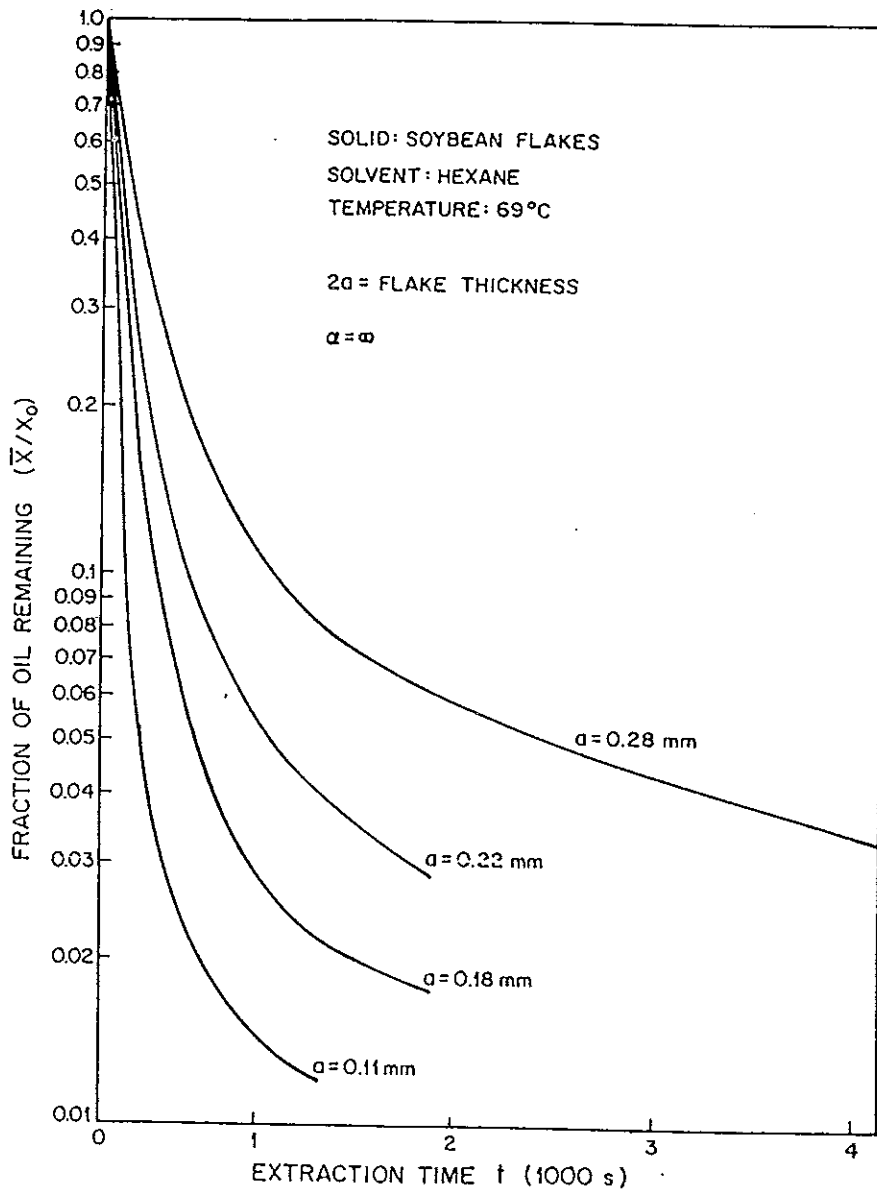


รูป 11 X กับ t หรือ $D_s t / a^2$ สำหรับวัสดุที่เป็นไปตามสมการแก้ปัญหของกฎของฟิคส์

มาตรฐาน (X vs t or $D_s t / a^2$ for material that obey standard solutions of Fick's Law.)

ที่มา : Segado และ Schwarzberg(1982)

เมื่อพิจารณารูป 12 และรูปจากการทดลอง 9 จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน แสดงว่าค่าความเข้มข้นและเวลาไม่เป็นไปตามสมการแก้ปัญหของฟิคส์มาตรฐาน (do not obey the standard Fick's law solutions) ได้มีการเสนอว่าเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจาก การเกิดลักษณะหลากหลายของโครงสร้าง (structural heterogeneity) หรือความหนาของแผ่นแบนไม่เท่ากันตลอด



รูป 12 $\log(\bar{x}/x_0)$ กับเวลา t สำหรับการสกัดน้ำมันจากแผ่นถั่วเหลืองโดยเฮกเซน ($\log(\bar{x}/x_0)$)

versus time for the extraction of soybean oil from flaked soybeans by oil free hexane

ที่มา : Schwartzberg(1980)

(non-uniform slab or flake thickness) ความเร็วช้าในการแตกตัวของน้ำมัน (slow dissolution of oil) หรือความสามารถในการละลายของตัวละลายบางตัวต่ำ (low solubility of certain solutes) การแพร่ของตัวละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้น (concentration-dependent diffusivity) การเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างน้ำมันกับของแข็ง (oil-solid interaction) และการไม่มีการถ่ายโอนโดยการแพร่ของน้ำมัน (non-diffusive transport of oil) อย่างไรก็ตามเหตุผลที่แท้จริงยังไม่แน่ชัด

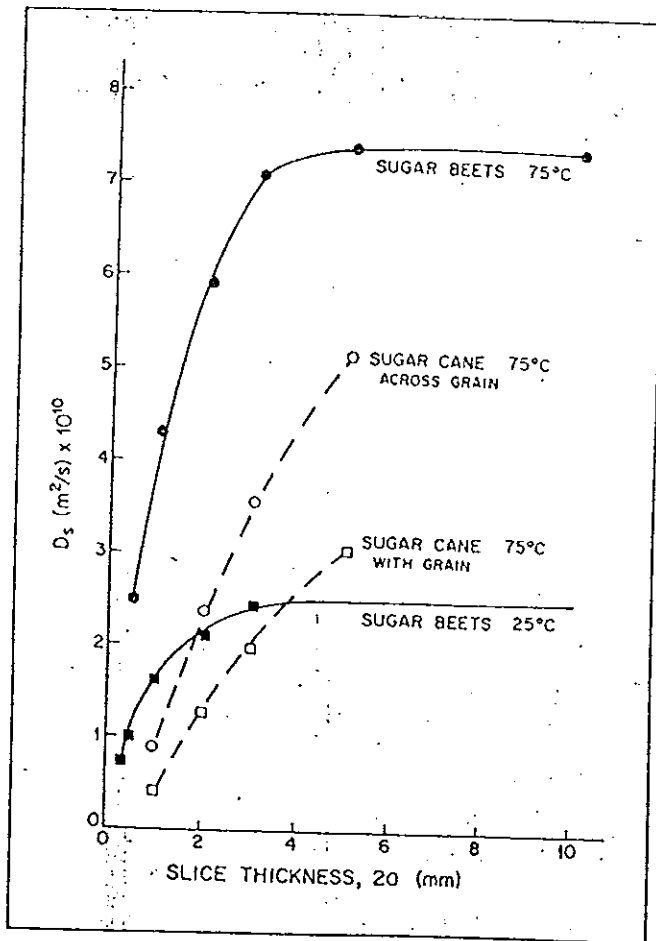
(Segado and Schwartzberg, 1982) แต่คาดว่าปัจจัยหลัก(major factor) น่าจะเนื่องมาจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวของโครงสร้างของแข็ง (solid-structure nonuniformity) (Schwartzberg, 1980)

อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าจากการทดลองนั้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย CNSL ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น (concentration-dependent diffusivity) ดังแสดงในตาราง 17 ความหนาของแผ่นแบนไม่เท่ากันตลอด(non-uniform slab thickness) เนื่องจากการแตกหักในลักษณะต่างๆกัน ระหว่างการเตรียมวัตถุดิบเพื่อทดลอง ส่งผลให้เกิดลักษณะหลากหลายของโครงสร้าง(structural heterogeneity) ความไม่เป็นหนึ่งเดียวของโครงสร้างของแข็ง(solid structure nonuniformity) เนื่องจากลักษณะธรรมชาติของวัตถุดิบและเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้มีขนาดมาจากแหล่งปลูกต่างๆ กัน มีการเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างน้ำมัน CNSL กับของแข็ง (oil-solid interaction) ซึ่งพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของของผสม CNSL กับตัวละลายเฮกเซนไม่เป็นเส้นตรงเมื่อใช้อัตราส่วนของ CNSL กับเฮกเซนต่างๆกัน (รูป 8) อนึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้น CNSL ในเฟสของแข็งเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย CNSL กลับเพิ่มขึ้น แสดงว่า CNSL กับโครงสร้างของแข็งมีปฏิกิริยาสัมพันธ์สูง ซึ่งอาจเป็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนใน CNSL กับออกซิเจนในเซลลูโลสหรืออาจเกิดจากแอฟฟินิตี(affinity)อื่นๆ นอกจากนี้ อาจเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างกันของเฮกเซน CNSL และโครงสร้างของแข็งด้วย

พิจารณารูป 12 และรูป 9 จากการทดลอง พบว่า เมื่อขนาดของวัตถุดิบที่ใช้สกัดเปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาก็เปลี่ยนไปด้วย กล่าวอีกนัยหนึ่งคือสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายในวัตถุดิบขนาดต่างกันมีความแตกต่างกันนั่นเอง เมื่อขนาดวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ก็เพิ่มขึ้นดังแสดงในตาราง 18 และรูป 13

การที่สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของแข็งที่ใช้สกัดเพิ่มขึ้นนั้น Schwartzberg และ Rong Yue Chao(1982) อธิบายว่า สำหรับของแข็งที่มีลักษณะกลุ่มเซลล์ประกอบด้วยท่อลำเลียงน้ำหรืออาหาร(vascular network) ที่ความหนาน้อยๆ ตัวละลายส่วนใหญ่จะไหลผ่านกลุ่มเซลล์ทั้งหลาย(cell mass) ออกไป ในขณะที่ที่ความหนาหลายๆจะมีการแพร่ผ่านระบบท่อลำเลียงน้ำหรืออาหาร(vascular system) มากกว่า สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นั้น น้ำมัน CNSL จะอยู่ในส่วน Spongy cells ซึ่งเป็นกลุ่มเซลล์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (Aggarwal, 1989) ซึ่งก็เป็นลักษณะของระบบท่อลำเลียงน้ำหรืออาหารนั่นเอง ในทางกลับกันถ้าเซลล์ของพืชที่ใช้สกัดมีการอัดตัวกันแน่น(densely packed cells) การเพิ่มขนาดอนุภาคที่ใช้สกัด จะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง

ข้อสังเกตประการหนึ่งคือ จากการทดลองหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุขของตัวละลาย



รูป 13 D_s กับความหนาของชิ้นอ้อยหรือซูการ์บีท (D_s vs slice thickness for sucrose in sugar cane and sugar beets)

ที่มา : Schwartzberg และ Rong Yue Chao (1982)

ตาราง 18 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_s) ที่เวลา 60 S ของการสกัดแบบแบทช์

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์, mm | D_s , m^2/s | ตัวอย่าง D_s ที่เวลา $t=60$ S, m^2/s |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| 2 | $3.15 \times 10^{-9} x_t^{2.85}$ | 3.67×10^{-11} |
| 5 | $2.89 \times 10^{-8} x_t^{3.72}$ | 5.10×10^{-11} |
| 9 | $2.91 \times 10^{-7} x_t^{4.53}$ | 15.02×10^{-11} |

พบว่า เฟสส่วนสัดกับเฟสของแข็งมีปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่ง Crank(1975) กล่าวว่า ในระบบที่มีปริมาตรคงที่ สัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏ(apparent diffusivity) ทั้งของตัวละลายและตัวทำละลายจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสำหรับระบบการสกัดน้ำมัน CNSL โดยตัวทำละลายเฮกเซนนี้ สัมประสิทธิ์การแพร่ของ CNSL และเฮกเซนย่อมมีค่าใกล้เคียงกัน

การที่ปริมาตรของสองเฟสไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อาจเนื่องจากโครงสร้างของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเซลล์โกลที่มีมีความคงทนสูง Kopelman และคณะ(1975) กล่าวว่า ในอาหารที่เป็นของแข็งที่เสียมสลายง่าย(deformable solid food) การไม่สมดุลของการแพร่(diffusion imbalance) มักจะทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลงเช่น การเหี่ยวของของแข็งเนื่องจากน้ำในผลอ่อนแพร่ออกจากเซลล์มากเกินไปเมื่อแช่อยู่ในน้ำเชื่อม(sugar syrup)

การทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย CNSL นี้ ได้ทดลองในของไหลที่เคลื่อนที่(moving fluid) โดยได้เขย่าภาชนะที่ใช้บรรจุตัวละลายและตัวทำละลาย ทั้งนี้เพื่อกำจัดความต้านทานเนื่องจากการแพร่ที่ภายนอกเฟสของแข็ง(external resistant) ให้หมดไป เพื่อให้ระบบถูกควบคุมโดยการแพร่ภายในของแข็ง(in solid diffusion) เพียงอย่างเดียว ทำให้การหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายมีความถูกต้อง พารามิเตอร์ที่ใช้บอกลักษณะความต้านทานการแพร่ของตัวละลายภายในและภายนอกเฟสของแข็ง พิจารณาได้จากไบโอทอมเบอร์ของการถ่ายโอนมวล(mass transfer Biot number, Bi)

โดยที่

$$Bi = \frac{k_f Ma}{D_s}$$

k_f : สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวของแข็ง

(surface mass transfer coefficient, m/S)

M : สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย,

$$M = \frac{X}{Y} = \left[\frac{(x - x^*) / (x_0 - x^*)}{(y - y^*) / (y_0 - y^*)} \right]$$

a : ค่ารัศมีสำหรับทรงกลมและทรงกระบอกและครึ่งหนึ่งของความหนาสำหรับแผ่นแบน

D_s : สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย, m^2/S

เนื่องจากไม่ได้ทดลองหาค่า k_f จึงประมาณค่า k_f จากตัวละลายอื่นดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของกลูโคสลักษณะทรงกลมรัศมี 0.3175 cm ที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่า $4.3180 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ($D_s = 6.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) (GreenKorn and Kessler, 1972)

สามารถประมาณค่า Bi ดังตาราง

ตาราง 19 ค่า Bi โดยประมาณในการสกัด CNSL แบบแบทช์

| ขนาดเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์, mm | D_s (m^2/s) | a (m) | x_i (g/cm^3) | $Bi = \frac{k_i Ma_i}{D_s}$, $k_i = 4.3180 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ $M \cong 1$ |
|------------------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | $3.15 \times 10^{-9} x_i^{2.85}$ | 3.67×10^{-11} | 0.1785–0.0657 | 17.49–482.83 |
| 5 | $2.89 \times 10^{-8} x_i^{3.72}$ | 5.10×10^{-11} | 0.1817–0.0791 | 17.99–395.94 |
| 9 | $2.91 \times 10^{-7} x_i^{4.53}$ | 5.02×10^{-11} | 0.1882–0.0920 | 16.12–412.96 |

ถ้า Bi มีค่าสูงกว่า 20 แสดงว่าการถ่ายโอนมวลที่ผิวเฟสของแข็งออกไปสู่เฟสเอ็กแทรกเร็วกว่าการถ่ายโอนมวลในของแข็งมาก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความต้านทานการถ่ายโอนมวลที่ผิวของแข็งน้อยกว่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลในของแข็ง ดังนั้นการแพร่ภายในของแข็งเป็นตัวควบคุมการแพร่ของระบบนั่นเอง

จากการประมาณค่า Bi ในตาราง 19 พบว่า Bi มีค่าสูงกว่า 20 เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นระบบนี้จึงเป็นระบบที่การแพร่ภายในของแข็งเป็นตัวควบคุมระบบ Schwartzberg(1980) กล่าวว่าเมื่อ Bi สูงกว่า 45 สามารถประมาณ (assume) ได้ว่า อนุภาคแขวนลอยอยู่ในของไหลอย่างอิสระ

การออกแบบปฏิกรณ์ในการสกัด(Extractor Design)

การพิจารณากำล้างการผลิต

จากสถิติการค้าสินค้าเกษตรกรรมไทยกับต่างประเทศปีพุทธศักราช 2533-2534 พบว่าในปีพุทธศักราช 2534 ไทยส่งเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเปลือกเป็นสินค้าออกปริมาณ 2,659 เมตริกตัน คิดเป็นมูลค่า 54,867,000 บาทและเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เอาเปลือกออก 132 เมตริกตันมูลค่า 17,229,000 บาท จะเห็นว่าปีหนึ่งๆประเทศไทยจะมีเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นวัสดุเศษเหลือจากการส่งสินค้าออกประมาณ 268 ตัน(เปลือกเมล็ดมีน้ำหนักรวมประมาณ 67 %ของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งเมล็ด(Aggarwal, 1972)) อย่างไรก็ตามปริมาณจริงย่อมมากกว่านี้ เนื่องจากไม่คิดรวมส่วนที่ผลิตได้และใช้ภายในประเทศ

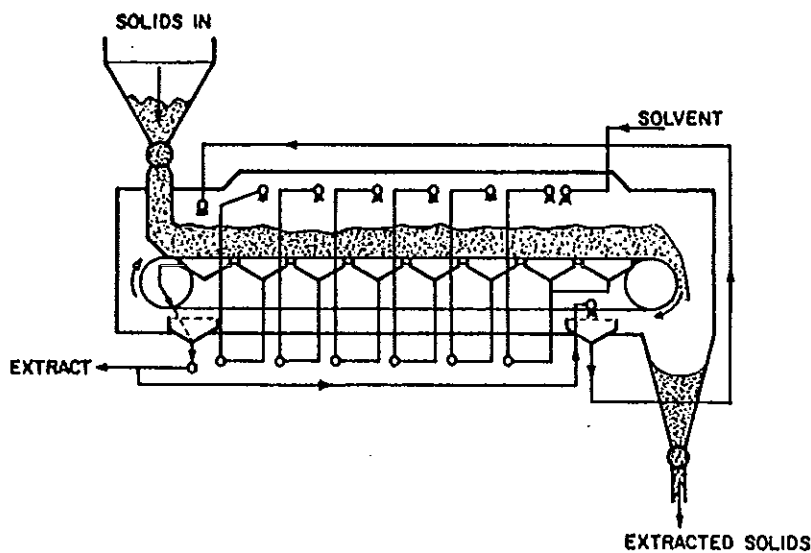
เฉพาะที่ภาคใต้โดยเฉพาะที่จังหวัดภูเก็ตมีโรงงานกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์อยู่จำนวน 10 โรง ใช้เมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตประมาณ 698.5 ตันต่อปี จะได้ผลผลิตเป็นเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่กะเทาะเปลือกแล้วประมาณ 94.66 ตันต่อปี ผลจากการนี้ทำให้มีเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือใช้เป็นจำนวนมากประมาณได้ว่าไม่น้อยกว่า 600 ตันต่อปี ในอนาคตการขยายตัวของโรงงานกะเทาะเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะมีมากขึ้น ทำให้มีเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือใช้มากขึ้น(อุตสาหกรรมสาร, 2532)

ถ้าสมมติว่าปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 600 ตัน เป็นวัตถุดิบป้อนสู่โรงงานสกัดน้ำมัน จะได้วัตถุดิบเฉลี่ย 50 ตันต่อเดือนหรือประมาณ 1-2 ตันต่อวัน ในที่นี้พิจารณาให้กำลังการผลิตคือเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ป้อนเข้าสู่โรงงานมีปริมาณวันละ 1 ตันหรือ 1,000 kg

การพิจารณาแบบปฏิกรณ์

ปฏิกรณ์ที่ใช้สกัดมีหลายแบบ ในที่นี้พิจารณาใช้ปฏิกรณ์แบบไหลตัดข้ามหลายสเตจ (Multistage Crossflow Extractor) ปฏิกรณ์แบบไหลตัดข้ามเป็นปฏิกรณ์ที่นิยมใช้ในระบบไหลสวนทางแบบหลายสเตจ(Multistage Countercurrent System) ที่ซึ่งเขตของแข็งมีการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง ของแข็งจะถูกป้อนเข้ามาที่จุดป้อน(feed zone)แล้วเคลื่อนที่ผ่านแชมเบอร์(chamber)หรือสเตจต่างๆบนผิวที่มีรูพรุนและถูกขับออกไปที่จุดขับของแข็ง(solid unloading zone) ส่วนสกัดจะซึมผ่านเบตและแผ่นกรอง(support surface)ลงไปรวมอยู่ที่ส่วนรองรับของเหลวทางด้านล่าง(sump)แล้วจะถูกนำกลับไปฉีดพ่นใหม่ที่สเตจถัดไป จากการจัดตำแหน่งของการฉีดพ่นและส่วนรองรับของเหลวในลักษณะนี้ส่วนสกัดจะถูกเคลื่อนย้ายในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของของแข็ง ทำให้เกิดลักษณะการชะละลายแบบไหลสวนทาง(Countercurrent leaching)นั่นเอง เมื่อการฉีดพ่น(drainage)หรือการซึมผ่านเบตเป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่วนสกัดจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่

(recirculated) ในแต่ละชั้นการสกัด ทำให้เบดเปียกขึ้นอยู่เสมอ การไหล(overflow)ของส่วนสกัดจาก ส่วนรองรับของเหลวหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งทำให้เกิดการไหลสวนทาง(countercurrent flow) เมื่อ อัตราการซึมผ่านหรือการฉีดพ่นช้า จะไม่มีการนำส่วนสกัดกลับมาใช้ใหม่ในแต่ละสแตจนั้นๆและ สำหรับการฉีดพ่นหรือการซึมผ่านช้ามากๆ ส่วนสกัดจะถูกฉีดพ่นบนเบดที่สองสแตจถัดไปของจุด รองรับของเหลว การขนส่งของแข็งทำได้โดยใช้สายพานเดียวดังรูป 14



รูป 14 ปฏิกรณ์การสกัดแบบไหลตัดข้ามแบบใช้สายพาน

(Belt-type crossflow extractor)

ที่มา : Schwartzberg (1983)

เครื่องสกัดหรือปฏิกรณ์ในการสกัดแบบไหลตัดข้าม(Crossflow Extractor)สามารถใช้ในการสกัดตัวละลายที่แตกต่างกันหลายชนิด เครื่องสกัดแบบนี้บางชนิดมีขนาดค่อนข้างใหญ่กล่าวคือมีความกว้าง 11 เมตรและยาว 52 เมตร สามารถรับของแข็งได้ 10,000 ตันต่อวัน เครื่องสกัดนี้อาจมีแรมเบอร์หรือสแตจถึง 18 สแตจ เบดของแข็งมักจะมีขนาด 0.5 ถึง 3.0 เมตร ถึงแม้ว่าใน Filtrex Extractor จะใช้เบดที่มีความลึก 0.05 เมตร

การพิจารณาข้อกำหนดต่างๆที่เกี่ยวข้องกับปฏิกรณ์การสกัด

1. สกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

- 2.จากการพิจารณาวัตถุบป้อนเข้าสู่โรงงาน 1 ตันต่อวัน กำหนดให้ปฏิกรณ์ยาว 5.2 เมตร
- 3.ออกแบบให้แชมเบอร์แต่ละแชมเบอร์มีลักษณะแบบผสมกันทั่วถึง(well mixed chamber) เป็นปฏิกรณ์ที่คิดรวมการผสมกลับ(backmixing) ซึ่งปฏิกรณ์แบบผสมกันทั่วถึง(well-mixed reactor) ที่มีแชมเบอร์ย่อยเรียงต่อกันหลายๆก็คือปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบปลัก(plug-flow reactor)นั่นเอง

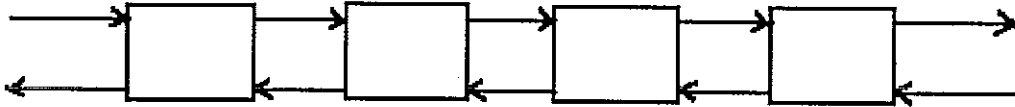
มฤดี ประภากรวัฒนาและจันทนา คงสังข์(2536) พบว่า ถ้าใช้สัดส่วนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อเฮกเซน 1:1 w/v, 1:1.7 หรือ 1:2 w/v และ 1:5 หรือ 1:7 w/v จะใช้จำนวนสเตจ 3, 2 และ 1 สเตจ ตามลำดับจึงจะสกัดCNSLได้หมด ดังนั้นในที่นี้จะออกแบบให้ปฏิกรณ์มี 4 สเตจหรือ 4 แชมเบอร์

- 4.กำหนดให้สกัดได้ 95%CNSLที่มีในวัตถุดิบ(ใช้วิธีการคิดความเข้มข้นแบบรวมวัสดุเฉื่อย เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ที่หาได้คิดรวมวัสดุเฉื่อย)
- 5.ในเครื่องสกัดแบบอาศัยการแพร่(diffuser)นิยมใช้ตัวทำละลาย 1.2-1.5 เท่าของวัตถุดิบ ดังนั้นสำหรับวัตถุดิบนำเข้าสู่ปฏิกรณ์ 1000 kg/day หรือ 100 kg/hour หรือ 5/3 kg/s จะใช้เฮกเซน $1.5 \times 5/3 = 2.5$ kg/s
- 6.เนื่องจากระบบการสกัดCNSLโดยตัวทำละลายเฮกเซนเป็นระบบที่สองเฟสค่อนข้างคงที่ ดังข้อมูลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย(ตารางผนวก 11, 13 และ 15) ดังนั้นกำหนดให้ L_f หรือปริมาณของเฟสส่วนสกัดที่ออกจากสเตจหรือแชมเบอร์สุดท้ายเท่ากับเฟสส่วนสกัดที่เข้าสู่แชมเบอร์แรกของการสกัดนั้นคือ $L_f = L_0 = L_1 = L_2 = L_3 = 2.5 \text{ kg/s}$ และดังนั้นปริมาณของของแข็งในเฟสของแข็งที่ออกจากแชมเบอร์สุดท้ายของการสกัด (S_f) ย่อมเท่ากับปริมาณของของแข็งที่เข้าสู่แชมเบอร์แรก นั่นคือ $S_f = S_0 = S_1 = S_2 = S_3 = 5/3 \text{ kg/s}$

จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของCNSLในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบคิดรวมวัสดุเฉื่อยเมื่อเริ่มต้น (x_0) มีค่า 0.5095 g/cm^3 หรือ 509.5 kg/m^3 ดังนั้นกำหนดให้ความเข้มข้นของCNSLในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ออกจากแชมเบอร์สุดท้าย (x_f) มีค่า 25.5 kg/m^3 (สกัด 95 % CNSL) สามารถเขียนสมการดุลมวลสารดังรูป 15

$$S_0 = 5/3 \text{ kg/s} \quad S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_f = 5/3 \text{ kg/s}$$

$$x_0 = 509.5 \text{ kg/m}^3 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_f = 25.5 \text{ kg/m}^3$$



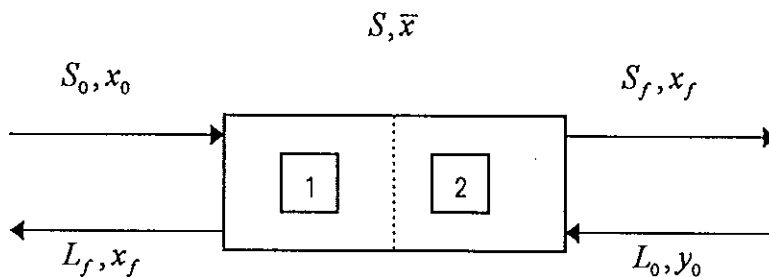
$$L_f = 2.5 \text{ kg/s} \quad L_3 \quad L_2 \quad L_1 \quad L_0 = 2.5 \text{ kg/s}$$

$$y_f = 322.7 \text{ kg/m}^3 \quad y_3 \quad y_2 \quad y_1 \quad y_0 = 0 \text{ kg/m}^3$$

รูป 15 การดุลมวลในปฏิกรณ์การสกัด

การคำนวณเวลาเรสซิเดนซ์ (resident time, t_f) เมื่อการไหลในปฏิกรณ์เป็นแบบปลั๊ก (plug flow) (ไม่มีการผสมกลับ(backmixing))

พิจารณาการดุลมวลรอบปฏิกรณ์ดังรูป 16



รูป 16 การดุลมวลตามความยาวปฏิกรณ์เมื่อการไหลในปฏิกรณ์เป็นแบบปลั๊ก

(Material balance along the extractor when the flow is plug flow)

จากการดุลมวลรอบส่วนที่ 1 จะได้

$$\bar{x}S + y_0L_0 = \bar{x}_fS_f + yL \dots \dots \dots (40)$$

$$y = \bar{x} \frac{S}{L} - \bar{x}_f \frac{S_f}{L} + y_0 \frac{L_0}{L} \dots \dots \dots (41)$$

โดยที่

- S_0 : อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อเริ่มต้น (m^3/s)
- S_f : อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็งที่ออกจากปฏิกรณ์ (m^3/s)
- S : อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็งที่จุดใดๆตามความยาวปฏิกรณ์ (m^3/s)
- L_0 : อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนสกัดเมื่อเริ่มต้น (m^3/s)

L_f : อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนสกัดที่ออกจากปฏิกรณ์ (m^3/s)

L : อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนสกัดที่จุดใดๆตามความยาวปฏิกรณ์ (m^3/s)

x_0 : ความเข้มข้นของตัวละลายเมื่อเริ่มต้น (kg/m^3)

x_f : ความเข้มข้นของตัวละลายที่ออกจากปฏิกรณ์ (kg/m^3)

\bar{x} : ความเข้มข้นเฉลี่ยของตัวละลายในของแข็งที่จุดใดๆตามความยาวปฏิกรณ์ (kg/m^3)

y_0 : ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนสกัดเมื่อเริ่มต้น (kg/m^3)

y_f : ความเข้มข้นของตัวละลายในส่วนสกัดที่ออกจากปฏิกรณ์ (kg/m^3)

y : ความเข้มข้นเฉลี่ยของตัวละลายในส่วนสกัดที่จุดใดๆตามความยาวปฏิกรณ์ (kg/m^3)

เมื่อใช้กฎข้อที่หนึ่งของฟิคส์(Fick's first law)เมื่อโปรไฟล์ของความเข้มข้นเป็นพาราโบลา

จะได้อัตราการถ่ายโอนตัวละลายระหว่างเฟสดังสมการ

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{3AeD}{l}(\bar{x} - x_s) = \frac{3AeD}{l}(\bar{x} - y/m) \dots \dots \dots (42)$$

โดยที่ Ae : พื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (m^2)

D : สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย (m^2/s)

l : ครึ่งหนึ่งของความหนาแผ่นแบน (m)

m : สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย

แทนค่าสมการ (41) ลงใน (42) จะได้

$$-\frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{3AeD}{l} \left(\bar{x} - \frac{\bar{x}S}{mL} - \frac{y_0L_0}{mL} + \frac{\bar{x}_fS_f}{mL} \right) \dots \dots \dots (43)$$

ถ้าประมาณว่า Ae, D, l, S และ L มีค่าคงที่ จะได้สมการแบบจำลองพาราโบลา

ง่ายที่สุด (The ultimate simplified parabolic model) คือ

$$-\frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{3AeD}{l} \left(\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \bar{x} + \frac{\bar{x}}{\alpha} - \frac{y_0}{m} \right); \alpha = \frac{mL}{S} \dots \dots \dots (44)$$

อินทิเกรตที่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $\bar{x} = \bar{x}_0$ ถึง $\bar{x} = \bar{x}$ จะได้

$$\left. \begin{array}{l} \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \bar{x} + \frac{\bar{x}_f}{\alpha} - \frac{y_0}{m} \\ \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \bar{x}_0 + \frac{\bar{x}_f}{\alpha} - \frac{y_0}{m} \end{array} \right\} 0 = \exp \left[- \frac{3D(\alpha - 1)Aet}{\alpha l} \right] \dots \dots \dots (45)$$

คำนวณหาเวลาเรสซิเดนซ์ (resident time, t_f) จากสมการที่ 45 โดยมีค่าของพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

$$\bar{x}_0 = x_0 = 509.5 kg / m^3, \bar{x}_f = x_f = 509.5 kg / m^3 \text{ (สกัด CNSL 95%)}$$

$$\alpha = \frac{mE'}{R'} \text{ โดยที่ } \frac{E'}{R'} = 1.5 \text{ และ } m = 0.9852 \text{ (ตาราง 13) ดังนั้น}$$

$$\alpha = 0.9852 \times 1.5 = 1.4778 \cong 1.48$$

สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm จะได้

$$D_s = 3.1546 \times 10^{-9} x_i^{2.8544} \text{ (ตาราง 17)}$$

ในที่นี้ใช้ค่าเฉลี่ย D_s จากการสกัดแบบแบทช์คือ

$$D_s = (3.75 \times 10^{-11} + 0.22 \times 10^{-11}) / 2 = 1.985 \times 10^{-11}$$

$$l = 0.1487 \times 10^{-3} \text{ m (ตาราง 12), } Ae = 4.67 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ (ตาราง 10)}$$

แทนค่าของพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการที่ (45) จะได้

$$\frac{\left(\frac{1.48-1}{1.48}\right)25.5 + \frac{25.5}{1.48} - \frac{0}{0.9852}}{\left(\frac{1.48-1}{1.48}\right)509.5 + \frac{25.5}{1.48} - \frac{0}{0.9852}} = \exp\left[\frac{3 \times 1.985 \times 10^{-11}(1.48-1) \times 4.67 \times 10^3 t}{1.48 \times 0.1487 \times 10^{-3}}\right]$$

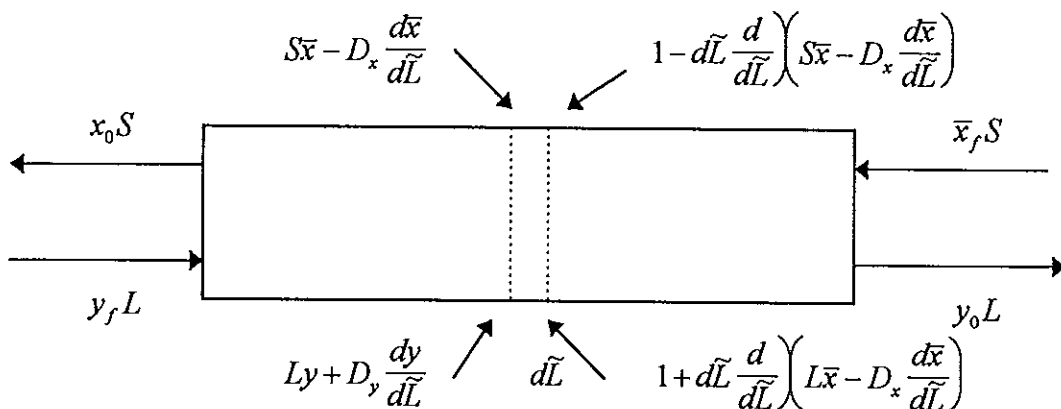
$$t = t_f = 3245.0054 S = 54.08 \text{ min}$$

นั่นคือเวลาเรสซิเดนซ์ (t_f) แบบไม่มีการผสมกลับในปฏิกรณ์มีค่าเป็น 54.08 นาที

การคำนวณเวลาเรสซิเดนซ์สำหรับการชะละลายแบบไหลสวนทางที่มีการผสมกลับเมื่อความเร็วของเฟสของเหลวไม่คงที่

ดังที่ได้ทราบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร (volumetric flow rate) ของของเหลวตามความยาวปฏิกรณ์มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับความเปลี่ยนแปลงของความเร็วเฉลี่ย ดังนั้นจึงใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลวเป็นฐานการคำนวณ

พิจารณากระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางที่มีการผสมกลับตลอดความยาว L ดังรูป 17



รูป 17 การดูมวลรอบปฏิกรณ์การสกัดแบบไหลสวนทางโดยพิจารณาการผสมกลับ

(Material balance along the countercurrent extractor with backmixing at length L)

โดยพิจารณาสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. อัตราการไหลเชิงปริมาตรของทั้งเฟสของแข็งและของเหลวมีค่าคงที่
2. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของตัวละลายมีค่าคงที่
3. สัมประสิทธิ์การแพร่ปรับเปลี่ยนมีค่าคงที่ (modified dispersion coefficient)

โดยที่ S, L : อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็งและของเหลวตามลำดับ (m^3/s)

A_x, A_y : พื้นที่ตัดขวาง(interstitial area)สำหรับการไหลของเฟสของแข็งและของเหลวตามลำดับ (m^2)

D_x : สัมประสิทธิ์การแพร่ปรับเปลี่ยนในเฟสของแข็ง = $D_x^* A_x$ (m^4/s)

D_x^* : สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับเฟสของแข็งนิยามโดยผู้วิจัยต่างๆ (m^2/s)

D_y : สัมประสิทธิ์การแพร่ปรับเปลี่ยนในเฟสของเหลว(ส่วนสกัด) = $D_y^* A_y$ (m^4/s)

D_y^* : สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับเฟสของเหลวนิยามโดยผู้วิจัยต่างๆ (m^2/s)

จากการดุลมวลรอบ $d\bar{L}$ จะได้

$$-S \frac{dX}{d\bar{L}} = -L \frac{dY}{d\bar{L}} = \frac{Sk_x}{v_x} (x - x^*) \dots \dots \dots (46)$$

โดยที่ v_x คือความเร็วเฉลี่ยของเฟสของแข็ง

$$SX = S\bar{x} - D_x \frac{d\bar{x}}{d\bar{L}} \dots \dots \dots (47)$$

$$LY = Ly + D_y \frac{dy}{d\bar{L}} \dots \dots \dots (48)$$

กำหนดตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$P = \frac{S\bar{L}_T}{D_x}, \quad T = \frac{k_x \bar{L}_T}{v_x} = k_x t_f, \quad t_f = \text{total resident time}$$

$$R = \frac{L\bar{L}_T}{D_y} = \text{Peclet Number}, \quad Q = \frac{S}{L}, \quad z = \frac{\bar{L}}{\bar{L}_T}$$

หลังการเปลี่ยนรูปสมการ (47) และ (48) จะได้

$$X = \bar{x} - \frac{1}{P} \frac{d\bar{x}}{dz}, \quad Y = y - \frac{1}{R} \frac{dy}{dz} \dots \dots \dots (49)$$

$$-\frac{dX}{dz} = \frac{1}{Q} \frac{dY}{dz} = T(x - x^*) \dots \dots \dots (50)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตทั่วไป (usual boundary condition) คือ

$$\text{ที่ } z = 0 \text{ จะได้ } x_0 = X, \quad y_f = Y = y \dots \dots \dots (51)$$

$$\text{และที่ } z = 1 \text{ จะได้ } y_0 = Y, \quad x_f = X = x \dots \dots \dots (52)$$

เนื่องจากการไหลของเฟสของเหลว(ส่วนสกัด)เป็นแบบพลัก ดังนั้นจะได้สมการแก้ปัญหา ดังต่อไปนี้คือ

สำหรับ $Q \neq 1$ ให้ $J = 1/\alpha = Q/m$ โดยที่ m คือค่าคงที่สมดุลของตัวละลาย จะได้

$$\frac{x_0 - x}{x_0 - y_0/m} = \frac{\frac{(1-w_1)H_1}{q_1} - \frac{(1-w_2)H_2}{q_2}}{\frac{(1-FW_1)H_1}{q_1} - \frac{(1-FW_2)H_2}{q_2}} \dots\dots\dots(53)$$

หรือ

$$\left. \frac{y - y_0}{mx_0 - y_0} \right\} \alpha = \frac{\frac{w_1 - H_1W_1}{q_1} - \frac{w_2 - H_2W_2}{q_2}}{\frac{(1-FW_1)H_1}{q_1} - \frac{(1-FW_2)H_2}{q_2}} \dots\dots\dots(54)$$

โดยที่ q_1 และ q_2 คือรากของสมการ

$$q^2 + q(T + R) = TR \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \dots\dots\dots(55)$$

$$\left. \begin{array}{l} H = 1 + q/R \\ w = e^{qz} \\ W = e^q \end{array} \right\} \dots\dots\dots(56)$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเทียบกับเฟสของแข็ง(k_x)สำหรับการชะละลาย

จากแบบจำลองการไหลแบบพลัก(plug flow)จะได้ว่า

$$-\frac{d\bar{x}}{dt} = Fk_b \frac{D}{\bar{l}} (\bar{x} - y/m) = FS \frac{\bar{l}}{\bar{l}^2} k_b (\bar{x} - x^*) = k_x (\bar{x} - x^*) \dots(57)$$

โดยที่ k_b คือพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับ Bi ซึ่งมีค่าโดยประมาณเป็น $Bi/(Bi + 3)$ ดังนั้นจะได้

$$k_x = FSk_b \frac{D}{\bar{l}^2} \dots\dots\dots(58)$$

สมการ (58) ได้จากการประมาณ(assume)ว่า ไม่มีผลอันเนื่องมาจากเงื่อนไขเริ่มต้นเกิดขึ้น (no initial condition effect)หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ j-factor มีค่าเป็นหนึ่ง (j-factor เป็นพารามิเตอร์บอกถึงเวลาล่าช้าของการสกัดเนื่องจากพลาสโมไลซิสของเซลล์ (cell plasmolysis) ทฤษฎีการแพร่ (diffusion theory) นั้นประมาณว่าการแพร่เกิดขึ้นทันทีที่เฟสของแข็งสัมผัสกับเฟสของเหลว แต่ในความเป็นจริงเซลล์ต้องมีการเสื่อมสภาพก่อนการแพร่จึงจะเกิดขึ้น การแพร่จะเกิดขึ้นดีที่สุดเมื่อผนังเซลล์เกิดการเสื่อมสภาพโดยสมบูรณ์ ถ้า j-factor เป็นหนึ่ง แสดงว่าการแพร่เกิดขึ้นทันที สำหรับ

ระบบการสกัด CNSL โดยเฮกเซนนี้ประมาณว่า j -factor เป็นหนึ่ง เนื่องจากไม่สามารถสังเกตเห็น เวลาช้าเนื่องจากพลาสมโไลซิสได้ (รูป 9)

R คือเพคเลทนามเบอร์ (Peclet Number) ของของเหลว เพคเลทนามเบอร์นี้เป็นค่าวัดปริมาณการผสมกลับ(backmixing) ถ้า R เป็นศูนย์แสดงว่าการผสมเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ ถ้า R เป็นอินฟินิท(∞) แสดงว่าการไหลเป็นแบบปลั๊ก(plug flow)

ในการใช้แบบจำลองการผสมกลับ(backmixing model) ร่วมกับทฤษฎีการแพร่(diffusion theory) นั้น มีปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งคือไม่ทราบค่า F หรือ F -factor การนำ F -factor ของระบบที่มีการไหลแบบปลั๊กมาใช้กับระบบไหลสวนทางแบบมีการผสมกลับ(countercurrent-backmixing system) จะทำให้เกิดการประมาณระดับของการสกัด(degree of extraction) สูงกว่าความเป็นจริง

ดังได้ทราบว่า F -factor ของระบบการสกัดหนึ่งๆขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาคและเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้อง ในระบบที่รูปร่างของอนุภาคมีลักษณะเป็นหนึ่งเดียว(uniformity) เฉพาะเงื่อนไขขอบเขตเท่านั้นที่มีผลต่อ F -factor โดยทั่วไปเมื่อ α เพิ่มขึ้น F -factor จะมีค่าเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันเมื่อ α ลดลง F -factor จะลดลง

