

การตกผลึกแบบชั้นของแข็งของสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก



นางสาว พัชรภรณ์ เฟ่งสุข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOLID-LAYER CRYSTALLIZATION OF PALMITIC AND OLEIC ACID MIXTURE



Miss Patcharakamol Phengsuk

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

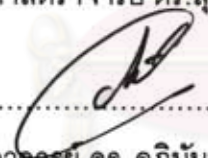
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตกผลึกแบบชั้นของแข็งของสารผสมของกรดปาล์ม มิติกและกรดโอเลอิก
โดย	นางสาว พัชรกมล ณธ์ เพ็งสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล

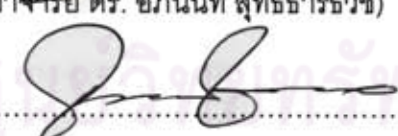
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

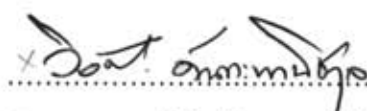
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวงจารย์)


.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ กิตติคุณ ดร. วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล)

พัชรภรณ์ เฟ่งสุข: การตกผลึกแบบชั้นของแข็งของสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก. (SOLID-LAYER CRYSTALLIZATION OF PALMITIC AND OLEIC ACID MIXTURE)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. อภินันท์ สุทธิธรรวัช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล, 164 หน้า.

การแยกส่วนสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกด้วยวิธีการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง ในงานวิจัยนี้สารผสมกรดไขมันถูกบรรจุในภาชนะตกผลึก และถูกควบคุมอุณหภูมิผนังภาชนะตกผลึกและอุณหภูมิตรงกลางภาชนะตกผลึกด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์ให้ความร้อน ตามลำดับ โดยการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองนั้น จะทำให้เกิดชั้นของแข็งบนผนังของภาชนะตกผลึก ซึ่งชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นนี้เป็นบริเวณที่เกิดการถ่ายโอนมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก โดยเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลว ภายในเวลา 720 นาที ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจะถูกวิเคราะห์ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในวัฏภาคของเหลวและของแข็งด้วยโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ จากผลการทดลอง ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจะเพิ่มขึ้นภายในชั้นของแข็ง ในขณะที่ความเข้มข้นของโอเลอิกจะเพิ่มขึ้นในวัฏภาคของเหลว ความเร็วในการถ่ายโอนมวลของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกในสารผสมจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิที่ถูกควบคุมและอัตราส่วนโดยมวลของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกในสารผสม ค่าฟลักซ์มวลจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยมวลเริ่มต้นของสารมากขึ้น เมื่อพิจารณาในชั้นของแข็ง กรดปาล์มมิติกจะถูกสะสมบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลวมากกว่าบริเวณอื่นภายในชั้นของแข็งโดยที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลวกรดปาล์มมิติกจะเพิ่มขึ้นถึง 11 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกเริ่มต้น ในการแยกส่วนในงานวิจัยนี้การถ่ายโอนมวลถูกควบคุมด้วยแรงขับเคลื่อน 2 แรง อันได้แก่ ความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เกิดการตกผลึกซ้ำของกรดปาล์มมิติกบริเวณผิวสัมผัส และความแตกต่างของความเข้มข้นของกรดโอเลอิกภายในชั้นของแข็ง ในการตกผลึกแบบชั้นของแข็งนี้มีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มมิติกและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-11} - 10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที และ 20-100 วัตต์ต่อเมตรต่อวินาทีตามลำดับ นอกจากนี้จากผลการวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิเป็นความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียล

ภาควิชา วิศวกรรมเคมีลายมือชื่อ.....พัชรภรณ์ เฟ่งสุข
 สาขาวิชา วิศวกรรมเคมีลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2553ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170596721: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FRACTIONATION / FATTY ACID / CRYSTALLIZATION / PALMITIC ACID /
OLEIC ACID

PATCHARAKAMOL PHENGSAK: SOLID-LAYER CRYSTALLIZATION OF PALMITIC AND OLEIC ACID MIXTURE. ADVISOR: APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. TAWATCHAI CHARINPANITKUL, D.Eng., 164 pp.

A novel fractionation method of solid-layer crystallization was presented in this work. The palmitic acid (PA) and oleic acid (OA) mixture were processed in a batch crystallizer under fixed temperature gradient condition realized by external coolant and a heater inserted in the solution. During the operation, the coolant and heater temperatures were properly selected to create a solid-liquid interface in the solution, where the exchange of PA and OA were performed. The fatty acid concentrations in solid phase and liquid phase were analyzed by gas chromatography (GC) during the processing. PA concentration in the outer solid phase gradually increased while OA concentration in the inner liquid phase increased, respectively. The mass transfer velocities of PA and OA were found to depend on the temperature gradient in the solution and the initial composition of the PA and OA mixture. The mass flux of PA was augmented by increasing the temperature gradient between T_H and T_W . The PA concentration rapidly decreased. The mass flux was higher when PA concentration in initial solution was higher. PA concentration was accumulated around the interface more than the other positions in the solid phase. About 11 percent of PA from the initial PA concentration was increase at solid-liquid interface. In this process, PA/OA fractionation could be controlled by two driving forces, namely PA recrystallization and transfer of OA elution in solid phase toward the interface. In this solid-layer crystallization, the effective diffusion coefficient of PA and conduction coefficient within solid layer were also determined in the range of 10^{-11} - 10^{-8} m²/s and 20-100 W/m.s, respectively. The correlations between effective diffusion coefficient and temperature were found as an exponential relationships.

Department: Chemical Engineering Student's signature: *Patcharakamol Phengsak*
Field of Study: Chemical Engineering Advisor's signature: *A. Soottitantawat*
Academic Year: 2010 Co-advisor's signature: *T. Charinpanitkul*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับการดูแลเอาใจใส่ คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ จากบุคคลหลายท่าน

ท่านแรกขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของงานวิจัย สำหรับคำแนะนำที่ดีและน่าสนใจเสมอมา และขอขอบพระคุณ Dr. Kyuya Nakagawa ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำงานวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่น ตลอดจนศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบารุจรัตน ประธานกรรมการศาสตราจารย์ กิตติคุณ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวราจารย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณทุน 100 ปี จุฬาลงกรณ์ ที่สนับสนุนเงินวิจัย ขอขอบพระคุณทุน HUMAP ที่สนับสนุนทุนแลกเปลี่ยนในการทำวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นเป็นเวลา 1 ปี ขอขอบพระคุณ บริษัท น้ำมันพืชปทุม จำกัด ที่สนับสนุนสารเคมีในงานวิจัย ขอขอบพระคุณภาคีวิชาวิศวกรรมเคมี สำหรับค่าเล่าเรียนและค่าใช้จ่ายในการเรียน ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนุภาคไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณ Dr. Kyuya Nakagawa และศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบารุจรัตนที่เชื้อเชิญไปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจ และคอยดูแลในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด ซึ่งเป็นแรงใจที่สำคัญที่สุด ที่ทำให้มีแรงผลักดัน ในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กรดไขมัน (Fatty acid).....	6
2.1.1 ประเภทของกรดไขมัน.....	6
2.1.1.1 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid).....	6
2.1.1.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid).....	7
2.1.2 ประโยชน์ของกรดไขมัน	8
2.1.2.1 ประโยชน์ต่อร่างกาย.....	8
2.1.2.2 ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ.....	9
2.2 กระบวนการการแยกสาร (Separation processes).....	12
2.2.1 การแยกสารโดยสร้างวัฏภาคอื่นเข้ามาช่วย (Phase creation) หรือโดย เติมวัฏภาคอื่นเข้ามาช่วย (Phase addition).....	12
2.2.2 การแยกสารโดยใช้วัสดุขวาง (Barrier separation).....	13
2.2.3 การแยกสารโดยใช้วัสดุภายนอกเข้ามาช่วย (Solid agent separation).	14

	หน้า
2.2.4 การแยกสารโดยใช้แรงภายนอกเข้ามาช่วย (Separation by gradient)..	14
2.3 การตกผลึก (Crystallization).....	16
2.3.1 สภาพอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation).....	18
2.3.2 การเกิดเมล็ดผลึก (Nucleation).....	19
2.3.2.1 กลไกการเกิดเมล็ดผลึกปฐมภูมิ (Primary nucleation).....	20
2.3.2.2 กลไกการเกิดแกนผลึกทุติยภูมิ (Secondary nucleation).....	21
2.3.3 การขยายขนาดของผลึก (Crystal Growth).....	22
2.4 การตกผลึกจากของเหลว (Melt crystallization).....	24
2.4.1 ข้อดีของกระบวนการตกผลึกจากของเหลว.....	24
2.4.2 การตกผลึกแบบแขวนลอย (Suspension crystallization).....	25
2.4.3 การตกผลึกแบบชั้นของแข็ง (Solid layer crystallization).....	26
2.5 กระบวนการแยกสารผสมที่ประกอบด้วยกรดไขมัน.....	27
2.5.1 การแยกสารผสมที่ประกอบด้วยกรดไขมันโดยวิธีการกลั่นแยกลำดับ ส่วนระดับโมเลกุล (Molecular distillation).....	27
2.5.2 การแยกสารผสมที่ประกอบด้วยกรดไขมันโดยวิธีการตกผลึก (Crystallization).....	29
2.6 ปรากฏการณ์การถ่ายโอน (Transport phenomena).....	36
2.6.1 การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer).....	36
2.6.1.1 การนำความร้อนและสภาพนำความร้อน (Heat Conduction and Thermal Conductivity).....	37
2.6.2 การถ่ายโอนมวล (Mass transfer).....	43
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	47
3.1 สารเคมี.....	47
3.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	48
3.3 การตกผลึกแบบเกิดชั้นของแข็ง.....	51
3.4 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก (PA).....	53
3.5 การตรวจวัดอุณหภูมิภายในภาชนะตกผลึก.....	54

	หน้า
3.6 การคำนวณหาค่าฟลักซ์เชิงมวล (Mass flux).....	56
3.7 ศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนโดยอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์.....	57
3.7.1 สมการการถ่ายโอนมวล.....	60
3.7.2 สมการการถ่ายโอนความร้อน.....	61
3.7.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D^{eff}).....	63
3.7.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k).....	63
3.7.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับ คุณสมบัติ.....	64
3.8 การวิเคราะห์ขนาดของผลึก (crystal grain) ในชั้นของแข็ง.....	65
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	66
4.1 การศึกษากลไกการแยกส่วนของสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก ด้วยกระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง.....	66
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในบริเวณวัฏภาค ของเหลว.....	68
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในบริเวณวัฏภาค ของแข็ง (ชั้นของแข็ง).....	73
4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของผลึกที่เกิดขึ้นภายในชั้นของแข็ง.....	81
4.1.4 การศึกษากลไกการเกิดผลึกในชั้นของแข็งและการแพร่ของกรดปาล์ม มิติกและกรดโอเลอิก.....	84
4.2 การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนโดยอาศัยการคำนวณทาง คณิตศาสตร์.....	90
4.2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มมิติก (effective diffusion coefficient) ในชั้นของแข็งในปรากฏการณ์ถ่ายโอน มวล.....	91
4.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (conduction coefficient) ใน ชั้นของแข็งในปรากฏการณ์ถ่ายโอนความร้อน.....	99

	หน้า
4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิ...	106
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการลดความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว.....	114
4.3.1 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) ที่มีผลต่อการลดความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก.....	114
4.3.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการลดความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก.....	118
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	123
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	123
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	124
รายการอ้างอิง.....	125
ภาคผนวก.....	129
ภาคผนวก ก.....	130
ภาคผนวก ข.....	133
ภาคผนวก ค.....	141
ภาคผนวก ง.....	147
ภาคผนวก จ.....	162
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	164

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันธรรมชาติ ในหน่วยร้อยละโดยมวลของกรดไขมันทั้งหมด.....	11
2.2	ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเลือกกระบวนการแยกที่เหมาะสม.....	15
2.3	การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างการตกผลึกจากสารละลาย (Solution crystallization) กับการตกผลึกจากของเหลว (Melt crystallization).....	17
2.4	สภาพนำความร้อนของอาหาร และวัสดุบางชนิด.....	41
3.1	สมบัติของกรดปาล์มมิติก และกรดโอเลอิก.....	47
3.2	สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกเริ่มต้นของสารผสมกรดไขมันต่างๆ.....	52
3.3	สภาวะอัตราส่วนของอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heating temperature (T_H)) กับอุณหภูมิผนังภาชนะตกผลึก (Wall temperature (T_W)).....	52
3.4	สภาวะการทำงานของเครื่องโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ (Gas chromatography (GC)).....	54
4.1	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) ระหว่างผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งจากการคำนวณกับการทดลอง.....	97
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) ระหว่างผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นของแข็งจากการคำนวณกับการทดลอง.....	104
4.3	ค่าคงที่ในสมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและแบบเอกซ์โปเนนเชียล.....	106
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) ระหว่างผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งจากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและอุณหภูมิกับการทดลอง.....	113

4.5	ข้อมูลความหนาของชั้นของแข็ง, จุดเยือกแข็งรวมของสารผสม และความเข้มข้นสัมพัทธ์บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลว โดยกำหนดอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) ต่างๆ ที่สภาวะอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	118
4.6	ข้อมูลความหนาของชั้นของแข็ง, จุดเยือกแข็งรวมของสารผสม และความเข้มข้นสัมพัทธ์บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลว โดยกำหนดอุณหภูมิ T_H และ T_W ต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50.....	122
ข-1	ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	133
ข-2	ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	134
ข-3	ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 60:40 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	135
ข-4	ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 70 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	136

ข-5	ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 60 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	137
ข-6	ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้น ภายใน 1440 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	138
ข-7	ข้อมูลดิบของอุณหภูมิภายในสารผสมทั้งวัฏภาคของเหลวและชั้นของแข็งที่เวลาต่างๆ ภายใน 1440 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	140
ค-1	ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ...	142
ค-2	ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ...	143
ค-3	ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 60:40 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ...	144
ค-4	ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 70 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ...	145
ค-5	ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 60 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ...	146

- ๑-1 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square) R^2 โดยใช้ ((
สมการ..... 163







ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของกรดปาล์มมิติก.....	7
2.2	โครงสร้างของกรดสเตียริก	7
2.3	โครงสร้างของกรดโอเลอิก	7
2.4	โครงสร้างของกรดไลโนเลอิก.....	8
2.5	โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์.....	10
2.6	การแยกสาร (a) การสร้างวิฏภาค (b) การเพิ่มวิฏภาค.....	13
2.7	กราฟแสดงค่าการละลายและค่าอิมิตวียังยวด.....	18
2.8	การเกิดเกิดผลึก (Nucleation) และการขยายขนาดของผลึก (Crystal Growth) จนเป็นเกรน.....	22
2.9	ความสัมพันธ์ของ ΔT , อัตราการเกิดผลึก และอัตราการขยายตัวของผลึก.....	23
2.10	การตกผลึกแบบแขวนลอย (Suspension crystallization).....	25
2.11	การตกผลึกแบบชั้นของแข็ง (Solid layer crystallization).....	26
2.12	โครงสร้างของแข็งของไตรกลีเซอไรด์.....	30
2.13	ภาชนะตกผลึกจากของเหลวผสมของกรดลอริกและกรดไมริสติกบนกระบอก หมุนเย็น.....	31
2.14	ลักษณะการของสารผสมของกรดลอริกและกรดไมริสติกในกระบวนการตกผลึก จากของเหลว.....	31
2.15	แผนผังกระบวนการตกผลึกจากของเหลวของไขมันนม.....	32
2.16	เครื่องมือในการแยกกรดไขมันจากไขมันนมด้วยกระบวนการตกผลึกแบบชั้น ของแข็ง.....	33
2.17	เครื่องมือในการตกผลึกแบบชั้นของแข็งของน้ำมันมะพร้าวด้วยแท่งความเย็น....	35
2.18	การนำความร้อน.....	37
2.19	การนำความร้อนในสภาวะคงที่ 1 มิติ.....	39

2.20	การถ่ายโอนมวลโดยสสารจะแพร่จากบริเวณความเข้มข้นสูงไปบริเวณความเข้มข้นต่ำ	44
3.1	ภาชนะแก้วรูปทรงกระบอกใช้เป็นภาชนะในการตกผลึก.....	48
3.2	อุปกรณ์ให้ความร้อนด้วย isothermal circulator (F-25, Julabo, Germany).....	49
3.3	อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (NTT-2200, Eyela, Japan).....	49
3.4	ชุดอุปกรณ์การทดลองในกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง.....	50
3.5	เครื่องโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ (Gas chromatography (GC)) (GC-14B, Shimadzu, Japan).....	53
3.6	เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) (Graphtec GL200, Japan).....	55
3.7	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลเปิดภายในภาชนะตกผลึก.....	55
3.8	แผนผังการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (conduction coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient).....	58
3.9	แบบจำลองชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง.....	59
3.10	กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) (Olympus CX31, Japan).....	65
4.1	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก.....	67
4.2	การลดของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก (\diamond) และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (\triangle) ในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	69

- 4.3 ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกและอนุหนุมิภายในสารผสมในวัฏภาค
ของเหลวเมื่อเวลาเปลี่ยนไปภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวล
ระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอนุหนุมิ
 T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (◇) เป็นความ
เข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง (△) เป็นอนุหนุมิภายในสาร
ผสมภายในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ และ (○) เป็นความเข้มข้นของกรด
ปาล์มมิติกจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอนุหนุมิกับสัดส่วนโมลของกรด
ปาล์มมิติกเมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของอนุหนุมิ..... 71
- 4.4 ทิศทางการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว เมื่อ
อนุหนุมิเปลี่ยนแปลง ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและ
กรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอนุหนุมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ
40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ..... 72
- 4.5 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่จุดต่างๆ ในวัฏภาค
ของแข็ง โดย (a) กำหนดชั้นต่างๆ ในวัฏภาคของแข็ง และ (b) ความเข้มข้นที่
เปลี่ยนไปตามเวลา ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรด
โอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอนุหนุมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40
องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ (○)
จุด D..... 74
- 4.6 การเปลี่ยนแปลงอนุหนุมิที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในภาชนะตกผลึก
ภายในเวลา 720 นาที และที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและ
กรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอนุหนุมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ
40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ
(○) จุด D..... 76

4.7	ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกบนเส้นแนวสภาพของแข็งที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในชั้นของแข็ง ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ (○) จุด D.....	77
4.8	ทิศทางการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	78
4.9	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแนวรัศมี ภายในภาชนะตกผลึก ที่ช่วงเวลาต่างๆ และที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (◇) 0 นาที, (□) 10 นาที, (△) 30 นาที, (○) 60 นาที, (◆) 120 นาที, (■) 180 นาที, (▲) 360 นาที และ (●) 720 นาที.....	80
4.10	ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นภายในวัฏภาคของแข็งภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	83
4.11	แผนภาพจำลองกลไกการเกิดผลึกของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง ที่เวลาต่างๆ โดยกำหนด  เป็นผลึกของกรดปาล์มมิติก (PA crystal) และ  สารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA/OA mixture).....	87
4.12	แผนภาพจำลองกลไกของกระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง โดยกำหนด  เป็นผลึกของกรดปาล์มมิติก (PA crystal) และ  สารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA/OA mixture).....	88

4.13	แบบจำลองแผนภาพสมดุล (Phase diagram) ของสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก.....	89
4.14	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็ง ณ เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) 120 นาที, (□) 360 นาที, (◇) 720 นาที และ (○) 1440 นาที.....	92
4.15	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มมิติกในแต่ละชั้นภายในชั้นของแข็ง ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ (○) จุด D...	94
4.16	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ที่เวลา 360 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการคำนวณ.....	95
4.17	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ที่เวลา 720 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการคำนวณ.....	96
4.18	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ที่เวลา 1440 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการคำนวณ.....	97
4.19	แผนภาพการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ที่เวลาต่างๆ ดังนี้ (a) 360, (b) 720, และ (c) 1440 นาที.....	98

4.20	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นของแข็งที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) 120 นาที, (□) 360 นาที, (◇) 720 นาที และ (○) 1440 นาที.....	100
4.21	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในแต่ละชั้นภายในชั้นของแข็งที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ (○) จุด D.....	101
4.22	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นของแข็ง ที่เวลา 360 นาที โดย (●) เป็นอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง และ (---) เป็นอุณหภูมิได้จากการคำนวณ.....	102
4.23	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นของแข็ง ที่เวลา 720 นาที โดย (●) เป็นอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง และ (---) เป็นอุณหภูมิได้จากการคำนวณ.....	103
4.24	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นของแข็ง ที่เวลา 1440 นาที โดย (●) เป็นอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง และ (---) เป็นอุณหภูมิได้จากการคำนวณ.....	104
4.25	แผนภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นของแข็ง ที่เวลาต่างๆ ดังนี้ (a) 360, (b) 720, และ (c) 1440 นาที.....	105
4.26	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 360 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเชิงเส้น	107

4.27	<p>กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 720 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเชิงเส้น</p>	108
4.28	<p>กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 1440 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเชิงเส้น</p>	109
4.29	<p>กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 360 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล.....</p>	110
4.30	<p>กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 720 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล.....</p>	111
4.31	<p>กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 1440 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล.....</p>	112
4.32	<p>แผนภาพความสัมพันธ์ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่เวลาต่างๆ ในวัฏภาคของเหลว ที่สภาวะอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) ดังนี้ (◇) PA:OA= 40:60, (□) PA:OA= 50:50 และ (△) PA:OA= 60:40.....</p>	116

4.33	แผนภาพความสัมพันธ์ค่าฟังก์ชันมวลที่เวลาต่างๆ ในวัฏภาคของเหลว ที่สภาวะ อุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยกำหนด อัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) ดังนี้ (\diamond) PA:OA= 40:60, (\square) PA:OA= 50:50 และ (\triangle) PA:OA= 60:40.....	117
4.34	แผนภาพความสัมพันธ์ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่เวลาต่างๆ ในวัฏภาคของเหลว โดยกำหนดอุณหภูมิ T_H และ T_W ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์ม มิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 โดยกำหนดอุณหภูมิ T_H/T_W ดังนี้ (\diamond) 70/30, (\square) 65/40 และ (\triangle) 60/40.....	120
4.35	แผนภาพความสัมพันธ์ค่าฟังก์ชันมวลที่เวลาต่างๆ ในวัฏภาคของเหลว ที่สภาวะ อัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 โดยกำหนดอุณหภูมิ T_H/T_W ดังนี้ (\diamond) 70/30, (\square) 65/40 และ (\triangle) 60/40.....	121
ก-1	ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของกรดปาล์มมิติกในสารผสมในหน่วยร้อยละโดยมวล..	131
ก-2	ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของกรดปาล์มมิติกในสารผสมในหน่วยกิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร.....	132

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยทั่วไปสารต่างๆในธรรมชาติมีคุณสมบัติเป็นสารผสม ซึ่งเป็นสารที่มีสารบริสุทธิ์มากกว่าหนึ่งสารเป็นองค์ประกอบ การแยกสารจึงเป็นเทคนิคที่สำคัญที่สามารถแยกสารบริสุทธิ์ภายในสารผสม เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆ น้ำมันธรรมชาติ (Natural oils) เป็นสารผสมชนิดหนึ่งที่เกิดจากการรวมตัวของไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) ซึ่งในไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยกรดไขมัน (fatty acids) หลากหลายชนิด (Johnson Rw. และคณะ (1989)) ยกตัวอย่างเช่น กรดไมริสติก (Myristic acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) กรดสเตียริก (Stearic acid) และกรดโอเลอิก (Oleic acid) เป็นต้น ซึ่งส่วนมากเป็นกรดไขมันที่พบมากในน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ กรดไขมันเป็นสารที่มีประโยชน์ เนื่องจากสามารถเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับเภสัชกรรม อาหาร และเชื้อเพลิง กรดไขมันสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ตามลักษณะของโครงสร้างของโมเลกุล ได้แก่ กรดไขมันชนิดอิ่มตัว (พันธะเดี่ยวเท่านั้น) และ กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (พันธะคู่มากกว่า 1 พันธะ) ทำให้กรดไขมันทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน โดยปกติกรดไขมันในน้ำมันธรรมชาติมักจะอยู่ในรูปของสารผสมของกรดไขมันหลายชนิด ในการนำกรดไขมันบริสุทธิ์แต่ละชนิดมาใช้ จึงต้องผ่านกระบวนการแยกสาร (Separation) หรือกระบวนการทำให้สารบริสุทธิ์ (Purification) เพื่อแยกองค์ประกอบที่ผสมกันให้แยกส่วนจากกัน และเพื่อนำส่วนที่แยกได้ไปใช้ประโยชน์เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมได้

การแยกสารเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยความแตกต่างของสมบัติต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทางกายภาพหรือทางเคมีของสารที่เป็นองค์ประกอบของสารผสมนั้นๆ มาใช้เป็นเกณฑ์ในการแยก ยกตัวอย่างเช่น จุดเดือด จุดเยือกแข็ง และสมบัติการละลาย เป็นต้น รวมทั้งต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพและความประหยัดด้วย การแยกสารมีหลายวิธี อันได้แก่ การกรอง (Filtration) การกลั่น (Distillation)

การระเหย (Evaporation) การตกตะกอน (Precipitation) การตกผลึก (Crystallization) และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Extraction) เป็นต้น เมื่อพิจารณาสารผสมอินทรีย์ (Organic compounds) ซึ่งเป็นประเภทของสารผสมที่พบบ่อยในธรรมชาติ วิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในแยกสารประเภทนี้คือ การกลั่น ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยคุณสมบัติความแตกต่างของจุดเดือดในการแยกสาร นั่นคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบอย่างต่อเนื่อง สารที่มีจุดเดือดต่ำจะสามารถแยกออกมาจากสารผสมได้ก่อนสารที่มีจุดเดือดสูงกว่า วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและเหมาะสมสำหรับสารผสมที่มีองค์ประกอบมากกว่าสองชนิดขึ้นไป แต่วิธีการกลั่นนี้มีข้อจำกัดมากมาย อันได้แก่ ในการดำเนินการต้องใช้สภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง และหอกลั่นต้องมีชั้นมากกว่า 100 ชั้น เพื่อให้สารที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งไม่สามารถดำเนินการในอุปกรณ์ขนาดเล็ก (Small-scale) ด้วยเหตุผลดังกล่าว วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมกับการแยกสารผสมของกรดไขมัน วิธีที่ใช้แยกสารรองจากวิธีการกลั่น ก็คือ การตกผลึก ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยความแตกต่างของจุดเยือกแข็งของสารเป็นหลัก โดยเมื่อลดอุณหภูมิของระบบจนถึงค่าอุณหภูมิหนึ่ง สารที่มีจุดเยือกแข็งสูงกว่าจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะของเหลวกลายเป็นสถานะของแข็ง และตกตะกอน ทำให้เกิดการแยกสารระหว่างสารที่เป็นของแข็งและสารที่เป็นของเหลว (Seader และคณะ (2006)) การแยกสารด้วยวิธีตกผลึกสามารถเลือกสารที่ต้องการแยกได้มาก (High Selectivity) สารที่แยกได้มีความบริสุทธิ์สูง (High purity) ใช้อุณหภูมิต่ำ (Low temperature) ลดการย่อยสลายทางความร้อน (Reduced thermal degradation) และลดจำนวนขั้นในการแยกสาร (Reduced number of stages) จากข้อดีดังกล่าว การตกผลึกจึงเหมาะสมในการแยกสารผสมที่ประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิด และเนื่องจากการตกผลึกนั้นสามารถทำให้หลายวิธี ได้แก่ การตกผลึกแบบแขวนลอย (Suspension crystallization) และการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง (Solid-layer crystallization) ซึ่งแตกต่างกันตรงลักษณะการเกิดผลึก ทำให้มีผลกระทบต่อกระบวนการแยกสาร จากงานวิจัยของ Matsuoka และคณะ (1996) พบว่า การตกผลึกแบบแขวนลอยมีประสิทธิภาพในการแยกสารได้ดีกว่าแบบชั้นของแข็ง แต่เมื่อพิจารณาสิ่งเจือปนที่อยู่ในสารผสม การตกผลึกแบบชั้นของแข็งสามารถกักเก็บสิ่งเจือปนไว้ภายในของแข็งได้ดีกว่า และแยกวัฏภาคของเหลวกับของแข็งได้ง่ายกว่าการตกผลึกแบบแขวนลอย โดยมียานวิจัยหลายงานวิจัยได้ศึกษาการแยกด้วยวิธีการตกผลึกแบบแขวนลอย ได้แก่ Dimick และคณะ

(1996) ได้แยกกรดไขมันต่างๆ จากไขมันนม และงานวิจัยได้ศึกษาการแยกด้วยวิธีการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง ได้แก่ Fukui K. และคณะ (2009) ได้ศึกษาการตกผลึกของสารผสมของกรดลอริก (Lauric acid) และกรดไมริสติก (Myristic acid) Peters-Erjawetz และคณะ (1999) ศึกษาการแยกกรดไขมันต่างๆจากเนยเหลว (Milk fat) Chaleepa และคณะ (2010) ศึกษาการแยกกรดไขมันต่างๆจากน้ำมันมะพร้าว (Coconut oil) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการตกผลึกสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแยกส่วน (Fractionation) สารผสมของกรดไขมันได้ ซึ่งกระบวนการแยกส่วนเป็นกระบวนการเพิ่มหรือลดปริมาณอัตราส่วนของสารที่ต้องการในสารผสมของกรดไขมัน และสารที่ได้จากการแยกส่วนสามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล ที่ถูกควบคุมคุณภาพของไบโอดีเซลด้วยองค์ประกอบของสารตั้งต้น (Antolin G. และคณะ (2002), Carla Cristina C.M. Silva และคณะ (2010), Hameed และคณะ (2009)) เนื่องจากไบโอดีเซลควรรักษาสถานะให้อยู่ในสถานะของเหลว นั้นหมายความว่าสารตั้งต้นในการผลิตควรประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นหลัก ซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดที่มีจุดเยือกแข็งต่ำ (Fangrui และคณะ (1999), Imahara และคณะ (2006))

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการแยกส่วนของสารผสมของกรดไขมัน โดยนำวิธีการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง (Solid-layer crystallization) และเทคนิคการทำให้สารเข้มข้นด้วยวิธีการแช่แข็ง (Freeze concentration) มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ (Nakagawa และคณะ (2010)) สารผสมกรดไขมันที่จำลองใช้ในงานวิจัย นั้นคือ สารผสมของกรดปาล์มมิติก (PA) และกรดโอเลอิก (OA) ซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและชนิดไม่อิ่มตัวที่พบมากในน้ำมันธรรมชาติชนิดต่างๆ ในกระบวนการตกผลึก สารผสมกรดไขมันจะถูกตกผลึกภายในภาชนะตกผลึก (Crystallizer) โดยควบคุมค่าความชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ระหว่างศูนย์กลางและภายนอกของภาชนะตกผลึก นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึกของสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก อันได้แก่ ค่าความชันของอุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกเริ่มต้นของสารผสม ปัจจัยทั้งสองเป็นตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมความเข้มข้นของกรดไขมันในบริเวณที่เป็น

สถานะของแข็งและของเหลว ในการแยกสารด้วยวิธีการตกผลึกนี้ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การถ่ายโอนความร้อนและมวลภายในภาชนะตกผลึก ซึ่งจะมีลักษณะหรือแนวโน้มที่แตกต่างกันไป ณ สภาวะที่ต่างกัน นั่นคือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Conduction coefficient) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Diffusion coefficient) จะแตกต่างกันด้วย จึงมีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าว เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษากลไกการแยกส่วนของสารผสมของกรดปาล์มมีติกและกรดโอเลอิกด้วยวิธีการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง

1.2.2 ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลของสารผสมของกรดปาล์มมีติกและกรดโอเลอิก โดยเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลว ในกระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมีติกภายในบริเวณส่วนที่มีสถานะเป็นของเหลว และการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของกรดปาล์มมีติกภายในบริเวณส่วนที่มีสถานะเป็นของแข็ง ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1.3.1.1 อัตราส่วนของอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อน (T_H) กับอุณหภูมิผนังภาชนะตกผลึก (Wall temperature (T_W)) (T_H/T_W) เท่ากับ 60/40, 65/40 และ 70/30 องศาเซลเซียส

1.3.1.2 อัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมีติกและกรดโอเลอิกเริ่มต้นของสารผสมกรดไขมัน (PA/OA) เท่ากับ 40:60, 50:50 และ 60:40 เปอร์เซ็นต์

1.3.2 คำนวณหาค่าฟลักซ์มวล (Mass flux) ของกรดปาล์มมีติกที่ถูกถ่ายโอนจากบริเวณส่วนที่มีสถานะเป็นของเหลวไปสู่บริเวณส่วนที่มีสถานะเป็นของแข็ง หรือชั้นของแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมีติกภายในบริเวณส่วนที่มีสถานะเป็นของเหลว ภายใต้เงื่อนไข 1.3.1.1 และ 1.3.1.2

1.3.3 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล โดยเปรียบเทียบจากลักษณะการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมีติกและการกระจายของอุณหภูมิภายในภาชนะตกผลึก

1.3.4 ศึกษาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและแบบเอกซ์โปเนนเชียลระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปภายในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้น

1.3.5 เปรียบเทียบลักษณะและขนาดของผลึกของกรดปาล์มมีติกที่เกิดขึ้น ณ จุดต่างๆ ภายในบริเวณส่วนที่มีสถานะเป็นของแข็ง หรือชั้นของแข็ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รับความรู้และความเข้าใจถึงกระบวนการการแยกส่วนของสารผสมของกรดปาล์มมีติกและกรดโอเลอิก ด้วยวิธีการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง

1.4.2 การแยกส่วนของสารผสมกรดไขมัน เป็นเทคนิคที่สามารถควบคุมปริมาณกรดไขมันชนิดใดชนิดหนึ่งให้ได้ในปริมาณที่ต้องการ เพื่อนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งต้องการควบคุมองค์ประกอบของสารตั้งต้นในการผลิต โดยเฉพาะการผลิตไบโอดีเซล

บทที่ 2

ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

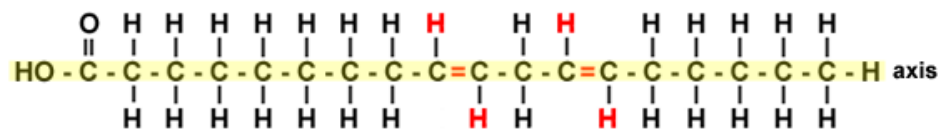
2.1 กรดไขมัน (Fatty acid) (ดาวัลย์ ฉิมภู และคณะ (2553))

กรดไขมัน (Fatty Acid) เป็นไฮโดรคาร์บอนแบบไม่มีซัลฟ์ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 4 ถึง 24 อะตอม ปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) (R-COOH) กรดไขมันที่พบมากในน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ในธรรมชาติจะมีจำนวนคาร์บอน (C) เป็นเลขคู่อยู่ระหว่าง 14-22 C อะตอม โดยเฉพาะ C16 และ C18 พบมากที่สุด โดยอาจมีโครงสร้างเป็นโซ่ยาวที่อิ่มตัว (ไม่มีพันธะคู่ (saturated fatty acid)) หรือไม่อิ่มตัว (มีพันธะคู่ 1 คู่ (monounsaturated fatty acid)) หรือมากกว่า (polyunsaturated fatty acid)) ซึ่งแต่ละชนิดมีความยาวของสายโซ่ ตำแหน่ง และจำนวน ของพันธะเดี่ยวหรือคู่แตกต่างกัน จึงมีความอิ่มตัวไม่เท่ากัน

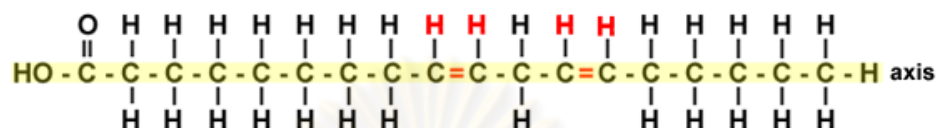
2.1.1 ประเภทของกรดไขมัน

กรดไขมันสามารถแบ่งตามโครงสร้างได้ 2 ชนิด ได้แก่

2.1.1.1 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) เป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมเรียงตัวกันเป็นโซ่ยาวตรงยึดกันด้วยพันธะเดี่ยว (C-C) มีสูตรทั่วไปคือ $C_nH_{2n+1}COOH$ เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็ม กรดไขมันอิ่มตัวนี้ ร่างกายสามารถสังเคราะห์ขึ้นมาเองได้ จึงจัดว่าเป็นกรดไขมันที่ไม่จำเป็น (Nonessential fatty acid) กรดไขมันส่วนใหญ่เป็นเลขคู่มี C ตั้งแต่ 16-18 ตัว เช่น กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) มีจำนวนคาร์บอน 16 ตัว และกรดสเตียริก (Stearic acid) มีจำนวนคาร์บอน 18 ตัว ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ เป็นต้น



linoleic acid: *trans* configuration (*trans* isomer)



linoleic acid: *cis* configuration (*cis* isomer)

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกรดไลโนเลอิก

(<http://waynesword.palomar.edu/plmar99.htm>)

2.1.2 ประโยชน์ของกรดไขมัน

2.1.2.1 ประโยชน์ต่อร่างกาย มีดังนี้

- ให้พลังงาน ไขมัน 1 กรัม ให้พลังงาน 9.1 กิโลแคลอรี
- เป็นตัวทำละลายวิตามินในไขมัน คือวิตามินเอ ดี อี และเค
- เป็นอาหารสะสมของร่างกาย จะถูกนำมาเผาผลาญให้พลังงาน เมื่อเกิดภาวะขาดแคลนอาหาร
- ช่วยป้องกันการกระทบกระเทือนของอวัยวะภายใน
- ป้องกันความร้อนภายใน ให้ออกสู่ภายนอกอย่างช้าๆ ซึ่งจะสังเกตได้จากคนอ้วนจะไม่ค่อยรู้สึกร้อนในขณะที่อากาศเย็น
- เป็นโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์
- เป็นส่วนประกอบของระบบต่างๆ ในร่างกาย เช่นระบบประสาท เนื้อเยื่อ
- เป็นสารตั้งต้นของวิตามินและฮอร์โมนหลายชนิด เช่น วิตามินดี อี และฮอร์โมนพวงสเตรอยด์

การรับประทานอาหาร ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันชนิดอิ่มตัวในปริมาณที่มากเกินไปเกินกว่าความต้องการของร่างกายจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้ เนื่องจากเมื่อร่างกายมีกรดไขมันอิ่มตัวปริมาณมาก กรดไขมันอิ่มตัวบางส่วนจะรวมตัวกับคอเลสเตอรอลในกระแสเลือด แล้วตกตะกอนเกาะอยู่ตามผนังหลอดเลือด เมื่อสะสมมาก ๆ ก็จะทำให้เกิดการอุดตันของหลอดเลือด ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคหลอดเลือดอุดตัน โรคหัวใจ และอาการอัมพาตได้

2.1.2.2 ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ (Tao และคณะ (2007)) ยกตัวอย่างเช่น

- กรดลอริก ใช้ทำเป็นเรซินในอุตสาหกรรมสี
- กรดปาล์มมิติก ใช้ในการเลี้ยงเชื้อราเพื่อสกัดเป็นยาปฏิชีวนะ ผสมกับกรดสเตียริก เพื่อทำเทียนไข
- กรดโอเลอิก ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ
- กรดสเตียริก ใช้ในการผลิตเครื่องสำอาง สบู่เด็ก ผสมกับกรดปาล์มมิติกเพื่อทำเทียนไข
- กรดลิโนเลอิก ใช้เป็นยาฉีดสำหรับลดไขมันในเส้นเลือด

นอกจากนี้กรดไขมันสามารถเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมพลังงาน (ไบโอดีเซล) หรือใช้เป็นสารสำหรับผลิตอนุพันธ์ของกรดไขมันประเภทต่างๆ เช่น

- Fatty Alcohol ใช้ประโยชน์ในการผลิต Sodium Alkyl Sulphates และ Surfactant ที่ใช้ผลิตผงซักฟอก
- Fatty Acid Amides มีคุณสมบัติช่วยกันน้ำ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การผลิตกระดาษ ไม้อัด โลหะ ยาง
- Fatty Amines ที่มีความสำคัญนิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การผลิตพลาสติก น้ำมันหล่อลื่น สารควบคุมเชื้อราและแบคทีเรีย

โดยทั่วไปกรดไขมันแต่ละชนิดจะไม่พบอยู่ในรูปอิสระ แต่จะพบในรูปของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับกลีเซอรอล ในการใช้ประโยชน์จากกรดไขมันแต่ละชนิด ต้องผ่านกระบวนการแยกก่อนนำไปใช้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษากระบวนการแยกสารผสมที่มีองค์ประกอบของกรดไขมัน โดยได้จำลองสารผสมของกรดไขมันเพื่อใช้สารตั้งต้นในกระบวนการแยก จากการพิจารณา กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) และกรดโอเลอิก (Oleic acid) เป็นกรดไขมันที่ถูกเลือก เนื่องจากกรดไขมันทั้งสองชนิดนี้เป็นกรดไขมันที่พบมากในธรรมชาติและเป็นองค์ประกอบของน้ำมันธรรมชาติหลายชนิด ดังตารางที่ 2.1 และนอกจากนี้ยังเป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและชนิดไม่อิ่มตัว ตามลำดับ ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้นำกรดไขมันทั้งสองชนิดนี้มาใช้เป็นสารผสมเริ่มต้น เพื่อศึกษาการแยกสารผสมที่ส่วนประกอบเป็นกรดไขมันสองชนิด ซึ่งมีโดยกระบวนการแยกที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกอธิบายต่อไป



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)

(<http://www.indiana.edu/~oso/Fat/SolidNLiquid.html>)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันธรรมชาติ ในหน่วยร้อยละโดยมวลของกรดไขมันทั้งหมด (<http://www.scientificpsychic.com/fitness/fattyacids1.html>)

Oil or Fat	Saturated				Mono unsaturated	Poly unsaturated	
	Lauric Acid C12:0	Myristic Acid C14:0	Palmitic Acid C16:0	Stearic Acid C18:0		Oleic Acid C18:1	Linoleic Acid C18:2
Almond Oil	-	-	7	2	69	17	-
Canola Oil	-	-	4	2	62	22	10
Cocoa Butter	-	-	25	38	32	3	-
Cod Liver Oil	-	8	17	-	22	5	-
Coconut Oil	47	18	9	3	6	2	-
Corn Oil (Maize Oil)	-	-	11	2	28	58	1
Cottonseed Oil	-	1	22	3	19	54	1
Flaxseed Oil	-	-	3	7	21	16	53
Grape seed Oil	-	-	8	4	15	73	-
Olive Oil	-	-	13	3	71	10	1
Palm Oil	-	1	45	4	40	10	-
Palm Olein	-	1	37	4	46	11	-
Palm Kernel Oil	48	16	8	3	15	2	-
Peanut Oil	-	-	11	2	48	32	-
Sesame Oil	-	-	9	4	41	45	-
Shea nut	1	-	4	39	44	5	-
Soybean Oil	-	-	11	4	24	54	7
Sunflower Oil	-	-	7	5	19	68	1

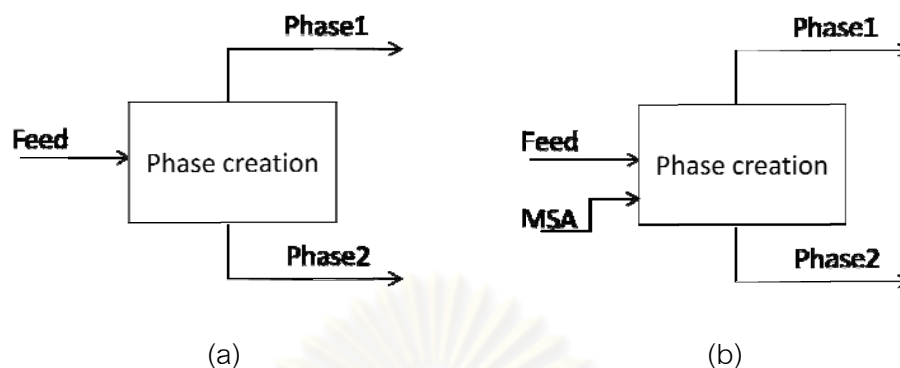
2.2 กระบวนการการแยกสาร (Separation processes) (Seader และคณะ (2006))

สารต่างๆ ที่อยู่ในธรรมชาติส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปของสารผสม ไม่ว่าจะเป็นสารเนื้อเดียวหรือสารเนื้อผสม การแยกสารจึงเป็นเทคนิคสำคัญ เพื่อแยกนำสารองค์ประกอบของสารผสมนั้นมาใช้ประโยชน์ต่างๆ เทคนิคการแยกมีหลายวิธี การเลือกวิธีการแยกสาร จึงเป็นปัจจัยหลัก เพื่อให้เหมาะสมและให้ความบริสุทธิ์ของสารที่ต้องการสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะพิจารณาความแตกต่างของคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารองค์ประกอบที่ต้องการแยกเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น ขนาดของโมเลกุล สมบัติการละลาย เป็นต้น

สารที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ไม่ว่าจะเป็นอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ สามารถนำมาผ่านกระบวนการแยก และได้ผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด โดยกลไกที่ใช้ในการแยกสาร มีดังนี้

2.2.1 การแยกสารโดยสร้างวัฏภาคอื่นเข้ามาช่วย (Phase creation) หรือโดยเติมวัฏภาคอื่นเข้ามาช่วย (Phase addition)

การแยกสารโดยสร้างวัฏภาคอื่นเข้ามาช่วย เป็นกลไกที่ใช้มากในอุตสาหกรรม โดยใช้พลังงาน (Energy-separating agent (ESA)) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนในการสร้างวัฏภาคใหม่ อาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ซึ่งวัฏภาคที่เกิดขึ้นจะทำให้สารตั้งต้นเปลี่ยนจากสารเนื้อเดียวเป็นสารเนื้อผสม ส่วนการแยกสารโดยการเพิ่มวัฏภาค ทำโดยเติมสารในการแยก (Mass-separating agent (MSA)) และทำให้สารที่ต้องการละลายอยู่ในสาร MSA ในปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม การแยกสารซึ่งอาศัยพลังงาน ESA มาช่วยในการสร้างวัฏภาคนั้น เป็นกลไกที่ง่ายกว่า การใช้สาร MSA เนื่องจากต้องเพิ่มกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสาร MSA เพื่อสามารถนำสาร MSA กลับมาใช้ในกระบวนการแยกอีกครั้ง



รูปที่ 2.6 กลไกการแยกสาร (a) การสร้างวัฏภาค (b) การเพิ่มวัฏภาค
(Seader และคณะ (2006))

ตัวอย่างกระบวนการแยกสารที่อาศัยพลังงาน ESA ได้แก่ การระเหย (Vaporization) การกลั่น (Distillation) การตกผลึก (Crystallization) เป็นต้น และตัวอย่างกระบวนการแยกโดยการเติมสาร MSA ได้แก่ การดูดซึม (Absorption) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-liquid extraction) เป็นต้น

2.2.2 การแยกสารโดยใช้วัสดุขวาง (Barrier separation)

การแยกสารในเทคนิคนี้ อธิบายง่ายๆ ก็คือการแยกที่ใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane) ซึ่งอาจจะทำมาจากเส้นใยธรรมชาติ หรือเส้นใยโพลีเมอร์สังเคราะห์ เป็นตัวกลางนั่นเอง โดยอาศัยความแตกต่างของสมบัติในการละลายภายในเยื่อเลือกผ่านและอัตราการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน ยกตัวอย่างเช่น การออสโมซิส (Osmosis) ซึ่งเป็นการแยกที่อาศัยความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) โดยจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อย

2.2.3 การแยกสารโดยใช้วัสดุภายนอกเข้ามาช่วย (Solid agent separation)

การแยกสารโดยใช้วัสดุภายนอกเข้ามาช่วย อันได้แก่ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) โครมาโตกราฟี (Chromatography) และการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) โดยวัสดุภายนอก อาจเป็นของแข็งหรือของเหลว และมักอยู่ในรูปของอนุภาคเล็ก (Granular material) หรือถูกบรรจุในคอลัมน์ ทำหน้าที่เป็นตัวนำสารที่ต้องการออกจากสารผสม

2.2.4 การแยกสารโดยใช้แรงภายนอกเข้ามาช่วย (Separation by gradient)

แรงภายนอก สามารถทำหน้าที่เป็นแรงกระตุ้นในกระบวนการแยกสาร ซึ่งแรงนี้จะส่งผลต่อโมเลกุลและประจุของสารภายในสารผสม โดยทั่วไปกระบวนการแยกที่อาศัยกลไกนี้ได้แก่ การหมุนเหวี่ยง (Centrifugation) การแพร่ทางความร้อน (Thermal diffusion) และการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) โดยใช้แรงเหวี่ยง (Centrifugal force) ความแตกต่างทางอุณหภูมิ (Thermal gradient) และแรงทางไฟฟ้า (Electrical force) เป็นแรงภายนอก ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม กระบวนการแยกสารมีหลายวิธี การเลือกวิธีการแยกที่เหมาะสมจึงเป็นหลักการสำคัญ ที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยตัวแปรสำคัญในการพิจารณาเลือกกระบวนการแยก ได้แก่ สภาวะของสายป้อนเข้า (Feed condition) สภาวะของสายผลิตภัณฑ์ (Product condition) คุณสมบัติที่แตกต่างกันของสารที่ต้องการแยก และลักษณะการดำเนินการในกระบวนการแยก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเลือกกระบวนการแยกที่เหมาะสม (Seader และคณะ (2006))

A. สภาวะของสายป้อนเข้า
<ol style="list-style-type: none"> 1. องค์ประกอบของสารผสม และความเข้มข้นของสารองค์ประกอบ 2. อัตราการไหลของสายป้อนเข้า 3. อุณหภูมิ 4. ความดัน 5. สถานะของสาร (ของแข็ง, ของเหลว และ/หรือก๊าซ)
B. สภาวะของสายผลิตภัณฑ์
<ol style="list-style-type: none"> 1. ความบริสุทธิ์ที่ต้องการ 2. อุณหภูมิ 3. ความดัน 4. สถานะของสาร
C. คุณสมบัติที่ต่างกันของสารที่ต้องการแยก
<ol style="list-style-type: none"> 1. โมเลกุล 2. อุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) 3. การถ่ายโอน (Transport)
D. ลักษณะการดำเนินการในกระบวนการแยก
<ol style="list-style-type: none"> 1. ง่ายต่อการเพิ่มขนาด (Ease of scale-up) 2. ง่ายต่อการแสดงผล (Ease of staging) 3. อุณหภูมิ, ความดัน และ สถานะของสาร ในระหว่างการดำเนินการ 4. ข้อจำกัดของขนาดของสาร 5. ความต้องการทางด้านพลังงาน

จากตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญเพื่อใช้ในการเลือกกระบวนการแยกสารที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาการแยกสารผสมที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ โดยทั่วไปวิธีที่ใช้แยกสารผสมอินทรีย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือกระบวนการการกลั่น ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้แยกสารออกจากสารละลายที่เป็นของเหลว โดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือด การกลั่นจึงเป็นกระบวนการที่ทำให้ของเหลวได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วทำให้ควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวอีก ในขณะที่กลั่น ของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ จะกลายเป็นไอแยกออกมาก่อน ของเหลวที่มีจุดเดือดสูงขึ้น จะกลั่นแยกออกมาทีหลัง กระบวนการกลั่นจึงต้องอาศัยสภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูงกว่ากระบวนการแยกอื่นๆ ด้วยเหตุที่ต้องใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะของสาร และไม่เหมาะกับสารผสมที่ประกอบด้วยสารที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน การตกผลึกจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่สามารถใช้ในการแยกสารผสมกรดอินทรีย์ได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการแยกที่อาศัยความแตกต่างของจุดเยือกแข็งของสาร จึงใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่ากระบวนการกลั่น นอกจากนี้สามารถเลือกสารที่ต้องการแยกได้มาก และสารที่ตกผลึกยังมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งการตกผลึกนี้จะถูกอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.3 การตกผลึก (Crystallization) (Paul และคณะ (2005))

การตกผลึก คือกระบวนการเกิดผลึกของแข็งจากสารละลาย (Solution) จากของเหลว (Melt) หรือไอ (Vapor) ที่มีการรวมตัวเป็นของแข็งจากขนาดเล็กๆ แล้วมีการเพิ่มขนาดขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นกระบวนการแยกที่เก่าแก่และนิยมใช้ในอุตสาหกรรมทางเคมี และอุตสาหกรรมยา การตกผลึกเป็นการแยกสารที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะประสิทธิภาพทางด้านพลังงาน จะประหยัดกว่าการแยกสารโดยการกลั่นและการสกัดระหว่างของเหลวกับของเหลว

การตกผลึกสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ การตกผลึกจากสารละลาย (Solution crystallization) และการตกผลึกจากสารหลอม (Melt crystallization) ซึ่งทั้งสองประเภทแตกต่างกันที่การตกผลึกจากสารละลายจะใช้สารละลายมาช่วยในการตกผลึก โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของการตกผลึกทั้งสอง ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างการตกผลึกจากสารละลาย (Solution crystallization) กับการตกผลึกจากสารเหลว (Melt crystallization)

คุณสมบัติ	การตกผลึกจากสารละลาย (Solution crystallization)	การตกผลึกจากสารเหลว (Melt crystallization)
อุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึก	สูง	ต่ำ
ประสิทธิภาพในการแยกสาร	ดี	ดีมาก
ความหนืดของสาร	สูง	ต่ำ
อัตราการเกิดผลึก	ปานกลาง	ดี
ขนาดอุปกรณ์ในการตกผลึก	เล็ก	ใหญ่
ความต้องการนำตัวทำละลาย	ไม่มี	มี

หลักการของการตกผลึกอาศัยสมบัติการละลายของสาร เมื่อทำการตกผลึกจากสารละลาย เนื่องจากการตกผลึกจะเกิดขึ้นได้ สารละลายจะต้องเป็นสารละลายที่อิ่มตัว นอกจากนี้ในการตกผลึกจากสารหลอมเหลวต้องอาศัยความแตกต่างของจุดเยือกแข็งของสาร นั่นคือ สารที่มีจุดเยือกแข็งสูงกว่าจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะของเหลวกลายเป็นสถานะของแข็ง และตกตะกอนก่อนสารที่มีจุดเยือกแข็งต่ำกว่า และทำให้เกิดการแยกสารระหว่างสารที่เป็นของแข็งและสารที่เป็นของเหลว (Seader และคณะ (2006))

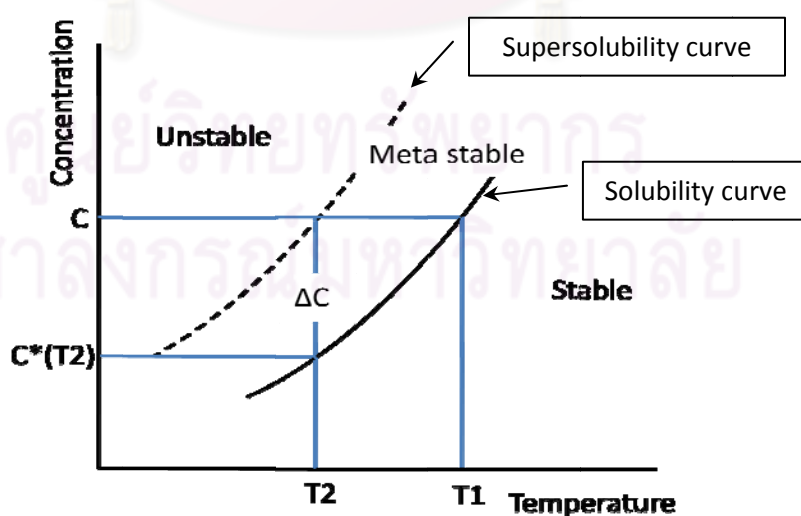
ค่าการละลาย (Solubility) ของตัวถูกละลายในสารละลาย คือค่าความเข้มข้นที่มากที่สุดของตัวถูกละลาย ที่สามารถละลาย (Dissolution) ในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ และสารละลายที่สภาวะนี้จะอิ่มตัวด้วยตัวถูกละลาย (Saturation) จึงเรียกสารละลายนี้ว่า สารละลายอิ่มตัว (Saturated solution)

สมดุลของวัฏภาคระหว่างของเหลวกับของแข็งในของผสมชนิดที่มีองค์ประกอบ 2 องค์ประกอบ ณ อุณหภูมิต่างๆ สามารถแสดงในค่าของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายอิ่มตัวนั้น ซึ่งส่วนมากจะแสดงในรูปแบบของกราฟสมดุล (equilibrium diagram) ของแต่ละสารละลาย ดังต่อไปนี้

1. สารละลายชนิด 2 องค์ประกอบเมื่อมีการตกผลึกแล้ว ไม่เกิดสารประกอบกับตัวทำละลาย สารละลายชนิดนี้มักพบบ่อยและเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุด
2. สารละลายชนิด 2 องค์ประกอบเมื่อมีการตกผลึกแล้วเกิดสารประกอบกับตัวทำละลาย

2.3.1 สภาพอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation)

กราฟสภาพอิ่มตัวและสภาพอิ่มตัวยิ่งยวด เมื่อทำสารละลายอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T1 ให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วกลายเป็นอุณหภูมิต่ำกว่า T2 พบว่าไม่เกิดวัฏภาคของของแข็งขึ้นอย่างทันทีทันใด ด้วยเหตุนี้ ความเข้มข้นของสารละลายจึงมีค่ามากกว่าความเข้มข้นที่อิ่มตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า T2 และที่จุดนี้เรียกว่า “สารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด” ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่าการละลายและค่าอิ่มตัวยิ่งยวด

ค่าความแตกต่างของความเข้มข้น $C-C^*$ (T_2) เรียกว่าสภาพอิ่มตัวยิ่งยวด ถ้าทำให้สารละลายเย็นลงเรื่อยๆ จากอุณหภูมิหนึ่ง พบว่ามีผลึกเป็นเกล็ดเล็กๆ เกิดขึ้นมากมาย ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเรียกว่า การเกิดเกล็ดผลึก (nucleation)

สภาพอิ่มตัวยิ่งยวดตั้งแต่เริ่มมีปรากฏการณ์การเกิดเกล็ดผลึก เรียกว่า สภาพอิ่มตัวยิ่งยวดจำกัด (Limits of supersaturation) นอกจากนี้ สามารถทำให้เกิดสภาพอิ่มตัวยิ่งยวดได้โดยวิธีการระเหยเอาตัวทำละลายออกจากสารละลาย หรือใช้ปฏิกิริยาเคมีเข้าช่วย จากรูปที่ 2.7 กราฟของสภาพอิ่มตัวและกราฟของสภาพอิ่มตัวยิ่งยวดทั้ง 2 เส้น แบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 เขต ดังนี้

1. เขตเสถียร (stable) เป็นบริเวณของความเข้มข้นที่อยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟสภาพอิ่มตัว บริเวณนี้ถ้านำผลึกชนิดเดียวกับตัวถูกละลายมาวาง ผลึกนั้นจะละลายหายไปในการละลาย
2. เขตกึ่งเสถียร (meta stable) เป็นบริเวณระหว่างเส้นกราฟทั้งสอง ซึ่งสารละลายที่บริเวณนี้จะเป็นสารละลายอิ่มตัวจะไม่มีอาการตกผลึกขึ้นมาเอง แต่ถ้าผลึกอยู่ในสารละลายนี้ ผลึกจะโตขึ้นอีก
3. เขตไม่เสถียร (unstable) เป็นบริเวณอยู่เหนือกราฟอิ่มตัวยิ่งยวด สารละลายขณะนี้จะอิ่มตัวยิ่งยวด ดังนั้นจึงสามารถเกิดการตกผลึกออกมาเองได้

การตกผลึกประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักที่สำคัญ คือ การเกิดเกล็ดผลึก (Nucleation) และการโตของผลึก (Crystal Growth)

2.3.2 การเกิดเกล็ดผลึก (Nucleation)

สำหรับขั้นตอนการเกิดเกล็ดผลึก สามารถเกิดขึ้นได้ในสารละลายที่ไม่มีผลึกอยู่ในรูปของสารแขวนลอย ซึ่งเรียกรวมการเกิดเกล็ดผลึกชนิดนี้ว่า การเกิดเกล็ดผลึกปฐมภูมิ (Primary nucleation) ส่วนการเกิดเกล็ดผลึกที่เกิดในสารละลายที่มีเกล็ดของผลึกอยู่ในสารละลายแล้ว เรียกว่า การเกิดเกล็ดผลึกทุติยภูมิ (Secondary nucleation)

การเกิดเกิดผลึกปฐมภูมิ เป็นการเกิดผลึกขึ้นเองในสารละลาย ซึ่งอาจแบ่งเป็น

- แบบเอกพันธ์ (Homogeneous) คือเกิดขึ้นเองจริงๆ ในสารละลาย
- แบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) คือ เกิดผลึกได้โดยอาศัยสิ่งเทียมหรือผงต่างๆ เป็นตัวเหนี่ยวนำ

2.3.2.1 กลไกการเกิดเกิดผลึกปฐมภูมิ (Primary nucleation)

สารละลายที่เข้มข้นมากๆ ถูกแรงภายนอกกระทำเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลเป็นกลุ่มเล็ก (Aggregate) จากนั้น กลุ่มเล็กๆ เหล่านี้จะรวมเป็นผลึกเล็กๆ เรียกว่า nuclei ปฏิกิริยาการเกิดดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (Free energy) ของระบบ ΔG ซึ่งเป็นผลรวมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการรวมตัวเป็นกลุ่มของโมเลกุลตัวถูกละลาย ΔG_v ซึ่งมีค่าเป็นลบ และการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีอิสระของการเกิดผิวใหม่ ΔG_s ซึ่งมีค่าเป็นบวก สมการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีอิสระของระบบ แสดงได้ดังนี้

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_s \quad (2.1)$$

G_v คือ พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (Volume free energy)

G_s คือ พลังงานอิสระเชิงพื้นผิว (Surface free energy)

สรุปได้ว่า การเกิดเกิดผลึกได้นั้น ระบบจำเป็นต้องมีเอนทาลปีอิสระสูงกว่า ΔG_c ซึ่งเรียกว่า พลังงานอิสระวิกฤต ระบบเอาค่าพลังงานจำนวนนี้มาจากศักย์ภาพทางเคมีของตัวถูกละลายในสารละลายนั้น เมื่อสารละลายนั้นมีค่าอิ่มตัวยิ่งยวดที่พอเหมาะก็จะทำให้ ΔG ของระบบมีค่ามากกว่า ΔG_c จึงทำให้เกิดผลึกได้ ดังนั้น ค่าอิ่มตัวยิ่งยวดขณะนี้เรียกได้ว่าเป็นค่าอิ่มตัวยิ่งยวดวิกฤต (Critical supersaturation)

ในกรณีการเกิดแกนผลึกปฐมภูมิซึ่งต้องการตัวเหนี่ยวนำในการเกิดแกนผลึกนั้น ตัวเหนี่ยวนำ (สิ่งแปลกปลอมหรือฝุ่นผงต่างๆ) จะลดค่า ΔG_s ซึ่งมีผลทำให้ค่า ΔG_c ลดลงจากเดิมอีก เป็นการสนับสนุนให้เกิดแกนผลึกได้ดีกว่าเดิม จะเห็นว่ากลไกที่อธิบายมานี้ สามารถอธิบายการเกิดแกนผลึกทั้งแบบเอกพันธ์ และแบบวิวิธพันธ์

2.3.2.2 กลไกการเกิดแกนผลึกทุติยภูมิ (Secondary nucleation)

การเกิดแกนผลึกทุติยภูมิเป็นการเกิดเกิดผลึกเล็กๆ จำนวนมากในสารละลาย ซึ่งมีการหว่านผลึกเล็กๆ เป็นตัวเหนี่ยวนำ โดยผลึกเหนี่ยวนำนี้เป็นสารเดียวกับตัวถูกละลาย กระบวนการที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในการเกิดผลึก ได้แก่

กระบวนการเสียดสี (Attrition process)

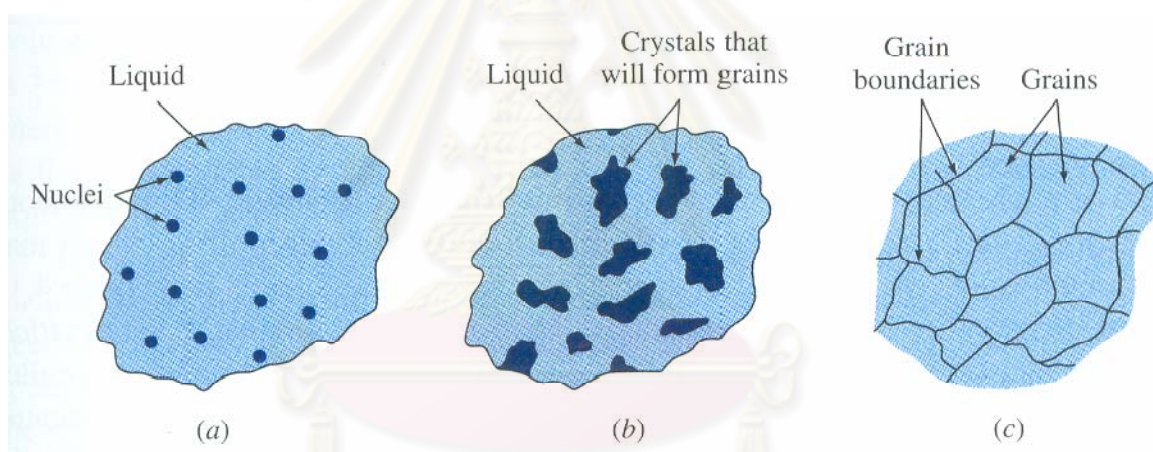
เกิดขึ้นเมื่อผิวของผลึกเล็กๆ ที่ใส่ลงในสารละลาย เพื่อเป็นการเหนี่ยวนำ มีลักษณะหยาบและบริเวณผิวหยาบนี้ จะมีโหนดของส่วนผลึกยื่นออกมา ซึ่งโหนดนี้สามารถแตกหลุดออกจากผลึกเดิมเนื่องจากถูกแรงภายนอกกระทำทันทีทันใด หรือกระทบกันเอง หรือ กระทบกับตัวกวน ส่วนที่หลุดมานี้จะเป็นตัวผลึก และมีขนาดโตต่อไป และในที่สุดจะพบผลึกอยู่มากมาย

กระบวนการเกิดขอบเขตจำกัด (Boundary limit process)

เป็นกระบวนการที่เกิดบริเวณรอยต่อระหว่างผลึกที่ใส่ลงไปเพื่อการเหนี่ยวนำกับสารละลาย มีกลุ่มโมเลกุล (aggregate) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสารละลาย กลุ่มโมเลกุลนี้ถูกดึงมาที่ผิวของผลึกเพื่อเหนี่ยวนำด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เมื่อสารละลายเกิดอิมิตวียิ่งยวด กลุ่มโมเลกุลสามารถเปลี่ยนเป็นแกนผลึก (nuclei) หรือบางครั้งอาจถูกแรงกระทำ ทำให้กลุ่มโมเลกุลที่หลุดออกไปยังสารละลาย ถ้าขนาดของกลุ่มโมเลกุลโตกว่าขนาดวิกฤต จะทำให้มันกลายเป็นแกนผลึกและโตขึ้นเรื่อยๆ

2.3.3 การขยายขนาดของผลึก (Crystal Growth)

หลังจากที่แกนผลึก (nuclei) เกิดขึ้นมาแล้ว แกนผลึกก็จะพยายามดึงอะตอมจากของเหลวเข้ามารวมเพื่อให้เติบโตจนกลายเป็นผลึก ซึ่งโครงสร้างอะตอมในผลึกนั้นก็จะมีโครงสร้างเป็นปกติโดยทั่ว ๆ ไปทั้งหมด แต่ทิศทางของการเรียงตัวของผลึกที่เกิดขึ้นแต่ละผลึกอาจจะมีการเรียงตัวในทิศทางที่แตกต่างกัน (ดังรูปที่ 2.8b) เมื่อการแข็งตัวของสารสิ้นสุดลงจะพบว่า ผลึกที่อยู่ติดกันจะมาชนกันในทิศทางที่แตกต่างกัน ดังนั้นที่ขอบของผลึกเล็ก ๆ จำนวนมากนี้เรียกว่า Polycrystalline และผลึกที่อยู่ใต้นั้นเรียกว่าเกรน (Grain) และพื้นผิวที่เกิดขึ้นระหว่างเกรนเรียกว่าขอบเกรน (Grain boundaries)

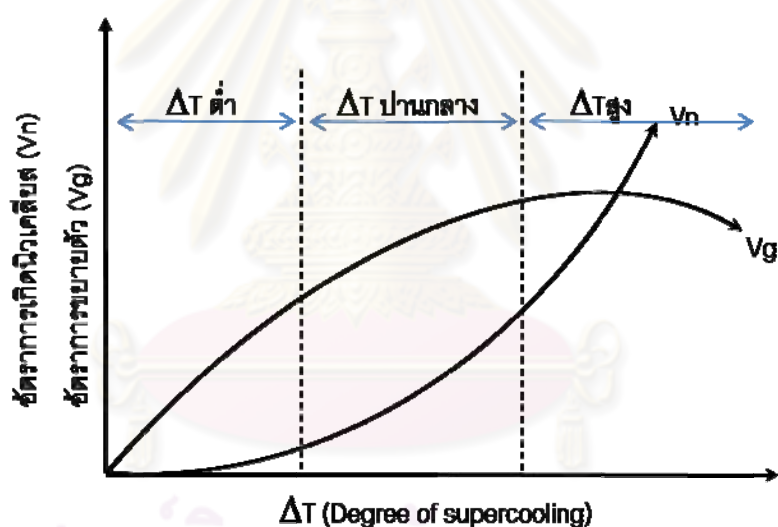


รูปที่ 2.8 การเกิดเกิดผลึก (Nucleation) และการขยายขนาดของผลึก (Crystal Growth) จนเป็น

เกรน

(<http://www.benbest.com/cryonics/lessons.html>)

ขนาดของเกรนจะเล็กหรือใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว คือถ้าเย็นตัวโดยทันทีทันใด หรือเร็วมาก เกรนที่จะได้มีขนาดละเอียด หรือถ้าเย็นตัวช้า ๆ เกรนที่ได้ก็มีขนาดใหญ่ (ฟิสิกส์ราชมงคลและคณะ (2000)) จากรูปที่ 2.9 เมื่อ ΔT มีค่าน้อยๆค่าจำนวนผลึกและอัตราการขยายตัวจะเพิ่มขึ้นในอัตราสม่ำเสมอ และเมื่อ ΔT มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการเกิดผลึกจะเพิ่มขึ้นมาก แต่ค่าอัตราการขยายตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อ ΔT มีค่าสูงมากๆ อัตราการเกิดนิวเคลียสจะเพิ่มขึ้นในอัตราสูง แต่การขยายตัวของผลึกกลับลดลง อย่างไรก็ตามในการเกิดผลึกของสารแต่ละชนิดจะเกิดผลึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของสารนั้นๆ (พรวิสา วงศ์ปัญญา และคณะ (2551))



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของ ΔT , อัตราการเกิดผลึก และอัตราการขยายตัวของผลึก

(http://www.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/2/material/IE2302_CH4.pdf)

จากความแตกต่างของคุณสมบัติการตกผลึกจากสารละลายและจากสารหลอม ในงานวิจัยนี้ การตกผลึกจากของเหลวเป็นที่น่าสนใจมากกว่าการตกผลึกจากสารละลาย เนื่องจากไม่ใช้ตัวทำละลายในการตกผลึก และสามารถเพิ่มขนาดของภาชนะตกผลึกได้

2.4 การตกผลึกจากสารหลอม (Melt crystallization) (Jones และคณะ (2006))

เป็นกระบวนการตกผลึกสามารถใช้กับการแยกสารอินทรีย์ ซึ่งมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกัน หรือเป็นสารที่ธาตุองค์ประกอบเหมือนกันแต่คุณสมบัติต่างกัน หรือเป็นสารที่มีความไวต่อความร้อน เป็นต้น การตกผลึกจากสารหลอมแตกต่างจากการตกผลึกแบบอื่นๆ ตรงที่อุณหภูมิในการตกผลึกมีค่าใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวขององค์ประกอบหลักของสารผสม จึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมเคมี และวิธีนี้ถือเป็นเทคโนโลยีสะอาด (Clean technology) สำหรับการแยกสารประกอบอินทรีย์ เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวทำละลายในกระบวนการ

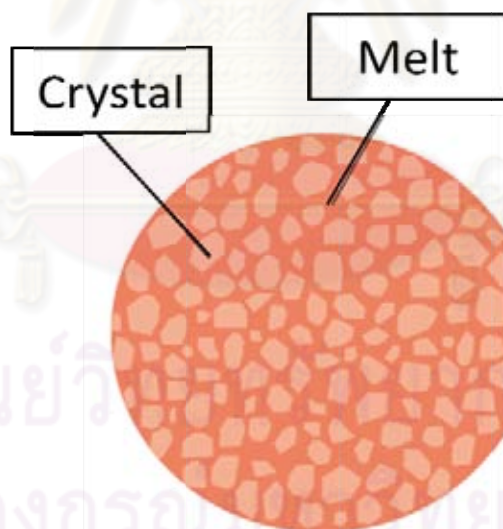
2.4.1 ข้อดีของกระบวนการตกผลึกจากสารหลอม

- โดยทั่วไปกระบวนการตกผลึก ต้องใช้พลังงานในการลดอุณหภูมิ โดยเฉพาะการตกผลึกประเภทนี้ ซึ่งน้อยกว่า 2-5 เท่าของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่น
- ประสิทธิภาพในการแยก สารที่ได้จากการแยกเป็นสารที่มีความบริสุทธิ์สูง
- เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวทำละลาย จึงปลอดภัยต่อคนและสิ่งแวดล้อม ทำให้วิธีการแยกนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร
- อุณหภูมิที่ใช้ในการแยกต่ำ เมื่อเทียบกับกระบวนการกลั่น เหมาะสำหรับสารที่ไวต่อความร้อน

การตกผลึกจากสารหลอมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ตามลักษณะการแยก ดังนี้

2.4.2 การตกผลึกแบบแขวนลอย (Suspension crystallization)

การเกิดผลึกของกระบวนการตกผลึกแบบแขวนลอยนี้ อาศัยความแตกต่างของแรงขับเคลื่อน (Driving force) ซึ่งได้แก่ ความแตกต่างของ chemical potentials อัตราส่วนทางกายภาพของสาร และพื้นที่ผิวของผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลและความร้อนภายในระบบ การตกผลึกแบบนี้ ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีความบริสุทธิ์สูงมาก และมีลักษณะการกระจายตัวของผลึกเล็กๆ จำนวนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวมากตามไปด้วย แต่มีการจำกัดขนาดของผลึก จากการกระจายของผลึกภายในสารผสมนี้ การนำสารที่ต้องการไปใช้ต้องอาศัยกระบวนการแยกของแข็งออกจากของเหลวอีกหนึ่งขั้นตอน เพื่อแยกผลึกออกจากสารผสม

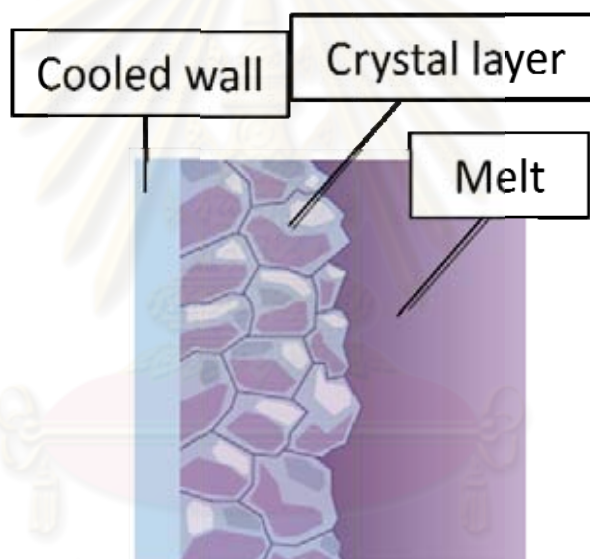


รูปที่ 2.10 การตกผลึกแบบแขวนลอย (Suspension crystallization)

(Sulzer Chemtech และคณะ)

2.4.3 การตกผลึกแบบชั้นของแข็ง (Solid layer crystallization)

เป็นกระบวนการตกผลึก ที่ต้องใช้อุปกรณ์เพื่อลดอุณหภูมิของผนัง เนื่องจากชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นจะเกิดบนผนังเย็น โดยการเกิดผลึกอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังเย็น (Cooled wall) กับของเหลว (Melt) ซึ่งทำหน้าที่แรงขับเคลื่อน ทำให้สามารถควบคุมอัตราการเกิดผลึกได้ การแยกระหว่างชั้นของแข็งกับของเหลวนั้นทำได้ง่าย และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอื่นๆ ก่อนนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การตกผลึกแบบชั้นของแข็ง (Solid layer crystallization)

(Sulzer Chemtech และคณะ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 การแยกสารผสมที่ประกอบด้วยกรดไขมัน

ในปัจจุบัน กระบวนการแยกสารผสมที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันหลายชนิดเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากกรดไขมันแต่ละชนิดสามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลายประเภท ซึ่งโดยทั่วไป กรดไขมันจะอยู่ในรูปของของผสม ซึ่งพบมากในน้ำมันธรรมชาติ อันได้แก่ น้ำมันพืช และน้ำมันสัตว์ การนำไปใช้ประโยชน์นั้นจึงต้องผ่านกระบวนการแยกสารให้สารมีความบริสุทธิ์สูงขึ้นก่อน ด้วยเหตุนี้ ทำให้นักวิจัยหลายท่านเกิดความสนใจและศึกษาการแยกสารผสมที่มีองค์ประกอบของกรดไขมัน โดยใช้กระบวนการต่างๆ ดังนี้

2.5.1 การแยกสารผสมที่ประกอบด้วยกรดไขมันโดยวิธีการกลั่นแยกลำดับส่วนระดับโมเลกุล (Molecular distillation)

การกลั่นแยกลำดับส่วนระดับโมเลกุล (Heath และคณะ (1981)) เป็นกระบวนการกลั่นที่ภายใต้สภาวะสุญญากาศสูง ความดันเร็ว และใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการกลั่นแบบธรรมดา เพื่อป้องกันสารเสื่อมสภาพ สามารถนำไปใช้กลั่นแยกสารต่างๆ เช่น วิตามินอี น้ำมันปลา น้ำมันปาล์ม กลีเซอริน และกรดไขมัน เป็นต้น ทำให้นักวิจัยหลายท่านนำวิธีการกลั่นแยกลำดับส่วนระดับโมเลกุลนี้มาใช้ในการแยกน้ำมันที่เหลือจากการกลั่น หรือของเหลวผลกลั่น (deodorizer distillate) ที่ได้จากการบวนการกลั่นเพื่อลดกรดและกำจัดกลิ่น (deodorization process) ซึ่งประกอบไปประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ (FFA), สเตอรอล, วิตามินอี, เอสเตอร์ของเตอรอล, ไฮโดรคาร์บอน, แอลดีไฮด์ และคีโตน (Chu และคณะ (2004)) โดยจะมีกรดไขมันในของเหลวผลกลั่นอยู่ประมาณ 25-75 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้น, ประเภทการกลั่น และสภาวะในการกลั่น

Martins และคณะ (2006) ได้ศึกษาการแยกกรดไขมันอิสระจากน้ำมันที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการกลั่นลำดับส่วนระดับโมเลกุล ปัจจัยที่มีผลต่อการกลั่นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ อุณหภูมิในการระเหย และอัตราการไหลขาเข้า โดยกำหนดอยู่ในช่วง 100-180 องศาเซลเซียส และ 1.5-23.0 กรัมต่อนาที ตามลำดับ ในการพิจารณาสภาวะที่ดีที่สุด ต้องเป็นสภาวะที่ไม่

ทำให้เกิดการสูญเสียวิตามินอีน้อยที่สุด นั่นคือ ที่อุณหภูมิในการระเหย และอัตราการไหลขาเข้า เท่ากับ 160 องศาเซลเซียส และ 10.4 กรัมต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งที่สภาวะนี้สามารถกลั่นกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมันที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันถั่วเหลืองเริ่มต้นได้ถึงร้อยละ 96.16 และเหลืออยู่ในน้ำมันอยู่ร้อยละ 6.4 ของน้ำมันที่เหลืออยู่

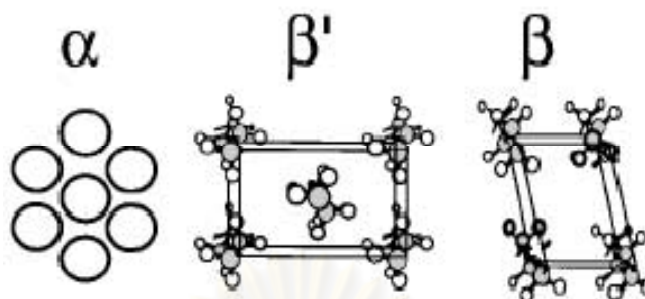
ต่อมา Jiang และคณะ (2006) ได้ศึกษาการแยกวิตามินอี (Tocopherol) และกรดไขมัน ด้วยกระบวนการกลั่นลำดับส่วนระดับโมเลกุล จากน้ำมันที่เหลือจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่ได้จากเมล็ดเรปส์ (Rapeseed oil deodorizer distillate (RODD)) กรดไขมันที่แยกได้นั้นจะอยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Esters (FAME)) เนื่องจากสารตั้งต้นจะถูกทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification) และกระบวนการตกผลึกของสเตอรอล (sterol) ก่อนนำมาเข้าสู่กระบวนการกลั่น อิทธิพลของอุณหภูมิในการระเหย, อุณหภูมิขาเข้า และอัตราการไหลขาเข้าที่มีผลต่อการกลั่นถูกศึกษา นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังศึกษาปัจจัยของความเร็วในการหมุนผนังหอกกลั่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นลำดับส่วนระดับโมเลกุลเมื่อควบคุมอุณหภูมิและความดัน สามารถถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความดัน 2.66 พาสคาล ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอน คีโตน และแอลดีไฮด์ ส่วนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส และความดัน 5.32 พาสคาล ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และส่วนที่ 3 ที่อุณหภูมิ 200-230 องศาเซลเซียส และความดัน 2.66 พาสคาล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารที่ประกอบด้วยวิตามินอีเป็นหลัก จากผลงานวิจัยนี้สภาวะที่สามารถแยกเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันมาก และทำให้วิตามินอีสูญเสียน้อยที่สุด คือ สภาวะที่อุณหภูมิในการระเหย 110 องศาเซลเซียส, ความดัน 5.32 พาสคาล, ความเร็วในการหมุนผนังหอกกลั่น 150 ต่อนาที และอุณหภูมิขาเข้า 80 องศาเซลเซียส โดยวิตามินอีและเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้จากกระบวนการกลั่นนี้คิดประมาณเป็นร้อยละ 50 และ 90 ของปริมาณเริ่มต้นในน้ำมันที่เหลือจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่ได้จากเมล็ดเรปส์ ตามลำดับ

2.5.2 การแยกสารผสมที่ประกอบด้วยกรดไขมันโดยวิธีการตกผลึก (Crystallization)

กรดไขมันในธรรมชาติมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีประโยชน์แตกต่างกันไป แต่ส่วนใหญ่มักจะใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมอาหารและยา (Hartel และคณะ (2002)) โดยการแยกสารหรือการทำให้สารบริสุทธิ์นั้นนิยมใช้วิธีการตกผลึก เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ทำให้สารเสื่อมสภาพ ทำให้งานวิจัยหลายงานวิจัยสนใจศึกษาการตกผลึกของสารผสมที่ประกอบด้วยกรดไขมัน ซึ่งในการตกผลึก ต้องอาศัยคุณสมบัติการแข็งตัวของกรดไขมัน Inoue และคณะ (2004) จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารผสมกรดไขมัน โดยการสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของสารผสมกรดไขมัน เพื่อใช้ในการกำหนดสภาวะอุณหภูมิในการแยกสาร โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารผสมระหว่างกรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวกับกรดไขมันอิ่มตัว อันได้แก่ กรดลอริก กรดไมริสติก และกรดปาล์มมิติก เป็นสารผสมตั้งต้นในงานวิจัย ซึ่งกรดไขมันที่ใช้นี้เป็นกรดไขมันที่พบมากในสารผสมจำพวกน้ำมันธรรมชาติ

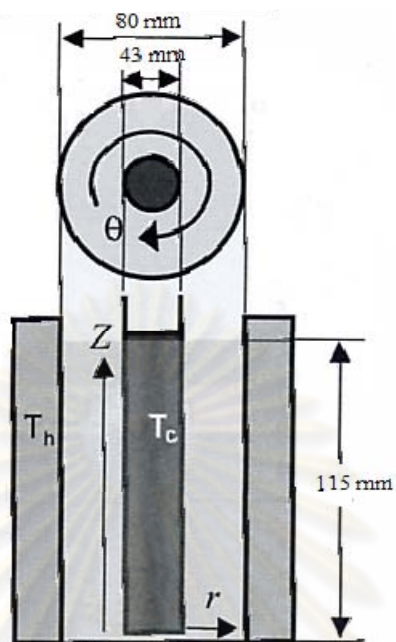
Sato และคณะ (2001) ได้ศึกษาการตกผลึกของไขมัน ซึ่งมีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักที่ประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิด โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ในการตกผลึก อันได้แก่ อัตราการตกผลึก ขนาดของผลึก และ โครงสร้างของผลึก โครงร่างของการแข็งตัวของไตรกลีเซอไรด์มี 3 โครงสร้าง คือ α , β' และ β ดังรูป 2.12 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, ความดัน, สารละลายที่ใช้, อัตราการตกผลึก และสิ่งเจือปนในสารตั้งต้นเป็นปัจจัยที่สำคัญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