เราสามารถที่จะประมาณ F -factor ในแบบจำลองที่มีการผสมกลับ(backmixing) โดยพิจารณาจากสมการแก้ปัญหาโดยประมาณของแบบจำลองการไหลแบบปลั๊ก(plug flow model) ที่ Bi เข้าใกล้อินฟินิท (∞) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูป

$$E = \frac{\left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)\bar{x} + \frac{\bar{x}_f}{\alpha} - \frac{y_0}{m}}{\left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)\bar{x}_0 + \frac{\bar{x}_f}{\alpha} - \frac{y_0}{m}} = j \exp\left[-FS\left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)F_0\right] \dots \dots \dots (59)$$

หรือ

$$E = \frac{\text{driving force}}{\text{initial driving force}} = \frac{\bar{x} - y/m}{\bar{x}_0 - y_f/m} = j \exp\left[-FS\left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)F_0\right]$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \ln E &= \ln(\text{driving force}) - \ln(\text{initial driving force}) \\ &= \ln j - \left[FS\left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)F_0\right] \dots \dots \dots (60) \end{aligned}$$

$$\frac{d \ln E}{dF_0} = \frac{d \ln(\text{driving force})}{dF_0} = -FS\left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right) \dots \dots \dots (61)$$

เนื่องจากไม่ได้ทดลองหา F -factor จึงประมาณ F -factor จากระบบการสกัดน้ำตาลจากแอปเปิลโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายดังนี้

$$\bar{F} \cong 3 + 0.22 \left\{ \frac{d(\text{driving force})}{dF_0} \right\} \dots \dots \dots (62)$$

(Siripatana, 1986)

พิจารณา F -factor ในแบบจำลองที่มีการผสมกลับดังนี้ จากสมการ (62) จะได้

$$x = (y_0/m - x_0) \frac{[q_2(1-w_1)H_1 - q_1(1-w_2)H_2]}{[q_2(1-\frac{1}{\alpha}W_1)H_1 - q_1(1-\frac{1}{\alpha}W_2)H_2]} + x_0 \dots \dots \dots (63)$$

จากสมการ (63) จะได้

$$\frac{y}{m} = -\frac{1}{\alpha}(y_0/m - x_0) \frac{[q_2(w_1 - H_1W_1) - q_1(w_2 - H_2W_2)]}{[q_2(1-\frac{1}{\alpha}W_1)H_1 - q_1(1-\frac{1}{\alpha}W_2)H_2]} + \frac{y_0}{m} \dots \dots \dots (64)$$

$\text{driving force} = x - y/m$

$$= (y_0/m - x_0) \frac{[q_2(1-w_1)H_1 + \frac{q_2}{\alpha}(w_1 - H_1W_1) - q_1(1-w_2)H_2 - q_1/\alpha(w_2 - H_2W_2)]}{[q_2(1-\frac{1}{\alpha}W_1)H_1 - q_1(1-\frac{1}{\alpha}W_2)H_2]} + (x_0 - y_0/m) \dots \dots \dots (65)$$

กำหนดให้

$$\psi_1 = q_1(1-w_1)H_1 = q_2(1-e^{q_1z})(1+q_1/R)$$

$$\psi_2 = \frac{q_2}{\alpha}(w_1 - H_1W_1) = \frac{q_2}{\alpha}(e^{q_1z} - (1+q_1/R)e^{q_1})$$

$$\psi_3 = q_1(1-w_2)H_2 = q_1(1-e^{q_2z})(1+q_2/R)$$

$$\psi_4 = \frac{q_1}{\alpha}(w_2 - H_2W_2) = \frac{q_1}{\alpha}(e^{q_2z} - (1+q_2/R)e^{q_2})$$

$$\psi_5 = q_2\left(1 - \frac{1}{\alpha}W_1\right)H_1 = q_2\left(1 - \frac{e^{q_1}}{\alpha}\right)(1+q_1/R)$$

$$\psi_6 = q_1\left(1 - \frac{1}{\alpha}W_2\right)H_2 = q_1\left(1 - \frac{e^{q_2}}{\alpha}\right)(1+q_2/R)$$

จากสมการ (65) จะได้

$$\text{driving force} = (y_0/m - x_0) \left[\frac{\psi_1 + \psi_2 - \psi_3 - \psi_4}{\psi_5 - \psi_6} \right] + (x_0 - y_0/m)$$

$$\ln(\text{driving force}) = \ln(y_0/m - x_0) + \ln \left[1 - \frac{\psi_1 + \psi_2 - \psi_3 - \psi_4}{\psi_5 - \psi_6} \right] \dots \dots \dots (66)$$

เนื่องจาก F -factor ในแบบจำลองที่มีการผสมกลับมีค่าไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับตำแหน่ง ดังนั้นเราจะประมาณค่า F เฉลี่ยจาก

$$d \ln(\text{driving force})_{\text{average}} = \frac{\int_0^{F_{0f}} \left[1 - \frac{\psi_1 + \psi_2 - \psi_3 - \psi_4}{\psi_5 - \psi_6} \right] d \ln \left[1 - \frac{\psi_1 + \psi_2 - \psi_3 - \psi_4}{\psi_5 - \psi_6} \right] dF_0}{\int_0^{F_{0f}} \left[1 - \frac{\psi_1 + \psi_2 - \psi_3 - \psi_4}{\psi_5 - \psi_6} \right] dF_0} \quad (67)$$

อินทิเกรตแบบแยกส่วน (by-part) จะได้ผลลัพธ์คือ

$$\frac{d \ln(\text{driving force})_{\text{average}}}{dF_0} = \frac{\left[1 - \frac{\psi_1 + \psi_2 - \psi_3 - \psi_4}{\psi_5 - \psi_6} \right]_{F_0=0}^{F_0=F_{0f}}}{\int_0^{F_{0f}} \left[1 - \frac{\psi_1 + \psi_2 - \psi_3 - \psi_4}{\psi_5 - \psi_6} \right] dF_0} \quad (68)$$

ในที่สุดจะได้ F -factor โดยคำนวณจากกระบวนการทำซ้ำ (iterative procedure) ดังต่อไปนี้

1. ประมาณค่า F -factor
2. แทนค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่างๆ ในกรณีที่เป็น Bi เข้าใกล้อินฟินิต (∞) และตัวแปรอื่นๆ ลงในเศษของเทอมขวามือของสมการที่ (68)
3. คำนวณส่วนของเทอมขวามือของสมการที่ (68) โดยการอินทิเกรตเชิงเลข แล้วคำนวณ $\frac{d \ln(\text{driving force})}{dF_0}$
4. คำนวณ F -factor จากสมการ (62) และใช้ F -factor ที่ได้ทำซ้ำข้อ 2-4 จนกระทั่งค่า F -factor ที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งมีความแตกต่างกันน้อยหรือไม่แตกต่างกันเลย ซึ่งในทางปฏิบัติการทำซ้ำประมาณ 4 ครั้งก็เพียงพอ

สำหรับแบบจำลองที่มีการผสมกลับ (backmixing model) แสดงในหน้า 66-68 โดยประมาณว่าการไหลในเฟสของเหลวเป็นแบบพลัก เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (k_x) เพคเลต นัมเบอร์ (R) และพารามิเตอร์และตัวแปรอื่นๆ ในสมการ (62) จะได้ค่าทำนายโปรไฟล์ของความเข้มข้นในเฟสของแข็ง อย่างไรก็ตามในที่นี้จะใช้แบบจำลองที่มีการผสมกลับร่วมกับทฤษฎีการแพร่ (diffusion -backmixing model) ดังได้แสดงในหน้า 66-71 ซึ่งต่างจากแบบจำลองที่มีการผสมกลับคือแทนที่ k_x ด้วย $FSk_b \frac{D_a}{l^2}$ โดยที่ $k_b = 1 / (1 + 2.24 / Bi^{1.02})$ (Siripatana, 1986)

จากการใช้โปรแกรมในการคำนวณหาความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็ง โดยอาศัยแบบจำลองที่มีการผสมกลับร่วมกับทฤษฎีการแพร่ (ภาคผนวก ค) โดยป้อนพารามิเตอร์

ต่างๆคือ แฟคเตอร์การสกัด(α) ความหนาครั้งหนึ่งของแผ่นแบน(l) สัมประสิทธิ์การแพร่(D_p) ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสส่วนสกัดเมื่อเริ่มต้น (y_0) ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเมื่อเริ่มต้น(x_0) เพคเลทนามเบอร์(R) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของตัวละลาย(M) เวลาเรสซิเดนซ์(t_r)และไบออกนามเบอร์ของการถ่ายโอนมวล(Bi) โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ F -factor รวมอยู่ด้วย โดยค่าต่างๆของพารามิเตอร์ที่ป้อนให้โปรแกรมเป็นดังต่อไปนี้คือ

-อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็ง()กำหนดให้เป็น $1 \text{ m}^3/\text{s}$

-อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็ง()กำหนดให้เป็น $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$

-สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย(M)มีค่าเป็น 0.9852

นั่นคือ $\alpha = \frac{MV}{U}$ โดยที่ $\frac{U}{V} = \frac{1.5}{1} = 1.5$ (เพื่อให้ของเหลวเป็น 1.5 เท่าของของแข็ง)

-ความหนาครั้งหนึ่งของแผ่นแบน(l)มีค่าเป็น $0.15 \times 10^{-3} \text{ m}$

-สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย(D_p)มีค่าเป็น $1.985 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

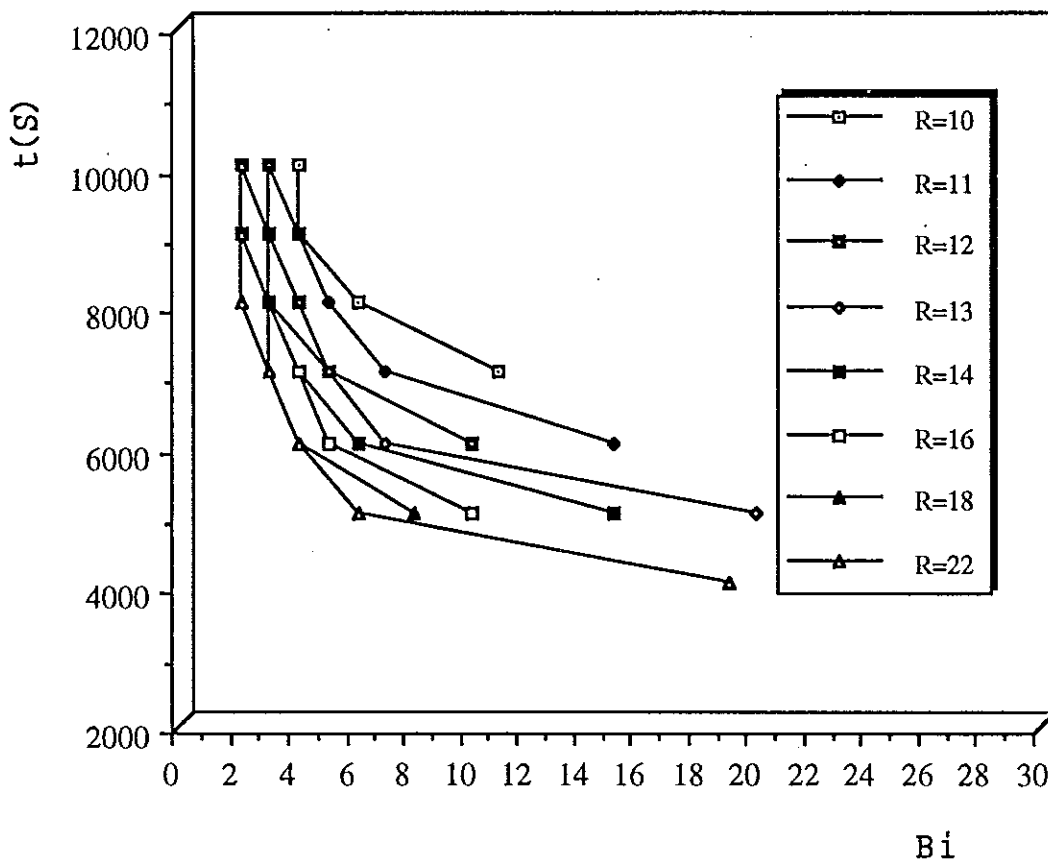
-ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเมื่อเริ่มต้น (x_0)มีค่าเป็น $509.5 \text{ kg}/\text{m}^3$

-ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสส่วนสกัดเมื่อเริ่มต้น (y_0)มีค่าเป็น $0 \text{ kg}/\text{m}^3$

เนื่องจากในระบบการสกัดส่วนใหญ่ไม่นับรวมเพคเลทนามเบอร์(R) และไบออกนามเบอร์ของการถ่ายโอนมวล(Bi) ดังนั้นจึงกำหนด R, Bi และ t_r ต่างๆเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของตัวละลายในเฟสของแข็งเป็น $25.5 \text{ kg}^3/\text{m}^3$ ซึ่งผลการคำนวณจากโปรแกรมแสดงในตารางผนวก ค และรูป 18

จากรูป 18 เราพิจารณาเวลาเรสซิเดนซ์ในช่วง 5,000 ถึง 10,000 s ซึ่งเป็นช่วงประมาณอย่างต่ำ(conservative) กล่าวคือ Bi อยู่ในช่วง 2-8 และ R อยู่ในช่วง 10-22 สำหรับค่า R หนึ่งๆ ถ้า Bi มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าจุดสุดท้ายที่แสดงในรูป ค่าความเข้มข้นสุดท้ายที่ออกจากปฏิกรณ์จะมีค่าสูงกว่า $25.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ นั่นคือไม่สามารถสกัด CNSL ได้ 95% ของ CNSL ที่มีในวัตถุดิบ ถ้า Bi น้อยกว่าจุดเริ่มต้นที่แสดงในรูปจะใช้เวลาสกัดนานเกินไปโดยไม่จำเป็น เมื่อพิจารณา R พบว่าสำหรับระบบนี้ถ้า R น้อยกว่า 10 ค่า Bi จะน้อยกว่า 1 และความเข้มข้นของการสกัดมีค่าเป็นลบและถ้า R มากกว่า 22 ผลการสกัดจะไม่ต่างกับกับค่าที่ R น้อยกว่าหรือเท่ากับ 22 ดังนั้นจึงสรุปว่า ช่วงประมาณอย่างต่ำของระบบนี้คือ Bi อยู่ในช่วง 2-8 และ R อยู่ในช่วง 10-22

การที่เวลาเรสซิเดนซ์รวมมีค่า 5,000-10,000 s หรือ 83.33-166.67 min ซึ่งสูงกว่าเวลาเรสซิเดนซ์ที่คำนวณได้เมื่อพิจารณาปฏิกรณ์แบบไม่มีการผสมกลับนั้น (54.08 min) ก็เนื่องมาจากปฏิกรณ์ที่มีการผสมกลับย่อมใช้เวลาานกว่า เวลาการสกัด(ในที่นี้คือเวลาเรสซิเดนซ์)จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้คือ



รูป 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Bi กับ t_f ที่ R ต่างๆ กันของระบบการสกัด CNSL ด้วยเฮกเซน

1. การแตกตัวของเซลล์ (Cell Plasmolysis) ถ้าเซลล์ยังคงมีชีวิต เวลาการสกัดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสามารถในการยอมให้มีการซึมผ่านของเซลล์ (cell permeability) เป็นตัวจำกัดการแพร่ของตัวละลาย พารามิเตอร์ที่ใช้บอกเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสเรียกว่า j -factor สำหรับระบบการสกัด CNSL ด้วยเฮกเซนนี้ กำหนดให้ j -factor มีค่าเป็น 1 ทั้งในการคำนวณหาเวลาการสกัด (เวลาเรชชีเดนท) ในปฏิกรณ์ที่มีและไม่มีการผสมกลับ กล่าวคือไม่มีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสเพราะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ (รูป 12) ซึ่งอาจจะเนื่องจากเซลล์ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตายเป็นเวลานานแล้ว

2. ความต้านทานการถ่ายโอนมวลที่ผิวเฟสของแข็ง (Biot Number Resistance) ระบบการสกัดหนึ่งๆ มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลที่ผิวของแข็งไม่เท่ากัน ถ้า Bi สูงกว่า 20 แสดงว่าไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลที่ผิวของแข็ง กล่าวคือ อนุภาคจะแพร่จากผิวเฟสของแข็งไปสู่เฟส

ส่วนสกัดได้ทันที ซึ่งเป็นระบบที่อนุภาคแขวนลอยอยู่ในของไหลอย่างอิสระ สำหรับระบบการสกัด CNSL โดยเฮกเซนนี้ประมาณว่า B_i มีค่าอยู่ในช่วง 2-8

3. การเกิดการผสมกลับ (Backmixing) ปฏิกรณ์แบบมีการผสมกลับย่อมใช้เวลาในการสกัด นานกว่าปฏิกรณ์แบบปลั๊ก (plug flow reactor) เนื่องจากแรงขับ (driving force) ต่ำกว่า การผสมกลับ จะเกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะการสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลวในปฏิกรณ์ ปฏิกรณ์บาง ชนิดเช่น DDS Slope Extractor มีเซมเบอร์ของการสกัดเรียงต่อกันเป็นจำนวนมากซึ่งอาจ ประมาณได้ว่าเป็นปฏิกรณ์แบบปลั๊กกล่าวคือไม่มีการผสมกลับ สำหรับปฏิกรณ์ที่พิจารณาเลือก ในที่นี้ เป็นปฏิกรณ์ที่การไหลของของแข็งเป็นแบบปลั๊ก (plug flow in one phase) ส่วนเฟสของแข็ง หรือของไหลมีการผสมกลับ (ประมาณว่าเป็นแบบผสมกันทั่วถึง (well mixed)) ดังนั้นเวลาการสกัดที่ คำนวณได้แบบมีการผสมกลับย่อมสูงกว่าแบบไม่มีการผสมกลับนั่นเอง

จากเวลาเรสซิเดนซ์รวม 5,000-10,000 s หรือ 83.33-166.67 min พิจารณาใช้เวลา 7,200 s หรือ 2 hour ซึ่งเป็นเวลาเรสซิเดนซ์หรือเวลาการสกัดโดยทั่วไป (typical extraction time) สำหรับ ปฏิกรณ์การสกัดทั่วไปในทางอุตสาหกรรม เมื่อกำหนดความยาวปฏิกรณ์ซึ่งเป็นระดับความอิสระ หนึ่ง (degree of freedom) ในการออกแบบและทราบอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็งและ ของเหลว (ส่วนสกัด) สามารถใช้เวลาเรสซิเดนซ์เพื่อออกแบบพื้นที่หน้าตัดของปฏิกรณ์ได้ดังนี้

-กำหนดความยาวปฏิกรณ์ 5.2 m

-อัตราการไหลเชิงมวลของของแข็งมีค่าเป็น 5/3 kg/s

ดังนั้นใน 7,200 s จะมีของแข็งในปฏิกรณ์ 12,000 kg

เนื่องจากของแข็งคือเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีความหนาแน่น $1.5343 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

ดังนั้นปริมาตรของของแข็งในปฏิกรณ์มีค่าเป็น 7.82 m³

-อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวมีค่าเป็น 2.5 kg/s

ดังนั้นใน 7,200 s จะมีของแข็งในปฏิกรณ์ 18,000 kg

เนื่องจากของเหลวคือเฮกเซนมีความหนาแน่น $0.6656 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

ดังนั้นปริมาตรของของเหลวในปฏิกรณ์มีค่าเป็น 27.04 m³

ดังนั้น ปริมาตรบรรจุของของแข็งรวมกับของเหลวในปฏิกรณ์มีค่าเป็น 34.86 m³ อย่างไรก็ตาม ต้องคิดปริมาตรว่างในปฏิกรณ์เพื่อเป็นส่วนของเครื่องจักรอีก 1-2 เท่าของปริมาตรของแข็ง รวมกับของเหลว ในที่นี้กำหนดให้ปริมาตรส่วนนี้เป็น 2 เท่าคือ 69.72 m³ ดังนั้นจะได้ปริมาตรรวม (effective volume) คือ 104.58 m³

จากความยาวปฏิกรณ์ 5.2 m ปริมาตรปฏิกรณ์ 104.58 m^3 ดังนั้นจะได้พื้นที่หน้าตัดของปฏิกรณ์ 20.11 m^2 ส่วนความเร็วของสายพาน(conveyer) ที่บรรทุกของแข็งหรือความเร็วของสกรูว์(screw)ที่ใช้เป็นตัวดันส่ง สามารถกำหนดได้เมื่อทราบความยาวสายพานและเวลาที่ของแข็งของเหลวชุดหนึ่งๆอยู่ในปฏิกรณ์ ถ้ากำหนดความเร็วสายพานเร็วเกินไป ประสิทธิภาพของการชะละลายแบบไหลสวนทางจะมีค่าน้อย เนื่องจากของแข็งมีเวลาอยู่ในปฏิกรณ์น้อย ถ้าความเร็วของสายพานช้าเกินไป จะเสียเวลาในการสกัดมากกว่าที่ควรจะเป็น อย่างไรก็ตามลักษณะการชะละลายนี้ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการฉีดพ่นของเหลวด้วย

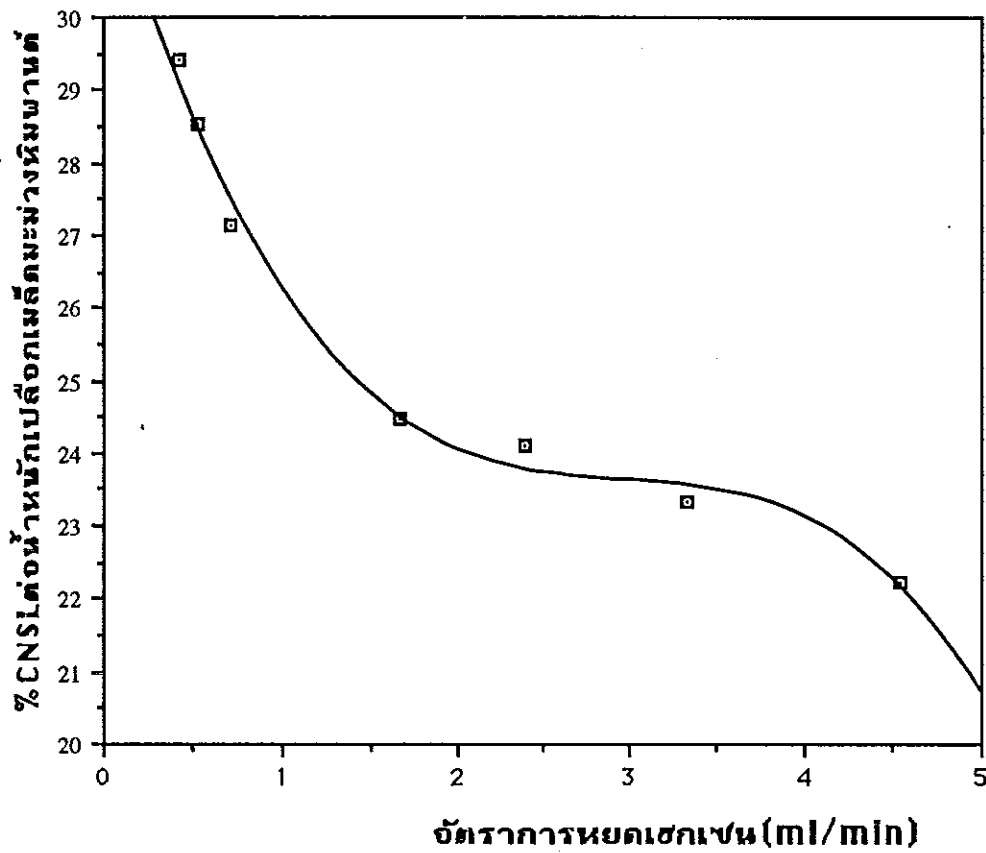
การสกัดCNSLแบบหยด

ตาราง 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยดเฮกเซน(ml/min) กับ%น้ำมันCNSLที่ได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

| อัตราการหยดเฮกเซน(ml/min) | %CNSLต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 100 กรัม |
|---------------------------|---------------------------------------------------|
| 0.42 | 29.41 |
| 0.53 | 28.53 |
| 0.71 | 27.16 |
| 1.67 | 24.47 |
| 2.38 | 24.09 |
| 3.33 | 23.33 |
| 4.545 | 22.23 |

จากตาราง 20 และรูป 19 ในการศึกษาผลของอัตราการหยดเฮกเซนในการสกัดแบบหยดพบว่า เมื่ออัตราการหยดช้าลง สามารถสกัดน้ำมันCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้มากขึ้น เนื่องจากCNSLมีเวลาในการแพร่จากภายในสู่ภายนอกเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (เฟสของแข็ง)มากขึ้น แต่เมื่อเวลามากถึงจุดหนึ่งผลได้CNSLจะเริ่มคงที่ เนื่องจากเฮกเซนที่อยู่ในเบดมีเวลาในการปรับสมดุล ทำให้ความเข้มข้นของCNSLในเฮกเซน(เฟสเอ็กแทรก)ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของCNSL ในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

จากตาราง 21 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการหยดลดลงจาก 4 เป็น 2 ml/min ผลได้CNSLเพิ่มขึ้น 0.91% และเมื่ออัตราการหยดลดลงจาก 2 เป็น 1 ml/min จะให้ CNSLเพิ่มขึ้น 2.24% ในขณะที่เมื่ออัตราการหยดลดลงจาก 1 เป็น 0.5 ml/min จะให้ CNSLเพิ่มขึ้น 2.38% ดังนั้นอัตราการหยดเฮกเซนที่เหมาะสมน่าจะเป็น 1-2 ml/min ซึ่งจะให้CNSL 24.05-26.29% เพราะถ้าใช้อัตราการหยดเร็วกว่านี้จะได้CNSLน้อย หรือถ้าใช้อัตราการหยดช้ากว่านี้คือ 0.5-1 ml/min ถึงแม้จะให้ผลได้เพิ่มขึ้น 2.38% แต่ต้องเสียเวลาในการสกัดนานขึ้น อันเนื่องมาจากที่ทดลอง เป็นระบบเปิด ถ้าใช้เวลาในการสกัดนานเกินไปจะเกิดปัญหาการสูญเสียเฮกเซนเนื่องจากการระเหย



รูป 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยดเฮกเซน(ml/min) กับ %CNSL ที่สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ตาราง 21 %CNSL ต่อ น้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่อ่านจากรูป 19 ที่อัตราการหยดเฮกเซนแตกต่างกัน

| อัตราการหยดเฮกเซน(ml/min) | %CNSL ต่อ น้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 100 กรัม | ผลต่างของ %CNSL |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------|
| 4 | 23.14 | - |
| 2 | 24.05 | 0.91 |
| 1 | 26.29 | 2.24 |
| 0.5 | 28.67 | 2.38 |
| 0.25 | 30.28 | 1.61 |

ตาราง 22 เปรียบเทียบผลได้ CNSL เมื่อใช้เทคนิคต่างกันในการสกัด CNSL จากเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์โดยใช้ตัวทำละลาย

| วิธีการสกัด CNSL | ขนาดวัสดุดิบ (mm) | ปริมาณ วัสดุดิบ(g) | ปริมาณตัว ทำละลาย(ml) | % CNSL | อ้างอิง |
|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| การสกัดแบบหยด | 2 | 30 | เฮกเซน 50 ml, RT เวลา 25-50 นาที | 24.05-26.29 (อัตราการหยด 1-2 ml/min) | * |
| การสกัดแบบหยด | 2 | 30 | เฮกเซน 50 ml, RT | 29.65 (อัตราการหยด 1.22 ml/min) | จันทนา คงสังข์ และมลฤดี ประ ภากรัตนา(2536) |
| การสกัดแบบแช่ | 2 | 30 | เฮกเซน 150 ml, RT, เวลาแช่ 30 นาที | 26.40 | |
| การสกัดแบบแช่ | 2 | 30 | เฮกเซน 100 ml, RT, เวลาแช่พร้อม เขย่า 30 นาที | 26.31 | |
| การสกัดแบบแช่ | 1-2 | 100 | เอทิลอีเทอร์ 400 ml, 40-60 °C | 24.01 | Tyman และคณะ (1989) |

* จากการทดลอง

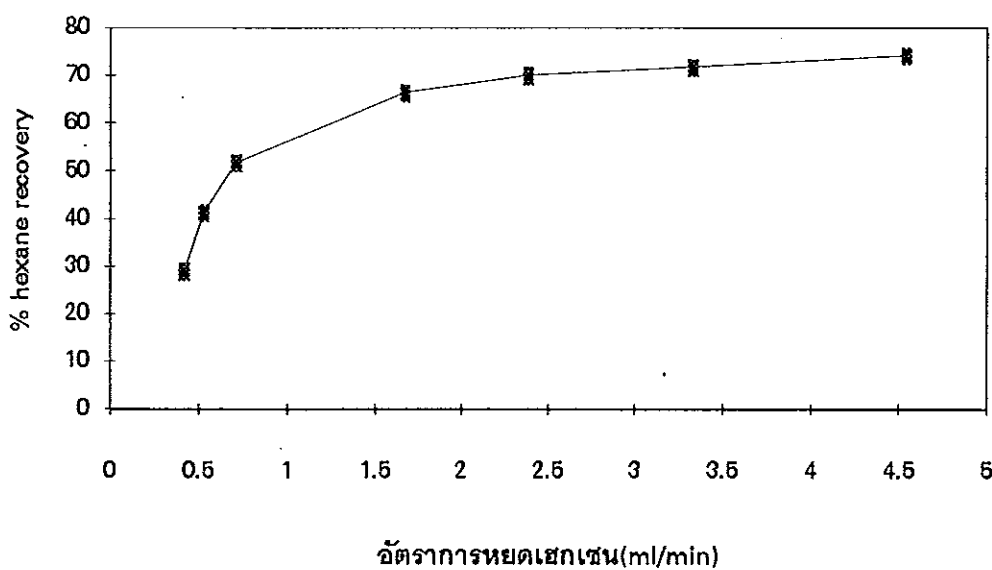
จากตาราง 22 พบว่าในการสกัดแบบแช่นั้นถ้าใช้เอทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลายจะให้ผลได้ CNSL ต่ำกว่าเมื่อใช้เฮกเซน การเขย่าจะทำให้การสกัดแบบแช่ดีขึ้นเนื่องจากการสัมผัสของตัวทำละลายและวัสดุดิบเกิดขึ้นทั่วถึงกว่าและช่วยลดปริมาณตัวทำละลายลง การสกัดแบบแช่ให้ผลได้ CNSL ใกล้เคียงกับการสกัดแบบหยดแต่การสกัดแบบหยดประหยัดตัวทำละลายได้ดีกว่า นอกจากนี้อาจสกัดโดยใช้ซอกเล็ต Tyman และคณะ (1989) กล่าวว่า วิธีการใช้ซอกเล็ตกับวิธีการแช่ให้ผลได้ไม่แตกต่างกัน

การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นั้นอาจทำได้โดยวิธีอื่นๆ เช่น การหีบ ซึ่งให้ผลได้ประมาณครึ่งหนึ่งของ CNSL ทั้งหมด (สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต, 2532) หรือการใช้ความร้อนเช่นการทอด ปรีดี้ผาติ สุวิทยารัตน์และวชิระ เสาวภาคย์ (2537) ได้ทดลองทอดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ 140 °C แล้วนำไปหีบพบว่าให้ผลได้ CNSL 23 % การเลือกวิธีการสกัด CNSL จึงต้องพิจารณาความเหมาะสมหลายๆประการ

พิจารณาตาราง 23 และรูป 20 พบว่า % hexane recovery เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราการหยุดเฮกเซนเนื่องจากดำเนินการทดลองในระบบเปิด จึงเกิดการระเหยของตัวทำละลายเมื่อเวลาสกัดนานขึ้น ดังนั้นถ้าดำเนินการทดลองในระบบปิด % hexane recovery ย่อมใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณวัตถุดิบคงที่ มลฤดี ประภากรรัตนและจันทนา คงสังข์(2536) พบว่า % hexane recovery จากการสกัด CNSL โดยวิธีการแช่มีค่าระหว่าง 79-80 % และเวลาในการแช่ไม่มีผลต่อ % hexane recovery ที่ได้

ตาราง 23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดเฮกเซน(ml/min) กับ % hexane recovery

| อัตราการหยุดเฮกเซน(ml/min) | % hexane recovery |
|----------------------------|-------------------|
| 0.42 | 28.99 |
| 0.53 | 41.26 |
| 0.71 | 51.62 |
| 1.67 | 66.37 |
| 2.38 | 70.00 |
| 3.33 | 71.69 |
| 4.545 | 74.16 |



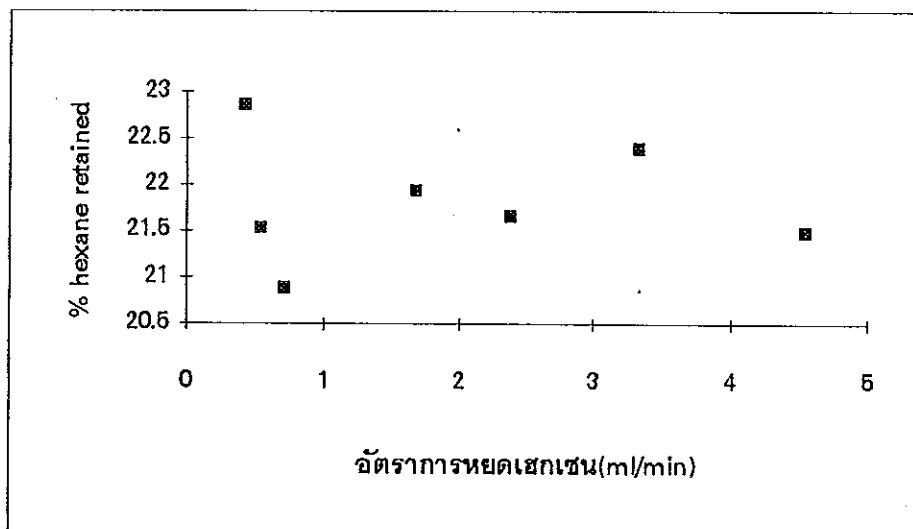
รูป 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยุดเฮกเซน(ml/min) กับ % hexane recovery

จากตาราง 24 และรูป 21 จะเห็นว่า % hexane retained ไม่ขึ้นอยู่กับการไหลของเฮกเซน ทั้งนี้เพราะเมื่อดำเนินการสกัดไประยะหนึ่ง เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์(เฟสของแข็ง) จะอิ่มตัวด้วยตัวทำละลาย จะเห็นว่า % hexane retained มีค่า 23-33 % แสดงว่าถ้าดำเนินการในระบบปิด % hexane recovery จะมีค่าสูงสุดเป็น 67-77 % ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของมฤดี ประภากรรัตนานาและจันทนา คงสังข์(2536)

ตาราง 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเฮกเซน(ml/min) กับ % hexane retained

| อัตราการไหลของเฮกเซน(ml/min) | % hexane retained |
|------------------------------|-------------------|
| 0.42 | 22.86 |
| 0.53 | 21.54 |
| 0.71 | 20.89 |
| 1.67 | 21.93 |
| 2.38 | 21.67 |
| 3.33 | 22.38 |
| 4.545 | 21.49 |

รูป 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเฮกเซน(ml/min) กับ % hexane retained



ตาราง 25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบตกับ %CNSLที่ได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์

สภาวะ -เวลาที่ใช้ในการสกัด 30 นาที

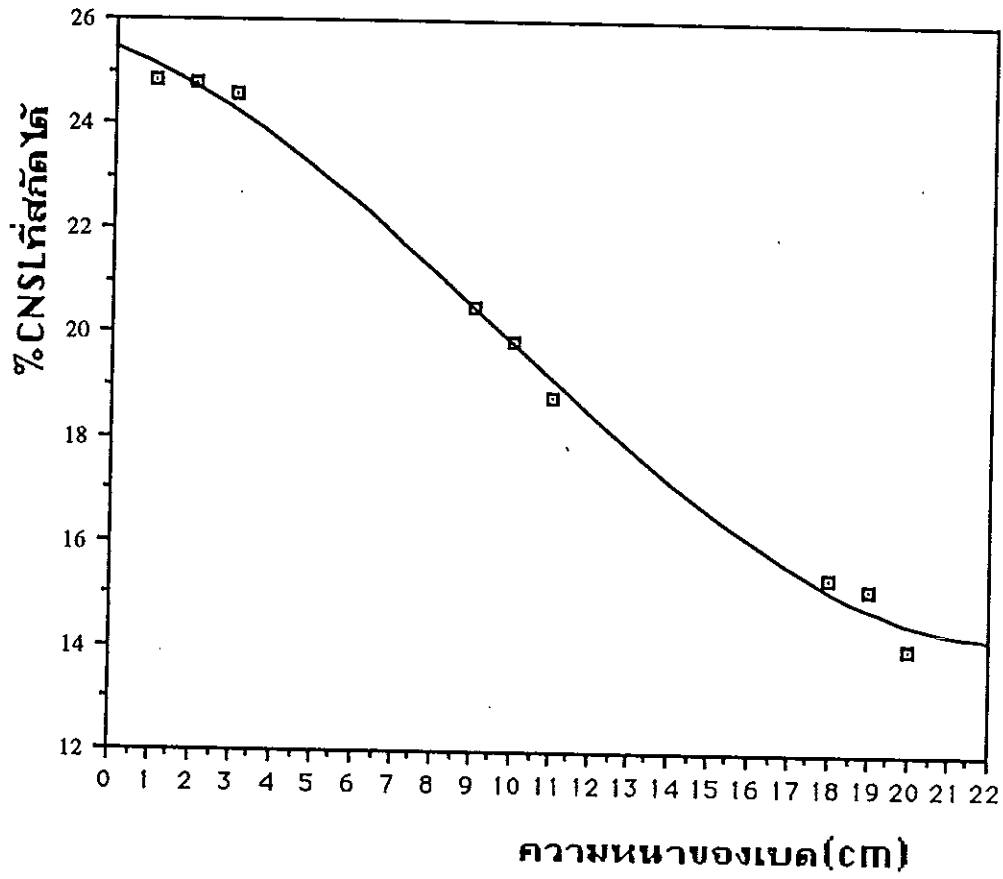
-เฮกเซน 50 ml

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

-อุณหภูมิห้อง 25 °C

| ความหนาของเบต(cm) | ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้(g) | % CNSLที่ได้ต่อน้ำหนักเปลือก 100 กรัม |
|-------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0.680 | 24.845 |
| 2 | 1.356 | 24.772 |
| 3 | 2.018 | 24.577 |
| 9 | 5.061 | 20.546 |
| 10 | 5.439 | 19.872 |
| 11 | 5.653 | 18.776 |
| 18 | 7.173 | 15.361 |
| 19 | 7.461 | 15.147 |
| 20 | 7.286 | 14.058 |

จากตาราง 25 และรูป 22 ในการศึกษาผลของความหนาเบตต่อการสกัดแบบหยดสรุปได้ว่า เมื่อความหนาของเบตมากขึ้น %CNSLที่สกัดได้ลดลง เนื่องจากเมื่อสารละลายมี %CNSL เพิ่มขึ้นการสกัดจะมีประสิทธิภาพต่ำลง จากการทดลองพบว่า เมื่อความหนาของเบตเป็น 18 19 และ 20 cm %CNSLจะเริ่มคงที่ จันทนา คงสังข์และมลฤดี ประภากรรัตน(2536) ได้ทดลองใช้ความหนาเบตมากกว่านี้คือ 20 24 และ 32 cm และพบว่า %CNSLที่สกัดได้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือเมื่อถึงจุดหนึ่งปริมาณCNSLไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากที่ปริมาณวัตถุดิบน้อยๆ CNSLในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สามารถที่จะแพร่เข้าไปในเฮกเซนได้ ทำให้เกิดการสะสมของCNSLในเฮกเซน(เฟสส่วนสกัด) เมื่อความเข้มข้นของCNSLในเฮกเซนมีค่ามากถึงระดับหนึ่งซึ่งเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเข้มข้นของCNSLในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์(เฟสของแข็ง) ก็จะไม่มีการแพร่สุทธิเกิดขึ้นระหว่างเฟสดังนั้นปริมาณCNSLในเฮกเซนจึงคงที่



รูป 22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดในการสกัดแบบหยดกับ %CNSLที่สกัดได้ (ข้อมูล
จากตาราง 25)

ตาราง 26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดในการสกัดแบบหยดกับ %CNSL ที่ได้ต่อ

น้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

สภาวะ -เวลาที่ใช้ในการสกัด 30 นาที

-เฮกเซน 50 ml

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

-อุณหภูมิห้อง 26.5 °C

-อัตราการสกัด = $50/30 = 1.67$ ml/min

| ความหนาของเบด (cm) | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ใน เบด(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อ น้ำหนักเปลือกที่ใช้ใน เบด |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 2.773 | 0.698 | 25.171 |
| 2 | 5.452 | 1.400 | 25.679 |
| 3 | 8.275 | 2.000 | 24.169 |
| 4 | 10.958 | 2.577 | 23.517 |
| 5 | 13.787 | 3.004 | 21.786 |
| 6 | 16.497 | 3.794 | 22.998 |
| 7 | 19.104 | 4.188 | 21.922 |
| 8 | 21.852 | 4.375 | 20.021 |
| 9 | 24.676 | 4.325 | 17.527 |
| 10 | 27.348 | 5.158 | 18.861 |
| 11 | 30.083 | 5.304 | 17.631 |

ตาราง 27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบตในการสกัดแบบหยดกับ %CNSL ที่ได้ต่อ

น้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

สภาวะ -เวลาที่ใช้ในการสกัด 30 นาที

-เฮกเซน 50 ml

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 5 mm

-อุณหภูมิห้อง 26.5 °C

-อัตราการสกัด = $50/30 = 1.67$ ml/min

| ความหนาของเบต (cm) | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ใน เบต(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อ น้ำหนักเปลือกที่ใช้ใน เบต |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 2.809 | 0.708 | 25.205 |
| 2 | 5.453 | 1.349 | 24.737 |
| 3 | 8.214 | 1.991 | 24.237 |
| 4 | 10.906 | 2.539 | 23.282 |
| 5 | 13.663 | 3.106 | 22.733 |
| 6 | 16.388 | 3.738 | 22.809 |
| 7 | 19.201 | 4.030 | 20.987 |
| 8 | 21.700 | 4.486 | 20.673 |
| 9 | 24.562 | 4.503 | 18.333 |
| 10 | 27.413 | 4.818 | 17.564 |
| 11 | 30.154 | 4.975 | 16.498 |

ตาราง 28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดในการสกัดแบบหยดกับ %CNSL ที่ได้ต่อ

น้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

สภาวะ -เวลาที่ใช้ในการสกัด 30 นาที

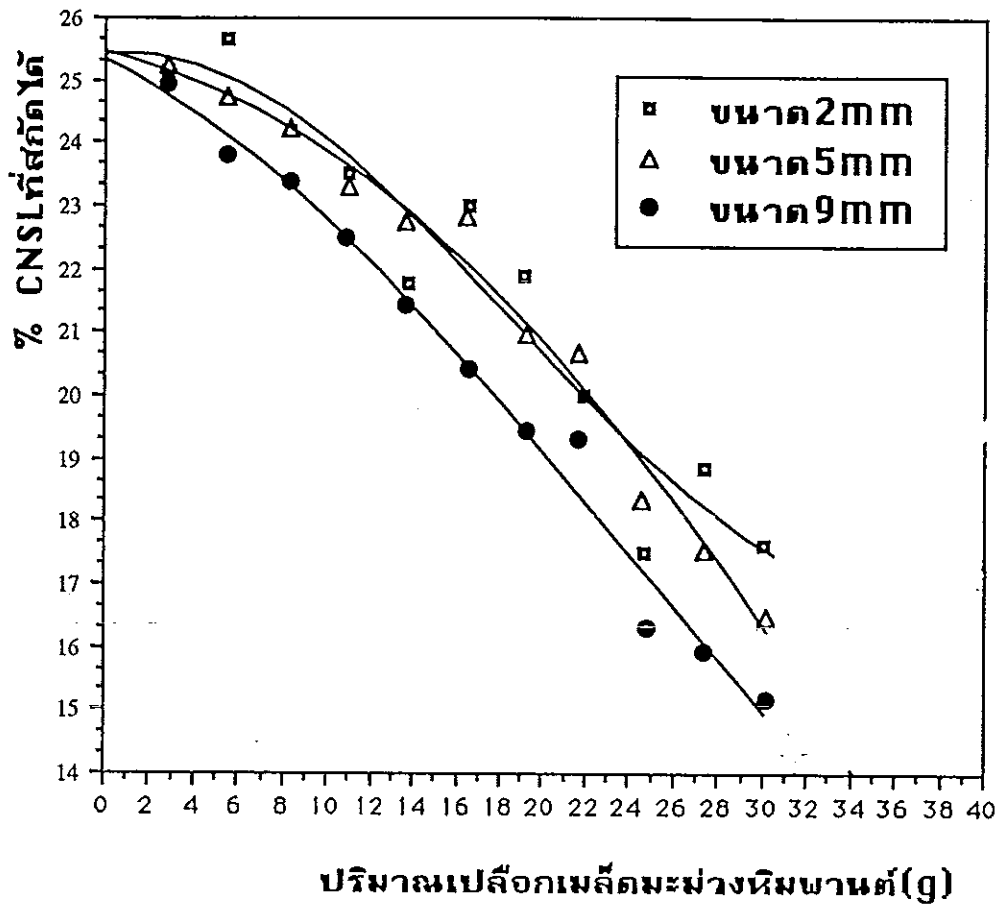
-เฮกเซน 50 ml

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 9 mm

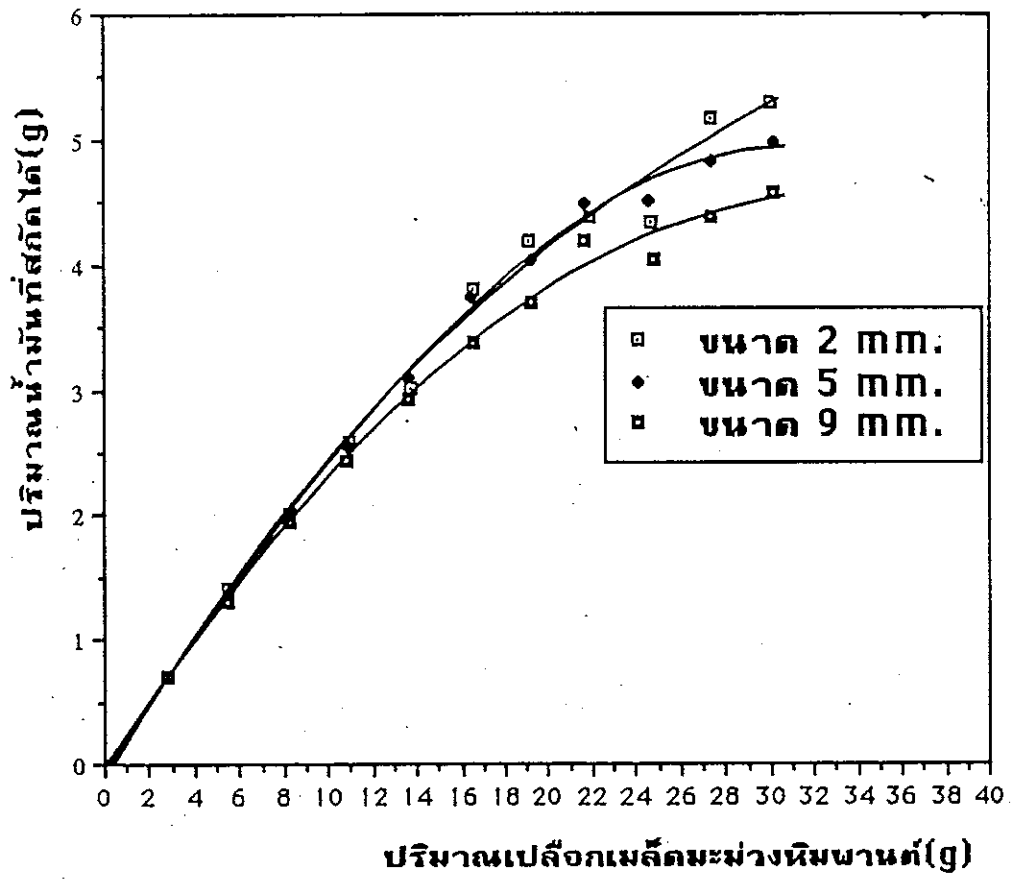
-อุณหภูมิห้อง 26.5 °C

-อัตราการสกัด = 50/30 = 1.67 ml/min

| ความหนาของเบด (cm) | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ใน เบด(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อ น้ำหนักเปลือกที่ใช้ใน เบด |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 2.837 | 0.707 | 24.921 |
| 2 | 5.472 | 1.306 | 23.815 |
| 3 | 8.286 | 1.939 | 23.401 |
| 4 | 10.857 | 2.443 | 22.502 |
| 5 | 13.615 | 2.917 | 21.425 |
| 6 | 16.487 | 3.365 | 20.411 |
| 7 | 19.155 | 3.703 | 19.468 |
| 8 | 21.674 | 4.189 | 19.327 |
| 9 | 24.790 | 4.045 | 16.317 |
| 10 | 27.400 | 4.369 | 15.945 |
| 11 | 30.136 | 4.571 | 15.168 |



รูป 23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm ในการสกัดแบบหยดกับ %CNSL ที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือก 100 กรัม



รูป 24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (g) 2, 5 และ 9 mm กับปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ (g)

ตาราง 29 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบดจากการสกัดแบบหยด (X) กับ % CNSL ที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือก (Y) โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 26, 27 และ 28

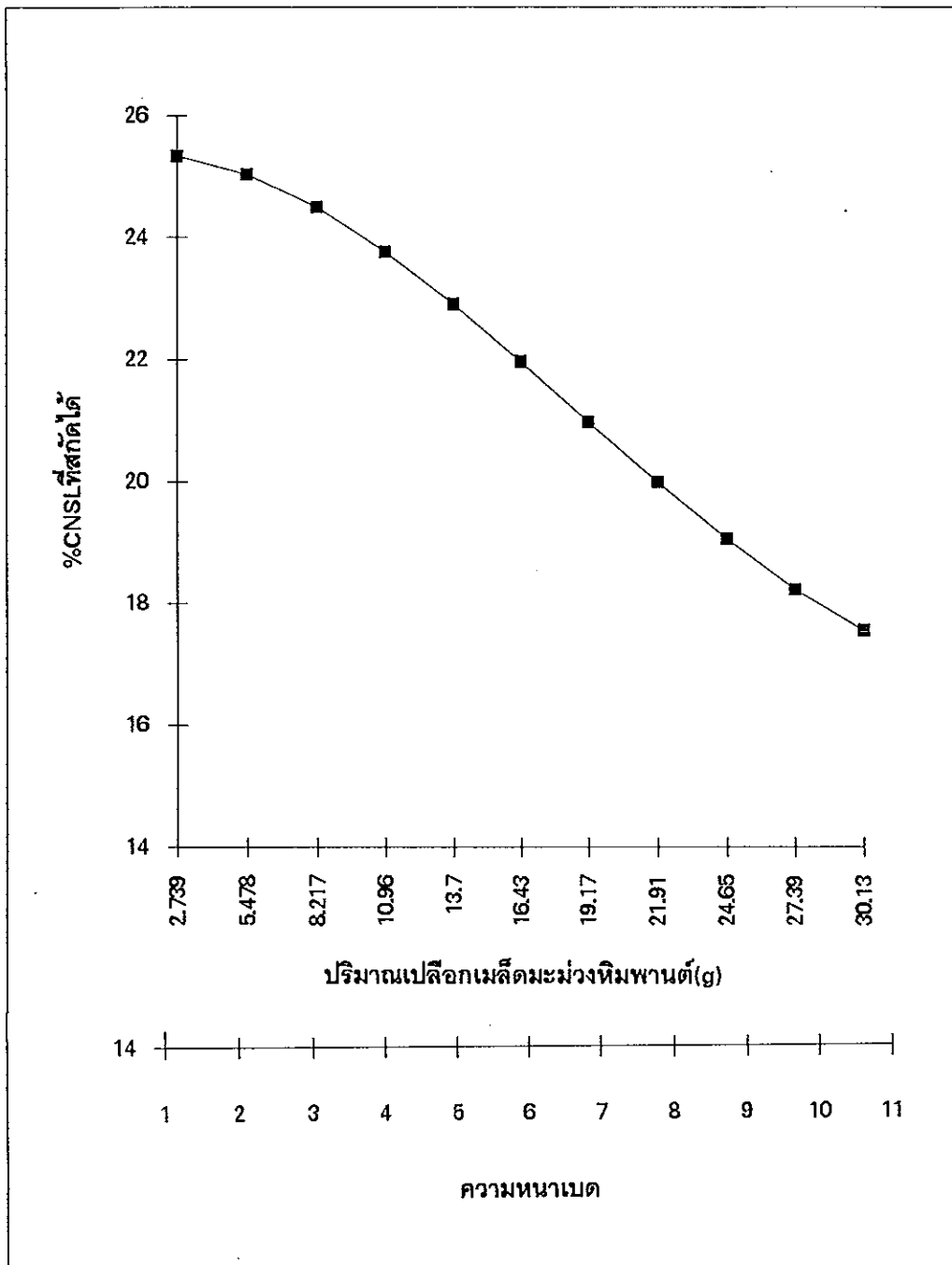
| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบด, g | สมการความสัมพันธ์ | สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 2 | 2.773–30.083 | $Y = 25.391 + 4.0599 \times 10^{-2} X - 2.1422 \times 10^{-2} X^2 + 3.7496 \times 10^{-4} X^3$ | 0.923 |
| 5 | 2.809–30.154 | $Y = 25.436 + 8.9458 \times 10^{-2} X - 6.7400 \times 10^{-3} X^2 + 1.2166 \times 10^{-5} X^3$ | 0.984 |
| 9 | 2.837–30.136 | $Y = 25.338 + 0.18188 X - 8.5232 \times 10^{-3} X^2 + 1.0266 \times 10^{-4} X^3$ | 0.985 |

ตาราง 30 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบดจากการสกัดแบบหยด (X) กับปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ (Y) โดยพิจารณาจากข้อมูลในตาราง 26, 27 และ 28

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบด, g | สมการความสัมพันธ์ | สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 2 | 2.773–30.083 | $Y = -0.15275 + 0.31369 X - 6.1761 \times 10^{-3} X^2 + 5.8338 \times 10^{-5} X^3$ | 0.998 |
| 5 | 2.809–30.154 | $Y = -5.2751 \times 10^{-2} + 0.26963 X - 1.9288 \times 10^{-3} X^2 - 5.0888 \times 10^{-5} X^3$ | 0.997 |
| 9 | 2.837–30.136 | $Y = -7.8171 \times 10^{-2} + 0.28127 X - 4.5104 \times 10^{-3} X^2 + 7.7086 \times 10^{-6} X^3$ | 0.995 |

ตาราง 31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (X) กับ %CNSL ที่สกัดได้ (Y) ที่อ่านจากรูป 23 หรือจากสมการความสัมพันธ์ในตาราง 29 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

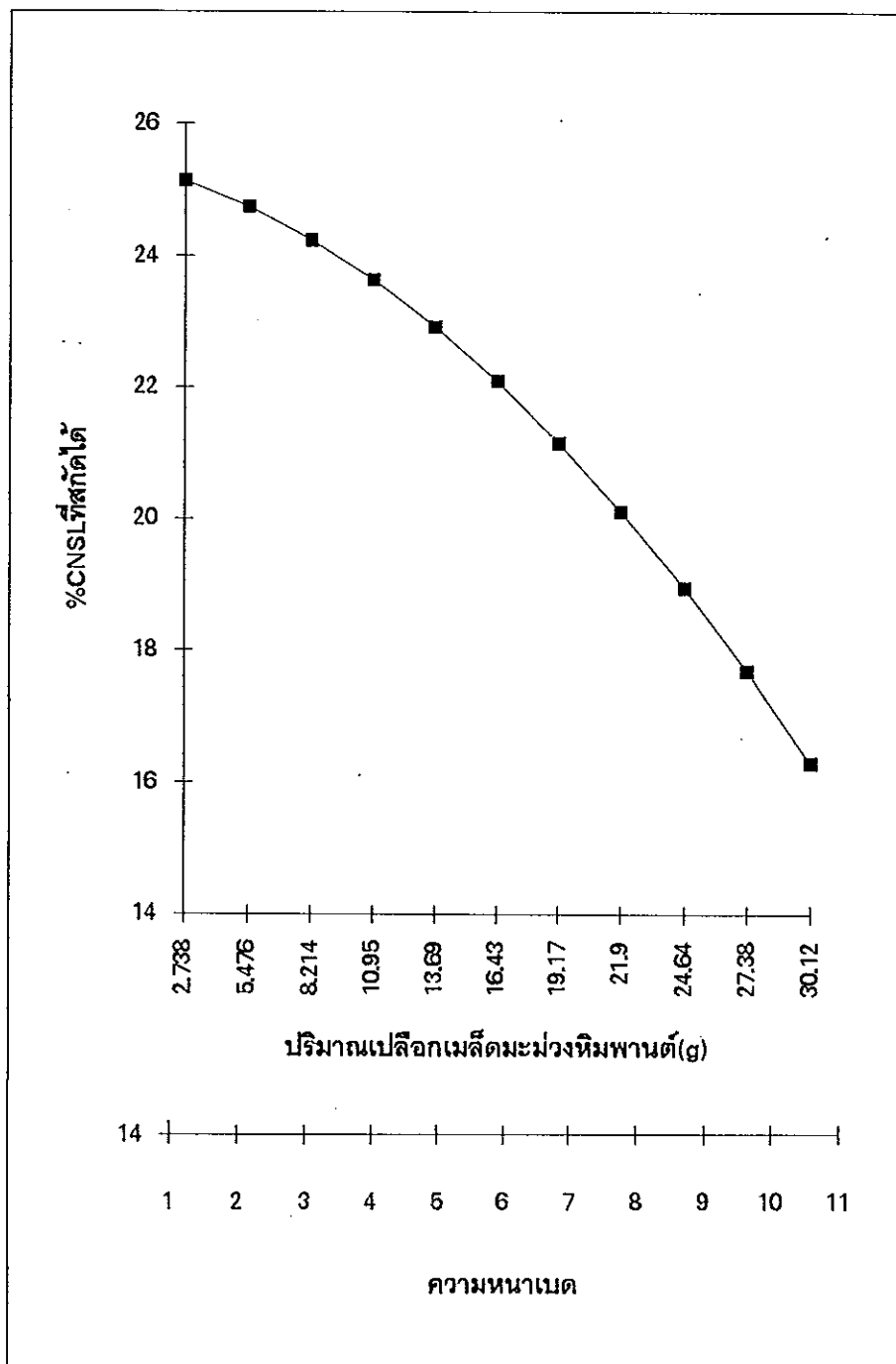
| ความหนาของเบด(cm) | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในเบด(g) | %CNSL ที่สกัดได้น้ำหนักเปลือก |
|-------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2.739 | 25.349 |
| 2 | 5.478 | 25.033 |
| 3 | 8.217 | 24.489 |
| 4 | 10.956 | 23.763 |
| 5 | 13.695 | 22.904 |
| 6 | 16.434 | 21.957 |
| 7 | 19.173 | 20.969 |
| 8 | 21.912 | 19.987 |
| 9 | 24.651 | 19.058 |
| 10 | 27.390 | 18.229 |
| 11 | 30.129 | 17.546 |



รูป 25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในแต่ละเบตกับ %CNSL ที่สกัดได้สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm โดยข้อมูลจากตาราง 31

ตาราง 32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (X) กับ %CNSL ที่สกัดได้ (Y) ที่อ่านจากรูป 23 หรือจากสมการความสัมพันธ์ในตาราง 29 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

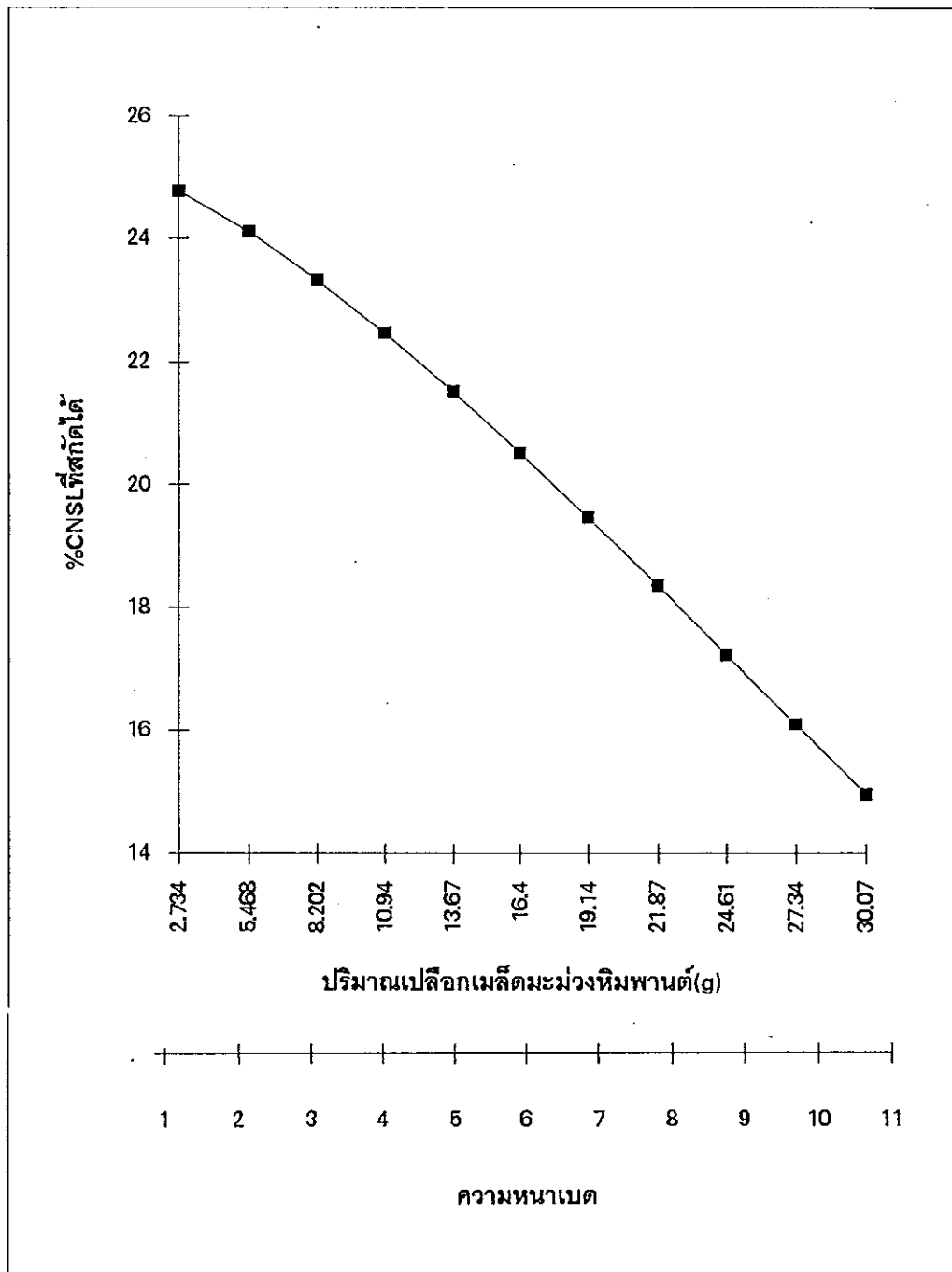
| ความหนาของเบด(cm) | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในเบด(g) | %CNSL ที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือก |
|-------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 2.738 | 25.140 |
| 2 | 5.476 | 24.742 |
| 3 | 8.214 | 24.240 |
| 4 | 10.952 | 23.632 |
| 5 | 13.690 | 22.917 |
| 6 | 16.428 | 22.093 |
| 7 | 19.166 | 21.160 |
| 8 | 21.904 | 20.115 |
| 9 | 24.642 | 18.957 |
| 10 | 27.380 | 17.684 |
| 11 | 30.118 | 16.296 |



รูป 26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในแต่ละเบตกับ %CNSL ที่สกัดได้สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm โดยข้อมูลจากตาราง 32

ตาราง 33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (X) กับ %CNSL ที่สกัดได้ (Y) ที่อ่านจากรูป 23 หรือจากสมการความสัมพันธ์ในตาราง 29 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

| ความหนาของเบด(cm) | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในเบด(g) | %CNSL ที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือก |
|-------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 2.734 | 24.779 |
| 2 | 5.468 | 24.105 |
| 3 | 8.202 | 23.329 |
| 4 | 10.936 | 22.464 |
| 5 | 13.670 | 21.521 |
| 6 | 16.404 | 20.514 |
| 7 | 19.138 | 19.455 |
| 8 | 21.872 | 18.357 |
| 9 | 24.606 | 17.232 |
| 10 | 27.340 | 16.092 |
| 11 | 30.074 | 14.952 |



รูป 27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในแต่ละเบตกับ %CNSL ที่สกัดได้สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm โดยข้อมูลจากตาราง 33

ตาราง 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณCNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบตสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm
-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยเบตละ 2.739 g

| ลำดับเบต | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในเบตสะสม(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) (อ่านจากรูป 24 หรือพิจารณาจากสมการในตาราง 30) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g)ในแต่ละเบต | % CNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบต (% w/w) |
|----------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | | |
| 1 | 2.739 | 0.661 | 0.661 | 24.13 |
| 2 | 5.478 | 1.390 | 0.729 | 26.62 |
| 3 | 8.217 | 2.040 | 0.650 | 23.73 |
| 4 | 10.956 | 2.619 | 0.579 | 21.14 |
| 5 | 13.695 | 3.135 | 0.516 | 18.84 |
| 6 | 16.434 | 3.593 | 0.458 | 16.72 |
| 7 | 19.173 | 4.002 | 0.409 | 14.93 |
| 8 | 21.912 | 4.369 | 0.367 | 13.40 |
| 9 | 24.651 | 4.701 | 0.332 | 12.12 |
| 10 | 27.390 | 5.005 | 0.296 | 10.81 |
| 11 | 30.129 | 5.288 | 0.283 | 10.33 |

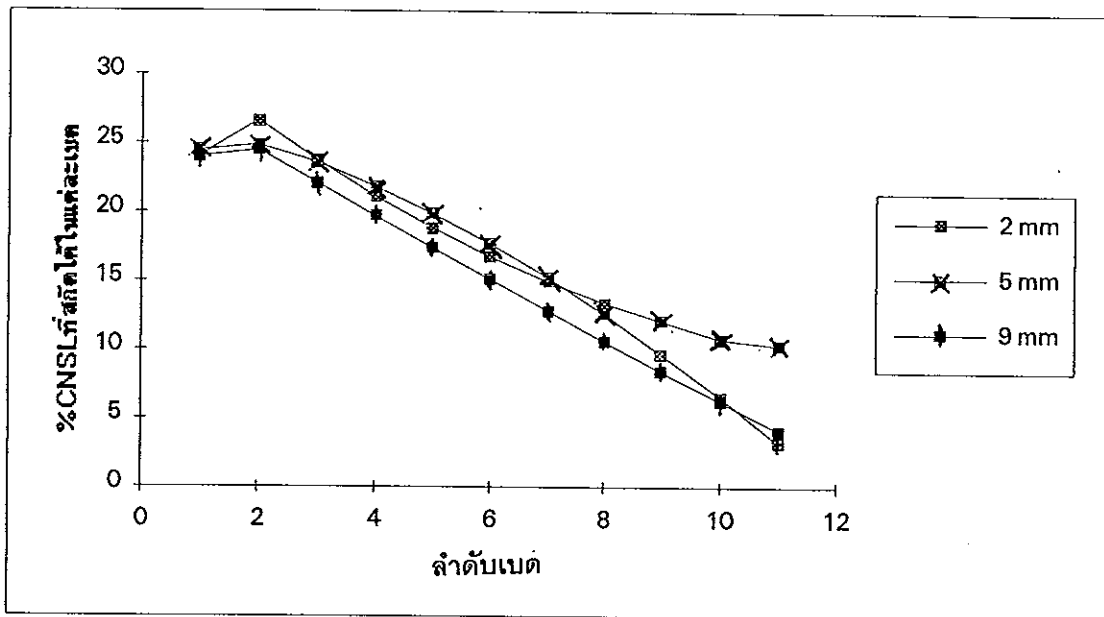
ตาราง 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณCNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบตสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยเบตละ 2.738 g

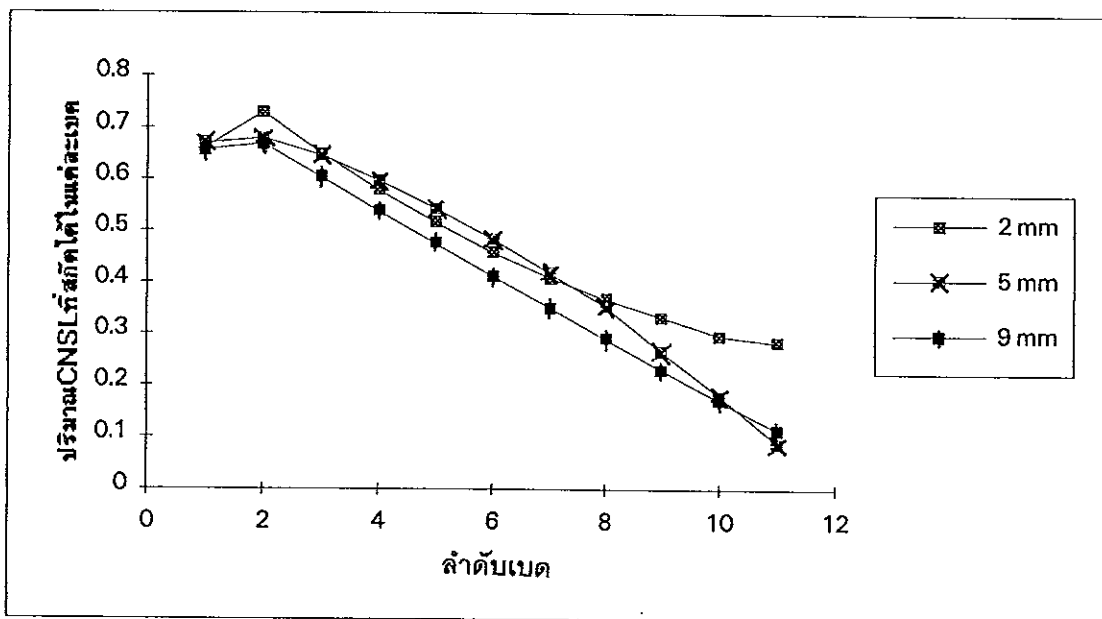
| ลำดับเบต | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในเบตสะสม(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) (อ่านจากรูป 24 หรือพิจารณาจากสมการในตาราง 30) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g)ในแต่ละเบต | % CNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบต (% w/w) |
|----------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | | |
| 1 | 2.738 | 0.670 | 0.670 | 24.47 |
| 2 | 5.476 | 1.358 | 0.680 | 24.84 |
| 3 | 8.214 | 2.004 | 0.646 | 23.59 |
| 4 | 10.952 | 2.602 | 0.598 | 21.84 |
| 5 | 13.690 | 3.146 | 0.544 | 19.87 |
| 6 | 16.428 | 3.630 | 0.484 | 17.68 |
| 7 | 19.166 | 4.048 | 0.418 | 15.27 |
| 8 | 21.904 | 4.393 | 0.345 | 12.60 |
| 9 | 24.642 | 4.658 | 0.265 | 9.679 |
| 10 | 27.380 | 4.839 | 0.180 | 6.574 |
| 11 | 30.118 | 4.927 | 0.088 | 3.214 |

ตาราง 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณCNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบตสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm
-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยเบตละ 2.734 g

| ลำดับเบต | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในเบตสะสม(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) (อ่านจากรูป 24 หรือพิจารณาจากสมการในตาราง 30) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g)ในแต่ละเบต | % CNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบต (% w/w) |
|----------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | | |
| 1 | 2.734 | 0.657 | 0.657 | 24.03 |
| 2 | 5.468 | 1.326 | 0.669 | 24.47 |
| 3 | 8.202 | 1.930 | 0.604 | 22.09 |
| 4 | 10.936 | 2.468 | 0.538 | 19.68 |
| 5 | 13.670 | 2.944 | 0.476 | 17.41 |
| 6 | 16.404 | 3.356 | 0.412 | 15.07 |
| 7 | 19.138 | 3.707 | 0.351 | 12.84 |
| 8 | 21.872 | 3.997 | 0.290 | 10.61 |
| 9 | 24.606 | 4.227 | 0.230 | 8.41 |
| 10 | 27.340 | 4.398 | 0.171 | 6.25 |
| 11 | 30.074 | 4.511 | 0.113 | 4.13 |



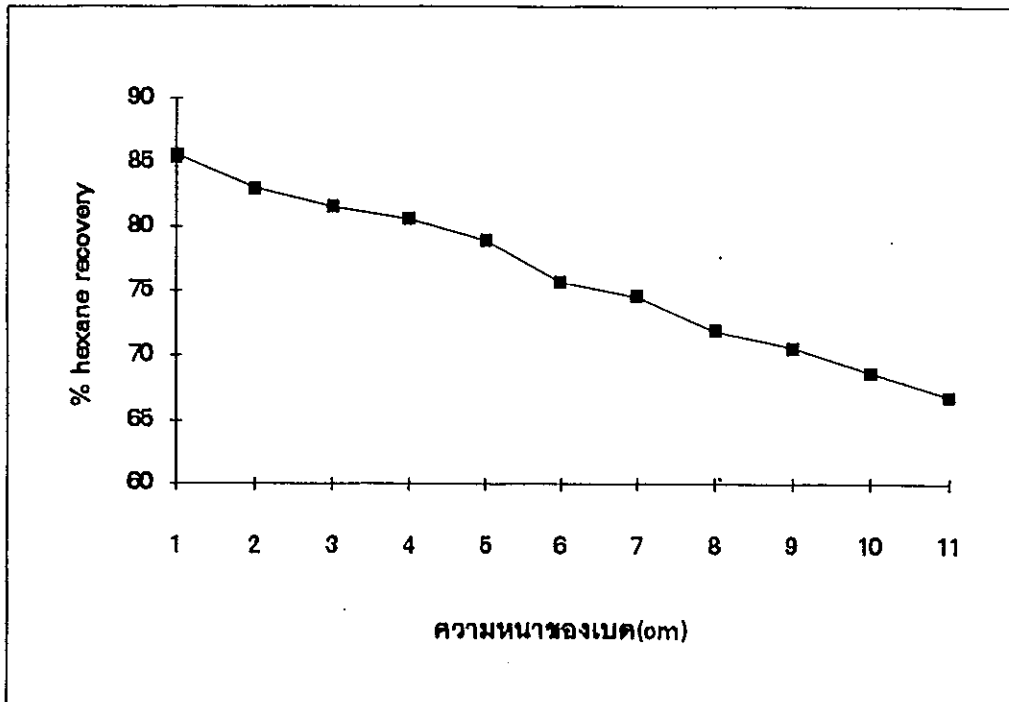
รูป 28 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับเบตกับ % CNSL ที่สกัดได้ในแต่ละเบต(% w/w)



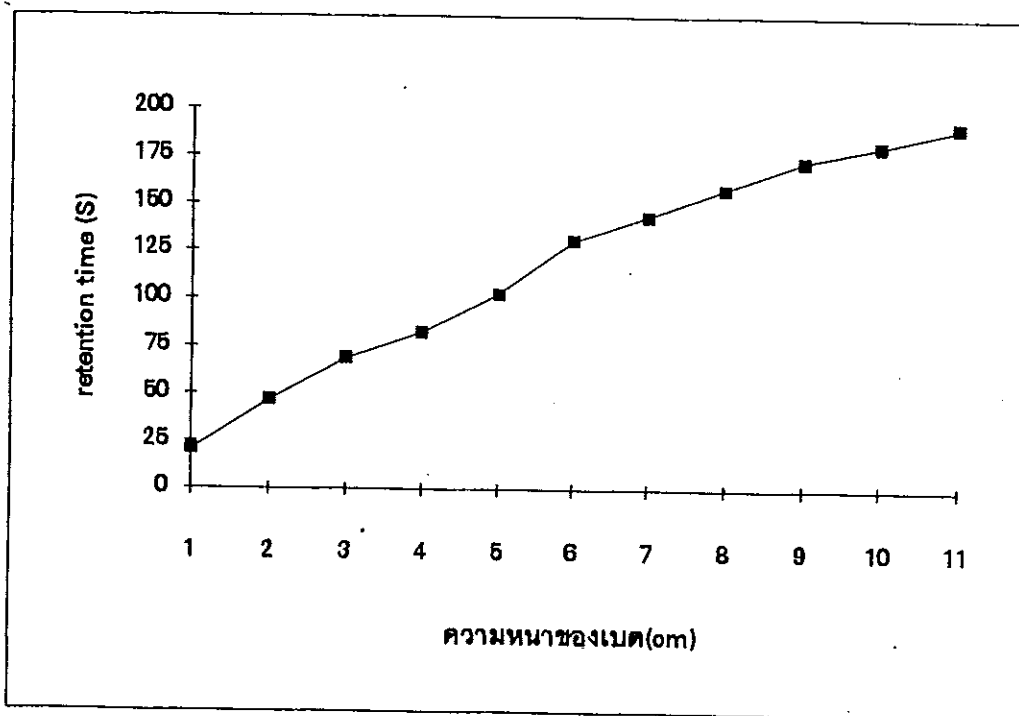
รูป 29 ความสัมพันธ์ระหว่างลำดับเบตกับปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ในแต่ละเบต(g)

ตาราง 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับ % hexane recovery, % hexane retained และ retention time(s) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์ขนาด 2 mm

| ความหนาของเบด(cm) | % hexane recovery | % hexane retained | % hexane รวมหลัง การสกัด | % hexane ที่หายไป เนื่องจากการระเหย | retention time(S) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-------------------|
| 1 | 85.64 | 2.62 | 88.26 | 11.74 | 20.7 |
| 2 | 83.02 | 5.05 | 88.07 | 11.93 | 46.8 |
| 3 | 81.55 | 6.18 | 87.73 | 12.27 | 68.7 |
| 4 | 80.60 | 8.10 | 88.70 | 11.30 | 82.5 |
| 5 | 78.87 | 10.49 | 89.36 | 10.64 | 102.7 |
| 6 | 75.64 | 12.47 | 88.11 | 11.89 | 130.2 |
| 7 | 74.50 | 15.24 | 89.74 | 10.26 | 143.5 |
| 8 | 71.88 | 15.88 | 87.76 | 12.24 | 158.2 |
| 9 | 70.61 | 17.10 | 87.71 | 12.29 | 172.7 |
| 10 | 68.72 | 18.39 | 87.11 | 12.89 | 180.7 |
| 11 | 66.89 | 21.30 | 88.19 | 11.81 | 190.7 |



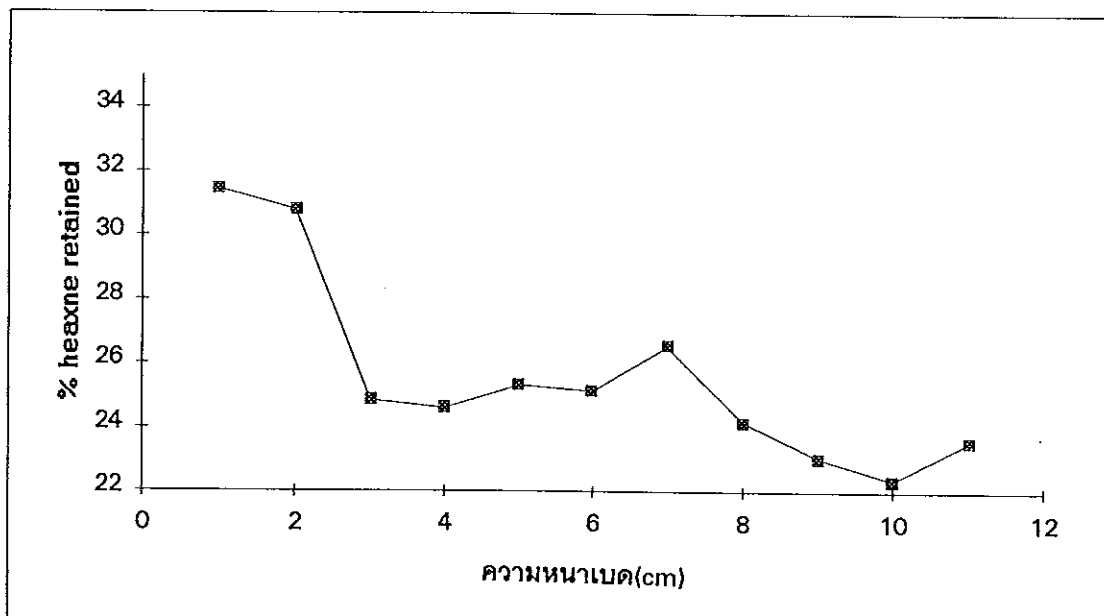
รูป 30. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบต(cm)กับ % hexane recovery สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm



รูป 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบต(cm)กับ retention time (S) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2mm

ตาราง 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับ % hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

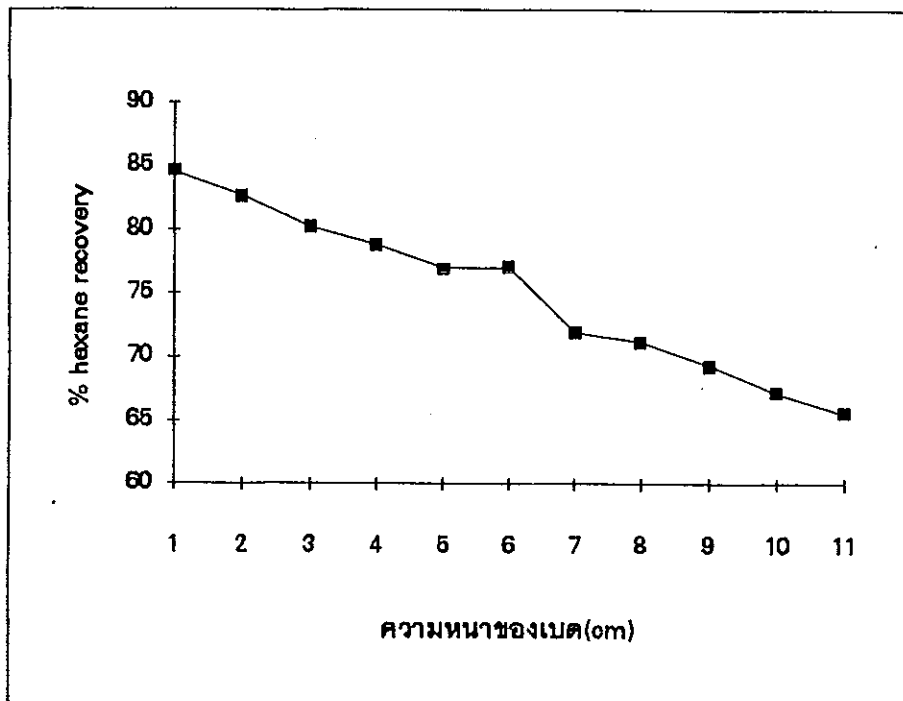
| ความหนาเบด (cm) | % hexane retained (w.CNSL/W.Raw Material) |
|-----------------|-------------------------------------------|
| 1 | 31.45 |
| 2 | 30.81 |
| 3 | 24.85 |
| 4 | 24.61 |
| 5 | 25.33 |
| 6 | 25.15 |
| 7 | 26.55 |
| 8 | 24.19 |
| 9 | 23.06 |
| 10 | 22.37 |
| 11 | 23.56 |



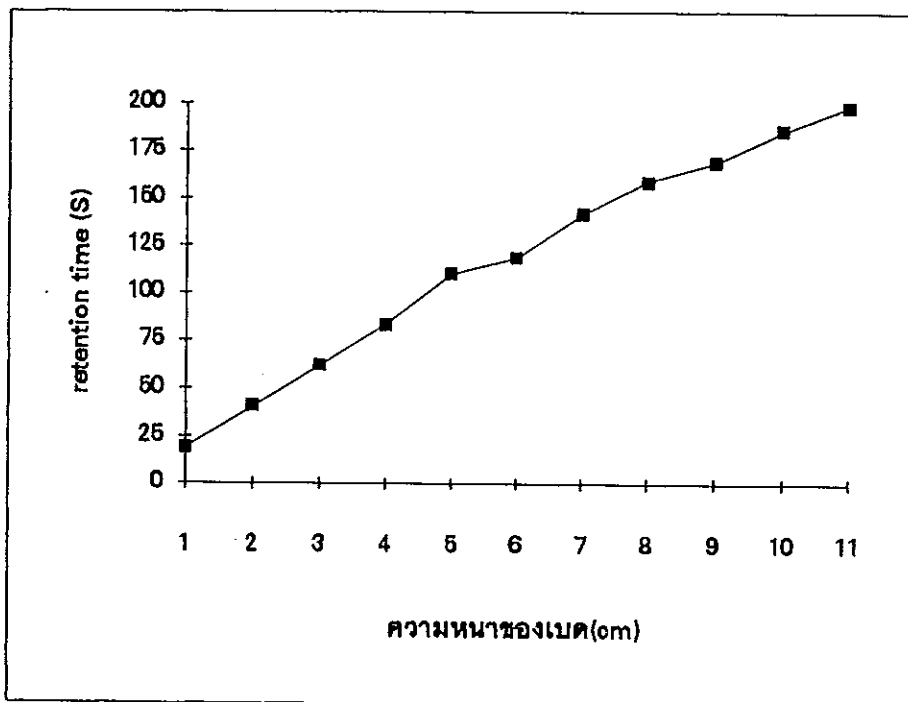
รูป 32 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm) กับ % hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

ตาราง 39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับ % hexane recovery, % hexane retained และ retention time(s) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์ขนาด 5 mm

| ความหนาของเบด(cm) | % hexane recovery | % hexane retained | % hexane รวมหลัง การสกัด | % hexane ที่หายไป เนื่องจากการระเหย | retention time(S) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-------------------|
| 1 | 84.52 | 3.11 | 87.63 | 12.37 | 19.3 |
| 2 | 82.63 | 5.28 | 87.91 | 12.09 | 40.6 |
| 3 | 80.20 | 7.53 | 87.73 | 12.27 | 61.9 |
| 4 | 78.84 | 9.13 | 88.70 | 11.30 | 83.5 |
| 5 | 77.00 | 10.90 | 87.90 | 12.10 | 110.2 |
| 6 | 77.01 | 12.64 | 89.65 | 10.35 | 118.7 |
| 7 | 71.93 | 15.63 | 87.56 | 12.44 | 141.3 |
| 8 | 71.20 | 15.80 | 87.00 | 13.00 | 158.9 |
| 9 | 69.32 | 18.16 | 87.48 | 12.52 | 168.9 |
| 10 | 67.17 | 20.41 | 87.58 | 12.42 | 185.3 |
| 11 | 65.58 | 21.80 | 87.38 | 12.62 | 198.6 |