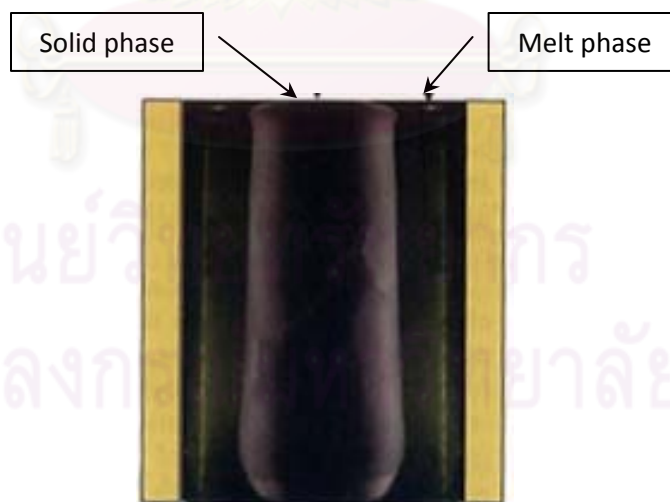


รูปที่ 2.12 โครงร่างของแข็งของไตรกลีเซอไรด์ (Sato และคณะ (2001))

Maeda และคณะ (1997) ได้ศึกษาแผนภาพสมดุลภาค (Equilibrium Phase Diagram) ของสารผสมของน้ำ+กรดไขมัน+สารละลายเอทานอลหรืออะซิโตน โดยกรดไขมันที่ถูกนำมาศึกษา ได้แก่ กรดลอริก, กรดไมริสติก และกรดปาล์มมิติก ในการศึกษาแผนภาพสมดุลนี้จะศึกษาสมบัติการละลายของกรดไขมันแต่ละชนิด ซึ่งความสามารถในการละลายของกรดไขมันในสารผสมจะน้อยลงเมื่อองค์ประกอบของน้ำมากขึ้น โดยความสามารถในการละลายของกรดลอริกจะลดลงมากกว่ากรดไมริสติกและมากกว่ากรดปาล์มมิติก ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายที่ใช้ กรดไขมันจะละลายในสารละลายเอทานอลได้ดีกว่าสารละลายอะซิโตน ต่อมา Fukui K. และคณะ (2009) ได้ศึกษาการตกผลึกจากสารหลอมผสมของกรดลอริกและกรดไมริสติกบนกระบอกหมุนเย็น ภาวะตกผลึกถูกกำหนดดังรูปที่ 2.13 โดยอัตราการหมุนของกระบอกหมุน (N) อุณหภูมิของกระบอกด้านนอก (T_h) มีอิทธิพลต่อการตกผลึก ในการตกผลึกกรดไมริสติกจะแข็งตัวบนกระบอกหมุนเย็น ทำให้สารผสมแยกเป็น 2 วัฏภาค ดังรูป 2.14 และมีการศึกษาโครงสร้างและอัตราการเกิดผลึกภายในวัฏภาคของแข็งเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนกระบอกหมุนเย็น จะทำให้ชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นบนกระบอกหมุนเย็นมีโครงสร้างเป็นผลึกเล็กๆ มากขึ้น โดยผลึกเล็กๆที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นบางส่วนของชั้นของแข็งเท่านั้น

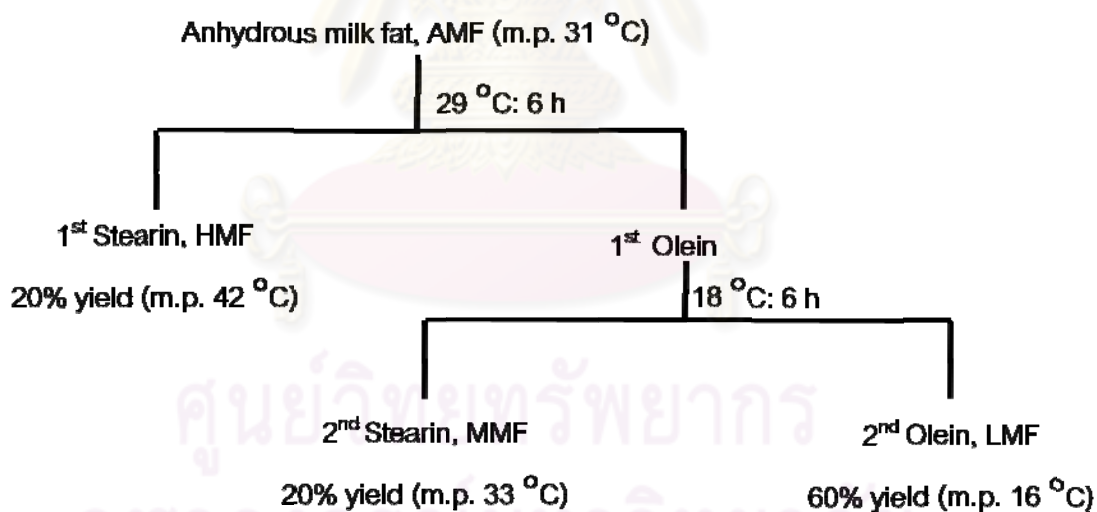


รูปที่ 2.13 ภาพขณะตกผลึกจากสารหลอมผสมของกรดลอริกและกรดไมริสติกบนระบบอกหมุนเวียน
(Fukui K. และคณะ (2009))



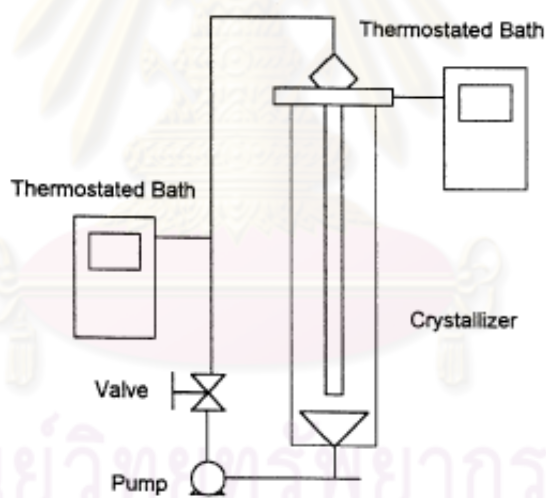
รูปที่ 2.14 ลักษณะการของสารผสมของกรดลอริกและกรดไมริสติกในกระบวนการตกผลึกจาก
ของเหลว (Fukui K. และคณะ (2009))

Dimick และคณะ (1996) ได้ศึกษาการแยกกรดไขมันต่างๆ จากไขมันนม (milk fat) ด้วยวิธีการตกผลึกจากสารหลอมแบบแขวนลอย (suspension crystallization) โดยศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางความร้อนของไขมันนม ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอย่างน้อย 60 ชนิด กรดไขมันแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างและคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่จะแยกตามช่วงอุณหภูมิของจุดเยือกแข็ง จะได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ สารที่มีจุดเยือกแข็งสูง (high melting, HMF), สารที่มีจุดเยือกแข็งปานกลาง (middle melting, MMF) และสารที่มีจุดเยือกแข็งต่ำ (low melting, LMF) ในงานวิจัยนี้ไขมันนมจะถูกตกผลึก 2 ขั้นตอนดังแผนผังรูปที่ 2.15 จากผลงานวิจัยไตรกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 36-54 อะตอม จะอยู่ในส่วนของ HMF ส่วนไตรกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 36-54 อะตอม จะถูกแยกไปอยู่ในส่วน LMF



รูปที่ 2.15 แผนผังกระบวนการตกผลึกจากของเหลวของไขมันนม (Dimick และคณะ (1996))

ต่อมา Peters-Erjawetz และคณะ (1999) ได้ศึกษาการแยกกรดไขมันต่างๆ จากไขมันนม ด้วยวิธีการตกผลึกจากสารหลอมแบบชั้นของแข็ง เครื่องมือในกระบวนการตกผลึกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ถูกติดตั้งดังรูปที่ 2.16 ชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นจะเกิดบนท่อเหล็กตรงกลางภาชนะตกผลึก โดยควบคุมอุณหภูมิของท่อเหล็ก ดังนี้ 15, 20 และ 30 องศาเซลเซียสสำหรับการแยกกรดไขมันที่มีช่วงจุดเยือกแข็งต่ำ, จุดเยือกแข็งปานกลาง และจุดเยือกแข็งสูง ตามลำดับ พบว่ากรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 4-10 อะตอมและกรดไขมันไม่อิ่มตัว จะถูกแยกได้มากเมื่ออุณหภูมิต่ำ ในทางตรงกันข้าม กรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 16-18 อะตอม จะแยกได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้น แต่ อุณหภูมิไม่มีผลต่อการแยกกรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนอะตอม 12-14 อะตอม



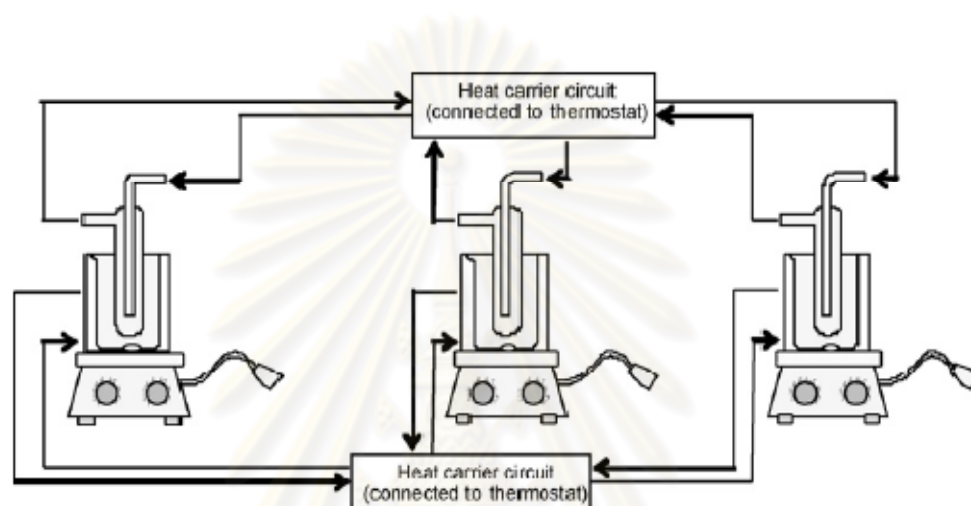
รูปที่ 2.16 เครื่องมือในการแยกกรดไขมันจากไขมันนมด้วยกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง
(Peters-Erjawetz และคณะ (1999))

Wright และคณะ (2000) ยังใช้สารผสม HMF และ MMF ของไขมันนมเป็นสารตั้งต้นในการศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายในกระบวนการตกผลึก ตัวทำละลายที่ใช้ศึกษา ได้แก่ LMF, น้ำมันคาโนลา (Canola oil, CO), เฮกเซน และเอทิล อาเซเตต (Ethyl acetate) พบว่า เมื่อสารผสมที่ผสมกับ LMF จะเกิดผลึกของแข็งมากกว่าสารผสมที่ผสมกับ CO และเมื่อพิจารณาพฤติกรรมการตกผลึก สารผสมที่ผสมด้วย LMF และ เอทิล อาเซเตต จะตกผลึกเร็วกว่าสารผสมที่ผสมด้วย CO และ เฮกเซน

จากงานวิจัยที่ศึกษาการตกผลึกของไขมันนม นั้น การตกผลึกจากสารหลอมนั้นมี 2 ประเภท นั่นคือ การตกผลึกแบบแขวนลอย ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะกระจายในสารผสม และการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง ซึ่งผลึกของแข็งที่เกิดขึ้นจะเกิดภายในชั้นของแข็งบนผนังที่มีอุณหภูมิต่ำ Matsuoka และคณะ (1996) ได้ศึกษาการทำให้สารบริสุทธิ์ ด้วยวิธีการตกผลึกจากของเหลว โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการตกผลึกแบบแขวนลอยกับแบบชั้นของแข็ง พบว่าการตกผลึกแบบแขวนลอยทำให้สารบริสุทธิ์มากกว่าแบบชั้นของแข็ง แต่การตกผลึกแบบชั้นของแข็งจะสามารถแยกสิ่งเจือปนออกจากสารผสมได้ดีกว่าแบบแขวนลอย

นอกจากนี้ปัจจุบันการแยกกรดไขมันต่างๆ จากน้ำมันธรรมชาติ นั้น เป็นที่สนใจอย่างมาก เนื่องจากน้ำมันธรรมชาติทุกประเภทมีกรดไขมันหลายชนิดเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยมีงานวิจัยที่นำน้ำมันธรรมชาติมาใช้เป็นสารตั้งต้นหลายงานวิจัย ยกตัวอย่างเช่น Zaliha และคณะ (2004) ศึกษาคุณสมบัติในการตกผลึกในด้านการความร้อน ทางเคมี และทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของการตกผลึก Chaleepa และคณะ (2010) ศึกษาการตกผลึกแบบชั้นของแข็งของน้ำมันมะพร้าว โดยใช้แท่งความเย็น (Cold finger) เป็นอุปกรณ์การตกผลึกดังรูปที่ 2.17 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึกในงานวิจัยนี้ อันได้แก่ อุณหภูมิในการตกผลึก, อุณหภูมิการหลอม, อัตราการลดอุณหภูมิ และความเร็วในการกวนสาร ในการพิจารณาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยก ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้สารที่แยกได้มีจุดเยือกแข็งและปริมาณไขมันส่วนแข็ง (Solid fat content) สูงที่สุด นั่นคือ อุณหภูมิในการตกผลึกเท่ากับ 21 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สารที่แยกได้มีจุดเยือกแข็ง 28.81 ± 0.59 องศาเซลเซียส และปริมาณไขมันส่วนแข็งเท่ากับ

25 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ส่วนสภาวะที่ดีที่สุดของอุณหภูมิการหลอม, อัตราการลดอุณหภูมิ และความเร็วในการกวนสาร เท่ากับ 36 องศาเซลเซียส, 0.2 เคลวินต่อชั่วโมง และ 500 รอบต่อนาที (rounds per minute, rpm)



รูปที่ 2.17 เครื่องมือในการทดลองแบบขั้นของแข็งของน้ำมันมะพร้าวด้วยแท่งความเย็น
(Chaleepa และคณะ (2010))

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 ปรากฏการณ์การถ่ายโอน (Transport phenomena) (Bird และคณะ (2007))

ในงานวิจัยนี้ การตกผลึกจากของเหลว ต้องอาศัยหลักการของการถ่ายโอนมวลและความร้อน ในการแยกสารต่างๆ

2.6.1 การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer)

การถ่ายโอนพลังงานความร้อน เป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างที่สองแห่งที่มี อุณหภูมิแตกต่างกัน วิธีการถ่ายโอน พลังงานความร้อนแบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

1. การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดย ความร้อนจะเคลื่อนที่ไปตามเนื้อของวัตถุจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่วัตถุที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนไม่ได้เคลื่อนที่ เช่น การนำแผ่นอะลูมิเนียมมาเผาไฟ โมเลกุลของแผ่นอะลูมิเนียมที่อยู่ใกล้เปลวไฟจะร้อนก่อนโมเลกุลที่อยู่ไกลออกไป เมื่อได้รับความร้อน จะสั่นมากขึ้นจึงชนกับโมเลกุลที่อยู่ติดกัน และทำให้โมเลกุลที่อยู่ติดกันสั่นต่อเนื่องกันไป ความร้อนจึง ถูกถ่ายโอนไปโดยการสั่นของโมเลกุลของแผ่นอะลูมิเนียม

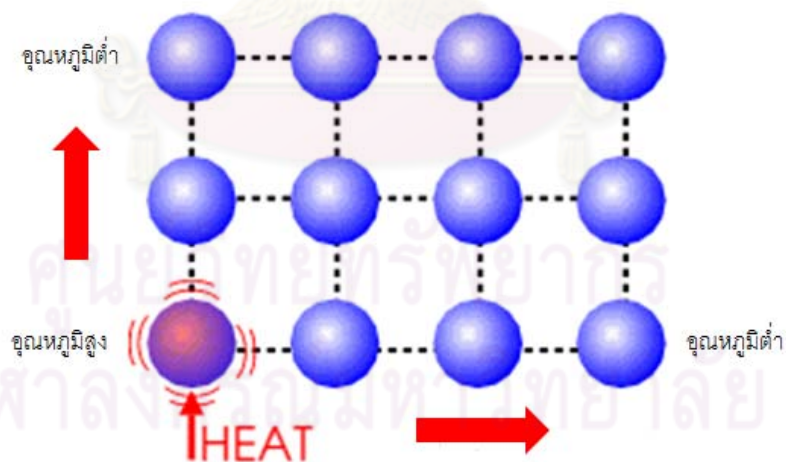
2. การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดย วัตถุที่เป็นตัวกลางในการพาความร้อนจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับความร้อนที่พาไป ตัวกลางในการพา ความร้อนจึงเป็นสารที่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่าย ได้แก่ ของเหลวและแก๊ส ลมบกกลมทะเลเป็นการ เคลื่อนที่ของอากาศที่พาความร้อนจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง การต้ม การนึ่ง และการทอด อาหารเป็นการทำให้อาหารสุกโดยการพาความร้อน

3. การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นการถ่ายโอนความร้อน โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก การแผ่รังสีความร้อน จากเตาไฟไปยังอาหารที่ปิ้งย่างบนเตาไฟ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนทั้งสามวิธี การนำความร้อนเกิดขึ้นภายในสารผสมในกระบวนการตกลึกจากของเหลว เนื่องจากตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนไม่ได้เคลื่อนที่ ซึ่งหลักการนำความร้อนจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.6.1.1 การนำความร้อน และสภาพนำความร้อน (Heat Conduction and Thermal Conductivity)

การนำความร้อน (conduction) คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนเกิดการถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งพลังงานดังกล่าวอาจมาจากพลังงานการหมุน การสั่น หรือการเคลื่อนที่ภายในโมเลกุล



รูปที่ 2.18 การนำความร้อน (www.gcse.com)

อัตราการนำความร้อนผ่านวัสดุ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ และพื้นที่ตั้งฉากกับการไหลของความร้อน และเป็นสัดส่วนกลับของระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) โดยมีค่า k เป็นค่าสภาพนำความร้อนมีหน่วยเป็น W/m^2 , K/m หรือ $W/m.K$ ซึ่งสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ กฎของฟูเรียร์ได้แสดงตามสมการที่ 2.2

$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

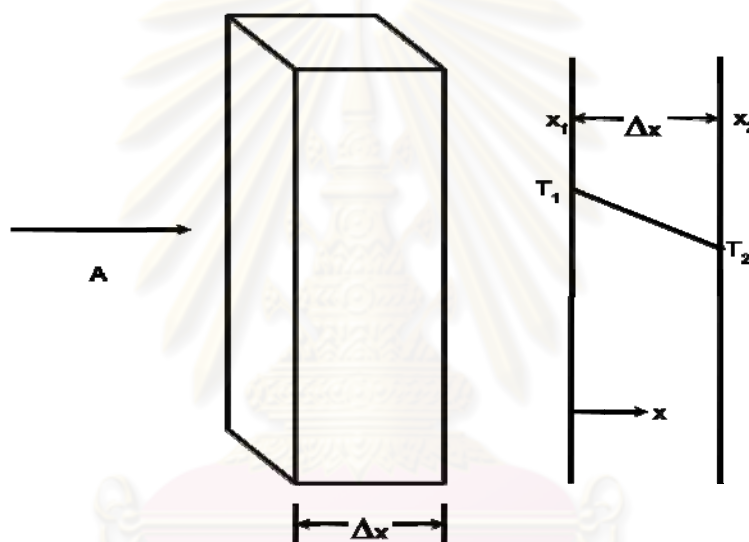
เมื่อ	q	คือ	อัตราการนำความร้อน (Conduction rate), W
	k	คือ	สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity), $W/m.K$
	A	คือ	พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (Area), m^2
	x	คือ	ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (Conduction distance), m
	T	คือ	อุณหภูมิ (Temperature), K

เครื่องหมายที่เป็นลบ แสดงถึงทิศทางการไหลของความร้อน ซึ่งจากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ กล่าวว่า ความร้อนต้องไหลในทิศทางที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ

ถ้าอัตราการไหลของความร้อนคงที่ (Steady state) ตามทิศทางการไหลของความร้อนตามแกน x และ x เป็นระยะทางการไหลของความร้อนจากด้านร้อน รูปแบบการลดลงของอุณหภูมิจะพิจารณาจาก สมการที่ 2.2 และเมื่ออินทิเกรตระยะทางการไหลของความร้อนจากตำแหน่ง x_1 ไปยังตำแหน่ง x_2 และอุณหภูมิเปลี่ยนจาก T_1 ไปเป็น T_2 ผลการอินทิเกรตจะได้เป็น สมการที่ 2.3

$$q = -\bar{k}A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.3)$$

ในที่นี้ Δx เป็นความหนาของวัสดุ และ ΔT เป็นอุณหภูมิที่ลดลง สภานำความร้อน แปรผันแบบเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น จึงต้องใช้ค่าสภานำความร้อนเฉลี่ย (\bar{k}) แทน



รูปที่ 2.19 การนำความร้อนในสภาวะคงที่ 1 มิติ

พิจารณานำความร้อนผ่านผนังดังรูปที่ 2.19 พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ

- ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวทั้ง 2 ฝั่งของผนังเพิ่มขึ้น
- พื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนเพิ่มขึ้น
- ความหนาของผนังลดลง

จากสมการที่ 2.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป อัตราการนำความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของความร้อน, q'' ตามสมการที่ 2.4

$$\frac{q}{A} = q'' = -k \frac{dt}{dx} \quad (2.4)$$

ปริมาณของ q'' ถูกเรียกว่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux)

ตามกฎของฟูเรียร์ สภาพนำความร้อนเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ หาได้จากการทดลอง โดยมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น ยกเว้นแก๊สบางชนิด แต่อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของความดันที่มีต่อสภาพนำความร้อนจะน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบสภาพนำความร้อนกับชนิดของวัสดุ สภาพนำความร้อนของโลหะจะมีค่าสูง ในส่วนของแก๊สจะมีค่าต่ำ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม มีค่าประมาณ 17 W/m °C ทองแดงมีค่าประมาณ 380 W/m °C เงินจะมีค่าประมาณ 415 W/m °C สภาพนำความร้อนของโลหะค่อนข้างคงตัว หรือลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับในโลหะเจือ (Alloys) จะมีค่าน้อยกว่าโลหะบริสุทธิ์ สำหรับแก้ว และวัสดุที่ไม่มีรูพรุน โดยปกติมีค่าต่ำซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 0.35 ถึง 3.5 W/m °C วัสดุประเภทนี้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สภาพนำความร้อนอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงก็ได้ ของแข็งที่มีสภาพนำความร้อนต่ำ ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในท่อ หลอด และใช้ทำผนังอาคาร วัสดุที่เป็นรูพรุน เช่น แผ่นใยแก้ว (Fiberglass pads) หรือโฟมพอลิเมอร์ อาจใช้ในการติดตั้งเพื่อดักอากาศ และป้องกันการพาความร้อน ค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุพวกนี้ อาจมีค่าต่ำใกล้เคียงกับอากาศ และถ้าพวกแก๊สที่มีมวลโมเลกุลสูง ถูกกักเก็บไว้ในโพนีเมอ์ยังทำให้มีสภาพนำความร้อนต่ำกว่าอากาศ สภาพนำความร้อนวัสดุบางชนิด แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สภาพนำความร้อนของอาหาร และวัสดุบางชนิด (Fellows และคณะ (2009))

ชนิดของวัสดุ	สภาพนำความร้อน ($W m^{-1} K^{-1}$)	อุณหภูมิที่วัด ($^{\circ}C$)
วัสดุก่อสร้าง		
อลูมิเนียม	220	0
ทองแดง	388	0
เหล็กกล้าไร้สนิม	21	20
โลหะ	45-400	0
อิฐทนไฟ	0.69	20
คอนกรีต	0.87	20
อาหาร		
น้ำมันมะกอก	0.17	20
นมที่ไม่ได้เอาครีมออก	0.56	20
ปลาเค็มแช่แข็ง	1.66	-10
น้ำแอปเปิ้ล	0.56	20
ส้ม	0.41	0-15
ถั่วเขียว	0.80	-12.1
กะหล่ำดอก	0.80	-6.6
ไข่	0.96	-8
น้ำแข็ง	2.25	0
น้ำ	0.57	20

การนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady State Heat Conduction) เป็นสภาวะที่ อุณหภูมิภายในระบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา จากสมการดุลพลังงาน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.5

$$Q_{Total} = Q_{conduction} + Q_{convection} + Q_{radiation} \quad (2.5)$$

เมื่อระบบไม่มีการถ่ายโอนความร้อนโดยการพา และการแผ่รังสี ($Q_{convection} = Q_{radiation} = 0$) ดังนั้น จากสมการที่ 2.5 จึงลดรูปเป็นสมการที่ 2.6

$$Q_{Total} = Q_{conduction} \quad (2.6)$$

จากสมการการถ่ายโอนพลังงานโดยการนำความร้อนในระบบพิกัดฉาก ทำให้สมการที่ 2.6 เขียนได้ ใหม่เป็นสมการที่ 2.7

$$Q_{Total} = Q_{conduction} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''}{k} = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

เมื่อ ไม่มีพลังงานภายในเกิดขึ้น ($q''' = 0$) และการนำความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางแกน x เพียงทิศทางเดียว $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \right)$ ดังนั้น สมการที่ 2.7 จึงกลายเป็นสมการที่ 2.8

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

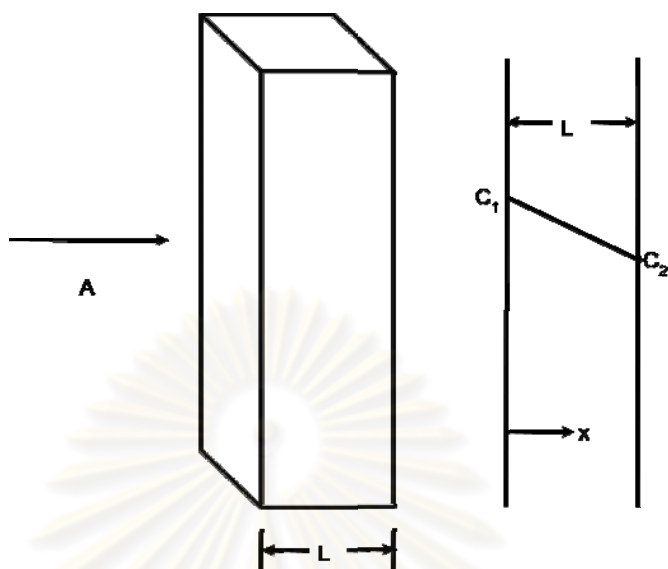
เมื่อ $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ โดยที่ α คือ สภาพแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) ในการแก้สมการที่ 2.8 ต้องใช้ระยะขอบเขตเงื่อนไข 2 เงื่อนไข และเงื่อนไขเริ่มต้น 1 เงื่อนไข

2.6.2 การถ่ายโอนมวล (Mass transfer) (Cussler และคณะ (2009))

การแพร่ของมวลสารในบริเวณต่างๆ ปรากฏขึ้นในขณะที่มีการเคลื่อนที่ของมวลสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) และถือว่าเป็นการถ่ายโอนมวลสารอีกวิธีหนึ่ง นอกจากนี้การถ่ายโอนมวลสารด้วยการแพร่ยังอาศัยกลไกที่คล้ายคลึงกับการถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำความร้อนที่อาศัยหลักการของความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient)

สำหรับกลไกของกระบวนการแพร่มวลสารในวัสดุ สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.20 โดยกำหนดความเข้มข้นของพื้นผิวทั้งสองด้านเท่ากับ C_1 และ C_2 ที่ระยะทางการแพร่ของมวลสารเท่ากับ 0 และ L ตามลำดับ พบว่าทิศทางของการแพร่มวลสาร A มีทิศทางเคลื่อนที่ (direction) จากบริเวณที่ความเข้มข้นของสารสูงไปยังบริเวณที่ความเข้มข้นของสารต่ำ และบริเวณที่มีการถ่ายโอนมวลจะต้องไม่เกิดการดูดซับมวลสาร หรือ การปลดปล่อยสารเกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสาร (Mass diffusion coefficient: D) บริเวณดังกล่าวจึงคงที่ พร้อมทั้งมวลสารบริเวณดังกล่าวมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ด้วยเหตุนี้กลไกการแพร่ของมวลสารข้างต้นจึงสอดคล้องกับกฎของฟิค (Fick's law) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการที่ 2.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.20 การถ่ายโอนมวลโดยสารจะแพร่จากบริเวณความเข้มข้นสูงไปบริเวณความเข้มข้นต่ำ
(Gebhart และคณะ (1993))

$$m = \frac{DA}{L}(C_1 - C_2) \quad (2.9)$$

เมื่อทำการพิจารณาสมการที่ 2.9 สามารถจัดสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของฟลักซ์เชิงมวล (Mass flux) แสดงดังสมการที่ 2.10

$$\frac{m}{A} = m'' = \frac{D}{L}(C_1 - C_2) = D \left[-\frac{(C_2 - C_1)}{L} \right] = -D \frac{dC}{dx} \quad (2.10)$$

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่ผิว (Area), m^2
	C_1	คือ	ความเข้มข้นเชิงโมล (Molar concentration), mol/L
	D	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่มวลสาร (Mass diffusion coefficient), m^2/s
	L	คือ	ระยะทางการแพร่ (Diffusion distance), m
	m	คือ	อัตราการแพร่ของมวลสาร (Rate of mass diffusion), kg/s
	m''	คือ	ฟลักซ์เชิงมวล (Mass flux), $kg/m^2.s$

อย่างไรก็ตามสมการที่ 2.9 และ 2.10 ใช้กับการแพร่ของมวลที่สภาวะคงที่ (steady state) สำหรับการการแพร่ของมวลที่สภาวะไม่คงที่ (unsteady state) ซึ่งเป็นสภาวะที่ความเข้มข้นของสารเปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ ขณะนั้น ดังนั้นในการอธิบายสภาวะดังกล่าวจึงใช้สมการความต่อเนื่อง (equation of continuity) ดังสมการที่ 2.11

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + v_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] + R_A \quad (2.11)$$

จากรูปที่ 2.20 เมื่อพิจารณาเป็นสองมิติ และความเร็วของสารในระบบมีค่าน้อยมากทำให้ $v_x = v_y = v_z = 0$ สารมีการแพร่ในแกน x เพียงทิศทางเดียว และไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นในระบบ ดังนั้นสมการที่ 2.11 จึงเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.12

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (2.12)$$

ในการแก้สมการที่ 2.12 ต้องใช้ระยะขอบเขตเงื่อนไข 2 เงื่อนไข และเงื่อนไขเริ่มต้น 1 เงื่อนไข

การแพร่เกี่ยวข้องกับเคลื่อนที่ของอะตอม ซึ่งปัจจัยของอุณหภูมิจะมีผลต่อการแพร่ โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้อัตราเร็วของการแพร่ของอะตอมเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากอัตราเร็วในการแพร่ของอะตอมซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (พรวสา วงศ์ปัญญา และคณะ (2551))

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (2.13)$$

เมื่อ	D	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิ T, m ² /s
	D ₀	คือ	ค่าสัดส่วนคงที่โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ, m ² /s
	Q	คือ	พลังงานกระตุ้นของอะตอมที่แพร่เข้าไปในของแข็ง, J/mol หรือ cal/mol
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol K หรือ 1.987 cal/mol K)
	T	คือ	อุณหภูมิ, K

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 กรดปาล์มมิติก ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 95 (Palmitic acid, PA) จากบริษัท Tokyo Chemical Industry Co., Ltd. ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1

3.1.2 กรดโอเลอิก ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 98 (Oleic acid, OA) จากบริษัท Tokyo Chemical Industry Co., Ltd. ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1

3.1.3 เอทานอล (Ethanol) จากบริษัท Chameleon Reagent ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย

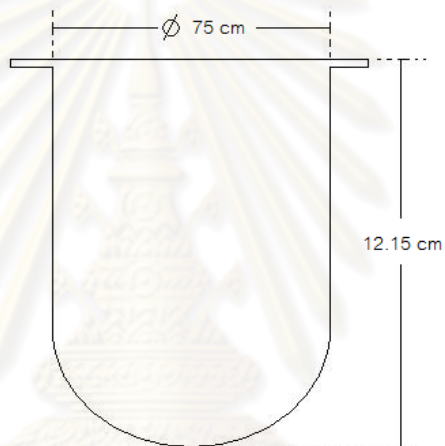
ตารางที่ 3.1 สมบัติของกรดปาล์มมิติก และกรดโอเลอิก (www.sjlipids.com)

สมบัติ	กรดปาล์มมิติก	กรดโอเลอิก
ชนิดของกรดไขมัน	กรดไขมันอิ่มตัว	กรดไขมันไม่อิ่มตัว
สูตรโมเลกุล	$C_{16}H_{32}O_2$	$C_{18}H_{34}O_2$
มวลโมเลกุล [กรัมต่อโมล, g/mol]	256.42	282.46
จุดหลอมเหลว [องศาเซลเซียส, °C]	62.9	16.3
จุดเดือด [องศาเซลเซียส, °C]	352	360

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ชุดอุปกรณ์การตกผลึก (crystallizer) เป็นอุปกรณ์การทดลองหลัก ดังแสดงรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบด้วย

3.2.1 ภาชนะแก้วรูปทรงกระบอก (cylindrical-shape glass vessel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร สูง 12.15 เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 ภาชนะแก้วรูปทรงกระบอก ใช้เป็นภาชนะในการตกผลึก

3.2.2 อุปกรณ์ให้ความร้อน (vertical-oriented heater) ด้วย isothermal circulator รุ่น F-25 จากบริษัท Julabo ประเทศเยอรมัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ให้ความร้อนด้วย isothermal circulator
(F-25, Julabo, Germany)

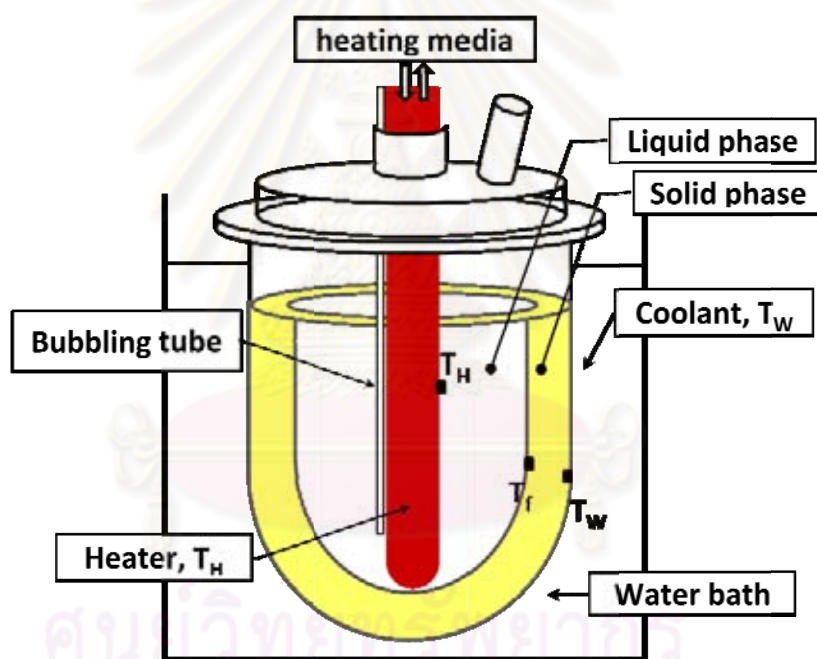
3.2.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) รุ่น NTT-2200 จากบริษัท Eyla ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
(NTT-2200, Eyla, Japan)

3.2.4 ท่อนำก๊าซไนโตรเจน (bubbling tube)

ในการประกอบชุดอุปกรณ์การทดลองนำอุปกรณ์ให้ความร้อนจะถูกใส่ลงในสารผสม โดยกำหนดตำแหน่งให้อยู่ตรงกลางของภาชนะ และควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater temperature (T_H)) หลังจากนั้นนำภาชนะตกลึกลงในอ่างน้ำ เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายนอกของภาชนะ (Wall temperature (T_W)) นอกจากนี้ติดตั้งท่อนำก๊าซไนโตรเจนถัดจากอุปกรณ์ให้ความร้อนทำให้เกิดฟองก๊าซไนโตรเจนภายในสารผสม ซึ่งก๊าซไนโตรเจนนี้ทำหน้าที่กวนสารให้มีความเข้มข้นสม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกสาร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์การทดลองในกระบวนการตกลึกลงแบบชั้นของแข็ง

3.3 การตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง

นำกรดพาล์มมิติคและกรดโอเลอิก มาผสมกันในอัตราส่วนเชิงมวลเริ่มต้นตามที่กำหนด ให้ได้ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อน โดยเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 60 -120 นาที หรือจนกว่าสารผสมละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นจึงนำสารผสมดังกล่าวเทใส่ ภาชนะการตกผลึก (crystallizer) ที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 3.3 เพื่อเริ่มการทดลอง ระหว่างการ ดำเนินการทดลอง ฟองก๊าซไนโตรเจนที่ใช้เพื่อกวนสารผสมทั้งสองผสมกันได้ดีขึ้น จะถูกปล่อยด้วย อัตราการไหลของก๊าซคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป ภายในสารผสมจะเริ่มปรากฏชั้นของของแข็งบริเวณผนัง ของภาชนะตกผลึก โดยความหนาชั้นของของแข็งนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในทิศทางเข้าหาจุดศูนย์กลางของ ภาชนะตกผลึก และเมื่อดำเนินการต่อไป 2 ชั่วโมง ความหนาของชั้นของแข็งนั้นจะคงที่ ซึ่งความหนา ของชั้นของแข็งจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิที่กำหนดระหว่างอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความ ร้อน (T_H) กับอุณหภูมิกายนอกภาชนะตกผลึก (T_W) และอัตราส่วนโดยมวลเริ่มต้นระหว่างกรดพาล์ม มิติก (PA) และกรดโอเลอิก (OA) ในกระบวนการตกผลึกจะใช้เวลาทั้งหมด 720 นาที โดยจะวัดความ เข้มข้นของกรดพาล์มมิติคตามต่างๆ เวลาที่กำหนด ได้แก่ 0, 30, 60, 90, 120, 180, 360 และ 720 นาทีที่สภาวะต่างๆ สรุปดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 เพื่อวัดค่าความเข้มข้นของกรดพาล์มมิติค (PA) ภายในบริเวณภูมิภาคที่เป็นของเหลวและชั้นของแข็ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกเริ่มต้นของสารผสมกรดไขมันต่างๆ

อัตราส่วนโดยมวลระหว่าง PA และ OA [เปอร์เซ็นต์]	สัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติก	ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก [โมลต่อลูกบาศก์เมตร]
40:60	0.42	1356
50:50	0.52	1703
60:40	0.62	2033

ตารางที่ 3.3 สภาวะอัตราส่วนของอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heating temperature (T_H)) กับอุณหภูมิผนังภาชนะตกผลึก (Wall temperature (T_W))

อุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความร้อน (T_H) [$^{\circ}\text{C}$]	อุณหภูมิผนังภาชนะตกผลึก (T_W) [$^{\circ}\text{C}$]
60	40
65	40
70	30

3.4 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก (PA)

ในการคำนวณหาความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก (PA) ภายในบริเวณที่เป็นภูมิภาคของเหลว และชั้นของแข็ง ที่เวลาต่างๆ ภายใน 720 นาที โดยเก็บตัวอย่างของสารผสมบริเวณภูมิภาคของเหลว และชั้นของแข็งมาประมาณ 0.01-0.04 กรัม หลังจากนั้นนำตัวอย่างแต่ละตัวมาละลายในเอทานอล ประมาณ 10 เท่าของน้ำหนักตัวอย่าง ในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นนั้น จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ (Gas chromatography (GC)) โดยมีสภาวะการทำงานของเครื่องโครมาโทกราฟีนี้ตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.5 เครื่องโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ (Gas chromatography (GC))

(GC-14B, Shimadzu, Japan)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 สภาวะการทำงานของเครื่องโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ (Gas chromatography (GC))

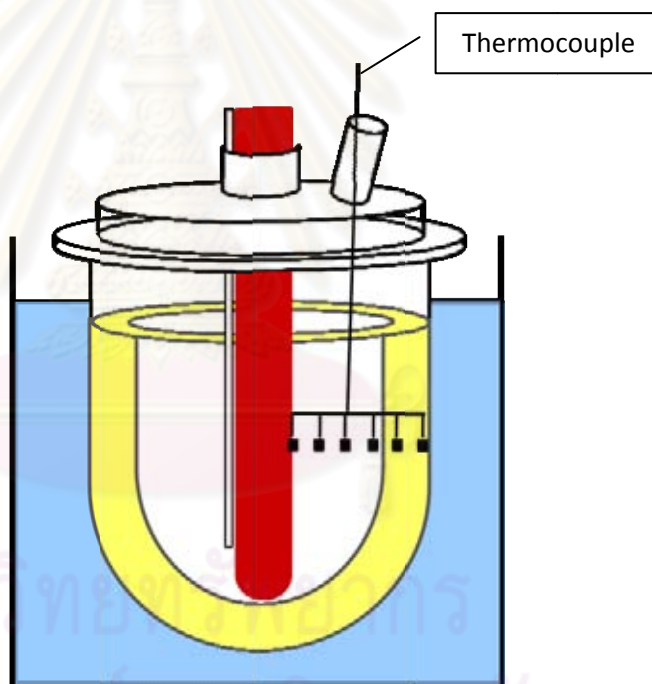
สภาวะการทำงานของเครื่องโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ(GC)	
รุ่น	GC-14B จากบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
คอลัมน์	UNISOL-400 (5% Uniport S 60/80)
ก๊าซพา (Carrier gas)	ก๊าซไนโตรเจน (N ₂)
ส่วนการตรวจวัด (Detector)	Flame ionization detector (FID)
อุณหภูมิของคอลัมน์ (Column temperature)	200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของส่วนการตรวจวัด (Detector temperature)	210 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของส่วนฉีดสารตัวอย่าง (Injection temperature)	230 องศาเซลเซียส
ปริมาตรการฉีด (Injection volume)	0.5 ไมโครลิตร