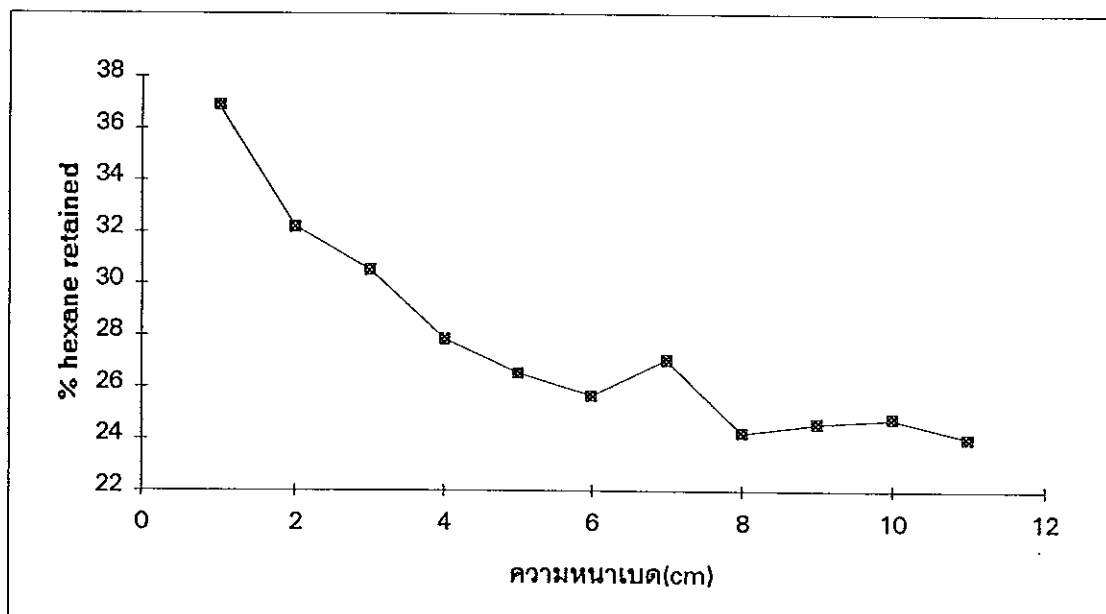
รูป 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบต(cm)กับ % hexane recovery สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm



รูป 34 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบต(cm)กับ retention time (S) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

ตาราง 40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบตกับ% hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

| ความหนาเบต (cm) | % hexane retained (w.CNSL/W.Raw Material) |
|-----------------|-------------------------------------------|
| 1 | 36.88 |
| 2 | 32.22 |
| 3 | 30.50 |
| 4 | 27.87 |
| 5 | 26.55 |
| 6 | 25.68 |
| 7 | 27.08 |
| 8 | 24.23 |
| 9 | 24.61 |
| 10 | 24.78 |
| 11 | 24.05 |

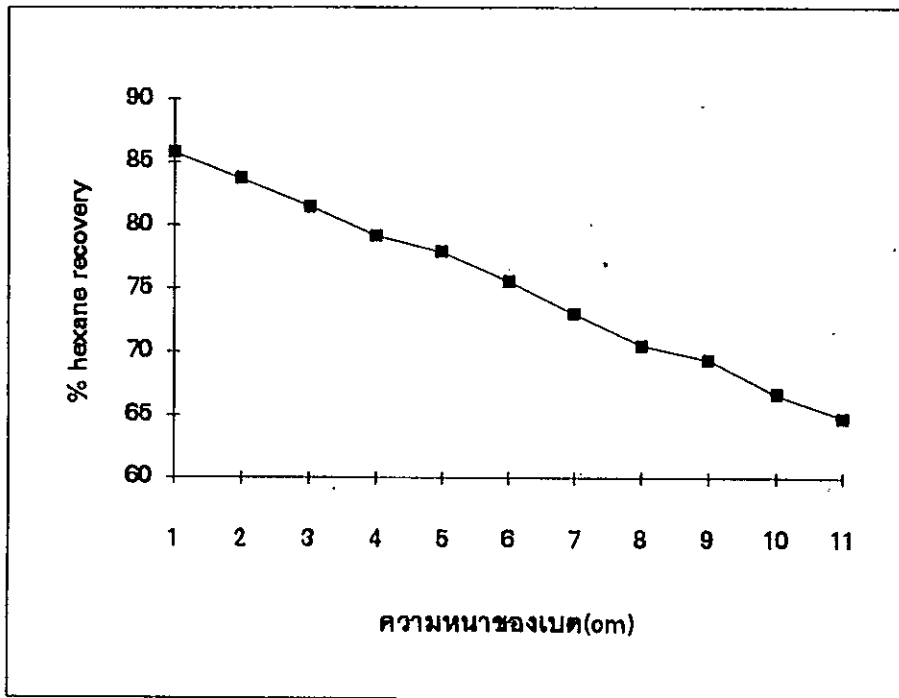


รูป 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบต(cm) กับ % hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

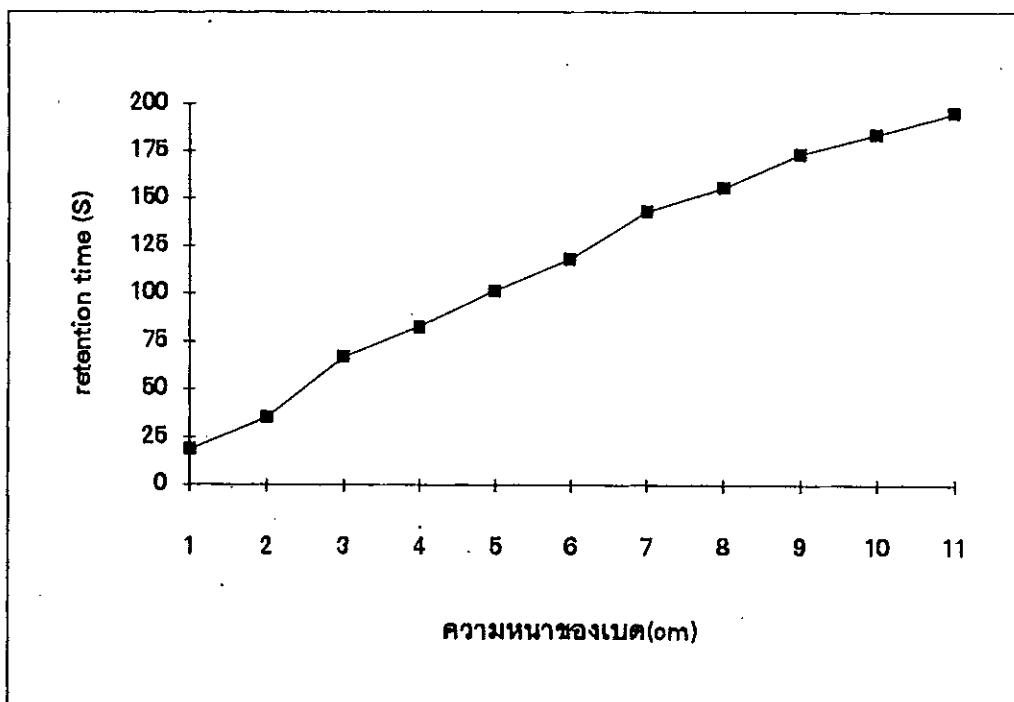
ตาราง 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับ % hexane recovery, % hexane retained และ retention time(s) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง

หิมพานต์ขนาด 9 mm

| ความหนาของเบด(cm) | % hexane recovery | % hexane retained | % hexane รวมหลัง การสกัด | % hexane ที่หายไป เนื่องจากการระเหย | retention time(S) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-------------------|
| 1 | 85.72 | 3.05 | 88.77 | 11.23 | 18.7 |
| 2 | 83.68 | 5.37 | 89.05 | 10.95 | 35.4 |
| 3 | 81.52 | 7.89 | 89.41 | 10.59 | 66.9 |
| 4 | 79.16 | 9.28 | 88.44 | 11.56 | 82.9 |
| 5 | 77.81 | 11.13 | 88.94 | 11.06 | 101.6 |
| 6 | 75.57 | 13.57 | 89.14 | 10.86 | 118.1 |
| 7 | 72.96 | 15.23 | 88.19 | 11.81 | 143.0 |
| 8 | 70.53 | 17.14 | 87.67 | 12.33 | 155.2 |
| 9 | 69.38 | 18.27 | 87.65 | 12.35 | 173.6 |
| 10 | 66.62 | 21.58 | 88.20 | 11.80 | 183.7 |
| 11 | 64.83 | 23.50 | 88.33 | 11.67 | 194.8 |



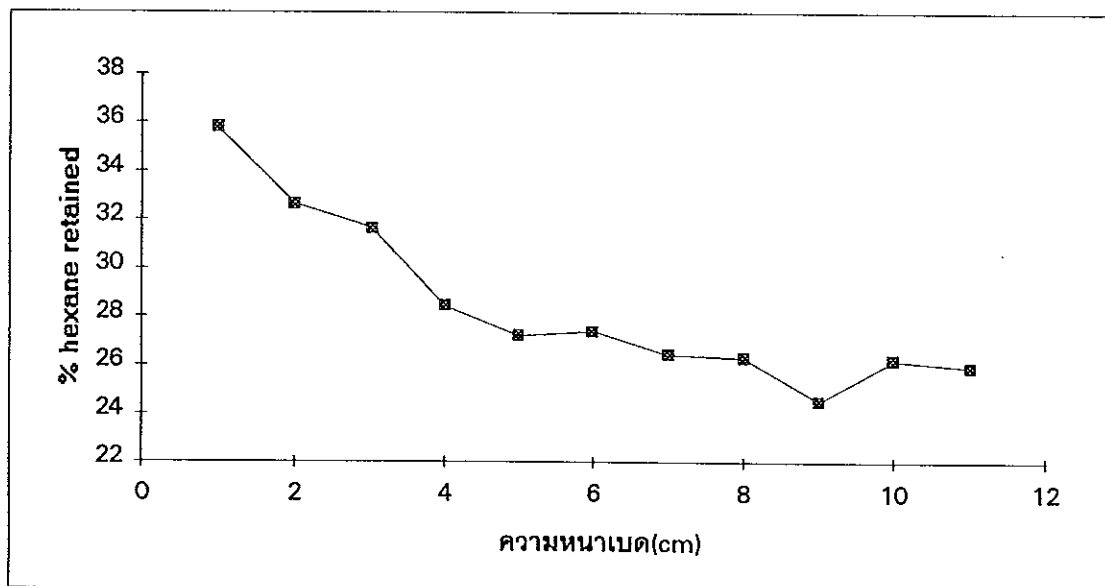
รูป 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบต(cm)กับ % hexane recovery สำหรับเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm



รูป 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบต(cm)กับ retention time (S) สำหรับเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

ตาราง 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบดกับ % hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

| ความหนาเบด (cm) | % hexane retained (w.CNSL/W.Raw Material) |
|-----------------|-------------------------------------------|
| 1 | 35.78 |
| 2 | 32.68 |
| 3 | 31.68 |
| 4 | 28.44 |
| 5 | 27.21 |
| 6 | 27.40 |
| 7 | 26.46 |
| 8 | 26.32 |
| 9 | 24.52 |
| 10 | 26.21 |
| 11 | 25.95 |



รูป 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเบด(cm) กับ % hexane retained สำหรับเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

ตาราง 43 % CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบตสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

-ปริมาณเฮกเซนที่ใช้เริ่มต้น 50 ml (33.23 g)

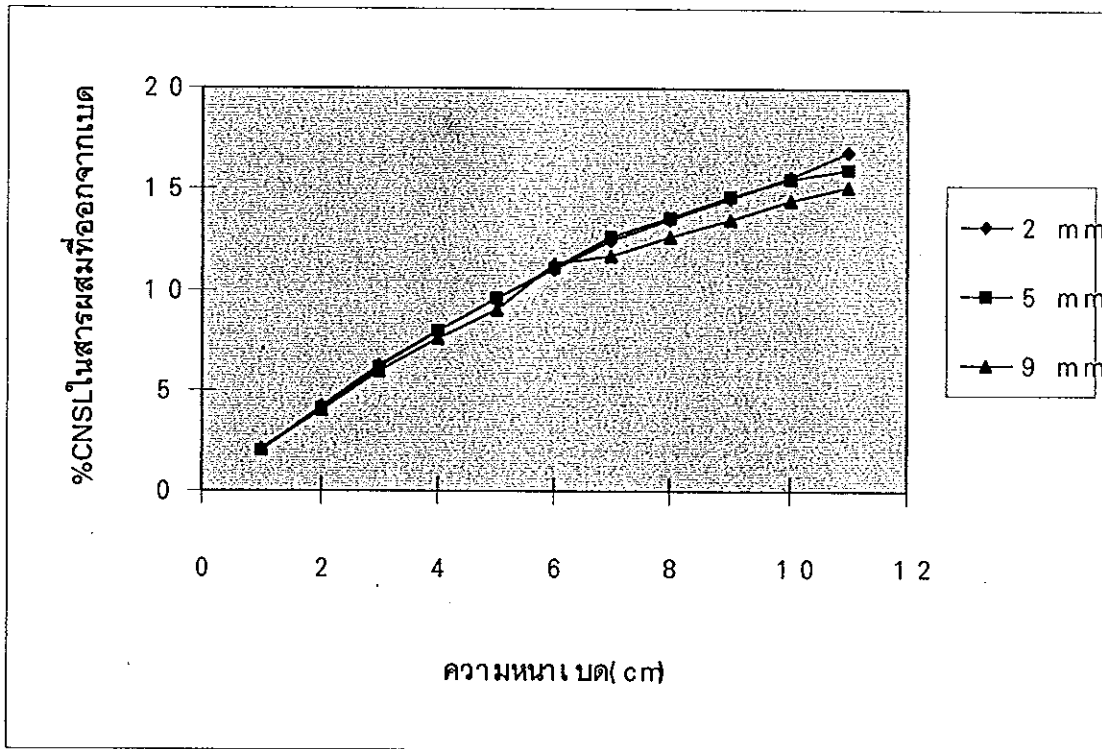
| ความหนาเบต | ปริมาณ hexane retained(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้ (g) | ปริมาณเฮกเซนที่ออก จากเบต(g) | %CNSLในสารผสม CNSLกับเฮกเซนที่ออก จากเบต(w/w) | %CNSLในสารผสม CNSLกับเฮกเซนที่สกัด ได้ในแต่ละเบต(w/w) |
|------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1 | 0.872 | 0.671 | 32.36 | 2.03 | 2.03 |
| 2 | 1.680 | 1.383 | 31.55 | 4.20 | 2.27 |
| 3 | 2.056 | 2.053 | 31.17 | 6.18 | 2.29 |
| 4 | 2.697 | 2.620 | 30.53 | 7.90 | 2.14 |
| 5 | 3.492 | 3.151 | 29.74 | 9.58 | 2.31 |
| 6 | 4.149 | 3.603 | 29.08 | 11.02 | 2.41 |
| 7 | 5.073 | 3.993 | 28.16 | 12.42 | 2.87 |
| 8 | 5.286 | 4.362 | 27.94 | 13.50 | 4.45 |
| 9 | 5.690 | 4.704 | 27.54 | 14.58 | |
| 10 | 6.119 | 5.000 | 27.11 | 15.57 | |
| 11 | 7.089 | 5.283 | 26.14 | 16.81 | |

ตาราง 44 % CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm
 -ปริมาณเฮกเซนที่ใช้เริ่มต้น 50 ml (33.23 g)

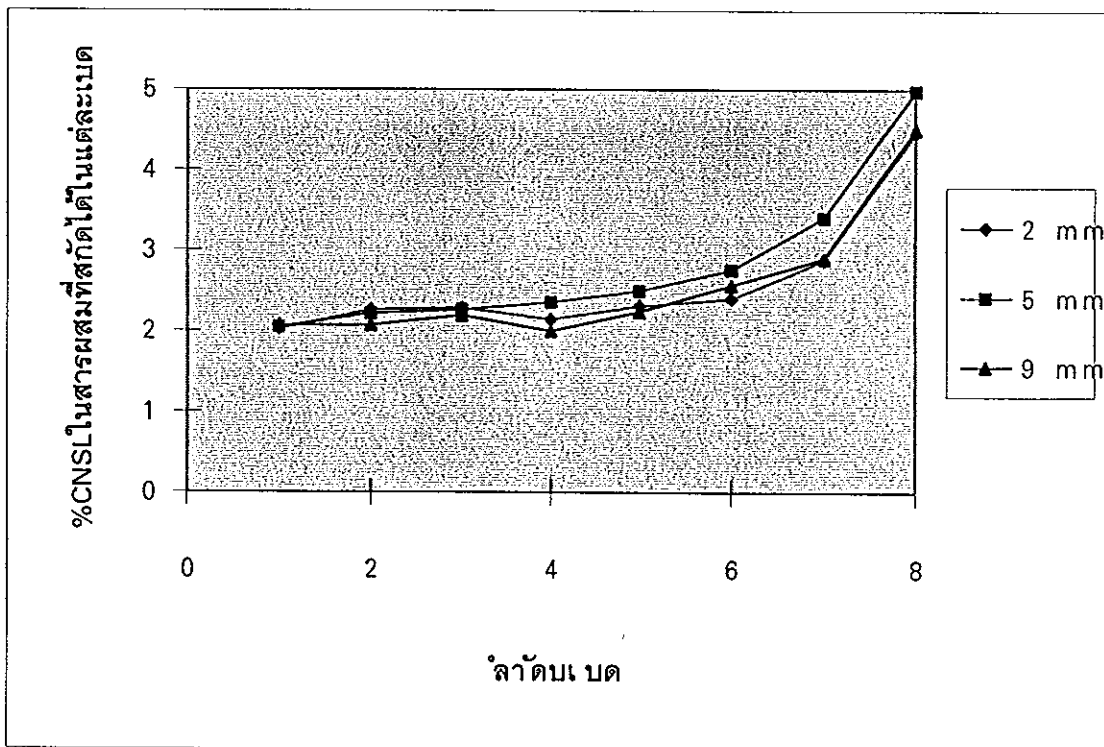
| ความหนาเบด | ปริมาณ hexane retained(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้ (g) | ปริมาณเฮกเซนที่ออกจากเบด(g) | %CNSLในสารผสม CNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบด(w/w) | %CNSLในสารผสม CNSLกับเฮกเซนที่สกัดได้ในแต่ละเบด(w/w) |
|------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1 | 1.036 | 0.670 | 32.19 | 2.04 | 2.04 |
| 2 | 1.757 | 1.358 | 31.47 | 4.14 | 2.21 |
| 3 | 2.505 | 2.004 | 30.73 | 6.12 | 2.26 |
| 4 | 3.040 | 2.602 | 30.19 | 7.93 | 2.35 |
| 5 | 3.628 | 3.146 | 29.60 | 9.61 | 2.49 |
| 6 | 4.208 | 3.630 | 29.02 | 11.12 | 2.76 |
| 7 | 5.200 | 4.048 | 28.03 | 12.62 | 3.41 |
| 8 | 5.258 | 4.393 | 27.97 | 13.57 | 4.97 |
| 9 | 6.044 | 4.658 | 27.19 | 14.63 | |
| 10 | 6.792 | 4.838 | 26.44 | 15.47 | |
| 11 | 7.255 | 4.927 | 25.98 | 15.94 | |

ตาราง 45 % CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบตสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm
 -ปริมาณเฮกเซนที่ใช้เริ่มต้น 50 ml (33.23 g)

| ความหนาเบต | ปริมาณ hexane retained(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้ (g) | ปริมาณเฮกเซนที่ออก จากเบต(g) | %CNSLในสารผสม CNSLกับเฮกเซนที่ออก จากเบต(w/w) | %CNSLในสารผสม CNSLกับเฮกเซนที่สกัด ได้ในแต่ละเบต(w/w) |
|------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1 | 1.015 | 0.684 | 32.215 | 2.08 | 2.08 |
| 2 | 1.788 | 1.327 | 31.442 | 4.05 | 2.07 |
| 3 | 2.625 | 1.947 | 30.605 | 5.98 | 2.18 |
| 4 | 3.088 | 2.454 | 30.142 | 7.53 | 2.01 |
| 5 | 3.704 | 2.935 | 29.526 | 9.04 | 2.24 |
| 6 | 4.517 | 3.368 | 28.713 | 11.25 | 2.56 |
| 7 | 5.069 | 3.709 | 28.161 | 11.64 | 2.90 |
| 8 | 5.704 | 3.978 | 27.526 | 12.63 | 4.49 |
| 9 | 6.079 | 4.240 | 27.151 | 13.51 | |
| 10 | 7.182 | 4.401 | 26.048 | 14.45 | |
| 11 | 7.821 | 4.513 | 25.409 | 15.08 | |



รูป 39 %CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบตรวม(w/w)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm



รูป 40 %CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่สกัดได้ในแต่ละเบต(w/w)สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm

จากตาราง 31 และรูป 25 ในการสกัด CNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm พบว่าเมื่อความหนาของเบดเพิ่มขึ้น %CNSLที่สกัดได้อ่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ลดลง ผลการทดลองนี้เป็นไปในทำนองเดียวกับ ตาราง 32 และรูป 26 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm และตาราง 33 และรูป 27 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าที่ความหนาเบดเดียวกันขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์น้อยกว่าจะให้ผลได้CNSLสูงกว่า ทั้งนี้เพราะผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับตัวทำละลายสูงกว่า

ในการเลือกความหนาเบดที่เหมาะสมจากการสกัดCNSLแบบหยดนั้น พิจารณาได้จาก ตาราง 34, 35, 36 และรูป 28 จะเห็นว่า สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แต่ละขนาด เมื่อลำดับเบดสูงขึ้น %CNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบดลดลง อย่างไรก็ตามในที่นี้เลือก ความหนาเบดเพียง 4 cm เท่านั้น เนื่องจากให้%CNSLที่สกัดได้ในแต่ละเบดประมาณ 20-27 % ต่อน้ำหนักเปลือก(นั่นคือสามารถสกัดCNSLออกมาได้ 60-80%) ถ้าใช้ความหนาเบดมากกว่านี้ผลได้ในแต่ละเบดจะน้อยเกินไป

ในการสกัดCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 cm โดยใช้ความหนาเบดรวม 4 cm พบว่าให้ผลได้ CNSL 23.76, 23.63 และ 22.46 % ตามลำดับ (ตาราง 31, 32, 33 หรือรูป 25,26,27 ตามลำดับ)

พิจารณา % hexane recovery และ % hexane retained กับความหนาของเบดพบว่า เมื่อความหนาของเบดเพิ่มขึ้น % hexane recovery ลดลง ทั้งนี้เพราะ % hexane retained เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากได้ดำเนินการทดลองในระบบเปิด จึงมีเฮกเซนหายไปเนื่องจากการระเหย 10-13 % ส่วน retention time จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเบดเพิ่มขึ้นและค่อนข้างเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามที่ความหนาเบดมากขึ้น การเพิ่มของ retention time จะน้อยลง ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากการยุบตัวของเบดระหว่างการสกัด (ตาราง 37,38 และรูป 30, 31, 32 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm, ตาราง 39,40 และรูป 33, 34, 35 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm และตาราง 41,42 และรูป 36, 37, 38 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm) เมื่อพิจารณาเฉพาะที่ความหนาเบด 4 cm จะได้ % hexane recovery 79-80 %, % hexane retained 24-36 % และ retention time 82-84 s โดยที่ค่าเหล่านี้ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดวัตถุดิบ ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากความต่างของขนาดวัตถุดิบไม่มากพอ

นอกจากนี้พบว่า%CNSLในสารผสมCNSLกับเฮกเซนที่ออกจากเบดรวมสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทุกขนาดมีค่าเพิ่มขึ้น(ตาราง 43, 44, 45 และรูป 39) หรือ %CNSLในสารผสม

CNSL กับเฮกเซนที่สกัดได้ในแต่ละเบดเพิ่มขึ้น(รูป 40) ทั้งนี้เพราะปริมาณเฮกเซนน้อยลงหรือความเข้มข้นของCNSLในสารผสมมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง

ตาราง 46 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดในเบดนิ่งสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

สภาวะ -เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm, ปริมาณเฮกเซน 50 ml

-อัตราการไหล(flow rate) 1.67 ml/min, อุณหภูมิห้อง 25.0 °C

-ความหนาเบด 4 cm(เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 10.955 g)

-retention time หรือ t_f จากการทดลองมีค่าเป็น 93.77 S

| เวลาการสกัด(t), S | ความเข้มข้นCNSL (y_{out}), g/cm ³ | $S = \frac{(y_{out} - Mx_0)}{(y_{in} - Mx_0)}$ $M \cong 1, y_{in} = 0 \text{ g/cm}^3$ $x_0 = 0.5095 \text{ g/cm}^3$ | $\theta = \frac{t - t_f}{t_f}$ | $1 - S = y_{out} / Mx_0$ |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 237.49 | 0.1525 | 0.7007 | 1.5327 | 0.2993 |
| 381.20 | 0.0875 | 0.8283 | 3.0653 | 0.1717 |
| 524.91 | 0.0575 | 0.8871 | 4.5978 | 0.1129 |
| 668.62 | 0.0585 | 0.8852 | 6.1304 | 0.1148 |
| 812.34 | 0.0378 | 0.9258 | 7.6631 | 0.0742 |
| 956.05 | 0.0293 | 0.9425 | 9.1957 | 0.0575 |
| 1099.76 | 0.0245 | 0.9519 | 10.7283 | 0.0481 |
| 1243.47 | 0.0230 | 0.9549 | 12.2609 | 0.0451 |
| 1387.19 | 0.0177 | 0.9653 | 13.7935 | 0.0347 |
| 1530.90 | 0.0163 | 0.9680 | 15.3261 | 0.0320 |
| 1674.61 | 0.0138 | 0.9729 | 16.8587 | 0.0271 |
| 1818.32 | 0.0135 | 0.9735 | 18.3913 | 0.0265 |

ตาราง 47 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยุดในเบดนิ่งสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

สภาวะ -เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm, ปริมาณเฮกเซน 50 ml

-อัตราการไหล(flow rate) 1.67 ml/min, อุณหภูมิห้อง 25.0 °C

-ความหนาเบด 4 cm(เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 10.974 g)

-retention time หรือ t_f จากการทดลองมีค่าเป็น 79.04 S

| เวลาการสกัด(t), S | ความเข้มข้นCNSL (y_{out}), g/cm ³ | $S = \frac{(y_{out} - Mx_0)}{(y_{in} - Mx_0)}$ $M \cong 1, y_{in} = 0g/cm^3$ $x_0 = 0.5095g/cm^3$ | $\theta = \frac{t - t_f}{t_f}$ | y_{out} / Mx_0 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|
| 222.75 | 0.1408 | 0.7237 | 1.8182 | 0.2763 |
| 366.47 | 0.0736 | 0.8555 | 3.6365 | 0.1445 |
| 510.18 | 0.0421 | 0.9174 | 5.4547 | 0.0826 |
| 653.89 | 0.0364 | 0.9286 | 7.2729 | 0.0715 |
| 797.60 | 0.0317 | 0.9378 | 9.0911 | 0.0622 |
| 941.32 | 0.0241 | 0.9527 | 10.9094 | 0.0473 |
| 1085.03 | 0.0186 | 0.9635 | 12.7276 | 0.0366 |
| 1228.74 | 0.0167 | 0.9672 | 14.5458 | 0.0328 |
| 1372.46 | 0.0163 | 0.9680 | 16.3641 | 0.0320 |
| 1516.17 | 0.0147 | 0.9711 | 18.1823 | 0.0288 |
| 1659.88 | 0.0112 | 0.9780 | 20.0005 | 0.0220 |
| 1803.59 | 0.0102 | 0.9800 | 21.8187 | 0.0200 |

ตาราง 48 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยุดในเบตนิ่งสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

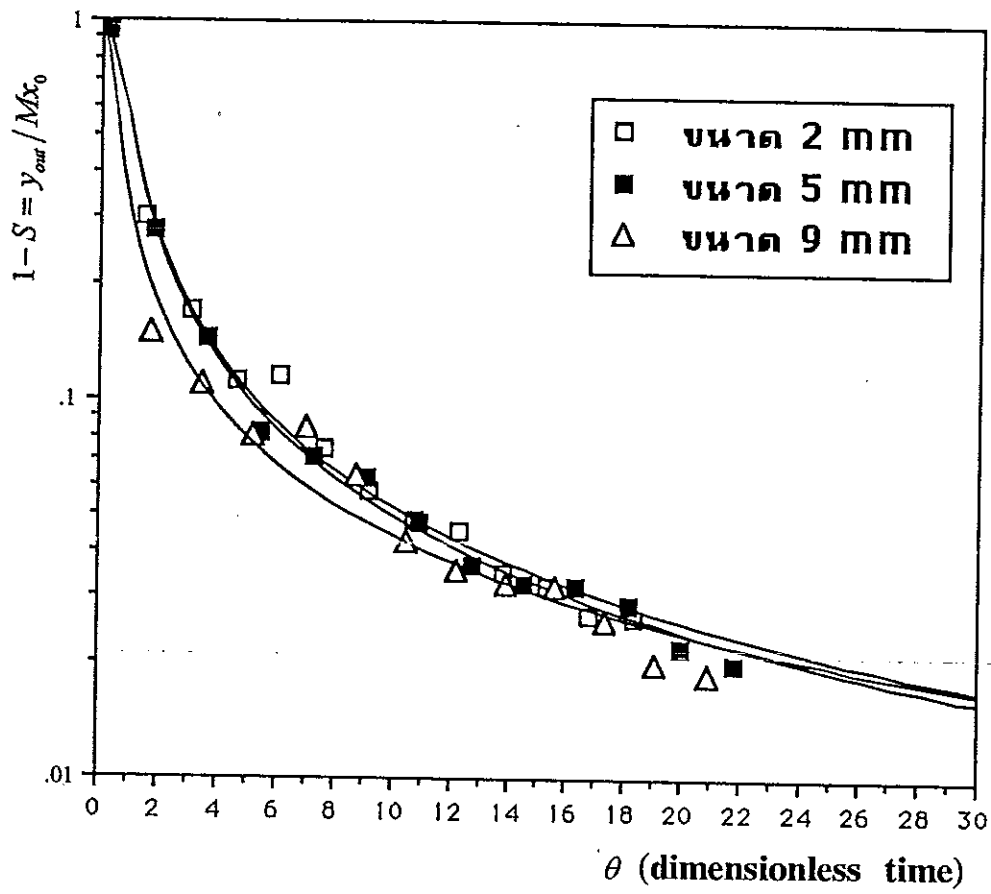
สภาวะ -เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm, ปริมาณเฮกเซน 50 ml

-อัตราการไหล(flow rate) 1.67 ml/min, อุณหภูมิห้อง 26.0 °C

-ความหนาเบต 4 cm(เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 10.927 g)

-retention time หรือ t_f จากการทดลองมีค่าเป็น 82.63 S

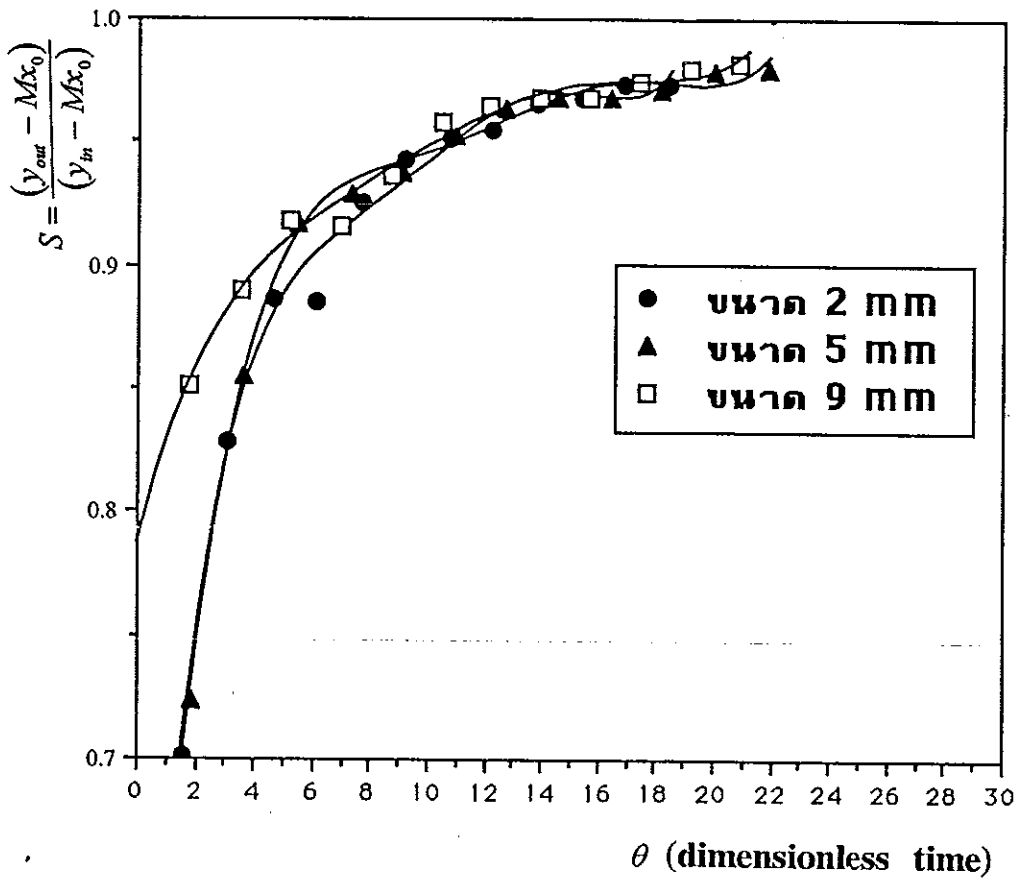
| เวลาการสกัด(t), S | ความเข้มข้นCNSL (y_{out}), g/cm ³ | $S = \frac{(y_{out} - Mx_0)}{(y_{in} - Mx_0)}$ $M \cong 1, y_{in} = 0g/cm^3$ $x_0 = 0.5095g/cm^3$ | $\theta = \frac{t - t_f}{t_f}$ | $1 - S = y_{out}/Mx_0$ |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 226.35 | 0.0758 | 0.8512 | 1.7393 | 0.1488 |
| 370.06 | 0.0563 | 0.8895 | 3.4785 | 0.1105 |
| 513.77 | 0.0415 | 0.9185 | 5.2177 | 0.0815 |
| 657.49 | 0.0430 | 0.9156 | 6.9570 | 0.0844 |
| 801.20 | 0.0323 | 0.9366 | 8.6962 | 0.0634 |
| 944.91 | 0.0214 | 0.9580 | 10.4354 | 0.0420 |
| 1088.62 | 0.0179 | 0.9649 | 12.1746 | 0.0351 |
| 1232.34 | 0.0167 | 0.09672 | 13.9140 | 0.0328 |
| 1376.05 | 0.0163 | 0.9680 | 15.6532 | 0.0320 |
| 1519.76 | 0.0133 | 0.9739 | 17.3924 | 0.0261 |
| 1663.47 | 0.0103 | 0.9798 | 19.1316 | 0.0202 |
| 1807.19 | 0.0095 | 0.9814 | 20.8709 | 0.0186 |



รูป 41 ความสัมพันธ์ระหว่าง θ (dimensionless time) กับ $1-S = y_{out}/Mx_0$ สำหรับ
เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5, และ 9 mm

ตาราง 49 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $1-S = y_{out}/Mx_0$ กับ θ จากการทดลองการสกัด CNSL แบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm

| ขนาดเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์, mm | ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| | logarithmic regression | regression coefficient (r^2) | exponential regression | regression coefficient (r^2) |
| 2 | $(1-S) = 0.53730\theta^{-1.0152}$ | 0.977 | $(1-S) = 0.24976 \times 10^{-5.9214 \exp(-2\theta)}$ | 0.942 |
| 5 | $(1-S) = 0.53118\theta^{-1.0320}$ | 0.990 | $(1-S) = 0.19815 \times 10^{-4.9606 \exp(-2\theta)}$ | 0.912 |
| 9 | $(1-S) = 0.31935\theta^{-0.86566}$ | 0.928 | $(1-S) = 0.15630 \times 10^{-4.6346 \exp(-2\theta)}$ | 0.970 |



รูป 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง θ (dimensionless time) กับ $S = \frac{(y_{out} - Mx_0)}{(y_{in} - Mx_0)}$

(dimensionless concentration) สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5, และ 9 mm

จากตาราง 46 และตาราง 14 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm ตาราง 47 และตาราง 15 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm และตาราง 48 และตาราง 16 สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm จะเห็นว่าที่เวลาการสกัดเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน การสกัดแบบแช่พร้อมกับมีการเขย่าจะให้ความเข้มข้น CNSL (Y_{out}) สูงกว่าการสกัดแบบหยดในเบตนิ่ง ทั้งนี้เพราะการสกัดแบบหยดไม่มีการผสมกลับ (back mixing) เกิดขึ้น เนื่องจากเป็นการไหลด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งอาจถือได้ว่าเสมือนเป็นการไหลแบบ พลั๊ก (plug flow) นั้นเอง

พิจารณาสมการของ Rosen (1952)

$$S = 0.5 \left[1 + \operatorname{erf} \left[F(\beta\theta - 1) \right] \right] \dots \dots \dots (26)$$

สมการนี้ใช้ได้ก็ต่อเมื่อ $\tau_f > 50$ โดยที่

$$\tau_f = \frac{D_s t_f}{a^2}$$

พิจารณา D_s ของขนาดวัตถุดิบต่างๆ กันดังตาราง 50

พิจารณา τ_f ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดต่างกันดังตาราง 51

จากตาราง 51 พบว่า τ_f ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 0.1 สอดคล้องกับรายงานของ Schwartzberg (1983) ซึ่งกล่าวว่า ในการชะละลายของเบตนิ่งส่วนใหญ่ τ_f มักมีค่าน้อยกว่า 1.0 และบ่อยครั้งที่มีค่าน้อยกว่า 0.1 ดังนั้นจึงใช้สมการที่ (26) ไม่ได้และสมการแก้ปัญหาก็จะให้ค่า S จะมีความซับซ้อนและยุ่งยากมาก Rosen (1954) กล่าวว่าที่ τ_f น้อยๆ ข้อมูลเกี่ยวกับค่า S มีอยู่น้อย

สมการที่ (26) นี้มีลักษณะกราฟเป็นแบบซิกมอยดอล (sigmoidal) ใดๆ ก็ตามค่า S และ θ จากการทดลองมักไม่มีลักษณะเป็นซิกมอยดอล ซึ่ง Schwartzberg (1983) รายงานว่าการขาดความสอดคล้องนี้ สาเหตุใหญ่อาจจะเนื่องมาจากความไม่คงที่ของการแทนที่สาร (unstable displacement) รูปร่างของกราฟที่ได้จากการทดลองขึ้นอยู่กับอย่างมากกว่า เมื่อเริ่มต้นนั้นเบตที่ใช้ถูกเติมเต็มด้วยส่วนสกัดที่สมดุลกับของแข็งที่จะสกัดหรือไม่ และขึ้นอยู่กับว่าการป้อนส่วนสกัดเป็นการป้อนจากบนลงล่าง (downflow) หรือจากล่างขึ้นบน (upflow) กราฟทั่วไประหว่าง $(1-S)$ กับ θ แสดงในรูป 41

เมื่อเบตเริ่มต้นไม่ถูกเติมเต็มด้วยส่วนสกัดและถ้ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ ลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential) ดังแสดงในรูป 41 โดยมีจุดเริ่มต้นที่ $\theta = 0$ จะได้ว่า

$$(1-S) = (1-S_0) \exp[-(1-S_0)\beta\theta] \dots \dots \dots (69)$$

ยิ่งไปกว่านั้นค่าสูงสุดของ $(1-S_0)$ เป็นไปตามสมการ

ตาราง 50 ค่า D_s ที่ความเข้มข้นของเอ็กเทร็กต์ต่างๆกันสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ขนาด 2, 5 และ 9 mm

| ขนาดเปลือก เมล็ด มะม่วง หิมพานต์, mm | ความเข้มข้น CNSL ที่ สกัดได้ (y_{out}), g/cm ³ (จากตาราง 46, 47, 48) | D_s (m ² /s) |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 2 | 0.0135-0.0718 | 3.67×10 ⁻¹¹ (ประมาณนอกช่วงโดย ใช้ตาราง 14 หรือรูป 9) |
| | 0.0719-0.1027 | 3.67×10 ⁻¹¹ -6.16×10 ⁻¹³ (คำนวณ จากตาราง 17) |
| | 0.1028-0.1525 | 4.33×10 ⁻¹⁴ (ประมาณนอกช่วงโดย ใช้ตาราง 14 หรือรูป 9) |
| 5 | 0.0102-0.0711 | 5.10×10 ⁻¹¹ (ประมาณนอกช่วงโดย ใช้ตาราง 15 หรือรูป 9) |
| | 0.0712-0.1010 | 5.10×10 ⁻¹¹ -2.76×10 ⁻¹³ (คำนวณ จากตาราง 17) |
| | 0.1011-0.1408 | 8.72×10 ⁻¹⁴ (ประมาณนอกช่วงโดย ใช้ตาราง 15 หรือรูป 9) |
| 9 | 0.0095-0.0697 | 1.50×10 ⁻¹⁰ (ประมาณนอกช่วงโดย ใช้ตาราง 16 หรือรูป 9) |
| | 0.0698-0.1005 | 1.50×10 ⁻¹⁰ -2.77×10 ⁻¹³ (คำนวณ จากตาราง 17) |

$$(1-S)_{\max} = 1 - \exp\left[\frac{-s_p(1-\varepsilon)kL}{v_p\varepsilon V}\right] \dots\dots\dots (70)$$

ค่าเอ็กซีโพเนนท์ (exponent) ใน (70) มีค่าเท่ากับ

$$(-vBi\tau_f/\beta)$$

โดยที่ ν : ดัชนีรูปทรง(geometric index) ซึ่งมีค่าเป็น 1 สำหรับแผ่นแบน 2 สำหรับทรงกระบอกและ 3 สำหรับทรงกลม

$$\beta : M\varepsilon/(1-\varepsilon)$$

ε : ความพรุนระหว่างอนุภาค(interparticle porosity)

ตาราง 51 ค่า τ_f ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm

| ขนาด, mm | D_s (m ² /s) | τ_f (s) | a (m) | $\tau_f = \frac{D_s t_f}{a^2}$ |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|
| 2 | $3.67 \times 10^{-11} - 4.33 \times 10^{-14}$ | 93.77 | 0.15×10^{-3} | 0.1557-0.0002 |
| 5 | $5.10 \times 10^{-11} - 8.72 \times 10^{-14}$ | 79.04 | 0.21×10^{-3} | 0.0893-0.0002 |
| 9 | $1.50 \times 10^{-10} - 2.77 \times 10^{-13}$ | 82.63 | 0.56×10^{-3} | 0.0395-0.0001 |

Schwartzberg(1983)รายงานว่ เมื่อไม่มีการผสมกลับ(back mixing)และไม่มีการแพร่ตามแนวแกน(axial dispersion)เกิดขึ้น ค่า $(1-S_0)$ จะมีค่าเท่ากับ $(1-S_0)_{\max}$ ดังนั้นจากการทดลองการสกัดแบบหยุดในเบดนิ่งจะได้

$$(1-S)_{\max} = (1-S_0) = 1 - (-\nu Bi \tau_f / \beta) = 1 + \nu Bi \tau_f / \beta \dots\dots\dots(71)$$

ทั้งนี้เนื่องจากในการสกัดแบบหยุดจากการทดลองนั้น การไหลของตัวทำละลายเป็นการไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจึงไม่มีการผสมกลับเกิดขึ้น และถือว่ามี การแพร่ตามแนวแกนเกิดขึ้นน้อย(ความเร่งของการไหลของตัวทำละลายเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่า 9.81 m²/s ในขณะที่ค่าการแพร่ตามแนวแกนมีค่าประมาณ 10^{-10} - 10^{-14} m²/s (ประมาณจากตาราง 50) ดังนั้นในที่นี้จะได้

$$(1-S) = (1 + \nu Bi \tau_f / \beta) \exp[-(1 + \nu Bi \tau_f / \beta) \beta \theta] \dots\dots\dots(72)$$