3.5 การตรวจวัดอุณหภูมิภายในภาชนะตกผลึก

อุณหภูมิภายในของสารผสมของแต่ละตำแหน่งตามแนวรัศมี 6 ตำแหน่งในภาชนะตกผลึก ตั้งแต่อุปกรณ์ให้ความร้อน จนถึงผนังของภาชนะตกผลึก ถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) โดยตำแหน่งที่วางเทอร์โมคัปเปิลดังกล่าวจะรวมสารผสมที่เป็นวัฏภาคของเหลวและชั้นของแข็ง ดังรูปที่ 3.7 และบันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) รุ่น GL200 จากบริษัท Graphtec ประเทศญี่ปุ่น ที่เวลา 0, 120, 360, 720 และ 1440 นาที



รูปที่ 3.6 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)
(Graphtec GL200, Japan)



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลเปิดภายในภาชนะตกลึก

3.6 การคำนวณหาค่าฟลักซ์เชิงมวล (Mass flux)

ที่สภาวะการทดลองต่างๆ การคำนวณค่าฟลักซ์เชิงมวลของกรดปาล์มมิติก (PA) ทั้งในบริเวณที่เป็นของแข็งและของเหลว โดยใช้สมการที่ 1

$$J = \frac{dC}{dt} \times \frac{V}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อ	J	=	ฟลักซ์เชิงมวล [กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]
	$\frac{dC}{dt}$	=	ความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกกับเวลา [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที, $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$]
	V	=	ปริมาตรของของเหลว [ลูกบาศก์เมตร, m^3]
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็ง [ตารางเมตร, m^2]

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาตรของของเหลว (V) และพื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่างของของเหลวกับของแข็ง (A) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยมวลเริ่มต้นระหว่างกรดปาล์มมิติกกับกรดโอเลอิก และความหนาของชั้นของแข็ง ซึ่งความหนาของชั้นของแข็งดังกล่าวจะถูกควบคุมโดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ T_H/T_W

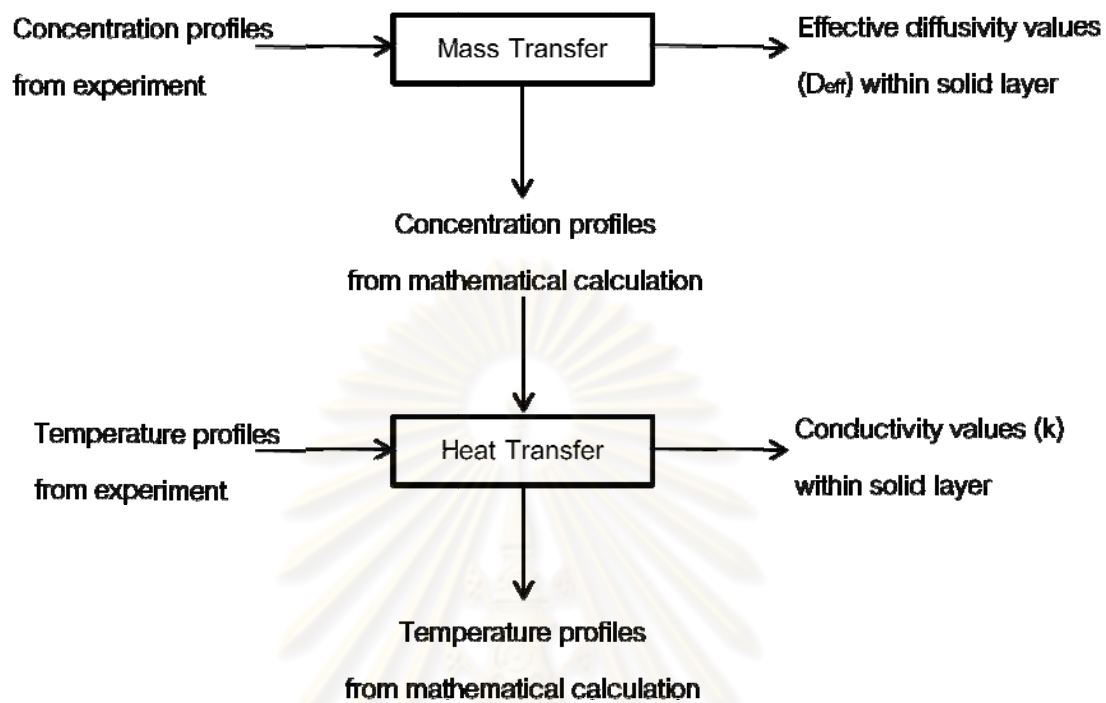
3.7 ศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนโดยอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนโดยอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณหา ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conduction coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient) โดยเปรียบเทียบกับค่าการทดลองที่ได้ ตามแผนผังดังรูป 3.8 และ จำลองรูปชั้นของแข็งที่เกิดขึ้น โดยแบ่งเป็น 4 ชั้นเท่าๆ กัน ได้แก่ ชั้น A, B, C และ D ดังรูปที่ 3.9 โดย กำหนดให้

- ความหนาของชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับรัศมีของภาชนะตกลูก ซึ่ง ในการคำนวณสามารถคิดเป็นระบบ rectangular เพื่อง่ายต่อการคำนวณ
- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจะคงที่ในแต่ละ ชั้น โดยทั้งสี่ชั้นในชั้นของแข็งจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองแตกต่างกันไป

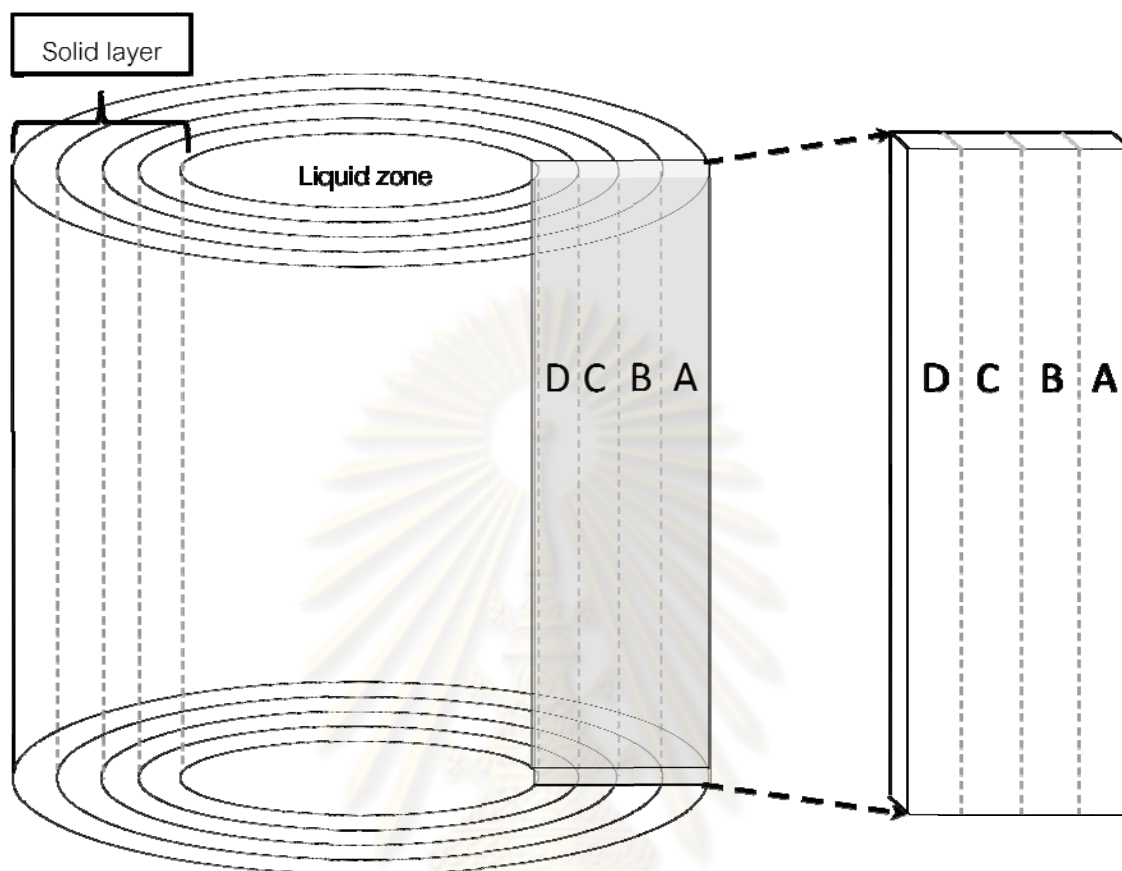
ผลของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสอง จะอยู่ในรูปของกราฟอุณหภูมิภายในของสารผสม ของแต่ละตำแหน่งตามแนวรัศมีในภาชนะตกลูกและกราฟการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรด ปาล์มมิติกภายในสารผสมบริเวณที่เป็นของเหลวและชั้นของแข็งที่มีความสัมพันธ์กับเวลา ตามลำดับ จากนั้นนำผลกราฟที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับกราฟการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิและความเข้มข้นที่ได้จากผลการทดลองในสภาวะการทดลองต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 แผนผังการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (conduction coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (effective diffusion coefficient)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แบบจำลองชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการแตกหักแบบชั้นของแข็ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7.1 สมการการถ่ายโอนมวล

สมการการถ่ายโอนมวลภายในชั้นของแข็ง เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient) ดังสมการที่ 3.2

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D^{eff} \nabla C) = R \quad (3.2)$$

เมื่อ	C	=	ความเข้มข้นของสาร [โมลต่อลูกบาศก์เมตร, mol/m ³]
	t	=	เวลา [วินาที, s]
	D^{eff}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล [ตารางเมตรต่อวินาที, m ² /s]
	R	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยา [โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที, mol/m ² .s]

ในกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง สามารถกำหนดสมมติฐาน เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์ประสิทธิผล ได้ดังนี้

- จากรูปที่ 3.9 เราพิจารณาเป็นแผนภาพ 2 มิติในระบบ rectangular โดยการถ่ายโอนมวลจะแพร่ในแนวแกน x เท่านั้น โดยจะแพร่จากชั้น D ไปยัง ชั้น A (จากซ้ายไปขวา)
- ไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ เป็นแค่การเปลี่ยนแปลงสถานะของสารเท่านั้น

จากการกำหนดสมมติฐานสามารถลดรูปสมการที่ 3.2 แล้วได้เป็นสมการที่ 3.3

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D^{eff} \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \cancel{\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}} \right] = R$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

3.7.2 สมการการถ่ายโอนความร้อน

สมการการถ่ายโอนความร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในชั้นของแข็งจะ เริ่มจากการพิจารณาสมการการถ่ายโอนความร้อน (Equation of heat) ดังสมการที่ 3.4

$$Q_{Total} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (3.4)$$

ในกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง สามารถกำหนดสมมติฐาน เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์ ประสิทธิภาพ ได้ดังนี้

- ภายในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้น ไม่เกิดปรากฏการณ์การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน โดยจะเกิดเฉพาะปรากฏการณ์การนำความร้อนเท่านั้น
- จากรูปที่ 3.9 เราพิจารณาเป็นแผนภาพ 2 มิติในระบบ rectangular โดยการถ่ายโอน ความร้อนจะเกิดในแนวแกน x เท่านั้น โดยจะแพร่จากชั้น D ไปยัง ชั้น A (จากซ้ายไป ขวา)

จากการกำหนดสมมติฐานสามารถลดรูปสมการที่ 3.4 แล้วได้เป็นสมการที่ 3.5

$$Q_{Total} = Q_{cond} + \cancel{Q_{conv}} + \cancel{Q_{rad}}$$

$$Q_{Total} = Q_{cond}$$

$$Q_{Total} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \cancel{\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}} \right]$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.5)$$

เมื่อ	ρ	=	ความหนาแน่นของสาร [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, kg/m^3]
	C_p	=	ความจุความร้อน [จูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน, J/kg.K]
	T	=	อุณหภูมิ [เคลวิน, K]
	k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน [วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน, W/m.K]
	Q	=	ความร้อนจากแหล่งกำเนิด [วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร, W/m^3]

ค่าความจุความร้อน ได้จากสมการคาดคะเนค่าความจุความร้อนของกรดปาล์มิติกและกรดโอเลอิก (Cedeño และคณะ (2000)) ซึ่งในการกำหนดค่าความหนาแน่นและความจุความร้อนของสารผสมกรดปาล์มิติกและกรดโอเลอิกนั้น ได้จากสมการอุดมคติของสารละลายดังสมการที่ 3.6

$$M = x_{PA}M_{PA} + x_{OA}M_{OA} \quad (3.6)$$

เมื่อ	M	=	คุณสมบัติของสารผสม
	M_{PA}	=	คุณสมบัติของกรดปาล์มิติก
	M_{OA}	=	คุณสมบัติของกรดโอเลอิก
	x_{PA}	=	สัดส่วนโมลของกรดปาล์มิติก
	x_{OA}	=	สัดส่วนโมลของกรดโอเลอิก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D^{eff})

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D^{eff}) จะอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการการถ่ายโอนมวล ดังสมการ 3.3 โดยกำหนดชั้นของแข็ง 4 ชั้น อันได้แก่ ชั้น A, B, C และ D ให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเท่ากับ D_A^{eff} , D_B^{eff} , D_C^{eff} และ D_D^{eff} ตามลำดับ การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลนี้ ทำโดยการสุ่มค่า D^{eff} ในแต่ละชั้นในชั้นของแข็ง ที่เวลาต่างๆ เพื่อให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และคำนวณหาค่า R^2 (Regression coefficient) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความแม่นยำของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่หาได้

3.7.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) จะอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการการถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำความร้อน ดังสมการ 3.5 โดยกำหนดให้ชั้นของแข็งในแต่ละชั้น 4 ชั้น อันได้แก่ ชั้น A, B, C และ D ให้มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ k_A , k_B , k_C และ k_D ตามลำดับ การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนนี้ ทำโดยการสุ่มค่าในแต่ละชั้นในชั้นของแข็งที่เวลาต่างๆ เช่นกัน เพื่อให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในชั้นของแข็งที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง และคำนวณหาค่า R^2 (Regression coefficient) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความแม่นยำของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่หาได้

3.7.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิ

จากการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในแต่ละชั้นภายในชั้นของแข็ง สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและอุณหภูมิ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การถ่ายโอนทั้งมวลและความร้อนในกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็งได้ ในที่นี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเชิงเส้นและแบบเอกซ์โปเนนเชียล โดยมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 3.7 และ 3.8 Moreira และคณะ (2005)

$$D^{eff} = a + bT \quad (3.7)$$

$$D^{eff} = a_1 e^{-b_1/T} \quad (3.8)$$

โดยที่ a, b = ค่าคงที่ในสมการเชิงเส้น

a_1, b_1 = ค่าคงที่ในสมการเอกซ์โปเนนเชียล

ค่าคงที่ในสมการทั้งสองจะแตกต่างกันในแต่ละชั้นภายในชั้นของแข็ง ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและอุณหภูมินี้ ก็คือการศึกษาค่าคงที่ของสมการเชิงเส้นและสมการเอกซ์โปเนนเชียลนั่นเอง โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ให้เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่หาได้จากการคำนวณในหัวข้อ 3.7.4 หลังจากนั้นหาค่าคงที่ในทั้งสองสมการโดยวิธีการสุ่ม เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้มีค่าใกล้เคียงผลการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ยังมีการคำนวณค่าคำนวณหาค่า R^2 (Regression coefficient) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความแม่นยำของการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิที่หาได้

3.8 การวิเคราะห์ขนาดของผลึก (crystal grain) ในชั้นของแข็ง

ในการวิเคราะห์ขนาดของผลึก (crystal grain) ในชั้นของแข็ง ทำได้โดยนำส่วนที่เป็นชั้นของแข็ง ตั้งแต่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของเหลวและของแข็งจนถึงผนังภาชนะตกผลึก มาแบ่งเป็น 4 ส่วนเท่าๆกัน หลังจากนั้นนำชิ้นส่วนดังกล่าวมาวิเคราะห์ขนาดของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ (Polarized microscope) รุ่น CX31 จากบริษัท Olympus ประเทศญี่ปุ่น เพื่อเปรียบเทียบลักษณะและขนาดของผลึกในแต่ละชั้นของชั้นของแข็ง



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

(Olympus CX31, Japan)

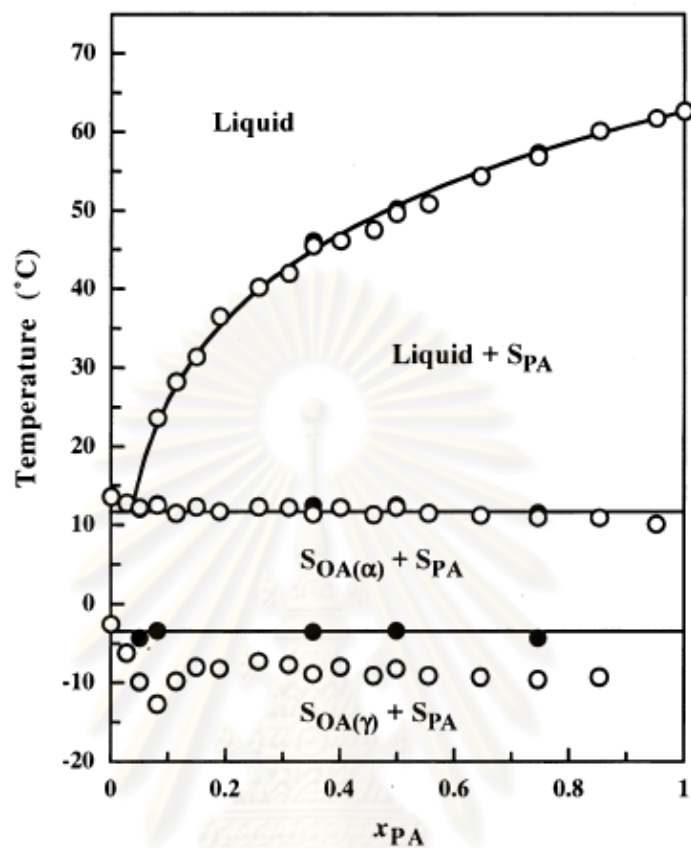
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษากลไกการแยกส่วนของสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกด้วยกระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง

นำสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกที่มีอัตราส่วนโดยมวลเริ่มต้น PA:OA เท่ากับ 40:60 คิดเป็นสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกเท่ากับ 0.42 ถูกให้ความร้อนจนเป็นสารผสมเนื้อเดียว เพื่อเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง โดยกำหนดอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความร้อน (heater) ที่ใช้ให้ความร้อนตรงกลางภาชนะตกผลึก (T_H) และอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิผนังของภาชนะตกผลึก (T_W) เป็น 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกที่อุณหภูมิดังกล่าว ทำให้สารผสมถูกแยกเป็นสองวัฏภาค (phase) ได้แก่ วัฏภาคของเหลวที่อยู่บริเวณตรงกลางของภาชนะตกผลึกและวัฏภาคของแข็งที่เกิดขึ้นที่ผนังภาชนะตกผลึก โดยวัฏภาคของแข็งที่เกิดขึ้นบนผนังภาชนะตกผลึกที่มีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสนั้น จะทำให้กรดปาล์มมิติกในสารผสมเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง ซึ่งอธิบายจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกแสดงดังรูปที่ 4.1 ชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นนั้นจะหนาขึ้นเรื่อยๆ และคงที่ที่เวลาผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมงนับตั้งแต่เริ่มใส่ภาชนะตกผลึกลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ การศึกษากลไกของกระบวนการตกผลึกในการแยกสารนี้ จะทำโดยการวัดหาค่าความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่เปลี่ยนไป ณ เวลาต่างๆ ทั้งในวัฏภาคของแข็งและของเหลว เพื่อดูทิศทางการถ่ายโอนหรือการแพร่ของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก ซึ่งการวัดความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกนั้นถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ (Gas chromatography (GC)) และวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของผลึกที่เกิดขึ้นภายในชั้นของแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

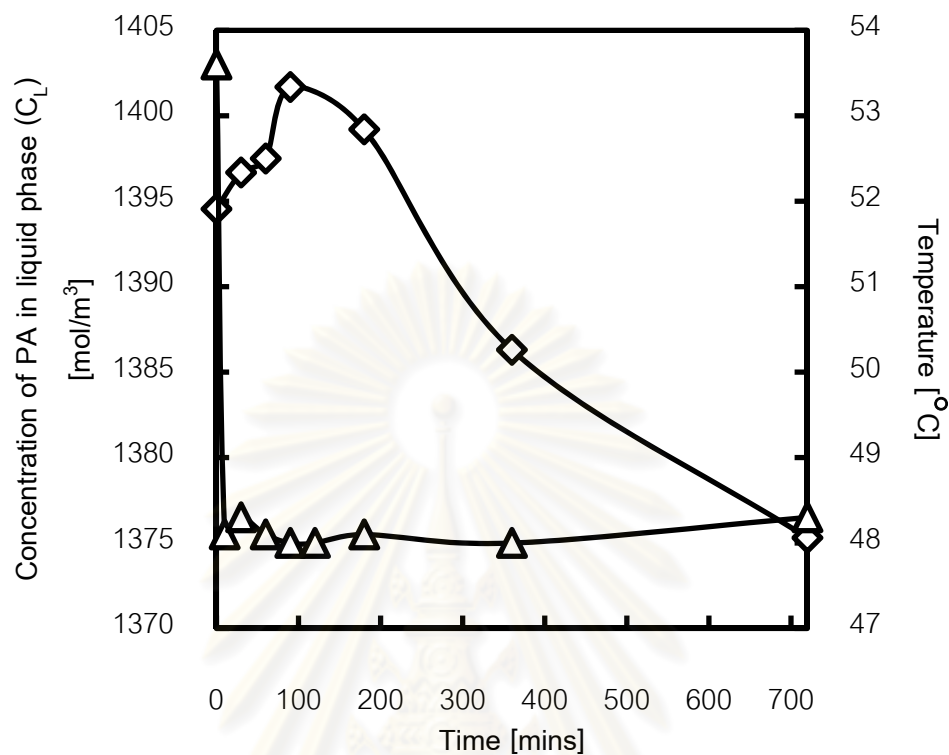


รูปที่ 4.1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (Inoue และคณะ (2004))

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในบริเวณภูมิภาคของเหลว

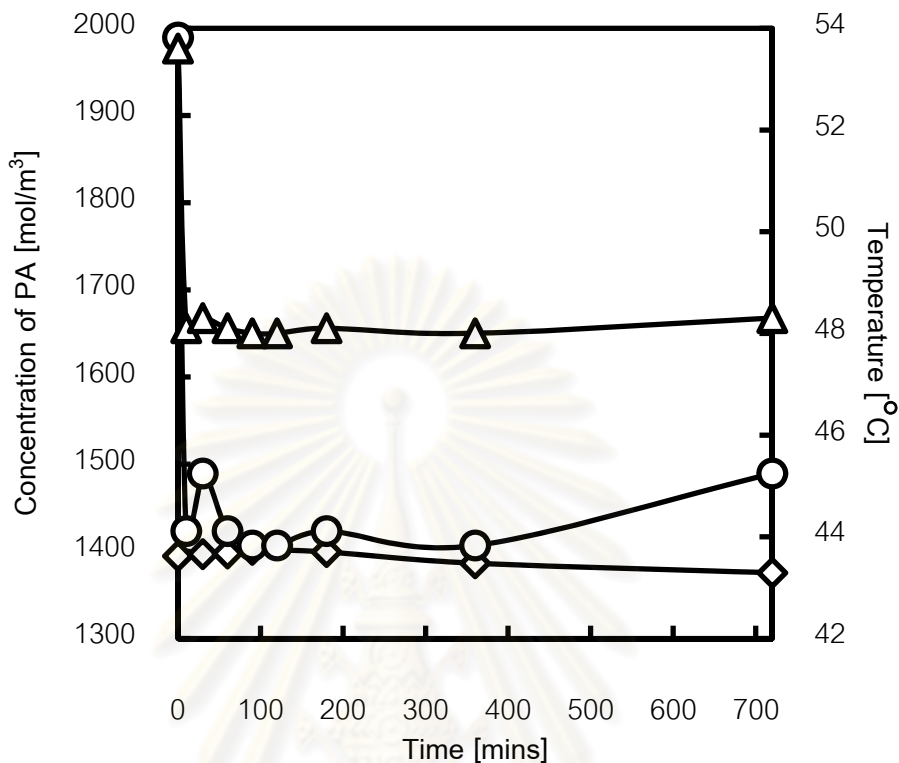
เมื่อสารผสมเนื้อเดียวของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก เริ่มเข้าสู่กระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิในการแยกสาร ทำให้เกิดขึ้นของแข็ง ชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดแทนที่สารผสมที่เป็นภูมิภาคของเหลว ทำให้ปริมาตรของสารผสมที่เป็นภูมิภาคของเหลวลดลง โดยสารที่มีจุดเยือกแข็งสูงส่วนใหญ่จะอยู่ในภูมิภาคของแข็งหรือชั้นของแข็ง ส่วนสารที่มีจุดเยือกแข็งต่ำส่วนใหญ่จะอยู่ในภูมิภาคของเหลว การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในสารผสมในบริเวณภูมิภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ จึงถูกพิจารณา โดยกำหนดที่เวลา 0, 10, 30, 60, 90, 120, 180, 360 และ 720 นาที ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในภูมิภาคของเหลวที่อยู่บริเวณตรงกลางของภาชนะตกผลึกจะเพิ่มขึ้นในตอนแรก และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลามากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นนี้จะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิภายในภูมิภาคของเหลวจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 10 นาที แล้วจะค่อยๆคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อภาชนะตกผลึกที่บรรจุสารผสมเนื้อเดียวถูกจุ่มลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารผสม จะทำให้อุณหภูมิกภายในสารผสมลดลงอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นของแข็งบางๆ บนผนังภาชนะตกผลึก โดยชั้นของแข็งจะประกอบด้วยผลึกของแข็งของกรดปาล์มมิติกที่มีขนาดเล็กและกรดโอเลอิกที่อยู่ในรูปของเหลวในปริมาณเท่าๆ กัน เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิต่ำอย่างรวดเร็ว ทำให้กรดปาล์มมิติกแข็งตัวและกักเก็บกรดโอเลอิกไว้ระหว่างผลึกขนาดเล็กมากมาย ประกอบกับปริมาตรของสารผสมในบริเวณภูมิภาคของเหลวลดลงเมื่อชั้นของแข็งหนาขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในบริเวณภูมิภาคของเหลวเพิ่มขึ้นในตอนแรก และหลังจากนั้นเมื่อชั้นของแข็งมีความหนาตามที่ที่สภาวะอุณหภูมิของสารผสมที่ในภูมิภาคของเหลวค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลา 90 นาที ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจะลดลงอย่างต่อเนื่องเนื่องจากกรดปาล์มมิติกมีจุดเยือกแข็งสูงกว่า ทำให้กรดปาล์มมิติกถูกถ่ายโอนมวลไปยังชั้นของแข็ง ทำให้ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในภูมิภาคของเหลวลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น



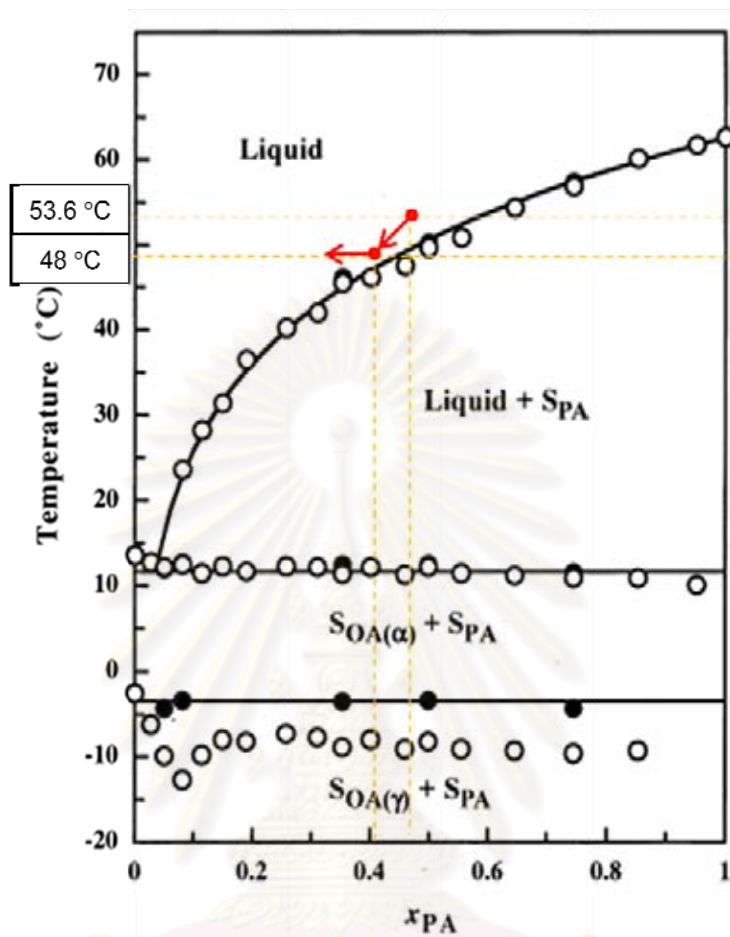
รูปที่ 4.2 การลดของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก (◇) และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (△) ในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาภายในสารผสมที่เป็นวัฏภาคของเหลว มาเปรียบเทียบกับแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (รูปที่ 4.1) เพื่อหาความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกบนเส้นแนวสภาพของแข็ง (solidus line) ในระบบสมดุลที่ทำให้กรดปาล์มมิติกในสารผสมเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ณ เวลาต่างๆ ทำให้ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ระบบสมดุลที่ทำให้กรดปาล์มมิติกเปลี่ยนสถานะเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยมีแนวโน้มไปทางเดียวกับอุณหภูมิ นั่นคืออุณหภูมิที่ลดลงอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และเมื่ออุณหภูมิก่อนข้างคงที่ ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจะคงที่เช่นกัน ซึ่งแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในวัฏภาคของเหลวในการทดลองที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิกงที่ และความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ทำให้กรดปาล์มมิติกเปลี่ยนสถานะ ณ เวลาที่วัดได้นั้น มีค่ามากกว่าความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกบริเวณวัฏภาคของเหลวที่วัดได้ในกระบวนการตกผลึก จึงทำให้กรดปาล์มมิติกในสารผสมที่บริเวณวัฏภาคของเหลวไม่สามารถเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งได้ แต่กรดปาล์มมิติกจะถูกถ่ายโอนไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งทำให้กรดปาล์มมิติกเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งภายในชั้นของแข็ง นอกจากนี้จากอุณหภูมิที่ลดลงในช่วงแรกและคงที่นั้น สามารถคาดคะเนทิศทางการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกบนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก ซึ่งแสดงทิศทางตามลูกศรดังรูปที่ 4.4 โดยความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิลดลง และเมื่ออุณหภูมิกงที่ ทิศทางการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจะลดลงในแนวขนานกันแกน x



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกและอุณหภูมิภายในสารผสมในวัฏภาคของเหลวเมื่อเวลาเปลี่ยนไปภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (\diamond) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง (\triangle) เป็นอุณหภูมิภายในสารผสมภายในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ และ (\circ) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกเมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

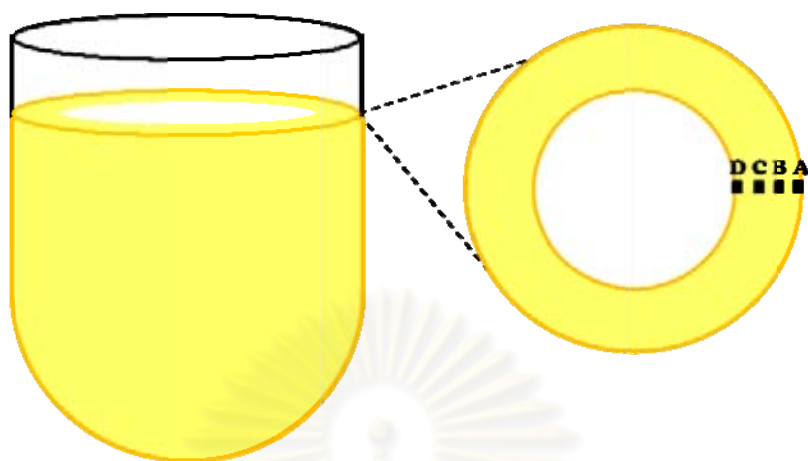


รูปที่ 4.4 ทิศทางการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

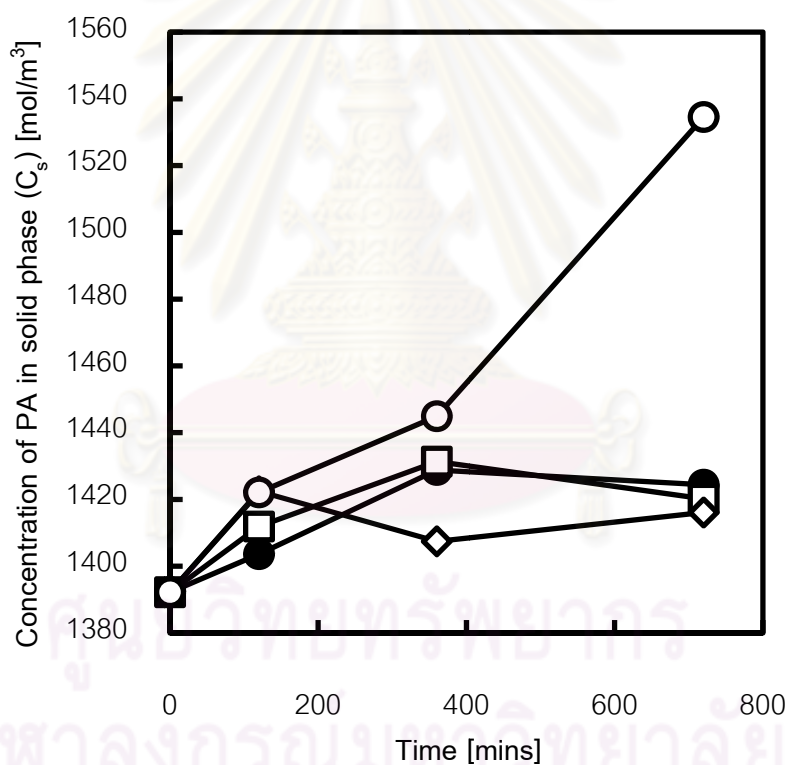
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในบริเวณภูมิภาคของแข็ง (ชั้นของแข็ง)

เนื่องจากความเข้มข้นในภูมิภาคของเหลวลดลง เมื่อเวลามากขึ้น จึงมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในภูมิภาคของแข็ง เมื่อเวลาเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยสมภาวะที่ใช้ในการศึกษานี้ ทำให้เกิดชั้นของแข็งที่มีความหนาประมาณ 1.4 เซนติเมตร ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก ชั้นของแข็งจะถูกแบ่งเป็นชั้น 4 ชั้นให้ระยะห่างเท่าๆ กัน ตั้งแต่ผนังภาชนะตกลึกจนถึงผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของเหลวกับของแข็ง ดังรูป 4.5(a) จากผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่เปลี่ยนไปในชั้นของแข็ง แสดงดังจากรูปที่ 4.5(b) ในแต่ละชั้นของชั้นของแข็งจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกเมื่อเวลามากขึ้น โดยเฉพาะจุด D ซึ่งเป็นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของเหลวกับของแข็ง จะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกมากที่สุด เนื่องจากการแพร่ของโมเลกุลของกรดปาล์มมิติกที่เกิดขึ้น ซึ่งอัตราเร็วในการแพร่จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะแปรผกผันกับโครงสร้างของโมเลกุล ทำให้ภูมิภาคของแข็งจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่น้อยกว่าในภูมิภาคของเหลว ส่งผลให้การแพร่ภายในภูมิภาคของแข็งนั้นเกิดได้น้อยมากเมื่อเทียบกับภูมิภาคของเหลว ด้วยเหตุนี้เมื่อโมเลกุลของกรดปาล์มมิติกที่แพร่จากภูมิภาคของเหลวจนมาถึงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของเหลวกับของแข็ง จะเกิดการสะสมของโมเลกุลกรดปาล์มมิติกอยู่บริเวณผิวสัมผัสนี้ (จุด D) ซึ่งผิวสัมผัสนี้เป็นบริเวณแรกที่โมเลกุลของกรดปาล์มมิติกสัมผัสกับของชั้นของแข็งก่อนจะแพร่เข้าสู่ภายในชั้นของแข็ง และแพร่ผ่านภายในชั้นของแข็งอย่างช้าๆ ทำให้ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่จุด A, B และ C ได้เพิ่มขึ้นน้อยมากหรือค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น



(a)

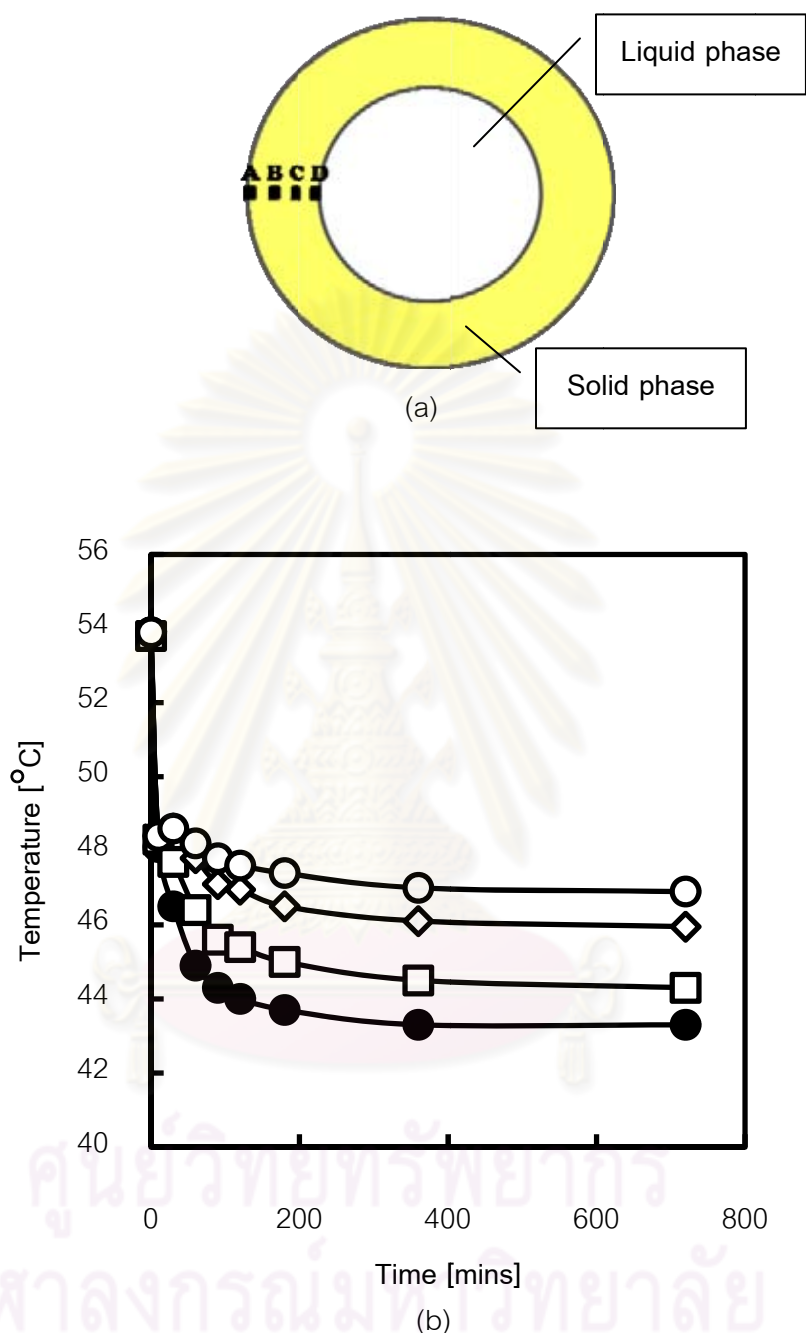


(b)

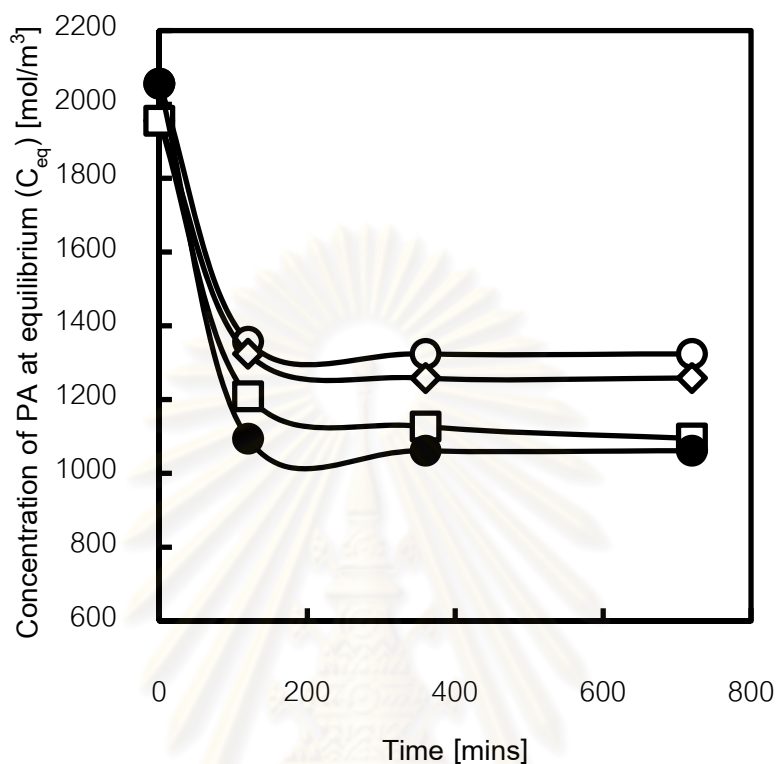
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่จุดต่างๆ ในวัฏภาคของแข็ง โดย (a) กำหนดชั้นต่างๆ ในวัฏภาคของแข็ง และ (b) ความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปตามเวลา ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ (○) จุด D

อุณหภูมิในแต่ละจุดภายในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้น ซึ่งถูกควบคุมด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง T_H และ T_W ทำให้อุณหภูมิจุดต่างๆ แตกต่างกัน และเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังรูปที่ 4.6 โดยสังเกตว่าอุณหภูมิภายในชั้นของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับอุณหภูมิของสารผสมที่เป็นวัฏภาคของเหลว และอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเวลา 180 นาที โดยจุดภายในชั้นของแข็งที่อยู่ใกล้กับอุปกรณ์ให้ความร้อนตรงกลางของภาชนะตกผลึกจะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่อยู่ใกล้กับผนังภาชนะตกผลึก และเมื่อนำอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาภายในชั้นของแข็ง มาเปรียบเทียบกับแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (รูปที่ 4.1) เพื่อหาความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่น้อยที่สุดที่ทำให้กรดปาล์มมิติกสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งได้ ที่อุณหภูมิต่างๆ จุดต่างๆ ภายในชั้นของแข็ง จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำ ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่น้อยที่สุดที่ทำให้กรดปาล์มมิติกแข็งตัวจะมีค่าน้อยกว่าจุดที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลว (จุด D) ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดอื่นๆ ในชั้นของแข็งมีความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกมาก และบริเวณผนังภาชนะตกผลึกที่มีอุณหภูมิต่ำจะมีความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกน้อยที่สุดในชั้นของแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.7 แสดงว่าบริเวณผิวสัมผัสจะมีความบริสุทธิ์ของกรดปาล์มมิติกสูงกว่าบริเวณอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกบริเวณผิวสัมผัสที่ได้จากการทดลองมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ส่วนความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจะคงที่เมื่ออุณหภูมิจึงที่ แสดงว่ากรดปาล์มมิติกเกิดการถ่ายโอนมวลอย่างช้าจากผิวสัมผัสไปยังผนังภาชนะตกผลึกเมื่อเวลาผ่านไป

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



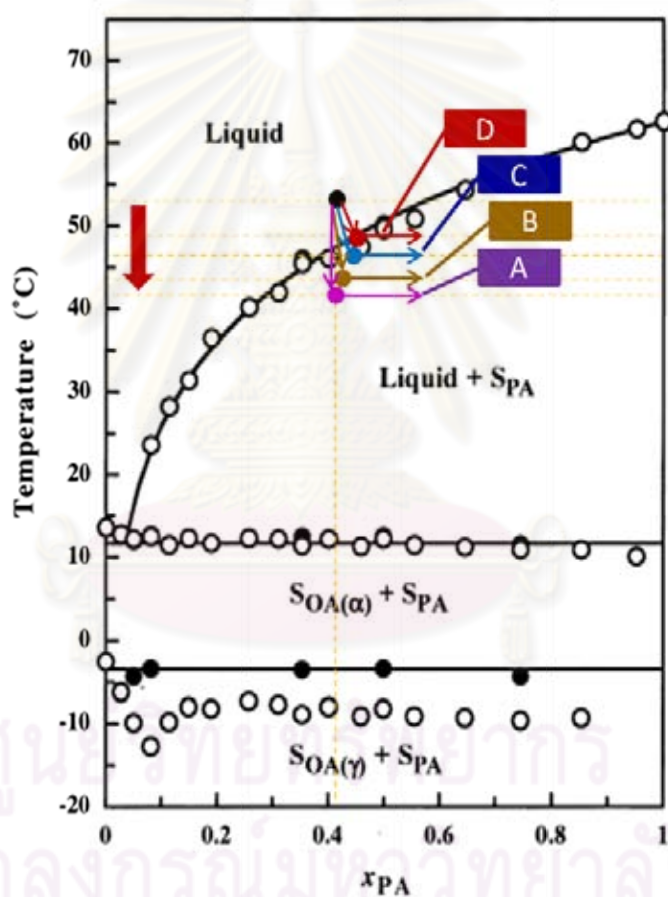
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในภาชนะตกผลึก ภายในเวลา 720 นาที และที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (◻) จุด B, (◊) จุด C และ (○) จุด D



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกบนเส้นแนวสภาพของแข็งที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในชั้นของแข็ง ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ (○) จุด D

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุณหภูมิที่ลดลงเมื่อเวลามากขึ้น สามารถคาดคะเนทิศทางของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกบนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก ซึ่งแสดงทิศทางตามลูกศรดังรูปที่ 4.8 โดยความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในแต่ละชั้นภายในชั้นของแข็งจะมีทิศทางเหมือนกันตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละชั้นที่จะลดลงและคงที่

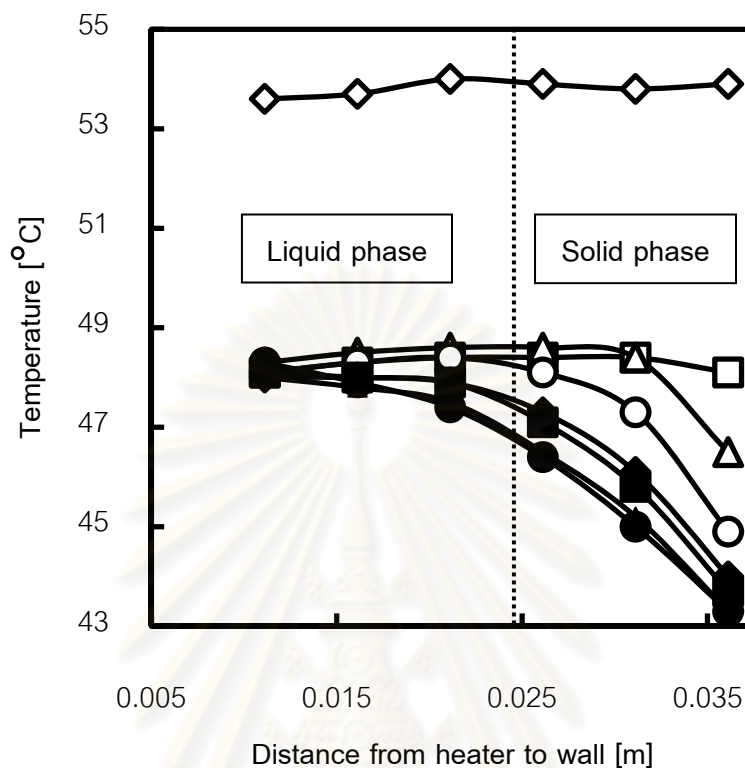


รูปที่ 4.8 ทิศทางการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแนวรัศมี ภายในภาชนะตกลึก ที่ช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเริ่มกระบวนการตกลึก อุณหภูมิภายในของสารผสมทั้งในภูมิภาคของเหลวและของแข็งจะลดลงพร้อมๆ กันอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก ซึ่งในช่วง 10 นาทีแรกนี้ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ภายในสารผสมจะมีค่าน้อย แต่เมื่อเวลามากขึ้น อุณหภูมิจะลดลงเรื่อยๆ ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุปกรณ์ให้ความร้อน T_H และผนังภาชนะตกลึก T_W มีค่ามากขึ้น ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิที่มากขึ้นนี้ จะส่งผลกระทบต่อการแยกสารผสมกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกในกระบวนการตกลึกแบบชั้นของแข็ง ตามทฤษฎีการถ่ายโอนมวล (Mass transfer)



คุรุวิทยุฑยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



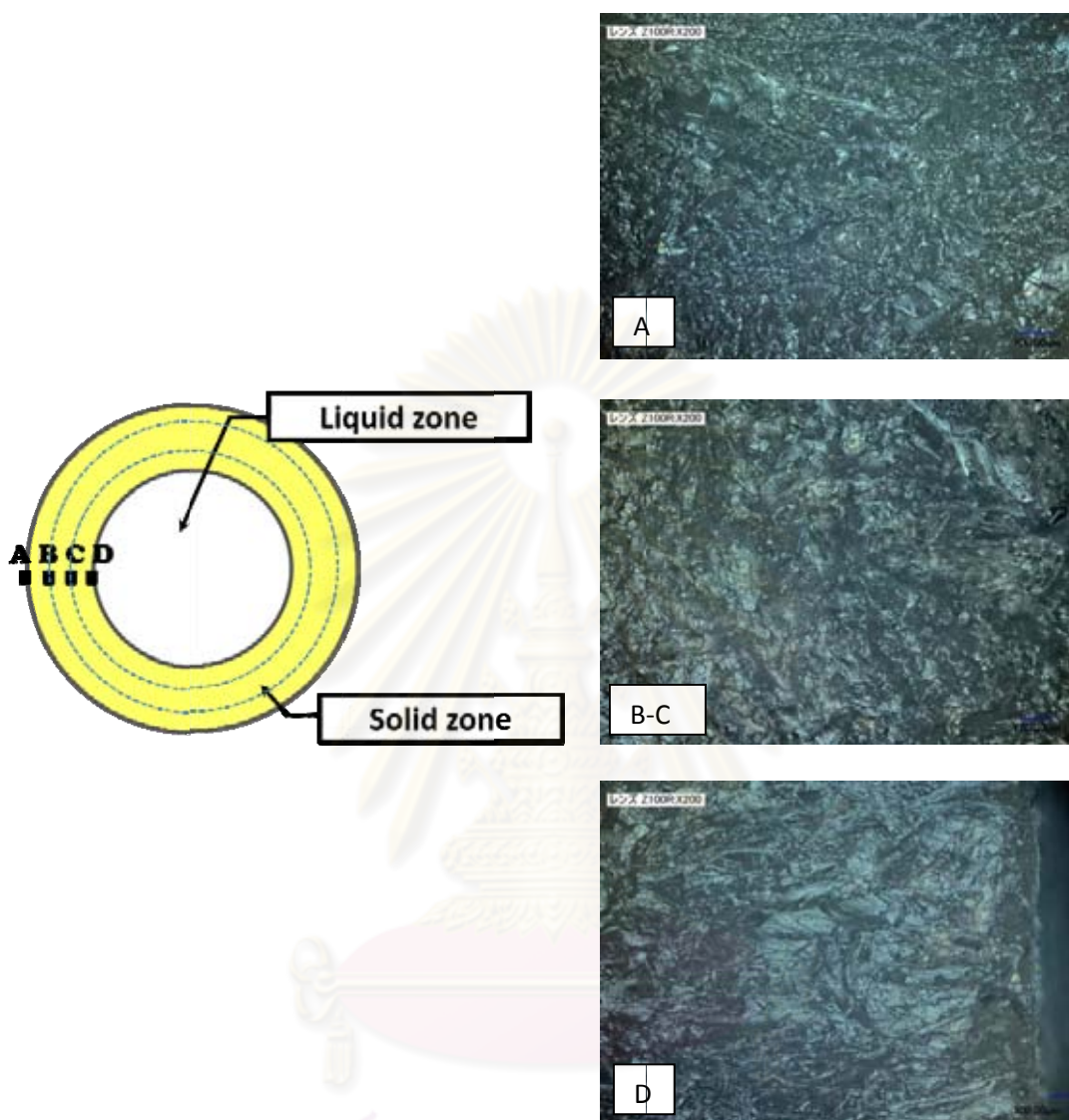
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแนวรัศมี ภายในภาชนะตกผลึก ที่ช่วงเวลาต่างๆ และที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_w เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (◇) 0 นาที, (□) 10 นาที, (△) 30 นาที, (○) 60 นาที, (◆) 120 นาที, (■) 180 นาที, (▲) 360 นาที และ (●) 720 นาที

4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของผลึกที่เกิดขึ้นภายในชั้นของแข็ง

เนื่องจากชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นมีการขยายตัวจนถึงประมาณ 90 นาที จึงจะคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นแต่ละชั้นภายในชั้นของแข็งเมื่อเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็งมีค่ามากที่สุดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวกับของแข็งดังผลการวิเคราะห์ข้างต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นแต่ละชั้นเมื่อเวลาผ่านไป 720 นาที โดยแบ่งชั้นของแข็งเป็น 4 ชั้น และนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) จากผลการวิเคราะห์ ภายในชั้นของแข็งนี้จะประกอบด้วยผลึกที่เกิดขึ้น (ลักษณะเป็นผลึกสี่เหลี่ยม) และสารผสมที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวที่แทรกอยู่ระหว่างผลึก (ลักษณะเป็นสีดำที่โยงต่อกัน) แสดงดังรูปที่ 4.10 สารผสมที่แทรกอยู่นั้นเป็นสารผสมที่มีองค์ประกอบหลักเป็นกรดโอเลอิก เนื่องจากกรดโอเลอิกมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่า จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ และผลึกที่เกิดขึ้นในชั้นของแข็งนั้นเป็นผลึกของกรดปาล์มมิติก เนื่องจากกรดปาล์มมิติกมีจุดเยือกแข็งสูงกว่า จึงแข็งตัวกลายเป็นผลึก ซึ่งอธิบายจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกแสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะและขนาดของผลึกในแต่ละจุด พบว่า ผลึกของกรดปาล์มมิติกจะขนาดเล็กและกระจายกันอย่างหนาแน่นบริเวณผนังภาชนะตกผลึก (จุด A) ซึ่งเกิดจากการการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิของภาชนะตกผลึกลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิทันที และผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นที่จุด B และ C และจะมีขนาดใหญ่ที่สุดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวกับของแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาภายในชั้นของแข็ง นั่นคือ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวกับของแข็ง จะเกิดการสะสมของโมเลกุลกรดปาล์มมิติกก่อนแพร่เข้าสู่ชั้นของแข็งนั่นเอง ซึ่งบริเวณผิวสัมผัสนี้ (ระยะห่างจากอุปกรณ์ให้ความร้อนประมาณเท่ากับ 2.45 เซนติเมตร) เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในชั้นของแข็ง ซึ่งจะมีความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่สามารถเปลี่ยนแปลงสถานะกลายเป็นของแข็งหรือผลึกได้มากกว่าบริเวณอื่นๆ ในชั้นของแข็งซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงทำให้โมเลกุลของกรดปาล์มมิติกที่สะสมอยู่บริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยโมเลกุลของกรดปาล์มมิติกที่สะสมในรูปของวัฏภาคของเหลวจะรวมตัวกับผลึกของแข็งของกรดปาล์มมิติกบริเวณผิวสัมผัสกลายเป็น

ผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังลักษณะของผลึกที่จุด D ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเราสามารถเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการตกผลึกซ้ำ (Recrystallization) และเมื่อพิจารณาสารผสมที่มีกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในสถานะของเหลวที่แทรกระหว่างผลึกของกรดปาล์มิติก จะเห็นได้ว่า ที่จุด A เป็นจุดที่มีการกระจายของกรดโอเลอิกมาก เนื่องจากการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สัดส่วนขององค์ประกอบในสารผสมมีการเปลี่ยนแปลงทั้งในวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยสัดส่วนของกรดปาล์มิติกจะเพิ่มขึ้นภายในวัฏภาคของเหลวบริเวณตรงกลางภาชนะตกผลึกในช่วงเวลา 90 นาทีแรกหรือในช่วงเวลาที่ความหนาของชั้นของแข็งยังไม่คงที่ และสัดส่วนของกรดโอเลอิกจะเพิ่มขึ้นในวัฏภาคของแข็งที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์เป็นค่าความเข้มข้น จะสอดคล้องกับผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มิติกในวัฏภาคของเหลว นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าที่เวลา 720 นาที เมื่อชั้นของแข็งมีความหนาคงที่ กรดโอเลอิกในชั้นของแข็งเคลื่อนที่ภายในชั้นของแข็งได้น้อยมาก เนื่องจากปรากฏการณ์การตกผลึกซ้ำของกรดปาล์มิติกที่ทำให้ผลึกของแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง จึงทำให้กรดโอเลอิกที่อยู่ภายในชั้นของแข็งไม่สามารถแพร่ไปยังวัฏภาคของเหลวได้ หรือแพร่ได้ช้ามาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นภายในวัฏภาคของแข็งภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.1.4 การศึกษากลไกการเกิดผลึกในชั้นของแข็งและการแพร่ของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น สามารถอธิบายกลไกของการเกิดผลึกและการแพร่ของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกในสารผสม สามารถอธิบายกลไกการเกิดผลึกของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งได้ ด้วยแผนภาพจำลองดังรูปที่ 4.11 เมื่อเริ่มกระบวนการตกผลึก ภาชนะตกผลึกจะถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยจุ่มภาชนะตกผลึกลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ทำให้อุณหภูมิภายในสารผสมลดลงภายใน 10 นาที และเกิดขึ้นของแข็งขึ้นบางๆ ซึ่งประกอบด้วยผลึกของกรดปาล์มมิติก (PA crystal) ขนาดเล็กจำนวนมากเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น และระหว่างผลึกจะถูกแทรกด้วยสารผสมที่มีกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสัดส่วนระหว่างกรดไขมันทั้งสองเท่ากับสัดส่วนของสารผสมเริ่มต้น และนอกจากนี้ชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นแทนที่สารผสมที่เป็นวัฏภาคของเหลว ทำให้ปริมาตรของวัฏภาคของเหลวน้อยลง ส่งผลให้ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวมากขึ้นในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไป ผลึกของกรดปาล์มมิติกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น พร้อมๆ กับการขยายตัวของชั้นของแข็ง จนความหนาของชั้นของแข็งคงที่ ณ เวลาผ่านไปประมาณ 90 นาที ที่เวลานี้ชั้นของแข็งจะหยุดการขยายตัว และเกิดปรากฏการณ์การแพร่ระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลวต่อไป

หลังจากที่ความหนาของชั้นของแข็งคงที่ ปรากฏการณ์การแพร่ระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกจึงเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากที่เวลามากขึ้นความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient) มากขึ้น โดยการแพร่ของกรดปาล์มมิติกวัฏภาคของเหลวบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะถูกแพร่ไปยังวัฏภาคของแข็งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แต่การแพร่ภายในวัฏภาคของแข็งนั้น มีอัตราการแพร่ที่ช้ามาก ด้วยเหตุที่ว่าในวัฏภาคของแข็งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่น้อยมากนั่นเอง ทำให้เกิดการสะสมของโมเลกุลของกรดปาล์มมิติกบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง และเกิดปรากฏการณ์การตกผลึกซ้ำ (Recrystallization) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การรวมตัวของกรดปาล์มมิติกกับผลึกของกรดปาล์มมิติกบริเวณผิวสัมผัสนี้ ส่งผลให้ผลึกของกรดปาล์มมิติกบริเวณผิวสัมผัสนี้มีขนาดใหญ่ขึ้นและใหญ่กว่าบริเวณอื่นๆ ดังแผนภาพจำลองรูปที่ 4.12 ส่วนกรดโอเลอิกที่

ถูกแทรกระหว่างผลึกของกรดปาล์มมิติก จะแพร่จากภายในชั้นของแข็งไปสู่บริเวณที่เป็นวัฏภาคของเหลว ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของกรดโอเลอิกในวัฏภาคของแข็งและของเหลว แต่อัตราการแพร่เป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากเป็นการแพร่สารภายในวัฏภาคของแข็งเช่นกัน

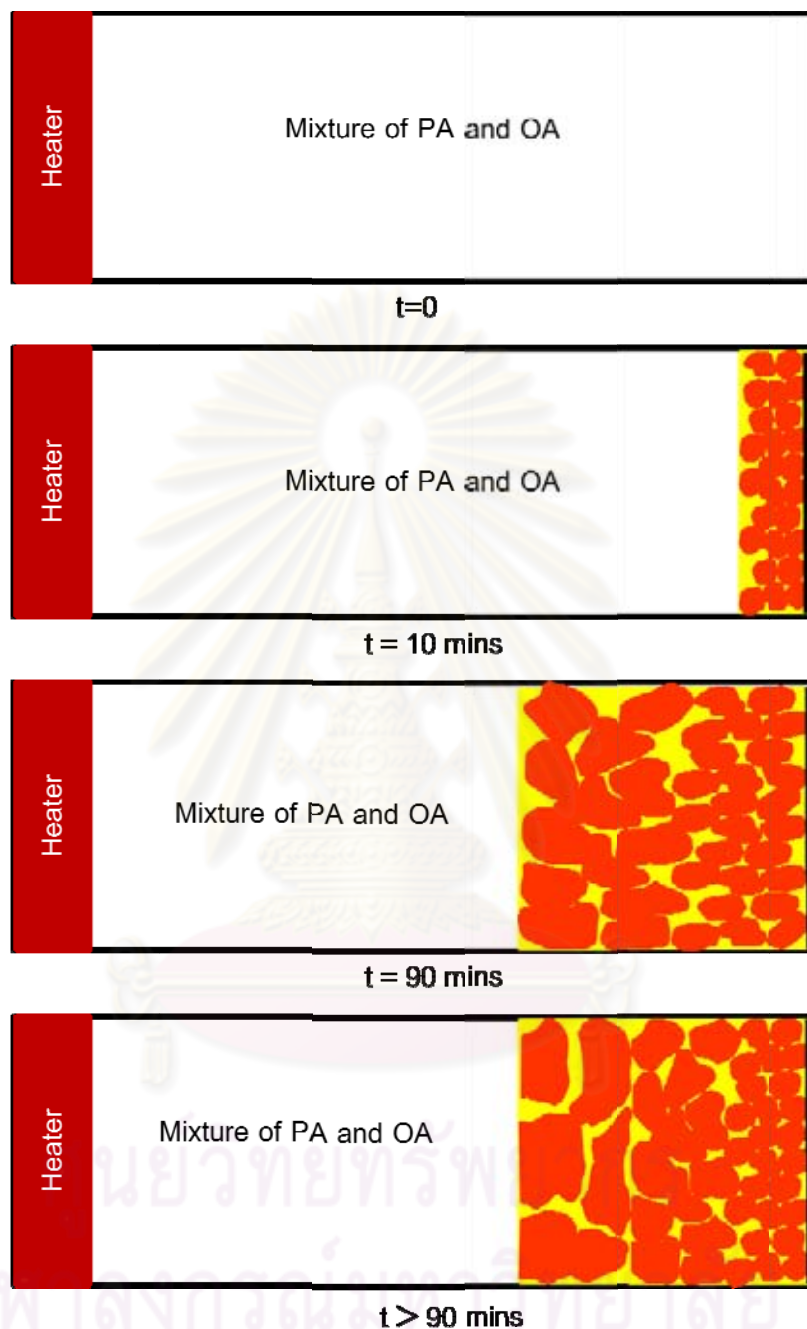
นอกจากนี้กลไกของการเกิดผลึกและการแพร่ของของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกในสารผสม สามารถอธิบาย โดยอาศัยแบบจำลองแผนภาพสมดุลของสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก แสดงดังรูปที่ 4.13 สารบริสุทธิ์สองชนิดมาผสมกัน และนำไปให้ความร้อนจนกลายเป็นสารผสมเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำสารผสมเนื้อเดียวกันควบคุมอุณหภูมิตรงกลาง T_H และผนังของภาชนะ T_W ให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าและต่ำกว่ากว่าจุดเยือกแข็งของสารผสม ตามลำดับ เมื่อเริ่มกระบวนการตกผลึก อุณหภูมิของสารผสมจะลดลง และเกิดชั้นของแข็งบริเวณผนังภาชนะ โดยอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสระหว่างสถานะของเหลวและชั้นของแข็ง จะถูกลดลงจนถึงอุณหภูมิต่ำหนึ่ง (T_1) ในแนวเส้นสภาพของเหลว (liquidus line) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้กรดปาล์มมิติกในสารผสมเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็งที่ปนอยู่ในสารผสม โดยความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก ณ บริเวณนี้ กำหนดให้เป็น $C_{interface}$ เมื่อกรดปาล์มมิติกถูกแพร่มาบริเวณผิวสัมผัสนี้ จะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง และเมื่อก้อนแข็งของกรดปาล์มมิติกหลายก้อนเกิดการรวมตัวกัน ณ บริเวณผิวสัมผัสนี้ที่มีอุณหภูมิต่ำที่ T_1 ทำให้สัดส่วนของกรดปาล์มมิติกในสารผสมมากขึ้น จนกลายเป็นผลึกของกรดปาล์มมิติกที่ค่อนข้างมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งสามารถอธิบายตามแนวทฤษฎีน้ำเงินในแบบจำลองแผนภาพสมดุลของสารผสมกรดไขมันทั้งสอง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ถูกเรียกว่า ปฏิกิริยาการตกผลึกซ้ำ (recrystallization) โดยปฏิกิริยานี้ เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างกรดปาล์มมิติกในสารผสมกับผลึกของกรดปาล์มมิติก จากปฏิกิริยานี้ สามารถทำหน้าที่เป็นแรงขับเคลื่อน (driving force) ในกระบวนการแยกสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกด้วยวิธีการตกผลึกได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำที่บริเวณผิวสัมผัส (T_1) และผนังของภาชนะ (T_W) ที่สัดส่วนของกรดปาล์มมิติกแตกต่างกัน โดยที่ผนังของภาชนะจะมีสัดส่วนของกรดปาล์มมิติกในสารผสม (C_{wall}) น้อยกว่าที่บริเวณผิวสัมผัส ($C_{interface}$) ซึ่งหมายความว่า สัดส่วนของกรดโอเล

อีกในสารผสมที่ผนังของภาชนะมีค่ามากกว่าที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งทำให้เกิดการแพร่ของกรดโอเลอิก จากบริเวณผนังของภาชนะไปยังบริเวณผิวสัมผัส ตามตามแนวลูกศรสีเขียว

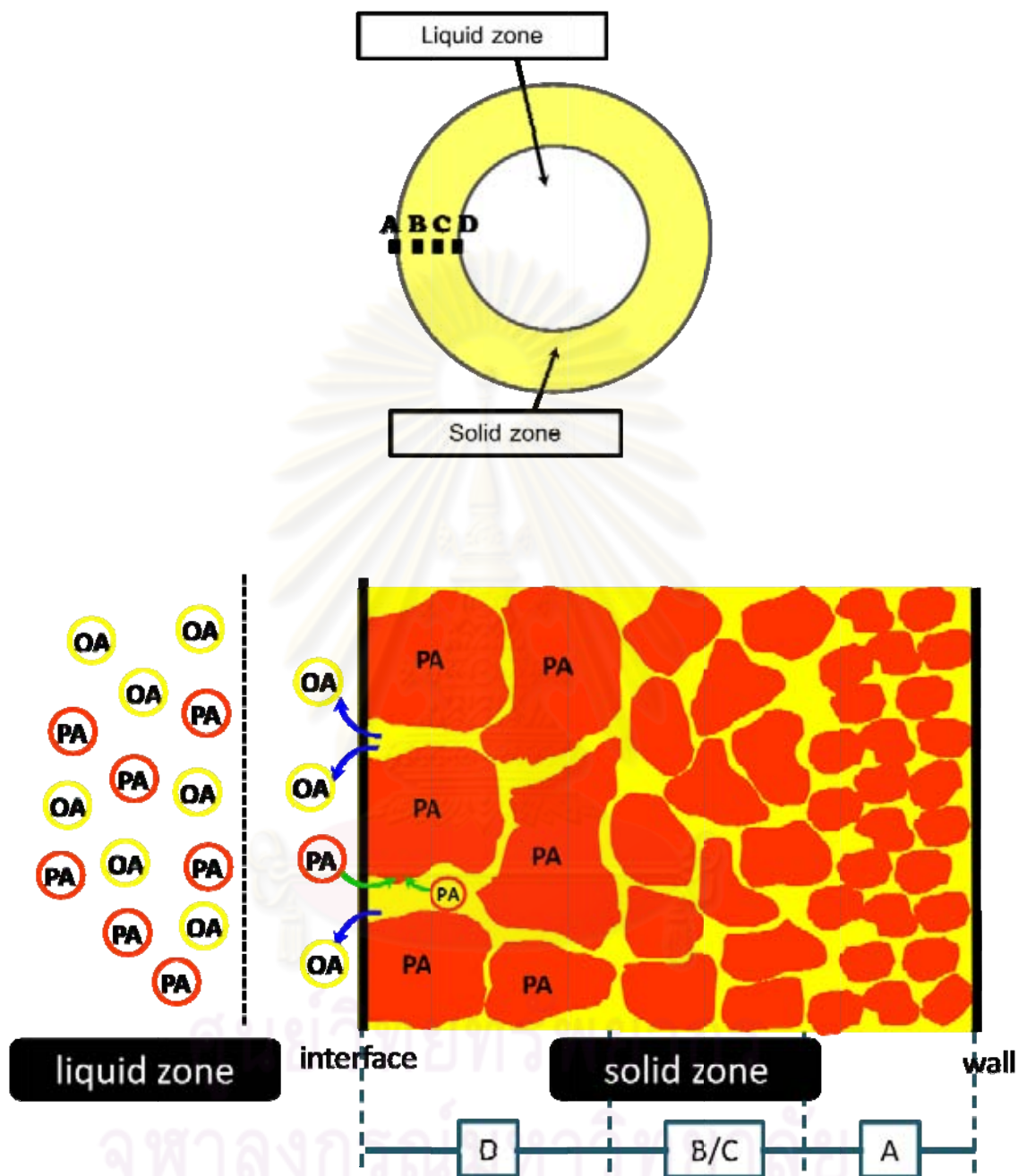
ในการแยกสารด้วยกระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็งนี้ การแพร่ของสารผสมระหว่างกรดไขมันสองชนิดทั้งภายในวัฏภาคของแข็งและของเหลวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากกรดไขมันเป็นสารที่มีความหนืดสูงและมีโมเลกุลเรียงกันอย่างหนาแน่น โดยเฉพาะภายในวัฏภาคของแข็ง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมาก จึงทำให้การแยกในงานวิจัยนี้ เป็นการเพิ่มหรือลดอัตราส่วนระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกภายในวัฏภาคของแข็งและของเหลวเท่านั้น



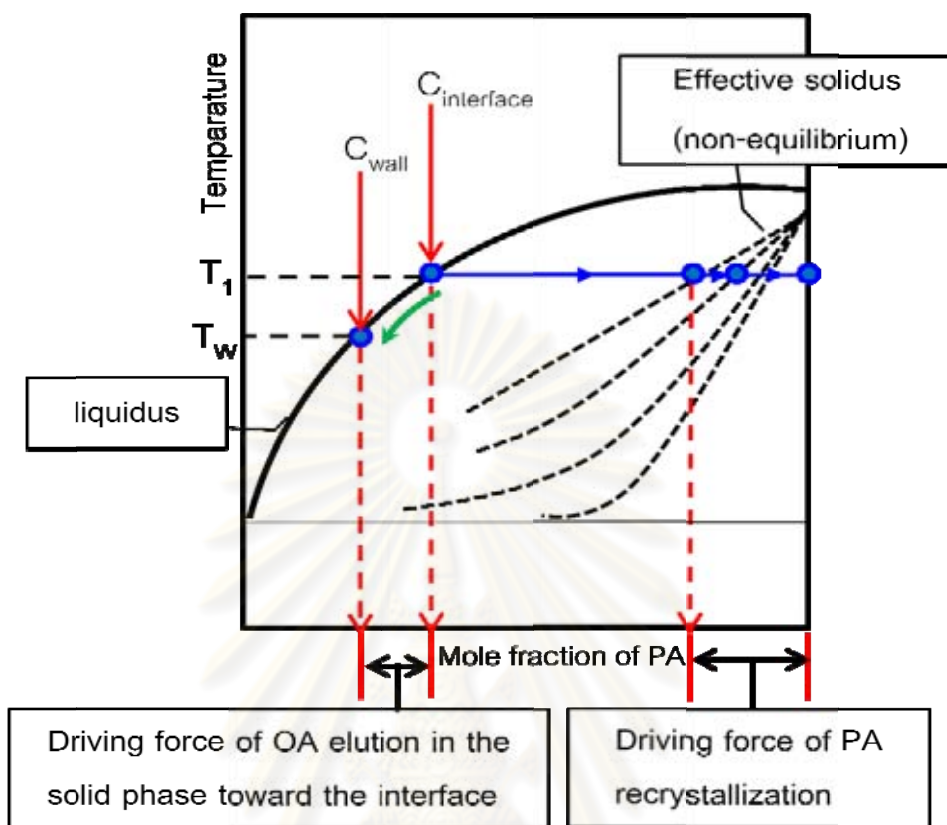
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 แผนภาพจำลองกลไกการเกิดผลึกของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง ที่เวลาต่างๆ โดยกำหนด ■ เป็นผลึกของกรดปาล์มมิติก (PA crystal) และ ■ สารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA/OA mixture)



รูปที่ 4.12 แผนภาพจำลองกลไกของกระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็ง โดยกำหนด เป็นผลึกของกรดปาล์มมิติก (PA crystal) และ สารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA/OA mixture)



รูปที่ 4.13 แบบจำลองแผนภาพสมดุล (Phase diagram) ของสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนโดยอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์

การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ทำได้โดยการคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ที่ทำให้ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกและอนุภูมิในชั้นของแข็งในแนวรัศมีตั้งแต่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลวจนถึงผนังภาชนะตกลูกที่ได้จากการคำนวณตรงกับผลการทดลอง โดยที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) (Regression coefficients) เป็นตัวกำหนดความแม่นยำของค่าสัมประสิทธิ์ที่หาได้ ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์แบบจำลองของชั้นของแข็งสองมิติที่ใช้ในการคำนวณ จะแบ่งชั้นของแข็งออกเป็น 4 ชั้นเท่าๆ กัน ได้แก่ ชั้น A, B, C และ D และสภาวะที่ใช้ในการคำนวณคือ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอนุภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

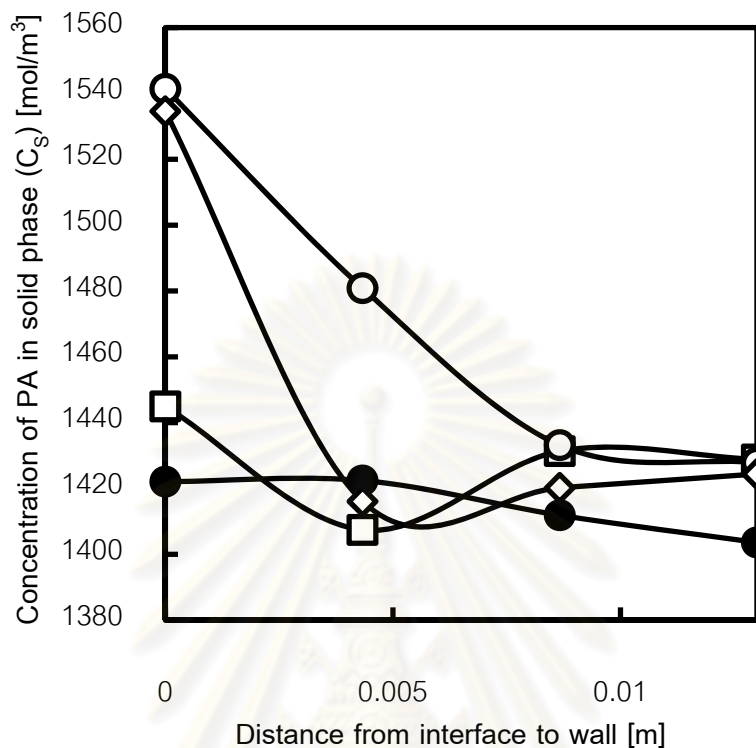
ขั้นตอนการคำนวณจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของการถ่ายโอนมวลและส่วนของการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งทั้งสองส่วนนั้นจะมีค่าสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและระยะทางตามแนวรัศมีจากผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลวจนถึงผนังภาชนะตกลูกที่มีความสัมพันธ์กัน โดยตัวแปรหลักของการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนความร้อน คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดปาล์มมิติกและ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มมิติก (effective diffusion coefficient) ในชั้นของแข็งในปรากฏการณ์ถ่ายโอนมวล

ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็งในการถ่ายโอนมวลนั้น เป็นปัจจัยหลักที่บ่งบอกความเร็วในการแพร่ของสารภายในชั้นของแข็งและส่งผลโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ซึ่งโดยทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและลักษณะโครงสร้างของสาร นั่นคือบริเวณที่มีคุณสมบัติสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากกว่าบริเวณที่มีคุณสมบัติต่ำ และภูมิภาคของเหลวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากกว่าภูมิภาคของแข็ง ทำให้ภายในชั้นของแข็งจะมีการถ่ายโอนมวลได้น้อย เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ โดยในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลนี้ จะใช้การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็งที่ได้จากการทดลองนั้น ซึ่งแสดงดังรูป 4.14 เป็นตัวเปรียบเทียบกับผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์จะศึกษาการถ่ายโอนมวลภายในบริเวณชั้นของแข็ง ดังนั้นการคิดเวลาในการคำนวณนั้นจะเริ่มคำนวณที่เวลา 120 นาทีเป็นเวลาเริ่มต้น เนื่องจากเวลานี้เป็นเวลาที่เราแน่ใจได้แล้วว่าชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นจะมีความหนาคงที่ โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้ 360, 720 และ 1440 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

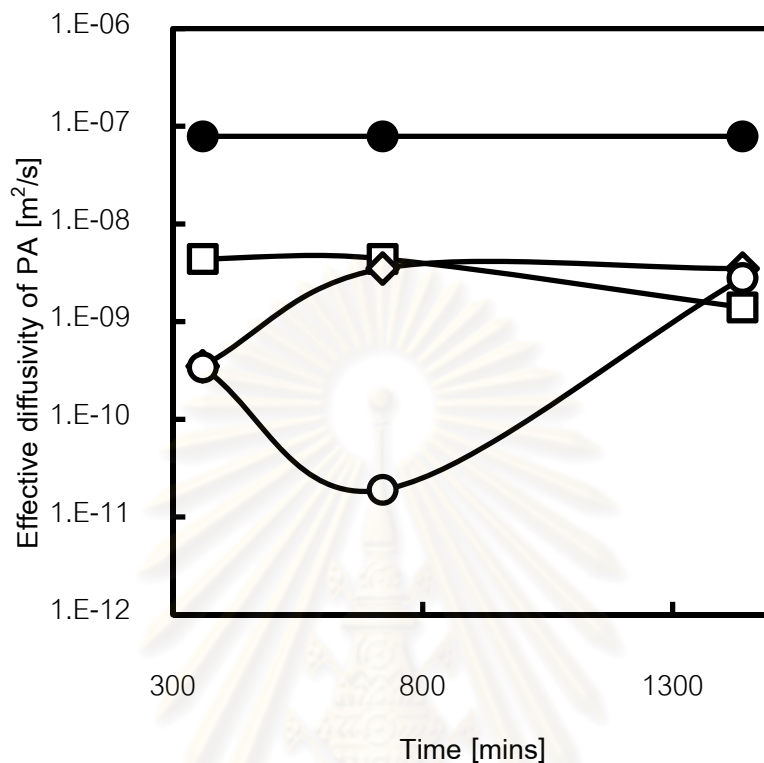


รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็ง ณ เวลาต่างๆ ที่ สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และ อุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) 120 นาที, (□) 360 นาที, (◇) 720 นาที และ (○) 1440 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

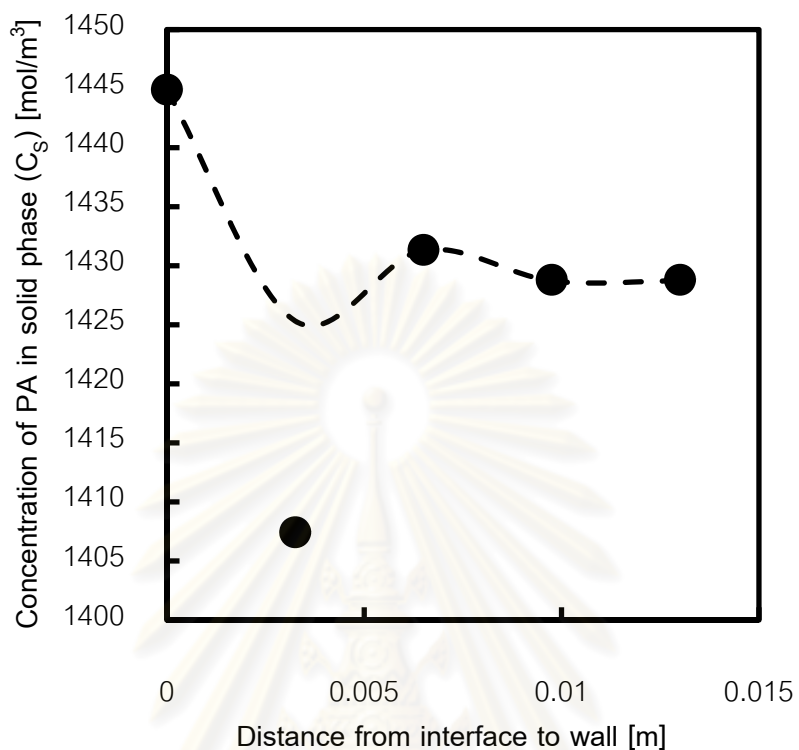
จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในชั้นของแข็งจะมีค่าน้อยมาก และเปลี่ยนแปลงตามเวลาน้อยมากเช่นกัน จากรูปที่ 4.15 ที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็ง จะเห็นได้ว่าบริเวณผนังภาชนะตผลึกจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมากกว่าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว เนื่องจากผลึกบริเวณผนังภาชนะเป็นผลึกของกรดปาล์มมิติกที่มีขนาดเล็ก จึงมีพื้นที่ผิวระหว่างผลึกมาก ซึ่งพื้นที่ผิวระหว่างผลึกเป็นเส้นทางการแพร่ของสาร ดังนั้นเมื่อพื้นที่ผิวมาก สารจะแพร่ได้ง่าย ทำให้สารกระจายบริเวณผนังภาชนะอย่างสม่ำเสมอ ส่วนบริเวณผิวสัมผัส เนื่องจากว่าเป็นบริเวณที่เกิดการตผลึกซ้ำ ทำให้กรดปาล์มมิติกส่วนใหญ่ที่แพร่เข้าสู่ชั้นของแข็ง เกิดการรวมตัวกันเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นบริเวณผิวสัมผัสนี้ และเมื่อเวลามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลบริเวณผนังภาชนะตผลึก (ชั้น A) จะมีคงที่ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง (ชั้น D) มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากที่สุด จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้ จะได้ผลการเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่ได้จากการคำนวณ ดังรูปที่ 4.16-4.18 และมีเปรียบเทียบกับผลของการเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่ได้จากการทดลอง โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) ระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.1 และเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกได้ชัดเจนขึ้น จึงมีการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก โดยใช้แถบสีเข้ามาช่วย แสดงดังรูปที่ 4.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



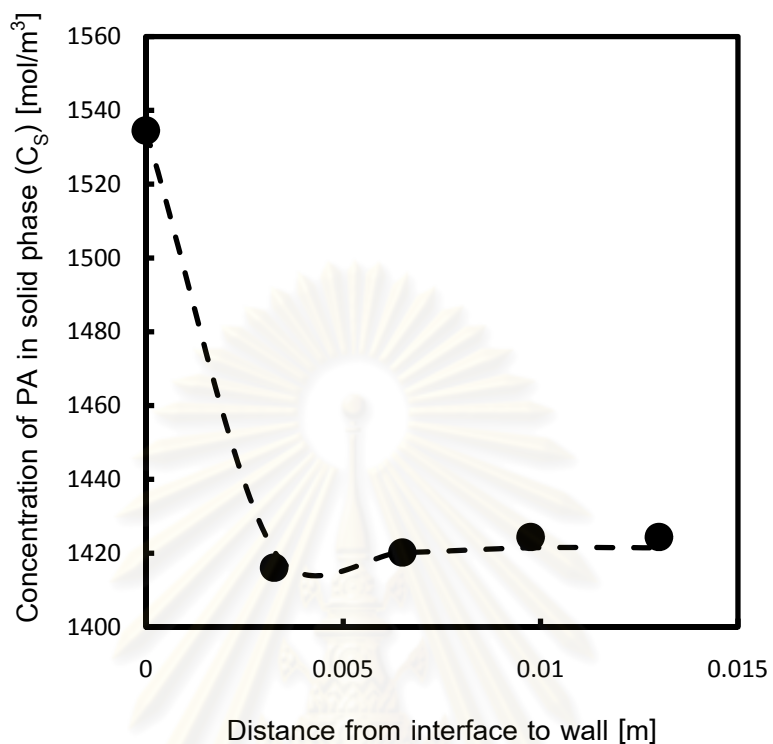
รูปที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มมิติกในแต่ละชั้นภายในชั้นของแข็ง ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ (○) จุด D