โดยที่ $\nu = 1$ สำหรับแผ่นแบน

$$Bi = k_r Ma / D_s$$

$$\tau_f = D_s t_f / a^2$$

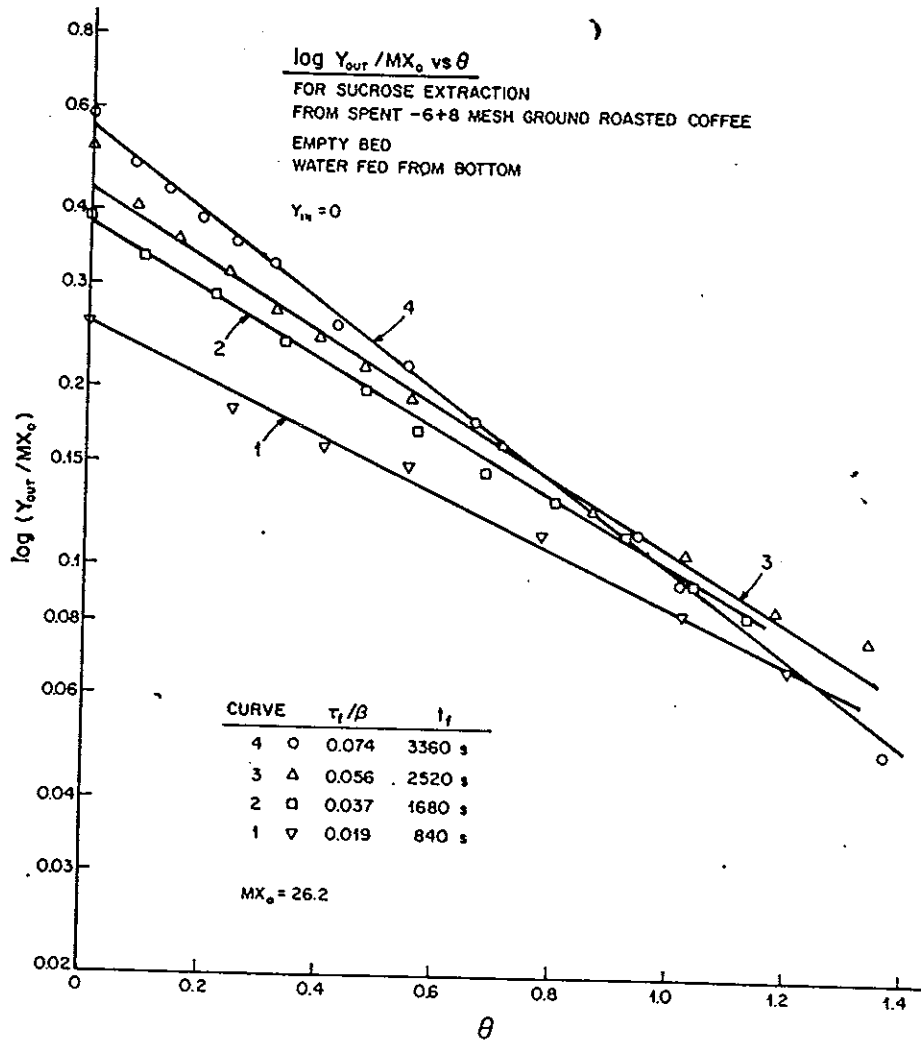
$$\beta = M\varepsilon / (1-\varepsilon)$$

จะได้

$$(1-S) = \left[1 + \frac{k_1 t_f (1-\varepsilon)}{a\varepsilon} \right] \exp \left[- \left[1 + \frac{k_1 t_f (1-\varepsilon)}{a\varepsilon} \right] \frac{\varepsilon \theta}{1-\varepsilon} \right] \dots \dots \dots (73)$$

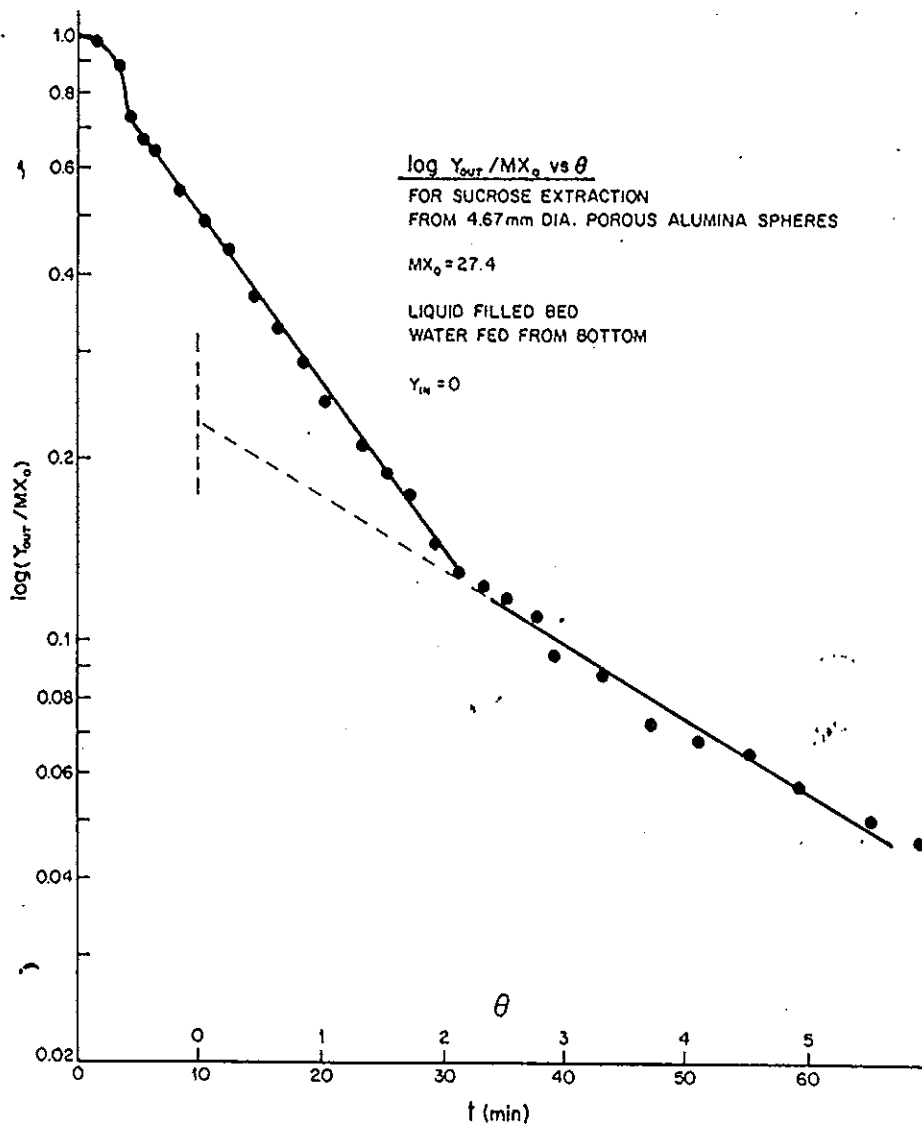
ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ขนาดต่างกันดังตาราง 52



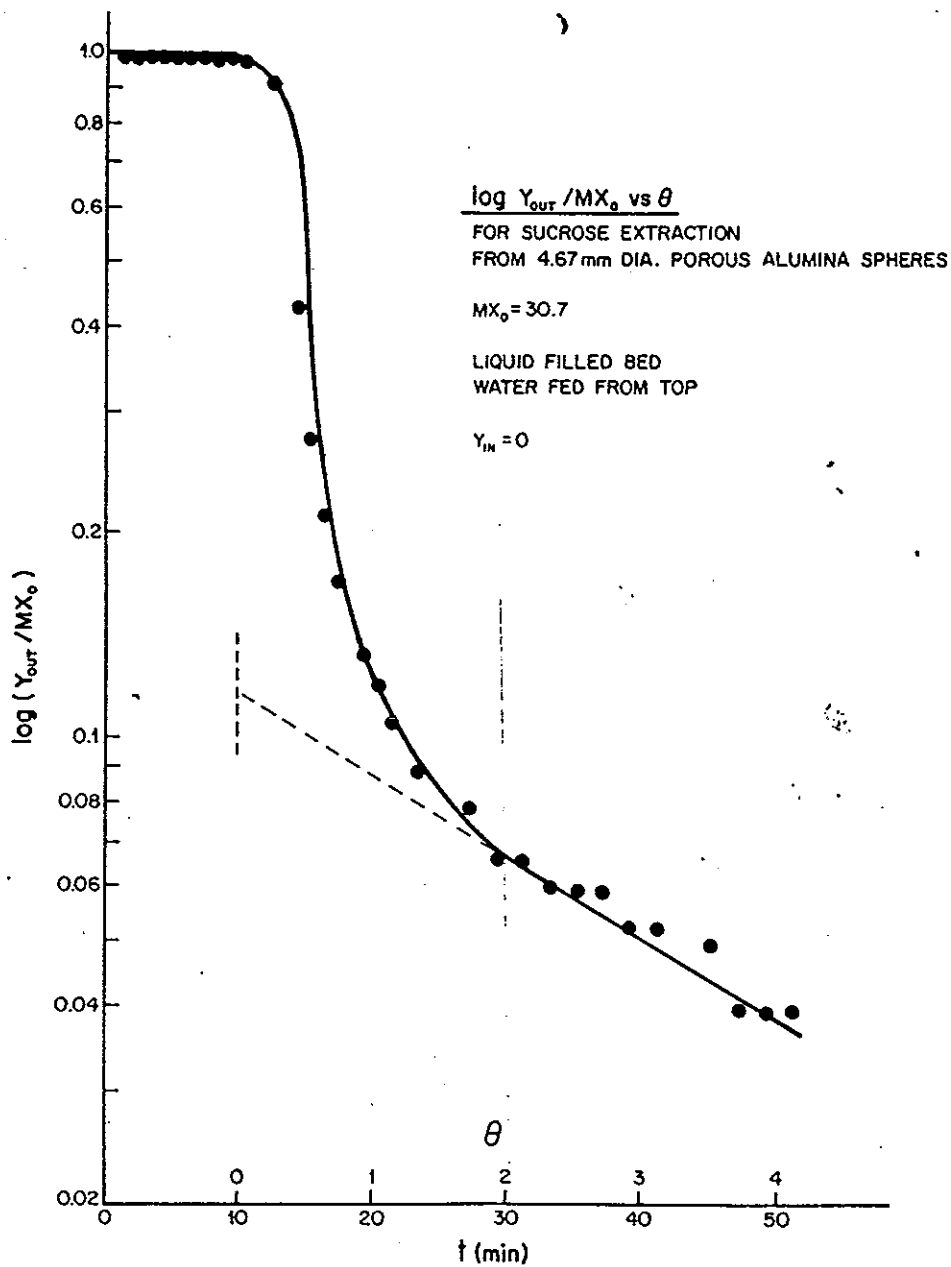
รูป 43 $\log(y_{out}/Mx_0)$ กับ θ จากการสกัดซูโครสจากผงกาแฟขนาด -6+8 mesh โดยใช้ น้ำปราศจากตัวละลายป้อนจากล่างขึ้นบนและเริ่มต้นการสกัดโดยไม่มีเอ็กแทรกตีเต็ม อยู่ในเบด ($\log(y_{out}/Mx_0)$ versus θ when using upflow of solute-free water to leach infused sucrose from -6+8 mesh spent coffee grounds in a bed that initially does not contain liquid in the interparticle pores)

ที่มา : Schwartzberg(1983)



รูป 44 $\log(y_{out}/Mx_0)$ กับ t และ θ จากการสกัดซูโครสจากทรงกลมอลูมินาที่มีรูพรุน
 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.67 mm โดยให้น้ำปราศจากตัวละลายป้อนจากล่างขึ้นบน
 และเริ่มต้นการสกัดโดยมีเอ็กแทรกต์ที่สมดุลกับทรงกลมเต็มเต็มอยู่ในเบด
 ($\log(y_{out}/Mx_0)$ versus t and θ when using upflow of solute-free water to leach
 infused sucrose from 4.67 mm diameter, porous alumina spheres in a bed initially
 filled with extract in equilibrium with the spheres)

ที่มา : Schwartzberg(1983)



รูป 45 $\log(y_{out}/Mx_0)$ กับ t และ θ จากการสกัดซูโครสจากทรงกลมอลูมินาที่มีรูพรุน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.67 mm โดยใช้น้ำปราศจากตัวละลายป้อนจากบนลงล่าง และเริ่มต้นการสกัดโดยมีเอ็กแทรกที่สมดุลกับทรงกลมเต็มเต็มอยู่ในเบด ($\log(y_{out}/Mx_0)$ versus t and θ when using downflow of solute-free water to leach infused sucrose from 4.67 mm diameter, porous alumina spheres in a bed initially filled with extract in equilibrium with the spheres)

ที่มา : Schwartzberg (1983)

ตาราง 52 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ จากการคำนวณจากสมการ (69) หรือ (73) ในการสกัดตัวละลายในเบตนิ่งสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm**

| ขนาด, mm | t_f (S) | a (m) | ε | สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ |
|----------|-----------|--------------------------|---------------|-----------------------------------------------|
| 2 | 82.50 | 0.1487×10^{-13} | 0.7113 | $(1-S) = 1.9723 \exp(-4.8595\theta)$ |
| 5 | 83.50 | 0.2126×10^{-13} | 0.7418 | $(1-S) = 1.5903 \exp(-4.5689\theta)$ |
| 9 | 82.90 | 0.5607×10^{-13} | 0.7536 | $(1-S) = 1.2087 \exp(-3.6969\theta)$ |

ตาราง 53 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ ที่คำนวณจากการทดลอง (fit curve) และที่คำนวณจากสมการ (69) หรือ (73)

| ขนาด, mm | ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ ที่คำนวณได้จากการทดลอง | | ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ ที่คำนวณได้จากสมการ (69) หรือ (73) |
|----------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| | logarithmic regression | exponential regression | |
| 2 | $(1-S) = 0.53730\theta^{-1.0152}$ | $(1-S) = 0.24976 \times 10^{-5.9214 \exp(-2\theta)}$ | $(1-S) = 1.9723 \exp(-4.8595\theta)$ |
| 5 | $(1-S) = 0.53118\theta^{-1.0320}$ | $(1-S) = 0.19815 \times 10^{-4.9606 \exp(-2\theta)}$ | $(1-S) = 1.5903 \exp(-4.5689\theta)$ |
| 9 | $(1-S) = 0.31935\theta^{-0.86566}$ | $(1-S) = 0.15630 \times 10^{-4.6346 \exp(-2\theta)}$ | $(1-S) = 1.2087 \exp(-3.6969\theta)$ |

จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ ที่ได้จากการทดลอง (fit curve) กับที่คำนวณจากสมการขาดความสอดคล้องกันอย่างมากทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ กับ θ จากการทดลองไม่เป็นเส้นตรงบนแกนเซมิ-ล็อก (semi log) (รูป 41) ส่วนสมการที่ (69) ใช้สำหรับความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงเท่านั้น

2. สาเหตุหนึ่งของการขาดความสอดคล้องกันนั้น น่าจะเกิดจากความไม่คงที่ของการแทนที่สาร (unstable displacement) กล่าวคือโครงสร้างของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไม่มีลักษณะเป็นหนึ่งเดียว (heterogeneity) ในขณะที่สภาวะของสมการที่ (69) นั้นวัตถุดิบ (เมล็ดกาแฟคั่ว) มีลักษณะถูกบดเป็นเนื้อละเอียด (ground roasted coffee -4+6 mesh) จึงมีความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้าง ขณะของการสกัดดำเนินไปนั้น สำหรับสภาวะของสมการที่ (69) เเบดจะถูกท่วมด้วยส่วนสกัดตลอดเวลา ในขณะที่การสกัดแบบหยดจากการทดลองนั้น ส่วนสกัดที่ป้อนจะไม่ท่วมเบดเลย (อัตราการไหล (flow rate) มีค่าน้อย)

3. ถึงแม้ว่าสภาวะในการทดลองนั้นเริ่มต้นจะไม่เติมเต็มด้วยส่วนสกัดเช่นเดียวกับสภาวะของสมการที่ (69) แต่การป้อนส่วนสกัดเป็นการป้อนจากบนลงล่าง (down flow) ไม่ใช่จากล่างขึ้นบน (up flow) ซึ่ง Schwartzberg (1983) กล่าวว่า รูปร่างของกราฟขึ้นอยู่กับอย่างมากว่าเมื่อเริ่มต้นนั้นเบดถูกเติมเต็มด้วยส่วนสกัดหรือไม่และการป้อนส่วนสกัดเป็นการป้อนจากบนลงล่างหรือจากล่างขึ้นบน

4. สมการที่ (69) เป็นสมการเอมิไพริคัล (empirical formula) ที่ใช้กับ θ น้อยๆ (0-1.4 (รูป 43)) แต่ใช้กับ θ มากๆไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาวะที่ต่างจากการทดลอง (θ มีค่าประมาณ 0-20)

5. ที่สภาวะของสมการที่ (69) นั้น ค่า retention time (t_r) ของการสกัดซูโครสจากผงกาแฟมีค่าสูง (840-3360 s (รูป 43)) ดังนั้นการแพร่ตามแนวแกน (axial dispersion) จึงมีผลต่อการสกัดมากกว่า (retention time (t_r) ของการสกัด CNSL แบบหยดจากการทดลองมีค่าต่ำกว่า (82-84 s) (จากตาราง 37, 39 และ 41 ที่ความหนาเบด 4 cm)

อนึ่งดังที่ได้กล่าวไว้ถ้า t_r น้อยกว่า 1.0 หรือ 0.1 สมการแก้ปัญหาค่า (solutions) ความสัมพันธ์ระหว่าง S หรือ $(1-S)$ กับ θ จะมีความซับซ้อนและยุ่งยากอย่างมากการใช้สมการที่ (69) จึงยังไม่เหมาะสม

ตาราง 54 ผลของการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายเฮกเซนในการสกัดCNSLแบบหยด

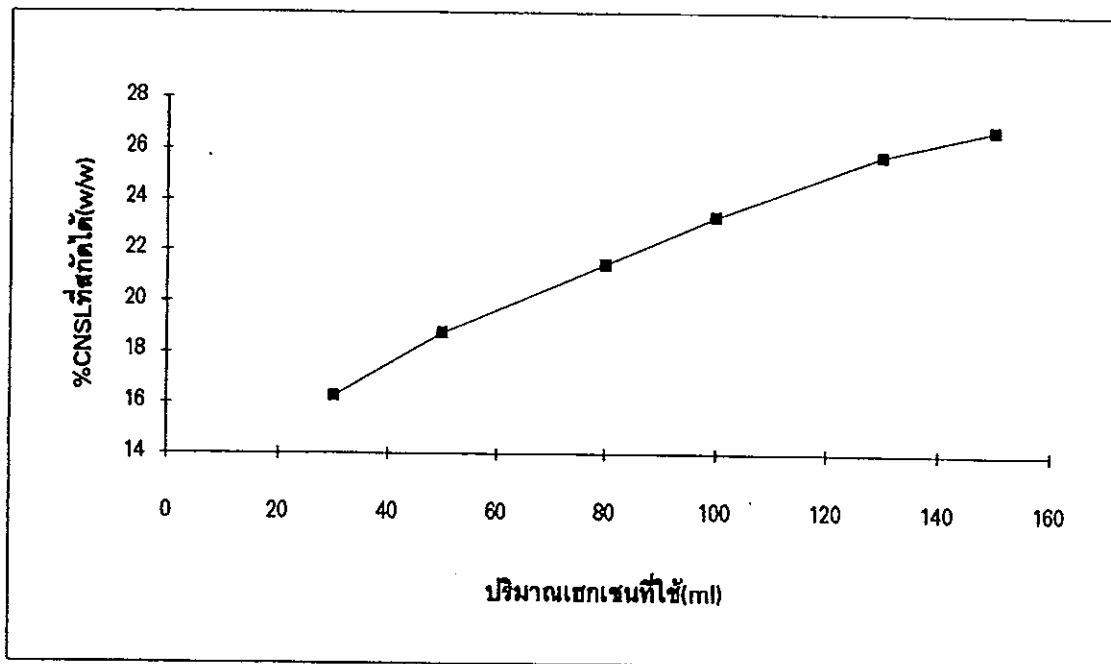
สภาวะ -ความหนาเบด 4 cm(น้ำหนักเปลือกเฉลี่ย 10.953 g)

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

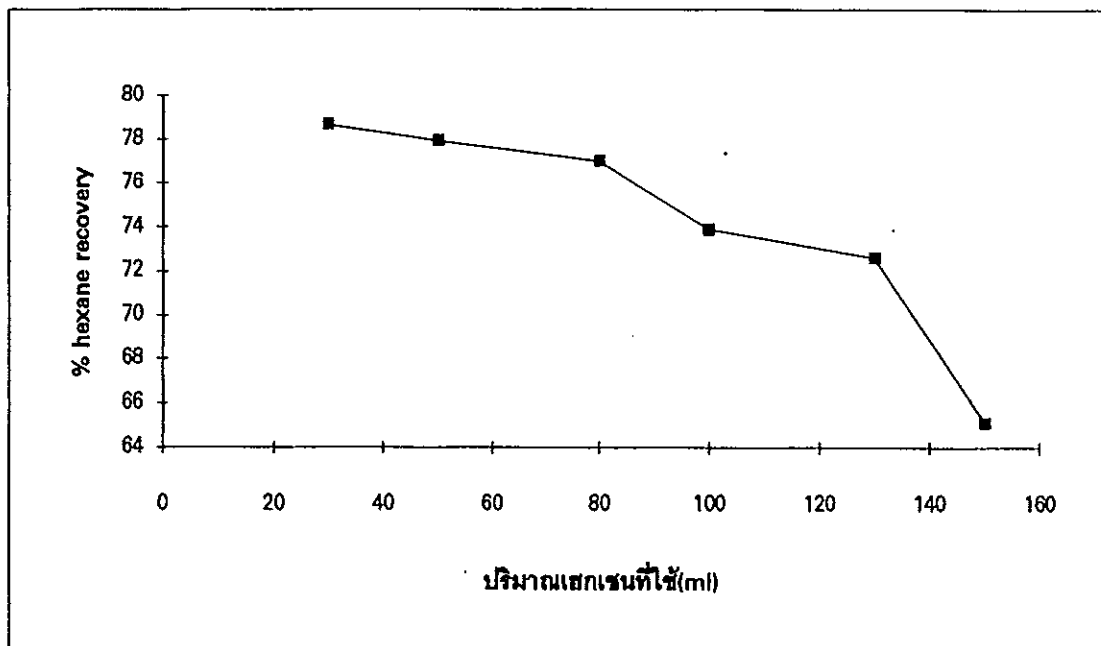
-อัตราการสกัด 1.67 ml/min

-ปริมาณเฮกเซนที่ใช้ 30.0, 50.0, 80.0, 100.0, 130.0 และ 150.0 ml

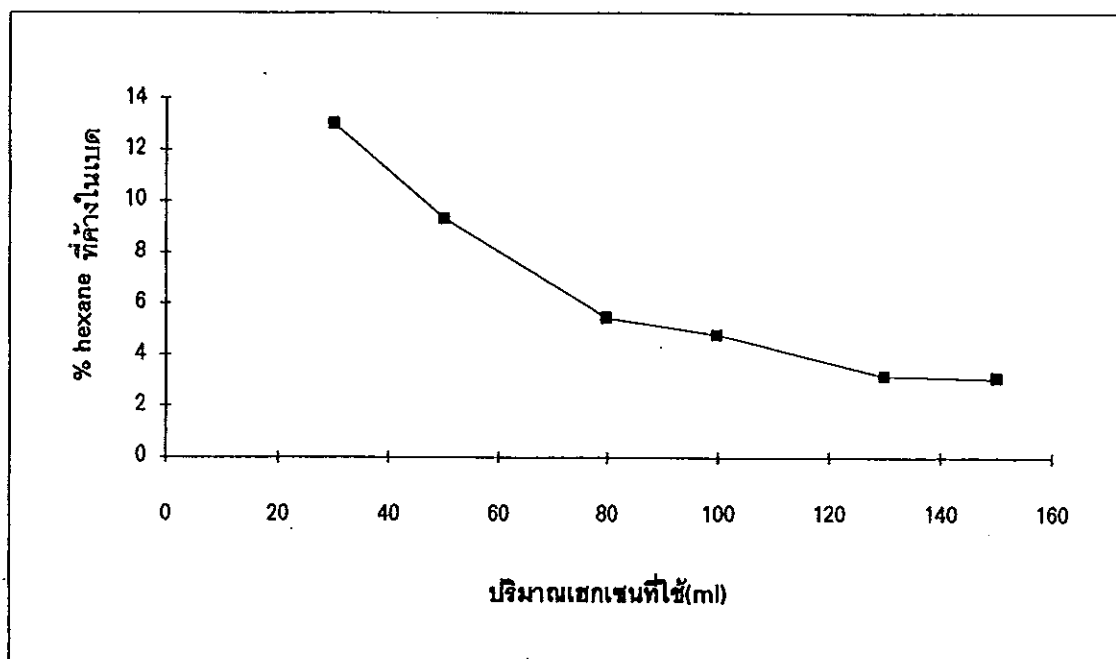
| ปริมาณเฮกเซน ที่ใช้(ml) | %CNSLที่สกัดได้ (w/w) | % hexane recovery | % hexane ที่ค้างในเบด | % hexane loss |
|----------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|------------------|
| 30.0 | 16.259 | 78.64 | 13.01 | 8.35 |
| 50.0 | 18.741 | 77.90 | 9.31 | 12.79 |
| 80.0 | 21.445 | 76.99 | 5.43 | 17.58 |
| 100.0 | 23.350 | 73.88 | 4.80 | 21.32 |
| 130.0 | 25.776 | 72.61 | 3.18 | 24.21 |
| 150.0 | 26.807 | 65.13 | 3.10 | 31.77 |



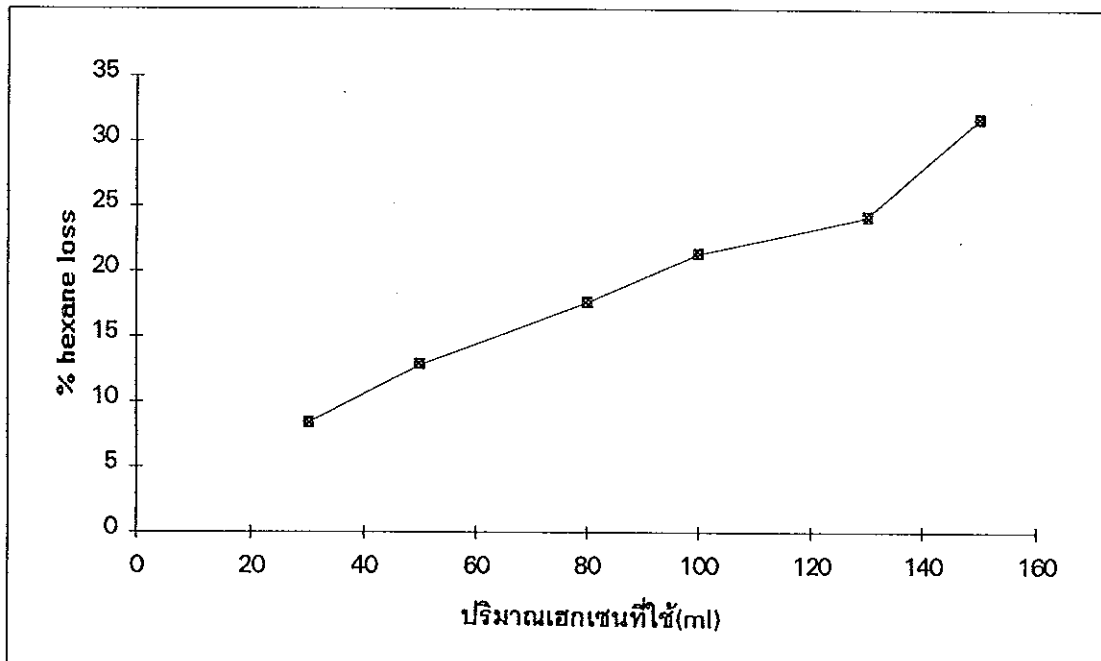
รูป 46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัดCNSL(ml)กับ%CNSLที่สกัดได้(w/w)



รูป 47 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัดCNSL(ml)กับ % hexane recovery



รูป 48 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัดCNSL(ml)กับ % hexane ที่ค้างในเบต



รูป 49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัด CNSL(ml) กับ % hexane loss

การพิจารณาปริมาณตัวทำละลายเฮกเซนในการสกัด CNSL แบบหยด

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวทำละลายเฮกเซนในการสกัด CNSL แบบหยดพบว่า สามารถสกัด CNSL ได้มากขึ้น (ตาราง 54 หรือรูป 46) % hexane recovery ลดลง (รูป 47) ทั้งนี้เนื่องจากการดำเนินการสกัดในระบบเปิด จึงเกิดการสูญเสียเฮกเซนเนื่องจากการระเหย กล่าวคือ % hexane loss เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการสกัดนานขึ้น (รูป 49) ส่วน % hexane retained จะลดลง (รูป 48) นอกจากนี้พบว่า ปริมาณเฮกเซนที่ค้างอยู่ในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เพราะเมื่อทำการหยดเฮกเซนไปเรื่อยๆ เฟสของแข็งจะอิ่มตัวด้วยตัวทำละลาย

อย่างไรก็ตามการพิจารณาใช้ปริมาณตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดแบบหยดนั้นไม่ได้คำนึงถึงปริมาณ CNSL ที่สกัดได้เพียงอย่างเดียวแต่ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการด้วย

บทที่ 4

สรุป

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ปริมาณ CNSL ในวัตถุดิบคือเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีค่าเป็น 33.205 % ความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตัวทำละลายเฮกเซน และตัวละลาย CNSL ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเป็น 1.5343, 0.6646 และ 0.9725 g/cm³ ตามลำดับ ความหนืดของเฮกเซนและ CNSL มีค่า 50 และ 990 centipoises ตามลำดับ เมื่อนำเฮกเซนกับ CNSL มาผสมในสัดส่วนต่างๆกันพบว่า เมื่อสัดส่วนเฮกเซนเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของสารผสมจะลดลง อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นเส้นตรง ทั้งนี้เพราะเกิดปฏิกิริยาสัมพันธระหว่างกันของสารผสม

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายกล่าวคือ พื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ความพรุนระหว่างอนุภาค ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสมมูลของตัวละลาย รัศมีสมมูลย์ของแผ่นแบนและครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นแบนของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลาย CNSL ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการคือ $3.15 \times 10^{-9} x_i^{2.5844}$, $2.89 \times 10^{-8} x_i^{3.7175}$ และ $2.91 \times 10^{-7} x_i^{4.5316}$ ตามลำดับ

ในการศึกษาการสกัด CNSL แบบหยดในระบบเปิดพบว่า อัตราการฉีดพ่น(หยด)เฮกเซนที่เหมาะสมคือ 1-2 ml/min ซึ่งจะสกัด CNSL ได้ 72.43-79.17 % ในวัตถุดิบเมื่อใช้สัดส่วนวัตถุดิบต่อเฮกเซน 3: 5 w/v จากการเปรียบเทียบการสกัดแบบแช่และการสกัดแบบหยดพบว่าให้ผลได้ใกล้เคียงกัน % hexane recovery เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราการหยดเฮกเซน เนื่องจากทดลองในระบบเปิด ส่วน % hexane retained คงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการหยดเนื่องจากเฟสของแข็งอิ่มตัวด้วยตัวทำละลาย ขนาดวัตถุดิบลดลงจะทำให้สกัด CNSL ได้ดีขึ้น เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับตัวทำละลายสูงกว่า ในที่นี้เลือกความหนาเบด 4 cm เนื่องจากให้ % CNSL ที่สกัดได้ในแต่ละเบดเป็น 60-80 %

ในการสกัด CNSL จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2, 5 และ 9 mm โดยใช้ความหนาเบด 4 cm (วัตถุดิบประมาณ 10-11 g) อัตราการหยดเฮกเซน 1.67 ml/min สกัดเป็นเวลา 30 min พบว่าให้ผลได้ CNSL 23.76, 23.63 และ 22.46 % ตามลำดับหรือคิดเป็น CNSL ในวัตถุดิบ 71.56, 71.17 และ 67.65 % ตามลำดับ ส่วน % hexane recovery, % hexane retained และ retention time มีค่าอยู่ในช่วง 79-80 %, 824-36 % และ 82-84 s ตามลำดับ โดยที่ค่าเหล่านี้ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดวัตถุดิบ ซึ่งอาจจะเนื่องจากความต่างของขนาดวัตถุดิบไม่มากพอ

อย่างไรก็ตามการทดลองนี้เป็นเพียงการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเท่านั้น เนื่องจากในระบบการสกัดจริงสำหรับของเหลวระเหยง่าย มักจะดำเนินการในระบบปิดเพื่อป้องกันการสูญเสียตัวทำละลายและด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัย นอกจากนี้จะเห็นว่ายังสกัด CNSL ได้ไม่หมด ดังนั้นอาจต้องแก้ปัญหาด้วยวิธีการต่างๆ เช่น ศึกษาถึงการลดขนาดวัตถุดิบและควบคุมการสูญเสีย CNSL ระหว่างการลดขนาด อาจนำเฮกเซนที่ผ่านการสกัดแล้วที่ยังไม่อิ่มตัวด้วยตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ (recirculation) เพื่อประหยัดตัวทำละลายและเพื่อให้การสกัดมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น อาจนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการอื่นเพื่อให้ได้ CNSL มากขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิตัวทำละลายก็เป็นหนทางหนึ่งในการช่วยสกัด แต่ต้องกระทำในระบบปิด

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-S)$ (dimensionless concentration) กับ θ (dimensionless time) สำหรับการสกัดในเบดนิ่ง พบว่าไม่เป็นไปตามสมการของ Schwartzberg (1983) เนื่องจากเงื่อนไขในการทดลองต่างกัน ส่วนการพิจารณาเฮกเซนในการสกัดแบบหยดนั้นพบว่า ปริมาณเฮกเซนที่เหมาะสมไม่ได้หมายถึงปริมาณที่ให้ CNSL สูงสุดเท่านั้นแต่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมาร่วมด้วย

จากการออกแบบปฏิกรณ์ในการสกัด ได้เลือกปฏิกรณ์แบบไหลตัดข้ามหลายสเตจ ปฏิกรณ์แบบนี้เป็นปฏิกรณ์ที่นิยมใช้ในระบบไหลสวนทางแบบหลายสเตจ ของแข็งในปฏิกรณ์จะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว (plug flow in one phase) ขณะที่ของเหลวยังคงมีการผสมกลับเกิดขึ้น จากการคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองการแพร่ที่มีการผสมกลับ (Backmixing-diffusion model) พบว่า เวลาเรสซิเดนซ์ในการสกัดโดยประมาณอย่างต่ำ (conservative) เพื่อให้สกัด CNSL ได้ 95 % อยู่ในช่วง 5,000-10,000 s ในที่นี้เลือกเวลา 7,200 s หรือ 2 hour ซึ่งเป็นเวลาทั่วไปที่ของแข็งของเหลวชุดหนึ่งๆ จะอยู่ในปฏิกรณ์ จากการกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลของของแข็งและของ

เหลว(ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร) เป็น 5/3 kg/s และ 2.5 kg/s ตามลำดับ และกำหนดความยาวปฏิกรณ์เป็น 5.2 m สามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดของปฏิกรณ์ได้โดยมีค่าเป็น 20.11 m²

อย่างไรก็ตาม การออกแบบปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดกำลังการผลิต ซึ่งในที่นี้เป็นเพียงการนำเสนอความคิดในการออกแบบเท่านั้น ในการพิจารณาการสกัดหนึ่งๆ ยังต้องมีหน่วยดำเนินการอื่นๆมาเกี่ยวข้อง อาทิเช่น หน่วยเตรียมของแข็งเพื่อการสกัด หน่วยแยกตัว ทำละลายออกจากตัวละลาย ซึ่งต้องพิจารณาเลือกเครื่องมือและวิธีการดำเนินการสำหรับการสกัดเฉพาะอย่างหนึ่งๆ สำหรับการตั้งโรงสกัดนั้นต้องคำนึงถึงหน่วยสนับสนุนอื่นๆทั้งหมด การทำการวิเคราะห์ราคา(cost analysis)จะบอกถึงความเป็นไปได้ในการผลิตว่ามากน้อยเพียงไร

บรรณานุกรม

- กรรณิการ์ สถาปิตานนท์, ศิลปชัย อรัญญนาค, จีรวัดมน์ สิ้นธุณนิชเศรษฐ และ เพิ่มสุข มานะ.
2532. "การผลิตวาร์นิชจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในระดับกึ่งการผลิตต้นแบบ". วารสารวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 4(1) : 5-19.
- จันทนา คงสังข์ และ มลฤดี ประภากรรัตน. 2536. การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. ปัญหาพิเศษ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธนวรรณ ยศราวุฒวรรกุล. 2537. การพัฒนากระบวนการผลิตวุ้นสำหรับเลี้ยงแมคทีเรียจากสาหร่ายสกุลคลอราซีลาเขียว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ประธาน วงศ์ศรีเวช และ สุรีย์พร สุรัตน์. 2536. การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. ปัญหาพิเศษ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประเทืองศรี สินชัยศรี. 2534. "คุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีและการแปรรูปของมะม่วงหิมพานต์". วารสารอุตสาหกรรมสาร. 34(7) : 9-16.
- ปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี 2. 2531. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปรีดีมาติ สุวิทยารัตน์ และ วชิระ เสาวภาคย์. 2537. การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยวิธีการทอด. ปัญหาพิเศษ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พัน มาลีวรรณ และ ทุ่น อารีย์. 2522. พันธุ์และการปรับปรุงบำรุงพันธุ์มะม่วงหิมพานต์ใน

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาเรื่องมะม่วงหิมพานต์
สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ณ สำนักงานเกษตรภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัด
ขอนแก่น. 6-8 กันยายน 2522.

พิชิต สุขเจริญพงศ์. 2521. การจัดการวิศวกรรมการผลิต. ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. กรุงเทพมหานคร.

วิจิตร วรรณชิต. 2528. มะม่วงหิมพานต์. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สถิติการเกษตรของประเทศไทยปีเพาะปลูก 2533/2534. 2535. เอกสารสถิติการเกษตรเลขที่ 436
ศูนย์สถิติการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สถิติการเกษตรของประเทศไทยปีเพาะปลูก 2534/2535. 2535. เอกสารสถิติการเกษตรเลขที่ 441.
ศูนย์สถิติการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต. 2532. มะม่วงหิมพานต์. อุตสาหกรรมสาร. 32(1).

อรวิดี มาลีวรรณ. 2524. ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมของน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์.
กองสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ.

Adam, E. E. and Ebert, R. J. 1982. Production and operation management : Concepts, models
and behavior. 2nd ed. New Joursey : Prentice Hall.

Aggarwal, J. 1972. Chemistry and uses of cashew nut shell liquid. Hyderabad India : Paint
Manufacture.

Chemical safety data sheets volume I : Solvents. 1989. Royal Society of Chemistry
Information Services.

Crank, J. E. 1975. The mathematics of diffusion. Oxford Clarendon Press.

Deisler, P.F. and Wilhelm. 1953. Diffusion in beds of porous solid measurement by frequency response technique. Ind. Eng. Chem. 45.

European Patent 001561. 1980.

Gonsalves, A. M. D'A. R. and Costa, A. M. B. S. R. C. S. 1975. Chromatography of cashew nut shell liquid. J. of Chromatography. 104:225-227

Greenkorn, R. A. and Kessler, D. P. 1972. Transfer operation. Kogakusha : McGraw-Hill.

Karnovsky, G. 1986. J. Am. Oil Chem. Soc. 63 : 1011.

Kopelman, I. J. ,Mizrabi, S. and Kochba, M. 1975. Effect of diffusion rate or drained weight of canned grapefruit segments. J. Food Sci. 40 : 695.

Mecklenburgh, J.C. and Hartland, S. 1974. The theory of backmixing. John Wiley & Sons

Rasmuson, A. and Neretniecks, I. 1980. Exact solution of a model for diffusion in particles and longitudinal dispersion in packed beds. J. Chem. Phys. 20 : 1590-1594.

Robert, T. 1980. Mass transfer operation, 3rd ed. McGraw-Hill.

Rousseau, R. W. 1987. Handbook of separation process technology. John Wiley&Sons.

Schawartzberg, H. G. 1980. Continuous counter-current extraction in the food industry "What's happening today in leaching technology- with extensive documentation". AIChE. 76(4) : 67-85.

Schawartzberg, H. G. , Flores, S. and Zaman, S. 1983. Analysis of multi-stage belt extractors.

Paper presented at the AIChE National Meeting, Denver CO, 28-31 August 1983.

Schawartzberg, H. G. and Rong Yue chao. 1982. Solute diffusivities in leaching processes.

J. Food Tech. pp. 73-85.

Schweitzer, P. A. 1979. Handbook of separation techniques for chemical engineers. McGraw-Hill Book Company.

Segado, R. R. and Schawartzberg, H. G. 1982. Anomalous behavior during oil extraction from flaked soybeans. Food Engineering Department. University of Massachusetts. U.S.A.

Siripatana, C. 1986. Mass transfer in reversing counter-current extractor. Master of Applied Sci. Thesis. School of Food Technology. University of New South Wales. Australia.

Treybal, R. E. 1980. Mass-transfer operations. 3rd ed. McGraw-Hill Book Company.

Tychopoulos, V. and Tyman, J. H. P. 1990. Long chain phenols- The thermal and oxidation deterioration of phenolic lipids from the cashew (Anacardium Occidentale) nut shell.

J. Sci. Food and Agri. 52 : 71-83.

Tyman, J. H. P. ,Johnson, R. A. ,Muir, M. and Rokhgar, R. 1989. The extraction of natural cashew nut shell liquid from the cashew nut (Anacardium Occidentale). JOACS. 66(4) : 553-557.

United Kingdom Patent 2104516B. 1981.

Weidner, E. In Proceedings of the 10th congress of essential oils. edited by B.M. Lawrence.