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



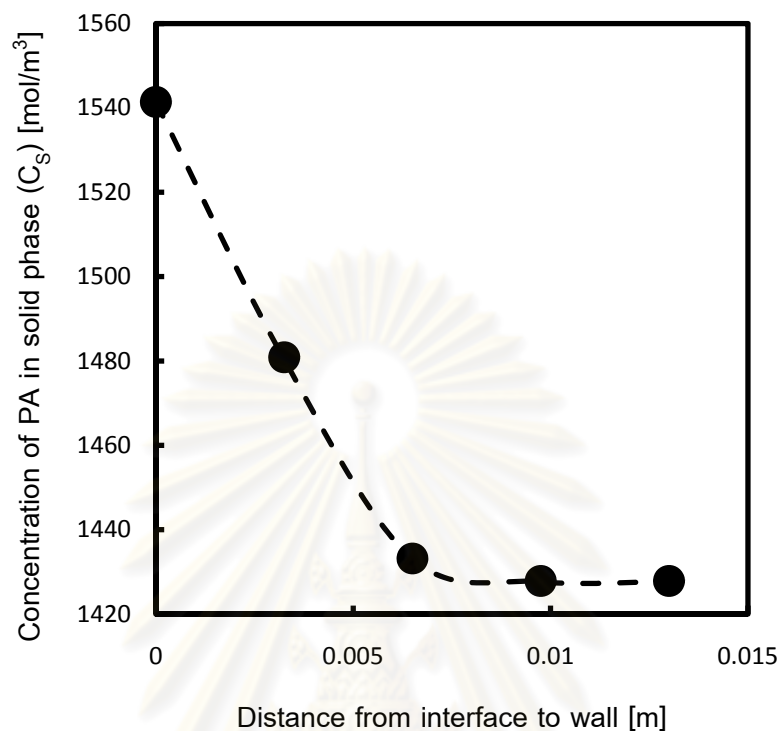
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ที่เวลา 360 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ที่เวลา 720 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณ

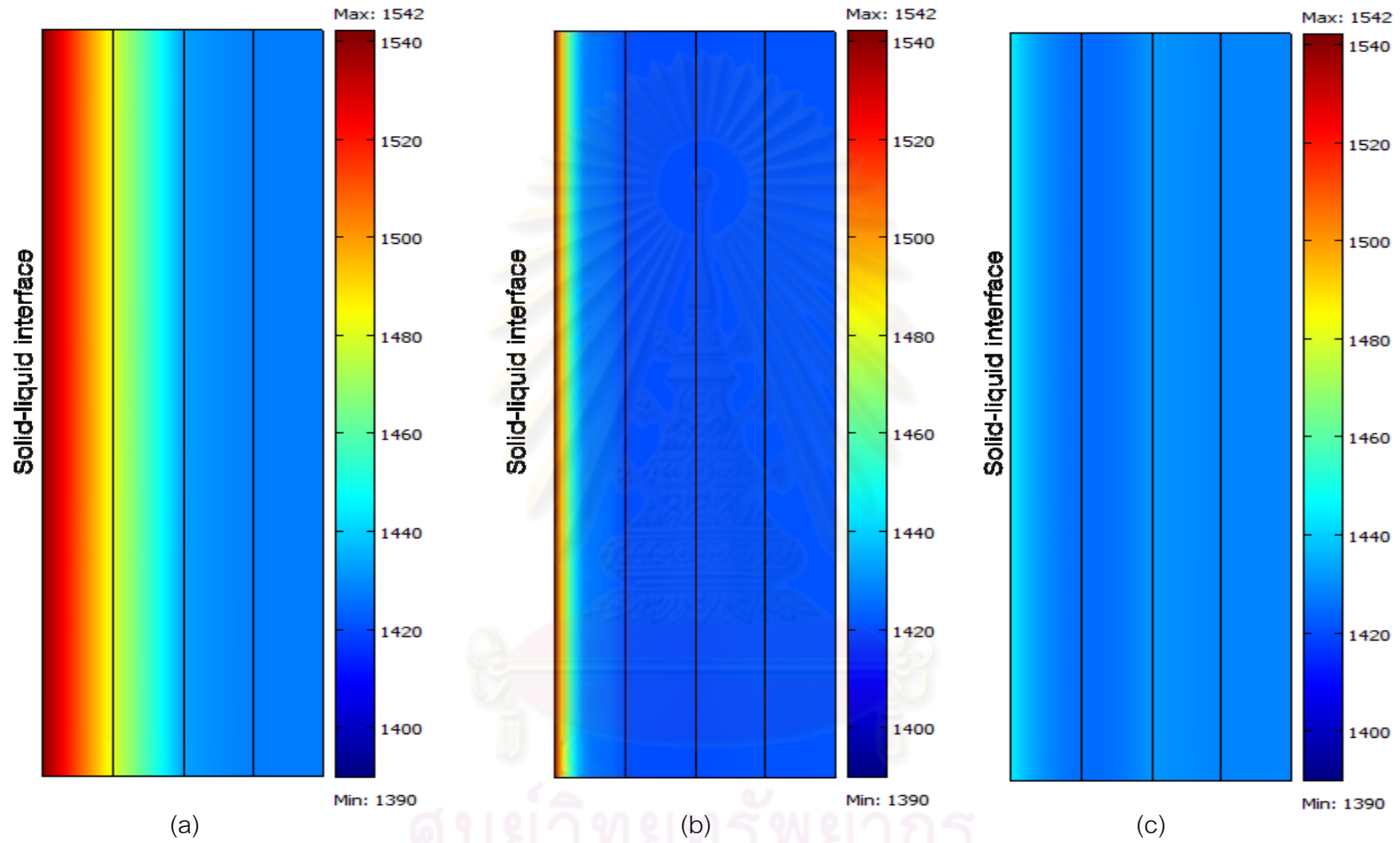
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็ง ที่เวลา 1440 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R²)) ระหว่างผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งจากการคำนวณกับจากการทดลอง

เวลา [นาที]	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R ²)
360	0.56
720	0.99
1440	0.99



รูปที่ 4.19 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติทิกในชั้นของแข็ง ที่เวลาต่างๆ ดังนี้ (a) 360, (b) 720, และ (c) 1440 นาที

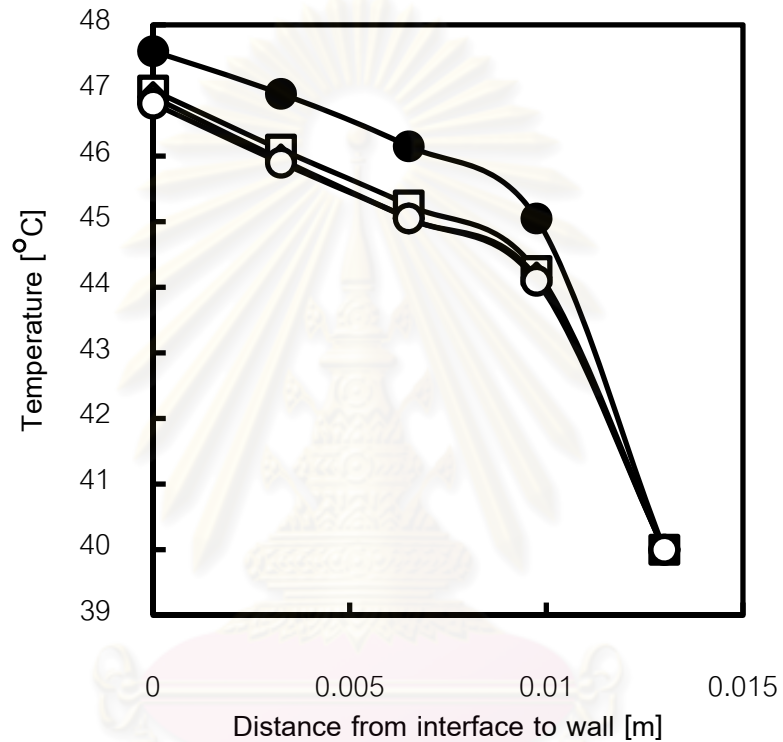
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (conduction coefficient) ในชั้นของแข็ง ในปรากฏการณ์ถ่ายโอนความร้อน

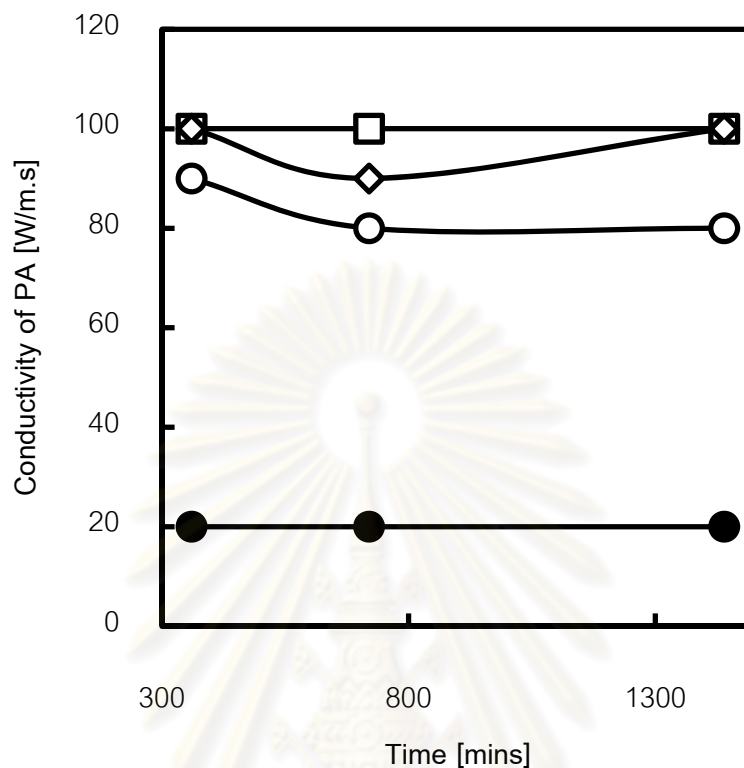
หลังจากคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็ง โดยผลที่ได้เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่จุดต่างๆ ภายในชั้นของแข็ง ซึ่งจากความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกสามารถนำมาคิดเป็นสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติก เพื่อนำมาหาค่าความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนที่เปลี่ยนไปที่จุดต่างๆ ภายในของแข็ง ณ เวลาต่างๆ และนำมาใช้เป็นตัวแปรในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งการนำค่าสัดส่วนโมลมาใช้ในการคำนวณ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีความสัมพันธ์กันที่จุดต่างๆ ภายในของแข็ง ณ เวลาต่างๆ โดยผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นของแข็ง แสดงดังรูป 4.20 เป็นตัวเปรียบเทียบ ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนนี้ จะคำนวณที่เวลา 120 นาทีเป็นเวลาเริ่มต้น โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้ 360, 720 และ 1440 นาที

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนค่อนข้างคงที่ทุกๆ จุดในชั้นของแข็งเมื่อเวลามากขึ้นดังรูปที่ 4.21 ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในของแข็งค่อยๆ ลดลง และคงที่ในที่สุด และจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนบริเวณผนังภาชนะตกลึกจะมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีผลึกของกรดปาล์มมิติกขนาดเล็กล้อมรอบด้วยกรดโอเลอิกที่เป็นของเหลวมากกว่าบริเวณอื่นๆ ภายในชั้นของแข็ง ซึ่งโดยทั่วไปการนำความร้อนในวัฏภาคของเหลวจะมีค่าน้อยกว่าในวัฏภาคของแข็งหรือสามารถอธิบายได้ว่าในวัฏภาคของเหลวมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนน้อยกว่า ดังนั้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนบริเวณผนังภาชนะตกลึกจะมีค่าน้อยที่สุด ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นของแข็งจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ กับผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิในการทดลอง ถูกเปรียบเทียบ เพื่อหาค่าถูกต้อง ดังรูปที่ 4.22-4.24 และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) ระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.2 นอกจากนี้เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ได้จา

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ชัดเจนขึ้น จึงมีการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นของแข็ง โดยใช้แถบสีเข้ามาช่วย แสดงดังรูปที่ 4.25

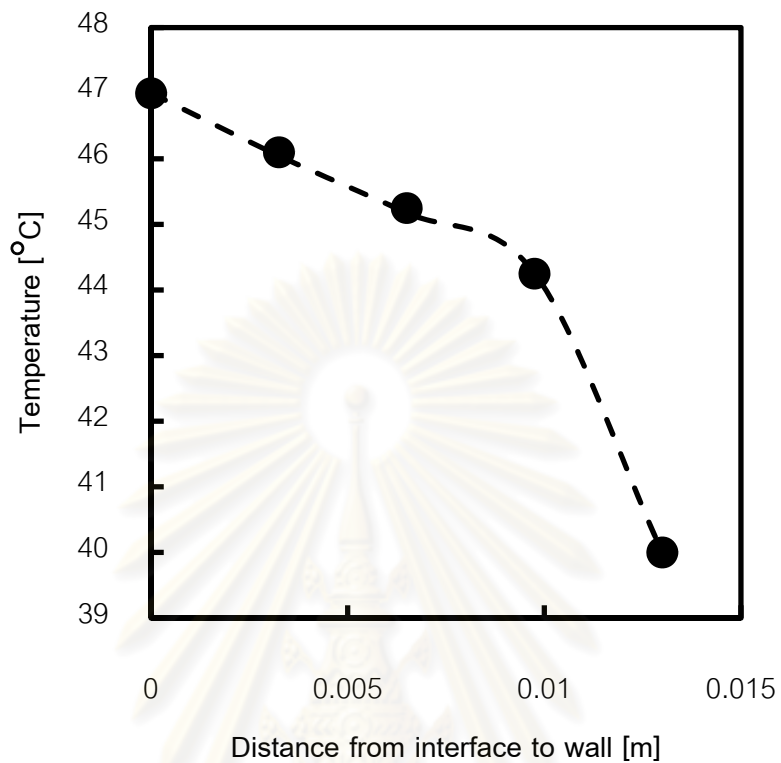


รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นของแข็งที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) 120 นาที, (□) 360 นาที, (◇) 720 นาที และ (○) 1440 นาที

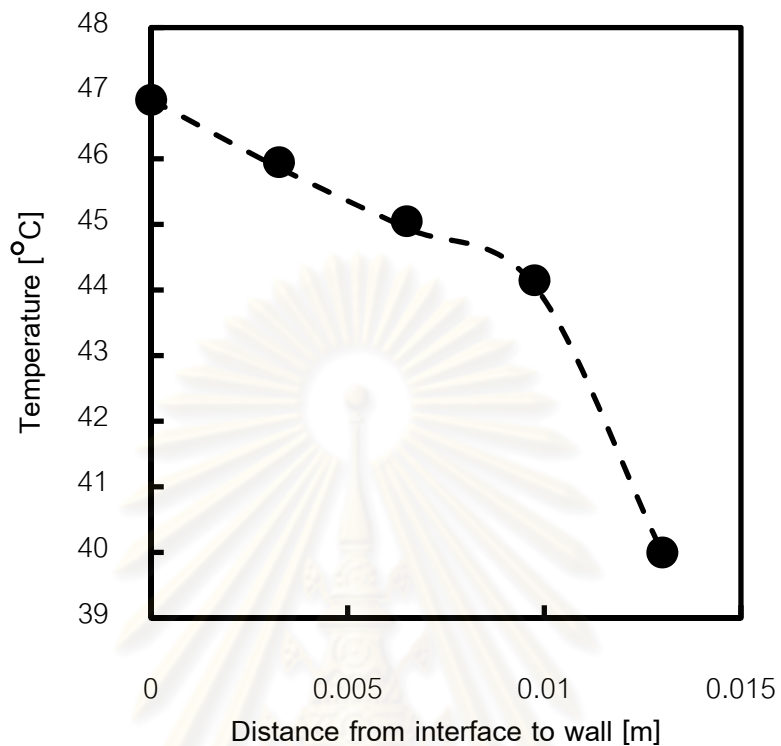


รูปที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในแต่ละชั้นภายในชั้นของแข็งที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดย (●) จุด A, (□) จุด B, (◇) จุด C และ (○) จุด D

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

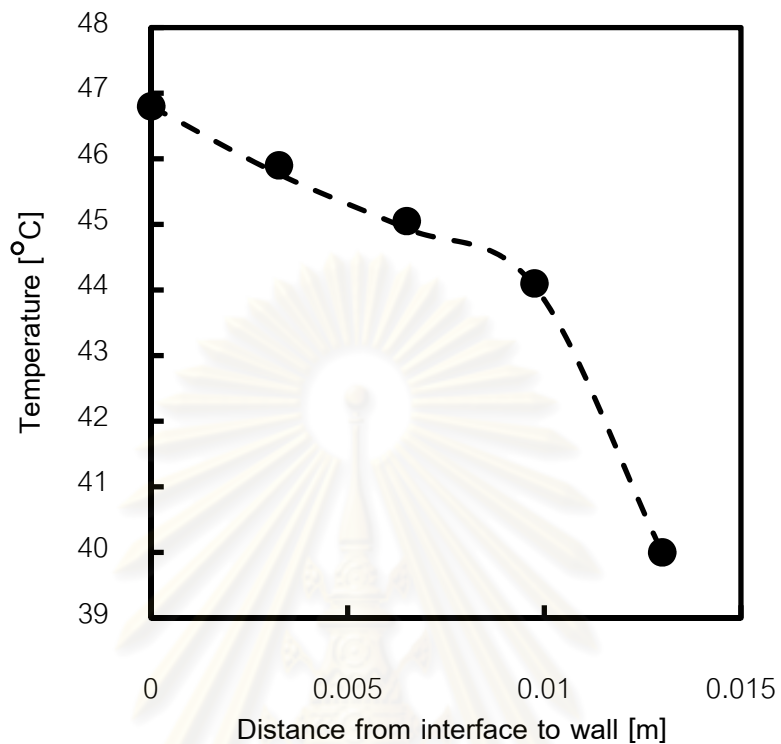


รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นของแข็ง ที่เวลา 360 นาที โดย (●) เป็นอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง และ (---) เป็นอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นของแข็ง ที่เวลา 720 นาที โดย (●) เป็นอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง และ (---) เป็นอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ

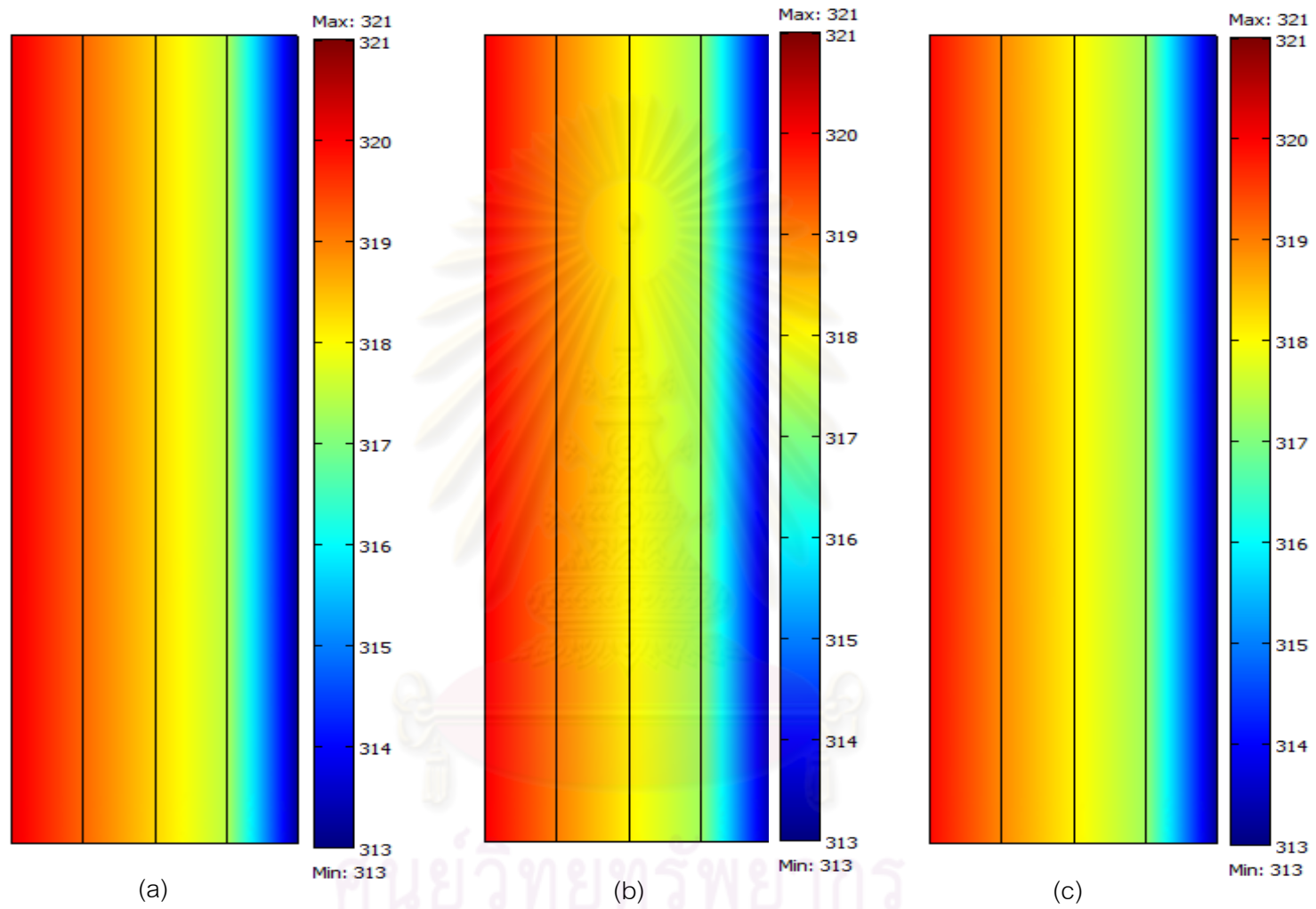
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นของแข็ง ที่เวลา 1440 นาที โดย (●) เป็นอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง และ (---) เป็นอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) ระหว่างผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นของแข็งจากการคำนวณกับจากการทดลอง

เวลา [นาที]	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2)
360	
720	0.99
1440	



รูปที่ 4.25 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชั้นของแข็ง ที่เวลาต่างๆ ดังนี้ (a) 360, (b) 720, และ (c) 1440 นาที

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิ

จากผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มิติกในชั้นของแข็ง ซึ่งภายในชั้นของแข็งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลา จึงมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิภายในชั้นของแข็ง โดยพิจารณาในรูปแบบของความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและแบบเอกซ์โปเนนเชียล และหาค่าคงที่ในสมการความสัมพันธ์ทั้งสองสมการ ซึ่งค่าคงที่ที่คำนวณได้นั้น แสดงดังตารางที่ 4.3

$$D^{eff} = a + bT$$

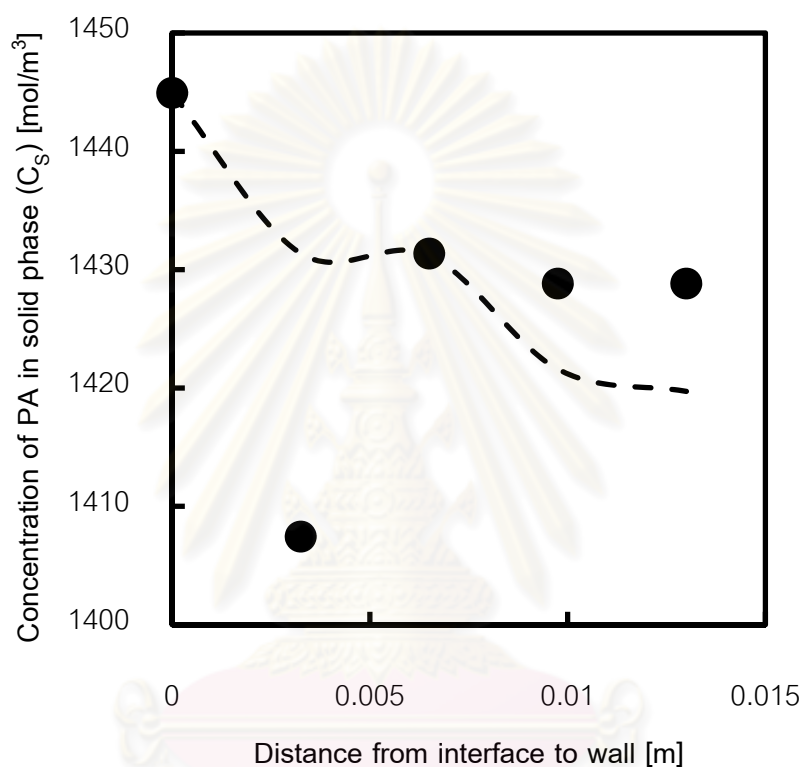
$$D^{eff} = a_1 e^{-b_1/T}$$

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ในสมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและแบบเอกซ์โปเนนเชียล

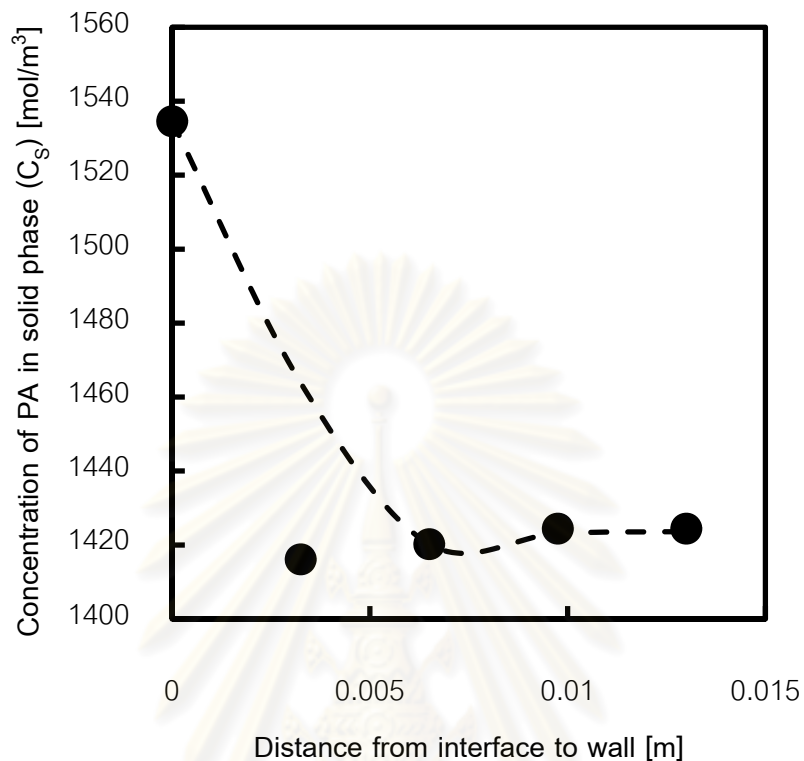
Part of solid layer	Linear		Exponential	
	a	b	a ₁	b ₁
D	1×10 ⁻⁹	8.3×10 ⁻¹⁴	0.09×10 ⁻⁹	8.3×10 ⁻¹⁴
C	1.3×10 ⁻⁹	8.3×10 ⁻¹⁴	0.81×10 ⁻⁹	8.3×10 ⁻¹⁴
B	1.6×10 ⁻⁹	8.3×10 ⁻¹⁴	2.43×10 ⁻⁹	8.3×10 ⁻¹⁴
A	3×10 ⁻⁹	8.3×10 ⁻¹⁴	8.65×10 ⁻⁹	8.3×10 ⁻¹⁴

ผลที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิทั้งสองแบบ จะอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มิติกภายในชั้นของแข็ง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มิติกภายในชั้นของแข็งจากการทดลองที่เวลาต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 4.26-4.28 และความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียลแสดงดังรูปที่ 4.29-4.31 และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R²)) ระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.4 จากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิภายในชั้นของแข็งแบบเอกซ์โปเนนเชียลให้ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ใกล้เคียงกับผลของการทดลองมากกว่าความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

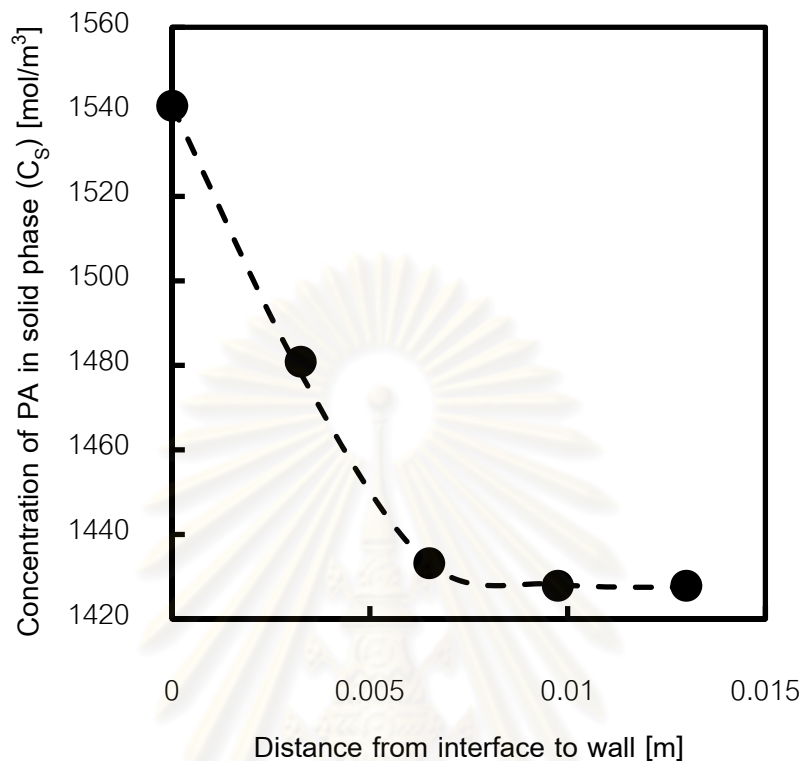


รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 360 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเชิงเส้น



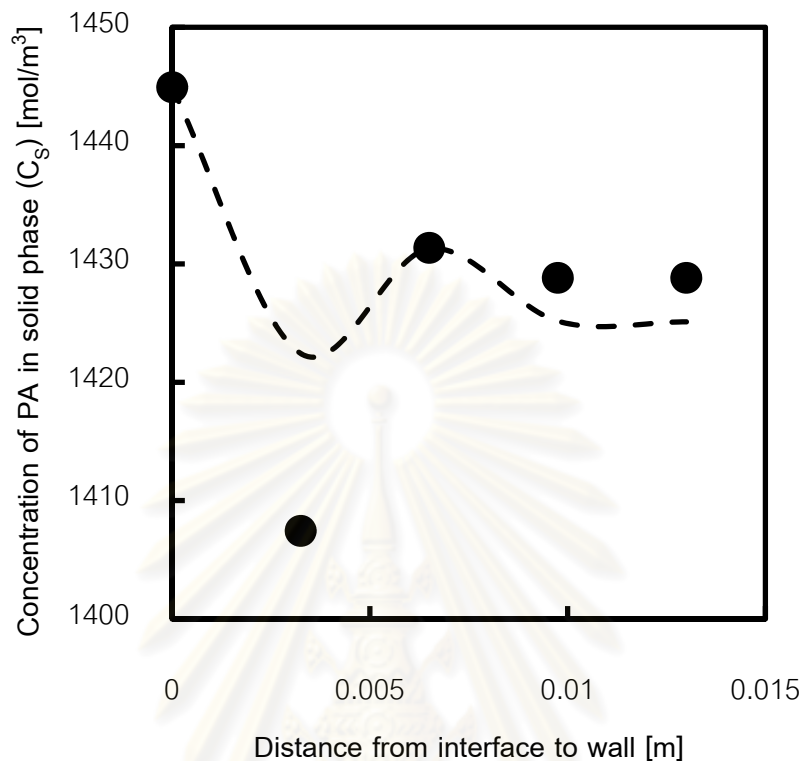
รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 720 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับคุณสมบัติแบบเชิงเส้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

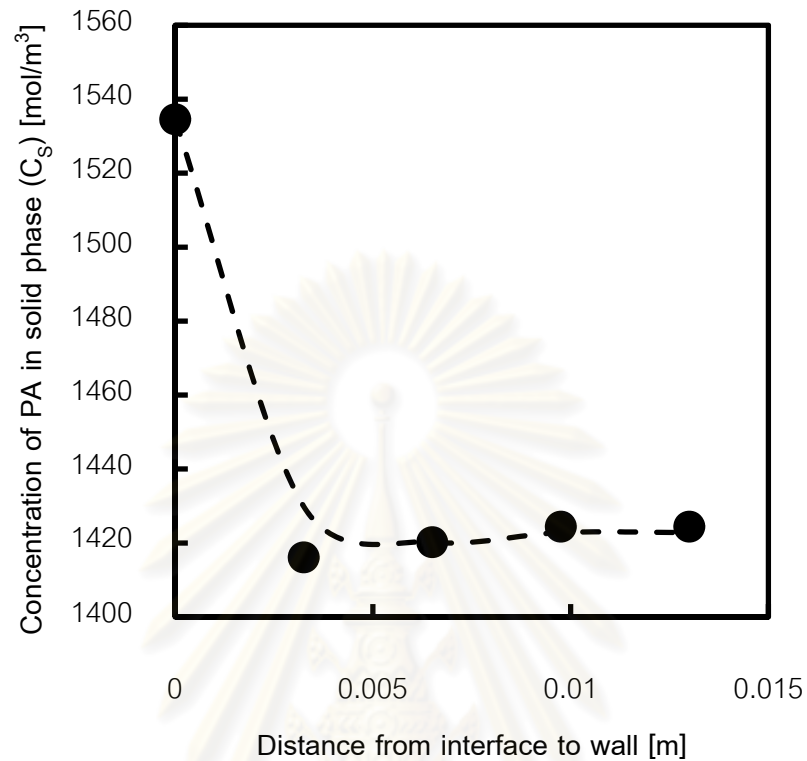


รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 1440 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ประสิทธิภาพกับคุณสมบัติแบบเชิงเส้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

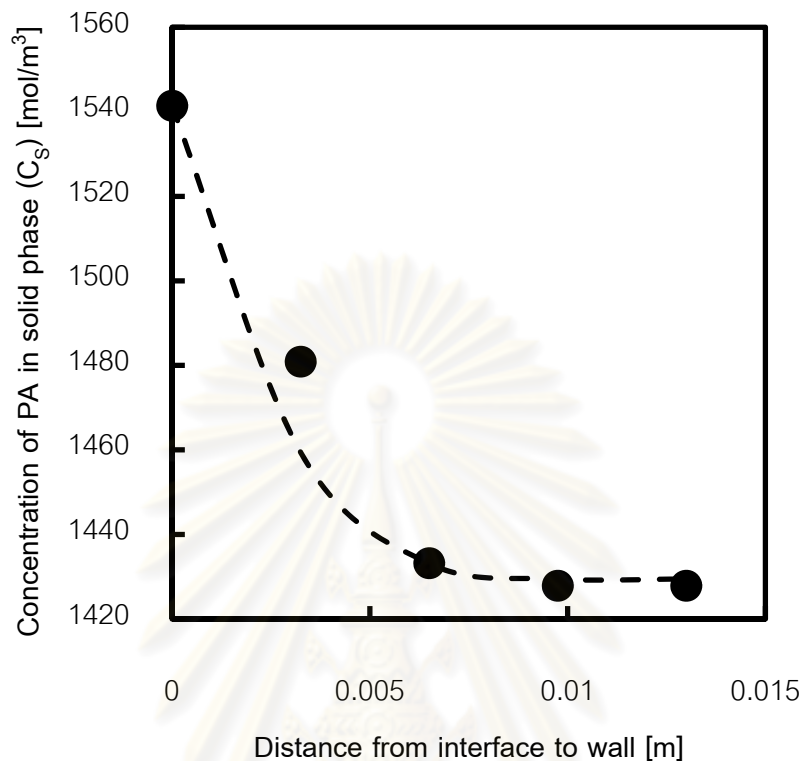


รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 360 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับคุณสมบัติแบบเอกซ์โปเนนเชียล



รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 720 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งที่เวลา 1440 นาที โดย (●) เป็นความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกที่ได้จากการทดลอง และ (---) เป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) ระหว่างผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกภายในชั้นของแข็งจากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและอุณหภูมิกับจากการทดลอง

เวลา[นาที]	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2)	
	แบบเชิงเส้น	แบบเอกซ์โปเนนเชียล
360	< 0.5	0.651
720	0.778	0.981
1440	0.99	0.953

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการลดความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว

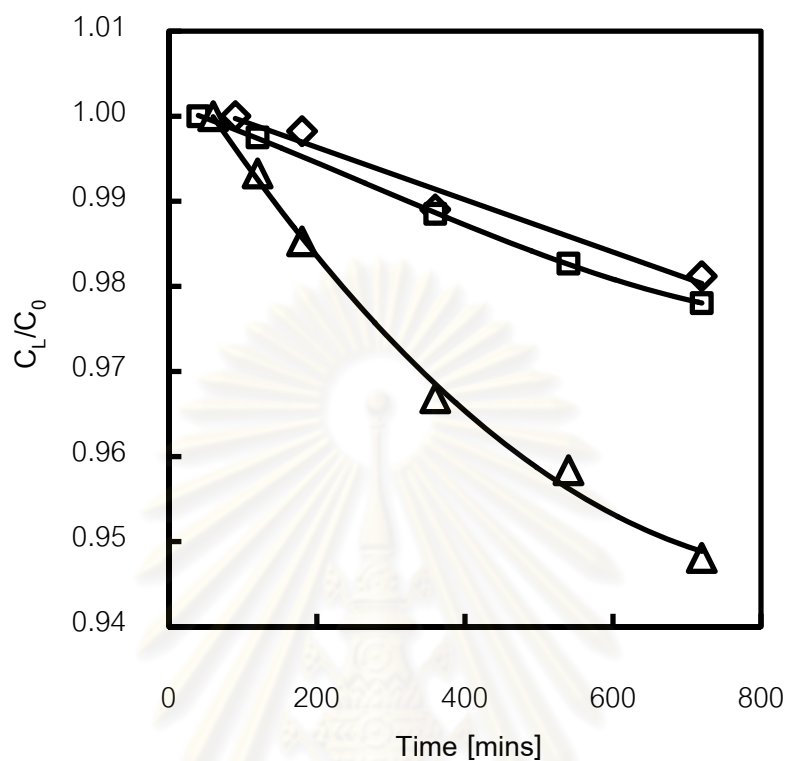
เนื่องจากการตกผลึก เป็นกระบวนการที่อาศัยการลดอุณหภูมิมาเกี่ยวข้องในการแยกสาร โดยที่สารที่มีจุดเยือกแข็งต่างกันมาผสมกัน สารที่มีจุดเยือกแข็งสูงจะแข็งตัวกลายเป็นผลึกก่อนสารที่มีจุดเยือกแข็งต่ำ ในการทดลองนี้ก็เช่นกัน สารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก กรดปาล์มมิติก ซึ่งเป็นสารที่มีจุดเยือกแข็งสูง (ประมาณ 62.9 องศาเซลเซียส) จะตกผลึกก่อนกรดโอเลอิกที่มีจุดเยือกแข็งต่ำ (ประมาณ 16.3 องศาเซลเซียส) โดยจุดเยือกแข็งของสารผสมทั้งสองนั้น ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก แสดงให้เห็นจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโมลของกรดปาล์มมิติกในสารผสมระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (รูปที่ 4.1) ดังนั้นสัดส่วนของสารตั้งต้นของกรดปาล์มมิติกกับกรดโอเลอิกและอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึก จึงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดผลึก ในการทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนเริ่มต้นของสารผสมตั้งต้น และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการแยกสารผสม โดยพิจารณาจากการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว จะพิจารณาตั้งแต่ช่วงเวลาที่ให้ความหนาของชั้นของแข็งคงที่ และคิดความเข้มข้นเป็นความเข้มข้นสัมพัทธ์ (Relative concentration) เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบ นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของการเติมสารละลายเอทานอลที่มีผลต่อการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวด้วย

4.3.1 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) ที่มีผลต่อการลดความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก

ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของสารผสมเริ่มต้น จะกำหนดอัตราส่วนโดยมวลเริ่มต้นของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก ดังนี้ PA:OA เท่ากับ 40:60, 50:50 และ 60:40 เมื่ออัตราส่วนโดยมวลเริ่มต้นระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) มากขึ้น จะส่งผลให้อัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวเร็วขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.32 ที่สภาวะ

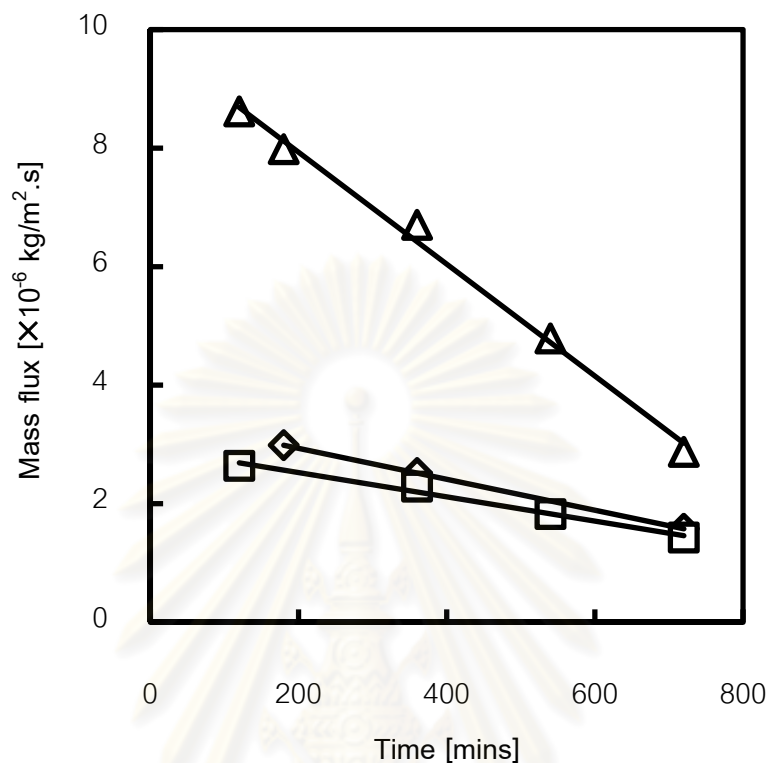
PA:OA เท่ากับ 60:40 จะมีอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกเร็ว ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือค่าฟลักซ์มวล (mass flux) บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง ณ เวลาที่ความหนาของชั้นของแข็งคงที่มีค่าสูง จากนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 4.33 และเมื่อพิจารณาข้อมูลผลการทดลองต่างๆ จากตารางที่ 4.5 ที่อัตราส่วนโดยมวลเริ่มต้นระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกเท่ากับ 60:40 ความหนาของชั้นของแข็งมาก แต่ความเข้มข้นสัมพัทธ์บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลวน้อย เมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนโดยมวลนี้ ปริมาณกรดปาล์มมิติกส่วนใหญ่ ถูกกลายเป็นผลึกและรวมกับผลึกที่อยู่ภายในชั้นของแข็ง เนื่องจากจุดเยือกแข็งรวมของสารผสมสูงประมาณ 54 องศาเซลเซียส (Inoue และคณะ (2004)) ทำให้กรดปาล์มมิติกในกรดปาล์มมิติกในสารผสมแข็งตัวเร็ว ส่งผลให้การลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวเกิดขึ้นเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.32 แผนภาพความสัมพันธ์ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่เวลาต่างๆ ในวัฏภาคของเหลว ที่สภาวะอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) ดังนี้ (\diamond) PA:OA= 40:60, (\square) PA:OA= 50:50 และ (\triangle) PA:OA= 60:40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.33 แผนภาพความสัมพันธ์ค่าฟลักซ์มวลที่เวลาต่างๆ ในวัฏภาคของเหลว ที่สภาวะอุณหภูมิ T_H และ T_w เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) ดังนี้ (◇) PA:OA= 40:60, (□) PA:OA= 50:50 และ (Δ) PA:OA= 60:40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลความหนาของชั้นของแข็ง, จุดเยือกแข็งรวมของสารผสม และความเข้มข้นสัมพัทธ์ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุของแข็งและของเหลว โดยกำหนดอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) ต่างๆ ที่สภาวะอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

อัตราส่วนโดยมวล ระหว่างกรดปาล์มมิติก และกรดโอเลอิก (PA:OA)	ความหนาของชั้น ของแข็ง * [เซนติเมตร]	จุดเยือกแข็งรวมของสาร ผสม** [องศาเซลเซียส]	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ บริเวณผิวสัมผัส ระหว่างวัสดุของแข็ง และของเหลว*
40:60	1.4	~ 47	1.11
50:50	2.0	~ 51	1.04
60:40	2.0	~ 54	0.98

*หลังจากดำเนินการ 12 ชั่วโมง, **Inoue และคณะ (2004)

4.3.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการลดความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก

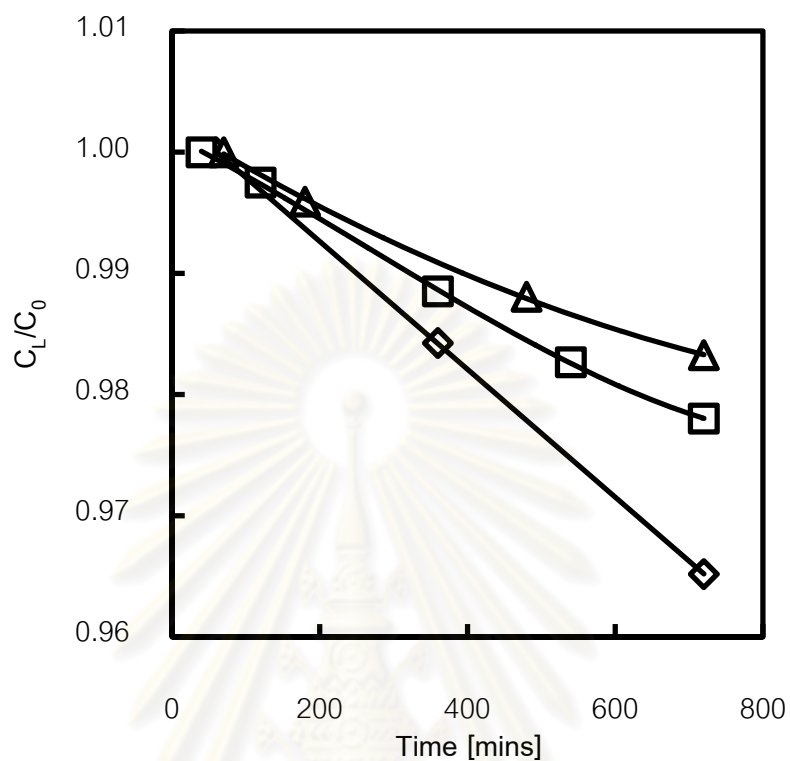
ในการกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนั้น จะประกอบด้วยอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความร้อน (T_H) และอุณหภูมิของผนังของภาชนะตกผลึก (T_W) โดยควรกำหนดอุณหภูมิให้สูงกว่าและต่ำกว่าจุดเยือกแข็งรวมของสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก ที่สัดส่วนของกรดปาล์มมิติกนั้นๆ ตามลำดับ โดยกำหนดอุณหภูมิ T_H/T_W ดังนี้ 70/30, 65/40 และ 60/40 องศาเซลเซียส จากผลการวิจัย จะเห็นได้ว่าที่สภาวะอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญในควบคุมการเกิดผลึกในกระบวนการตกผลึกแบบเกิดขึ้นของแข็งนี้ โดยการกำหนดความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ที่ใช้ในการตกผลึก เพื่อควบคุมความหนาของชั้นของแข็งและการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัสดุของเหลว ซึ่งควรพิจารณาจากจุดเยือกแข็งรวมของสารผสมที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมินี้ สารผสมที่ใช้มีอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก เท่ากับ 50:50

ซึ่งมีจุดเยือกแข็งรวมประมาณ 51 องศาเซลเซียส (ประมาณจากรูปที่ 4.1) จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับจุดเยือกแข็งรวม นั่นคือที่สภาวะ T_H และ T_W เท่ากับ 60 และ 40 องศาเซลเซียส จะทำให้ความหนาของชั้นของแข็งมากขึ้น และความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลวน้อยลง ด้วยเหตุผลที่ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิ เป็นแรงขับเคลื่อนที่ทำให้การเกิดผลึกเกิดขึ้นเร็ว แต่การเคลื่อนที่ของกรดปาล์มมิติกไปยังชั้นของแข็งช้า ในทางตรงกันข้าม เมื่อกำหนดให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมาก ที่สภาวะ T_H และ T_W เท่ากับ 70 และ 30 องศาเซลเซียส การเกิดผลึกเกิดขึ้นช้ากว่า ส่งผลให้ความหนาของชั้นของแข็งน้อยกว่า แต่เป็นแรงขับเคลื่อนให้กรดปาล์มมิติกเคลื่อนที่ไปยังชั้นของแข็งได้เร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวเกิดขึ้นเร็วตามไปด้วย

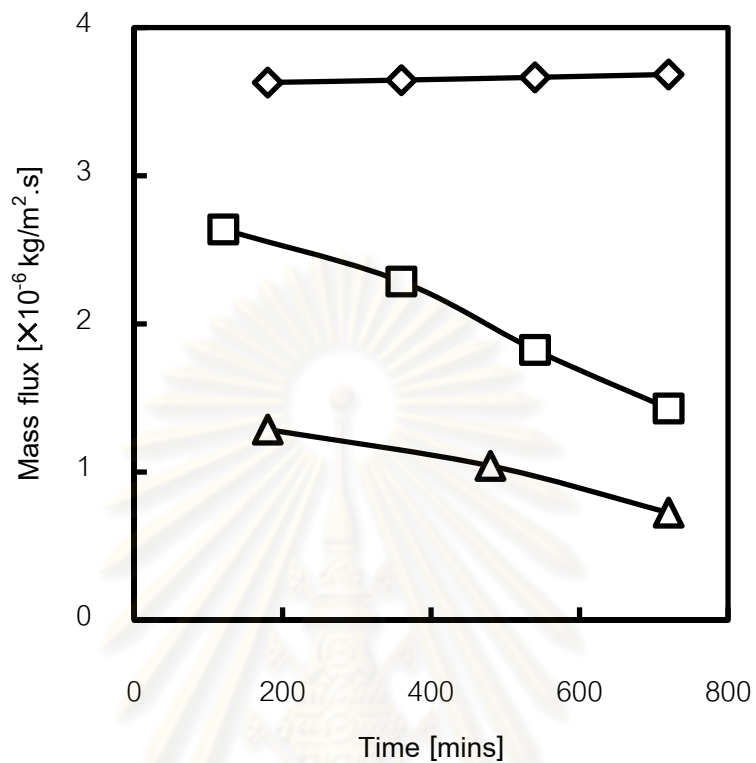


คุรุวิทยุทธรพยกร
จุพาลงกรณัฒหาวิทยาลัทย



รูปที่ 4.34 แผนภาพความสัมพันธ์ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่เวลาต่างๆ ในวัฏภาคของเหลว โดยกำหนด
 อุณหภูมิ T_H และ T_W ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA)
 เท่ากับ 50:50 โดยกำหนดอุณหภูมิ T_H/T_W ดังนี้ (\diamond) 70/30, (\square) 65/40 และ (\triangle) 60/40 องศา
 เซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.35 แผนภาพความสัมพันธ์ค่าฟลักซ์มวลที่เวลาต่างๆ ในภูมิภาคของเหลว ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 โดยกำหนดอุณหภูมิ T_H/T_W

ดังนี้ (◇) 70/30, (□) 65/40 และ (△) 60/40 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลความหนาของชั้นของแข็ง, จุดเยือกแข็งรวมของสารผสม และความเข้มข้นสัมพัทธ์ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของแข็งและของเหลว โดยกำหนดอุณหภูมิ T_H และ T_W ต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50

อุณหภูมิ T_H และ T_W (T_H/T_W) [องศาเซลเซียส]	ความหนาของชั้น ของแข็ง * [เซนติเมตร]	จุดเยือกแข็งรวมของสาร ผสม** [องศาเซลเซียส]	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ บริเวณผิวสัมผัส ระหว่างภูมิภาคของแข็ง และของเหลว*
70/30	1.4		1.11
65/40	2.0	~ 51	1.04
60/40	2.7		0.98

*หลังจากดำเนินการ 12 ชั่วโมง, **Inoue และคณะ (2004)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแยกส่วนกรดไขมันของสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกด้วยกระบวนการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง โดยใช้เทคนิคการทำให้สารเข้มข้นด้วยแบบแช่แข็ง (freeze concentration technique) ซึ่งอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุปกรณ์ให้ความร้อนตรงกลางภาชนะตกผลึกและอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ผนังภาชนะตกผลึก ทำให้เกิดชั้นของแข็งบนผนังของภาชนะตกผลึก โดยมีอัตราโดยมวลเริ่มต้นของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุปกรณ์ให้ความร้อนกับอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการตกผลึก เมื่อเริ่มกระบวนการตกผลึก ชั้นของแข็งจะเริ่มเกิดขึ้นบางๆ และจะหนาขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป และคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ในกระบวนการแยกส่วนของสารผสมในงานวิจัยนี้ จะใช้เวลาทั้งหมด 720 นาที จะพบว่าความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกจะเพิ่มขึ้นในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้นบนผนังของภาชนะตกผลึก โดยเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของแข็งและของเหลวจะมีค่าความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกมากกว่าบริเวณอื่นๆ ภายในของแข็ง โดยมีความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกเพิ่มขึ้นถึง 11 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกเริ่มต้น และเมื่อพิจารณากรดโอเลอิก ความเข้มข้นของกรดโอเลอิกจะเพิ่มขึ้นในภูมิภาคของเหลว ซึ่งอยู่บริเวณตรงกลางภาชนะตกผลึก เนื่องจากกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกภายในสารผสมจะเกิดการถ่ายโอนมวลระหว่างภูมิภาคของแข็งและของเหลว โดยกลไกการถ่ายโอนมวลของกรดไขมันทั้งสองชนิดเกิดจากแรงขับเคลื่อน 2 แรง คือความแตกต่างของอุณหภูมิภายในสารผสม และความแตกต่างของความเข้มข้นของกรดโอเลอิกในภูมิภาคของแข็งและของเหลว ปรัชญาการถ่ายโอนทั้งการแพร่ของสารและการนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชั้นของแข็ง จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกรดปาล์มมิติก

ภายในชั้นของแข็งจะมีค่าน้อยมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-11} - 10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งในแต่ละจุดภายในชั้นของแข็งตั้งแต่ผิวสัมผัสถึงผนังภาชนะจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลไม่เท่ากัน และเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลน้อยที่สุดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของแข็งและของเหลว ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในชั้นของแข็ง จะมีค่าอยู่ในช่วง 20-100 วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน ซึ่งในแต่ละจุดภายในชั้นของแข็งตั้งแต่ผิวสัมผัสถึงผนังภาชนะจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนไม่เท่ากัน แต่จะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเวลามากขึ้น โดยบริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของแข็งและของเหลวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมากกว่าบริเวณอื่น ซึ่งจากผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิกับแบบเชิงเส้นและแบบเอกซ์โปเนนเชียล

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการแยกส่วนของสารผสมกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก ด้วยวิธีการตกผลึกแบบชั้นของแข็ง เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ควรมีการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตกผลึกดังต่อไปนี้
 - ศึกษาปัจจัยของการเติมสารละลายลงไปในสารผสม เพื่อกำหนดอุณหภูมิในการตกผลึก
 - ศึกษาการเพิ่มกระบวนการแยกวิธีต่างๆ อันได้แก่ การดูดซับ การสกัด เป็นต้น ก่อนนำสารเข้ากระบวนการตกผลึก เพื่อให้ได้สารที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น
2. ในการกำหนดแบบจำลองในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ควรคำนวณให้อยู่ในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate System)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ดาวัตย์ ฉิมภู. ชีวเคมี. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ครั้งที่ 4, 2553.

ฟิลิกส์ราชมงคล. ความไม่สมบูรณ์ของผลึก (Disorder in solid phases). กรุงเทพมหานคร : 2000.

พรวิสา วงศ์ปัญญา. การแข็งตัวของโลหะ (Solidification of metals). นครราชสีมา : 2551.

พรวิสา วงศ์ปัญญา. การแพร่ในของแข็ง (Diffusion of solids). นครราชสีมา : 2551.

ภาษาอังกฤษ

Antolín G., T.F.V., Briceño Y., Castaño V., Pérez C. and Ramírez A.I. Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. Biores Tech. 83 (2002): p. 111-114.

Bird, R.B., Warren E. Stewart, and Lightfoot, E.N. Transport phenomena 2nd ed. 2007, New York J. Wiley.

Carla Cristina C.M. Silva, N.F.P.R., Mariana M.V.M. Souza and Donato A.G. Aranda. Biodiesel production from soybean oil and methanol using hydrotalcites as catalyst. Fuel Proc Tech 91 (2) (2010): p. 205-210.

Cedeño, F.O., Prieto, M.M., and Xiberta, J. Measurements and Estimate of Heat Capacity for Some Pure Fatty Acids and Their Binary and Ternary Mixtures. Journal of Chemical & Engineering Data 45 (1) (2000): p. 64-69.

Chaleepa, K., Szepes, A., and Ulrich, J. Dry fractionation of coconut oil by melt crystallization. Chemical Engineering Research and Design 88 (9) (2010): p. 1217-1222.

Chemtech, S. Fractional Crystallization. S. Chemtech.

Chu, B.S., Baharin, B.S., Che Man, Y.B., and Quek, S.Y. Separation of vitamin E from palm fatty acid distillate using silica: I Equilibrium of batch adsorption. Journal of Food Engineering 62 (1) (2004): p. 97-103.

Cussler, E.L. Diffusion : mass transfer in fluid systems. 3rd ed. 2009, New York Cambridge University Press.

Dimick, P., Reddy, S., and Ziegler, G. Chemical and thermal characteristics of milk-fat fractions isolated by a melt crystallization. Journal of the American Oil Chemists' Society 73 (12) (1996): p. 1647-1652.

Fellows, P.J. Food Processing Technology: Principles and Practice, Third Edition. 2009: Taylor and Francis.

Fukui K., N.K., Tani N., Asakusa Y., Maeda K. Melt crystallization of fatty acid on rotating cold cylinder. Journal of Chemical Engineering of Japan 39 (11) (2009): p. 1154-1160.

Gebhart, B. Heat conduction and mass diffusion. 1993, New York: McGraw-Hill, Inc.

Hameed, B.H., Lai, L.F., and Chin, L.H. Production of biodiesel from palm oil (*Elaeis guineensis*) using heterogeneous catalyst: An optimized process. Fuel Processing Technology 90 (4) (2009): p. 606-610.

Hartel, R.W. and Allan, S.M., Crystallization in foods, in Handbook of Industrial Crystallization (Second Edition), p. 287-304. Butterworth-Heinemann, 2002.

Heath, H.B. Source of flavors. 1981, United States of America: Van Nostrand Reinhold.

Inoue, T., Hisatsugu, Y., Ishikawa, R., and Suzuki, M. Solid-liquid phase behavior of binary fatty acid mixtures: 2. Mixtures of oleic acid with lauric acid, myristic acid, and palmitic acid. Chemistry and Physics of Lipids 127 (2) (2004): p. 161-173.

- Jiang, S.T., Shao, P., Pan, L.J., and Zhao, Y.Y. Molecular Distillation for recovering Tocopherol and Fatty Acid Methyl Esters from Rapeseed Oil Deodoriser Distillate. Biosystems Engineering 93 (4) (2006): p. 383-391.
- Johnson RW., F.E. Fatty acids in industry. 1989, New York: Marcel Dekker.
- Jones, J.U.a.M.J. HEAT AND MASS TRANSFER OPERATIONS CRYSTALLIZATION. 2006, Germany: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
- Maeda, K., Yamada, S., and Hirota, S. Binodal curve of two liquid phases and solid-liquid equilibrium for water + fatty acid + ethanol systems and water + fatty acid + acetone systems. Fluid Phase Equilibria 130 (1-2) (1997): p. 281-294.
- Martins, P.F., Ito, V.M., Batistella, C.B., and Maciel, M.R.W. Free fatty acid separation from vegetable oil deodorizer distillate using molecular distillation process. Separation and Purification Technology 48 (1) (2006): p. 78-84.
- Matsuoka, M., Fukuda, T., Takagi, Y., and Takiyama, H. Purification of organic solid solutions by melt crystallization: comparison between layer and suspension crystallization. Journal of Crystal Growth 166 (1-4) (1996): p. 1035-1039.
- Moreira, R., Chenlo, F., Chaguri, L., and Vázquez, G. Mathematical Modelling of the Drying Kinetics of Chestnut (*Castanea Sativa* Mill.): Influence of the Natural Shells. Food and Bioproducts Processing 83 (4) (2005): p. 306-314.
- Nakagawa, K., Nagahama, H., Maebashi, S., and Maeda, K. Usefulness of solute elution from frozen matrix for freeze-concentration technique. Chemical Engineering Research and Design 88 (5-6) (2010): p. 718-724.
- Paul, E.L., Tung, H.-H., and Midler, M. Organic crystallization processes. Powder Technology 150 (2) (2005): p. 133-143.

Peters-Erjawetz, S., Ulrich, J., Tiedtke, M., and Hartel, R. Milk fat fractionation by solid-layer melt crystallization. Journal of the American Oil Chemists' Society 76 (5) (1999): p. 579-584.

Sato, K. Crystallization behaviour of fats and lipids -- a review. Chemical Engineering Science 56 (7) (2001): p. 2255-2265.

Seader, J.D. and Henley, E.J. Separation process principles. 2nd ed. 2006: John Wiley & Sons, Inc.

Tao, B.Y. and Shang-Tian, Y., Industrial Applications for Plant Oils and Lipids, in Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources, p. 611-627. Elsevier, 2007.

Wright, A.J., McGauley, S.E., Narine, S.S., Willis, W.M., Lencki, R.W., and Marangoni, A.G. Solvent Effects on the Crystallization Behavior of Milk Fat Fractions. Journal of Agricultural and Food Chemistry 48 (4) (2000): p. 1033-1040.

Zaliha, O., Chong, C.L., Cheow, C.S., Norizzah, A.R., and Kellens, M.J. Crystallization properties of palm oil by dry fractionation. Food Chemistry 86 (2) (2004): p. 245-250.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

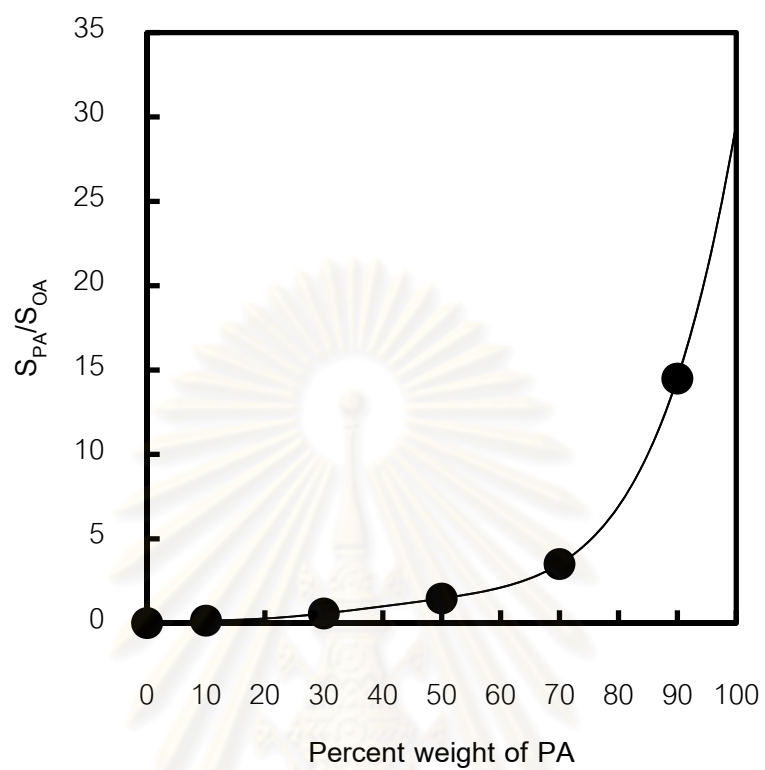
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน

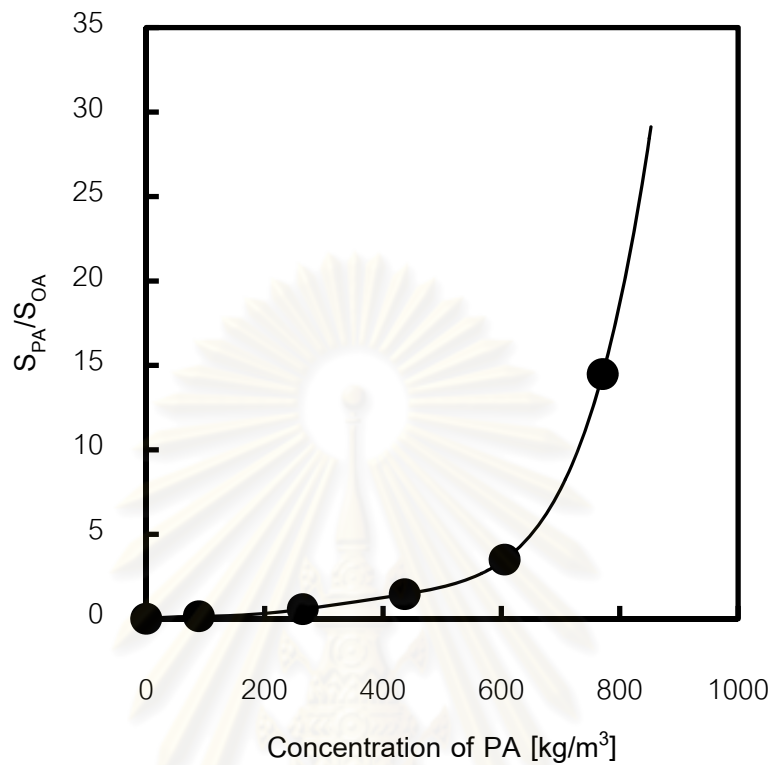
การทำกราฟมาตรฐานทำได้โดย การเตรียมสารผสมของกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก ปริมาตร 1 มิลลิลิตรที่อัตราส่วน PA:OA ต่างๆ คือ 0:100, 10:90, 30:70, 50:50, 70:30, 90:10 และ 100:0 โดยน้ำหนัก โดยซึ่งกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกตามอัตราส่วนโดยมวล จากนั้นเติม สารละลายเอทานอลลงไปให้สารผสมมีความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ของสารมาตรฐาน และทำให้สาร มาตรฐานเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปวัดค่าพื้นที่ใต้กราฟของกรดปาล์มมิติก (S_{PA}) และกรดโอเลอิก (S_{OA}) ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแบบก๊าซ (Gas chromatography (GC)) นำค่าพื้นที่ใต้ กราฟทั้งสองมีหาค่าอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟ (S_{PA}/S_{OA}) แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟอัตราส่วนของ พื้นที่ใต้กราฟกับเปอร์เซ็นต์ของกรดปาล์มมิติกในสารผสมดังแสดงในภาพที่ ก-1 และ ก-2 ซึ่งแสดง ตัวอย่างของกราฟมาตรฐานของกรดปาล์มมิติกในสารผสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก-1 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของกรดปาล์มมิติกในสารผสมในหน่วยร้อยละโดยมวล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก-2 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของกรดปาล์มมิติกในสารผสมในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

กำหนดให้

S_{PA} คือ พื้นที่ใต้กราฟของกรดปาล์มมิติก

S_{OA} คือ พื้นที่ใต้กราฟของกรดโอเลอิก

S_{PA}/S_{OA} คือ อัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของกรดปาล์มมิติกกับกรดโอเลอิก

C_{PA} คือ ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก [โมลต่อลูกบาศก์เมตร]

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เวลา [นาที]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		Average	C_{PA}
	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}/S_{OA}	
0	177161	168649	165822	154159	1.0631	1394.5448
10	173022	178155	106352	98126	1.0275	1387.1430
30	187080	178291	183140	169178	1.0659	1396.6810
60	173010	163559	175840	164798	1.0670	1397.4993
90	127365	118701	170376	158908	1.0726	1401.6809
120	175723	166558	186145	178354	1.0494	1384.7325
180	166896	156004	72317	65592	1.0693	1399.2038
360	201549	191572	192653	187392	1.0521	1386.3070
720	191428	184621	198134	190889	1.0374	1375.3068

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่ สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และ อุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เวลา [นาที]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		Average	C_{PA}
	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}/S_{OA}	
0	305922	201861	298796	180332	1.5862	1722.7702
10	286866	175870	277909	182684	1.5762	1724.6225
30	258073	164672	220866	139733	1.5739	1741.5937
60	258666	157877	262317	165208	1.6131	1762.3791
90	268510	162384	215970	131084	1.6506	1766.2975
120	168736	121944	156364	111710	1.3917	1761.4126
180	98589	58795	253213	158392	1.6377	1749.5662
360	246725	157148	234655	146444	1.5862	1745.5495
720	191161	125052	251890	165585	1.5249	1727.0065

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่ สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 60:40 และ อุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เวลา [นาที]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		Average	C_{PA}
	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}/S_{OA}	
0	326562	137472	318866	133016	2.3863	2003.4410
10	297746	120478	230063	89705	2.5180	2045.8807
30	371071	150965	289558	116551	2.4712	2030.7886
60	303999	115545	180889	68786	2.6304	2082.0917
90	355678	147106	302394	125289	2.4157	2012.9047
120	271325	106628	222436	84606	2.5868	2068.0616
180	205293	79850	214406	85776	2.5353	2051.4488
360	372806	154907	345341	142374	2.4161	2013.0381
720	310264	135195	310264	135195	2.2949	1973.9815

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่ สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และ อุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 70 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เวลา [นาที]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		Average	C_{PA}
	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}/S_{OA}	
0	173696	142459	132621	105692	1.2548	1538.3322
10	141671	112774	212179	164830	1.2562	1539.4201
30	192757	147287	217586	168718	1.2896	1564.4729
60	242408	187062	211083	162631	1.2979	1570.6848
90	174267	137045	202142	160670	1.2716	1550.9442
120	209461	180023	213214	167834	1.2704	1550.0308
360	202288	160036	206744	163318	1.2640	1545.2530
540	195212	152602	195212	152602	1.2792	1556.6582
720	208570	174154	203339	162359	1.2250	1516.0006

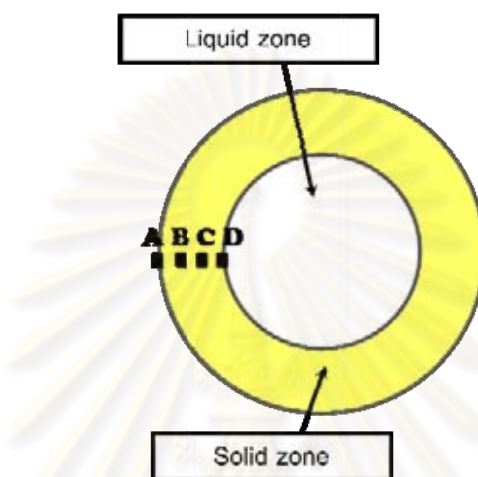
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลว ภายใน 720 นาที ที่ สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และ อุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 60 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เวลา [นาที]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		Average	C_{PA}
	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}/S_{OA}	
0	200222	128483	242659	171236	1.5528	1734.7999
10	240967	154486	254670	160310	1.5742	1741.6880
30	226744	142836	207443	129387	1.5874	1745.9549
60	233706	151247	229466	144775	1.5850	1745.1623
90	36568	20346	181485	117423	1.6714	1773.0261
120	195374	123741	210826	136192	1.5789	1743.1998
180	178547	114045	184449	117435	1.5681	1739.7257
360	249324	108603	190297	119607	1.5910	1747.1075
720	184155	122818	184155	122818	1.4994	1717.5830

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลดิบของความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกในชั้นของแข็งที่เกิดขึ้น ภายใน 1440 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และ อุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



	เวลา [นาที]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		Average S_{PA}/S_{OA}	C_{PA}
		S_{PA}	S_{OA}	S_{PA}	S_{OA}		
D	0	212681	196504	270247	254965	1.059937638	1392.2003
	120	282676	257027	232538	210610	1.099791073	1422.0893
	360	272440	241045	272440	241045	1.13024539	1444.9291
	720	243129	194540	288712	253312	1.249763545	1534.5643
	1440	255940	203300	255940	203300	1.258927693	1541.4372
C	0	212681	196504	270247	254965	1.059937638	1392.2003
	120	286089	260024	227131	191256	1.100240747	1422.4265
	360	196189	162992	280355	259527	1.080253692	1407.4368
	720	362236	151912	248282	227408	1.091790966	1416.0894
	1440	127206	107969	128326	109896	1.178171512	1480.8724

B	0	212681	196504	270247	254965	1.059937638	1392.2003
	120	274570	232712	280743	258465	1.086193488	1411.8915
	360	206395	176466	220575	198334	1.112139119	1431.3499
	720	236095	215165	221606	206942	1.097274185	1420.2017
	1440	248254	222734	248254	222734	1.114576131	1433.1776
A	0	212681	196504	270247	254965	1.059937638	1392.2003
	120	240858	224018	251505	216409	1.075172531	1403.6261
	360	304003	277662	251338	226683	1.108764221	1428.8189
	720	250624	216573	270898	245629	1.102874661	1424.4019
	1440	182884	120363	271299	244975	1.107455863	1427.8376



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลดิบของอุณหภูมิภายในสารผสมทั้งวัฏภาคของเหลวระดับของแข็งที่เวลาต่างๆ ภายใน 1440 นาที ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวล ระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เวลา [นาที]	อุณหภูมิ [องศาเซลเซียส]							
	ระยะทางจากอุปกรณ์ให้ความร้อนถึงผนังภาชนะตกผลึก [เมตร]							
	0.00612	0.01112	0.01612	0.02112	0.02612	0.03112	0.03612	0.0375
0	65	53.6	53.7	54	53.9	53.8	53.9	40
10	65	48.1	48.3	48.4	48.4	48.4	48.1	40
30	65	48.3	48.5	48.6	48.6	48.4	46.5	40
60	65	48.1	48.3	48.4	48.1	47.3	44.9	40
90	65	48	48.1	48.1	47.6	46.5	44.3	40
120	65	48	48	47.9	47.3	46.1	44	40
180	65	48.1	48	47.9	47.1	45.8	43.7	40
360	65	48	47.8	47.5	46.5	45.2	43.3	40
720	65	48.3	47.9	47.4	46.4	45	43.3	40
1440	65	48.1	47.9	47.4	46.3	45	43.2	40

ภาคผนวก ค
การคำนวณค่าฟลักซ์เชิงมวล

กำหนดให้	J	คือ ฟลักซ์เชิงมวลของกรดปาล์มมิติก [กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที]
	C_{PA}	คือ ความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติก
	$\frac{dC_{PA}}{dt}$	คือ ความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดปาล์มมิติกกับเวลา [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที]
	V	คือ ปริมาตรของของเหลว [ลูกบาศก์เมตร]
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็ง [ตารางเมตร]

$$J = \frac{dC_{PA}}{dt} \times \frac{V}{A}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ค่าพลาซิมวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วน
โดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 40:60 และอุณหภูมิ T_H และ T_W
เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ปริมาตรของของเหลว (V) เท่ากับ 169.65 ลูกบาศก์เมตร

พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่าง

ของเหลวกับของแข็ง (A) เท่ากับ 155.95 ตารางเมตร

เวลา [นาทีก]	C_{PA}	dC_{PA}/dt	$J \times 10^{-6}$
90	359.7271		
180	358.2446	0.0165	2.9866
360	355.7465	0.0139	2.5163
720	352.6176	0.0087	1.5758

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วน
โดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W
เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ปริมาตรของของเหลว (V) เท่ากับ 104.62 ลูกบาศก์เมตร

พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่าง

ของเหลวกับของแข็ง (A) เท่ากับ 123.02 ตารางเมตร

เวลา [นาทีก]	C_{PA}	dC_{PA}/dt	$J \times 10^{-6}$
40	452.4744		
120	450.9851	0.0186	2.6384
360	447.1130	0.0161	2.2866
540	444.7953	0.0129	1.8249
720	442.9802	0.0101	1.4291

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-3 ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 60:40 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 65 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ปริมาตรของของเหลว (V) เท่ากับ 50.89 ลูกบาศก์เมตร

พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่าง

ของเหลวกับของแข็ง (A) เท่ากับ 64.58 ตารางเมตร

เวลา [นาทีก]	C_{PA}	dC_{PA}/dt	$J \times 10^{-6}$
60	533.8559		
120	529.9183	0.0656	8.6203
180	526.2723	0.0608	7.9817
360	517.0848	0.0510	6.7044
540	510.5227	0.0365	4.7886
720	506.5860	0.0219	2.8728

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-4 ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วน
โดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W
เท่ากับ 70 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ปริมาตรของของเหลว (V) เท่ากับ 98.96 ลูกบาศก์เมตร

พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่าง

ของเหลวกับของแข็ง (A) เท่ากับ 95.79 ตารางเมตร

เวลา [นาทีก]	C_{PA}	dC_{PA}/dt	$J \times 10^{-6}$
60	402.7550		
180	400.2256	0.0211	3.6294
360	396.4148	0.0212	3.6454
540	392.5839	0.0213	3.6646
720	388.7329	0.0214	3.6838

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-5 ค่าฟลักซ์มวลของกรดปาล์มมิติกในวัฏภาคของเหลวที่เวลาต่างๆ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยมวลระหว่างกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิก (PA:OA) เท่ากับ 50:50 และอุณหภูมิ T_H และ T_W เท่ากับ 60 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ปริมาตรของของเหลว (V) เท่ากับ 31.10 ลูกบาศก์เมตร
พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็ง (A) เท่ากับ 61.55 ตารางเมตร

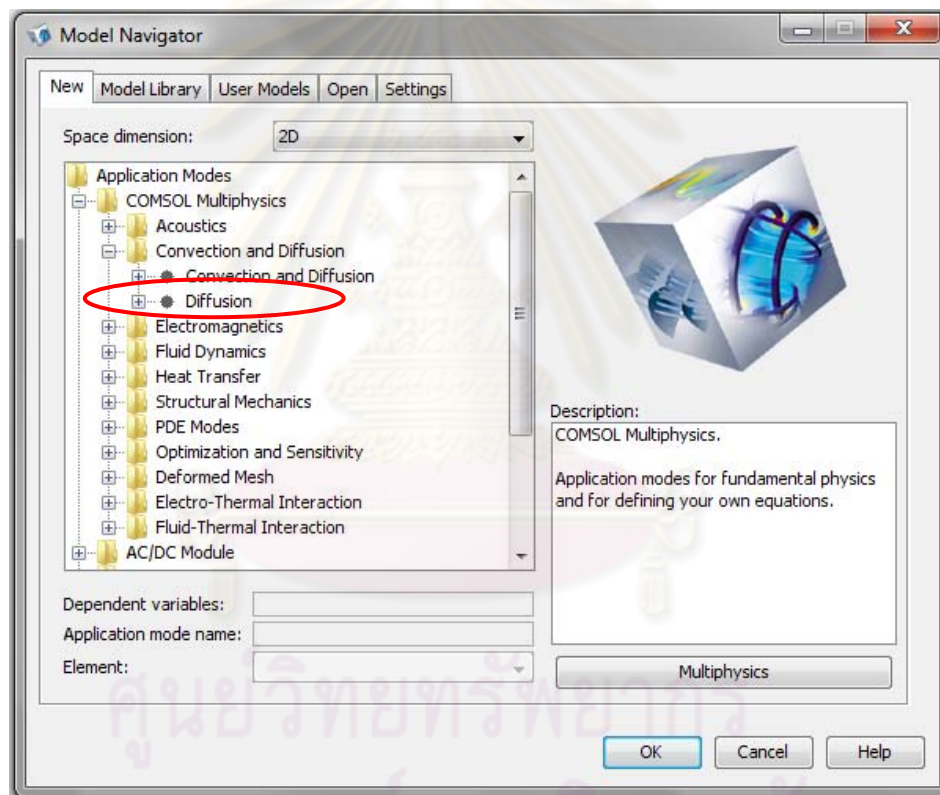
เวลา [นาทีก]	C_{PA}	dC_{PA}/dt	$J \times 10^{-6}$
60	448.0564		
180	446.2230	0.0153	1.2867
480	442.5142	0.0124	1.0412
720	440.4467	0.0086	0.7255

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

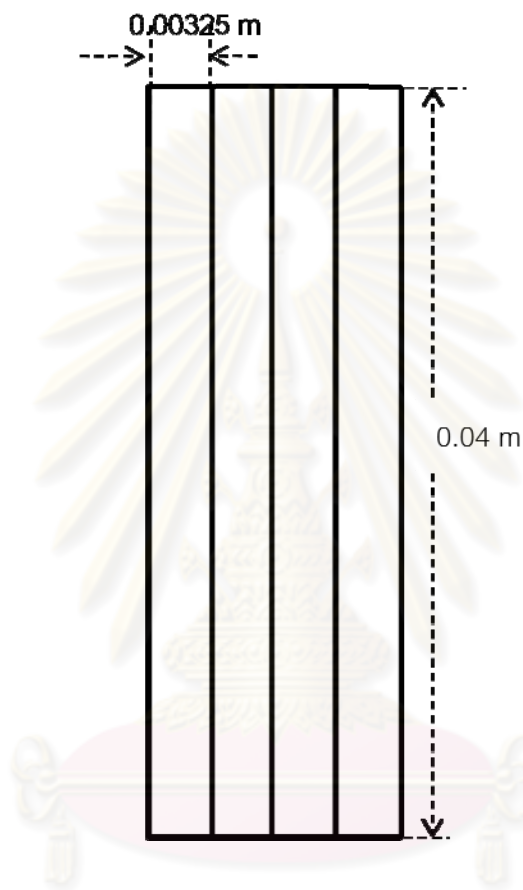
ภาคผนวก ง
การคำนวณทางคณิตศาสตร์

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

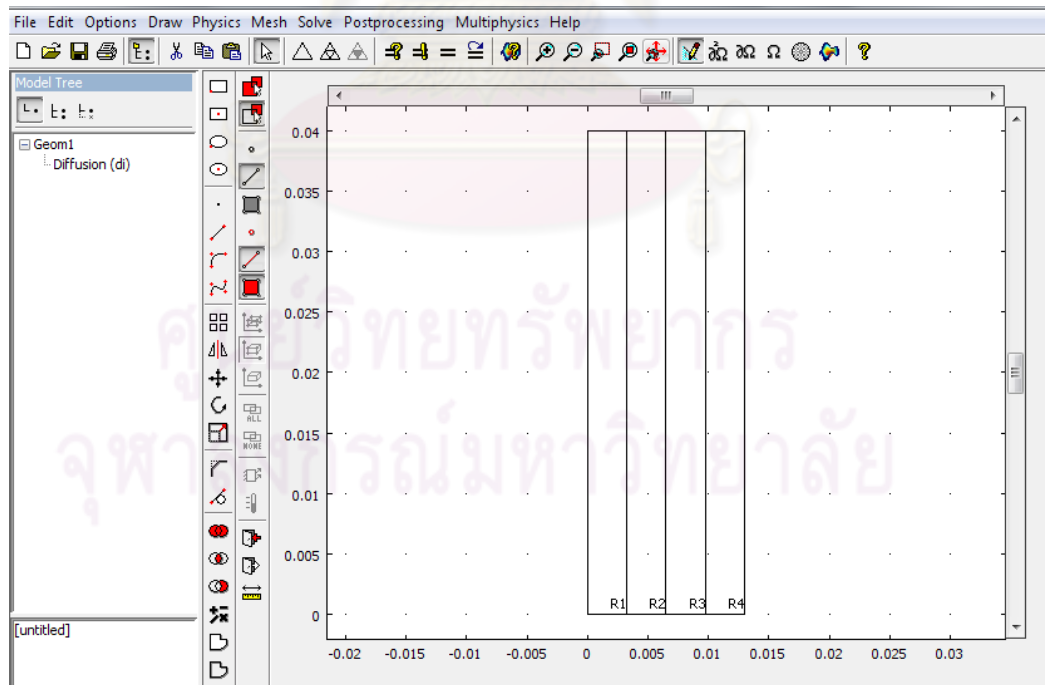
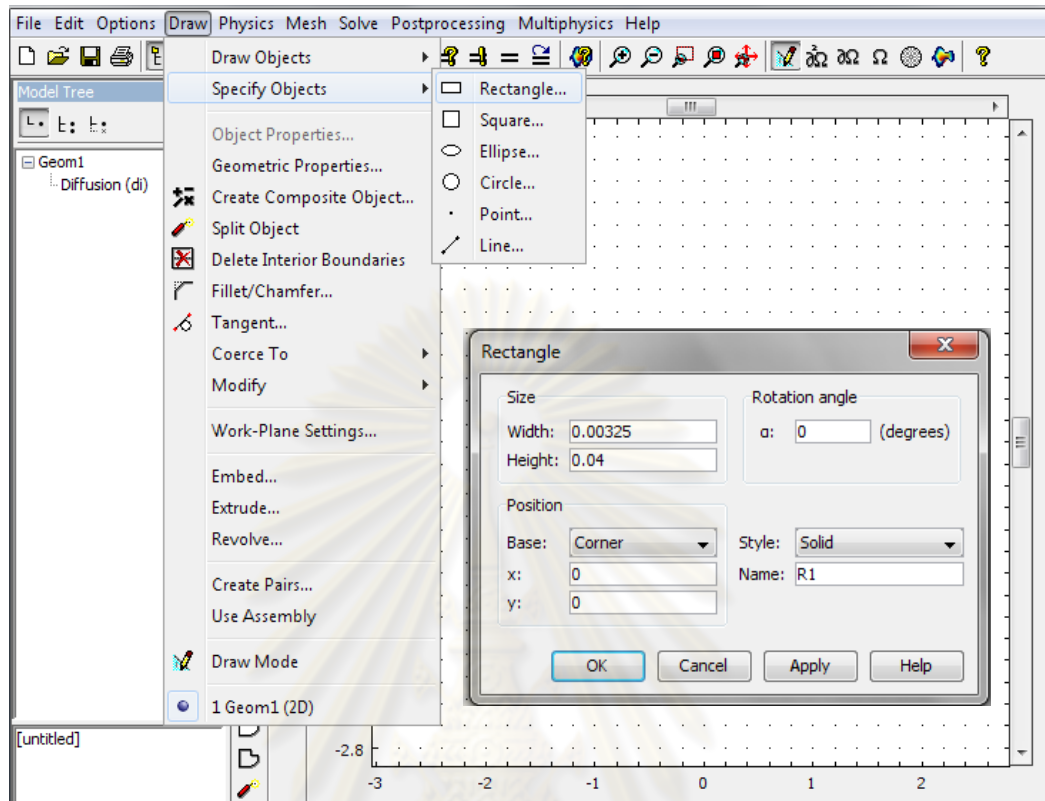
ขั้นตอนที่ 1 เลือก Model Navigator → New → COMSOL Multiphysics → Convection and Diffusion → Diffusion แล้วกด OK