Amsterdam. ELsevir Science Publishers.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของ ตัวละลาย CNSL

ตารางผนวก 1 การทดลองเพื่อหาปริมาณ CNSL ทั้งหมดที่มีในเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

สภาวะ -เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm ปริมาณ 30 กรัม

-เฮกเซน 300 ml

-เวลาที่ใช้ในการสกัดโดยซอกซ์เล็ท(soxhlet) 3 ชั่วโมง

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือก | ปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ | %น้ำมันที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือก |
|----------|--------------|------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 30.015 | 10.092 | 33.623 |
| 2 | 29.986 | 9.925 | 33.099 |
| 3 | 30.237 | 9.946 | 32.893 |
| เฉลี่ย | 30.079 | 9.988 | 33.205 |

วิธีการทดลองหาความหนาแน่น(density, ρ)ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

อุปกรณ์การทดลอง -พิกโนมิเตอร์(pycnometer) ขนาด 25 ml

-เครื่องชั่งน้ำหนัก

1. ชั่งน้ำหนักพิกโนมิเตอร์ (w_1)
2. ใส่ตัวอย่างลงในพิกโนมิเตอร์แล้วชั่งน้ำหนัก (w_2)
3. เติมน้ำลงในพิกโนมิเตอร์จนเต็ม ชั่งน้ำหนัก (w_3)
4. คำนวณน้ำหนักน้ำที่เติมลงไป (w_2-w_3)
5. จากความหนาแน่นของน้ำ คำนวณหาปริมาตรน้ำที่เติมลงไปได้
6. คำนวณหาความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ดังนี้

ความหนาแน่น= น้ำหนักตัวอย่าง/(25-ปริมาตรน้ำ)

$$= (w_2 - w_1)/(25 - V), \text{ g/cm}^3$$

ตารางผนวก 2 ข้อมูลการทดสอบหาความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

-ความหนาแน่นของน้ำ 1.0004 g/cm³ ที่อุณหภูมิห้อง(25 °C)

| ครั้งที่ | น้ำหนัก พิกโน มิเตอร์ (w ₁), g | น้ำหนัก พิกโนมิ เตอร์กับ ตัวอย่าง (w ₂), g | น้ำหนัก ตัวอย่าง (w ₂ -w ₁), g | น้ำหนัก พิกโนมิ เตอร์กับ ตัวอย่าง และน้ำ (w ₃), g | น้ำหนัก น้ำ (w ₃ -w ₂), g | ปริมาตร น้ำ (V), cm ³ | ความ หนาแน่น ของตัว อย่าง, g/cm ³ |
|----------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | 22.8740 | 26.2793 | 3.4053 | 49.1803 | 22.9010 | 22.9010 | 1.6223 |
| 2 | 22.9228 | 26.3349 | 3.4121 | 49.0566 | 212.7217 | 22.7217 | 1.4977 |
| 3 | 22.9066 | 27.3941 | 4.4875 | 49.3678 | 21.9737 | 21.9737 | 1.4828 |
| เฉลี่ย | | | | | | | 1.5343 |

วิธีการทดสอบหาความหนืด(viscosity, μ)ของเฮกเซนและ CNSL

อุปกรณ์การทดลอง -Brookfield Viscometer

1. ต่อ spindle เข้ากับแกนของเครื่อง
2. จุ่ม spindle ในตัวอย่างที่ต้องการทดสอบโดยให้ระดับของเหลวอยู่ที่จุดกำหนดที่ spindle
3. กดครีซและกดปุ่มให้มอเตอร์หมุน ปลดครีซและปล่อยให้มอเตอร์หมุนจนเข็มบนหน้าปัดอยู่ที่จุดคงที่ เวลาที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) นี้ขึ้นอยู่กับความเร็ว ถ้าความเร็ว 4 rpm จะใช้เวลา 20-30 วินาที ที่ความเร็วต่ำกว่านี้ ต้องใช้เวลาอย่างน้อยหนึ่งรอบของการหมุนบนหน้าปัด ที่ความเร็วสูงๆ ต้องกดครีซพร้อมกับหยุดมอเตอร์ เพื่ออ่านค่าตำแหน่งเข็มบนหน้าปัด
4. การเช็คค่า เปิดเครื่องอีกขณะที่ยังกดครีซ แล้วปลดครีซ
5. คำนวณค่าความหนืดโดยใช้ factor finder

วิธีการทดลองหาความหนาแน่น(density, ρ) ของของผสม CNSL กับเฮกเซน

อุปกรณ์การทดลอง -พิกโนมิเตอร์ขนาด 25 ml
-เครื่องชั่งน้ำหนัก

1. ชั่งน้ำหนักพิกโนมิเตอร์
2. ใส่ CNSL ลงในพิกโนมิเตอร์ปริมาณต่างๆดังนี้คือ 24.8174, 21.3925, 19.8850, 17.4014, 14.6995, 13.3060, 10.2560, 7.4588, 4.3277, 1.7870 และ 0 g ตามลำดับ
3. ปรับปริมาตรพิกโนมิเตอร์ด้วยเฮกเซนจนได้ปริมาตร 25 ml แล้วชั่งน้ำหนัก
4. คำนวณหาน้ำหนักเฮกเซนที่เติมลงไปเพื่อปรับปริมาตร
5. จากผลการทดลองจะคำนวณหาความหนาแน่นของน้ำมัน CNSL และเฮกเซนได้ แล้วจึงคำนวณหาความหนาแน่นของของผสมดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่นของของผสม CNSL กับเฮกเซน (g/cm}^3\text{)} = \left[\frac{W_{mix}}{\frac{W_{CNSL}}{\rho_{CNSL}} + \frac{W_H}{\rho_H}} \right]$$

โดยที่ W_{mix} : น้ำหนักของของผสม CNSL กับเฮกเซน

W_{CNSL} : น้ำหนักของ CNSL

W_H : น้ำหนักของเฮกเซน

ρ_{CNSL} : ความหนาแน่นของ CNSL

ρ_H : ความหนาแน่นของเฮกเซน

ตารางผนวก 3 ข้อมูลการทดลองหาความหนาแน่นของของผสมCNSLกับเฮกเซน

| น้ำหนักCNSL, g | น้ำหนักเฮกเซน, g | น้ำหนักของของ ผสมCNSLกับ เฮกเซน, g | น้ำหนักเฮกเซน ต่อน้ำหนักของ ของผสม (w/w) | ความหนาแน่น ของของผสม, g/cm ³ |
|----------------|---------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 24.3125 | 0 | 0 | 0 | 0.9725 |
| 21.3925 | 2.2482 | 23.6407 | 0.0951 | 0.9315 |
| 19.8850 | 3.1646 | 23.0496 | 0.1373 | 0.9143 |
| 17.4014 | 4.9115 | 22.3129 | 0.2201 | 0.8825 |
| 14.5995 | 6.7996 | 21.3990 | 0.3177 | 0.8477 |
| 13.3060 | 7.6676 | 20.9736 | 0.3656 | 0.8316 |
| 10.2560 | 9.7441 | 20.0001 | 0.4872 | 0.7934 |
| 7.4588 | 11.5907 | 19.0565 | 0.6082 | 0.7589 |
| 4.3277 | 13.6851 | 18.0128 | 0.7597 | 0.7193 |
| 1.7870 | 15.3180 | 17.1050 | 0.8955 | 0.6873 |
| 0 | 16.6150 | 16.6150 | 1.0 | 0.6646 |

ตารางผนวก 4 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาขนาดพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (α) จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² $\sigma_{n-1} = 4.7584$ $\bar{x} = 9.8660$ | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.9384$ $\bar{x} = 4.6700$ |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 20.40 | 0.0072 | 4.6927 | 14.00 | 0.2300 | 3.2200 | 23.6200 | 5.0333 |
| 2 | 8.60 | 0.0032 | 2.0856 | 9.40 | 0.2425 | 2.2795 | 10.8795 | 5.2615 |
| 3 | 5.02 | 0.0030 | 1.9553 | 9.12 | 0.3911 | 3.5590 | 8.5590 | 4.3773 |
| 4 | 8.02 | 0.0026 | 1.6946 | 8.60 | 0.2118 | 1.8215 | 9.8215 | 5.7958 |
| 5 | 7.98 | 0.0037 | 2.4115 | 7.68 | 0.3014 | 2.3609 | 10.3509 | 4.2923 |
| 6 | 22.48 | 0.0099 | 6.4525 | 13.80 | 0.2868 | 3.9578 | 26.4578 | 4.1004 |
| 7 | 9.38 | 0.0038 | 2.4767 | 8.84 | 0.2646 | 2.3285 | 11.6885 | 4.7194 |
| 8 | 8.84 | 0.0025 | 1.6294 | 9.58 | 0.1843 | 1.7693 | 10.6093 | 6.5112 |
| 9 | 8.40 | 0.0056 | 3.6499 | 8.28 | 0.4345 | 3.6064 | 12.0064 | 3.2895 |
| 10 | 23.38 | 0.0091 | 5.9310 | 10.66 | 0.2535 | 2.7125 | 26.1125 | 4.4027 |
| 11 | 4.80 | 0.0035 | 2.2812 | 8.78 | 0.4753 | 4.1826 | 8.9826 | 3.9377 |
| 12 | 11.18 | 0.0037 | 2.4115 | 9.60 | 0.2153 | 2.0669 | 13.2669 | 5.5015 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² $\sigma_{n-1} = 4.7584$ $\bar{x} = 9.8660$ | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.9384$ $\bar{x} = 4.6700$ |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | 11.20 | 0.0052 | 3.3892 | 10.40 | 0.3026 | 3.1470 | 14.3470 | 4.2332 |
| 14 | 10.42 | 0.0057 | 3.7150 | 11.00 | 0.3572 | 3.9292 | 14.3292 | 3.8571 |
| 15 | 5.80 | 0.0033 | 2.1508 | 7.20 | 0.3585 | 2.5812 | 8.5812 | 3.9858 |
| 16 | 5.40 | 0.0026 | 1.6946 | 7.40 | 0.3138 | 2.3221 | 7.7221 | 4.5569 |
| 17 | 7.28 | 0.0066 | 4.3016 | 8.82 | 0.5909 | 4.7272 | 12.0072 | 2.7913 |
| 18 | 12.60 | 0.0037 | 2.4115 | 9.62 | 0.1914 | 1.8374 | 14.4374 | 5.9869 |
| 19 | 8.78 | 0.0033 | 2.1508 | 8.40 | 0.2444 | 2.0530 | 10.8530 | 5.0460 |
| 20 | 7.82 | 0.0035 | 2.2812 | 10.68 | 0.2925 | 3.1298 | 10.9298 | 4.7913 |
| 21 | 15.20 | 0.0061 | 3.9758 | 12.60 | 0.2616 | 3.2962 | 18.4962 | 4.6522 |
| 22 | 7.64 | 0.0022 | 1.4339 | 8.50 | 0.1887 | 1.6040 | 9.2040 | 6.4189 |
| 23 | 8.98 | 0.0037 | 2.4115 | 9.38 | 0.2679 | 2.5183 | 11.5183 | 4.7764 |
| 24 | 7.22 | 0.0028 | 1.8249 | 7.60 | 0.2535 | 1.9266 | 9.1266 | 5.0012 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² $\sigma_{n-1} = 4.7584$ $\bar{x} = 9.8660$ | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.9384$ $\bar{x} = 4.6700$ |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25 | 8.40 | 0.0030 | 1.9553 | 9.00 | 0.2328 | 2.0952 | 10.4952 | 5.3676 |
| 26 | 10.00 | 0.0067 | 4.3668 | 12.22 | 0.4367 | 5.3277 | 15.3277 | 3.5101 |
| 27 | 9.04 | 0.0049 | 3.1936 | 8.92 | 0.3548 | 3.1577 | 12.1577 | 3.8069 |
| 28 | 10.66 | 0.0047 | 3.0633 | 10.18 | 0.2890 | 2.9478 | 10.8890 | 3.5547 |
| 29 | 5.20 | 0.0016 | 1.0428 | 7.00 | 0.2005 | 1.4035 | 6.6035 | 6.3325 |
| 30 | 5.80 | 0.0026 | 1.6946 | 4.78 | 0.2922 | 1.4026 | 7.2026 | 4.2503 |

ตารางผนวก 5 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาขนาดพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตร (α) จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.7284$ $\bar{x} = 3.0275$ |
|---------|---------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 37.60 | 0.0207 | 13.4915 | 20.00 | 0.3588 | 7.1760 | 44.7760 | 3.3188 |
| 2 | 37.80 | 0.0202 | 13.1656 | 18.61 | 0.3483 | 6.4819 | 44.2819 | 3.3635 |
| 3 | 30.64 | 0.0297 | 19.3574 | 18.72 | 0.6326 | 11.8422 | 42.4422 | 2.1926 |
| 4 | 53.42 | 0.0292 | 19.0315 | 20.34 | 0.3564 | 7.2492 | 60.6492 | 3.1868 |
| 5 | 56.36 | 0.0365 | 23.7894 | 20.42 | 0.4218 | 8.6132 | 65.0132 | 2.7329 |
| 6 | 61.02 | 0.0342 | 22.2903 | 17.80 | 0.3654 | 6.5041 | 67.5041 | 3.0824 |
| 7 | 59.38 | 0.0586 | 38.1933 | 22.70 | 0.6430 | 14.5961 | 73.9961 | 1.9374 |
| 8 | 40.18 | 0.0289 | 18.8360 | 19.80 | 0.4686 | 9.2783 | 49.4783 | 2.6268 |
| 9 | 31.20 | 0.0229 | 14.9254 | 19.20 | 0.4784 | 9.1853 | 40.3853 | 2.7058 |
| 10 | 40.40 | 0.0244 | 15.9030 | 18.30 | 0.3936 | 7.2029 | 47.6029 | 2.9933 |
| 11 | 20.84 | 0.0155 | 10.1023 | 17.50 | 0.4857 | 8.4998 | 29.2998 | 2.9003 |
| 12 | 33.76 | 0.0211 | 13.7522 | 18.90 | 0.406 | 7.6904 | 41.4904 | 3.0170 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.7284$ $\bar{x} = 3.0275$ |
|---------|---------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | 40.40 | 0.0387 | 25.2232 | 17.40 | 0.6243 | 10.8628 | 51.2628 | 2.0324 |
| 14 | 32.20 | 0.0375 | 24.4411 | 17.80 | 0.7590 | 13.5102 | 45.7102 | 1.8702 |
| 15 | 38.18 | 0.0252 | 16.4244 | 17.50 | 0.4300 | 7.5250 | 45.7250 | 2.7840 |
| 16 | 34.02 | 0.0274 | 17.8583 | 18.60 | 0.5252 | 9.7687 | 43.7687 | 2.4509 |
| 17 | 42.40 | 0.0303 | 19.7484 | 17.60 | 0.4658 | 8.1981 | 50.5981 | 2.5621 |
| 18 | 52.40 | 0.0241 | 15.7075 | 18.60 | 0.2998 | 5.5763 | 57.9763 | 3.6910 |
| 19 | 42.60 | 0.0162 | 10.5586 | 22.50 | 0.2479 | 5.5778 | 48.1778 | 4.5629 |
| 20 | 27.20 | 0.0288 | 18.7708 | 15.80 | 0.6901 | 10.9036 | 38.1036 | 2.0299 |
| 21 | 33.60 | 0.0195 | 12.7094 | 17.50 | 0.3783 | 6.6203 | 40.2203 | 3.1646 |
| 22 | 40.20 | 0.0195 | 12.7094 | 17.00 | 0.3162 | 5.3754 | 45.5754 | 3.5860 |
| 23 | 51.40 | 0.0271 | 17.6628 | 22.60 | 0.3436 | 7.7654 | 59.1654 | 3.3497 |
| 24 | 50.00 | 0.0231 | 15.0557 | 28.40 | 0.3011 | 8.5512 | 58.5512 | 3.8890 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.7284$ $\bar{x} = 3.0275$ |
|---------|---------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25 | 53.80 | 0.0260 | 16.9548 | 21.00 | 0.3150 | 6.6150 | 60.4150 | 3.5652 |
| 26 | 36.60 | 0.0161 | 10.4934 | 18.70 | 0.2869 | 5.3650 | 41.9650 | 3.9992 |
| 27 | 47.00 | 0.0304 | 19.8136 | 21.30 | 0.4216 | 8.9801 | 55.9801 | 2.8253 |
| 28 | 48.00 | 0.0174 | 11.3407 | 16.30 | 0.2363 | 3.8517 | 51.8517 | 4.5722 |
| 29 | 38.22 | 0.0179 | 11.6666 | 18.50 | 0.3054 | 5.6499 | 43.8499 | 3.7586 |
| 30 | 50.18 | 0.0428 | 27.8955 | 24.40 | 0.3760 | 9.1744 | 59.3744 | 2.1285 |

ตารางผนวก 6 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาขนาดพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร(α)จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.2755$ $\bar{x} = 1.6322$ |
|---------|---------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 60.10 | 0.0713 | 46.4707 | 26.30 | 0.7732 | 20.3352 | 80.4532 | 1.7309 |
| 2 | 47.60 | 0.0964 | 62.8300 | 29.50 | 1.3200 | 38.9400 | 86.5400 | 1.3774 |
| 3 | 27.40 | 0.0426 | 27.7651 | 25.20 | 1.0133 | 25.5352 | 52.9352 | 1.9065 |
| 4 | 45.20 | 0.0697 | 45.4279 | 27.60 | 1.0050 | 27.7380 | 72.9380 | 1.6056 |
| 5 | 41.70 | 0.0331 | 21.5734 | 23.40 | 0.5173 | 12.1048 | 53.8048 | 2.4940 |
| 6 | 37.90 | 0.0638 | 41.5825 | 18.06 | 1.0972 | 19.7496 | 57.6496 | 1.3684 |
| 7 | 34.80 | 0.0705 | 45.9493 | 22.32 | 1.3204 | 29.4449 | 64.2449 | 1.3982 |
| 8 | 39.74 | 0.0602 | 39.2361 | 26.36 | 0.9883 | 26.0911 | 65.7911 | 1.6768 |
| 9 | 42.32 | 0.0698 | 45.4931 | 23.00 | 1.0755 | 24.7365 | 67.0365 | 1.4736 |
| 10 | 39.06 | 0.0604 | 39.3665 | 22.48 | 1.0068 | 22.6530 | 61.7530 | 1.5687 |
| 11 | 37.70 | 0.0856 | 55.7909 | 28.18 | 1.4799 | 41.7332 | 79.4332 | 1.4238 |
| 12 | 36.28 | 0.0700 | 45.6234 | 26.50 | 1.2568 | 33.3052 | 69.6052 | 1.5256 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.2755$ $\bar{x} = 1.6322$ |
|---------|---------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | 44.20 | 0.0679 | 44.2547 | 28.50 | 1.0012 | 28.5342 | 72.7342 | 1.6435 |
| 14 | 42.10 | 0.0527 | 34.3479 | 27.00 | 0.8159 | 22.0293 | 64.1293 | 1.8671 |
| 15 | 33.90 | 0.0471 | 30.6980 | 28.80 | 0.9055 | 26.0784 | 59.9784 | 1.9538 |
| 16 | 44.10 | 0.0685 | 44.6458 | 26.80 | 1.0124 | 27.1323 | 71.2323 | 1.5955 |
| 17 | 39.60 | 0.0364 | 23.7242 | 24.40 | 0.5991 | 14.6180 | 54.2180 | 2.2853 |
| 18 | 42.80 | 0.0739 | 48.1653 | 24.40 | 1.1254 | 24.7598 | 67.5598 | 1.4027 |
| 19 | 42.00 | 0.0702 | 45.7538 | 27.00 | 1.0894 | 29.4138 | 71.4138 | 1.5608 |
| 20 | 39.90 | 0.0519 | 33.8265 | 26.60 | 0.8478 | 22.5515 | 62.4515 | 1.8462 |
| 21 | 32.50 | 0.0742 | 48.3608 | 21.30 | 1.4880 | 31.6944 | 64.1944 | 1.3274 |
| 22 | 31.10 | 0.0513 | 33.4354 | 22.40 | 1.0751 | 24.0822 | 55.1822 | 1.6504 |
| 23 | 28.20 | 0.0573 | 37.3460 | 22.00 | 1.3243 | 29.1346 | 57.3346 | 1.5352 |
| 24 | 28.70 | 0.0651 | 42.4298 | 24.10 | 1.4784 | 35.6294 | 64.3294 | 1.5161 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | น้ำหนักเปลือก, g | ปริมาตร เปลือก, mm ³ | เส้นรอบวงของ พื้นที่ด้านหน้า และหลัง, mm ² | ความหนา เปลือก, mm | พื้นที่ด้านข้าง, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งชั้น, mm ² | พื้นที่รวมต่อ หนึ่งหน่วย ปริมาตร, mm ² $\sigma_{n-1} = 0.2755$ $\bar{x} = 1.6322$ |
|---------|---------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25 | 43.40 | 0.0580 | 37.8023 | 24.90 | 0.8710 | 21.6979 | 65.0979 | 1.7221 |
| 26 | 40.60 | 0.0502 | 32.7185 | 24.60 | 0.8059 | 19.8251 | 60.4251 | 1.8468 |
| 27 | 45.90 | 0.0870 | 56.7034 | 27.30 | 1.2354 | 33.7264 | 79.6264 | 1.4043 |
| 28 | 33.80 | 0.0679 | 44.2547 | 26.90 | 1.3093 | 35.2202 | 69.0202 | 1.5596 |
| 29 | 30.30 | 0.1090 | 71.0422 | 24.70 | 2.3446 | 57.9116 | 88.2116 | 1.2417 |
| 30 | 37.70 | 0.0845 | 55.0740 | 28.50 | 1.4608 | 41.6328 | 79.3328 | 1.4405 |

การคำนวณหาพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร(α)ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ $1.5343 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$

1. ปริมาตรตัวอย่าง = น้ำหนักตัวอย่าง / ความหนาแน่นของตัวอย่าง
2. ความหนาของตัวอย่าง = ปริมาตรตัวอย่าง / พื้นที่ด้านบนหรือล่าง
3. พื้นที่ด้านข้างของตัวอย่าง = ความหนาของตัวอย่าง \times เส้นรอบรูป
4. พื้นที่รวม = พื้นที่ด้านข้าง + พื้นที่ด้านบนหรือล่าง $\times 2$
5. $\alpha =$ พื้นที่รวม / ปริมาตรตัวอย่าง

ตารางผนวก 7 การหาความพรุนระหว่างอนุภาคเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเบตนิง(interparticle porosity, ϵ)

ความหนาแน่นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 1.5343 g/cm³

| ขนาดเปลือก เมล็ด มะม่วงหิมพานต์, mm | ปริมาตร เบตนิง, cm ³ | น้ำหนักเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ใน เบตนิง, g | | ปริมาตรเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์, cm ³ | | ปริมาตรว่างในเบตนิงที่ มีเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์, cm ³ | | ความพรุนระหว่างอนุภาค cm ³ /cm ³ | | |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------|------------|--------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | เฉลี่ย |
| 2 | 113.3661 | 51.169 | 50.343 | 33.3501 | 32.1171 | 80.0160 | 81.2490 | 0.0758 | 0.7167 | 0.7113 |
| 5 | 113.3661 | 45.651 | 44.611 | 29.7536 | 29.0758 | 83.6125 | 84.5852 | 0.7375 | 0.7461 | 0.7418 |
| 9 | 113.3661 | 42.596 | 43.118 | 27.7625 | 28.1027 | 85.6036 | 85.2634 | 0.7551 | 0.7521 | 0.7536 |

การคำนวณ

ความพรุนระหว่างอนุภาค(interparticle porosity)= ปริมาตรว่างในเบตนิงที่มีเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์/ปริมาตรเบตนิง

ตารางผนวก 8 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหารัศมีสมมูล ของทรงกระบอก (half of equivalent diameter for cylinder, a_c) และ ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นแบน (half of thickness for slab, a_s) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้าหรือหลัง, mm ² | ความหนาเปลือก, mm | รัศมีสมมูล ของทรง กระบอก, a_c (mm) | ครึ่งหนึ่งของความหนาของ แผ่นแบน, a_s (mm) |
|---------|---------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1 | 10.20 | 0.2300 | 1.8019 | 0.1150 |
| 2 | 4.30 | 0.2425 | 1.1699 | 0.1213 |
| 3 | 2.50 | 0.3911 | 0.8921 | 0.1956 |
| 4 | 4.00 | 0.2118 | 1.1284 | 0.1059 |
| 5 | 4.00 | 0.3014 | 1.1284 | 0.1507 |
| 6 | 11.25 | 0.2868 | 1.8923 | 0.1434 |
| 7 | 4.68 | 0.2646 | 1.2205 | 0.1323 |
| 8 | 4.42 | 0.1843 | 1.1861 | 0.0922 |
| 9 | 4.20 | 0.4345 | 1.1562 | 0.2173 |
| 10 | 11.70 | 0.2535 | 1.9298 | 0.1268 |
| 11 | 2.40 | 0.4753 | 0.8740 | 0.2377 |
| 12 | 5.60 | 0.2153 | 1.3351 | 0.1077 |
| 13 | 5.60 | 0.3026 | 1.3351 | 0.1513 |
| 14 | 5.20 | 0.3572 | 1.2866 | 0.1786 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้าหรือหลัง, mm ² | ความหนาเปลือก, mm | รัศมีสมมูล: ของทรง กระบอก, a_c (mm) | ครึ่งหนึ่งของความหนาของ แผ่นแบน, a_s (mm) |
|---------|---------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 15 | 3.00 | 0.3585 | 0.9772 | 0.1793 |
| 16 | 2.70 | 0.3138 | 0.9271 | 0.1569 |
| 17 | 3.64 | 0.5909 | 1.0764 | 0.2955 |
| 18 | 6.30 | 0.1914 | 1.4161 | 0.0957 |
| 19 | 4.40 | 0.2444 | 1.1835 | 0.1222 |
| 20 | 3.90 | 0.2925 | 1.1142 | 0.1463 |
| 21 | 7.60 | 0.2616 | 1.5554 | 0.1308 |
| 22 | 3.80 | 0.1887 | 1.0998 | 0.0944 |
| 23 | 4.50 | 0.2679 | 1.1968 | 0.1340 |
| 24 | 3.60 | 0.2535 | 1.0705 | 0.1268 |
| 25 | 4.20 | 0.2328 | 1.1563 | 0.1164 |
| 26 | 5.00 | 0.4367 | 1.2616 | 0.2184 |
| 27 | 4.50 | 0.3548 | 1.1968 | 0.1774 |
| 28 | 5.30 | 0.2890 | 1.2989 | 0.1445 |
| 29 | 2.60 | 0.2005 | 0.9097 | 0.1003 |
| 30 | 2.90 | 0.2922 | 0.9608 | 0.1461 |

ตารางผนวก 9 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาปริมาตรของทรงกระบอก (half of equivalent diameter for cylinder, a_c) และ ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นแบน (half of thickness for slab, a_s) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

| ลำดับ | พื้นที่ด้านหน้าหรือหลัง, mm ² | ความหนาเปลือก, mm | ปริมาตรของทรงกระบอก, a_c (mm) | ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นแบน, a_s (mm) |
|-------|------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|
| 1 | 18.80 | 0.3588 | 2.4463 | 0.1794 |
| 2 | 18.90 | 0.3483 | 2.4528 | 0.1742 |
| 3 | 15.30 | 0.6326 | 2.2068 | 0.3163 |
| 4 | 26.70 | 0.3564 | 2.9153 | 0.1782 |
| 5 | 28.20 | 0.4218 | 2.9961 | 0.2109 |
| 6 | 30.50 | 0.3654 | 3.1158 | 0.1827 |
| 7 | 29.70 | 0.6430 | 3.0747 | 0.3215 |
| 8 | 20.10 | 0.4686 | 2.5294 | 0.2343 |
| 9 | 15.60 | 0.4784 | 2.2284 | 0.2392 |
| 10 | 20.20 | 0.3936 | 2.5357 | 0.1968 |
| 11 | 14.10 | 0.4857 | 2.1409 | 0.2429 |
| 12 | 16.90 | 0.4069 | 2.3194 | 0.2035 |
| 13 | 20.20 | 0.6243 | 2.5357 | 0.3122 |
| 14 | 16.20 | 0.7590 | 2.2708 | 0.3795 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้าหรือหลัง, mm ² | ความหนาเปลือก, mm | รัศมีสมมูล ของทรง กระบอก, a_c (mm) | ครึ่งหนึ่งของความหนาของ แผ่นแบน, a_s (mm) |
|---------|------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|
| 15 | 19.10 | 0.4300 | 2.4657 | 0.2150 |
| 16 | 17.00 | 0.5252 | 2.3262 | 0.2626 |
| 17 | 20.20 | 0.4658 | 2.5977 | 0.2329 |
| 18 | 26.20 | 0.2998 | 2.8879 | 0.1499 |
| 19 | 21.30 | 0.2479 | 2.6038 | 0.1240 |
| 20 | 13.60 | 0.6901 | 2.0806 | 0.3451 |
| 21 | 16.80 | 0.3783 | 2.3125 | 0.1892 |
| 22 | 20.10 | 0.3162 | 2.5294 | 0.1581 |
| 23 | 25.70 | 0.3436 | 2.8602 | 0.1718 |
| 24 | 25.00 | 0.3611 | 2.8209 | 0.1806 |
| 25 | 26.90 | 0.3150 | 2.9262 | 0.1575 |
| 26 | 18.30 | 0.2869 | 2.4135 | 0.1435 |
| 27 | 23.50 | 0.4216 | 2.7350 | 0.2108 |
| 28 | 24.00 | 0.2363 | 2.7640 | 0.1182 |
| 29 | 19.10 | 0.3054 | 2.4657 | 0.1527 |
| 30 | 25.10 | 0.3760 | 2.8266 | 0.1880 |

ตารางผนวก 10 ข้อมูลและค่าคำนวณในการหาปริมาณของทรงกระบอก (half of equivalent diameter for cylinder, a_c) และ ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นแบน (half of thickness for slab, a_s) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

| ชนิด | พื้นที่ด้านหน้าหรือหลัง, mm ² | ความหนาเปลือก, mm | รัศมีสมมูล ของทรงกระบอก, a_c (mm) | ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นแบน, a_s (mm) |
|------|------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1 | 30.05 | 0.7732 | 3.0928 | 0.3866 |
| 2 | 23.80 | 1.3200 | 2.7524 | 0.6600 |
| 3 | 13.70 | 1.0133 | 2.0883 | 0.5067 |
| 4 | 22.60 | 1.0050 | 2.6821 | 0.5025 |
| 5 | 20.85 | 0.5173 | 2.5762 | 0.2587 |
| 6 | 18.95 | 1.0972 | 2.4560 | 0.5486 |
| 7 | 17.40 | 1.3204 | 2.3534 | 0.6602 |
| 8 | 19.85 | 0.9883 | 2.5137 | 0.4942 |
| 9 | 21.15 | 1.0755 | 2.5947 | 0.5378 |
| 10 | 19.55 | 1.0068 | 2.4946 | 0.5034 |
| 11 | 18.85 | 1.4799 | 2.4495 | 0.7400 |
| 12 | 18.15 | 1.2568 | 2.4036 | 0.6284 |
| 13 | 22.10 | 1.0012 | 2.6523 | 0.5006 |
| 14 | 21.05 | 0.8159 | 2.5885 | 0.4080 |

| ชั้นที่ | พื้นที่ด้านหน้าหรือหลัง, mm ² | ความหนาเปลือก, mm | รัศมีสมมูล ของทรง กระบอก, a_c (mm) | ครึ่งหนึ่งของความหนาของ แผ่นแบน, a_s (mm) |
|---------|------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|
| 15 | 16.95 | 0.9055 | 2.3228 | 0.4528 |
| 16 | 22.05 | 1.0124 | 2.6493 | 0.5062 |
| 17 | 19.80 | 0.5991 | 2.5105 | 0.2996 |
| 18 | 21.40 | 1.1254 | 2.6099 | 0.5627 |
| 19 | 21.00 | 1.0894 | 2.5854 | 0.5447 |
| 20 | 19.95 | 0.8478 | 2.5200 | 0.4239 |
| 21 | 16.25 | 1.4880 | 2.2743 | 0.7440 |
| 22 | 15.55 | 1.0751 | 2.2248 | 0.5376 |
| 23 | 14.10 | 1.3243 | 2.1185 | 0.6622 |
| 24 | 14.35 | 1.4784 | 2.1372 | 0.7392 |
| 25 | 21.70 | 0.8710 | 2.6282 | 0.4355 |
| 26 | 20.30 | 0.8059 | 2.5420 | 0.4030 |
| 27 | 22.95 | 1.2354 | 2.7028 | 0.6177 |
| 28 | 16.90 | 1.3093 | 2.3194 | 0.6547 |
| 29 | 15.15 | 2.3446 | 2.1960 | 1.1723 |
| 30 | 18.85 | 1.4608 | 2.4495 | 0.7304 |

ตัวอย่างการคำนวณ

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

การคำนวณหารัศมีสมมูล (half of equivalent diameter)

ตัวอย่างชั้นที่ 1 มีพื้นที่ด้านหน้าหรือหลัง = 10.20 mm²

$$\text{กำหนดพื้นที่วงกลม } \pi r^2 = 10.20 \text{ mm}^2$$

$\therefore r$

$$\therefore r = 1.8019 \text{ mm} = \text{half of equivalent diameter}$$

$$2r = 3.6038 \text{ mm} = \text{equivalent diameter}$$

การคำนวณหาครึ่งหนึ่งของความหนาสมมูล (half of thickness)

ตัวอย่างชั้นที่ 1 มีความหนา = 0.2300 mm

$$\text{ดังนั้น ครึ่งหนึ่งของความหนา} = 0.1150 \text{ mm}$$

สำหรับตัวอย่างอื่นๆก็คำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

การทดลองหา $(y/x)^*$

สภาวะ - เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm 50 g ต่อเฮกเซน 150 cm³

- อุณหภูมิห้อง (27 °C) ($\rho_{CNSL} = 0.9725 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{HEXANE} = 0.6656 \text{ g/cm}^3$)

ตารางผนวก 11 ผลการทดลองการหา $(y/x)^*$ สำหรับตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

| ครั้งที่ | จำนวนตัวอย่าง, g | ปริมาตรเอ็กแทรก, cm ³ | น้ำหนักเอ็กแทรก, g | น้ำหนัก CNSL ในเอ็กแทรก, g | น้ำหนักของแข็งหลังรินสารละลายออก (drained solid), g | น้ำหนักของแข็งหลังรินสารละลายออกแล้วระเหยเฮกเซน, g |
|----------|------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 50.0024 | 149.9 | 104.5537 | 15.1474 | 43.2582 | 34.8550 |
| 2 | 50.1026 | 148.8 | 103.8111 | 15.1146 | 43.8516 | 34.9880 |
| 3 | 50.4535 | 149.5 | 104.3117 | 15.2244 | 43.9646 | 35.2287 |

ตารางผนวก 12 ผลการคำนวณหา $(y/x)^*$ สำหรับตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

| ครั้งที่ | จำนวนตัวอย่าง, g | จำนวนCNSLในตัวอย่าง, g | y_0 , g/cm ³ | x_0 , g/cm ³ | ปริมาตรเอ็กแทรกหลังสกัด 24 hour, cm ³ | น้ำหนักเอ็กแทรกหลังสกัด 24 hour, g | น้ำหนักCNSLในเอ็กแทรกหลังระเหยเฮกเซน, g | y_{out} , g/cm ³ |
|----------|------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 50.0024 | 16.6033 | 0 | 0.9725 | 149.9 | 104.5537 | 15.1474 | 0.1011 |
| 2 | 50.1026 | 16.6366 | 0 | 0.9725 | 148.8 | 103.8111 | 15.1146 | 0.1016 |
| 3 | 50.4535 | 16.7530 | 0 | 0.9725 | 149.5 | 104.3117 | 15.2244 | 0.1018 |

x_0 : ความเข้มข้นของCNSLในของแข็งเมื่อเริ่มต้น, g/cm³

y_0 : ความเข้มข้นของCNSLในเอ็กแทรกเมื่อเริ่มต้น, g/cm³

x_{out} : ความเข้มข้นของCNSLในของแข็งที่จุดสมดุล, g/cm³

y_{out} : ความเข้มข้นของCNSLในเอ็กแทรกที่จุดสมดุล, g/cm³

$$\rho_{CNSL} = 0.9725 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{HEXANE} = 0.6656 \text{ g/cm}^3$$

| น้ำหนักของ แข็งที่รินสาร ละลายออก (drained solid), g | น้ำหนักCNSL กับเฮกเซนใน ของแข็งที่ริน สารละลาย ออก, g | น้ำหนักของ แข็งเฉื่อย(inert solid)ในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g | น้ำหนักCNSL กับของแข็ง เฉื่อยในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก แล้วระเหยเฮก เซน, g | น้ำหนักCNSL ในของแข็งที่ รินสารละลาย ออก, g | น้ำหนัก เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g | ปริมาตร CNSLในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, cm ³ | ปริมาตร เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, cm ³ | ปริมาตรรวม ของCNSLกับ เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 43.2852 | 9.8861 | 33.3991 | 34.8550 | 1.4559 | 8.4302 | 1.4971 | 12.6656 | 14.1627 |
| 43.8516 | 10.3856 | 33.4660 | 34.9880 | 1.5220 | 8.8636 | 1.5650 | 13.3167 | 14.8817 |
| 43.9646 | 10.2645 | 33.7001 | 35.2287 | 1.5286 | 8.7359 | 1.5718 | 13.1248 | 14.6966 |

| x_{out} , g/cm ³ | น้ำหนัก เอ็กแทรกจาก การทำดูลมวล สาร, g | น้ำหนักที่หาย ไปจากการทำ ดูลมวลสาร (คือน้ำหนัก เฮกเซน), g | น้ำหนัก เฮกเซนใน เอ็กแทรกจาก การทำดูลมวล สาร, g | ปริมาณ เฮกเซนใน เอ็กแทรกเมื่อ ใช้ ผลจากการ คำนวณดูล มวล สาร, cm ³ | ปริมาณCNLSL ในเอ็กแทรก, cm ³ | ปริมาณของ เอ็กแทรกจาก การดูลมวล สาร, cm ³ | ปริมาณที่หาย ไป(คือ ปริมาณเฮก เซน)จาก การทำดูลมวล สาร, cm ³ | $(y/x)^*$ หรือ m |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 0.1028 | 106.5571 | 2.0035 | 91.4098 | 137.3344 | 15.5757 | 152.9101 | 3.0101 | 0.9835 |
| 0.1023 | 106.0910 | 2.2799 | 90.9764 | 136.6833 | 15.5420 | 152.2253 | 3.4253 | 0.9935 |
| 0.1040 | 106.3285 | 2.0168 | 91.1041 | 136.8752 | 15.6549 | 152.5301 | 3.0301 | 0.9788 |

เฉลี่ย 0.9852.....

การทดลองหา $(y/x)^*$

สภาวะ - เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm 50 g ต่อเฮกเซน 150 cm³

- อุณหภูมิห้อง (27 °C) ($\rho_{CNSL} = 0.9725 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{HEXANE} = 0.6656 \text{ g/cm}^3$)

ตาราง ผง 13 ผลการทดลองการหา $(y/x)^*$ สำหรับตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

| ครั้งที่ | จำนวนตัวอย่าง, g | ปริมาตรเอ็กแทรก, cm ³ | น้ำหนักเอ็กแทรก, g | น้ำหนัก CNSL ในเอ็กแทรก, g | น้ำหนักของแข็งหลังรินสารละลายออก (drained solid), g | น้ำหนักของแข็งหลังรินสารละลายออกแล้วระเหยเฮกเซน, g |
|----------|------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 50.2536 | 149.8 | 104.5807 | 15.2161 | 43.4998 | 35.0195 |
| 2 | 50.4901 | 149.0 | 103.9805 | 15.2295 | 44.0760 | 35.2606 |
| 3 | 50.2001 | 149.8 | 104.5022 | 15.1955 | 48.4266 | 35.0046 |

ตารางผนวก 14 ผลการคำนวณหา $(y/x)^*$ สำหรับตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

| ครั้งที่ | จำนวนตัวอย่าง, g | จำนวนCNSLในตัวอย่าง, g | $y_0, \text{g/cm}^3$ | $x_0, \text{g/cm}^3$ | ปริมาตรเอ็กแทรกต์หลังสกัด 24 hour, cm^3 | น้ำหนักเอ็กแทรกต์หลังสกัด 24 hour, g | น้ำหนักCNSLในเอ็กแทรกต์หลังระเหยเฮกเซน, g | $y_{out}, \text{g/cm}^3$ |
|----------|------------------|------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 50.2536 | 16.6807 | 0 | 0.9725 | 149.8 | 104.5807 | 15.2161 | 0.1016 |
| 2 | 50.4901 | 16.7652 | 0 | 0.9725 | 149.0 | 103.9805 | 15.2295 | 0.1022 |
| 3 | 50.2001 | 16.6689 | 0 | 0.9725 | 149.8 | 104.5022 | 15.1955 | 0.1014 |

x_0 : ความเข้มข้นของCNSLในของแข็งเมื่อเริ่มต้น, g/cm^3

y_0 : ความเข้มข้นของCNSLในเอ็กแทรกต์เมื่อเริ่มต้น, g/cm^3

x_{out} : ความเข้มข้นของCNSLในของแข็งที่จุดสมดุล, g/cm^3

y_{out} : ความเข้มข้นของCNSLในเอ็กแทรกต์ที่จุดสมดุล, g/cm^3

$$\rho_{\text{CNSL}} = 0.9725 \text{g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{HEXANE}} = 0.6656 \text{g/cm}^3$$

| น้ำหนักของ แข็งที่รินสาร ละลายออก (drained solid), g | น้ำหนักCNSL กับเฮกเซนใน ของแข็งที่ริน สารละลาย ออก, g | น้ำหนักของ แข็งเฉื่อย(inert solid) ในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g | น้ำหนักCNSL กับของแข็ง เฉื่อยในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก แล้วระเหย เฮกเซน, g | น้ำหนักCNSL ในของแข็งที่ รินสารละลาย ออก, g | น้ำหนัก เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g | ปริมาตร CNSLในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, 3 cm | ปริมาตร เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, 3 cm | ปริมาตรรวม ของCNSLกับ เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 43.4998 | 9.4949 | 33.5549 | 35.0195 | 1.4646 | 8.4303 | 1.5060 | 12.7408 | 14.2468 |
| 44.0760 | 10.3511 | 33.7249 | 35.2606 | 1.5357 | 8.8154 | 1.5791 | 13.2443 | 14.8234 |
| 43.4266 | 8.4220 | 33.5312 | 35.0046 | 1.4734 | 8.4220 | 1.5151 | 12.6532 | 14.1683 |

| $x_{out}, g/cm^3$ | น้ำหนัก เอ็กแทร์กจาก การทำดูลมวล สาร, g | น้ำหนักที่หาย ไปจากการทำ ดูลมวลสาร (คือน้ำหนัก เฮกเซน), g | น้ำหนัก เฮกเซนใน เอ็กแทร์กจาก การทำดูลมวล สาร, g | ปริมาตร เฮกเซนใน เอ็กแทร์กเมื่อ ใช้ผลจากการ คำนวณดูล มวลสาร, cm^3 | ปริมาตรCNSL ในเอ็กแทร์ก, cm^3 | ปริมาตรของ เอ็กแทร์กจาก การทำดูลมวล สาร, cm^3 | ปริมาตรที่หาย ไป(คือปริ- มาตรเฮกเซน) จากการทำดูล มวลสาร, cm^3 | $(y/x)^*$ หรือ m |
|-------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 0.1028 | 106.5758 | 2.0671 | 91.3597 | 137.2592 | 15.6464 | 152.9056 | 3.1056 | 0.9883 |
| 0.1036 | 106.2541 | 2.2736 | 91.0246 | 136.7557 | 15.6601 | 152.4158 | 3.4158 | 0.9865 |
| 0.1040 | 106.6135 | 2.1113 | 91.4180 | 137.3468 | 15.1955 | 152.9720 | 3.1720 | 0.9750 |

เฉลี่ย 0.9833.....

การทดลองหา $(y/x)^*$

สภาวะ -เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm 50 g ต่อเฮกเซน 150 cm³

-อุณหภูมิห้อง (27 °C) ($\rho_{CNSL} = 0.9725 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{HEXANE} = 0.6656 \text{ g/cm}^3$)

ตารางผนวก 15 ผลการทดลองการหา $(y/x)^*$ สำหรับตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

| ครั้งที่ | จำนวนตัวอย่าง, g | ปริมาตรเอ็กแทรก, cm ³ | น้ำหนักเอ็กแทรก, g | น้ำหนัก CNSL ในเอ็กแทรก, g | น้ำหนักของแข็งหลังรีนสารละลายออก (drained solid), g | น้ำหนักของแข็งหลังรีนสารละลายออกแล้วระเหยเฮกเซน, g |
|----------|------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 50.4371 | 149.8 | 104.5029 | 15.1978 | 44.1935 | 35.2393 |
| 2 | 50.4888 | 149.3 | 104.1907 | 15.2627 | 43.9519 | 35.2261 |
| 3 | 50.3200 | 149.0 | 103.9455 | 15.1185 | 44.3699 | 35.2015 |

ตารางผนวก 16 ผลการคำนวณหา $(y/x)^*$ สำหรับตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

| ครั้งที่ | จำนวน ตัวอย่าง, g | จำนวนCNSL ในตัวอย่าง, g | $y_0, \text{g/cm}^3$ | $x_0, \text{g/cm}^3$ | ปริมาตร เอ็กแทรกหลัง สกัด 24 hour, cm^3 | น้ำหนัก เอ็กแทรกหลัง สกัด 24 hour, g | น้ำหนักCNSL ในเอ็กแทรก หลังระเหย เฮกเซน, g | $y_{out}, \text{g/cm}^3$ |
|----------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 50.4371 | 16.7476 | 0 | 0.9725 | 149.8 | 104.5029 | 15.1978 | 0.1015 |
| 2 | 50.4888 | 16.7648 | 0 | 0.9725 | 149.3 | 104.1907 | 15.2627 | 0.1022 |
| 3 | 50.3200 | 16.7088 | 0 | 0.9725 | 149.0 | 103.9455 | 15.1185 | 0.1015 |

x_0 : ความเข้มข้นของCNSLในของแข็งเมื่อเริ่มต้น, g/cm^3

y_0 : ความเข้มข้นของCNSLในเอ็กแทรกเมื่อเริ่มต้น, g/cm^3

x_{out} : ความเข้มข้นของCNSLในของแข็งที่จุดสมดุล, g/cm^3

y_{out} : ความเข้มข้นของCNSLในเอ็กแทรกที่จุดสมดุล, g/cm^3

$$\rho_{CNSL} = 0.9725 \text{g/cm}^3$$

$$\rho_{HEXANE} = 0.6656 \text{g/cm}^3$$

| น้ำหนักของ แข็งที่รินสาร ละลายออก (drained solid), g | น้ำหนักCNSL กับเฮกเซนใน ของแข็งที่ริน สารละลาย ออก, g | น้ำหนักของ แข็งเฉื่อย(inert solid)ในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g | น้ำหนักCNSL กับของแข็ง เฉื่อยในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก แล้วระเหยเฮก เซน, g | น้ำหนักCNSL ในของแข็งที่ รินสารละลาย ออก, g | น้ำหนัก เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g | ปริมาตร CNSLในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, 3 cm | ปริมาตร เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, 3 cm | ปริมาตรรวม ของCNSLกับ เฮกเซนในของ แข็งที่รินสาร ละลายออก, g |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 44.1935 | 10.5040 | 33.6895 | 35.2393 | 1.5498 | 8.9542 | 1.5936 | 13.4528 | 15.0464 |
| 43.9519 | 10.2279 | 33.7240 | 35.2261 | 1.5021 | 8.7258 | 1.5446 | 13.1097 | 14.6543 |
| 44.3699 | 10.7587 | 33.6112 | 35.2015 | 1.5930 | 9.1684 | 1.6352 | 13.7747 | 15.4099 |

| $x_{out}, g/cm^3$ | น้ำหนัก เอ็กแทรกจาก การทำดูลมวล สาร, g | น้ำหนักที่หาย ไปจากการทำ ดูลมวลสาร (คือน้ำหนัก เฮกเซน), g | น้ำหนัก เฮกเซนใน เอ็กแทรกจาก การทำดูลมวล สาร, g | ปริมาตร เฮกเซนใน เอ็กแทรกเมื่อ ใช้ผลจากการ คำนวณดูล มวลสาร, cm^3 | ปริมาตรCNSL ในเอ็กแทรก, cm^3 | ปริมาตรของ เอ็กแทรกจาก การดูลมวล สาร, cm^3 | ปริมาตรที่หาย ไป(คือปริ มาตรเฮกเซน) จากการทำดูล มวลสาร, cm^3 | $(v/x)^*$ หรือ m |
|-------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 0.1030 | 106.0836 | 1.5807 | 90.8858 | 136.5472 | 15.6276 | 152.1748 | 2.3748 | 0.9854 |
| 0.1025 | 106.3769 | 2.1862 | 91.1142 | 136.8903 | 15.6943 | 152.5846 | 3.2846 | 0.9971 |
| 0.1032 | 105.7901 | 1.8446 | 90.6716 | 136.2254 | 15.5460 | 151.7714 | 2.7714 | 0.9835 |

เฉลี่ย 0.9887.....

การคำนวณค่า $(y/x)^*$

ตัวอย่างการคำนวณค่า $(y/x)^*$ สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

-ข้อมูลจากการทดลองมีดังนี้

จำนวนตัวอย่าง 50.0024 g

ปริมาตรเฮกเซน 150.0 cm³

ปริมาตรเอ็กแทรก 149.9 cm³

น้ำหนักเอ็กแทรก 104.5537 g

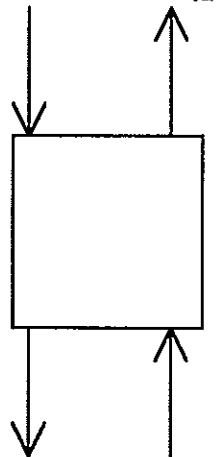
น้ำหนักCNSLในเอ็กแทรกหลังระเหยเฮกเซน 15.1474 g

น้ำหนักของแข็งหลังจากรินสารละลายออก(drained solid) 43.2852 g

น้ำหนักของแข็งหลังรินสารละลายออกแล้วระเหยเฮกเซน 34.8550 g

hexane 150 cm³

$y_0 = 0 \text{ g/cm}^3$



y_{out}

$x_0 = 0.9725 \text{ g/cm}^3$

รูปผนวก 1 การดูดมวลสารในการสกัดCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้เฮกเซน

พิจารณาการคำนวณดังนี้

x_0 : ความเข้มข้นของCNSLในตัวอย่างของแข็งเมื่อเริ่มต้น, g/cm³

x_{out} : ความเข้มข้นของCNSLในตัวอย่างของแข็งที่จุดสมดุล, g/cm³

y_0 : ความเข้มข้นของCNSLในเอ็กแทรกเมื่อเริ่มต้น, g/cm³

y_{out} : ความเข้มข้นของCNSLในเอ็กแทรกที่จุดสมดุล, g/cm³

ρ_{CNSL} : ความหนาแน่นของCNSLที่อุณหภูมิห้อง = 0.9725 g/cm³

ρ_{HEXANE} : ความหนาแน่นของเฮกเซนที่อุณหภูมิห้อง = 0.6656 g/cm³

ปริมาณ CNSL ในตัวอย่างเมื่อเริ่มต้น = 33.205 %w/w

$$\therefore \text{ปริมาณ CNSL ในตัวอย่างเมื่อเริ่มต้น} = (33.205/100) \times 50.0024 \text{ g} \\ = 16.6033 \text{ g}$$

ปริมาตร CNSL ในตัวอย่างเมื่อเริ่มต้น = $16.6033/0.9725 = 17.0728 \text{ ml}$

$$\therefore x_0 = 16.6033/17.0728 = 0.9725 \text{ g/ml}$$

$$\therefore y_0 = 0 \text{ g/ml} \text{ เนื่องจากตัวทำละลายเริ่มต้นไม่มี CNSL}$$

ปริมาตรตัวทำละลายเริ่มต้น = ปริมาตรเฮกเซน
= 150.0 cm^3

$$\therefore \text{ปริมาณตัวทำละลายเมื่อเริ่มต้น} = 150.0 \times 0.6656 = 99.84 \text{ g}$$

จากข้อมูลการทดลอง $\therefore y_{out} = 15.1474/149.9 = 0.1011 \text{ g/ml}$

เนื่องจาก น้ำหนักของแข็งที่รินสารละลายออก (drained solid) = 43.2852 g

น้ำหนักของแข็งที่รินสารละลายออกแล้วระเหยเฮกเซน = 34.8550 g

$$\therefore \text{ปริมาณเฮกเซนที่ค้างอยู่ในของแข็งที่รินสารละลายออก} = 8.4302 \text{ g}$$

$$\text{นั่นคือ ปริมาตรเฮกเซนที่ค้างอยู่ในของแข็งที่รินสารละลายออก} = 8.4302/0.6656 \\ = 12.6656 \text{ cm}^3$$

$$\therefore \text{น้ำหนักของแข็งเฉื่อย (inert solid) ในของแข็งที่รินสารละลายออก} = (1 - 0.33205) \times 50.0024 \\ = 33.3991 \text{ g}$$

ดังนั้น ปริมาณ CNSL ในของแข็งที่รินสารละลายออก = $34.8550 - 33.3991 = 1.4559 \text{ g}$

$$\therefore \text{ปริมาตร CNSL ในของแข็งที่รินสารละลายออก} = 1.4559/0.9725 = 1.4971 \text{ cm}^3$$

$$x_{out} = 1.4559/(1.4971 + 12.6656) = 0.1028 \text{ g/cm}^3$$

-จากสมการดุลมวลสารรวม

มวลที่เข้าสู่ระบบ (mass in) = มวลที่ออกจากระบบ (mass out)

"มวลเอ็กแทรกเริ่มต้น + มวลตัวอย่างเริ่มต้นไม่คิดรวมของแข็งเฉื่อย =

มวลเอ็กแทรกที่จุดสมดุล + มวลตัวอย่างที่จุดสมดุลไม่คิดรวมของแข็งเฉื่อย"

$$99.84 + 16.6033 = \text{มวลเอ็กแทรกที่จุดสมดุล} + (1.4559 + 8.4302)$$

$$\therefore \text{มวลเอ็กแทรกที่จุดสมดุล} = 106.5572 \text{ g}$$

เนื่องจาก ปริมาณ CNSL ในเอ็กแทรกที่จุดสมดุล = 15.1474 g

$$\therefore \text{ปริมาตร CNSL ในเอ็กแทรกที่จุดสมดุล} = 15.1474/0.9725 = 15.5757 \text{ cm}^3$$

-จากสมการดุลมวลสารของเฮกเซน

มวลเฮกเซนที่เข้าสู่ระบบ = มวลเฮกเซนที่ออกจากระบบ

$$99.84+0 = 8.4302+\text{เฮกเซนในเอ็กเทร็ก}$$

$$\therefore \text{เฮกเซนในเอ็กเทร็กจากการดุลมวลสาร} = 91.4098 \text{ g}$$

$$\therefore \text{ปริมาตรเฮกเซนในเอ็กเทร็กจากการดุลมวลสาร} = 91.4098/0.6656 = 137.3344 \text{ cm}^3$$

$$\text{ปริมาตรเฮกเซนในเอ็กเทร็กจากการทดลอง} = 149.9-15.5757 = 134.3243 \text{ cm}^3$$

$$\therefore \text{ปริมาตรเฮกเซนที่หายไป} = 137.3344-134.3243 = 3.0101 \text{ cm}^3$$

หรืออาจจะคิดเป็นปริมาณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{มวลเอ็กเทร็กที่จุดสมดุลจากการดุลมวลสาร} &= \text{มวล CNSL} + \text{มวลเฮกเซน} \\ &= 106.5572 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{เนื่องจาก มวล CNSL} = 15.1474 \text{ g}$$

$$\therefore \text{มวลเฮกเซนจากการดุลมวลสาร} = 106.5572-15.1474 = 91.4098 \text{ g}$$

จากการทดลองพบว่า ปริมาตรเอ็กเทร็กที่จุดสมดุล = 149.9 cm³

$$\text{ปริมาตร CNSL ในเอ็กเทร็กที่จุดสมดุล} = 15.5757 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ปริมาตรเฮกเซนในเอ็กเทร็กที่จุดสมดุลจากการทดลอง} &= 149.9-15.5757 \\ &= 134.3243 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{มวลเฮกเซนในเอ็กเทร็กที่จุดสมดุลจากการทดลอง} &= 134.3243 \times 0.6656 \\ &= 89.4063 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{มวลเอ็กเทร็กที่จุดสมดุลจากการทดลอง} = 15.1474+89.4063 = 104.5537 \text{ g}$$

$$\therefore \text{มวลเฮกเซนที่หายไป} = 106.5572-104.5537 = 2.0035 \text{ g}$$

ดังนั้นจากการดุลมวลสารพบว่า มวลหายไป 3.0101 cm³ หรือ 2.0035 g

ซึ่งอาจจะเนื่องมาจาก

1. การระเหยของเฮกเซน
2. ความผิดพลาด(error)จากการวัดค่า
3. ความผิดพลาดระหว่างทำการทดลอง
4. ความผิดพลาดจากการทำเลข(คำนวณ)เช่น การปัดเศษ

จากการคำนวณพบว่า $m = (y/x)^* = (y_{out}/x_{out})^* = 0.1011/0.1028 = 0.9835$

ผลการคำนวณค่าต่างๆแสดงไว้ในตาราง ส่วนการทดลองครั้งอื่นๆก็คำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

-ข้อมูลการทดลอง ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่เวลาต่างๆจากการสกัดแบบเบบท์
 ตารางผนวก 17 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่เวลาต่างๆจากการสกัดแบบเบบท์สำหรับเปลือก
 เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

| เวลา(t), min | ความเข้มข้น CNSL(y), g/cm ³ ครั้งที่ 1 | ความเข้มข้น CNSL(y), g/cm ³ ครั้งที่ 2 | ค่าเฉลี่ยของ ความเข้มข้น CNSL, g/cm ³ | x_r , g/cm ³ |
|------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 0.0715 | 0.0723 | 0.0719 | 0.1785 |
| 2 | 0.0742 | 0.0744 | 0.0743 | 0.1675 |
| 3 | 0.0785 | 0.0787 | 0.0786 | 0.1477 |
| 4 | 0.0816 | 0.0816 | 0.0816 | 0.1339 |
| 5 | 0.0845 | 0.0851 | 0.0848 | 0.1191 |
| 8 | 0.0852 | 0.0864 | 0.0858 | 0.1145 |
| 10 | 0.0894 | 0.0904 | 0.0899 | 0.0957 |
| 13 | 0.0894 | 0.0898 | 0.0896 | 0.0970 |
| 15 | 0.0906 | 0.0906 | 0.0906 | 0.0924 |
| 18 | 0.0928 | 0.0922 | 0.0925 | 0.0837 |
| 20 | 0.0924 | 0.0918 | 0.0921 | 0.0855 |
| 25 | 0.0935 | 0.0931 | 0.0933 | 0.0800 |
| 30 | 0.0942 | 0.0940 | 0.0941 | 0.0763 |
| 40 | 0.0926 | 0.0928 | 0.0927 | 0.0828 |
| 50 | 0.0940 | 0.0940 | 0.0940 | 0.0768 |
| 60 | 0.0955 | 0.0947 | 0.0951 | 0.0717 |
| 120 | 0.0961 | 0.0967 | 0.0964 | 0.0657 |
| 180 | 0.0960 | 0.0968 | 0.0964 | 0.0657 |
| 24hour | 0.1025 | 0.1029 | 0.1027 | |

ตารางผนวก 18 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่เวลาต่างๆจากการสกัดแบบเบทซ์สำหรับเปลือก
เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

| เวลา(t), min | ความเข้มข้น CNSL(\mathcal{Y}), g/cm ³ ครั้งที่ 1 | ความเข้มข้น CNSL(\mathcal{Y}), g/cm ³ ครั้งที่ 2 | ค่าเฉลี่ยของ ความเข้มข้น CNSL, g/cm ³ | x_t , g/cm ³ |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 0.0714 | 0.0710 | 0.0712 | 0.1817 |
| 2 | 0.0749 | 0.0749 | 0.0749 | 0.1647 |
| 3 | 0.0780 | 0.0781 | 0.0779 | 0.1509 |
| 4 | 0.0809 | 0.0809 | 0.0809 | 0.1371 |
| 5 | 0.0843 | 0.0849 | 0.0846 | 0.1201 |
| 8 | 0.0845 | 0.0837 | 0.0841 | 0.1224 |
| 10 | 0.0882 | 0.0884 | 0.0883 | 0.1030 |
| 13 | 0.0885 | 0.0883 | 0.0884 | 0.1026 |
| 15 | 0.0891 | 0.0887 | 0.0889 | 0.1003 |
| 18 | 0.0896 | 0.0888 | 0.0892 | 0.0989 |
| 20 | 0.0899 | 0.0899 | 0.0899 | 0.0957 |
| 25 | 0.0906 | 0.0916 | 0.0911 | 0.0901 |
| 30 | 0.0901 | 0.0989 | 0.0900 | 0.0952 |
| 40 | 0.0943 | 0.0937 | 0.0940 | 0.0768 |
| 50 | 0.0925 | 0.0929 | 0.0927 | 0.0828 |
| 60 | 0.0952 | 0.0950 | 0.0951 | 0.0717 |
| 120 | 0.0942 | 0.0932 | 0.0937 | 0.0782 |
| 180 | 0.0943 | 0.0927 | 0.0935 | 0.0791 |
| 24hour | 0.1012 | 0.1008 | 0.1010 | |

ตารางผนวก 19 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่เวลาต่างๆจากการสกัดแบบเบทซ์สำหรับเปลือก

เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

| เวลา(t), min | ความเข้มข้น CNSL(Y), g/cm ³ ครั้งที่ 1 | ความเข้มข้น CNSL(Y), g/cm ³ ครั้งที่ 2 | ค่าเฉลี่ยของ ความเข้มข้น CNSL, g/cm ³ | x_t , g/cm ³ |
|------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 0.0697 | 0.0699 | 0.0698 | 0.1882 |
| 2 | 0.0688 | 0.0694 | 0.0691 | 0.1914 |
| 3 | 0.0709 | 0.0707 | 0.0708 | 0.1836 |
| 4 | 0.0725 | 0.0729 | 0.0727 | 0.1748 |
| 5 | 0.0745 | 0.0753 | 0.0749 | 0.1647 |
| 8 | 0.0776 | 0.0782 | 0.0779 | 0.1509 |
| 10 | 0.0798 | 0.0800 | 0.0799 | 0.1417 |
| 13 | 0.0812 | 0.0816 | 0.0814 | 0.1348 |
| 15 | 0.0831 | 0.0833 | 0.0832 | 0.1265 |
| 18 | 0.0838 | 0.0840 | 0.0842 | 0.1219 |
| 20 | 0.0844 | 0.0844 | 0.0844 | 0.1211 |
| 25 | 0.0860 | 0.0854 | 0.0857 | 0.1150 |
| 30 | 0.0861 | 0.0861 | 0.0861 | 0.1132 |
| 40 | 0.0868 | 0.0874 | 0.0871 | 0.1086 |
| 50 | 0.0889 | 0.0895 | 0.0892 | 0.0989 |
| 60 | 0.0865 | 0.0869 | 0.0867 | 0.1104 |
| 120 | 0.0907 | 0.0907 | 0.0907 | 0.0920 |
| 180 | 0.0911 | 0.0903 | 0.0907 | 0.0920 |
| 24hour | 0.1007 | 0.1003 | 0.1005 | |

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง(CNSL)ในเอ็กแทรก

(Diffusivity of solid(CNSL) in extract)

จากการคำนวณพบว่า

α : แฟคเตอร์การสกัด(stripping factor = mE'/R')

E' : มวลของเอ็กแทรก(extract mass), kg

R' : มวลของของแข็ง(solid mass), kg

m : สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุลของตัวละลาย

(solute equilibrium distribution coefficient, $(y/x)^*$)

จากการทดลอง $E' = 150.0 \text{ cm}^3$

$$\rho_{\text{hexane}} = 0.6656 \text{ g/cm}^3 \therefore E' = 99.84 \text{ g}$$

$$R' = 50.00 \text{ g}$$

$$m = 0.9857 \text{ (จากผลการทดลอง)}$$

$$\text{ดังนั้น } \alpha = \frac{mE'}{R'} = \frac{0.9857 \times 99.84}{50.00} = 1.9682$$

นั่นคือ α มีค่าจำกัด (α is finite)

คำนวณหา q_i, C_i สำหรับแผ่นแบนไม่จำกัดขนาด(Infinite Slab)เมื่อ α มีค่าจำกัด

$$q_{is} = \frac{-\tan q_{is}}{\alpha}; \alpha = 1.9682$$

$$\therefore q_{is} = 1.8381429 \dots \cong 1.8381$$

$$C_{is} = \frac{2\alpha(\alpha+1)}{(\alpha+1)+(\alpha q_i)^2} = \frac{2 \times 1.9682 \times (1.9682+1)}{(1.9682+1)+(1.9682 \times 1.8381)^2}$$

$$\therefore C_{is} = 0.7277$$

คำนวณหา q_i, C_i สำหรับทรงกระบอกไม่จำกัดขนาด(infinite Cylinder)เมื่อ α มีค่าจำกัด

$$q_{ic} = \frac{-2J_1(q_i)}{\alpha J_0(q_i)}; \alpha = 1.9682$$

$$\therefore q_{ic} = -1.0162 \frac{J_1(q_i)}{J_0(q_i)}$$

โดยที่ J_0 : ฟังก์ชันเบสเซลอันดับศูนย์(Bessel function of order zero)

J_1 : ฟังก์ชันเบสเซลอันดับหนึ่ง(Bessel function of order zero)

$$\therefore \text{จะได้ } q_{ic} = 2.7404$$

ตารางผนวก สัมประสิทธิ์และค่า Eigenvalue สำหรับสมการแก้ปัญหากฎข้อที่สองของฟิคส์
 จากการสกัดแบบแบทช์โดยที่ α มีค่าคงที่และ Bi มีค่าเป็นอนันต์
 (Coefficient and EigenValues for Fick's Second law Solutions for Batch
 Extractions in which α is constant and Bi is infinite)

| Solid Shape | α | Equation for q_i | C_i |
|-------------------|----------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Infinite Slab | Finite | $q_i = \frac{-\tan q_i}{\alpha}$ | $\frac{2\alpha(\alpha+1)}{(\alpha+1)+(\alpha q_i)^2}$ |
| | Infinite | $q_i = \frac{(2i-1)\pi}{2}$ | $\frac{2}{q_i^2}$ |
| Infinite Cylinder | Finite | $q_i = \frac{-2J_1(q_i)}{\alpha J_0(q_i)}$ | $\frac{4\alpha(\alpha+1)}{4(\alpha+1)+(\alpha q_i)^2}$ |
| | Infinite | $J_0(q_i)=0$ | $\frac{4}{q_i^2}$ |
| Sphere | Finite | $q_i = \frac{(3+\alpha q_i^2)\tan q_i}{3}$ | $\frac{6\alpha(\alpha+1)}{9(\alpha+1)+(\alpha q_i)^2}$ |
| | Infinite | $q_i = i\pi$ | $\frac{6}{q_i^2}$ |

The value of C_i and q_i listed in this table are taken from various parts of "Diffusion in solids" by J. Crank, Oxford University Press, London, 1970

ที่มา : Schwartzberg(1980)

$$C_{ic} = \frac{4\alpha(\alpha+1)}{4(\alpha+1)+(\alpha q_i)^2}$$

$$\therefore C_{ic} = \frac{4 \times 1.9682 \times (1.9682+1)}{4(1.9682+1)+(1.9682 \times 2.7404)^2} = 0.5704$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Y$ กับเวลา t (s) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดต่างๆ
 จะได้ดังสมการดังตารางผนวก 21

จากสมการ (37) จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

$$-\left[\frac{q_{is}^2}{\alpha_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{\alpha_c^2} \right] D_s = -0.1040 t^{-0.7724}$$

โดยที่

ตารางผนวก ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Y$ กับ t (s) ของการสกัด CNSL จากเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์, mm | ความสัมพันธ์ของ $\ln Y$ กับ t (s) | ความชัน(slope, $d \ln Y / dt$) |
|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|
| 2 | $\ln Y = -0.4569t^{0.2276}$ | $-0.1040t^{-0.7724}$ |
| 5 | $\ln Y = -0.5509t^{0.1959}$ | $-0.1079t^{-0.8041}$ |
| 9 | $\ln Y = -0.4821t^{0.1816}$ | $-0.0875t^{-0.8184}$ |

$$q_{is} = 1.8381, q_{ic} = 2.7404$$

$$a_s = 0.1487 \times 10^{-3} m, a_c = 1.2246 \times 10^{-3} m$$

$$\therefore D_s = 6.5904 \times 10^{-10} t^{-0.7724} m^2 / S$$

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 5 mm

$$-\left[\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2} \right] D_s = -0.1079 t^{-0.8041}$$

โดยที่

$$q_{is} = 1.8381, q_{ic} = 2.7404$$

$$a_s = 0.2126 \times 10^{-3} m, a_c = 2.5795 \times 10^{-3} m$$

$$\therefore D_s = 1.4220 \times 10^{-9} t^{-0.8041} m^2 / S$$

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 9 mm

$$-\left[\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2} \right] D_s = -0.0875 t^{-0.8184}$$

โดยที่

$$q_{is} = 1.8381, q_{ic} = 2.7404$$

$$a_s = 0.5607 \times 10^{-3} m, a_c = 2.4830 \times 10^{-3} m$$

$$\therefore D_s = 7.3131 \times 10^{-9} t^{-0.8184} m^2 / S$$

ดังนั้นจากการคำนวณจึงสรุปค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ CNSL ดังนี้

ตารางผนวก สัมประสิทธิ์การแพร่ของ CNSL สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดต่างๆ

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | สัมประสิทธิ์การแพร่ของ CNSL (Diffusivity, D_s), m ² /s |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 2 | $6.5904 \times 10^{-10} t^{-0.7724}$ |
| 5 | $1.4220 \times 10^{-9} t^{-0.8041}$ |
| 9 | $7.3131 \times 10^{-9} t^{-0.8184}$ |

จากการทดลอง(ตาราง 14 15 16) พบว่า ระยะเวลาต่างๆของการสกัด(t)กับความเข้มข้นของตัวละลาย CNSL ในวัฏภาคของแข็งที่คิดรวมวัสดุเฉื่อย (inert material, x_i) มีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

ตารางผนวก ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(t)กับความเข้มข้นของตัวละลาย CNSL ในเฟสของแข็งที่คิดรวมวัสดุเฉื่อย(x_i)

| ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, mm | ความสัมพันธ์ระหว่าง t (s) กับ x_i (g/cm ³) | สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (regression coefficient, r^2) |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 2 | $x_i = 0.5778 t^{-0.2706}$ | 0.979094103 |
| 5 | $x_i = 0.4448 t^{-0.2163}$ | 0.960328404 |
| 9 | $x_i = 0.4437 t^{-0.1806}$ | 0.940342464 |

โดยที่พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง t กับ x_i ตั้งแต่ $t=0$ s ถึง $t=1800$ s ที่ระยะเวลานานกว่านี้จะไม่เกิดผลต่อการหาสัมประสิทธิ์การแพร่มากนักเนื่องจากเริ่มเข้าใกล้สภาวะสมดุล

จากตารางผนวก จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง D_s กับ x_i ดังแสดงในตาราง 17

การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln y$ กับเวลา t (S) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ขนาดต่างๆ

-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

จากตาราง 14 พบว่าข้อมูล $\ln y$ กับ t มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$z = \ln y = -at^b \text{ โดยที่}$$

$$t \rightarrow \infty, \ln y \rightarrow -\infty$$

$$t \rightarrow 0, \ln y \rightarrow 0$$

แทนค่าตั้งแต่ $t=0$ S, $\ln y=0$ จนถึง $t=1800$ S, $\ln y=-2.4800$ จะได้

$$a=0.4569$$

$$b=0.2276$$

$$r=0.990417441$$

\therefore จะได้สมการ

$$\ln y = -0.4569t^{0.2276}$$

$$\text{slope} = \frac{d \ln y}{dt} = -0.1040t^{-0.7724}$$

-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

ในการทำงานเดียวกันกับการคำนวณสำหรับขนาด 2 mm

จากตาราง 15 แทนค่าตั้งแต่ $t=0$ S, $\ln y=0$ จนถึง $t=1800$ S, $\ln y=-2.1271$

จะได้

$$a=0.5509$$

$$b=0.1959$$

$$r=0.979369045$$

จะได้สมการ

$$\ln y = -0.5509t^{0.1959}$$

$$\text{slope} = \frac{d \ln y}{dt} = -0.1079t^{-0.8041}$$

-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

จากตาราง 16 แทนค่าตั้งแต่ $t=0$ S, $\ln y=0$ จนถึง $t=1800$ S, $\ln y=-1.9429$

จะได้

$$a=0.4821$$

$$b=0.1816$$

$$r=0.982169555$$

จะได้สมการ

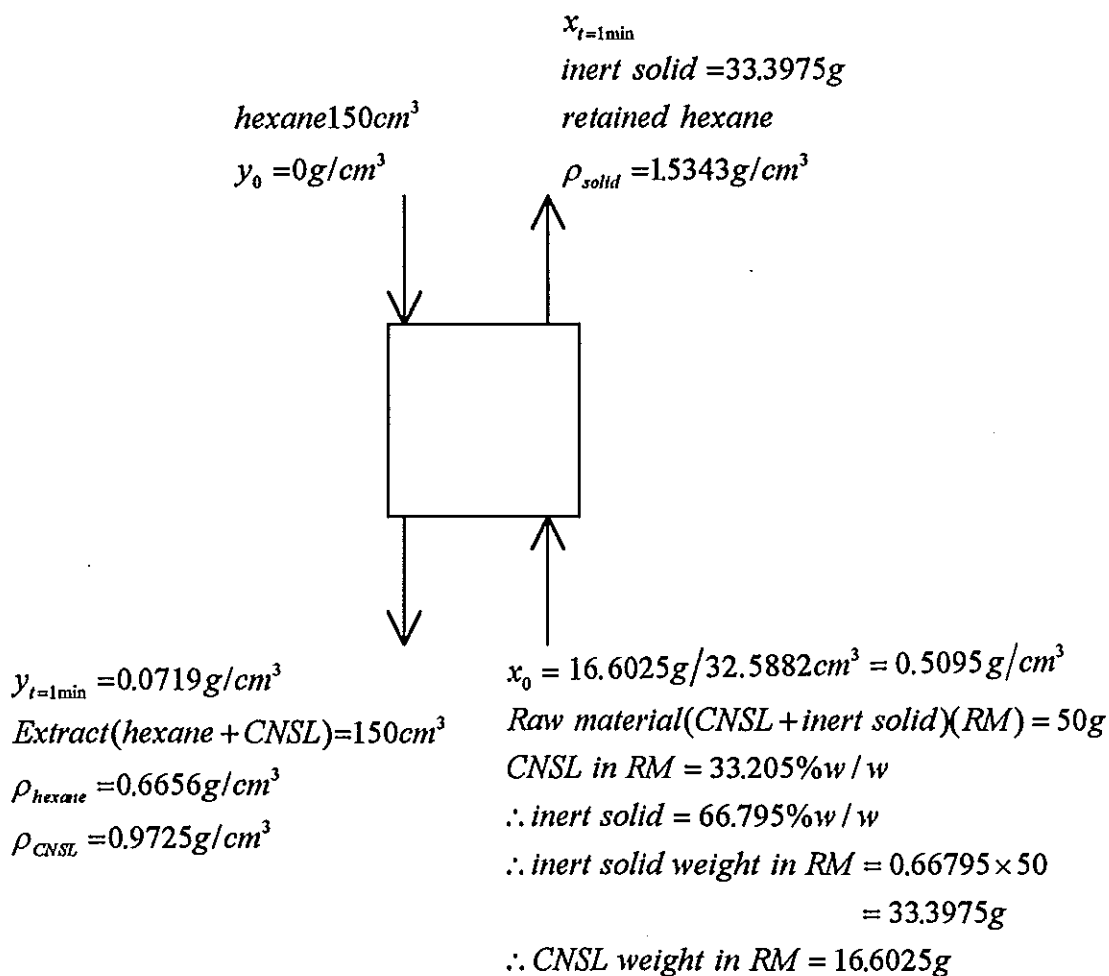
$$\ln y = -0.4821t^{0.1816}$$

$$\text{slope} = \frac{d \ln y}{dt} = -0.0875t^{-0.8184}$$

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของCNSLในวัฏภาคของแข็งแบบคิโตรวมของแข็งเฉื่อย (inert solid) (x_t) จากการสกัดCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบแบทช์โดยใช้ เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย

-ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

เวลาในการสกัด 1 นาที



รูปผนวก 2 ตัวอย่างการคูณมวลสารเพื่อคำนวณความเข้มข้นของCNSLในวัฏภาคของแข็งแบบคิโตรวมของแข็งเฉื่อย (inert solid) จากการสกัดCNSLจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบแบทช์

-สมมุติฐานที่ใช้(assumption)

ปริมาตรเอ็กแทรกเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งถูกต้องโดยพิจารณาจากการทดลองในการหา m หรือ $(y/x)^*$

ดังนั้นให้ปริมาตรเอ็กแทรกเท่าเดิมคือ 150 cm^3

$$y_{t=1\text{min}} = 0.0719 \text{ g/cm}^3 \text{ (ผลจากการทดลอง)}$$

-วิธีคำนวณ

- พิจารณาส่วนของตัวทำละลาย(solvent)ที่ใช้สกัด (คือเฮกเซนบริสุทธิ์)

$$y_0 = 0 \text{ g/cm}^3, \text{ เฮกเซน(hexane) } 150 \text{ cm}^3, \rho_{\text{HEXANE}} = 0.6656 \text{ g/cm}^3$$

- พิจารณาส่วนของเอ็กแทรก(extract)ที่ได้จากการสกัด (คือเฮกเซนกับ CNSL)

$$1 \text{ cm}^3 \text{ ของเอ็กแทรก มี CNSL} = 0.0719 \text{ g}$$

$$150 \text{ cm}^3 \text{ ของเอ็กแทรก มี CNSL} = 0.0719 \times 150 = 10.785 \text{ g}$$

- พิจารณาวัตถุดิบ(Raw material)เมื่อเริ่มต้นการสกัด (คือของแข็งเฉื่อย(inert solid) กับ CNSL)

$$x_0 = 0.9725 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{น้ำหนักวัตถุดิบ} = 50 \text{ g}$$

$$\text{CNSL ในวัตถุดิบ} = 33.205 \% \text{w/w (ผลจากการทดลอง)}$$

$$\therefore \text{ของแข็งเฉื่อย} = 66.795 \% \text{w/w}$$

$$\therefore \text{น้ำหนักของของแข็งเฉื่อยในวัตถุดิบ} = 0.66759 \times 50 = 33.3975 \text{ g}$$

$$\therefore \text{น้ำหนัก CNSL ในวัตถุดิบ} = 16.6025 \text{ g}$$

- พิจารณาวัตถุดิบ(Raw material)หลังการสกัดที่ระยะเวลาต่างๆ (คือของแข็งเฉื่อย CNSL และเฮกเซนที่ค้างอยู่ในของแข็ง(hexane retained))

-ที่เวลาการสกัด $t = 1 \text{ min}$

เมื่อพิจารณาให้ปริมาตรเอ็กแทรกไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นปริมาตรของวัฏภาคของแข็งจึงไม่เปลี่ยนแปลงด้วย นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรวัฏภาคของแข็งเริ่มต้น} &= \text{ปริมาตรวัฏภาคของแข็งที่ระยะการสกัดต่างๆ} \\ &= 50/1.5343 = 32.5882 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{วัตถุดิบที่เวลาการสกัด } 1 \text{ min มี CNSL} = 16.6025 - 10.785 = 5.8175 \text{ g}$$

$$\text{ดังนั้น } x_t = 5.8175/32.5882 = 0.1785 \text{ g/cm}^3$$

สำหรับ x , ที่เวลาอื่นๆหรือสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดอื่นๆก็คำนวณได้ใน
ทำนองเดียวกัน

ภาคผนวก ข การสกัด CNSL แบบหยด

ภาคผนวกการทดลองศึกษาผลของอัตราการหยดเฮกเซนในการสกัดแบบหยด

สภาวะ -ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

-น้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 30 ± 0.5 g

-เฮกเซน 50 ml, อุณหภูมิห้อง 25.5 °C

-อัตราการหยด 0.42, 0.53, 0.71, 1.67, 2.38, 3.33 และ 4.545 ml/min

ตารางผนวก 20.1-20.7 ผลของอัตราการหยดเฮกเซนที่อัตราการหยดแตกต่างกัน

ตารางผนวก 20.1 อัตราการหยดเฮกเซน 0.42 ml/min

| ครั้งที่ | ปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ (g) | % CNSL ที่ได้อ่อน้ำหนักเปลือก | ปริมาณ hexane recovery (g) | ปริมาณ hexane retained (g) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 8.213 | 27.077 | 23.562 | 8.642 |
| 2 | 9.435 | 31.743 | 24.292 | 9.122 |
| เฉลี่ย | 8.779 | 29.41 | 23.927 | 8.882 |

ตารางผนวก 20.2 อัตราการหยดเฮกเซน 0.53 ml/min

| ครั้งที่ | ปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ (g) | % CNSL ที่ได้อ่อน้ำหนักเปลือก | ปริมาณ hexane recovery (g) | ปริมาณ hexane retained (g) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 8.526 | 27.96 | 26.964 | 6.499 |
| 2 | 8.636 | 29.10 | 27.630 | 7.225 |
| เฉลี่ย | 8.581 | 28.53 | 27.297 | 6.862 |

ตารางผนวก 20.3 อัตราการหยดเฮกเซน 0.71 ml/min

| ครั้งที่ | ปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ (g) | % CNSL ที่ได้อ่อน้ำหนักเปลือก | ปริมาณ hexane recovery (g) | ปริมาณ hexane retained (g) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 8.007 | 27.12 | 23.646 | 7.967 |
| 2 | 8.327 | 27.20 | 24.534 | 8.863 |
| เฉลี่ย | 8.167 | 27.16 | 24.090 | 8.415 |

ตารางผนวก 20.4 อัตราการหยดเสกเซน 1.67 ml/min

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อน้ำหนักเปลือก | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) |
|----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 8.007 | 27.12 | 23.646 | 7.967 |
| 2 | 8.327 | 27.20 | 24.534 | 8.863 |
| เฉลี่ย | 8.167 | 27.16 | 24.090 | 8.415 |

ตารางผนวก 20.5 อัตราการหยดเสกเซน 2.38 ml/min

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อน้ำหนักเปลือก | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) |
|----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 6.972 | 22.66 | 22.541 | 9.965 |
| 2 | 7.598 | 25.52 | 25.021 | 7.451 |
| เฉลี่ย | 7.285 | 24.09 | 23.781 | 8.708 |

ตารางผนวก 20.6 อัตราการหยดเสกเซน 3.33 ml/min

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อน้ำหนักเปลือก | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) |
|----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 6.843 | 22.698 | 24.654 | 11.410 |
| 2 | 7.159 | 23.962 | 20.876 | 8.430 |
| เฉลี่ย | 7.001 | 23.330 | 22.765 | 9.92 |

ตารางผนวก 20.7 อัตราการหยดเสกเซน 4.545 ml/min

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อน้ำหนักเปลือก | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) |
|----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 6.846 | 24.447 | 25.292 | 9.291 |
| 2 | 6.694 | 20.013 | 22.832 | 8.915 |
| เฉลี่ย | 6.77 | 22.23 | 23.832 | 9.103 |

หมายเหตุ : ความสัมพันธ์(regression)ระหว่าง%CNSLที่สกัดได้ต่อเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Y)กับอัตราการหยดเสกเซน(X) คือ

$$Y = 32.208 - 8.3757X + 2.7706X^2 - 0.31091X^3, r^2 = 0.992$$

การศึกษาค่าผลของความหนาเบดต่อการสกัด CNSL โดยเฮกเซนแบบหยด

สภาวะ -ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

-ความหนาของเบด 1, 2, 3, 9, 10, 11, 18, 19 และ 20 cm ตามลำดับ

-เฮกเซน 50 ml, อุณหภูมิห้อง 25 °C

-อัตราการสกัด 1.67 ml/min

ตารางผนวก 21.1-21.9 ผลของความหนาเบดต่อการสกัดโดยเฮกเซนแบบหยด

ตารางผนวก 21.1 ผลของความหนาเบด 1 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ (g) | % CNSL ที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|----------------------------|------------------------------------------------------|
| 1 | 0.666 | 24.557 |
| 2 | 0.694 | 25.113 |
| เฉลี่ย | 0.680 | 24.845 |

ตารางผนวก 21.2 ผลของความหนาเบด 2 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ (g) | % CNSL ที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|----------------------------|------------------------------------------------------|
| 1 | 1.285 | 24.708 |
| 2 | 1.427 | 24.836 |
| เฉลี่ย | 1.356 | 24.772 |

ตารางผนวก 21.3 ผลของความหนาเบด 3 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ (g) | % CNSL ที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|----------------------------|------------------------------------------------------|
| 1 | 2.144 | 25.176 |
| 2 | 1.892 | 23.979 |
| เฉลี่ย | 2.018 | 24.577 |

ตารางผนวก 21.4 ผลของความหนาเบด 9 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 5.076 | 20.084 |
| 2 | 5.047 | 21.008 |
| เฉลี่ย | 5.061 | 20.546 |

ตารางผนวก 21.5 ผลของความหนาเบด 10 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 5.416 | 19.307 |
| 2 | 5.462 | 20.437 |
| เฉลี่ย | 5.439 | 19.872 |

ตารางผนวก 21.6 ผลของความหนาเบด 11 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 5.718 | 19.321 |
| 2 | 5.588 | 18.231 |
| เฉลี่ย | 5.653 | 18.776 |

ตารางผนวก 21.7 ผลของความหนาเบด 18 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 7.202 | 15.380 |
| 2 | 7.144 | 15.342 |
| เฉลี่ย | 7.173 | 15.631 |

ตารางผนวก 21.8 ผลของความหนาเบด 19 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 8.363 | 16.955 |
| 2 | 6.559 | 13.339 |
| เฉลี่ย | 7.461 | 15.147 |

ตารางผนวก 21.9 ผลของความหนาเบด 20 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่สกัดได้ต่อน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
|----------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | 7.069 | 13.613 |
| 2 | 7.503 | 14.502 |
| เฉลี่ย | 7.286 | 14.058 |

สภาวะ -ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

-ความหนาเบด 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 11 cm

-เฮกเซน 50 ml, อุณหภูมิห้อง 26 °C

-อัตราการสกัด 1.67 ml/min

ตารางผนวก 22.1- 22.11 ผลของความหนาเบดต่อการสกัดโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

ตารางผนวก 22.1 ผลของความหนาเบด 1 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อน้ำหนักเปลือก |
|----------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | 2.776 | 0.702 | 25.288 |
| 2 | 2.770 | 0.694 | 25.054 |
| เฉลี่ย | 2.773 | 0.698 | 25.171 |

ตารางผนวก 22.2 ผลของความหนาเบด 2 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 5.456 | 1.638 | 30.022 |
| 2 | 5.454 | 1.1694 | 21.336 |
| เฉลี่ย | 5.452 | 1.400 | 25.679 |

ตารางผนวก 22.3 ผลของความหนาเบด 3 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8.278 | 2.211 | 26.709 |
| 2 | 8.272 | 1.789 | 21.627 |
| เฉลี่ย | 8.275 | 2.000 | 24.169 |

ตารางผนวก 22.4 ผลของความหนาเบด 4 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 10.964 | 2.553 | 23.285 |
| 2 | 10.952 | 2.601 | 23.749 |
| เฉลี่ย | 10.958 | 2.577 | 23.517 |

ตารางผนวก 22.5 ผลของความหนาเบด 5 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 13.794 | 3.096 | 22.445 |
| 2 | 13.780 | 2.912 | 21.132 |
| เฉลี่ย | 13.787 | 3.004 | 21.786 |

ตารางผนวก 22.6 ผลของความหนาเบด 6 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 16.503 | 3.801 | 23.032 |
| 2 | 16.491 | 3.787 | 22.964 |
| เฉลี่ย | 16.497 | 3.794 | 22.998 |

ตารางผนวก 22.7 ผลของความหนาเบด 7 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 19.114 | 4.199 | 21.968 |
| 2 | 19.094 | 4.177 | 21.876 |
| เฉลี่ย | 19.104 | 4.188 | 21.922 |

ตารางผนวก 22.8 ผลของความหนาเบด 8 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 21.852 | 4.568 | 20.904 |
| 2 | 21.852 | 4.182 | 19.138 |
| เฉลี่ย | 21.852 | 4.375 | 20.021 |

ตารางผนวก 22.9 ผลของความหนาเบด 9 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 24.632 | 3.867 | 15.699 |
| 2 | 24.720 | 4.783 | 19.349 |
| เฉลี่ย | 24.676 | 4.325 | 17.527 |

ตารางผนวก 22.10 ผลของความหนาเบด 10 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 27.299 | 5.208 | 19.078 |
| 2 | 27.397 | 5.108 | 18.644 |
| เฉลี่ย | 27.348 | 5.158 | 18.861 |

ตารางผนวก 22.11 ผลของความหนาเบด 11 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 30.433 | 5.479 | 18.003 |
| 2 | 29.733 | 5.129 | 17.250 |
| เฉลี่ย | 30.083 | 5.304 | 17.631 |

สภาวะ -ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 5 mm

-ความหนาเบด 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 11 cm

-เฮกเซน 50 ml, อุณหภูมิห้อง 26 °C

-อัตราการสกัด 1.67 ml/min

ตารางผนวก 23.1- 23.11 ผลของความหนาเบดต่อการสกัดโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือก
เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

ตารางผนวก 23.1 ผลของความหนาเบด 1 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 2.819 | 0.709 | 25.151 |
| 2 | 2.799 | 0.707 | 25.259 |
| เฉลี่ย | 2.809 | 0.708 | 25.205 |

ตารางผนวก 23.2 ผลของความหนาเบด 2 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 5.424 | 1.319 | 24.318 |
| 2 | 5.482 | 1.379 | 26.165 |
| เฉลี่ย | 5.453 | 1.349 | 24.737 |

ตารางผนวก 23.3 ผลของความหนาเบด 3 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8.175 | 1.951 | 23.865 |
| 2 | 8.253 | 2.031 | 24.609 |
| เฉลี่ย | 8.214 | 1.991 | 24.237 |

ตารางผนวก 23.4 ผลของความหนาเบด 4 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 10.935 | 2.509 | 22.945 |
| 2 | 10.877 | 2.569 | 23.619 |
| เฉลี่ย | 10.906 | 2.539 | 23.282 |

ตารางผนวก 23.5 ผลของความหนาเบด 5 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 13.649 | 3.091 | 22.646 |
| 2 | 13.677 | 3.121 | 22.819 |
| เฉลี่ย | 13.663 | 3.106 | 22.733 |

ตารางผนวก 23.6 ผลของความหนาเบด 6 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 16.355 | 3.827 | 23.400 |
| 2 | 16.421 | 3.649 | 22.222 |
| เฉลี่ย | 16.388 | 3.738 | 22.809 |

ตารางผนวก 23.7 ผลของความหนาเบด 7 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 19.291 | 4.310 | 21.409 |
| 2 | 19.111 | 3.930 | 20.564 |
| เฉลี่ย | 19.201 | 4.030 | 20.987 |

ตารางผนวก 23.8 ผลของความหนาเบด 8 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 21.519 | 4.486 | 20.847 |
| 2 | 21.881 | 4.486 | 20.502 |
| เฉลี่ย | 21.700 | 4.486 | 20.673 |

ตารางผนวก 23.9 ผลของความหนาเบด 9 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 24.620 | 4.564 | 18.538 |
| 2 | 24.504 | 4.442 | 18.128 |
| เฉลี่ย | 24.562 | 4.503 | 18.333 |

ตารางผนวก 23.10 ผลของความหนาเบด 10 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 27.738 | 5.149 | 18.563 |
| 2 | 27.088 | 4.487 | 16.565 |
| เฉลี่ย | 27.413 | 4.818 | 17.564 |

ตารางผนวก 23.11 ผลของความหนาเบด 11 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 30.063 | 4.865 | 16.183 |
| 2 | 30.245 | 5.085 | 16.813 |
| เฉลี่ย | 30.164 | 4.975 | 16.498 |

สภาวะ -ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 9 mm

-ความหนาเบด 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 11 cm

-เฮกเซน 50 ml, อุณหภูมิห้อง 26 °C

-อัตราการสกัด 1.67 ml/min

ตารางผนวก 24.1-24.11 ผลของความหนาเบดต่อการสกัดโดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือก
เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

ตารางผนวก 24.1 ผลของความหนาเบด 1 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 2.826 | 0.666 | 23.567 |
| 2 | 2.848 | 0.748 | 26.264 |
| เฉลี่ย | 2.837 | 0.707 | 24.921 |

ตารางผนวก 24.2 ผลของความหนาเบด 2 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 5.341 | 1.156 | 21.644 |
| 2 | 5.603 | 1.456 | 25.986 |
| เฉลี่ย | 5.472 | 1.306 | 23.815 |

ตารางผนวก 24.3 ผลของความหนาเบด 3 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8.279 | 1.947 | 23.517 |
| 2 | 8.293 | 1.931 | 23.285 |
| เฉลี่ย | 8.286 | 1.939 | 23.401 |

ตารางผนวก 24.4 ผลของความหนาเบด 4 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 10.860 | 2.448 | 22.541 |
| 2 | 10.854 | 2.438 | 22.462 |
| เฉลี่ย | 10.857 | 2.443 | 22.502 |

ตารางผนวก 24.5 ผลของความหนาเบด 5 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 13.589 | 2.890 | 21.267 |
| 2 | 13.641 | 2.944 | 21.582 |
| เฉลี่ย | 13.615 | 2.917 | 21.425 |

ตารางผนวก 24.6 ผลของความหนาเบด 6 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 16.443 | 3.412 | 20.750 |
| 2 | 16.531 | 3.318 | 20.071 |
| เฉลี่ย | 16.487 | 3.365 | 20.411 |

ตารางผนวก 24.7 ผลของความหนาเบด 7 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 18.760 | 3.703 | 19.739 |
| 2 | 19.550 | 3.763 | 19.197 |
| เฉลี่ย | 19.155 | 3.728 | 19.468 |

ตารางผนวก 24.8 ผลของความหนาเบด 8 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 21.678 | 3.847 | 17.746 |
| 2 | 21.670 | 4.531 | 20.909 |
| เฉลี่ย | 21.674 | 4.189 | 16.317 |

ตารางผนวก 24.9 ผลของความหนาเบด 9 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 24.779 | 4.032 | 16.272 |
| 2 | 24.801 | 4.058 | 16.362 |
| เฉลี่ย | 24.790 | 4.045 | 16.317 |

ตารางผนวก 24.10 ผลของความหนาเบด 10 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 27.401 | 4.370 | 15.948 |
| 2 | 27.399 | 4.368 | 15.942 |
| เฉลี่ย | 27.400 | 4.369 | 15.945 |

ตารางผนวก 24.11 ผลของความหนาเบด 11 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์(g) | ปริมาณCNSLที่สกัด ได้(g) | %CNSLที่ได้ต่อ น้ำหนักเปลือก |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 30.105 | 4.534 | 15.061 |
| 2 | 30.167 | 4.608 | 15.275 |
| เฉลี่ย | 30.136 | 4.571 | 15.168 |

การคำนวณปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยต่อหนึ่งเบดจากการทดลองศึกษาผลของความหนาเบดที่มีต่อการสกัดแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดต่างกัน

$$\text{ปริมาณเปลือกเฉลี่ยต่อหนึ่งเบด} = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n}{z_1 + z_2 + z_3 + \dots + z_n}$$

โดยที่ $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$: ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ความหนา

1 เบด, 2 เบด, 3เบด จนกระทั่งถึง 11 เบดตามลำดับ

$z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$: จำนวนความหนาเบดที่ 1, 2, 3 จนกระทั่งถึงเบดที่ 11 ตามลำดับ

-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

$$\text{ปริมาณเปลือกเฉลี่ยต่อหนึ่งเบด} = \frac{2.809 + 5.453 + 8.214 + \dots + 30.154}{1 + 2 + 3 + \dots + 11} = 2.739 \text{ g}$$

-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

$$\text{ปริมาณเปลือกเฉลี่ยต่อหนึ่งเบด} = 2.738 \text{ g}$$

-เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

$$\text{ปริมาณเปลือกเฉลี่ยต่อหนึ่งเบด} = 2.734 \text{ g}$$

การคำนวณ %CNSL ที่สกัดได้ในแต่ละเบด(% weight of CNSL/weight of raw material)

-พิจารณาเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

-คำนวณ %CNSL ที่สกัดได้ในเบดที่ 1

$$\% \text{CNSL ที่สกัดได้ในแต่ละเบด} = \frac{x_1}{x_2} \times 100$$

โดยที่ x_1 : ปริมาณ CNSL ที่สกัดได้ในแต่ละเบด

x_2 : ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ยในเบด

$$\text{ดังนั้น \%CNSL ที่สกัดได้ในเบดที่ 1} = \frac{0.661}{2.739} \times 100 = 24.13 \%$$

ส่วนการคำนวณ %CNSL ในเบดอื่นๆหรือสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาดอื่นๆก็กระทำได้ในทำนองเดียวกัน

ตารางผนวก 25.1.1-25.11 % hexane recovery, % hexane retained และ retention time (S) จากการทดลองศึกษาผลของความหนาเบดในการสกัด CNSL โดยเฮกเซนแบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

ตารางผนวก 25.1 ความหนาเบด 1 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.776 | 28.50 | 0.870 | 20.00 |
| 2 | 2.770 | 28.50 | 0.874 | 21.40 |
| เฉลี่ย | 2.773 | 28.50 | 0.872 | 20.70 |

ตารางผนวก 25.2 ความหนาเบด 2 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 5.456 | 27.528 | 1.666 | 49.90 |
| 2 | 5.454 | 27.730 | 1.694 | 43.70 |
| เฉลี่ย | 5.452 | 27.629 | 1.680 | 46.80 |

ตารางผนวก 25.3 ความหนาเบด 3 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 8.278 | 27.138 | 2.053 | 72.10 |
| 2 | 8.272 | 27.142 | 2.059 | 65.30 |
| เฉลี่ย | 8.275 | 27.140 | 2.056 | 68.70 |

ตารางผนวก 25.4 ความหนาเบด 4 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 10.964 | 26.826 | 2.699 | 81.7 |
| 2 | 10.952 | 26.822 | 2.695 | 83.3 |
| เฉลี่ย | 10.958 | 26.824 | 2.697 | 82.5 |

ตารางผนวก 25.5 ความหนาเบด 5 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 13.794 | 26.240 | 3.487 | 100.8 |
| 2 | 13.780 | 26.254 | 3.497 | 104.6 |
| เฉลี่ย | 13.787 | 26.247 | 3.492 | 102.7 |

ตารางผนวก 25.6 ความหนาเบด 6 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 16.503 | 25.200 | 4.303 | 132.5 |
| 2 | 16.491 | 25.148 | 3.995 | 127.9 |
| เฉลี่ย | 16.497 | 25.174 | 4.149 | 130.2 |

ตารางผนวก 25.7 ความหนาเบด 7 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 19.114 | 24.785 | 5.073 | 142.4 |
| 2 | 19.094 | 24.805 | 5.073 | 144.6 |
| เฉลี่ย | 19.104 | 24.795 | 5.073 | 143.5 |

ตารางผนวก 25.8 ความหนาเบด 8 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 21.852 | 23.915 | 5.289 | 155.7 |
| 2 | 21.852 | 23.925 | 5.283 | 160.7 |
| เฉลี่ย | 21.852 | 23.920 | 5.286 | 158.2 |

ตารางผนวก 25.9 ความหนาเบด 9 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 24.632 | 23.488 | 5.687 | 172.4 |
| 2 | 24.720 | 23.510 | 5.693 | 173.0 |
| เฉลี่ย | 24.676 | 23.499 | 5.690 | 172.7 |

ตารางผนวก 25.10 ความหนาเบด 10 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 27.299 | 22.880 | 6.317 | 189.9 |
| 2 | 27.397 | 22.860 | 5.921 | 171.5 |
| เฉลี่ย | 27.348 | 22.870 | 6.119 | 180.7 |

ตารางผนวก 25.11 ความหนาเบด 11 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 30.433 | 22.256 | 7.086 | 175.5 |
| 2 | 29.733 | 22.266 | 7.092 | 205.9 |
| เฉลี่ย | 30.083 | 22.261 | 7.089 | 190.7 |

ตารางผนวก 26.1-26.11 % hexane recovery, % hexane retained และ retention time (S) จาก
การทดลองศึกษาผลของความหนาเบตในการสกัด CNSL โดยเฮกเซน
แบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

ตารางผนวก 26.1 ความหนาเบต 1 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.819 | 28.250 | 1.041 | 19.7 |
| 2 | 2.799 | 28.006 | 1.031 | 18.9 |
| เฉลี่ย | 2.809 | 28.128 | 1.036 | 19.3 |

ตารางผนวก 26.2 ความหนาเบต 2 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 5.424 | 27.488 | 1.752 | 42.7 |
| 2 | 5.482 | 27.510 | 1.762 | 38.5 |
| เฉลี่ย | 5.453 | 27.499 | 1.757 | 40.6 |

ตารางผนวก 26.3 ความหนาเบต 3 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 8.175 | 26.246 | 2.399 | 59.1 |
| 2 | 8.253 | 27.136 | 2.611 | 64.7 |
| เฉลี่ย | 8.214 | 26.691 | 2.505 | 61.9 |

ตารางผนวก 26.4 ความหนาเบด 4 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 10.935 | 26.574 | 3.122 | 82.6 |
| 2 | 10.877 | 25.902 | 2.958 | 84.4 |
| เฉลี่ย | 10.906 | 26.238 | 3.040 | 83.5 |

ตารางผนวก 26.5 ความหนาเบด 5 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 13.649 | 25.571 | 3.546 | 108.5 |
| 2 | 13.677 | 25.681 | 3.710 | 111.9 |
| เฉลี่ย | 13.663 | 25.626 | 3.628 | 110.2 |

ตารางผนวก 26.6 ความหนาเบด 6 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 16.355 | 25.620 | 4.206 | 113.8 |
| 2 | 16.421 | 25.638 | 4.210 | 123.6 |
| เฉลี่ย | 16.388 | 25.629 | 4.208 | 118.7 |

ตารางผนวก 26.7 ความหนาเบด 7 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 19.291 | 23.939 | 5.180 | 143.7 |
| 2 | 19.111 | 23.937 | 5.220 | 138.9 |
| เฉลี่ย | 19.201 | 23.938 | 5.200 | 141.3 |

ตารางผนวก 26.8 ความหนาเบด 8 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 21.519 | 23.714 | 5.271 | 157.1 |
| 2 | 21.881 | 23.676 | 5.245 | 160.7 |
| เฉลี่ย | 21.700 | 23.695 | 5.258 | 158.9 |

ตารางผนวก 26.9 ความหนาเบด 9 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 24.620 | 23.502 | 6.040 | 166.7 |
| 2 | 24.504 | 22.640 | 6.048 | 171.1 |
| เฉลี่ย | 24.562 | 23.071 | 6.044 | 168.9 |

ตารางผนวก 26.10 ความหนาเบด 10 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 27.738 | 22.441 | 6.778 | 180.8 |
| 2 | 27.088 | 22.259 | 6.806 | 189.8 |
| เฉลี่ย | 27.413 | 22.350 | 6.792 | 185.3 |

ตารางผนวก 26.11 ความหนาเบด 11 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 30.063 | 21.762 | 7.262 | 204.6 |
| 2 | 30.245 | 21.888 | 7.248 | 192.6 |
| เฉลี่ย | 30.154 | 21.825 | 7.255 | 198.6 |

ตารางผนวก 27.1-27.11 % hexane recovery, % hexane retained และ retention time (S) จาก
การทดลองศึกษาผลของความหนาเบตในการสกัด CNSL โดยเฮกเซน
แบบหยดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

ตารางผนวก 27.1 ความหนาเบต 1 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.826 | 28.446 | 0.860 | 16.7 |
| 2 | 2.848 | 28.610 | 1.170 | 20.7 |
| เฉลี่ย | 2.837 | 28.528 | 1.015 | 18.7 |

ตารางผนวก 27.2 ความหนาเบต 2 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 5.341 | 27.786 | 1.783 | 31.9 |
| 2 | 5.603 | 27.912 | 1.793 | 38.9 |
| เฉลี่ย | 5.472 | 27.849 | 1.788 | 35.4 |

ตารางผนวก 27.3 ความหนาเบต 3 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 8.279 | 27.043 | 2.584 | 71.0 |
| 2 | 8.293 | 27.217 | 2.666 | 62.8 |
| เฉลี่ย | 8.286 | 27.130 | 2.625 | 66.9 |

ตารางผนวก 27.4 ความหนาเบด 4 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 10.860 | 26.781 | 3.075 | 82.3 |
| 2 | 18.854 | 25.907 | 3.101 | 83.5 |
| เฉลี่ย | 10.857 | 26.344 | 3.088 | 82.9 |

ตารางผนวก 27.5 ความหนาเบด 5 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 13.589 | 25.549 | 3.695 | 98.8 |
| 2 | 13.641 | 26.241 | 3.713 | 104.4 |
| เฉลี่ย | 13.615 | 25.895 | 3.704 | 101.6 |

ตารางผนวก 27.6 ความหนาเบด 6 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 16.443 | 24.558 | 4.492 | 120.5 |
| 2 | 16.531 | 25.742 | 4.542 | 115.7 |
| เฉลี่ย | 16.487 | 25.150 | 4.517 | 118.1 |

ตารางผนวก 27.7 ความหนาเบด 7 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 18.760 | 24.385 | 5.038 | 142.5 |
| 2 | 19.550 | 24.177 | 5.100 | 144.5 |
| เฉลี่ย | 19.155 | 24.281 | 5.069 | 143.5 |

ตารางผนวก 27.8 ความหนาเบด 8 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 21.678 | 23.441 | 6.695 | 150.1 |
| 2 | 21.670 | 23.503 | 5.713 | 160.3 |
| เฉลี่ย | 21.674 | 23.472 | 5.704 | 155.2 |

ตารางผนวก 27.9 ความหนาเบด 9 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 24.779 | 23.064 | 6.077 | 172.5 |
| 2 | 24.801 | 23.116 | 6.081 | 174.7 |
| เฉลี่ย | 24.790 | 23.090 | 6.079 | 173.6 |

ตารางผนวก 27.10 ความหนาเบด 10 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 27.401 | 22.010 | 7.176 | 180.2 |
| 2 | 27.399 | 22.332 | 7.188 | 187.2 |
| เฉลี่ย | 27.400 | 22.171 | 7.182 | 183.7 |

ตารางผนวก 27.11 ความหนาเบด 11 cm

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์,mm | ปริมาณ hexane recovery(g) | ปริมาณ hexane retained(g) | retention time (S) |
|----------|----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | 30.105 | 21.549 | 7.872 | 195.7 |
| 2 | 30.167 | 21.601 | 7.770 | 193.9 |
| เฉลี่ย | 30.136 | 21.575 | 7.821 | 194.8 |

ภาคผนวก ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยุดในเบดนิ่ง

- เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm
- ปริมาณเฮกเซน 50 ml
- อัตราการไหล (flow rate) 1.67 ml/min, อุณหภูมิห้อง 25.0 °C
- ความหนาเบด 4 cm (เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 10.955 g)
- เก็บตัวอย่างครั้งละ 4 ml

ตารางผนวก 28 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยุดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm (ครั้งที่ 1)*

| เวลาการสกัด (t), s | น้ำหนัก CNSL, g | ความเข้มข้น CNSL (y_{out}), g/cm ³ |
|------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|
| 237.49 | 0.610 | 0.1525 |
| 381.20 | 0.350 | 0.0875 |
| 524.91 | 0.230 | 0.0575 |
| 668.62 | 0.234 | 0.0585 |
| 812.34 | 0.151 | 0.0378 |
| 956.05 | 0.117 | 0.0293 |
| 1099.76 | 0.098 | 0.0245 |
| 1243.47 | 0.092 | 0.0230 |
| 1387.19 | 0.071 | 0.0177 |
| 1530.90 | 0.065 | 0.0163 |
| 1674.61 | 0.055 | 0.0138 |
| 1818.32 | 0.054 | 0.0135 |

* t_f (retention time or extract transit time through bed) จากการทดลองมีค่าเป็น

93.77 s

ตารางผนวก 29 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ
เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm (ครั้งที่ 2)*

| เวลาการสกัด (t), s | น้ำหนัก CNSL, g | ความเข้มข้น CNSL (y_{out}), g/cm ³ |
|------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|
| 226.35 | 0.449 | 0.1123 |
| 370.06 | 0.392 | 0.0980 |
| 513.77 | 0.279 | 0.0698 |
| 657.49 | 0.229 | 0.0573 |
| 801.20 | 0.190 | 0.0475 |
| 944.91 | 0.139 | 0.0348 |
| 1088.62 | 0.078 | 0.0195 |
| 1232.34 | 0.055 | 0.0138 |
| 1376.05 | 0.056 | 0.0140 |
| 1519.76 | 0.039 | 0.0098 |
| 1663.47 | 0.038 | 0.0095 |
| 1807.19 | 0.038 | 0.0095 |

* t_f (retention time or extract transit time through bed) จากการทดลองมีค่าเป็น

82.63 S

- สภาวะ - เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm
 - ปริมาณเฮกเซน 50 ml
 - อัตราการไหล(flow rate) 1.67 ml/min, อุณหภูมิห้อง 25.5 °C
 - ความหนาเบด 4 cm(เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 10.974 g)
 - เก็บตัวอย่างครั้งละ 4 ml

ตารางผนวก 30 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยุดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm (ครั้งที่ 1)*

| เวลาการสกัด(t), s | น้ำหนัก CNSL, g | ความเข้มข้น CNSL(y_{out}), g/cm ³ |
|-----------------------|-----------------|--------------------------------------------------|
| 222.75 | 0.5632 | 0.1408 |
| 366.47 | 0.2944 | 0.0736 |
| 510.18 | 0.1684 | 0.0421 |
| 653.89 | 0.1456 | 0.0364 |
| 797.60 | 0.1267 | 0.0317 |
| 941.32 | 0.0964 | 0.0241 |
| 1085.03 | 0.0743 | 0.0186 |
| 1228.74 | 0.0667 | 0.0167 |
| 1372.46 | 0.0651 | 0.0163 |
| 1516.17 | 0.0588 | 0.0147 |
| 1659.88 | 0.0448 | 0.0112 |
| 1803.59 | 0.0408 | 0.0102 |

* t_f (retention time or extract transit time through bed) จากการทดลองมีค่าเป็น

79.04 S

ตารางผนวก 31 ความเข้มข้นCNSLที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ
เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm (ครั้งที่ 2)*

| เวลาการสกัด(t), s | น้ำหนักCNSL, g | ความเข้มข้นCNSL(y_{out}), g/cm ³ |
|-----------------------|----------------|-------------------------------------------------|
| 222.75 | 0.6028 | 0.1507 |
| 366.47 | 0.3360 | 0.0840 |
| 510.18 | 0.2850 | 0.0713 |
| 653.89 | 0.2870 | 0.0718 |
| 797.60 | 0.2280 | 0.0570 |
| 941.32 | 0.1400 | 0.0350 |
| 1085.03 | 0.0840 | 0.0210 |
| 1228.74 | 0.0600 | 0.0150 |
| 1372.46 | 0.0610 | 0.0153 |
| 1516.17 | 0.0580 | 0.0145 |
| 1659.88 | 0.0600 | 0.0150 |
| 1803.59 | 0.0620 | 0.0155 |

* t_f (retention time or extract transit time through bed) จากการทดลองมีค่าเป็น

79.04 S

สภาวะ - เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

- ปริมาณเฮกเซน 50 ml

- อัตราการไหล (flow rate) 1.67 ml/min, อุณหภูมิห้อง 25.5 °C

- ความหนาเบด 4 cm (เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 10.927 g)

- เก็บตัวอย่างครั้งละ 4 ml

ตารางผนวก 32 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยุดสำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm (ครั้งที่ 1)*

| เวลาการสกัด (t_f), s | น้ำหนัก CNSL, g | ความเข้มข้น CNSL (y_{out}), g/cm ³ |
|--------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|
| 222.75 | 0.3030 | 0.0758 |
| 366.47 | 0.2250 | 0.0563 |
| 510.18 | 0.1660 | 0.0415 |
| 653.89 | 0.1720 | 0.0430 |
| 797.60 | 0.1290 | 0.0323 |
| 941.32 | 0.0856 | 0.0214 |
| 1085.03 | 0.0716 | 0.0179 |
| 1228.74 | 0.0668 | 0.0167 |
| 1372.46 | 0.0650 | 0.0163 |
| 1516.17 | 0.0530 | 0.0133 |
| 1659.88 | 0.0412 | 0.0103 |
| 1803.59 | 0.0380 | 0.0095 |

* t_f (retention time or extract transit time through bed) จากการทดลองมีค่าเป็น

82.63 s

ตารางผนวก 33 ความเข้มข้น CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆของการสกัดแบบหยดสำหรับ
เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm (ครั้งที่ 2)*

| เวลาการสกัด(t), s | น้ำหนัก CNSL, g | ความเข้มข้น CNSL(y_{out}), g/cm ³ |
|-----------------------|-----------------|--------------------------------------------------|
| 219.16 | 0.322 | 0.0805 |
| 362.87 | 0.255 | 0.0638 |
| 506.59 | 0.175 | 0.0438 |
| 650.30 | 0.170 | 0.0425 |
| 794.01 | 0.153 | 0.0383 |
| 937.72 | 0.128 | 0.0320 |
| 1081.44 | 0.111 | 0.0278 |
| 1225.15 | 0.091 | 0.0228 |
| 1368.86 | 0.123 | 0.0308 |
| 1512.57 | 0.078 | 0.0195 |
| 1656.29 | 0.096 | 0.0240 |
| 1800.00 | 0.097 | 0.0243 |

* t_f (retention time or extract transit time through bed) จากการทดลองมีค่าเป็น

75.45 S

ภาคผนวกการศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายเฮกเซนในการสกัดCNSL

แบบหยด

สภาวะ -ขนาดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 2 mm

-ความหนาเมด 4 cm, อุณหภูมิห้อง 26.5 °C(ความหนาแน่นเฮกเซน 0.6646 g/ml)

-อัตราการหยดเฮกเซน 1.67 ml/min

-ปริมาณเฮกเซนที่ใช้สกัดคือ 30.0, 50.0, 80.0, 100.0, 130.0 และ 150 ml

ตารางผนวก 34.1-34.6 ผลของการเพิ่มปริมาณเฮกเซนในการสกัดCNSLแบบหยด

ตารางผนวก 34.1 ผลของการใช้เฮกเซนปริมาณ 30.0 ml

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือก(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | ปริมาณhexane recovery(g) | ปริมาณhexane retained(g) |
|----------|-----------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 10.862 | 1.699 | 15.93 | 2.672 |
| 2 | 11.034 | 1.861 | 15.43 | 2.514 |
| เฉลี่ย | 10.948 | 1.780 | 15.68 | 2.593 |

ตารางผนวก 34.2 ผลของการใช้เฮกเซนปริมาณ 50.0 ml

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือก(g) | ปริมาณCNSLที่สกัดได้(g) | ปริมาณhexane recovery(g) | ปริมาณhexane retained(g) |
|----------|-----------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 10.763 | 2.213 | 26.443 | 3.123 |
| 2 | 11.103 | 1.885 | 25.327 | 3.067 |
| เฉลี่ย | 10.933 | 2.049 | 25.885 | 3.095 |

ตารางผนวก 34.3 ผลของการใช้เฮกเซนปริมาณ 80.0 ml

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือก(g) | ปริมาณCNLSLที่สกัดได้(g) | ปริมาณhexane recovery(g) | ปริมาณhexane retained(g) |
|----------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 11.238 | 2.367 | 40.985 | 2.910 |
| 2 | 10.706 | 2.339 | 40.883 | 2.864 |
| เฉลี่ย | 10.972 | 2.353 | 40.934 | 2.887 |

ตารางผนวก 34.4 ผลของการใช้เฮกเซนปริมาณ 100.0 ml

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือก(g) | ปริมาณCNLSLที่สกัดได้(g) | ปริมาณhexane recovery(g) | ปริมาณhexane retained(g) |
|----------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 10.951 | 2.567 | 48.653 | 3.153 |
| 2 | 10.985 | 2.555 | 49.549 | 3.233 |
| เฉลี่ย | 10.968 | 2.561 | 49.101 | 3.193 |

ตารางผนวก 34.5 ผลของการใช้เฮกเซนปริมาณ 130.0 ml

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือก(g) | ปริมาณCNLSLที่สกัดได้(g) | ปริมาณhexane recovery(g) | ปริมาณhexane retained(g) |
|----------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 10.541 | 2.858 | 62.367 | 2.750 |
| 2 | 11.417 | 2.802 | 63.101 | 2.818 |
| เฉลี่ย | 10.979 | 2.830 | 62.734 | 2.784 |

ตารางผนวก 34.6 ผลของการใช้เฮกเซนปริมาณ 150.0 ml

| ครั้งที่ | ปริมาณเปลือก(g) | ปริมาณCNLSLที่สกัดได้(g) | ปริมาณhexane recovery(g) | ปริมาณhexane retained(g) |
|----------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 10.226 | 2.861 | 66.350 | 3.058 |
| 2 | 11.604 | 2.991 | 63.506 | 3.128 |
| เฉลี่ย | 10.915 | 2.926 | 64.928 | 3.093 |

ภาคผนวกการศึกษาผลได้CNSLจากการขยายพื้นที่หน้าตัดในการสกัดแบบหยด

สภาวะ -เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

-อัตราการหยดเฮกเซน 1.67 ml/min

-ปริมาณการฉีดพ่น(หยด)เฮกเซนมีค่าเป็น 50 ml ต่อหนึ่งจุดของการฉีดพ่น

ตารางผนวก 35 ผลได้CNSLจากการขยายพื้นที่หน้าตัดในการสกัดแบบหยด

| พื้นที่หน้าตัดของการหยด (inches ²) | ลักษณะการดำเนินการสกัดแบบหยด | | | | | | |
|---------------------------------------------------|------------------------------|-------------------|-----------|--------|----------------------|-----------|--------|
| | จำนวนจุดของการฉีดพ่น | ปริมาณวัตถุดิบ(g) | | | ปริมาณCNSLที่สกัดได้ | | |
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่2 | เฉลี่ย | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่2 | เฉลี่ย |
| 0.7854 | 1 | 10.763 | 11.103 | 10.953 | 2.213 | 1.885 | 2.049 |
| 4.0 | 4 | 44.895 | 46.749 | 45.822 | 9.695 | 9.863 | 9.779 |

การคำนวณข้อมูลเกี่ยวกับผลของการศึกษาความเข้มข้นของ CNSL ที่สกัดได้ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการสกัดแบบหยุด

-การคำนวณความเข้มข้นของ CNSL ในวัฏภาคของแข็งเมื่อเริ่มต้นโดยคิดรวมวัสดุเฉื่อย (x_0)

$$x_0 \text{ (g/cm}^3\text{)} = \left(\frac{\frac{w_{CNSL}}{w_{CNSL} + w_{inert}}}{\rho_{RM}} \right), \text{ g/cm}^3$$

โดยที่ w_{CNSL} : ปริมาณ CNSL เริ่มต้น, g

w_{inert} : ปริมาณวัสดุเฉื่อย (inert material), g

ρ_{RM} : ความหนาแน่นของวัสดุดิบ (Raw material = CNSL + inert material), g/cm³

จากการทดลองพบว่า

$$x_0 = \left(\frac{\frac{16.6025}{(16.6025 + 33.3975)}}{1.5343} \right) = 0.5095, \text{ g/cm}^3$$

-การประมาณนอกช่วง (extrapolation) เพื่อหา D_s ของตัวละลาย CNSL สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 2 mm

จากตาราง X10 หรือรูป 6 พบว่า

-ที่เวลาน้อยกว่า 60 s ($y_{out} < 0.0719 \text{ g/cm}^3$)

จะได้

$$-\left[\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2} \right] D_s = -5.7943 \times 10^{-3}$$

โดยที่

$$q_{is} = 1.8381, q_{ic} = 2.7404$$

$$a_s = 0.1487 \times 10^{-3} \text{ m}, a_c = 1.2246 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\therefore D_s = 3.6718 \times 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{S}$$

-ที่เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง (86400 s) ($y_{out} < 0.1027 \text{ g/cm}^3$)

$$-\left[\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2} \right] D_s = -6.8267 \times 10^{-6}$$

$$D_s = 4.3260 \times 10^{-14} \text{ m}^2 / \text{S}$$

-การประมาณนอกช่วง(extrapolation)เพื่อหา D_s ของตัวละลาย CNSL สำหรับเปลือก
เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 5 mm

จากตาราง X11 หรือรูป 7 พบว่า

-ที่เวลาน้อยกว่า 60 s ($y_{out} < 0.0712 \text{ g/cm}^3$)

จะได้

$$-\left[\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2}\right] D_s = -3.8727 \times 10^{-3}$$

โดยที่

$$q_{is} = 1.8381, q_{ic} = 2.7404$$

$$a_s = 0.2126 \times 10^{-3} \text{ m}, a_c = 2.5795 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\therefore D_s = 5.1038 \times 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{S}$$

-ที่เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง(86400 s) ($y_{out} < 0.1010 \text{ g/cm}^3$)

$$-\left[\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2}\right] D_s = -6.6135 \times 10^{-6}$$

$$D_s = 8.7159 \times 10^{-14} \text{ m}^2 / \text{S}$$

-การประมาณนอกช่วง(extrapolation)เพื่อหา D_s ของตัวละลาย CNSL สำหรับเปลือก
เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ขนาด 9 mm

จากตาราง X12 หรือรูป 8 พบว่า

-ที่เวลาน้อยกว่า 60 s ($y_{out} < 0.0698 \text{ g/cm}^3$)

จะได้

$$-\left[\frac{q_{is}^2}{a_s^2} + \frac{q_{ic}^2}{a_c^2}\right] D_s = -1.7971 \times 10^{-3}$$

โดยที่

$$q_{is} = 1.8381, q_{ic} = 2.7404$$

$$a_s = 0.5607 \times 10^{-3} \text{ m}, a_c = 2.4830 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\therefore D_s = 1.5020 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{S}$$

ภาคผนวก ค การออกแบบปฏิกรณ์ในการสกัด

Program

```

2 PRINT "*****CCEMODEL2*****"
3 PRINT "THIS PROGRAMME CAN BE USED TO PREDICT THE CONCENTRATION PROFILE
      ALONG THE EXTRACTOR. THE SHAPE MUST BE INFINITE SLAB"
5 INPUT "VOLUMETRIC RATE OF SOLID(M^3/SEC)= ";U
9 INPUT "VOLUMETRIC RATE OF LIQUID(M^3/SEC)= ";V
13 INPUT "HALF THICKNESS OF SLICES= ";FL
15 INPUT "DIFFUSIVITY(M^2/SEC)= ";E
17 INPUT "SOLVENT CONCENTRATION= ";B1
19 INPUT "INITIAL CONCENTRATION IN SOLID(KG/M^3)= ";A1
21 INPUT "PECLET NUMBER (DIMENSIONLESS)= ";R
23 INPUT "DISTRIBUTION COEFFICIENT (DIMENSIONLESS)= ";M
25 INPUT "TOTAL EXTRACTION TIME (SEC)= ";TX:FF=E*TX/FL^2
27 DR=V*M/U
40 F=3
43 INPUT "NUMBER OF ITERATION REQUIRED= ";N
45 FOR L= 1 TO N
47 Z=1
50 GOSUB 405
60 P1=P
65 GOTO 460
405 T=F*FF
410 A=(T+R)^2+T*R*(1/DR-1)*4
416 IF A < 0 THEN PRINT "NO REAL ROOT"
420 Q1=.5*{(T+R)+A^.5)
425 Q2=.5*{(T+R)-A^.5)

```

```
430 C=Q2*(1-EXP(Q1*Z))*(1+Q1/R)+Q2/DR*(EXP(Q1*Z)-(1+Q1/R)*EXP(Q1))
435 C=C-Q1*(1-EXP(Q2*Z))*(1+Q2/R)-Q1/DR*(EXP(Q2*Z)-(1+Q2/R)*EXP(Q2))
440 B=Q2*(1-EXP(Q1)/DR)*(1+Q1/R)-Q1*(1-EXP(Q2)/DR)*(1+Q2/R)
445 P=1-(C/B)
446 RETURN
460 H=FF/20
470 Z=.001/FF;GOSUB 405
480 D0=P
490 Z=1;GOSUB 405
500 D1=P
510 S=.5*(D0+D1)
520 FOR I=1 TO 19
530 Z=I/20
540 GOSUB 405
550 S=S+P
560 NEXT I
565 S=S*H
570 PRINT "AVERAGE DIMENSIONLESS DRIVING FORCE=" ;S
580 D=Q2/DR*(1-(1+Q1/R)*EXP(Q1))-Q1/DR*(1-(1+Q2/R)*EXP(Q2))
590 T1=(P1-(1-D/B))/S: PRINT "AVERAGE DLOG(DRIVING FORCE)=" ;T1
595 T2=3+.22*T1
600 PRINT "F0=" ;F;" F1=" ;T2
610 F=T2
620 NEXT L
625 L1=((F-2.4598)/(.5262/DR)): PRINT "N-FACTOR=" ;L1
626 INPUT "HOW MANY NUMBER OF ITERATION REQUIRED? ";NB
627 FOR CH=1 TO NB
```

```
628 INPUT 'BIOT NUMBER= ';BI
632 B=B1
635 A=A1
650 T=F*E/FL^2*TX:Q=U/M/M
660 T=T/(1+2.24/BI^1.02)
665 G=((T+R)/2)^2+T*R*(Q-1)
670 IF G >= 0 THEN 690
680 PRINT 'NO REAL ROOT '
690 W=(T+R)/2+G^.5
700 I=(T+R)/2-G^.5
710 O=((1-EXP(W*Z))*(1+W/R))/W-((1-EXP(I*Z))*(1+I/R))/I
720 K=O/(((1-Q*EXP(W))* (1+W/R))/W-((1-Q*EXP(I))* (1+I/R))/I)
730 X=A-(A-B/M)*K
750 PRINT 'CONCENTRATION IN SOLID PHASE (KG/M^3)= 'X
800 NEXT CH
3000 END
```

ที่มา : ดัดแปลงจาก Program M (Siripatana, 1986)

ตารางผนวก 36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pe , Bi , t_f และ x_f ของระบบการสกัด CNSL ด้วยเฮกเซน

| Pe | $t_f (S)$ | Bi | $x_f (kg / m^3)$ |
|------|-----------|------|------------------|
| 10 | 3000 | 20 | 54.13 |
| | 4000 | 20 | 40.37 |
| | 5000 | 20 | 32.33 |
| | 6000 | 20 | 27.16 |
| | 7000 | 11 | 25.33 |
| | 8000 | 6 | 25.24 |
| | 9000 | 4 | 25.44 |
| | 10000 | 4 | 23.11 |
| 11 | 3000 | 20 | 51.70 |
| | 4000 | 20 | 37.86 |
| | 5000 | 20 | 29.83 |
| | 6000 | 15 | 25.48 |
| | 7000 | 7 | 24.99 |
| | 8000 | 5 | 23.94 |
| | 9000 | 4 | 22.91 |
| | 10000 | 3 | 23.08 |
| 12 | 3000 | 20 | 49.69 |
| | 4000 | 20 | 35.78 |
| | 5000 | 20 | 27.85 |
| | 6000 | 10 | 25.03 |
| | 7000 | 5 | 25.36 |
| | 8000 | 4 | 23.72 |
| | 9000 | 3 | 23.59 |
| | 10000 | 3 | 20.98 |

| Pe | $t_f(S)$ | Bi | $x_f(kg/m^3)$ |
|------|----------|------|---------------|
| 13 | 3000 | 20 | 47.93 |
| | 4000 | 20 | 33.97 |
| | 5000 | 20 | 25.88 |
| | 6000 | 7 | 25.42 |
| | 7000 | 5 | 23.56 |
| | 8000 | 3 | 25.14 |
| | 9000 | 3 | 21.80 |
| | 10000 | 2 | 24.29 |
| 14 | 3000 | 20 | 46.41 |
| | 4000 | 20 | 32.41 |
| | 5000 | 15 | 25.36 |
| | 6000 | 6 | 25.11 |
| | 7000 | 4 | 24.23 |
| | 8000 | 3 | 23.60 |
| | 9000 | 3 | 20.28 |
| | 10000 | 2 | 22.75 |
| 15 | 3000 | 20 | 45.09 |
| | 4000 | 20 | 31.06 |
| | 5000 | 12 | 25.05 |
| | 6000 | 6 | 23.77 |
| | 7000 | 4 | 22.90 |
| | 8000 | 3 | 22.27 |
| | 9000 | 2 | 24.33 |
| | 10000 | 2 | 21.43 |

| Pe | $t_f (S)$ | Bi | $x_f (kg / m^3)$ |
|------|-----------|------|------------------|
| 16 | 3000 | 20 | 43.93 |
| | 4000 | 20 | 29.88 |
| | 5000 | 10 | 24.92 |
| | 6000 | 5 | 24.35 |
| | 7000 | 4 | 21.74 |
| | 8000 | 3 | 21.12 |
| | 9000 | 2 | 23.56 |
| | 10000 | 2 | 20.28 |
| 17 | 3000 | 20 | 42.90 |
| | 4000 | 20 | 28.84 |
| | 5000 | 8 | 25.48 |
| | 6000 | 6 | 23.33 |
| | 7000 | 3 | 24.49 |
| | 8000 | 3 | 20.11 |
| | 9000 | 2 | 22.54 |
| | 10000 | 2 | 19.27 |
| 18 | 3000 | 20 | 41.98 |
| | 4000 | 20 | 27.91 |
| | 5000 | 8 | 24.56 |
| | 6000 | 4 | 25.08 |
| | 7000 | 3 | 23.58 |
| | 8000 | 3 | 19.21 |
| | 9000 | 2 | 21.63 |
| | 10000 | 2 | 18.39 |

| Pe | $t_f(S)$ | Bi | $x_f(kg/m^3)$ |
|------|----------|------|---------------|
| 19 | 3000 | 20 | 41.16 |
| | 4000 | 20 | 27.09 |
| | 5000 | 7 | 24.88 |
| | 6000 | 4 | 24.26 |
| | 7000 | 3 | 22.76 |
| | 8000 | 2 | 25.04 |
| | 9000 | 2 | 20.83 |
| | 10000 | 2 | 17.60 |
| 20 | 3000 | 20 | 40.42 |
| | 4000 | 20 | 26.35 |
| | 5000 | 7 | 24.15 |
| | 6000 | 4 | 23.53 |
| | 7000 | 3 | 22.04 |
| | 8000 | 2 | 24.31 |
| | 9000 | 2 | 20.11 |
| | 10000 | 2 | 16.90 |
| 22 | 3000 | 20 | 39.14 |
| | 4000 | 19 | 25.29 |
| | 5000 | 6 | 24.41 |
| | 6000 | 4 | 22.28 |
| | 7000 | 3 | 20.79 |
| | 8000 | 2 | 23.05 |
| | 9000 | 2 | 18.88 |
| | 10000 | 2 | 15.71 |

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายไฉฉวี ฤทธิธรรม

วัน เดือน ปีเกิด 16 ตุลาคม 2512

วุฒิการศึกษา

| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| วิทยาศาสตรบัณฑิต(อุตสาหกรรมเกษตร) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2535 |
| วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมเคมี) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2538 |