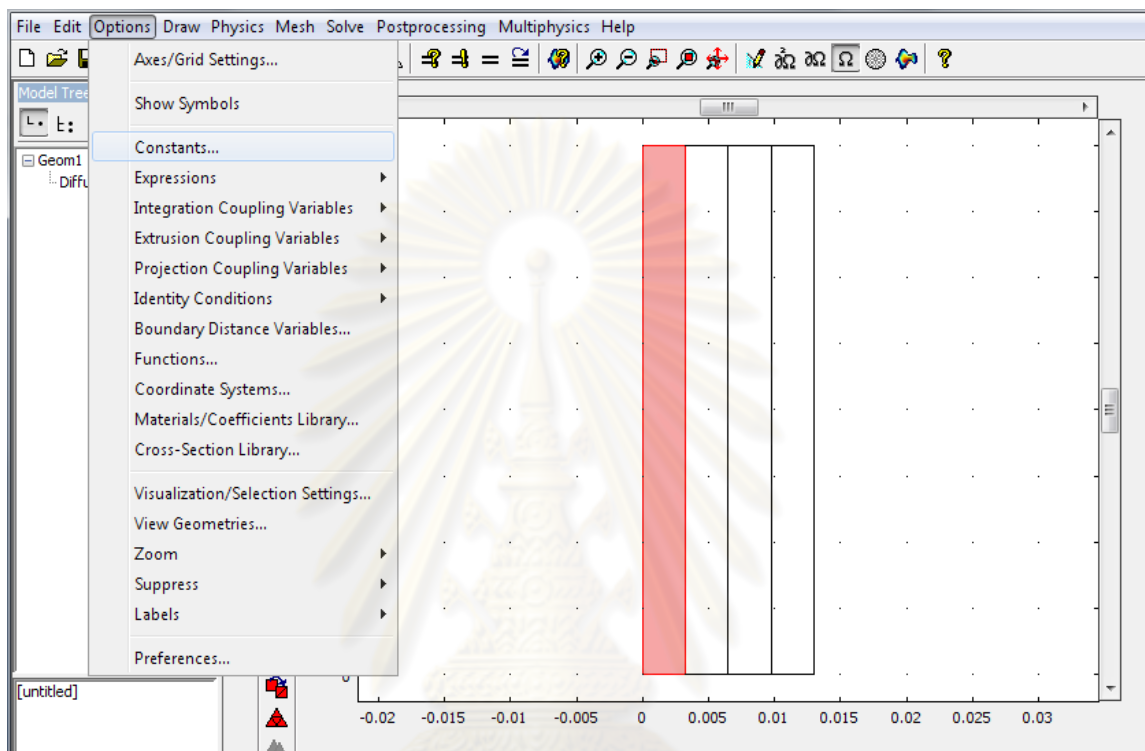
ขั้นตอนที่ 2 สร้าง Model ในการคำนวณ โดยเลือก Draw → rectangle โดยแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณมีเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.00325×0.04 เมตร จำนวน 4 รูปติดต่อกัน ดังรูป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าคงที่ต่างๆ โดย Option → Constants และ กำหนดค่าคงที่ต่างๆ

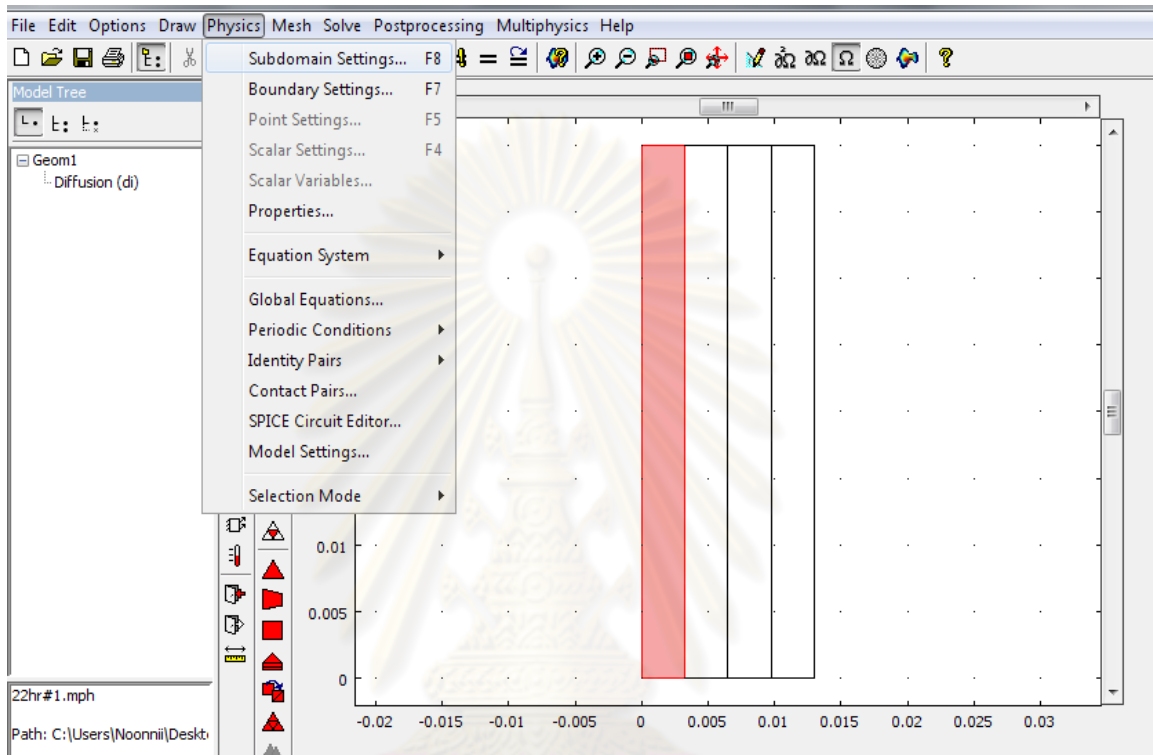


Constants

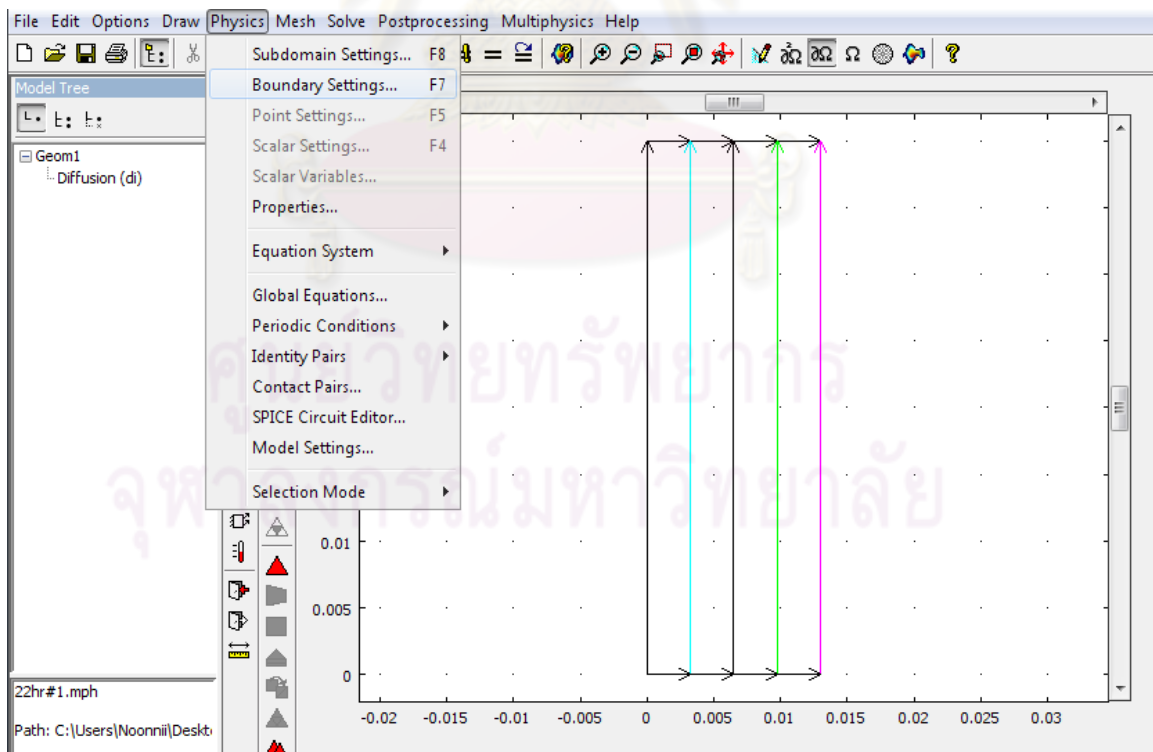
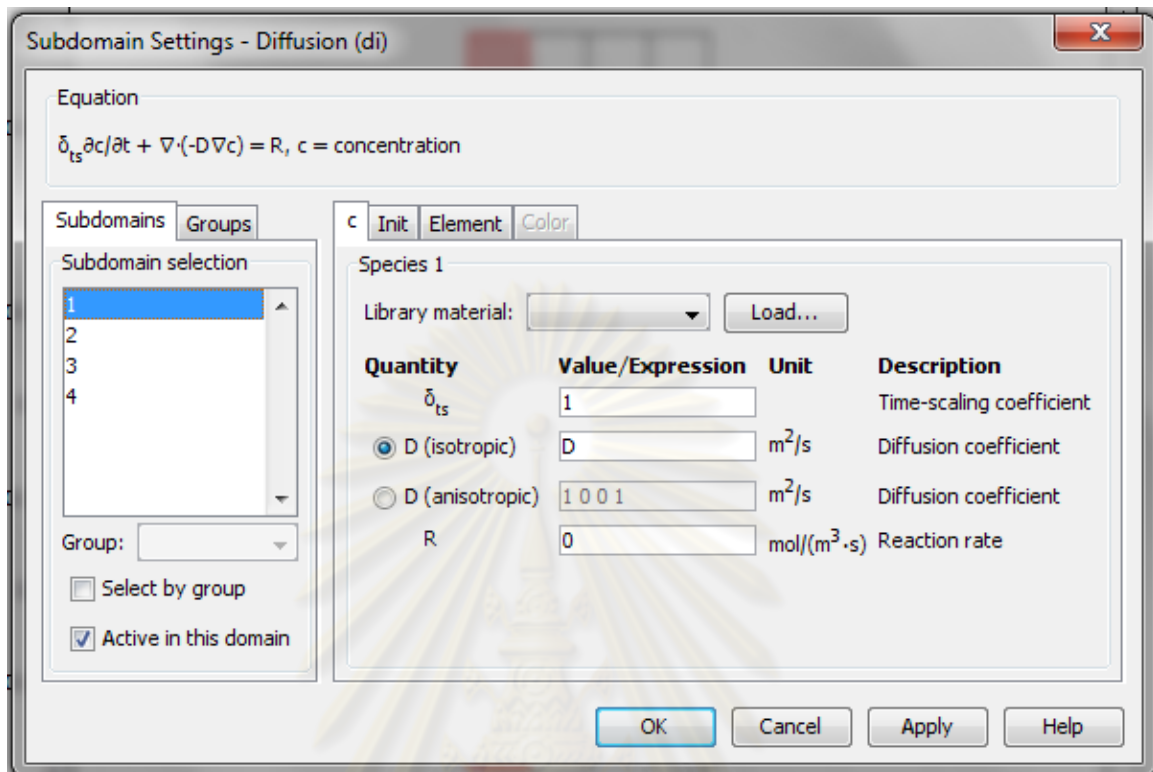
Name	Expression	Value	Description
C1	1422.089[mol/m ³]	1422.089[mol/m ³]	Concentration
C2	1422.427[mol/m ³]	1422.427[mol/m ³]	Concentration
C3	1411.891[mol/m ³]	1411.891[mol/m ³]	Concentration
C4	1403.626[mol/m ³]	1403.626[mol/m ³]	Concentration
D	0.000028[cm ² /s]	(2.8e-9)[m ² /s]	Heuristic diffusivity constant
Ds1	0.000035[cm ² /s]	(3.5e-9)[m ² /s]	Heuristic diffusivity constant
Ds2	0.000014[cm ² /s]	(1.4e-9)[m ² /s]	Heuristic diffusivity constant
Ds3	0.00079[cm ² /s]	(7.9e-8)[m ² /s]	Heuristic diffusivity constant

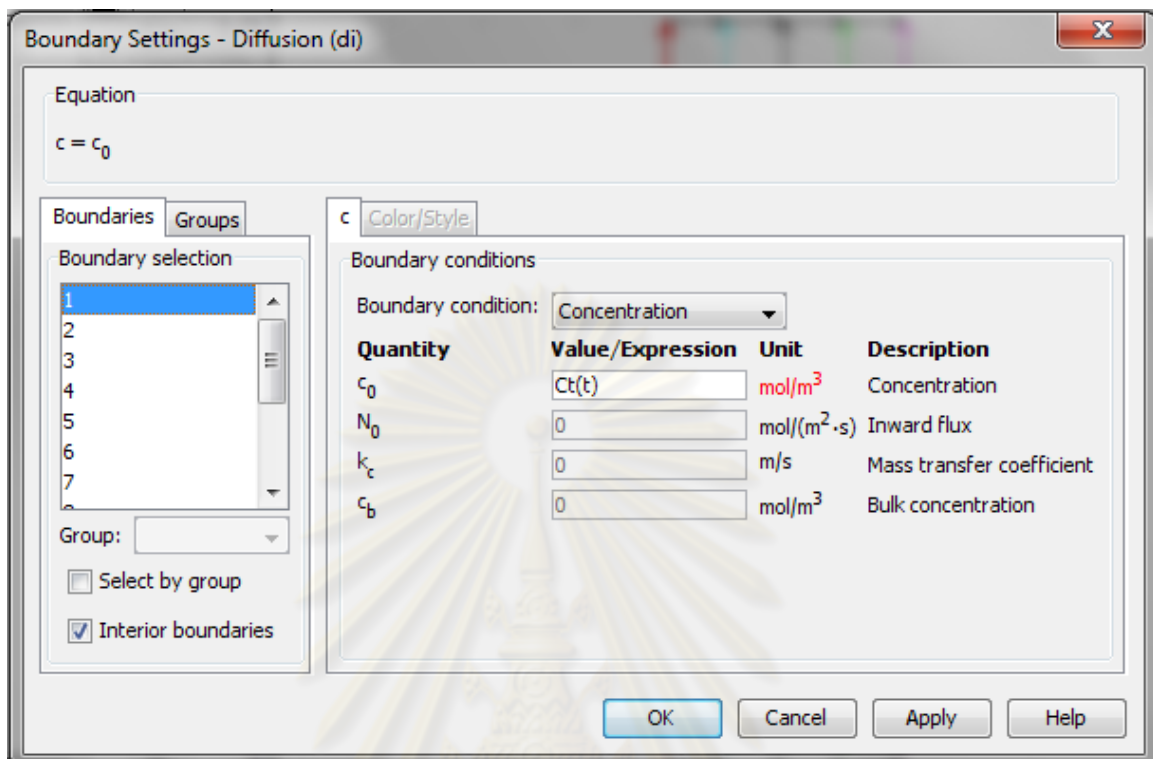
OK Cancel Apply Help

ขั้นตอนที่ 4 กำหนด Subdomain settings และ Boundary settings ของแต่ละชั้นของชั้นของแข็ง โดยเลือก physics → Subdomain settings และ Boundary settings และกำหนดค่าต่างๆ



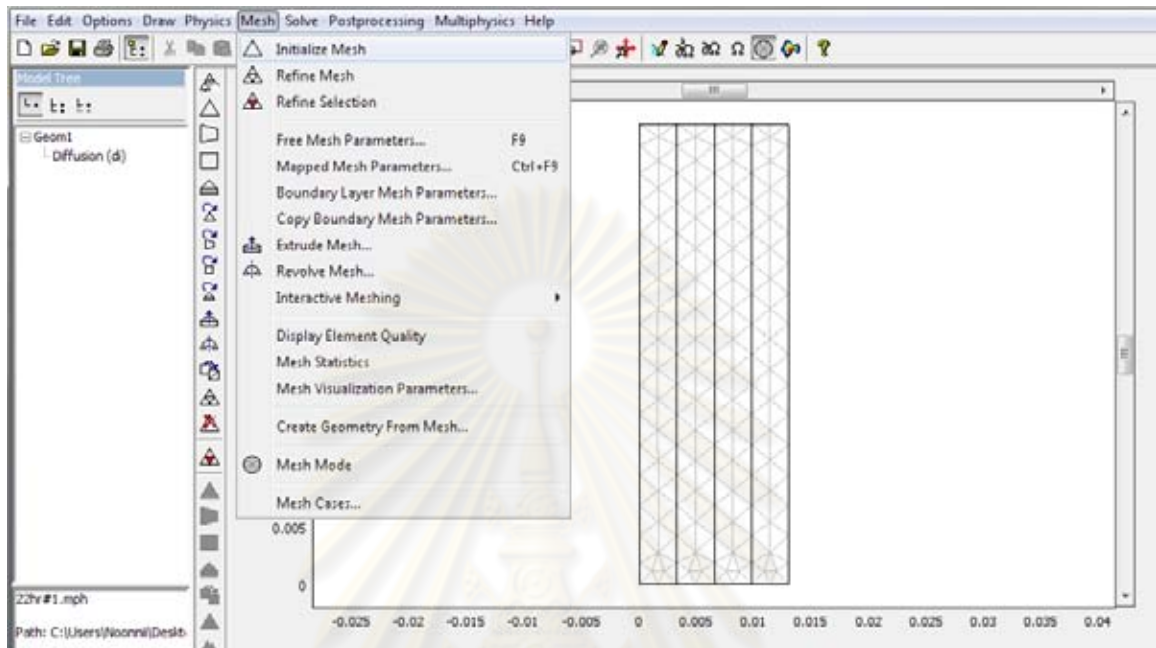
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





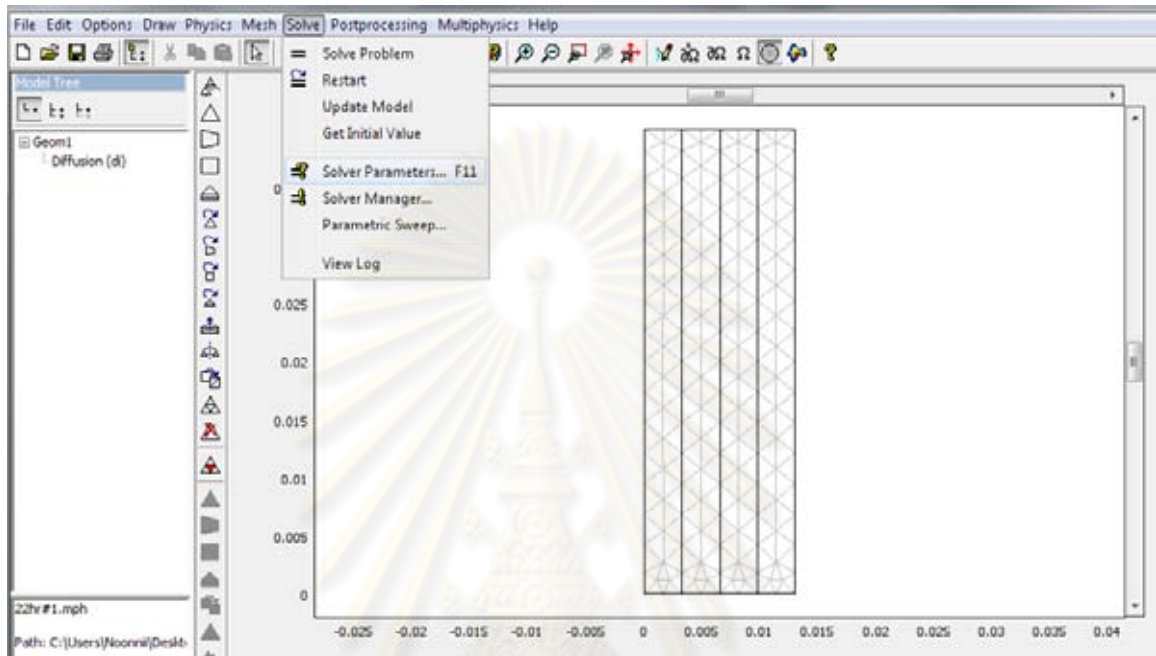
ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 5 กำหนด Mesh เพื่อใช้คำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยเลือก Mesh → Initialize Mesh

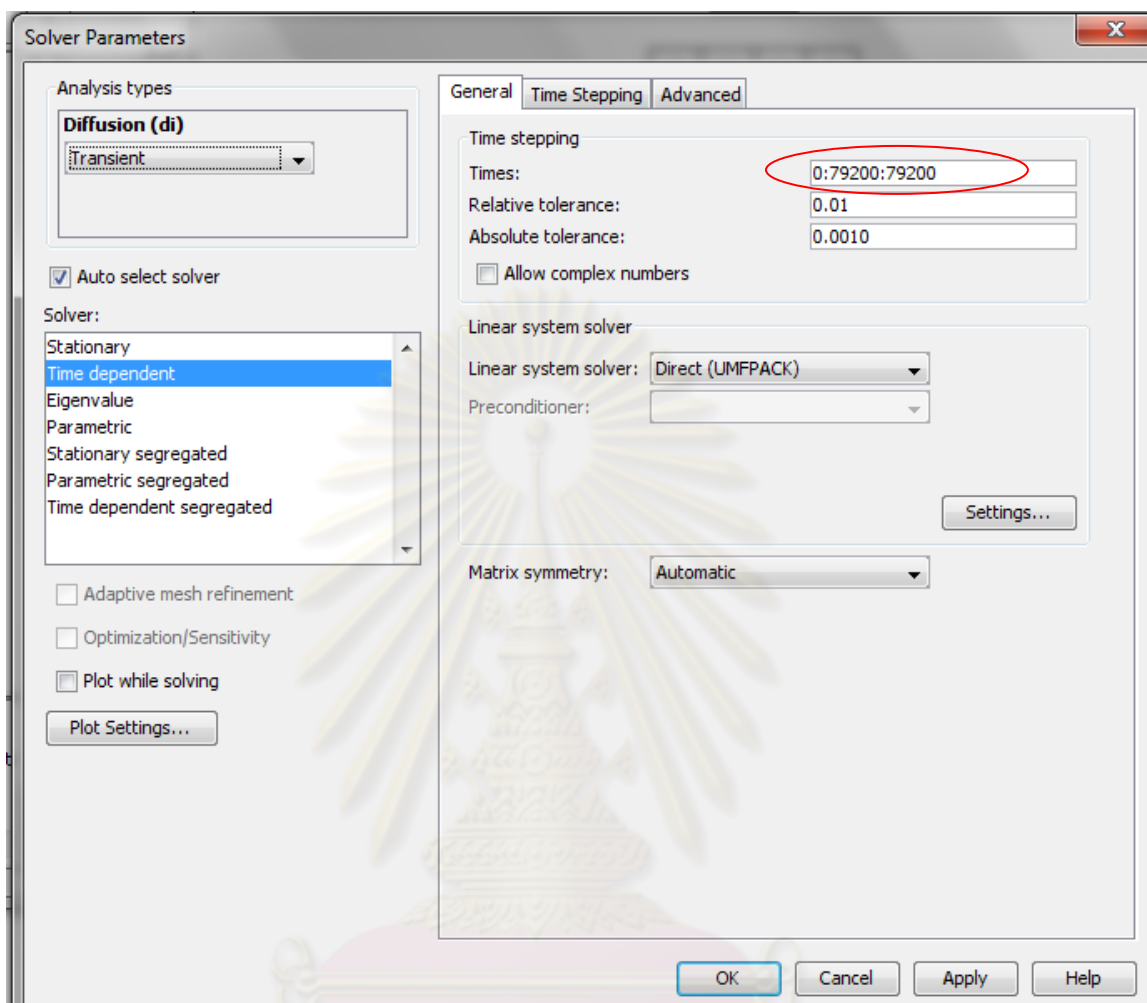


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 6 ก่อนจะเริ่มคำนวณทางคณิตศาสตร์ ต้องกำหนดระยะเวลาในการคำนวณในหน่วยวินาที โดยเลือก Solve → Solver Parameter → Times

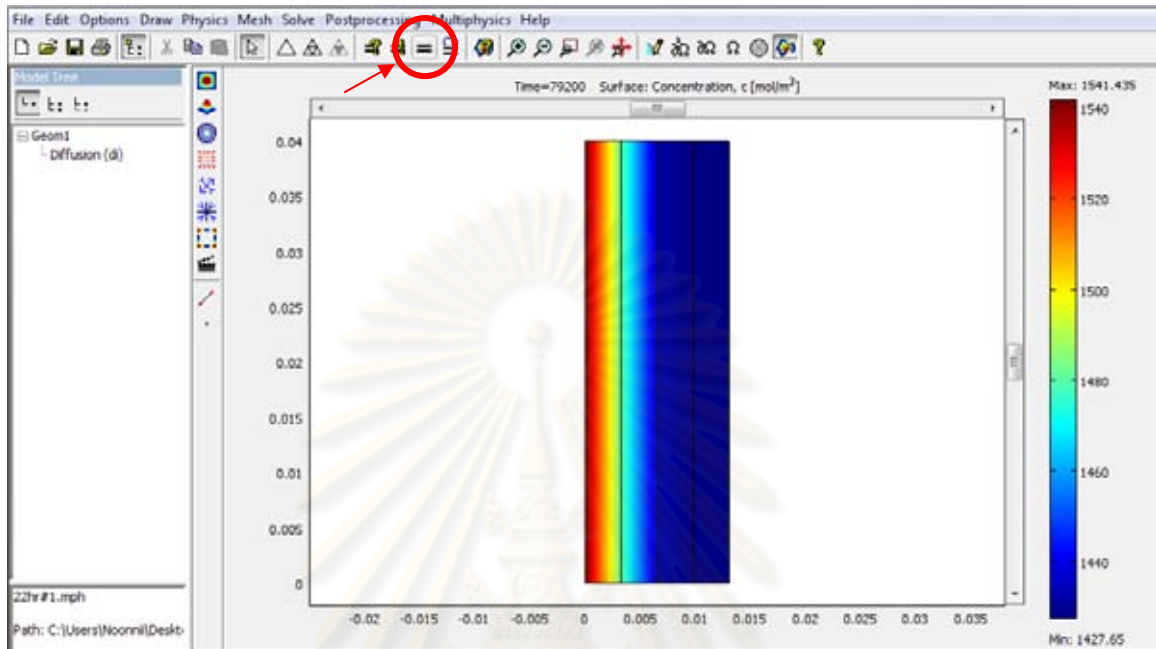


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



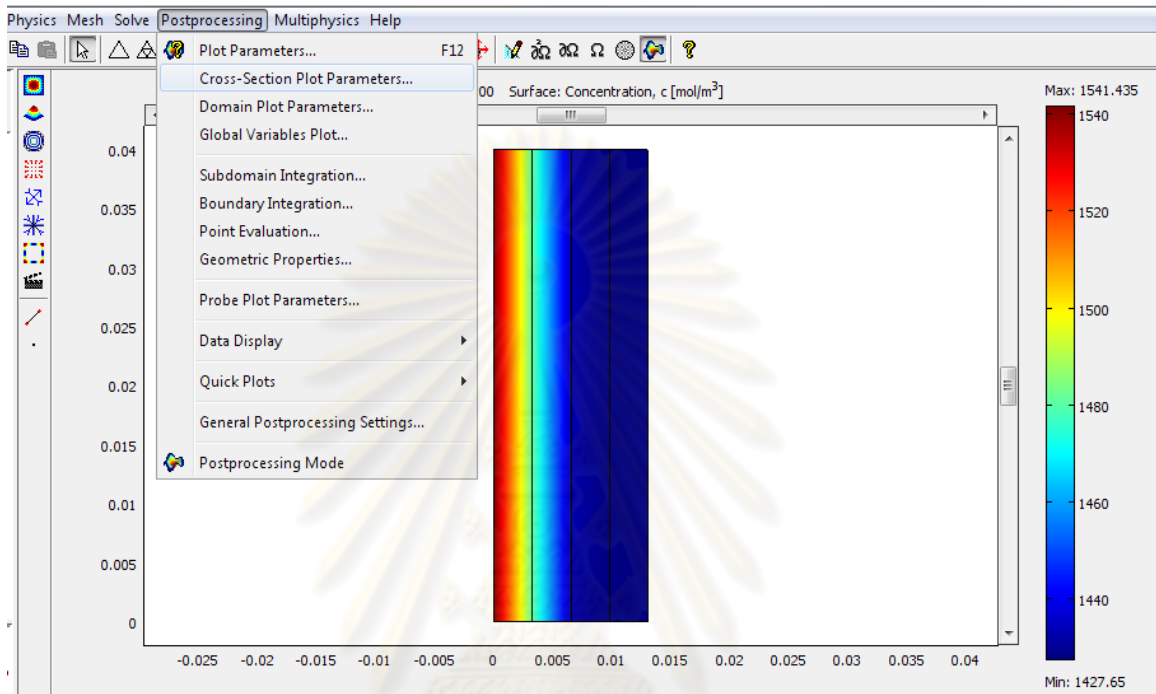
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยกดที่ 

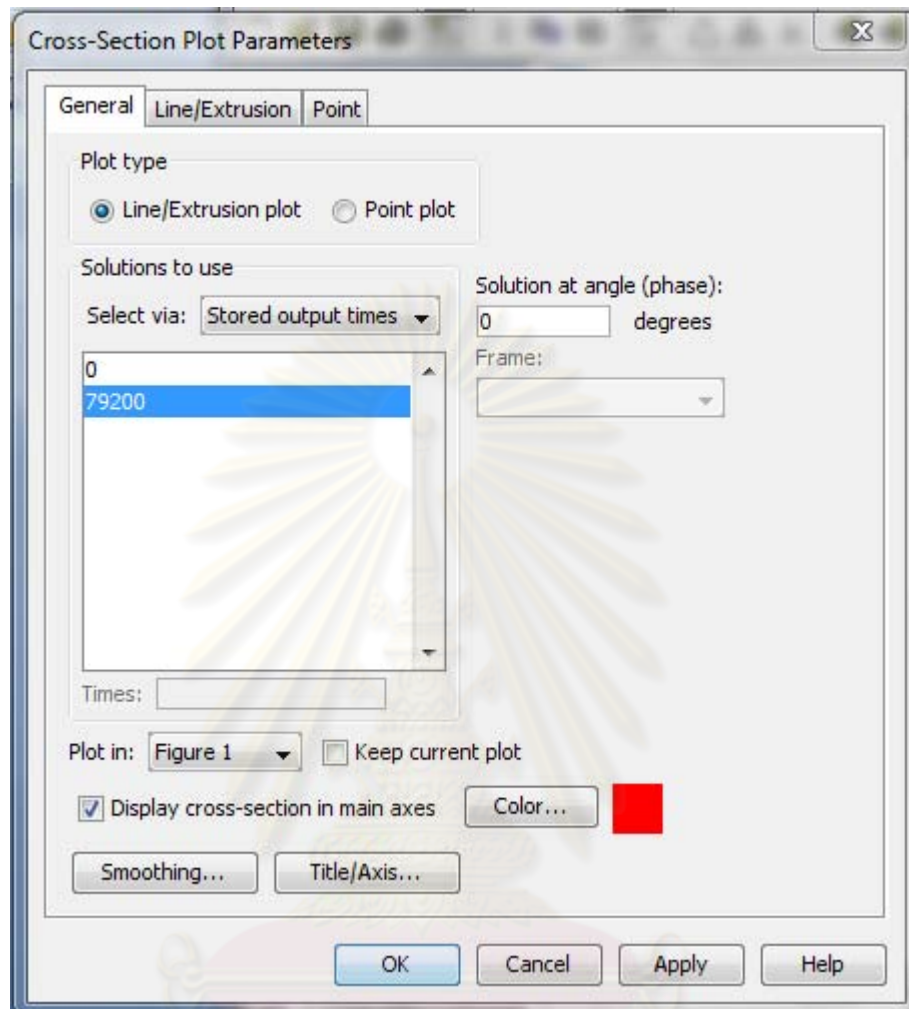


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

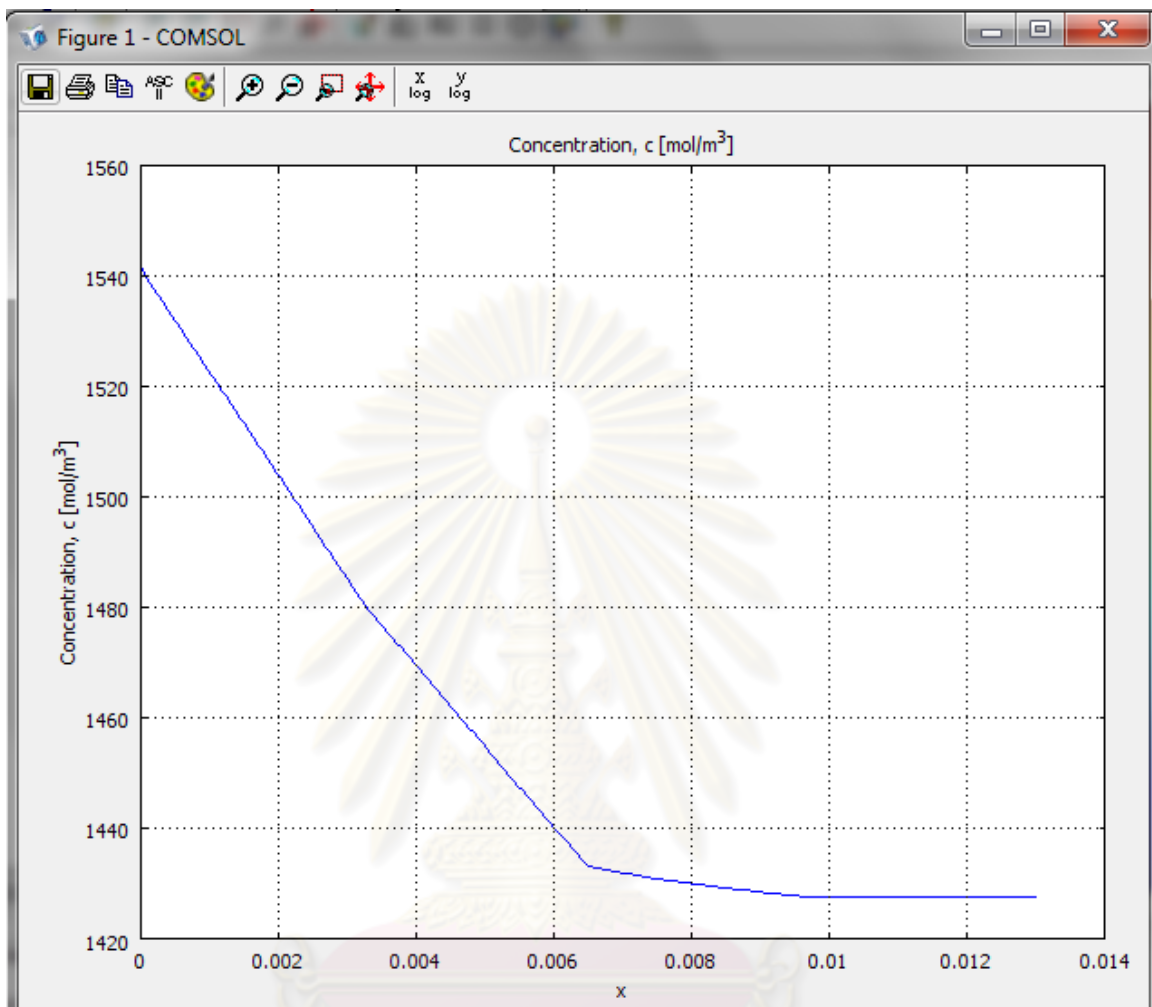
ขั้นตอนที่ 8 ในการแสดงผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยเลือก Postprocessing → Cross-Section Plot Parameters



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

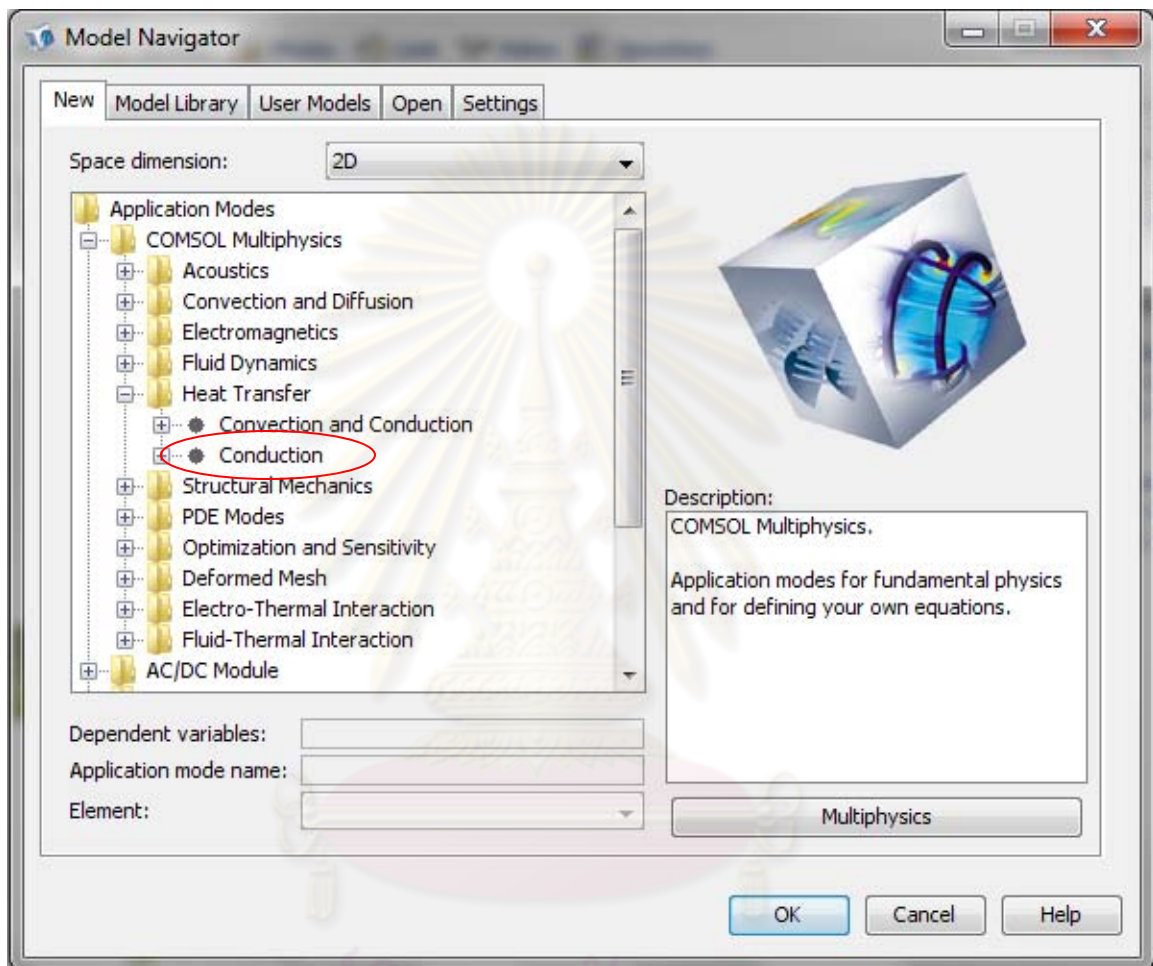


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หมายเหตุ ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จะมีขั้นตอนที่เหมือนกับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ แต่เปลี่ยนจาก Diffusion เป็น Conduction ในขั้นตอนที่ 1



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2))

กำหนดให้	y_i	คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง
	f_i	คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์
	\bar{y}	คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการทดลอง
	n	คือ จำนวนข้อมูล

:

$$SS_{\text{tot}} = \sum (y_i - \bar{y})^2,$$

$$SS_{\text{err}} = \sum (y_i - f_i)^2,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$$

โดยที่

$$R^2 \equiv 1 - \frac{SS_{\text{err}}}{SS_{\text{tot}}}.$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-1 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Square (R^2)) โดยใช้สมการที่กล่าวข้างต้น

y_i	f_i	SS_{tot}	SS_{err}	R^2
1541.447	1541.435	6273.385	6.73E-06	
1480.872	1459.41	347.4446	460.6372	
1433.178	1433.123	844.1847	0.002942	0.95
1427.838	1429.453	1183.006	2.6100	
1427.838	1429.42	1183.006	2.5045	
	รวม	9831.026	465.7547	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรกมลท์ เฟ่งสุข เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 เข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย