

การสกัดปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบโดยวิธีแบบสองขั้นตอน

นายจักรพันธ์ แสนดวง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EXTRACTION OF BETA-CAROTENE FROM CRUDE PALM OIL BIODIESEL
BY TWO-STEP METHOD

Mr. Jaggapan Sanduang



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมัน ปาล์มดิบโดยวิธีแบบสองขั้นตอน
โดย	นายจักรพันธ์ แสนดวง
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวลี พุกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพิตา ทิณชีระนันท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. กัญย์ กังวานสายชล)

จักรพันธ์ แสนดวง : การสกัดบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบโดยวิธีแบบสองขั้นตอน (EXTRACTION OF BETA-CAROTENE FROM CRUDE PALM OIL BIODIESEL BY TWO-STEP METHOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว, 124 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำกลับคืนของบีตาแคโรทีนจากของเสียในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาการดูดซับบีตาแคโรทีน การสกัดบีตาแคโรทีน และการแยกบีตาแคโรทีน ในส่วนของการศึกษาการดูดซับ ศึกษาสมดุลและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ที่ 40 – 80 องศาเซลเซียส และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับ 4 ชนิด ได้แก่ BE01 BE02 NaB และ CaB โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 0.1 – 0.6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในงานวิจัยนี้วัดความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนในตัวอย่างด้วยเครื่อง HPLC จากการทดลองพบว่าความจุการดูดซับสำหรับตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิการดูดซับ แต่ความจุการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและพบว่ากลไกการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช นอกจากนี้ยังพบว่าจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม ในส่วนของการศึกษาการสกัดบีตาแคโรทีน ผลได้การสกัดบีตาแคโรทีนจากดินฟอกสีใช้แล้วด้วยวิธีซอกซ์เลตเป็น 0 กรัมต่อกรัมดินฟอกสีใช้แล้ว เพราะบีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับถูกออกซิไดซ์เป็นสารประกอบอื่น และการสกัดบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยวิธีซอกซ์เลตเป็นเวลา 48 ชั่วโมงพบว่าผลได้น้ำมันและบีตาแคโรทีนคิดเป็น 0.17 กรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง และ 1.22 มิลลิกรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ช่วงความดัน 200 – 350 บาร์ ช่วงอุณหภูมิ 40 – 70 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้น้ำมันและบีตาแคโรทีนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในการสกัดเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อผลได้อย่างมีนัยสำคัญในส่วนของการศึกษาการแยกบีตาแคโรทีน ศึกษาผลของความดันดำเนินการช่วง 180 – 280 บาร์ และอุณหภูมิดำเนินการช่วง 30 – 50 องศาเซลเซียส ต่อความเข้มข้นบีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ พบว่าความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันดำเนินการเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นบีตาแคโรทีนอย่างมีนัยสำคัญ ความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนมีค่าสูงสุดสำหรับช่วงความดันและอุณหภูมิที่ศึกษาคิดเป็นร้อยละ 31.92 ที่ความดันและอุณหภูมิดำเนินการ 280 บาร์ และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5671921623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: BETA-CAROTENE ADSORPTION / BETA-CAROTENE EXTRATION / CRUDE PALM OIL BIODIESEL / SUPER CRITICAL CARBON DIOXIDE / PALM PRESSED FIBER

JAGGAPAN SANDUANG: EXTRACTION OF BETA-CAROTENE FROM CRUDE PALM OIL BIODIESEL BY TWO-STEP METHOD. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Ph.D., CO-ADVISOR: RUENGWIT SAWANGKAEW, Ph.D., 124 pp.

This research is the study of beta-carotene recovery from crude palm oil biodiesel production process wastes. This work divided in to three parts: beta-carotene adsorption, extraction and fractionation. In term of adsorption study, the equilibrium and kinetics of beta-carotene adsorption on clay adsorbents were studied at isothermal condition (40 – 80 °C). The beta-carotene concentrations of samples were measured using HPLC. It was observed that the adsorption capacity of all adsorbents increased with increasing of adsorption time and temperature. The equilibrium data of beta-carotene adsorption agreed well with Freundlich's isotherm. The adsorption mechanism follows the pseudo-second-order kinetic model. In term of extraction study, the yields of spent bleaching earth extraction is zero because adsorpted beta-carotene oxidized and transform to other compounds. The oil and beta-carotene extraction yields of palm pressed fiber (PPF) extraction using n-Hexane are 0.17 g/g dried PPF and 1.22 mg/g dried PPF, respectively. The effect of extraction pressure (200 – 350 bar) and temperature (40 – 70 °C) on yields of beta-carotene extraction from PPF using SCCO₂ were studies. It was shown that the extraction yields of oil and beta-carotene increased with increasing of extraction pressure. In term of fractionation, the effect of operation pressure (180 – 280 bar) and temperature (30 – 50 °C) in fractionator on beta-carotene concentration were studied. It was observed that the beta-carotene concentration increased with increasing of the operating pressure, but product yield decreased. The maximum concentration of beta-carotene concentration is 31.92% at 280 bar and 50 °C for operating pressure and temperature, respectively.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2014 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย และข้อคิดเห็นต่างๆ จากรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พลุกษาท และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพิตา ทิณูชีระนนท์ และ ดร. กันย์ กังวานสายชล ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ยิ่ง

ขอขอบคุณโครงการทุนพัฒนาศักยภาพการวิจัยเชิงสถาบันของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการวิจัยต่อเนื่อง 7 คลัสเตอร์ (ปีที่ 1/2556 และปีที่ 2/2557) ทุนงบประมาณฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนด้านทุนวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ ว่าที่ ร้อยเอก วีระเดช สุขเอียด ที่ช่วยเตรียมกากใยปาล์มที่ใช้ในงานวิจัย จนสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้ที่เกี่ยวข้อง ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านต่างๆ เรื่อยมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ปีตาแคโรทีน	6
2.2 การดูดซับ	15
2.3 การสกัด	21
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	35
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	35
3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	42
4.1 สมบัติของตัวดูดซับประเภทดินเหนียว	42
4.2 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบบน ตัวดูดซับประเภทดินเหนียว	43
4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	49

4.4 ปริมาณสูญเสียของไบโอดีเซลในกระบวนการดูดซับ	52
4.5 ผลได้ปิตาแคโรทีนจากการสกัดดินฟอสซีใช้แล้ว	52
4.6 ผลได้น้ำมันและปิตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์ม	55
4.7 ผลได้และร้อยละความบริสุทธิ์ของปิตาแคโรทีนที่ได้จากเครื่องแยก	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการทดลอง	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
รายการอ้างอิง	67
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดลอง	84
ภาคผนวก ข ค่าการละลายของน้ำมันและปิตาแคโรทีนในคาร์บอนไดออกไซด์.....	110
ภาคผนวก ค ข้อมูลความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์.....	116
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	124

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ชนิดและร้อยละของแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบจากประเทศมาเลเซีย.....	2
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปีตาแคโรทีน.....	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปีตาแคโรทีน (ต่อ).....	7
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปีตาแคโรทีนที่ได้จากการทดลอง.....	7
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปีตาแคโรทีนที่ได้จากการทดลอง (ต่อ).....	8
ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่อัตราการกำจัดออกซิเจนโดยเด็ดเดี่ยวสำหรับปีตาแคโรทีนที่มีโครงสร้างต่างกัน (ในเบนซีน)	10
ตารางที่ 2.6 ผลลัพท์จากการออกซิไดซ์ของปีตาแคโรทีนด้วยอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน.....	11
ตารางที่ 2.7 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	17
ตารางที่ 2.8 ลักษณะและการประยุกต์ใช้รูปแบบการสกัด.....	23
ตารางที่ 2.9 สมบัติวิกฤตของของไหลที่ใช้ในกระบวนการที่ดำเนินการภายใต้ภาวะเหนือวิกฤต.....	26
ตารางที่ 2.10 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของของไหลภาวะเหนือวิกฤต แก๊ส และของเหลว.....	27
ตารางที่ 2.11 ค่าการละลายของสารประกอบบางชนิดในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต.....	31
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการวิเคราะห์โครมาโทแกรมของสารละลายปีตาแคโรทีน.....	37
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการไล่ระดับตัวพาสำหรับการแยกปีตาแคโรทีน.....	37
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของตัวดูดซับประเภทดินเหนียว.....	42
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของดินฟอกสีประเภทดินเหนียว.....	42
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรุนด์ลิชสำหรับการดูดซับปีตาแคโร ทีนจากไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว	49
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือนและแบบจำลอง จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือนสำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลด้วยตัว ดูดซับประเภทดินเหนียวที่ 40 องศาเซลเซียส	51

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของบีตาแคโรทีน.....	6
รูปที่ 2.2 กลไกการสังเคราะห์วิตามินเอจากบีตาแคโรทีน	14
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการดูดซับ.....	16
รูปที่ 2.4 แผนภาพ PVT ของสารบริสุทธิ์และภาพฉาย PT.....	25
รูปที่ 2.5 แผนภาพรูปแบบการดำเนินการสำหรับการสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต	28
รูปที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อผลได้การสกัดพีนอลิกและเทอร์ปีนอยด์จากวัตุดิบที่ แตกต่างกัน.....	32
รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อผลได้การสกัดและค่าการดูดกลืนคลื่นแสง ของแคโรทีนอยด์บางชนิด	32
รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อผลได้การสกัดโทโคฟีรอลจากวัตุดิบที่แตกต่างกัน	33
รูปที่ 3.1 กราฟบีตาแคโรทีนมาตรฐาน.....	38
รูปที่ 3.2 ชุดการสกัดแบบซอกซ์เลต	39
รูปที่ 3.3 ชุดการสกัดและแยกด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต	41
รูปที่ 4.1 ความจุการดูดซับของการดูดซับบีตาแคโรทีนบนตัวดูดซับประเภทดินเหนียว	44
รูปที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดออกของบีตาแคโรทีนที่ดูดซับด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว.....	45
รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุลที่ 40 องศาเซลเซียส	46
รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อร้อยละการกำจัดออกที่ 40 องศาเซลเซียส	46
รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุล	48
รูปที่ 4.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน	50
รูปที่ 4.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน.....	50
รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซลต่อปริมาณสูญเสียของไบโอดีเซล	52
รูปที่ 4.9 ผลได้การสกัดบีตาแคโรทีนจากตัวดูดซับใช้แล้วด้วยวิธีสกัดแบบซอกซ์เลต.....	53

รูปที่ 4.10 รูปแบบการออกซิไดซ์ของปีตาแคโรทีนบนดินฟอกสีกัมมันต์ (ABE) และดินฟอกสีแบบธรรมชาติ (NBE)	53
รูปที่ 4.11 ผลผลิตภัณฑจากการออกซิไดซ์ของปีตาแคโรทีนโดยการเติมอนุโมลอิสระ.....	54
รูปที่ 4.12 ผลได้การสกัดน้ำมันและปีตาแคโรทีนจากกากไยปาล์มด้วยวิธีสกัดแบบซอกซ์เลตเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต	55
รูปที่ 4.13 ผลของความดันต่อผลได้การสกัดน้ำมันจากกากไยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต.....	57
รูปที่ 4.14 ผลของความดันต่อผลได้การสกัดปีตาแคโรทีนมันจากกากไยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต.....	57
รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้การสกัดน้ำมันจากกากไยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต.....	58
รูปที่ 4.16 ค่าการละลายของไตรกลีเซอไรด์ในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต	59
รูปที่ 4.17 ผลของความดันต่อผลได้การสกัดปีตาแคโรทีนมันจากกากไยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต.....	59
รูปที่ 4.18 ค่าการละลายของปีตาแคโรทีนในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต	60
รูปที่ 4.19 ผลได้ของการสกัดน้ำมันและปีตาแคโรทีนจากกากไยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 350 บาร์ ที่ช่วงน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ต่างๆ	61
รูปที่ 4.20 ผลได้น้ำมันจากเครื่องแยกเครื่องที่ 1	62
รูปที่ 4.21 ผลได้น้ำมันจากเครื่องแยกเครื่องที่ 2.....	63
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นปีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องสกัดเครื่องที่ 1	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) เป็นพืชที่นิยมปลูกในกว่า 45 ประเทศทั่วโลก ส่วนใหญ่เป็นประเทศเขตร้อน เช่น อินโดนีเซีย มาเลเซีย ไทย ไนจีเรีย โคลอมเบีย กานา ซาอีร์ และแคเมอรูน ครอบคลุมพื้นที่กว่า 14 ล้านไร่ทั่วโลก (1) ซึ่งในแต่ละปีสามารถเก็บเกี่ยวผลปาล์มได้ประมาณ 3 – 4 ล้านตันต่อไร่ (2) จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2552 จังหวัดกระบี่มีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจำนวน 21 โรง มีกำลังการผลิต 2.77 ล้านตันปาล์มทะลายสดต่อปี ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) 0.56 ล้านตันต่อปี น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm Kernel Oil) 0.07 ล้านตันต่อปี และมีกากของเสียประกอบด้วย ทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunches) 0.8 ล้านตันต่อปี กากใยปาล์ม (Palm Pressed Fiber) 0.05 ล้านตันต่อปี กะลาปาล์ม (Palm Kernel Shells) 0.02 ล้านตันต่อปี และน้ำเสียและกากตะกอนน้ำมันกว่า 2 ล้านตันต่อปี (3, 4) ของเสียจากกระบวนการดังกล่าว เช่น ทะลายปาล์มเปล่า กากใยปาล์ม และกะลาปาล์ม บางส่วนจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องผลิตไอน้ำ และบางส่วนจะถูกทิ้งไว้กลางแจ้งเพื่อให้อยสลาย

ในน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการหีบสกัดมีแคโรทีนอยด์ วิตามินอี และสเตอรอล (sterols) ร้อยละ 1 (5) หรือมีปริมาณแคโรทีนอยด์ประมาณ 500 – 700 ส่วนต่อล้านส่วน จึงส่งผลให้น้ำมันปาล์มดิบมีสีส้มแดง (6, 7) แคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบส่วนใหญ่อยู่ในรูปแอลฟาและบีตาแคโรทีน คิดเป็นร้อยละ 90 ของแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (6-8) เมื่อใช้น้ำมันปาล์มดิบที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงผลิตเป็นไบโอดีเซล ไบโอดีเซลที่ได้จึงมีสีเข้มเพราะมีแคโรทีนอยด์สูงเช่นกัน สีของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบมีผลอย่างมากต่อความเชื่อถือของตลาดเพราะผู้ใช้ไบโอดีเซลมักเชื่อว่าไบโอดีเซลที่สีเข้มจะมีคุณภาพต่ำ (9, 10) ดังนั้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของตลาดจึงจำเป็นต้องกำจัดเม็ดสีออกจากไบโอดีเซล การกำจัดเม็ดสีสามารถทำได้หลายวิธี ส่วนใหญ่มักใช้การดูดซับด้วยตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ ดินฟอกสีกัมมันต์และซิลิกา เป็นต้น (11) นอกจากนี้พบงานวิจัยนำเสนอการใช้ดินฟอกสีกัมมันต์ร่วมกับซิลิกาเพื่อให้ประสิทธิภาพของการดูดซับสูงขึ้น (12) และวิธีอื่นๆ ที่สามารถสกัดเม็ดสีจากน้ำมันได้ เช่น เทคโนโลยีการกรองระดับนาโนด้วยเยื่อเลือกผ่าน (13) การดูดซับด้วยตัวดูดซับประเภทพอลิเมอร์ (14) และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (15) อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปาล์มจะฟอกน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียวหรือที่เรียกกันว่าดินฟอกสี ดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการดูดซับแล้ว

จะมีทั้งน้ำมัน แคโรทีนอยด์ และแร่ธาตุต่างๆ จำนวนมาก ซึ่งดินพอกสีใช้แล้วเหล่านี้เป็นของเสียเหลือทิ้งของโรงกลั่นน้ำมันปาล์ม โดยแต่ละปีมีดินพอกสีใช้แล้วเหลือทิ้งกว่า 20,000 ตัน

กากใยปาล์มที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มมีแคโรทีนอยด์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก โดยกากใยปาล์มที่มีน้ำมันเหลืออยู่ร้อยละ 5 – 6 จะมีแคโรทีนอยด์ประมาณ 4,000 – 6,000 ส่วนต่อล้านส่วน ซึ่งเป็น 6 เท่า ของแคโรทีนอยด์ที่พบในน้ำมันปาล์มดิบ (16) นอกจากนี้กากใยปาล์มของปาล์มน้ำมันลูกผสมบางสายพันธุ์ยังมีปริมาณแคโรทีนอยด์ถึง 6,000 – 7,000 ส่วนต่อล้านส่วน (17)

แคโรทีนอยด์เป็นเม็ดสี (Pigment) ในช่วงสีเหลือง ส้มและแดง ซึ่งอยู่ในพีซีชั้นสูง สัตว์ทะเล และจุลินทรีย์บางชนิดที่สังเคราะห์แสงได้ สำหรับน้ำมันปาล์มดิบแคโรทีนอยด์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแคโรทีน (Carotene) แสดงดังตารางที่ 1.1 (18)

ตารางที่ 1.1 ชนิดและร้อยละของแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบจากประเทศมาเลเซีย

ชนิดของแคโรทีนอยด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Phytoene	1.27
Phytofluene	0.06
β -Carotene	56.02
Cis- β -Carotene	0.68
α -Carotene	35.16
Cis- α -Carotene	2.49
ζ -Carotene	0.69
γ -Carotene	0.33
δ -Carotene	0.83
Neurosporene	0.29
β -Zeaxanthin	0.74
α -Zeaxanthin	0.23
Lycopene	1.30

บีตาแคโรทีน (β -carotene) เป็นเม็ดสีธรรมชาติที่ร่างกายสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วิตามินเอ (Pro vitamin A) ได้ตามที่ร่างกายต้องการ ร่างกายคนเราต้องการวิตามินเอเพื่อรักษาสุขภาพผิวและเยื่อโพรงจมูก เสริมสร้างภูมิคุ้มกัน และช่วยให้มีสุขภาพสายตาและการมองเห็นที่ดี (19) บีตาแคโรทีนเองยังมีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และสามารถป้องกันการเกิดโรคหลอดเลือด

เลือดหัวใจ และมะเร็งได้ (20) ด้วยประโยชน์ดังกล่าวทำให้บีตาแคโรทีนเป็นที่ต้องการทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมยา นอกจากนี้แคโรทีนอยด์ใช้ผสมในอาหารสัตว์ เช่น ปลาแซลมอน หอยเม่น กุ้งและไก่ไข่ เพื่อทำให้เนื้อและไข่มีสีส้มนารับประทาน ตัวอย่างแคโรทีนอยด์ที่ใช้เป็นอาหารสัตว์จากบริษัท BASF Chemical ประเทศเยอรมนี มีชื่อทางการค้าว่า Lucantin® & Lucarotin®

มูลค่าการตลาดของแคโรทีนอยด์ในตลาดโลกมีค่าประมาณ 1.2 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี ค.ศ. 2010 และคาดว่าจะเพิ่มเป็น 1.3 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี ค.ศ. 2017 หรือเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2.9 ต่อปี (21) ซึ่งกว่าร้อยละ 56 ของแคโรทีนอยด์ในตลาดอยู่ในรูปบีตาแคโรทีน และแอสตาแซนทิน (Astaxanthin) จากการสำรวจข้อมูลบนเว็บไซต์ <http://www.alibaba.com/> ราคาขายของแคโรทีนเกรดบริโภคนอยู่ในช่วง 500 – 6,000 บาทต่อกิโลกรัม ขึ้นกับร้อยละ บีตาแคโรทีนซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 1 – 30 แคโรทีนอยด์ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นในประเทศจีนจากการสกัดพืชที่มีสีแดงและสับด้วยตัวทำละลายแล้วระเหยตัวทำละลายออก

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีการดั้งเดิมในอุตสาหกรรม เช่น การสกัดน้ำมันถั่วเหลือง และการสกัดผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ (Natural Product) จากสมุนไพร ตัวทำละลายดั้งเดิมที่ใช้สกัด ได้แก่ เฮกเซน (Hexane) เอสเทอร์และแอลกอฮอล์ต่างๆ แต่การใช้ความร้อนระเหยตัวทำละลายดังกล่าวออกจากผลิตภัณฑ์หลังการสกัดทำให้สารสกัดสูญเสียฤทธิ์ทางชีวภาพได้ ในอีกทางหนึ่งการปนเปื้อนของตัวทำละลายในสารสกัดอาจเกิดขึ้นหากระเหยตัวทำละลายไม่หมด ดังนั้นการระเหยตัวทำละลายออกจากสารสกัดจึงทำในระบบสุญญากาศเพื่อลดจุดเดือดของตัวทำละลาย

การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อเสียของการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบดั้งเดิม เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกจากสารสกัดได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนหรือระบบสุญญากาศเพื่อระเหยตัวทำละลายออก นอกจากนี้ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของแคโรทีนอยด์แต่ละชนิดแตกต่างกันตามความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ทำให้แยกแคโรทีนอยด์แต่ละชนิดได้ด้วยการปรับความดันคล้ายกับการกลั่นลำดับส่วน ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตจึงมีแนวโน้มที่จะมีความบริสุทธิ์สูงกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบดั้งเดิม

การสกัดสารแคโรทีนอยด์ออกจากน้ำมันปาล์มดิบหรือไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตโดยตรงสามารถทำได้ แต่สารแคโรทีนอยด์ที่ได้จะปนเปื้อนด้วยไตรกลีเซอไรด์หรือไบโอดีเซล ทำให้ต้องมีการสกัดหลายรอบ นอกจากนี้การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตโดยตรงต้องใช้ห้องสกัด (Extraction Chamber) ที่มีปริมาตรมาก เนื่องจากความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเพียงร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก

การสกัดแคโรทีนอยด์ 1 กิโลกรัม ต้องใช้ห้องสกัดปริมาณมากกว่า 1,000 ลิตร ประกอบกับราคาของเครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ตามปริมาณของห้องสกัด การดูดซับแคโรทีนอยด์ช่วยเพิ่มความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่จากเดิมกระจายตัวอยู่ในน้ำมันให้มีค่าสูงขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับและส่งผลให้ปริมาณของห้องสกัดลดลงอย่างมาก เช่น การดูดซับด้วยดินฟอกสีร้อยละ 3 ของไบโอดีเซล ทำให้แคโรทีนอยด์ที่ละลายในไบโอดีเซลประมาณ 1,000 ลิตร ถูกดูดซับบนดินฟอกสีประมาณ 30 กิโลกรัม (มีปริมาตรประมาณ 30 ลิตร) ดังนั้นการดูดซับแคโรทีนอยด์ก่อนการสกัดหรือกระบวนการแบบสองขั้นตอนส่งผลให้ปริมาณของห้องสกัดลดลงประมาณ 30 เท่า เมื่อเทียบกับการสกัดโดยตรง นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมไบโอดีเซลมีการใช้ตัวดูดซับเพื่อฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบอยู่แล้วทำให้การสกัดสารแคโรทีนอยด์ออกจากตัวดูดซับไม่ส่งผลกับกระบวนการผลิตโดยรวมช่วยนำกลับสารแคโรทีนอยด์ในของเสียได้

ด้วยปัญหาความเชื่อมั่นของผู้บริโภคต่อสีของน้ำมันปาล์มและไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของปีตาแคโรทีนมีค่าสูงมาก และกากเหลือทิ้งจำนวนมากจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มทั้งดินฟอกสีใช้แล้วและกากใยปาล์มที่มีแคโรทีนอยด์อยู่จำนวนมาก งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการดูดซับปีตาแคโรทีนจากน้ำมันปาล์มดิบและไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียวเพื่อกำจัดปีตาแคโรทีนที่เจือปนในไบโอดีเซล และศึกษาการสกัดปีตาแคโรทีนจากตัวดูดซับใช้แล้วและกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องสกัดแบบเบดนิ่งเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อนำปีตาแคโรทีนกลับคืนเป็นผลผลิตมูลค่าเพิ่ม (value added product) และศึกษาการแยกปีตาแคโรทีนจากของผสมคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเพื่อให้ได้ปีตาแคโรทีนที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยการปรับความดันและอุณหภูมิในเครื่องแยก (Fractionators)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

1.2.2 ศึกษาการสกัดปีตาแคโรทีนจากของเสียในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม (ดินฟอกสีใช้แล้วและกากใยปาล์ม) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยวิธี Soxhlet

1.2.3 หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกปีตาแคโรทีนจากของผสมที่สกัดได้ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต เพื่อให้ได้ปีตาแคโรทีนที่มีความบริสุทธิ์สูง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการนำบีตาแคโรทีนกลับคืนจากของเสียในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ได้แก่ ดินฟอกสีใช้แล้ว และกากใยปาล์ม ด้วยการสกัดและแยกด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ศึกษาผลของชนิดของตัวดูดซับประเภทดินเหนียว เวลาการดูดซับ อุณหภูมิดูดซับ อัตราส่วนปริมาณตัวดูดซับต่อปริมาตรไบโอดีเซลต่อประสิทธิภาพการดูดซับบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

1.3.2 ศึกษาสมมูลและไอโซเทอมการดูดซับของการดูดซับบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

1.3.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของการดูดซับบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

1.3.4 หาผลได้น้ำมันและบีตาแคโรทีนที่ได้จากการสกัดดินฟอกสีใช้แล้วและกากใยปาล์ม ด้วยการสกัดแบบซ็อกซ์เล็ต (Soxhlet extraction)

1.3.5 ศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลาสกัดต่อผลได้น้ำมันและบีตาแคโรทีนจากการสกัดดินฟอกสีใช้แล้วและกากใยปาล์มที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

1.3.6 ศึกษาผลของการเปลี่ยนความดันต่อการแยกบีตาแคโรทีนจากของผสมคาร์บอนไดออกไซด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ตัวดูดซับและภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบบนตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

1.4.2 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดบีตาแคโรทีนจากตัวดูดซับด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต รวมถึงได้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมสำหรับการแยกบีตาแคโรทีนจากของผสมที่สกัดได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บีตาแคโรทีน

บีตาแคโรทีน (β -Carotene) เป็นเม็ดสีธรรมชาติที่สามารถละลายได้ในไขมัน พบได้ในผักผลไม้ที่มีสีแดง ส้ม และเหลือง ร่างกายคนเราสามารถเปลี่ยนบีตาแคโรทีนเป็นวิตามินเอได้ตามต้องการเมื่อร่างกายอยู่ในภาวะขาดวิตามินเอ นอกจากนี้บีตาแคโรทีนยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันตัวออกซิไดซ์ที่สามารถทำอันตรายต่อเซลล์ได้ ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดมะเร็ง

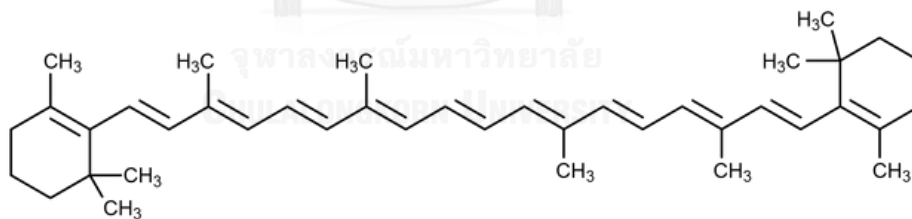
2.1.1 สมบัติของบีตาแคโรทีน

บีตาแคโรทีนเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) ที่มีสมบัติดังนี้

1) ชื่อตามกำหนดของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry: IUPAC) (22)

บีตาแคโรทีนมีชื่อตามระบบ IUPAC ดังนี้ 1,3,3-trimethyl-2-[(1E,3E,5E,7E,9E,11E,13E,15E,17E)-3,7,12,16-tetramethyl-18-(2,6,6-trimethylcyclohexen-1-yl)octadeca-1,3,5,7,9,11,13,15,17-nonaenyl]cyclohexene

2) โครงสร้างของบีตาแคโรทีน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของบีตาแคโรทีน

3) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของบีตาแคโรทีน

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของบีตาแคโรทีน (22)

Molecular Weight	536.87264 g/mol
Molecular Formula	$C_{40}H_{56}$
Hydrogen Bond Donor Count	0
Hydrogen Bond Acceptor Count	0

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปีตาแคโรทีน (ต่อ) (22)

Rotatable Bond Count	10
Exact Mass	536.438202 g/mol
Monoisotopic Mass	536.438202 g/mol
Heavy Atom Count	40
Formal Charge	0
Complexity	1120
Isotope Atom Count	0
Defined Atom Stereocenter Count	0
Undefined Atom Stereocenter Count	0
Defined Bond Stereocenter Count	9
Undefined Bond Stereocenter Count	0
Covalently-Bonded Unit Count	1

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปีตาแคโรทีนที่ได้จากการทดลอง

Color	Deep purple, Red (23) Deep orange (24) Red brown (25)
Melting Point	183 °C (23)

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปีตาแคโรทีนที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

Solubility	109 mg / 100 ml n-hexane at 0 °C (23) Sol in fat solvent (24) Soluble in acetone (25) Soluble in vegetable oils (26) Insoluble in ethanol, glycerol, propylene glycol (27) 0.6 mg/L water (28)
Density	1.00 at 20 °C/20 °C (25)
Vapor Pressure	1.8×10^{-11} mm Hg at 25 °C (29)
Spectral Properties	Max absorption (chloroform): 497, 466 nm (23) Max absorption (benzene): 278, 364, 463, 494 nm (30)

2.1.2 ประโยชน์ของปีตาแคโรทีน

1) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระหมายถึงสารที่สามารถชะลอหรือยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของสารออกซิไดซ์ได้แม้จะมีความเข้มข้นต่ำกว่า (31) ซึ่งอาหารที่เรารับประทานทุกวันมีแคโรทีนอยด์ที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติจำนวนมาก ในธรรมชาติมีแคโรทีนอยด์กว่า 600 ชนิด (32) แต่มีเพียง 40 ชนิด ที่พบในอาหารที่เรารับประทาน และน้อยกว่า 20 ชนิดที่พบในเนื้อเยื่อและพลาสมา (33, 34) แคโรทีนอยด์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจากงานวิจัยด้านระบาดวิทยาระบุว่าการรับประทานอาหารที่อุดมไปด้วยปีตาแคโรทีนเพิ่มขึ้น หรือหรือเพิ่มระดับปีตาแคโรทีนในพลาสมาเป็นการลดความเสี่ยงการเกิดมะเร็งปอดและมะเร็งชนิดอื่นๆ (35, 36)

ปฏิกิริยาและการเกิดปฏิกิริยาของปีตาแคโรทีน มีดังนี้

ก. สมบัติทั่วไป

สารออกซิไดซ์และอนุมูลอิสระที่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างทางชีวภาพ เป็นต้นเหตุของการเกิดและการขยายตัวของโรคความเสื่อม เพราะเยื่อเลือกผ่านต่างๆ ในร่างกายประกอบขึ้นจากไขมันไม่อิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่ทำให้มีความเสี่ยงสูงมากที่จะถูกย่อยสลายโดยอนุมูลอิสระกลายเป็นลิปิดเพอร์ออกไซด์ ซึ่งปีตาแคโรทีนสามารถช่วยยับยั้งการออกซิเดชันและช่วยลดการเกิดลิปิดเพอร์ออกไซด์ในเนื้อเยื่อเหล่านั้นได้ ความสามารถของปีตาแคโรทีนต่อการต้านอนุมูลอิสระขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น

โครงสร้าง และสมบัติทางเคมี รวมถึงตำแหน่งและรูปร่างของปีตาแคโรทีนที่อยู่ในเนื้อเยื่อด้วย และจากงานวิจัยพบว่าโครงสร้างของปีตาแคโรทีนยังเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญมากต่อการกำจัดสารออกซิไดซ์ (37, 38) และการกำจัดอนุมูลอิสระ (39-42) เพราะพันธะคู่ในโมเลกุลของปีตาแคโรทีนมีผลต่อการถ่ายโอนพลังงานในการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับการสังเคราะห์ด้วยแสง (43) บ่งชี้ว่าสามารถจับกับออกซิเจนโมเลกุลเดี่ยว ($^1\text{O}_2$) ได้ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปีตาแคโรทีนกับสารที่มีออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยาเป็นองค์ประกอบชนิดอื่นๆ ซึ่งประกอบด้วย อนุมูล เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ (O_2^-) และสารที่ไม่ใช่อนุมูล เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะขึ้นกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันออกไป และเนื่องจากสายโซ่หลักในโมเลกุลปีตาแคโรทีนมีอิเล็กตรอนจำนวนมากทำให้ง่ายต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของสารที่ขอบอิเล็กตรอนจึงส่งผลต่อเสถียรภาพของโมเลกุล ดังนั้นนอกจากพฤติกรรมทางด้านอนุมูลอิสระของปีตาแคโรทีนจะขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลแล้วยังขึ้นกับธรรมชาติการออกซิไดซ์ของโมเลกุลปีตาแคโรทีนเองด้วย

ข. การกำจัดออกซิเจนโดดเดี่ยวด้วยปีตาแคโรทีน

กลไกหลักของการกำจัด $^1\text{O}_2$ ด้วยปีตาแคโรทีนขึ้นกับการถ่ายโอนพลังงานระหว่างโมเลกุล ซึ่งระดับพลังงานที่ 3 ที่ต่ำที่สุดของปีตาแคโรทีนคือ 88 ± 3 กิโลจูลต่อโมล (44) เทียบกับ $^1\text{O}_2$ อยู่ที่ 94 กิโลจูลต่อโมล และจากงานวิจัยพบว่าปีตาแคโรทีนมีประสิทธิภาพในการกำจัด $^1\text{O}_2$ สูงตรงเท่ากับที่ระดับพลังงานที่ 3 ของปีตาแคโรทีนต่ำพอ (45) ดังสมการที่ (2.1) ส่งผลให้ปีตาแคโรทีนที่อยู่ในระดับพลังงานที่ 3 ($^3\text{CAR}^*$) ซึ่งพร้อมที่จะลดระดับพลังงานลงเป็นระดับพื้นแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปความร้อน ปริมาณ $^1\text{O}_2$ ที่สามารถกำจัดได้ด้วยปีตาแคโรทีนจะขึ้นกับความยาวของโมเลกุลปีตาแคโรทีนและการถ่ายโอนพลังงาน (37, 38, 45-48)



นอกจากการกำจัด $^1\text{O}_2$ จะเกิดขึ้นแบบกายภาพแล้วยังสามารถเกิดแบบเคมีได้ด้วย โดย $^1\text{O}_2$ จะเข้าทำปฏิกิริยากับปีตาแคโรทีน ซึ่งเป็นการทำลายโมเลกุลของปีตาแคโรทีน (47)

ค. การกำจัดอนุมูลอิสระด้วยปีตาแคโรทีน

ในร่างกายมนุษย์มีการผลิตสารที่มีออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยาเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ซึ่งประกอบด้วย $^1\text{O}_2$, OH^* , O_2^- และ H_2O_2 (31) กลไกของการกำจัดสารเหล่านี้จะขึ้นกับธรรมชาติของแต่ละตัว (49) โดยปีตาแคโรทีนจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ออกซิลมากแต่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับ OH^* และ O_2^- มากเช่นกัน (39)

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่อัตราการกำจัดออกซิเจนโตเดี่ยวสำหรับปีตาแคโรทีนที่มีโครงสร้างต่างกัน (ในเบนซีน) (45)

β -Carotene	จำนวนของคาร์บอนพันธะคู่ ประเภทคอนจูเกต	K_q ($\times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$)
7,70-Dihydro- β -carotene	8	0.3
Septapreno- β -carotene	9	1.38
80-Apo- β -carotenal	9	5.27
9-cis- β -carotene	11	11.0
15-cis- β -carotene	11	11.0
All trans- β -Carotene	11	13.0
Decapreno- β -carotene	15	20.0
Dodecapreno- β -carotene	19	23.0

ปฏิกิริยาระหว่างปีตาแคโรทีนกับอนุมูลอิสระสามารถเกิดขึ้นได้ 3 แบบ ได้แก่ การถ่ายโอนอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2.2), การดึงไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.3) และการเติม ดังสมการที่ (2.4) (45, 50)



ทั้งนี้หากกล่าวถึงสมบัตการต้านอนุมูลอิสระของปีตาแคโรทีนจะหมายถึงทั้งอัตราการกำจัดอนุมูลต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของอนุมูล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น รวมไปถึงอนุมูลของปีตาแคโรทีนที่เกิดขึ้นด้วย (41, 51, 52) ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราและกลไกการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ธรรมชาติของตัวอนุมูลอิสระเอง สิ่งแวดล้อมหรือภาวะที่เกิดปฏิกิริยา รวมไปถึงโครงสร้างของปีตาแคโรทีนด้วย นอกจากนี้ยังมีผลของโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของไขมันบนพื้นผิวเยื่อเลือกผ่าน (เยื่อหุ้มเซลล์) (53) และสภาพขั้วของโมเลกุล (54)

ง. ผลลัพธ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของปีตาแคโรทีน

กลไกของการเกิดออกซิเดชันระหว่างอนุมูลอิสระกับปีตาแคโรทีนที่แตกต่างกันส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกันด้วย เนื่องจากโมเลกุลปีตาแคโรทีนมีสายโซ่พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนยาวจึงส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความซับซ้อน เพราะอนุมูลอิสระสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับปีตาแคโรทีนได้หลายตำแหน่ง ตารางที่ 2.6 เป็นการสรุปผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชันปีตาแคโรทีนด้วยอนุมูลอิสระต่างชนิดกัน

ตารางที่ 2.6 ผลิตรภัณฑ์จากการออกซิไดซ์ของปีตาแคโรทีนด้วยอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน

ชนิดของตัวออกซิไดซ์	ผลิตรภัณฑ์ที่ตรวจพบ	รายการอ้างอิง
Azobisisobutylnitrile (AIBN)	Apocarotenals: β -apo-150-carotenal, β -apo-140-carotenal, β -apo-140-carotenal, β -apo-120-carotenal, β -apo-100-carotenal Apocarotenones: β -apo-13-carotenone Epoxides: β -carotene-5,6-epoxide, β -carotene-15,150-epoxidea	(55)
Dioxygen (Ruthenium tetramesitylporphyrin catalyst/air)	Apocarotenals and apocarotenones: Complete series observed Epoxides: β -carotene-5,6-epoxide Isomers: 15-cis- β -carotene Others: C ₉ ,80-diapocarotene-dial C ₁₃ ,80-diapocarotene-dial	(56)
2,2-azobis(2,4-dimethyl vateronitrile) (AMVN)	Epoxides: β -carotene-5,6-epoxide, β -carotene-5,6,50,60-diepoxyde, β -carotene-15,150-epoxide Isomers: cis- β -carotene-15,150-epoxide	(57, 58)

2) สามารถรักษาอาการผิวหนังไหม้ที่เกิดจากการแพ้แดดได้

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งให้พลังงานของโลกของเรา อาหารและเชื้อเพลิงทั้งหมดที่มีบนโลกเกิดจากการการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์สารชีวโมเลกุลผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในพืชและแบคทีเรียบางชนิด โดยส่วนใหญ่พลังงานที่ถูกส่งมาจากดวงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของแสงขาว (Visible light) แต่อินฟราเรด (Infrared, IR) และอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) ก็เป็นรังสีที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตเช่นกัน (59) โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามความยาวคลื่น ได้แก่ ยูวีเอ (UVA) ความยาวคลื่น 320 – 400 นาโนเมตร ยูวีบี (UVB) ความยาวคลื่น 280 – 320 นาโนเมตร และยูวีซี (UVC) ความยาวคลื่น 100 – 280 นาโนเมตร ในธรรมชาติยูวีซีจะถูกดูดกลืนโดยโอโซนในชั้นบรรยากาศจนหมดเหลือเพียงยูวีเอและยูวีบีที่สามารถส่องผ่านลงมายังพื้นผิวโลกได้ แสงขาว (400 – 700 นาโนเมตร) และรังสียูวีสามารถรบกวนการทำงานของชีวเคมีของสิ่งมีชีวิตได้ และสามารถทำอันตรายต่อโครงสร้างทางชีวภาพต่างๆ เช่น DNA ไขมัน และโปรตีน (60-62) สำหรับ DNA รังสียูวีส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสายคู่เบส ทำให้เกิดการออกซิไดซ์ด้วยแสง และส่งผลให้ DNA แตกเป็นสายเดี่ยว แต่ในสัตว์และพืชมีกระบวนการที่สามารถป้องกันผลกระทบดังกล่าวได้ (63) โดยใช้เม็ดสี เช่น บีตาแคโรทีน ในการดูดกลืนและสะท้อนรังสีที่อาจทำอันตรายต่อเซลล์ได้ (64, 65) แสงแดดสามารถทำอันตรายเนื้อเยื่อและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางชีวเคมีอันเป็นสาเหตุของการเกิดโรคผิวหนัง และการมองเห็น (62, 66) ซึ่งทำให้เกิดริ้วรอยก่อนวัย เกิดปฏิกิริยา photoallergic และ phototoxic และเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งผิวหนัง (67-70)

ก. อาการผิวหนังไหม้

ผลกระทบจากแสงแดดที่พบบ่อยคืออาการผิวหนังไหม้หรือเกิดผื่นแดงเนื่องจากแดด เป็นการเกิดผื่นแดงบริเวณผิวหนังที่มีความบอบบางซึ่งเป็นผลกระทบจากรังสียูวี (71) ผื่นแดงที่เกิดจากการแพ้แดดจะแสดงอาการภายในไม่กี่ชั่วโมงหลังได้รับรังสียูวี หรือแสดงอาการอย่างช้าที่สุด 18 – 24 ชั่วโมง อาการผื่นแดงที่เกิดขึ้นเกิดจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบมีการไหลเวียนเลือดเพิ่มขึ้นเพราะหลอดเลือดบริเวณนั้นเกิดการขยายตัวและมีอาการบวม น้ำ การตอบสนองต่อรังสียูวีเช่นนี้อาจเป็นอันตรายต่อ DNA ของเซลล์ในบริเวณนั้นได้

อาการผิวหนังไหม้และอันตรายที่เกิดขึ้นกับ DNA ซึ่งสามารถพัฒนาไปเป็นมะเร็งได้ ส่วนใหญ่เป็นผลกระทบจากรังสียูวีบี โดยรังสียูวีบีจะทำให้เกิดการอักเสบของเซลล์ เพราะยูวีบีจะทำให้เกิดความเสียหายต่อโปรตีนและ DNA ของเซลล์ผิวหนัง และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสัญญาณวิทยาของเซลล์ keratinocytes และเซลล์ผิวหนังอื่นๆ เมื่อเซลล์เหล่านี้ได้รับความเสียหายถาวรหรือตายเนื่องจากการสัมผัสรังสียูวีก็จะแสดงอาการผิวหนังไหม้บริเวณผิวหนังชั้นนอก (72, 73) นอกจากนี้อนุมูลอิสระยังเป็นตัวเร่งขั้นต้นที่ก่อให้เกิดอาการผิวหนังไหม้เมื่อสัมผัสกับยูวีบี

ข. การศึกษาการป้องกันอาการผิวไหม้ด้วยปีตาแคโรทีน

จากงานวิจัยของ Mathews-Roth (74) ระบุว่าปีตาแคโรทีนเป็นสารป้องกันแสงแดด และสามารถป้องกันการเกิด erythropoietic protoporphyria ได้เป็นอย่างดี ซึ่ง Mathews-Roth เป็นนักวิจัยคนแรกที่ทำการศึกษาผลของปีตาแคโรทีนต่อการป้องกันแสงแดดในคนสุขภาพดี โดยการทดสอบผลทางคลินิกของการรับประทานปีตาแคโรทีนต่อการตอบสนองต่อแสงแดดของผิวหนัง (75) โดยอาสาสมัครจะได้รับปีตาแคโรทีน 180 มิลลิกรัมต่อวัน เป็นเวลา 10 สัปดาห์ จากนั้นอาสาสมัครทั้งหมดจะถูกทดสอบโดยให้ทุกคนตากแดดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจะถูกวัดปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดผื่นแดง (minimal erythema dose, MED) และผื่นแดงที่เกิดขึ้น พบว่าปริมาณ MED ของกลุ่มอาสาสมัครที่ได้รับปีตาแคโรทีนสูงกว่ากลุ่มอาสาสมัครที่ไม่ได้รับปีตาแคโรทีนอย่างเห็นได้ชัด แต่ลักษณะของผื่นแดงที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกัน

จากหลายๆ งานวิจัยพบว่าคุณสมบัติการป้องกันอาการผิวไหม้เนื่องจากรังสียูวีของปีตาแคโรทีนจะเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อกลุ่มอาสาสมัครได้รับปีตาแคโรทีนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 สัปดาห์ขึ้นไป แต่จะไม่สามารถช่วยป้องกันอาการผิวไหม้ได้หากได้รับปีตาแคโรทีนเพียง 3 – 4 สัปดาห์ (76, 77)

Lee และคณะ (78) ทำการทดลองโดยให้กลุ่มอาสาสมัครรับประทานแคโรทีนอยด์ซึ่งมีส่วนประสมหลักเป็นปีตาแคโรทีนเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ช่วงแรกอาสาสมัครจะได้รับแคโรทีนอยด์ 30 มิลลิกรัมต่อวัน แล้วเพิ่มขึ้นทุกๆ 8 สัปดาห์ จนช่วงสุดท้ายจะได้รับแคโรทีนอยด์ 90 มิลลิกรัมต่อวัน พบว่าระดับ MED ของอาสาสมัครเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่าของระดับ MED ก่อนได้รับแคโรทีนอยด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลุ่มอาสาสมัครต้องสัมผัสแสงแดดมากกว่าเดิมร้อยละ 50 จึงจะทำให้เกิดผื่นแดง

จากผลการศึกษาข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการรับประทานปีตาแคโรทีนสามารถป้องกันการเกิดอาการผื่นแดงจากแดดได้อย่างน่าพึงพอใจ แต่จำเป็นต้องรับประทานอย่างสม่ำเสมอ ต่อเนื่อง และเป็นเวลานาน จะเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อรับประทานต่อเนื่อง 10 สัปดาห์ขึ้นไป แต่หากรับประทานเพียง 3 – 4 สัปดาห์ ก็จะไม่สามารถช่วยป้องกันอาการดังกล่าวได้

3) เป็นโปรวิตามินเอเพื่อป้องกันภาวะขาดวิตามินเอ

วิตามินเอเป็นชื่อเรียกโดยรวมของกลุ่มสารประกอบที่ประกอบด้วยเรตินอล (retinol) เรตินัล (retinal) และกรดเรติโนอิก (retinoic acid) สารประกอบเหล่านี้เป็นสารอาหารที่จำเป็นต้องได้รับอย่างเพียงพอ เพราะร่างกายจำเป็นต้องใช้ในการเจริญเติบโต ช่วยบำรุงผิวหนังและเส้นผม ป้องกันการอักเสบของเยื่อหุ้มโพรงจมูก ช่วยให้ระบบการผลิตน้ำย่อยทำงานเป็นปกติ ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกัน และช่วยให้มีสุขภาพสายตาและการมองเห็นที่ดีอีกด้วย วิตามินเอจะทำงานร่วมกับวิตามินดี ในการเพิ่มภูมิต้านทานแต่หากเกิดภาวะขาดวิตามินเอจะส่งผลกระทบต่อระบบต่อมไร้ท่อในร่างกาย (79) นอกจากนี้ระดับวิตามินเอยังสัมพันธ์กับการทำงานของต่อมไทรอยด์ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซึม

ไอโอดีน (80) และการสร้างฮอร์โมนไตรไอโอดิโรนิน (triiodothyronine) ซึ่งส่งผลต่อการตอบสนองภายในเซลล์ (81)

ถึงแม้ว่าวิตามินเอเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายแต่ถ้าได้รับในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลเสียต่างๆ ได้ดังนี้ (82)

ก. *แห้งลูกหรือทารกคลอดออกมาพิการ* หญิงมีครรภ์ที่ได้รับวิตามินเอมากเกินไปมีความเสี่ยงต่อภาวะทารกในครรภ์คลอดออกมาพิการหรือแห้งได้ เนื่องจากวิตามินเอมีผลต่อการเจริญเติบโตของเด็กในครรภ์ ซึ่งอาจทำให้เด็กมีความผิดปกติที่ทางเดินปัสสาวะ กระดูกผิดปกติ หรือมีติ่งปูดออกมาที่บริเวณหู

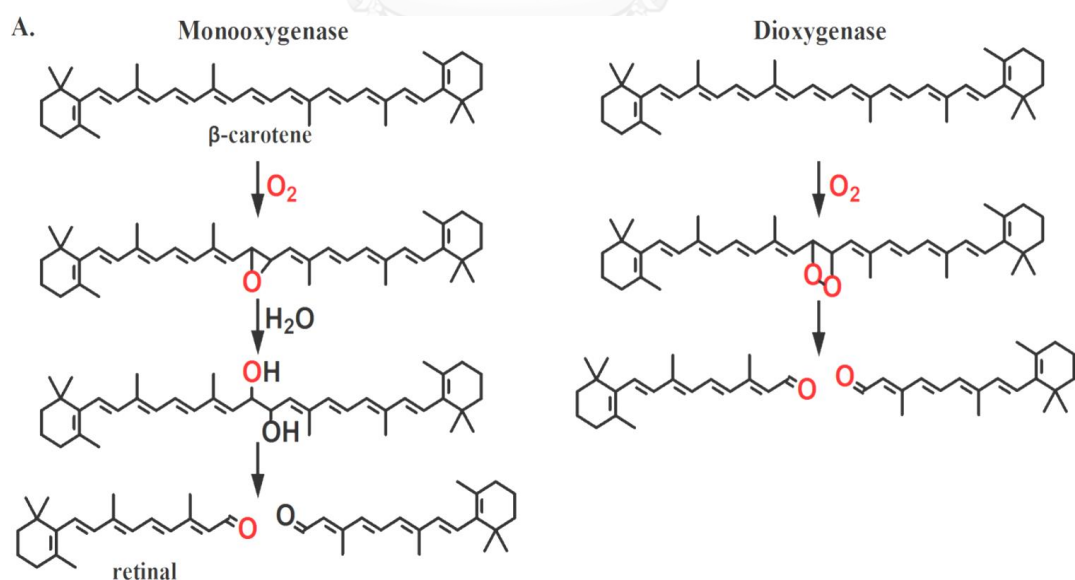
ข. *อ่อนเพลีย* หากร่างกายได้รับวิตามินเอเกินครึ่งละ 15,000 ไมโครกรัม จะมีผลทำให้รู้สึกอ่อนเพลียและอาเจียนได้

ค. *เจ็บกระดูกและข้อต่อ เปื่อยอาหาร เชื่องซึม นอนไม่หลับ กระวนกระวาย ผม่วง ปวดศีรษะ ท้องผูก* ทั้งหมดนี้เป็นโทษในระยะยาวที่เกิดจากการรับประทานวิตามินเอมากเกินไป

ง. *ในสัตว์กระเพาะเดี่ยว* เมื่อได้รับเกินความต้องการ 4-10 เท่า จะทำให้โครงกระดูกผิดปกติ

จ. *ในสัตว์เคี้ยวเอื้อง* เมื่อได้รับเกิน 30 เท่า จะเกิดอาการผิดปกติ

ร่างกายสามารถสังเคราะห์วิตามินเอจากบีตาแคโรทีนได้ตามที่ร่างกายต้องการจึงไม่ทำให้เกิดภาวะระดับวิตามินเอเกิน และการได้รับบีตาแคโรทีนมากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดภาวะตัวเหลือง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบต่างๆ ของร่างกาย



รูปที่ 2.2 กลไกการสังเคราะห์วิตามินเอจากบีตาแคโรทีน (83)

การสังเคราะห์วิตามินเอจากบีตาแคโรทีนเกิดขึ้นที่ตับ เร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ β -carotene 15-15'-oxygenase (BCO1) โดยมีกลไกดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากรูปที่ 2.2 สำหรับกลไกการสังเคราะห์แบบ monooxygenase ออกซิเจนในเรตินัล 1 โมเลกุลได้มาจาก O_2 ส่วนอีก 1 โมเลกุลได้มาจากน้ำ (84) แต่สำหรับกลไกการสังเคราะห์แบบ dioxygenase ออกซิเจนในเรตินัลทั้ง 2 โมเลกุลได้มาจาก O_2 (85)

4) ป้องกันการเกิดโรคหัวใจและโรคหลอดเลือดสมอง

มีงานวิจัยด้านระบาดวิทยาจำนวนมากที่บ่งชี้ว่าผู้ที่บริโภคผักและผลไม้จำนวนมากจะมีอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจและโรคหลอดเลือดสมองลดลง (86-90) นอกจากนี้จากข้อมูลการวิจัยระยะสั้นยังช่วยสนับสนุนว่าการบริโภคอาหารที่ปรุงจากผักและผลไม้จะช่วยลดความเสี่ยงและอัตราการตายเนื่องจากโรคหัวใจและหลอดเลือดสมอง (91-93) ในผักผลไม้ที่เรารับประทานกันทุกวันอุดมไปด้วยบีตาแคโรทีนโดยเฉพาะในผักผลไม้ที่มีสีเหลือง ส้ม และแดง ซึ่งบีตาแคโรทีนดังกล่าวสามารถกำจัดออกซิเจนอิสระและอนุมูลต่างๆ ได้ (94) บีตาแคโรทีนที่เรารับประทานเข้าไปจะถูกเก็บสะสมไว้ที่ตับโดยละลายอยู่ในเนื้อเยื่อไขมันและพลาสมา (95) ด้วยเหตุนี้บีตาแคโรทีนจึงเป็นสารต้านอนุมูลอิสระชั้นดีที่สามารถลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคเรื้อรังหลายอย่าง เช่น โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคมะเร็ง และโรคเบาหวาน

2.2 การดูดซับ

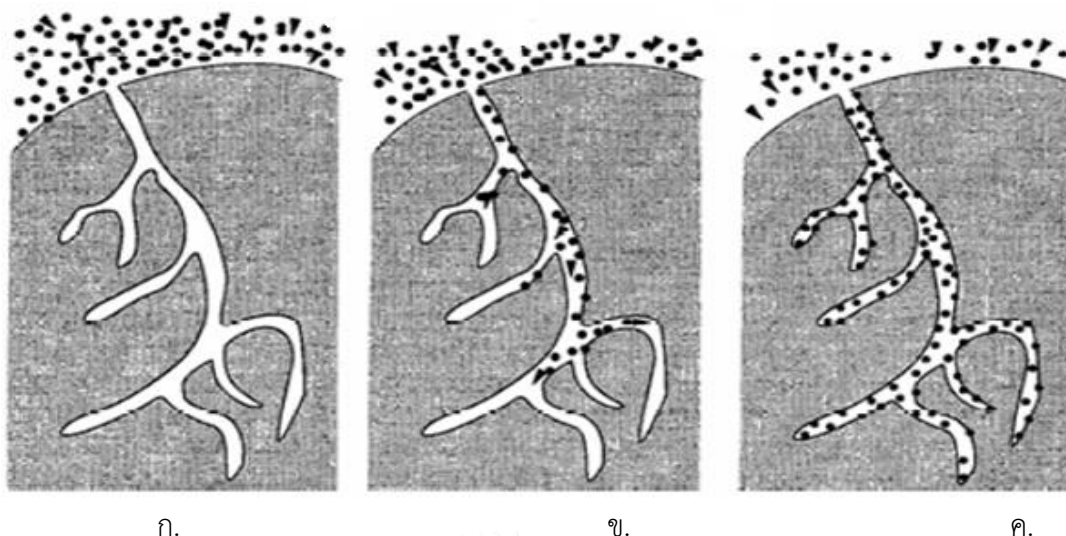
2.2.1 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการแยกโมเลกุลหรือคอลลอยด์ออกจากของไหลโดยอาศัยการตรึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์จากสารละลายลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับและเกิดการสะสมจนมีความเข้มข้นสูง โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และของแข็งที่ใช้ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การแพร่ภายนอก การแพร่ภายใน และปฏิกิริยาพื้นผิว โดยทั้ง 3 ขั้นตอนเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน (96) ดังรูปที่ 2.3

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่และแทรกตัวผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายที่ห่อหุ้มพื้นผิวของตัวดูดซับอยู่จนถึงพื้นผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกตรึงลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกระบวนการแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการดูดซับ ก. การแพร่ภายนอก ข. การแพร่ภายใน ค. ปฏิกริยาพื้นผิว

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อการดูดซับ ถ้าตัวถูกดูดซับเคลื่อนย้ายได้อย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว ซึ่งอัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานการเคลื่อนย้ายโมเลกุลมากที่สุด โดยขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มพื้นผิวตัวดูดซับอยู่

2) การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่สารถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มของสารละลายไปยังผิวของตัวดูดซับ

3) การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ เรียกว่าการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับ

กระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพ เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยแรงอ่อนๆ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's force) ซึ่งประกอบด้วยแรงที่เกิดจากการแพร่ (Dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) โดยจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส (97) ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดติดกับโมเลกุลตัวดูดซับแบบกายภาพ ซึ่งการดูดซับแบบ

กายภาพสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรงและชั้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมอยู่บนตัวดูดซับ ทำให้เกิดการซ้อนทับกันของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นชั้นๆ หลายๆ ชั้น จึงมักเรียกการดูดซับทางกายภาพว่า การดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยจำนวนชั้นที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายสูงขึ้นจำนวนชั้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับที่ต่ำและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีใดๆ จึงส่งผลให้เกิดการคาย (Desorption) ได้ ทำให้สามารถเกิดการผันกลับได้ (Reversible) นั่นเอง จึงสามารถฟื้นฟูตัวดูดซับได้ง่าย

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่เกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวตัวดูดซับ ทำให้เกิดการสร้างสารประกอบใหม่ขึ้นบนผิวของตัวดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับจึงลดลง การดูดซับประเภทนี้จะเกิดเฉพาะบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเท่านั้นทำให้การดูดซับเกิดได้เพียงชั้นเดียว จึงเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption) เนื่องจากการดูดซับทางเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หากได้รับพลังงานกระตุ้นการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีหรือเร็วขึ้น แต่เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรงสูงจึงไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) ทำให้การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับทำได้ยาก

ตารางที่ 2.7 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี (98)

การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์	1. เกิดจากพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. สามารถผันกลับได้	2. ไม่สามารถผันกลับได้
3. เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ	3. เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง
4. เกิดได้ทั้งแบบชั้นเดียวและหลายชั้น	4. เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว
5. เกิดขึ้นได้แม้ไม่มีพลังงานกระตุ้น	5. จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อมีพลังงานกระตุ้น

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และปัจจัยภายนอกดังต่อไปนี้ (99)

(1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้ความสามารถการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ได้มาจากช่องว่างหรือรูพรุนภายในตัวดูดซับ ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

เล็กกว่าขนาดรูพรุนของตัวดูดซับและสามารถแพร่เข้าได้ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้ารูพรุนมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแล้วตัวถูกดูดซับไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง

(2) ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสัมพันธ์ต่อการดูดซับ เพราะขนาดโมเลกุลต้องมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่เข้าภายในรูพรุนได้ และความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกดูดซับต้องถูกแยกออกมาจากสารละลาย ดังนั้นสารที่มีค่าการละลายน้อยจะถูกดูดซับได้ง่าย

(3) อุณหภูมิการดูดซับเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญสำหรับการดูดซับ เนื่องจากพันธะยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นแตกต่างกันการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิการดูดซับจะส่งผลต่อความสามารถการดูดซับด้วย เช่น ถ้าเป็นการดูดซับแบบคายความร้อน การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมียังเป็นการเพิ่มอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับทำให้อัตราการแพร่สูงขึ้นการดูดซับจึงเกิดได้ดีขึ้น

(4) ความปั่นป่วนของระบบส่งผลต่ออัตราเร็วในการตรึงตัวถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เพราะเป็นการเพิ่มอัตราเร็วในการขนส่งโมเลกุลภายในระบบ กล่าวคือถ้าความปั่นป่วนของระบบสูงความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ในทางตรงข้ามถ้าความปั่นป่วนในระบบต่ำ ชั้นฟิล์มจะมีความหนาจึงเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

2.2.3 สมดุลของการดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการคายจนถึงจุดที่อัตราการดูดซับกับอัตราการคายเท่ากันหรือระบบเข้าสู่สมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ที่ภาวะสมดุลความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับจะคงที่ โดยจุดสมดุลของระบบการดูดซับหนึ่งๆ จะเป็นสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้น อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น

การอธิบายสมดุลการดูดซับจะพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยจะเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งสามารถใช้เปรียบเทียบเพื่อหาตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบนั้นๆ

ถึงแม้ว่าทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พัฒนาขึ้นเพื่อใช้อธิบายความแตกต่างของไอโซเทอมการดูดซับจะมีจำนวนมาก แต่ไอโซเทอมที่นิยมใช้ในการศึกษาการดูดซับได้แก่ แบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ (Langmuir's model) และแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich's model) (100-102)

1) แบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ (Langmuir isotherm)

แบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ใช้อธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่ในการดูดซับแน่นอนและเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียว ไม่สามารถเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ โดยทุกๆ ตำแหน่งในการดูดซับมีลักษณะเหมือนกัน พลังงานในการดูดซับเท่ากัน และสมการที่ใช้อธิบายดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$q_e = \frac{bK_L C_e}{1 + (K_L C_e)} \quad (2.5)$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

b คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม เดซิลิตร)

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงก์เมียร์

2) แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich isotherm)

แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชสามารถอธิบายการดูดซับของตัวดูดซับที่มีพื้นผิวการดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีโอกาสเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น มีการกระจายพลังงานการดูดซับซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.6

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

$1/n$ คือ ค่าคงที่ที่บ่งบอกความเข้มข้นของการดูดซับ

ค่า $1/n=1$ แสดงว่าไอโซเทอมของการดูดซับเป็นเส้นตรง ค่า $1/n>1$ แสดงว่าพื้นที่ผิวของตัวถูกดูดซับมีปริมาณมากที่สามารถใช้ในการดูดซับได้ และค่า $1/n<1$ แสดงว่าพื้นที่ผิวของตัวถูกดูดซับมีปริมาณจำกัด

2.2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์สามารถอธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ใช้ทำนายอัตราการดูดซับได้ และมีความสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการ โดยทั่วไป อัตราเร็วในการดูดซับจะมีค่ามากช่วงระยะเริ่มต้นการดูดซับและอัตราเร็วของการดูดซับจะค่อยๆ

ลดลงและเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในที่สุด แบบจำลองที่นิยมใช้อธิบายปรากฏการณ์การดูดซับมี 2 แบบ ได้แก่ จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order kinetics) และ จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order kinetics) โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (Pseudo-chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของตัวดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง (103, 104)

(1) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order kinetics) หมายถึง อัตราการดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง มีรูปทั่วไปดังสมการที่ 2.7 พิจารณาภายใต้สมมติฐานว่าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับเป็นปฏิกิริยาที่ผันแปรตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นชนิดเดียว และสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.8

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.7)$$

$$\ln(q_e - q_t) = q_e - k_1 t \quad (2.8)$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม

t คือ เวลา (นาทีก)

(2) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order kinetics) หมายถึง อัตราการดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสองหรือขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด โดยมีรูปทั่วไปดังสมการในสมการที่ 2.9 จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือนเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีที่เกิดประจุของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ อัตราการดูดซับจะขึ้นกับจำนวนของตัวถูกดูดซับและจำนวนตัวถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล ซึ่งสามารถเขียนให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.10

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.9)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.10)$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม

t คือ เวลา (นาทีก)

2.2.5 การศึกษาการดูดซับบีตาแคโรทีน

Ahmad และคณะ (105) ศึกษาผลของการสังเคราะห์ตัวดูดซับต่อการดูดซับบีตาแคโรทีนในระบบแบบตซ์ โดยการสร้างไอโซเทอมของการดูดซับและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับบีตาแคโรทีนจากสารละลายบีตาแคโรทีนในเฮกเซนบนตัวดูดซับที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาเจล (Silica gel) และฟลอริซิล (Forisil) โดยวิเคราะห์ปริมาณบีตาแคโรทีนในสารละลายก่อนและหลังดูดซับด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ เวลาดูดซับ อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของบีตาแคโรทีน จากผลการทดลองพบว่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้นตามเวลาและอุณหภูมิในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น และสมมูลการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงก์เมีย (Langmuir's isotherm) โดยความจุสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวของตัวดูดซับฟลอริซิลเท่ากับ 86.207 มิลลิกรัมบีตาแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับซึ่งมากกว่าซิลิกาเจล และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม

Wu และ Li (106) ศึกษาจลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับบีตาแคโรทีนและคลอโรฟิลจากสารละลายไซลีนบนตัวดูดซับประเภทดินเบนโทไนต์กัมมันต์ที่อุณหภูมิ 65 – 95 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าสมมูลการดูดซับบีตาแคโรทีนบนตัวดูดซับประเภทดินเบนโทไนต์กัมมันต์สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงก์เมียแต่สมมูลการดูดซับคลอโรฟิลบนตัวดูดซับประเภทดินเบนโทไนต์กัมมันต์สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช สำหรับจลนพลศาสตร์ของการดูดซับทั้งบีตาแคโรทีนและคลอโรฟิลเป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมทั้งคู่ จากการทดลองยังพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับสามารถเพิ่มอัตราและสมมูลการดูดซับบีตาแคโรทีนและคลอโรฟิลได้ และพลังงานก่อกัมมันต์ของการดูดซับบีตาแคโรทีนและคลอโรฟิลบนตัวดูดซับประเภทดินเบนโทไนต์กัมมันต์เท่ากับ 19.808 กิโลจูลต่อโมล และ 16.475 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ และสามารถคำนวณพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ เช่น ΔH ΔS และ ΔG ของการดูดซับบีตาแคโรทีนที่ 65 องศาเซลเซียส ได้เป็น 21.766 กิโลจูลต่อโมล 92.244 จูลต่อเคลวิน และ -9.554 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ สำหรับการดูดซับคลอโรฟิลที่ 65 องศาเซลเซียสคำนวณได้เท่ากับ 31.051 กิโลจูลต่อโมล 93.549 จูลต่อเคลวิน และ -0.729 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ

2.3 การสกัด

2.3.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

การออกแบบเครื่องมือในระบบการสกัดจะขึ้นกับขั้นตอนการสกัดและลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบที่ใช้สกัดและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัด ในอดีตการสกัดหรือการชะถูกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การแช่ และการซึมผ่าน (107) แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสกัดพัฒนาไปมากกระบวนการสกัดที่ใช้กันคือการสกัดแบบต่อเนื่อง (108) เพราะการสกัดแบบแช่

ต้องนำวัตถุดิบที่ผ่านการแช่มาบดซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียจำนวนมากจึงไม่ค่อยได้รับความนิยม แต่รูปแบบการสกัดดังกล่าวก็ยังมีใช้อยู่ในปัจจุบันเพราะอุปกรณ์ในการสกัดเรียบง่ายไม่ซับซ้อน (109)

1) รูปแบบการดำเนินการ

การสกัดแบบแบตช์ (Batch Extraction) ดำเนินการโดยขั้นแรกบรรจุวัตถุดิบของแข็งที่ต้องการสกัดลงในเครื่องสกัด จากนั้นเติมตัวทำละลายลงในเครื่องสกัดให้ตัวทำละลายท่วมวัตถุดิบของแข็งแล้วกวนผสมเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร เมื่อระบบถูกกวนจนถึงระยะเวลาที่กำหนดจึงแยกตัวทำละลายที่มีสารผลิตภัณฑ์ละลายอยู่ซึ่งเรียกว่า miscella ออกแล้วเอาของแข็งที่เหลือทิ้งไป ซึ่งในปัจจุบันการดำเนินการสกัดแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมเพราะการดำเนินงานไม่ต่อเนื่องและมีค่าใช้จ่ายสูงเพราะใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก แต่อาจจะยังมีใช้อยู่สำหรับบางกระบวนการที่มีขนาดเล็ก เช่น การสกัดกลีนาเวเนเดอร์

การสกัดแบบกึ่งต่อเนื่อง (Quasi-continuous Extraction) เป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดเพราะสามารถต่อเครื่องสกัดเป็นแบบอนุกรม คือส่งตัวทำละลายที่ผ่านกระบวนการสกัดแล้วไปยังเครื่องสกัดถัดไปที่มีสารสกัดในวัตถุดิบสูงกว่า ด้วยวิธีนี้จะสามารถเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในตัวทำละลายจนเข้าใกล้ความจุของตัวทำละลาย เมื่อผลิตภัณฑ์ในวัตถุดิบหมดแล้วก็เปลี่ยนวัตถุดิบใหม่เข้าไป และโดยปกติแล้วจะดำเนินการสกัดแบบสวนทาง กล่าวคือตัวทำละลายที่มีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สูงจะไหลผ่านวัตถุดิบที่มีความเข้มข้นผลิตภัณฑ์สูงกว่าเพื่อให้เกิดการละลายของผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบลงในตัวทำละลาย ดังนั้นตัวทำละลายใหม่ที่ถูกป้อนเข้าในระบบจะไหลผ่านและสัมผัสกับวัตถุดิบที่มีความเข้มข้นต่ำที่สุดในระบบ

การสกัดแบบต่อเนื่อง (Continuous Extraction) เป็นกระบวนการที่วัตถุดิบจะถูกป้อนและไหลออกจากเครื่องสกัดอย่างต่อเนื่อง

การออกแบบระบบการสกัดจะคำนึงถึงลักษณะและสมบัติของตัวทำละลายการละลายของสารผลิตภัณฑ์ เช่น ถ้าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสกัดสูงกว่าจุดเดือดของตัวทำละลายก็จะต้องเพิ่มความดันในระบบเพื่อให้ตัวทำละลายคงสภาพเป็นของเหลว หรือในระบบที่ใช้ตัวทำละลายไวไฟสูงก็จำเป็นต้องดำเนินการภายใต้ภาวะสุญญากาศเล็กน้อยเพื่อป้องกันการรั่วไหล ซึ่งตารางที่ 2.8 (110) จะแสดงภาพรวมของการดำเนินการสกัดและตัวอย่างการนำไปใช้

2) การเลือกตัวทำละลาย (111)

แม้ว่ากระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายอาจเป็นการออกแบบทางวิศวกรรมที่ไม่ซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ค่อนข้างต่ำ แต่การออกแบบกระบวนการให้น่าสนใจในทางเศรษฐศาสตร์ต้องอาศัยกลยุทธ์ที่ซับซ้อนและขึ้นกับตัวแปรหลายอย่าง ซึ่งมีหลายกรณีที่พิจารณาแล้วพบว่า การสกัดด้วยตัวทำละลายไม่เหมาะสมเมื่อเทียบกับเทคนิคการแยกแบบอื่น ๆ เพราะไม่มีการเลือกใช้ตัวทำละลายอย่างเป็นระบบ เช่น เลือกตัวทำละลายที่สามารถละลายสารผลิตภัณฑ์ได้ดีมากจึงมีผลได้การสกัดสูง

ตารางที่ 2.8 ลักษณะและการประยุกต์ใช้รูปแบบการสกัด

Operation	Working principle	Extraction system	Field of application	Examples
Batch	Immersion extraction	Stirred vessel	Pharmacy	Alkaloids
	Static bed percolation	Single-stage percolator	Spices	Pepper
	Static bed cross-current percolation	Multi-stage percolator		
Quasi-continuous	Stationary bed, countercurrent percolation beets	Multistage percolator	Instant material, sugar	Instant coffee, sugar from battery
Continuous	Rotating cells, countercurrent percolation	Rotocel	Vegetable oil	
	Rotating bed, countercurrent percolation, stationary tray bottom	Carrousel	Vegetable oil, spices, instant material	Soybean oil, paprika, sieve pepper, hops
	Stationary bed, countercurrent percolation, rotating feed/discharging locations	Stationary basket	Vegetable oil, spices	Wheat germ, paprika
	Horiz. moving bed, countercurrent percolation	Sieve tray belt; sliding cell	Sugar	Sugar from beets/cane
	Horiz. moving bed, co-/ countercurrent percolation	Crown loop extractor	Sugar, vegetable oil	Sugar cane, soybean oil
	Vert. moving bed, co-/ countercurrent percolation	Basket elevator	Vegetable oil	Flaked oil seeds
	Moving bed, countercurrent, immersion	Screw conveyor	Sugar	Sugar beets

แต่ไม่สามารถแยกสารผลิตภัณฑ์ออกจากตัวทำละลายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณา 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้

- ก. การยึดเหนี่ยวระหว่างของเหลวกับของเหลว (Liquid-liquid contact)
- ข. การกู้คืนตัวทำละลาย (Solvent recovery)
- ค. การทำความสะอาดวัตถุดิบที่เหลือจากการสกัด (Raffinate cleanup)

ในกระบวนการสกัดไม่มี “ตัวทำละลายครอบครัว” ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในแต่ละระบบโดยพิจารณาจากความแตกต่างของอันตรกิริยาระหว่าง 2 ภูมิภาค ซึ่งลักษณะอันพึงประสงค์ของตัวทำละลายที่ใช้เลือกให้เหมาะสมสำหรับการสกัดสารอินทรีย์มีดังนี้

- ก. ความจุตัวถูกละลายสูง
- ข. สมรรถนะการเลือกสูง หมายถึง มีค่าการละลายของสารพึงประสงค์สูงแต่มีค่าการละลายของสารไม่พึงประสงค์อื่นๆ ต่ำ
- ค. ละลายน้ำได้น้อย
- ง. ฟื้นฟูง่าย
- จ. มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม เช่น ความหนาแน่น ความหนืด และแรงตึงผิว
- ฉ. ราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ และไม่ทำให้เกิดสนิม

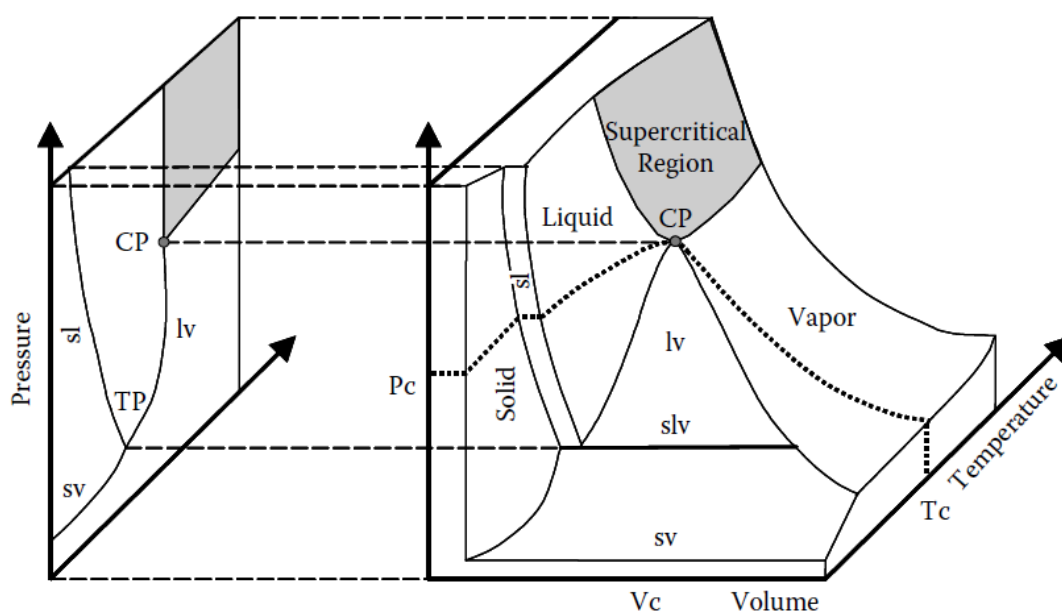
2.3.2 การสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต

1) ของไหลภาวะเหนือวิกฤต

ตัวทำละลายจำนวนมากที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ยา อาหาร และการสกัดสารจากธรรมชาติ หากจะมองหาตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของไหลภาวะเหนือวิกฤตก็เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ ซึ่งสามารถปรับใช้ได้กับหลายกระบวนการ เช่น ใช้ในการสกัด การทำปฏิกิริยาเคมี การชะล้าง การอบแห้ง และสามารถใช้ในกระบวนการอื่นๆ ได้อีกมากมาย การปรับใช้งานของไหลภาวะกึ่งหรือเหนือวิกฤตจะคำนึงถึงความหนาแน่นเป็นหลัก เพราะความหนาแน่นจะบ่งบอกกำลังการละลายของตัวทำละลาย การปรับความหนาแน่นของของไหลภาวะกึ่งหรือเหนือวิกฤตทำได้ง่ายมากเพียงการปรับอุณหภูมิ ความดัน หรือองค์ประกอบ ลักษณะอื่นๆ ที่เป็นจุดเด่นของของไหลภาวะกึ่งหรือเหนือวิกฤต ได้แก่ แรงตึงผิวต่ำ ความหนืดต่ำ และสัมประสิทธิ์การแพร่สูง (112)

ความแตกต่างในแต่ละสถานะของสารบริสุทธิ์สามารถแสดงในรูปแบบแผนภาพสามมิติ ความดัน-ปริมาตร-อุณหภูมิ (PVT diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่ละพื้นที่แสดงขอบเขตของสถานะที่แตกต่างกัน ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ที่ขึ้นกับค่าต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิและความดัน ตามกฎวิกฤตสมดุระหว่าง 2 ภูมิภาคใดๆ ของสารบริสุทธิ์ เช่น ของแข็ง-ของเหลว ของแข็ง-แก๊ส และของเหลว-แก๊ส จะมีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 1 ดังนั้นความดันที่สมดุลวิกฤตใดๆ

จะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ภาพฉาย PT ที่แสดงเส้นสมดุลระหว่างของแข็ง-ของเหลว ของแข็ง-แก๊ส และของเหลว-แก๊ส แสดงในรูปที่ 2.4 ซ้าย เมื่อพิจารณาเส้นสมดุลระหว่างของเหลว-แก๊สในภาพฉาย PT จะพบว่าเป็นเส้นโค้งความดันไอของสาร โดยมีจุดเริ่มต้นจากจุดร่วมสาม (triple point, TP) ซึ่งเป็นจุดสมดุลของสารทั้ง 3 วัฏภาคและสิ้นสุดที่จุดวิกฤต (critical point, CP) สามารถอธิบาย CP ได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติของของเหลวตามเส้นโค้งความดันไอ กล่าวคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารความหนาแน่นของของเหลวจะลดลง ในขณะที่ความหนาแน่นของไอจะเพิ่มขึ้นเพราะความดันไอเพิ่มขึ้น จนในที่สุดความหนาแน่นของทั้ง 2 วัฏภาคจะมาบรรจบกันที่จุดวิกฤต และที่จุดวิกฤตนี้ สมบัติของทั้ง 2 วัฏภาคจะไม่แตกต่างกัน และภาวะที่สารมีอุณหภูมิและความดันเหนือจุดวิกฤตเรียกว่าภาวะเหนือวิกฤต



รูปที่ 2.4 แผนภาพ PVT ของสารบริสุทธิ์และภาพฉาย PT (112)

การใช้ตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตโดยทั่วไปใช้อุณหภูมิประมาณอุณหภูมิวิกฤตแล้วเพิ่มความดันให้สูงพอที่จะทำให้ความหนาแน่นของสารมากกว่าความหนาแน่นวิกฤต และตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตที่ใช้ทั่วไปแสดงในตารางที่ 2.9 ซึ่งตัวทำละลายเหล่านี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทอุณหภูมิวิกฤตต่ำกับประเภทอุณหภูมิวิกฤตสูง คาร์บอนไดออกไซด์ อีเทน และโพรเพนจัดอยู่ในประเภทอุณหภูมิวิกฤตต่ำ ส่วนแอลเคน เมทานอล และน้ำเป็นประเภทอุณหภูมิวิกฤตสูง ซึ่งตัวทำละลายประเภทอุณหภูมิวิกฤตต่ำกับประเภทอุณหภูมิวิกฤตสูงก็จะมีกำลังการละลายและสมรรถนะการเลือกแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.9 สมบัติวิกฤตของของไหลที่ใช้ในกระบวนการที่ดำเนินการภายใต้ภาวะเหนือวิกฤต (112)

ชนิดของไหล	อุณหภูมิวิกฤต (เคลวิน)	ความดันวิกฤต (บาร์)	ปริมาตรวิกฤต (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
คาร์บอนไดออกไซด์	304.12	73.7	94.07
อีเทน	305.3	48.7	145.5
โพรเพน	369.8	42.5	200.0
น้ำ	647.1	220.6	55.95
แอมโมเนีย	405.4	113.5	72.47
เฮกเซน	507.5	30.2	368.0
เมทานอล	512.6	80.9	118.0

Francis (113) ศึกษาสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวทำละลายโดยศึกษาพฤติกรรมต่อตัวถูกละลายหลายๆ ชนิด พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายแอลเคนได้ถึง C10 ส่วนอีเทนละลายได้ถึง C20 และโพรเพนละลายได้ถึง C35 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนไดออกไซด์มีสมรรถนะการเลือกที่มวลโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ Stahl และ Quirin (114) ยังได้ศึกษาการสกัดสารธรรมชาติหลายชนิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์สามารถสกัดสารไฮโดรคาร์บอนและสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สามารถละลายได้ในไขมันและมีมวลโมเลกุลต่ำได้ดี แต่ไม่สามารถสกัดสารที่มีหมู่ฟังก์ชันมีขั้ว เช่น หมูไฮดรอกซิล หรือคาร์บอนิลได้ และสารประเภทน้ำตาลและกรดอะมิโนได้นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการแยก ได้แก่ ความแตกต่างของมวล ความดันไอ และขั้วของสารในของผสม

การสกัดด้วยตัวทำละลายประเภทอุณหภูมิวิกฤตสูง เช่น โทลูอิน หรือน้ำ มักดำเนินการที่อุณหภูมิ 500 – 700 เคลวิน ซึ่งกำลังการสกัดจะสูงกว่าตัวทำละลายประเภทอุณหภูมิวิกฤตต่ำมาก และสามารถสกัดสารที่มีมวลโมเลกุลสูงได้ดี แต่การสกัดด้วยตัวทำละลายประเภทอุณหภูมิวิกฤตสูงมีสมรรถนะการเลือกต่ำและเนื่องจากดำเนินการที่อุณหภูมิสูงจึงเสี่ยงต่อการสลายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ ส่วนการสกัดด้วยตัวทำละลายประเภทอุณหภูมิวิกฤตต่ำมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับตัวทำละลายที่เป็นของเหลวคือ ดำเนินการที่อุณหภูมิไม่สูง มีกำลังการสกัดต่ำ และสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย จึงเหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมยาและอาหาร

สมบัติทางกายภาพของของไหลภาวะเหนือวิกฤตจะอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว ซึ่งสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของของไหลภาวะเหนือวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลวดังแสดงในตารางที่ 2.10 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างของเหลวกับของไหลภาวะเหนือวิกฤตจะเห็นว่าของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีความหนาแน่นและความหนืดต่ำกว่า แต่มีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าของเหลว และค่า

การนำความร้อนของของไหลสถานะเหนือวิกฤตมีค่าสูงมากเพราะในทางทฤษฎีค่าความจุความร้อนของของไหลมีค่าเป็นอนันต์ที่จุดวิกฤตของสาร แต่ของไหลจะมีแรงดึงผิวเข้าใกล้ศูนย์ เมื่ออยู่ในช่วงเหนือวิกฤต ดังนั้นด้วยข้อดีด้านการถ่ายโอนมวลและความร้อนของไหลสถานะเหนือวิกฤตจึงได้ถูกใช้เป็นตัวทำละลายแพร่หลายขึ้น

ตารางที่ 2.10 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของของไหลสถานะเหนือวิกฤต แก๊ส และของเหลว (112)

สมบัติทางกายภาพ	แก๊ส (อุณหภูมิห้อง)	ของไหลสถานะเหนือวิกฤต (อุณหภูมิและความดันวิกฤต)	ของเหลว (อุณหภูมิห้อง)
Density ρ (kg/m ³)	0.6 – 2	200 – 500	600 – 1600
Dynamic viscosity μ (mPa·s)	0.01 – 0.3	0.01 – 0.03	0.2 – 3
Kinematic viscosity η^a (10 ⁶ m ² /s)	5 – 500	0.2 – 0.1	0.1 – 5
Thermal conductivity λ (W/mK)	0.01 – 0.025	Maximum ^b	0.1 – 0.2
Diffusion coefficient D (10 ⁶ m ² /s)	10 – 40	0.07	0.0002 – 0.002
Surface tension σ (dyn/cm ²)	—	—	20 – 40

^a $\eta = \mu/\rho$

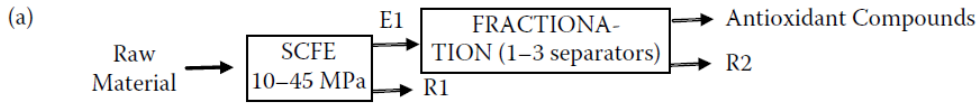
^b ค่าการนำความร้อนของของไหลมีค่ามากที่อุณหภูมิและความดันวิกฤต

2) การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

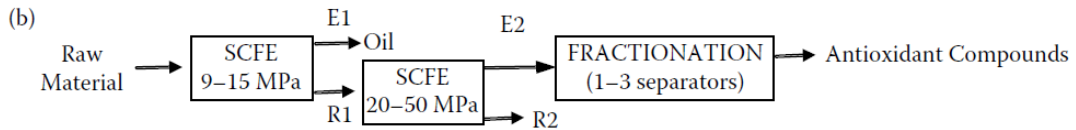
การสกัดด้วยของไหลสถานะเหนือวิกฤตยังเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่แต่น่าจะใช้กันอย่างแพร่หลายในอนาคต เพราะมีการศึกษาการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจำนวนมาก เช่น สารต้านจุลินทรีย์จากเมล็ดองุ่น (115) การสกัดเครื่องเทศ (116) และการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากสะระแหน่ (117) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการสกัดสารป้องกันอาการสมองขาดเลือดจากเปลือกโกโก้ (118) ศึกษาสกัดสารประเภท antimutagenic และ antineoplastic จากพืชและเครื่องเทศด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (116, 119) และ antimutagenic จากต้นหูกวาง (120)

การออกแบบระบบการสกัดจะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบกับตัวทำละลายว่าจะ เป็นแบบของแข็ง-ของเหลว หรือของเหลว-ของเหลว โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบของแข็ง-ของเหลวหรือของแข็ง-ของไหล ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลของสารผลิตภัณฑ์จากเมตริกซ์ของแข็งไปยังวัฏภาคของไหล อัตราการสกัดจะขึ้นกับการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคของแข็ง ค่าการละลายของสารผลิตภัณฑ์ในตัวทำละลาย และการยึดติดของสารผลิตภัณฑ์กับวัฏภาคของแข็ง

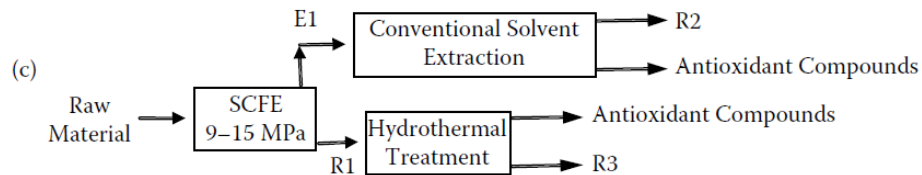
ปัจจุบันใช้การสกัดแบบกึ่งต่อเนื่องมากที่สุด โดยการบรรจุวัตถุดิบลงในเครื่องสกัดแล้วให้ตัวทำละลายไหลผ่านจะเกิดการสกัดตลอดเส้นทางที่ตัวทำละลายไหลผ่าน ซึ่งสามารถสกัดแบบขั้นตอนเดียวหรือหลายขั้นตอนก็ได้



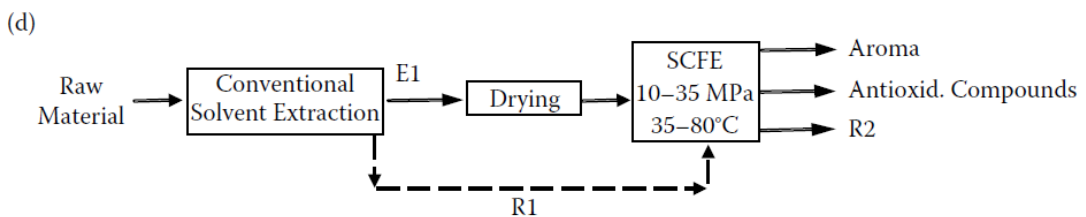
Raw Material	Flowers, Fruits, Leaves, Spices, Medicinal Plants, Seeds, Hulls, Roots	Crustacean, Microalgae, Tomato	Olive Leaves, Medicinal Plants, Wheat Germ, Seeds
Antioxidant Compounds	Phenolics and Terpenoids	Carotenoids	Vitamin E



Raw material	Leaves, Medicinal Plants, Seeds	Paprika
Antioxidant Compounds	Phenolics and Terpenoids	Carotenoids



Raw Material	Medicinal Plants, Stalks
Antioxidant Compounds	Phenolics and Terpenoids



Raw Material	Grape Seeds, Grape Pomace
Antioxidant Compounds	Phenolics and Terpenoids

รูปที่ 2.5 แผนภาพรูปแบบการดำเนินการสำหรับการสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต E1 และ E2 คือ ของผสมที่ได้จากการสกัด R1 R2 และ R3 คือ ของแข็งที่เหลือจากการสกัด

ก. รูปแบบการดำเนินการ

รูปแบบการดำเนินการของการสกัดสารจากธรรมชาติด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (a) – (d) ซึ่งเป็นการแสดงแผนภาพการไหลแบบง่าย

จากรูปที่ 2.5 (a) เป็นการสกัดแบบขั้นตอนเดียวแล้วนำของผสมที่ได้จากการสกัดไปแยกด้วยเครื่องแยกหลายขั้นตอน โดยวัตถุดิบจะถูกสกัดครั้งเดียวแล้วของผสมที่ได้จะถูกแยกด้วยการลดความดันลงเรื่อยๆ รูปแบบการสกัดแบบนี้เหมาะสำหรับการแยกของแข็งและการวิเคราะห์ (121-123)

จากรูปที่ 2.5 (b) เป็นการสกัดแบบหลายขั้นตอน โดยเริ่มจากการสกัดที่ความดันน้อยกว่า 150 บาร์และไม่เติมตัวทำละลายร่วมเพื่อดึงสารจำพวกไม่มีขั้ว เช่น น้ำมันหอมระเหยและไขออกก่อน จากนั้นจึงเพิ่มความดันเป็น 500 บาร์ และเติมตัวทำละลายร่วมร้อยละ 40 เพื่อดึงสารต้านอนุมูลอิสระที่มีขั้วสูง (124, 125) เหมาะสำหรับการสกัดแบบขั้นตอนเดียวไม่ออกแยกยาก (126, 127)

การสกัดตามรูปแบบการดำเนินการในรูปที่ 2.5 (c) เป็นการใช้การสกัดด้วยตัวทำละลายร่วมกับการสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต ขั้นแรกสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤตที่ความดันต่ำเพื่อกำจัดโอรเซเหยและไขออกจากของแข็งก่อน (128, 129) แล้วจึงสกัดด้วยตัวทำละลาย และกากของแข็งที่เหลือจะถูกต้มเพื่อทำความสะอาด ซึ่งกระบวนการนี้ใช้ในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากหน่อไม้ (130)

การสกัดกากผลิตภัณฑ์อบแห้งหรือกากของแข็งด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤตดังแสดงในรูปที่ 2.5 (d) เป็นกระบวนการที่ทำให้สารผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์มากขึ้น หรือการสกัดสารผลิตภัณฑ์ที่ยังเหลือในกากของแข็ง ซึ่งถูกใช้ในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระและสารออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท (131, 132) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่และยึดแน่นกับเมตริกซ์ของของแข็ง (133)

นอกจากนี้สารต้านอนุมูลอิสระยังสามารถสกัดได้จากวัตถุดิบเหลวในกระบวนการกลั่นน้ำมันพืช (134) และกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ (135) แต่เนื่องจากโดยส่วนใหญ่วัตถุดิบธรรมชาติที่สกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีผลิตภัณฑ์เป้าหมายปริมาณน้อย และวัตถุดิบมีความหนาแน่นต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้ปริมาตรเครื่องสกัดสูง (136) ดังนั้นจึงควรสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อกำจัดสารอื่นๆ ออกไปก่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสำหรับการสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต และช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการสกัดได้อีกด้วย

ข. ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการสกัด

จากงานวิจัยจำนวนมากบ่งชี้ว่าวัตถุดิบเริ่มต้นและภาวะการดำเนินการส่งผลต่อการสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤตมาก ซึ่งมีอิทธิพลต่อการสกัดเทอร์พินอยด์และฟีนอล (137, 138) แคลโรทีนอยด์ (139-141) และโทโคฟีรอลจากวัตถุดิบของแข็ง และการสกัดวัตถุดิบที่เป็นของแข็งจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเชิงกลสำหรับลดขนาดอนุภาคเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวล แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กไปอาจสูญเสียผลิตภัณฑ์เนื่องจากการระเหยหรือการสลายตัวของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้

อย่างไรก็ตามตัวแปรที่สำคัญสำหรับการสกัดด้วยไฮลภาวะเหนือวิกฤตคือ ความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลของตัวทำละลาย ชนิดของตัวทำละลายร่วม และปริมาณตัวทำละลายร่วมที่ต้องใช้ ซึ่งจำเป็นต้องหาภาวะที่เหมาะสมให้ได้ก่อนเริ่มสกัด

ความดันและอุณหภูมิ กำลังการสกัดของคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นกับความหนาแน่น ซึ่งขึ้นกับความดันและอุณหภูมิในการสกัด นอกจากนี้ยังขึ้นกับสมดุลการละลายของสารผลิตภัณฑ์ด้วย ซึ่งสมดุลการละลายได้รับอิทธิพลจากขนาดโมเลกุล สภาพขั้ว และหมู่ฟังก์ชัน นอกจากนี้ยังขึ้นกับการยึดติดกับเมตริกซ์ของแข็งด้วย

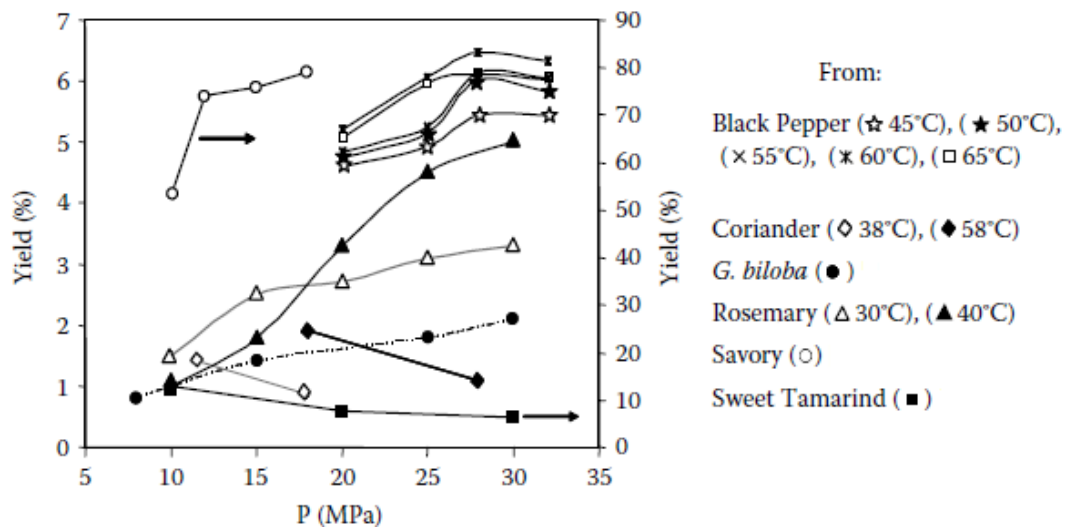
สมดุลการละลายเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบกระบวนการสกัดและการแยก และตารางที่ 2.11 เป็นการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยจำนวนมากซึ่งประกอบด้วยค่าการละลายของสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ (142) วิตามินที่ละลายได้ในไขมัน (143) และสารประกอบจำพวกฟีนอล (144, 145) ค่าการละลายของสารบริสุทธิ์และของผสมบางชนิด (146, 147) เทอร์ปีนอยด์จากน้ำมันส้ม (148) น้ำมันหอมระเหย (149) และองค์ประกอบอื่นๆ (150) นอกจากนี้ยังมีค่าการละลายของสารจากธรรมชาติที่มีองค์ประกอบจำนวนมาก และหลังจากผลการศึกษาค่าการละลายของโทโคฟีรอลของ Chrastil (151) ดีพิมพ์เผยแพร่ก็มีงานวิจัยคล้ายๆ กันดีพิมพ์เผยแพร่อีกจำนวนมาก (152-154) และมีผลการศึกษาเกี่ยวกับการละลายของเมทิลโอเลเอทที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง (155-158) และจากน้ำมันปาล์มดิบ (134) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับค่าการละลายของแคโรทีนอยด์บริสุทธิ์บางชนิด เช่น แคปไซซิน (153) บีตาแคโรทีน (139, 153, 159-161) ของผสมแคโรทีนอยด์ (162) และบีตาแคโรทีนธรรมชาติที่สกัดได้จากแครอท (161)

การเพิ่มความดันจะทำให้ความหนาแน่นของของตัวทำละลายเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ผลได้การสกัดเพิ่มขึ้นด้วย เพราะการเพิ่มความดันจะทำให้ตัวทำละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลงเช่นกัน และโดยส่วนใหญ่การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระมักดำเนินการที่ 500 บาร์ (163) อย่างไรก็ตามหากดำเนินการสกัดที่ภาวะความดันสูงการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ผลได้การสกัดลดลง เพราะการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความหนาแน่นของสารละลายลดลงซึ่งทำให้กำลังการสกัดลดลงนั่นเอง แสดงให้เห็นว่าความดันและอุณหภูมิส่งผลซึ่งกันและกันแบบคลอสโอเวอร์ กล่าวคือ อุณหภูมิสูงเหมาะสำหรับการสกัดที่ความดันสูง ส่วนอุณหภูมิต่ำเหมาะสำหรับการสกัดที่ความดันต่ำ

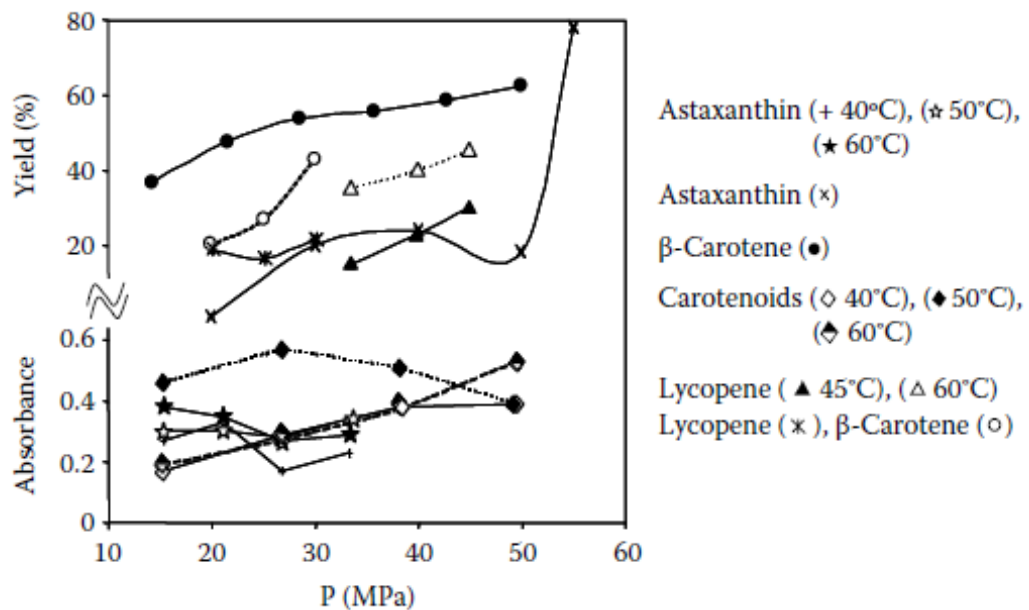
ตารางที่ 2.11 ค่าการละลายของสารประกอบบางชนิดในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

สารประกอบ	ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ค่าการละลาย	รายการ อ้างอิง
Tocopherols			($y_2 \times 10^4$)	
(alpha, delta)	8–35	292–353	—	(143)
	8–35.21	298–353	—	(139)
	9.5–35	303–353	—	(146)
	1–2.52	298–313	2.59–7.31	(126)
Carotenoids			($y_2 \times 10^6$)	
(astaxanthin, canthaxanthin,	0.15–50	288–343	—	(143)
capsanthin, β -carotene,	2–3.5	313–353	0.09–3.24	(126)
lycopene, lutein,	5–180	288–353	—	(139)
zeaxanthin)	5–80	288–353	0.019–0.989	(164)
Terpenoids			(mg/g)	
(monoterpene	3–11	295–335	—	(165)
hydrocarbons,				
sesquiterpene	8–10	313–333	1.6–CM ^a	(150)
hydrocarbons,				
oxygenated derivatives,	0.8–13	310–333	—	(146)
aldehydes, ketones)				
Phenolic Compounds			($y_2 \times 10^4$)	
(benzoic acid, cinnamic	2–50	308–473	—	(165)
acids,				
flavonoids)	0.91–2.53	308–318	0.0788–5.61	(150)
	2–40.4	308–473	—	(146)
	79–500	308–373	—	(144)
	0.26–50	308–373	0.08×10^{-4} –1730	(145)

^a CM = Complete miscibility



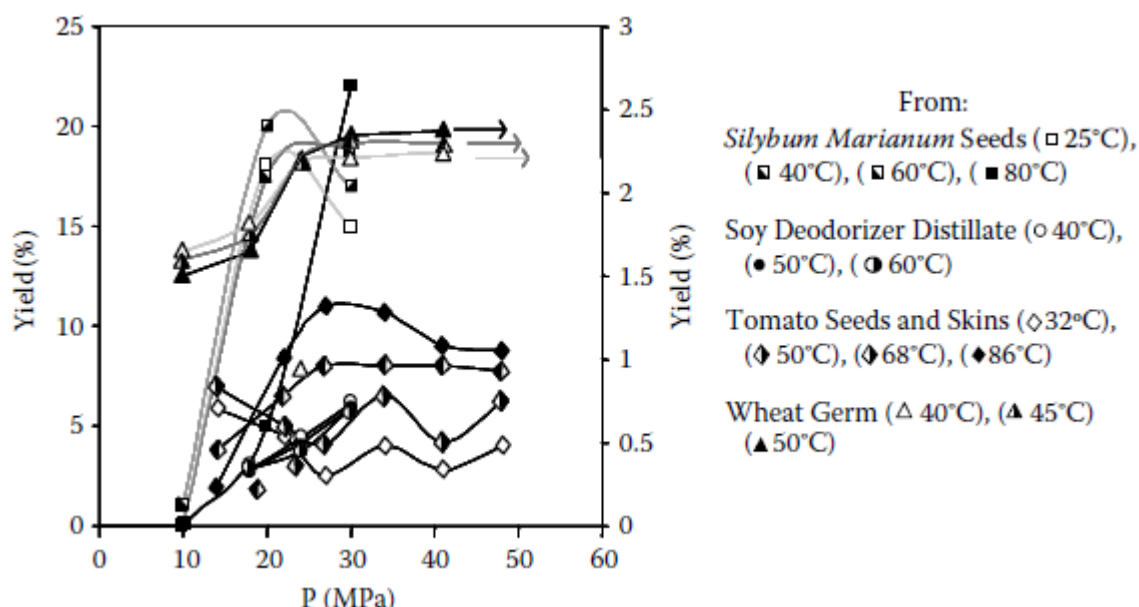
รูปที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อผลได้การสกัดพีนอลิก และเทอร์ปีนอยด์จากวัตถุดิบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อผลได้การสกัด และค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของแคโรทีนอยด์บางชนิด

ผลของอุณหภูมิและความดันต่อผลได้การสกัดของสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดแสดงในรูปที่ 2.6 – 2.8 ซึ่งเป็นการแสดงผลของอุณหภูมิต่อการสกัด meso-bamboo (130) การเปลี่ยนแปลงความร้อน (166) และข้อดีของการสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤตที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือสามารถสกัดได้ที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 50 องศาเซลเซียส) เพราะสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพบางตัวไวต่อความร้อนมากจึงจำเป็นต้องสกัดที่อุณหภูมิต่ำ เช่น การสกัดกรดคาร์โนสิคจากโรสแมรี่ (123) กรดกรดแอนาคาติคจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (167)

ไฮเปอร์ฟอรินจาก *Hypericum perforatum* (168) คาร์โนซอลจากสารแห้ง (169) สารต้านอนุมูลอิสระจากว่านหางจระเข้ (170) และมาไตรซินจากดอกคาโมไมล์ (171)



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อผลได้การสกัดโทโคฟีรอลจากวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

3) การศึกษาการสกัดบีตาแคโรทีน

Davanejad และคณะ (172) ศึกษาผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลาสำหรับการสกัดบีตาแคโรทีนจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต โดยทำการทดลองที่ความดัน 75 125 และ 175 บาร์ อุณหภูมิ 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 และ 5 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณของบีตาแคโรทีนด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่าได้ภาวะที่เหมาะสมที่ความดัน 140 บาร์ อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส และเวลาสกัด 3 ชั่วโมง โดยได้ร้อยละผลได้บีตาแคโรทีนเป็น 1.028×10^{-2} และร้อยละผลได้สูงสุดเท่ากับ 1.741×10^{-2} เมื่อดำเนินการสกัดที่ความดัน 75 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และเวลาสกัด 1 ชั่วโมง

Mustapa และคณะ (173) ศึกษาการสกัดน้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์มโดยใช้สารทำความเย็น R134a ภาวะกึ่งวิกฤตเป็นตัวทำละลาย การสกัดใช้วิธีแบบไดนามิกเพื่อศึกษาการสกัดบีตาแคโรทีนควบคู่ไปด้วย โดยทดลองเพื่อหาผลได้น้ำมันและการละลายของบีตาแคโรทีนที่อุณหภูมิ 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 45 - 100 บาร์ วิเคราะห์ปริมาณบีตาแคโรทีนในน้ำมันที่สกัดได้ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากการทดลองพบว่าผลได้น้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนสูงที่สุดเมื่อดำเนินการที่ความดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

และความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนต่ำที่สุดที่ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนในน้ำมันปาล์มที่สกัดได้อยู่ในช่วง 330 – 780 ppm

Saldana และคณะ (174) ศึกษาการสกัดไลโคพีน (lycopene) และบีตาแคโรทีนจากเนื้อและผิวแห้งของมะเขือเทศด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตและคาร์บอนไดออกไซด์ผสมกับตัวทำละลายร่วมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักตัวทำละลายร่วมคือ น้ำมันทานตะวันและเอทานอล โดยทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 400 บาร์ และอัตราการไหลของตัวทำละลาย 0.5 และ 1.2 ลิตรต่อนาที ในชุดการสกัดที่ภาวะเหนือวิกฤตระดับห้องปฏิบัติการ จากผลการทดลองพบว่าการสกัดไลโคพีนและบีตาแคโรทีนด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้น้ำมันทานตะวันเป็นตัวทำละลายร่วมให้ผลได้ไลโคพีนและบีตาแคโรทีนสูงกว่าใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตให้ร้อยละผลได้ดีที่สุด

Muhammad และคณะ (175) ศึกษาการนำกลับคืน (recovery) บีตาแคโรทีนจากการดูดซับด้วยเมโซพอร์ัสคาร์บอนโคตโมโนลิต (Mesoporous carbon coated monolith) ในกระบวนการแบบแบดซ์ ซึ่งศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการคาย (desorption) โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวชะ จากการศึกษาไอโซเทอมพบว่าการคายบีตาแคโรทีนสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์ เมื่อพิจารณาผลของปริมาณบีตาแคโรทีนบนพื้นผิวตัวดูดซับเริ่มต้นและอุณหภูมิการคายบ่งชี้ว่าการคายมีจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง การคายของบีตาแคโรทีนจะเกิดขึ้นสองแบบคือคายแบบเร็ว กับคายแบบช้า จากผลการทดลองของการคายแบบช้าพบว่าสัดส่วนการคายจะเพิ่มขึ้นจาก 0.8446 เป็น 0.9007 เมื่อเพิ่มปริมาณบีตาแคโรทีนเริ่มต้นจาก 10.83 เป็น 39.72 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่สัดส่วนการคายจะลดลงจาก 0.9261 เป็น 0.8684 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคายจาก 30 เป็น 50 องศาเซลเซียส และพลังงานก่อกัมมันต์ของการคายแบบเร็วและแบบช้าเท่ากับ 7.88 และ 44.47 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ จากการศึกษาการฟื้นฟูเมโซพอร์ัสคาร์บอนโคตโมโนลิตด้วยกระบวนการทางเคมีและความร้อน พบว่าประสิทธิภาพการฟื้นฟู (%RE) จะลดลงจาก 96.24% เป็น 60.04% และ 94.51% เป็น 81.62% สำหรับการฟื้นฟูด้วยกระบวนการทางเคมีและความร้อนตามลำดับ

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- เครื่องวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน Surface area and porosity analyzer (BET)
- เครื่อง High Pressure Liquid Chromatography (HPLC)
- เครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าได้ (Water Bath Shaker)
- ชุดสกัดด้วยตัวทำละลาย (Soxhlet Extraction Apparatus)
- ชุดสกัดและแยกตัวของไหลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid Extraction and Fractionation Apparatus)

- ชุดกรองสูญญากาศ

- เครื่องชั่งดิจิตอล (Analytical Balance)

- เครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน

3.1.2 สารเคมี

- สารมาตรฐานบีตาแคโรทีน (β -Carotene, $C_{40}H_{56}$): 97% UV

- เฮกเซน (n-Hexane, C_6H_{14}): HPLC Grade

- เฮกเซน (n-Hexane, C_6H_{14}): AR Grade

- น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil)

- เมทานอล (Methanol, CH_3OH): HPLC Grade และ Commercial Grade

- กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4): 98% AR Grade

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH): AR Grade

- ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether): AR Grade

- อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile, CH_3CN): HPLC Grade

- เมทิลเทอร์เชียรีบิวทิลอีเทอร์ (Methyl Tertiary Butyl Ether, MTBE, $C_5H_{12}O$): HPLC

Grade

3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ และการสกัดบีตาแคโรทีนจากของเสียในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

3.2.1 การเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ

ขั้นที่ 1 ต้มกวนน้ำมันปาล์มดิบที่ 105 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่น้ำออกจากน้ำมันปาล์มดิบ

ขั้นที่ 2 นำน้ำมันปาล์มที่ต้มไล่น้ำแล้วมาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระ โดยกวนผสมน้ำมันปาล์มกับเมทานอลที่มีกรดซัลฟูริกร้อยละ 1 โดยปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตร น้ำมันปาล์ม : เมทานอล เป็น 80 : 20 ที่ 50 – 60 องศาเซลเซียส ด้วยชุดระเหยและควบแน่น (Reflux) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาแยกออกจากน้ำมัน จากนั้นแยกเอาน้ำมัน (ชั้นล่าง) ด้วยกรวยแยกเพื่อนำไปทำปฏิกิริยาในขั้นถัดไป

ขั้นที่ 3 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยนำน้ำมันที่ได้จากขั้นที่ 2 มากวนผสมกับเมทานอลที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตร น้ำมันปาล์ม : เมทานอล เป็น 80 : 20 ที่ 50 – 60 องศาเซลเซียส ด้วยชุดระเหยและควบแน่น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ของผสมแยกชั้น แล้วแยกกลีเซอริน (ชั้นล่าง) ออก จะได้ไบโอดีเซล (ชั้นบน)

ขั้นที่ 4 ล้างไบโอดีเซลด้วยเพื่อกำจัดเบสที่หลงเหลืออยู่และสบู่ที่อาจเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาข้างเคียงด้วยน้ำกลั่นจนกว่าน้ำล้างจะเป็นกลาง (pH = 6 – 8) แล้วต้มกวนไบโอดีเซลที่ 105 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่น้ำ

ขั้นที่ 5 นำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นบีตาแคโรทีนด้วยเครื่อง HPLC ก่อนใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.4 การวิเคราะห์เชิงปริมาณบีตาแคโรทีนในสารละลายด้วยเครื่อง HPLC

ขั้นที่ 1 เตรียมสารละลายมาตรฐานบีตาแคโรทีนที่ความเข้มข้น 10 – 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในเฮกเซน แล้ววิเคราะห์หาพื้นที่ใต้กราฟเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของตัวอย่างต่อไป ซึ่งเงื่อนไขในการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการวิเคราะห์โครมาโทแกรมของสารละลายบีตาแคโรทีน

Analytical Column:	YMC Carotenoid (C30), 5 μ m, 4.6 \times 250 mm (P/N CT99S05-2546WT)
Column	Ambient
Temperature:	
Mobile Phase:	MTBE/CH ₃ CN/CH ₃ OH (อัตราส่วนตามตารางที่ 3.2)
Flow Rate:	1.0 mL/min
Detection:	Absorbance at 475 nm
Injection Volume:	5 μ L

ตารางที่ 3.2 การไล่อัตราส่วนตัวพาสําหรับการแยกบีตาแคโรทีน

Time (min)	Mobile Phase A MTBE (% vol.)	Mobile Phase B CH ₃ CN (% vol.)	Mobile Phase C CH ₃ OH (% vol.)
0.0	0	25	75
10.0	50	15	35
12.5	50	15	35
13.0	0	25	75
15.0	0	25	75

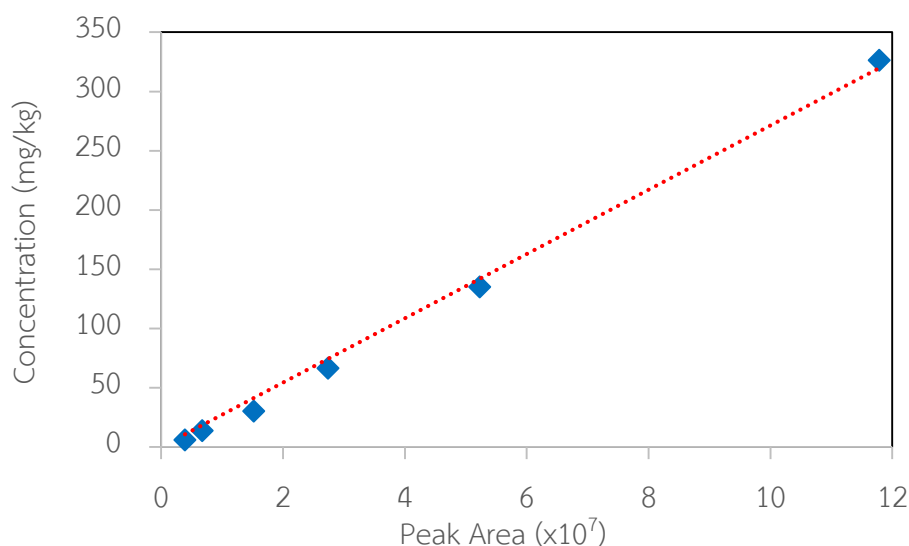
จากการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานบีตาแคโรทีนตามขั้นที่ 1 จะได้กราฟบีตาแคโรทีนมาตรฐานดังรูปที่ 3.1 และได้สมการเส้นแนวโน้มของกราฟดังสมการที่ 3.1

$$y = 3 \times 10^{-6}x \quad (3.1)$$

เมื่อ y คือ ความเข้มข้นบีตาแคโรทีนในสารละลาย

x คือ พื้นที่ใต้กราฟของโครมาโทแกรม

ขั้นที่ 2 วิเคราะห์ความเข้มข้นบีตาแคโรทีนในตัวอย่างโดยละลายตัวอย่างไปโอดีเซลที่ต้องการวัดความเข้มข้นบีตาแคโรทีนในเฮกเซนในอัตราส่วนที่เหมาะสม (ความเข้มข้นบีตาแคโรทีนไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ภายใต้เงื่อนไขการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.1 – 3.2 แล้วนำพื้นที่ใต้กราฟไปคำนวณหาความเข้มข้นบีตาแคโรทีนตัวอย่างด้วยสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟปีตาแคโรทีนมาตรฐาน

3.2.5 การดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

การศึกษาศมดุลการดูดซับเริ่มจากเตรียมน้ำมัน 100 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ แล้วเติมตัวดูดซับประเภทดินเหนียว 0.5 กรัม สำหรับดินฟอกสีประเภทที่ 1 (BE01) ประเภทที่ 2 (BE02) โซเดียมเบนโทไนด์ (NaB) และแคลเซียมเบนโทไนด์ (CaB) แล้วเขย่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ และเก็บตัวอย่างน้ำมันทุกๆ ช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อวัดความเข้มข้นปีตาแคโรทีนที่เหลืออยู่ในน้ำมัน แล้วนำไปคำนวณหาความจุการดูดซับที่เวลาใดๆ ตามสมการที่ 3.2

$$q_t = \frac{W(C_0 - C_t)}{m} \quad (3.2)$$

เมื่อ q_t คือ ความจุการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

W คือ น้ำหนักไบโอดีเซลที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นปีตาแคโรทีนเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_t คือ ความเข้มข้นปีตาแคโรทีนที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

m คือ มวลของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)

สำหรับการศึกษาผลของอัตราส่วนตัวดูดซับต่อน้ำมันต่อความจุการดูดซับจะใช้อัตราส่วนตัวดูดซับต่อน้ำมันเป็น 0.1 0.2 0.4 และ 0.6 กรัมต่อน้ำมัน 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อให้การดูดซับเข้าสู่สมดุล แล้วเก็บตัวอย่างไปวัดความเข้มข้นปีตาแคโรทีนที่เหลืออยู่เพื่อใช้ในการคำนวณหาความจุการดูดซับที่สมดุล ตามสมการที่ 3.3

$$q_e = \frac{W(C_0 - C_e)}{m} \quad (3.2)$$

เมื่อ q_e คือ ความจุการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

W คือ น้ำหนักไบโอดีเซลที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

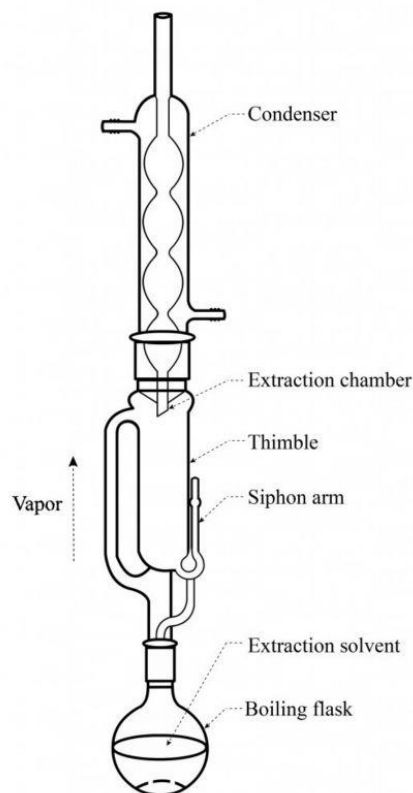
C_0 คือ ความเข้มข้นปีตาแคโรทีนเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นปีตาแคโรทีนที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

m คือ มวลของตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)

และการศึกษาผลของอุณหภูมิดูดซับจะทดลองที่ 40 – 80 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนตัวดูดซับที่ 0.1 กรัมต่อน้ำมัน 100 มิลลิลิตร สำหรับ BE01 BE02 CaB และ NaB กรัมต่อน้ำมัน 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 10 ชั่วโมงเช่นกัน

3.2.6 การสกัดปีตาแคโรทีนจากของเสียในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม (ดินฟอกสีและกากใยปาล์ม) ด้วยเครื่องชอกซ์เลต (Soxhlet Extraction)



รูปที่ 3.2 ชุดการสกัดแบบชอกซ์เลต

เตรียมวัตถุดิบ 30 กรัม ใส่ใน extraction thimble แล้วตั้งชุดการทดลองการสกัดแบบ ซอกซ์เลต ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นเติมเฮกเซน 150 มิลลิลิตร แล้วดำเนินการสกัด เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงเก็บสารละลายที่ได้จากการสกัดไประเหยเฮกเซนออก เพื่อหาผลได้น้ำมันจากการสกัดและนำมาวิเคราะห์เชิงปริมาณของปีตาแคโรทีน

3.2.7 การสกัดปีตาแคโรทีนจากของเสียในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม (ดินฟอกสีและกากใย ปาล์ม) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide Extraction)

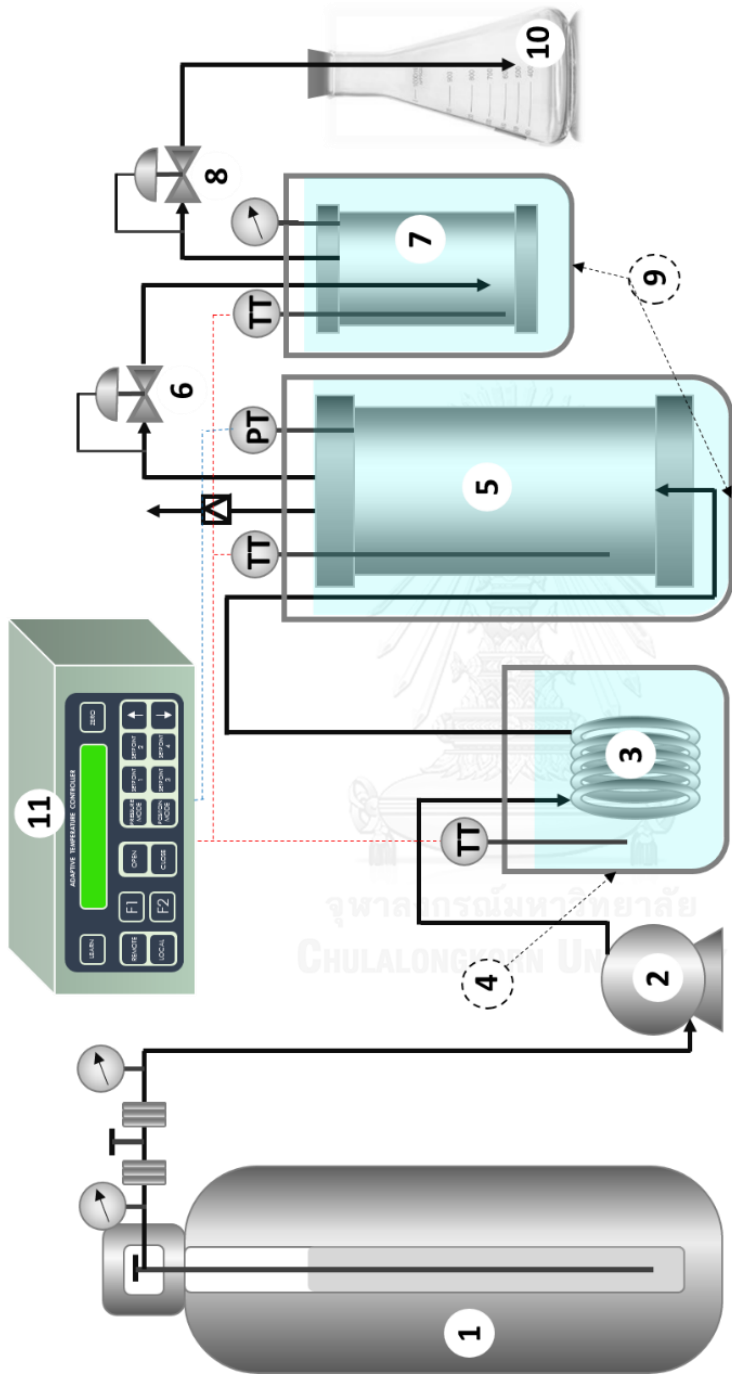
การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตใช้ชุดการสกัดและแยกด้วยของไหล ภาวะเหนือวิกฤตดังแสดงในรูปที่ 3.3 เริ่มจากบรรจุวัตถุดิบ 60 กรัม ในเครื่องสกัด (Extractor) (หมายเลข 5) แล้วปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบโดยใช้ปั๊มแรงดันสูงที่มีระบบหล่อเย็นเพื่อให้ คาร์บอนไดออกไซด์คงสภาพเป็นของเหลวก่อนปั๊ม แล้วปรับเพิ่มความดันด้วย Back-pressure regulator เมื่อความดันในระบบถึงค่าที่ต้องการจึงเริ่มเก็บตัวอย่างที่ออกมาจาก Back-pressure regulator ตัวที่ 1 (หมายเลข 6) ทุก 200 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ จนใช้คาร์บอนไดออกไซด์ใน การสกัดครบ 1,200 กรัม จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้จากการสกัดไปวิเคราะห์เชิงปริมาณของน้ำมันและ ปีตาแคโรทีนต่อไป

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความดันต่อผลได้การสกัดน้ำมันและปีตาแคโรทีนที่ 200 250 300 และ 350 บาร์ และศึกษาผลของอุณหภูมิการสกัดที่ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส

3.2.8 การแยกปีตาแคโรทีนจากของผสมคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องแยก (Fractionator)

ในการศึกษาการแยกปีตาแคโรทีนที่ภาวะเหนือวิกฤตใช้ชุดการสกัดและแยกด้วยของไหล ภาวะเหนือวิกฤตดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทดลองโดยสกัดปีตาแคโรทีนจากวัตถุดิบ 50 กรัม ที่บรรจุอยู่ใน เครื่องสกัด (หมายเลข 5) ที่ความดัน 350 บาร์และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และนำกระแสของ ผสมที่ได้จากการสกัดที่ออกมาจาก Back-pressure regulator ตัวที่ 1 (หมายเลข 6) ไปลดอุณหภูมิ และความดันในเครื่องแยก (Fractionator) (หมายเลข 7) ไปพร้อมๆ กับการสกัด และเก็บตัวอย่างที่ ออกมาจาก Back-pressure regulator ตัวที่ 2 (หมายเลข 8) จนใช้คาร์บอนไดออกไซด์ครบ 1,500 กรัม จึงหยุดกระบวนการสกัดและการแยก แล้วนำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องแยกตัวที่ 1 (ออกจาก Back-pressure regulator ตัวที่ 1) และที่ได้จากเครื่องแยกตัวที่ 2 (ออกจาก Back-pressure regulator ตัวที่ 2) ไปวิเคราะห์เชิงปริมาณของน้ำมันและปีตาแคโรทีนต่อไป

ในงานวิจัยนี้ทดลองลดอุณหภูมิและความดันของของผสมที่ได้จากการสกัดที่ความดัน 350 บาร์และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในเครื่องแยกตัวที่ 1 เป็นความดัน 180 230 และ 280 บาร์ และอุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส และในเครื่องแยกตัวที่ 2 เป็นความดันบรรยากาศและ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.3 ชุดการสัดและแยกด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต

- 1) ท่อคาร์บอนไดออกไซด์เหลว 2) ปั๊มแรงดันสูง 3) Pre-heater 4) อ่างนำความดันอุณหภูมิ 5) เครื่องสัด (Extractor)
- 6) Back-pressure regulator ตัวที่ 1 7) เครื่องแยก (Fractionator) 8) Back-pressure regulator ตัวที่ 2 9) อ่างนำความดันอุณหภูมิ
- 10) ขวดเก็บตัวอย่าง 11) เครื่องควบคุม

-  Pressure gauge
-  Safety valve
-  TT Temperature transmitter
-  PT Pressure transmitter

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 สมบัติของตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

Adsorbent type	Compositions (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	BaO
Bleaching clay (B01)	75.50	12.70	3.36	1.57	2.22	1.29	1.10	0.95	0.90	0.12
Bleaching clay (B02)	71.80	12.60	3.19	2.12	3.03	0.47	0.17	0.46	5.93	-
Sodium bentonite (NaB)	53.50	18.30	16.20	2.89	2.21	0.30	4.29	1.49	-	-
Calcium bentonite (CaB)	71.00	19.30	6.29	0.48	0.31	1.00	0.16	1.22	-	-

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของดินฟอกสีประเภทดินเหนียว

Adsorbent type	Bulk density (g/ml)	Total pore volume (mL/g)	Specific surface area (m ² /g)	Average pore diameter (nm)
Bleaching clay (BE01)	0.58	0.18	156.39	469.23
Bleaching clay (BE02)	0.46	0.23	198.62	462.53
Sodium bentonite (NaB)	1.00	0.06	56.92	407.48
Calcium bentonite (CaB)	1.00	0.07	41.74	521.57

ตัวดูดซับประเภทดินเหนียวมีองค์ประกอบคล้ายกัน โดยมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO₂ เป็นส่วนใหญ่คิดเป็นร้อยละ 70 โดยประมาณ ยกเว้นดินฟอกสีประเภท NaB มี SiO₂ ประมาณร้อยละ 50 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของดินฟอกสีทั้ง 4 ประเภท มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับ BE01 และ BE02 ที่ประมาณ 0.5 กรัมต่อมิลลิเมตร และใกล้เคียงกันสำหรับ NaB และ CaB ที่ประมาณ 1 กรัมต่อมิลลิเมตร ซึ่งค่อนข้างสูง จึงทำให้ปริมาตรที่ใช้สำหรับกระบวนการดูดซับต่ำ เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับประเภทดินเหนียวด้วยเทคนิค BET ได้ปริมาตรรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับประเภทดินเหนียวทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับประเภทดินเหนียวดังกล่าวบ่งชี้ว่าสามารถเกิดการดูดซับบีตาแคโรทีนภายในรูพรุนของตัวดูดซับประเภทดินเหนียวเหล่านี้ได้ เพราะบีตาแคโรทีนมีขนาดโมเลกุล 2.1 นาโนเมตร × 0.8 นาโนเมตร × 0.7 นาโนเมตร (176) ซึ่งเล็กกว่าขนาดรูพรุนของตัวดูดซับประเภทดินเหนียวทั้ง 4 ตัว ทำให้สามารถเกิดการแพร่ภายในและถ่ายโอนโมเลกุลบีตาแคโรทีนเข้า

ไปในรูปพุนและเกิดการดูดซับบนพื้นผิวได้ และปริมาณรูปพุนเฉลี่ยบ่งบอกความสามารถในการดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับประเภท BE02 มีค่าปริมาณรูปพุนเฉลี่ยมากที่สุด จึงน่าจะส่งผลให้มีความจุการดูดซับสูงที่สุดด้วย

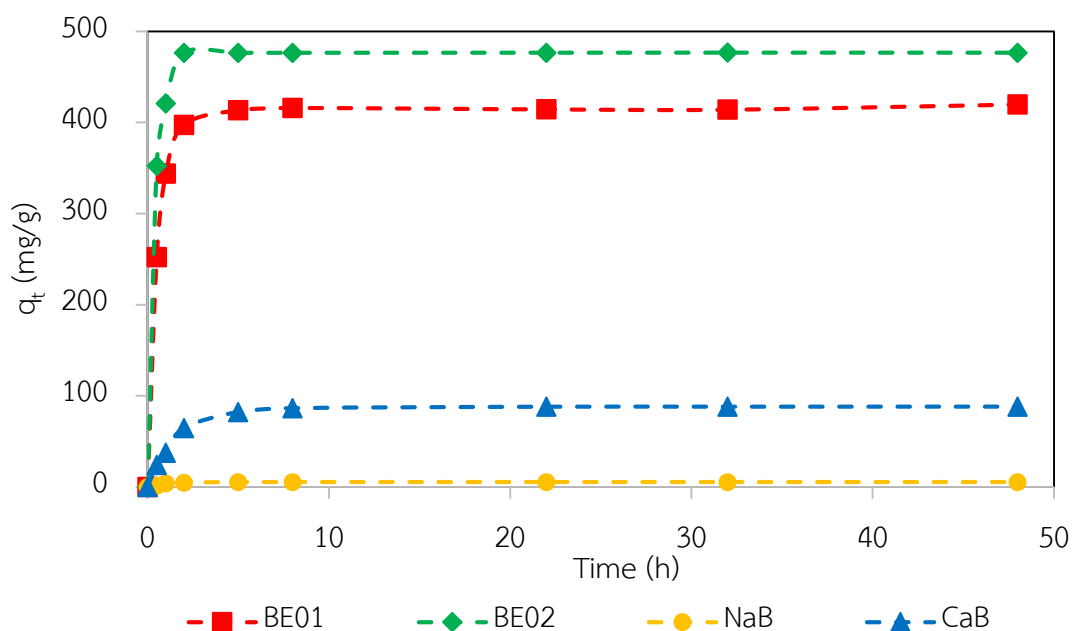
4.2 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบบนตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

4.2.1 อิทธิพลของชนิดตัวดูดซับ

ปริมาณปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนก่อนทำการดูดซับและหลังจากถูกดูดซับแล้ว โดยปริมาณของปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ q_t (มิลลิกรัมต่อกรัม) สามารถคำนวณจากสมการสมดุลมวล (สมการที่ 3.2)

กระบวนการดูดซับประกอบด้วย 2 ช่วงหลักๆ คือ ช่วงการดูดซับเร็ว และช่วงการดูดซับช้า (177) โดยช่วงแรกของการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะเกิดอันตรกิริยาเชิงเคมีระหว่างปีตาแคโรทีนละลายพื้นผิวของตัวดูดซับ และเนื่องจากบนพื้นผิวของตัวดูดซับยังไม่มีโมเลกุลของปีตาแคโรทีนเกาะหรือยึดติดอยู่ โมเลกุลของปีตาแคโรทีนในไบโอดีเซลจึงเข้าเกาะและยึดติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ง่าย ส่วนการดูดซับช่วงที่ 2 เป็นการเกิดอันตรกิริยาเชิงกายภาพระหว่างปีตาแคโรทีนกับปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวแล้ว เมื่อเวลาผ่านไปการดูดซับจะค่อยๆ ช้าลงเพราะการดูดซับเกิดแบบพอกพูนหลายชั้น และความหนาแน่นของปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้นจึงทำให้พื้นผิวที่สามารถดูดซับได้ค่อยๆ ลดลง นอกจากนี้โมเลกุลของปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวแล้วยังเป็นตัวต้านทานการดูดซับด้วย จากนั้นการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลในที่สุด จากงานวิจัยของ Tong และคณะ (178) ที่ศึกษาการดูดซับปีตาแคโรทีนบนดินเหนียวเบนโทไนด์กัมมันต์พบว่าช่วง 10 นาทีแรกของการดูดซับ อัตราการดูดซับถูกควบคุมโดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างปีตาแคโรทีนกับพื้นผิวของดินเหนียวเบนโทไนด์กัมมันต์ หลังจากนั้นจะเกิดการดูดซับแบบช้า ซึ่งอัตราการดูดซับในขั้นนี้จะถูกควบคุมโดยการแพร่ภายใน หรือการเคลื่อนย้ายโมเลกุลปีตาแคโรทีนภายในรูปพุนของตัวดูดซับ

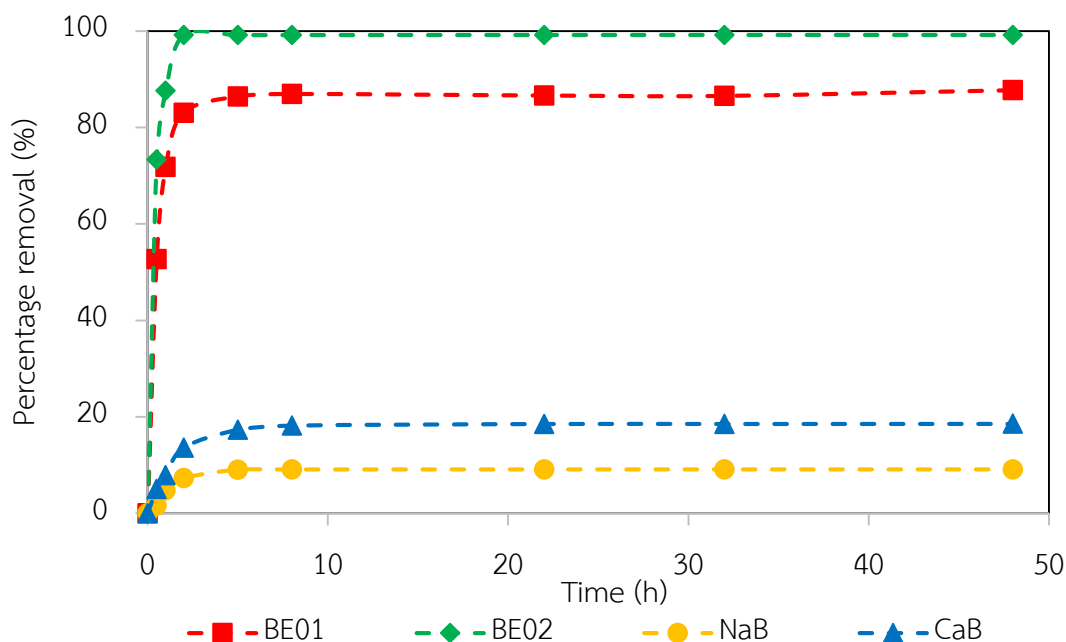
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับกับเวลาการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดต่างๆ พบว่าช่วงเริ่มต้นการดูดซับจะเกิดขึ้นเร็วมาก จากนั้นการดูดซับจะค่อยๆ ช้าลงและเข้าสู่สมดุลในที่สุด เวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุลสำหรับ BE01 BE02 NaB และ CaB คือ 5 2 8 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ และปริมาณปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของ BE01 BE02 NaB และ CaB ที่สมดุล (q_e) คือ 415 477 45 และ 88 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ความจุการดูดซับของการดูดซับปีตาแคโรทีนบนตัวดูดซับประเภทดินเหนียว ที่ 40 องศาเซลเซียสอัตราส่วนตัวดูดซับที่ 0.4 กรัม ต่อไบโอดีเซล 100 มิลลิลิตร

เมื่อพิจารณาความจุการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับประเภท NaB และ CaB พบว่าความจุการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับประเภท CaB มีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาค่าปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความจุการดูดซับดังตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ความแตกต่างของความจุการดูดซับเนื่องมาจากเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวดูดซับประเภท NaB และ CaB มีค่าต่างกัน โดยตัวดูดซับประเภท CaB มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนสูงกว่าบ่งบอกว่ารูพรุนมีขนาดใหญ่กว่าจึงทำให้การแพร่ภายในของปีตาแคโรทีนเกิดขึ้นได้ดีกว่า ส่งผลให้เกิดการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวภายในรูพรุนได้ดีกว่า

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดออกกับเวลา พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน ร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับด้วย BE02 มีค่าสูงที่สุด และร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับด้วย NaB มีค่าน้อยที่สุด ค่าร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ถูกดูดซับด้วย BE01 BE02 NaB และ CaB คือ ร้อยละ 86.56 99.20 9.11 และ 18.55 ตามลำดับ



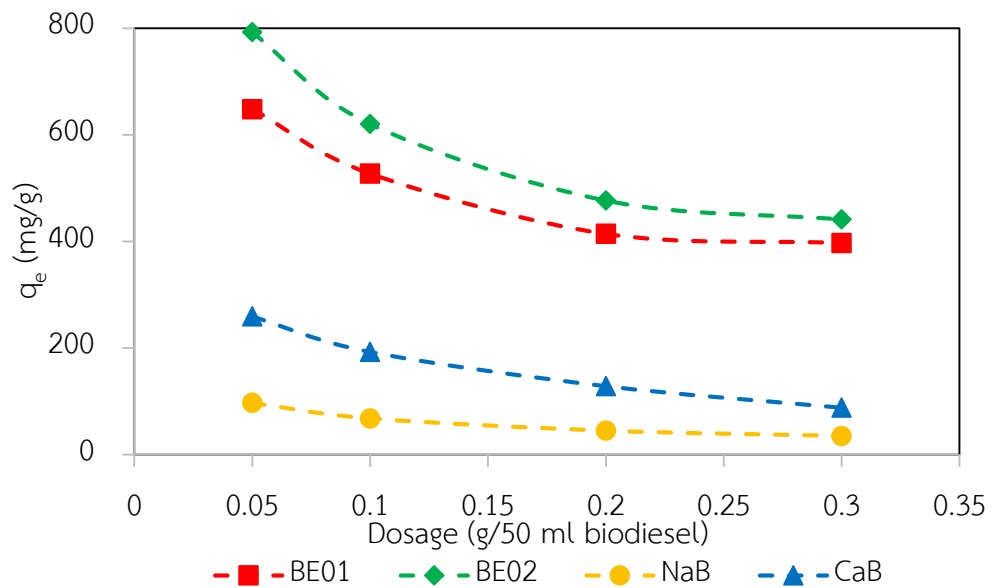
รูปที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนที่ดูดซับด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว ที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนตัวดูดซับที่ 0.4 กรัม ต่อไปโอติเซล 100 มิลลิลิตร

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 บ่งชี้ว่าตัวดูดซับประเภท BE02 เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดจากตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดที่ศึกษา สำหรับการฟอกสีไปโอติเซลหรือการกำจัดปีตาแคโรทีนจากไปโอติเซล เพราะตัวดูดซับประเภท BE02 มีค่าความจุการดูดซับของปีตาแคโรทีนหรือความหนาแน่นของปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวตัวดูดซับมากที่สุด เวลาสมดุลการดูดซับมีค่าน้อยที่สุด และมีค่าร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนจากไปโอติเซลมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากใช้ BE02 ในการดูดซับจะใช้เวลาในการดูดซับน้อย ใช้อัตราส่วนตัวดูดซับต่อไปโอติเซลต่ำ จึงทำให้ประหยัดเวลาและค่าดำเนินการต่ำ

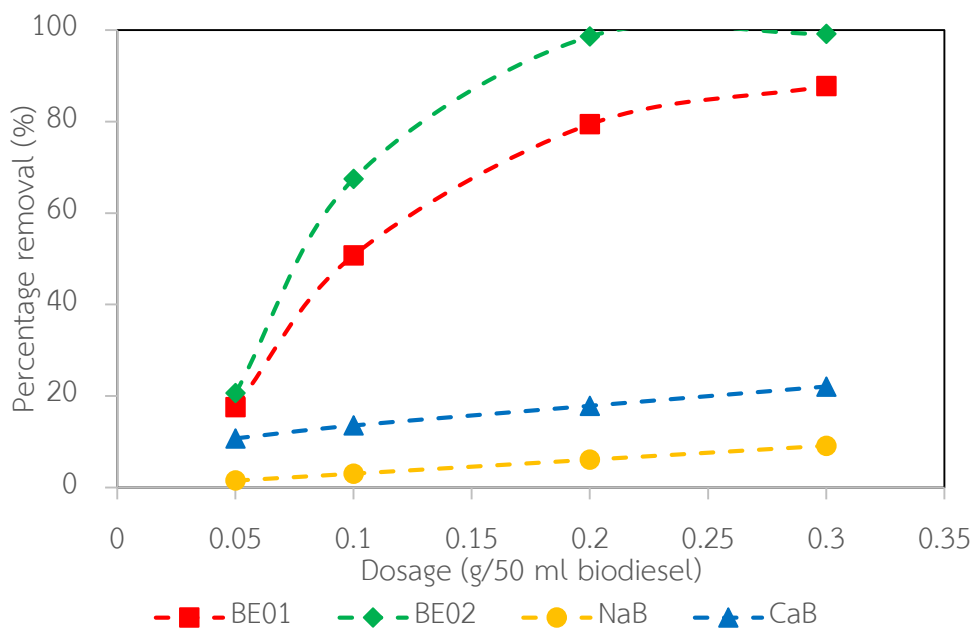
4.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนปริมาณตัวดูดซับต่อปริมาตรไปโอติเซล

จากรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณของปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล q_e (มิลลิกรัมต่อกรัม) จะลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อแบตช์เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ในการดูดซับแปรผันตรงตามปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้น ถ้าปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นพื้นที่ที่สามารถดูดซับได้ก็เพิ่มขึ้นด้วยทำให้ปริมาณปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับจากไปโอติเซลดิบเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากันความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนในไปโอติเซลจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และเนื่องจากความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนในไปโอติเซลเป็นแรงขับในการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (179) ดังนั้น ถ้าความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนในไปโอติเซลดิบลดลง

ความสามารถในการดูดซับจึงลดลงด้วย ส่งผลให้ปริมาณบีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่ภาวะสมดุลลดลง q_e ของการดูดซับบีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของ BE01 BE02 NaB และ CaB ลดลงจาก 648 เป็น 397 793 เป็น 441 97 เป็น 35 259 เป็น 88 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 0.05 เป็น 0.3 กรัมต่อไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร



รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุลที่ 40 องศาเซลเซียส



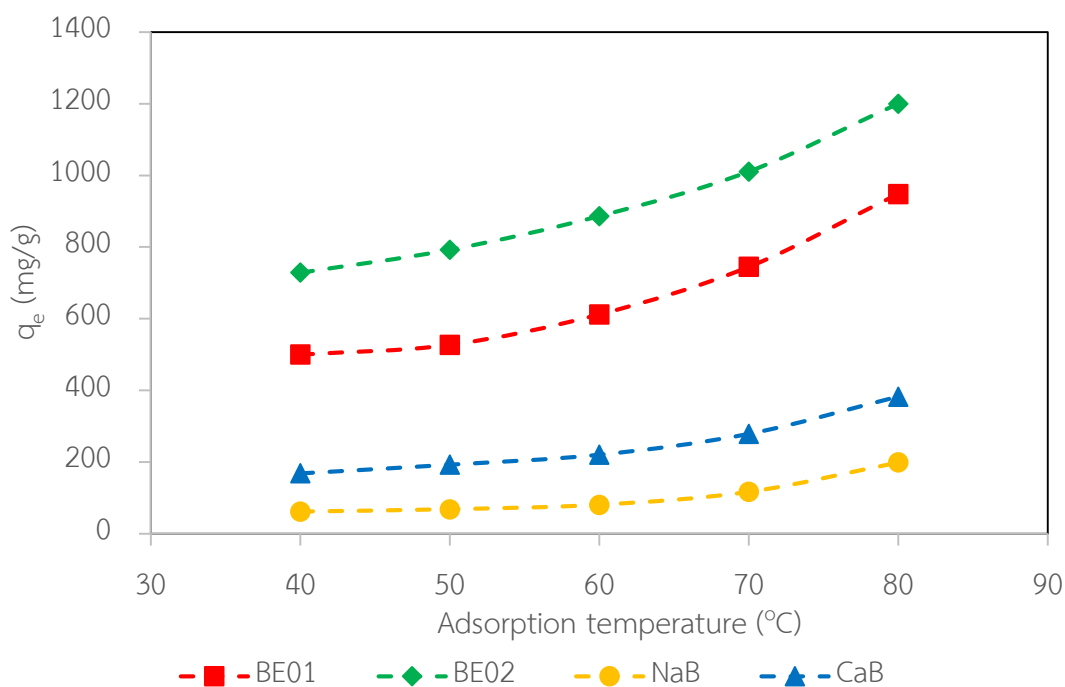
รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อร้อยละการกำจัดออกที่ 40 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีน (รูปที่ 4.4) พบว่าร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากถ้าปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นพื้นผิวที่สามารถดูดซับได้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยจึงส่งผลให้สามารถดูดซับโมเลกุลของปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลดิบได้มากขึ้น

หากพิจารณาการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับประเภท BE01 และ BE02 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซลจาก 0.2 กรัม เป็น 0.3 กรัมต่อไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร (เพิ่มอัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซลร้อยละ 50) พบว่าร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนเพิ่มขึ้นน้อยมาก คือ จากร้อยละ 79.43 เป็นร้อยละ 87.74 และร้อยละ 98.62 เป็น 99.20 สำหรับ BE01 และ BE02 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซลอีกร้อยละ 50 หมายถึงการเพิ่มพื้นที่การดูดซับอีกร้อยละ 50 ทำให้ปีตาแคโรทีนสามารถถูกดูดซับได้อย่างอิสระและง่ายขึ้นจึงจะทำให้ความเข้มข้นปีตาแคโรทีนในไบโอดีเซลที่ภาวะสมดุลลดลง ส่งผลให้แรงขับเนื่องจากความเข้มข้นลดลงด้วย ดังนั้นสำหรับการใช้ตัวดูดซับประเภท BE02 ในการดูดซับจึงควรใช้อัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซลที่ 0.2 กรัมต่อไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร มากกว่า 0.3 กรัมต่อไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร เพราะการเพิ่มอัตราส่วนตัวดูดซับประเภท BE02 ต่อไบโอดีเซลจาก 0.2 กรัม เป็น 0.3 กรัมต่อไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร ช่วยเพิ่มร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนเพียงร้อยละ 0.58 เท่านั้น

4.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิการดูดซับ

รูปที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิต่อสมดุลการดูดซับของปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของ BE01 BE02 NaB และ CaB พบว่าความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการดูดซับเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของสมดุลการดูดซับเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับเป็นการเพิ่มอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลปีตาแคโรทีนในไบโอดีเซล จึงเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและยึดติดกันระหว่างปีตาแคโรทีนกับพื้นผิวการดูดซับ โดยทั่วไปการดูดซับเชิงกายภาพจะเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ส่วนการดูดซับเชิงเคมีจะเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส (97) ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นกลไกการดูดซับส่วนใหญ่จึงเป็นการดูดซับเชิงกายภาพ ถึงแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับสามารถเพิ่มสมดุลการดูดซับได้ แต่ก็ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับอย่างไม่มีขีดจำกัดได้ เนื่องจากปีตาแคโรทีนจะเกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุล ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 0.1 กรัมต่อไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร

4.2.4 ไอโซเทอมการดูดซับ

สัดส่วนของโมเลกุลบีตาแคโรทีนที่ละลายอยู่ในของเหลวกับที่ยึดติดบนตัวดูดซับเป็นตัวบ่งบอกตำแหน่งของสมดุลของกระบวนการดูดซับ (180) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของสมดุลการดูดซับเพื่อใช้ในการออกแบบกระบวนการดูดซับ ปัจจุบันไอโซเทอมที่มักใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลของสมดุลการดูดซับมี 2 แบบ คือ ไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรอนด์ลิช ความเหมาะสมของการเลือกรูปแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลจะต้องคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R^2) เป็นหลัก สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรอนด์ลิช แสดงดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

จากสมการที่ (2.5) K_L คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงก์เมียร์ (L/mg) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ เมื่อพลอตระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะสามารถหาค่า b และ K_L ได้จากความชันและจุดตัดแกน y ตามลำดับ

จากสมการที่ (2.6) K_F ($\text{mg}/(\text{g}/(\text{mg}/\text{L})^{1/n})$) และ n คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรอนด์ลิช และค่าผลกระทบต่อความจุการดูดซับและความรุนแรงของการดูดซับตามลำดับ K_F เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับพลังงานพันธะสามารถใช้บ่งบอกค่าการดูดซับหรือสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของบีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับในหน่วยของความเข้มข้นที่ภาวะสมดุล ความชัน $1/n$ คือ irrational fraction

ใช้บ่งบอกความรุนแรงของการดูดซับหรือความเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างพื้นผิว เมื่อพลอตระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ จะได้ความชัน $1/n$ และจุดตัดแกน y $\log K_F$

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรอนด์ลิชสำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีน จากไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

Adsorbent type	Langmuir			Freundlich		
	K_L (L/mg)	b (mg/g)	R^2	K_F (mg/(g(mg/L) ^{1/n}))	$1/n$	R^2
BE01	0.0019	833.33	0.9887	45.49	0.35	0.9935
BE02	0.0040	909.09	0.9892	105.18	0.27	0.9909
NaB	-0.0004	-2.76	0.9872	8.97×10^{-71}	6.99	0.9988
CaB	-0.0004	-25.97	0.7028	1.34×10^{-21}	21.41	0.8622

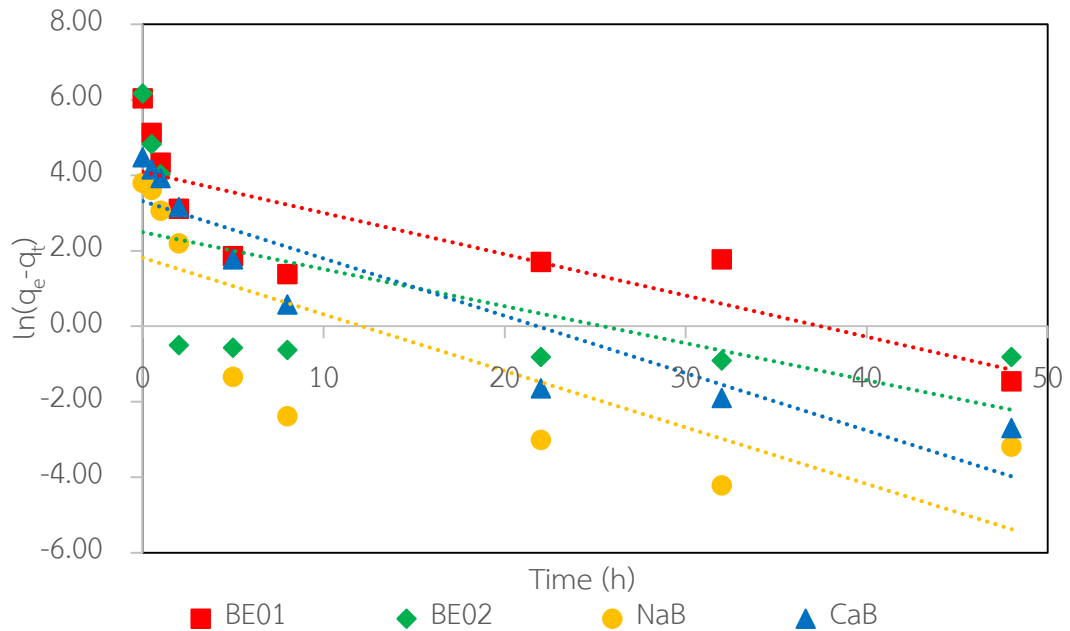
จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรอนด์ลิช สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของ BE01 BE02 NaB และ CaB พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิชมากกว่าแบบแลงก์เมียร์โดยพิจารณาจากค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.99 สำหรับ BE01 BE02 NaB และมากกว่า 0.86 สำหรับ CaB ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับประเภทดินเหนียวจะเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันของสารหลายองค์ประกอบ และเกิดการดูดซับสารมากกว่า 1 ชนิด และเมื่อพิจารณาค่า K_F พบว่า BE02 มีค่ามากที่สุด ซึ่งค่า K_F สามารถใช้บ่งบอกค่าความจุการดูดซับได้ กล่าวคือถ้าค่า K_F มากบ่งชี้ว่าค่าความจุการดูดซับมีค่ามาก (105)

4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

กลไกการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับประเภทดินเหนียวศึกษาโดยวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order kinetic model) และแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (pseudo-second-order kinetic model) เปรียบเทียบกัน Lagergren ได้พัฒนาสมการแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมขึ้น (181) เพื่อใช้วิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับโดยมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

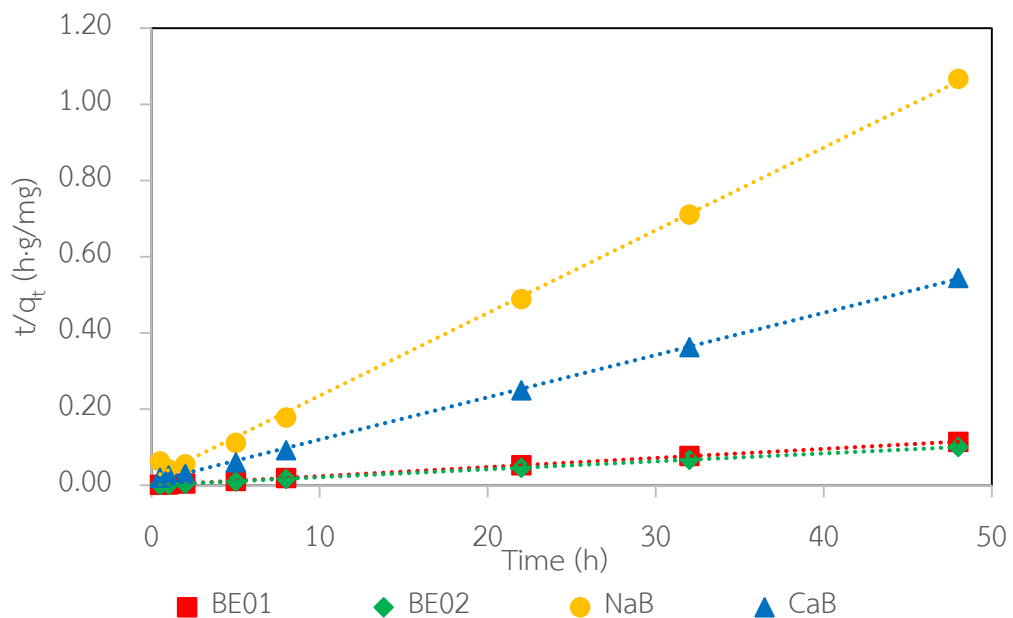
ค่า k_1 หรือค่าคงที่อัตราการดูดซับสำหรับแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมสามารถหาได้จากการพลอตระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับเวลา ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.6

แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (182) มีรูปสมการดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 ค่า k_2 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสำหรับแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมสามารถหาได้จากการพลอตระหว่าง t/q_t กับ t ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม

สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไปโอดีเซลบนตัวดูดซับประเภทดินเหนียวที่ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม

สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไปโอดีเซลบนตัวดูดซับประเภทดินเหนียวที่ 40 องศาเซลเซียส

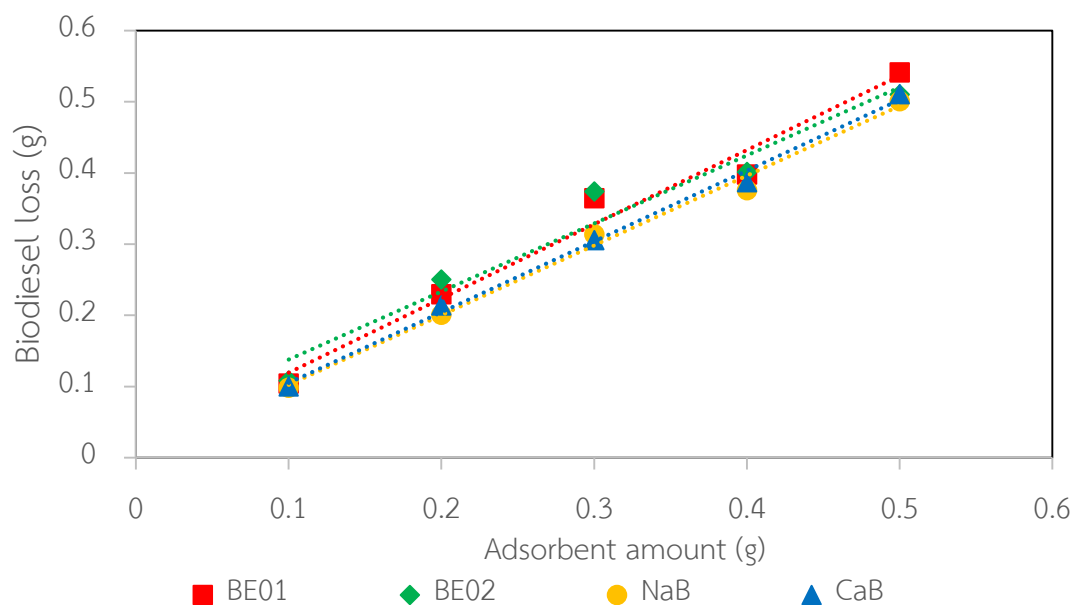
การพิจารณาจลนพลศาสตร์การดูดซับว่าสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมหรือแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการพลอตเส้นตรงระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t และ (t/q_t) กับ t แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม ตามลำดับ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของการดูดซับปีตาแคโรทีนที่ 40 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 ถึง 2.10 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับของการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับประเภทดินเหนียวด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมเหมาะสมกว่าวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม เพราะ R^2 ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.99 สำหรับตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด และค่า q_e ที่คำนวณได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมใกล้เคียงกับ q_e ที่ได้จากการทดลองมากกว่า q_e ที่คำนวณได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมสำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียวที่ 40 องศาเซลเซียส

Adsorbent type	$q_{e,exp}$ (mg/g)	First-order kinetic model			Second-order kinetic model		
		k_1 (h^{-1})	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	k_2 (g/(mg·h))	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
BE01	419.77	0.109	59.96	0.6775	0.012	416.67	0.9999
BE02	476.55	0.098	12.10	0.3339	0.044	476.19	1.0000
NaB	44.96	0.150	6.13	0.6125	0.025	46.08	0.9983
CaB	88.13	0.152	27.53	0.8426	0.013	90.09	0.9995

จากการวิเคราะห์สมดุลการดูดซับพบว่าจลนพลศาสตร์ของการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียวสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม เพราะอัตราการดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสองหรือขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด คือ ปีตาแคโรทีนและไบโอดีเซล และค่า k_2 บ่งบอกอัตราเร็วของการดูดซับถ้าค่า k_2 มาก การดูดซับจะเกิดขึ้นได้เร็วและเข้าสู่สมดุลเร็ว จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับประเภท BE02 เกิดการดูดซับได้เร็วที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลสมดุลการดูดซับดังรูปที่ 4.1

4.4 ปริมาณสูญเสียของไบโอดีเซลในกระบวนการดูดซับ

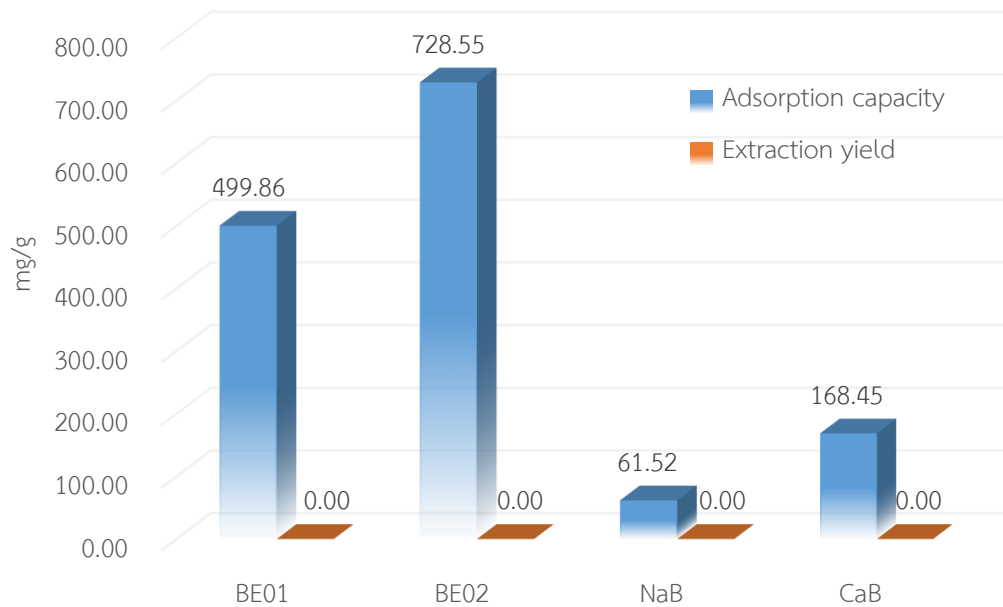


รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซลต่อปริมาณสูญเสียของไบโอดีเซลที่ 40 องศาเซลเซียส

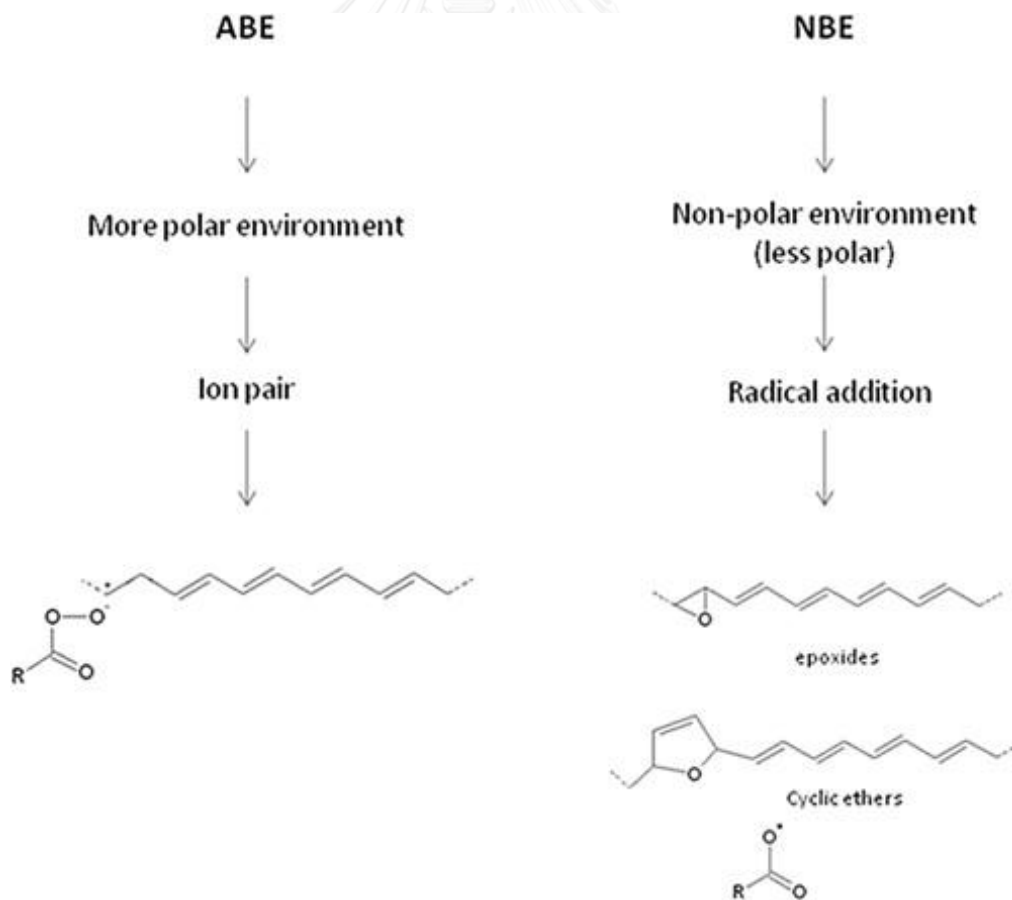
การศึกษาปริมาณสูญเสียไบโอดีเซล ทดลองโดยศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อปริมาณการสูญเสียไบโอดีเซลในกระบวนการดูดซับดังรูปที่ 4.8 ปริมาณการสูญเสียไบโอดีเซลแปรผันตรงกับปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ กล่าวคือเมื่อใช้อัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นปริมาณไบโอดีเซลที่สูญเสียจะเพิ่มขึ้น และปริมาณการสูญเสียของไบโอดีเซลเท่ากับน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ ซึ่งใกล้เคียงกันทั้ง BE01 BE02 NaB และ CaB

4.5 ผลได้ปีตาแคโรทีนจากการสกัดดินฟอกสีใช้แล้ว

การฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบหรือไบโอดีเซลโดยทั่วไปใช้การดูดซับด้วยดินฟอกสีหรือตัวดูดซับประเภทดินเหนียวซึ่งมีความจุการดูดซับสูงจึงใช้อัตราส่วนดินฟอกสีต่อไบโอดีเซลต่ำ และนอกจากนี้ดินฟอกสียังมีราคาถูกเมื่อเทียบกับตัวดูดซับประเภทอื่น ทำให้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากดินฟอกสีมีความจุการดูดซับของปีตาแคโรทีนสูง ดินฟอกสีใช้แล้วที่โดยปกติจะทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์จึงน่าจะมีปริมาณปีตาแคโรทีนต่อกรัมสูง หากสามารถสกัดปีตาแคโรทีนเหล่านี้ออกมาได้จะสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับดินฟอกสีเป็นอย่างมาก



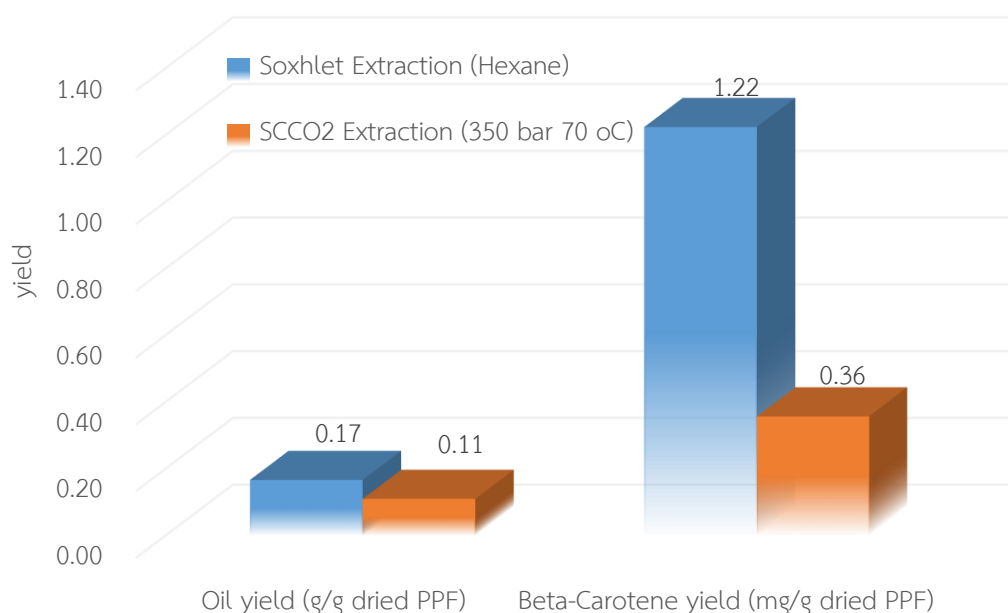
รูปที่ 4.9 ผลได้การสกัดปีตาแคโรทีนจากตัวดูดซับใช้แล้วด้วยวิธีสกัดแบบซอกซ์เลต



รูปที่ 4.10 รูปแบบการออกซิไดซ์ของปีตาแคโรทีนบนดินฟอกสีกัมมันต์ (ABE) และดินฟอกสีแบบธรรมชาติ (NBE) (183)

4.6 ผลได้น้ำมันและบีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์ม

กากใยปาล์มเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่อุดมไปด้วยบีตาแคโรทีน ในแต่ละปีมีกากใยปาล์มเหลือทิ้งหลายล้านตัน แต่มีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ คือใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาเท่านั้น การสกัดบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มจึงเป็นเรื่องน่าสนใจเพราะ จากงานวิจัยจำนวนมากระบุว่ากากใยปาล์มที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเหล่านี้มี บีตาแคโรทีนอยู่จำนวนมาก ประมาณ 5000 – 7000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (17)



รูปที่ 4.12 ผลได้การสกัดน้ำมันและบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์ม

ด้วยวิธีสกัดแบบ soxhlet เปรียบเทียบกับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

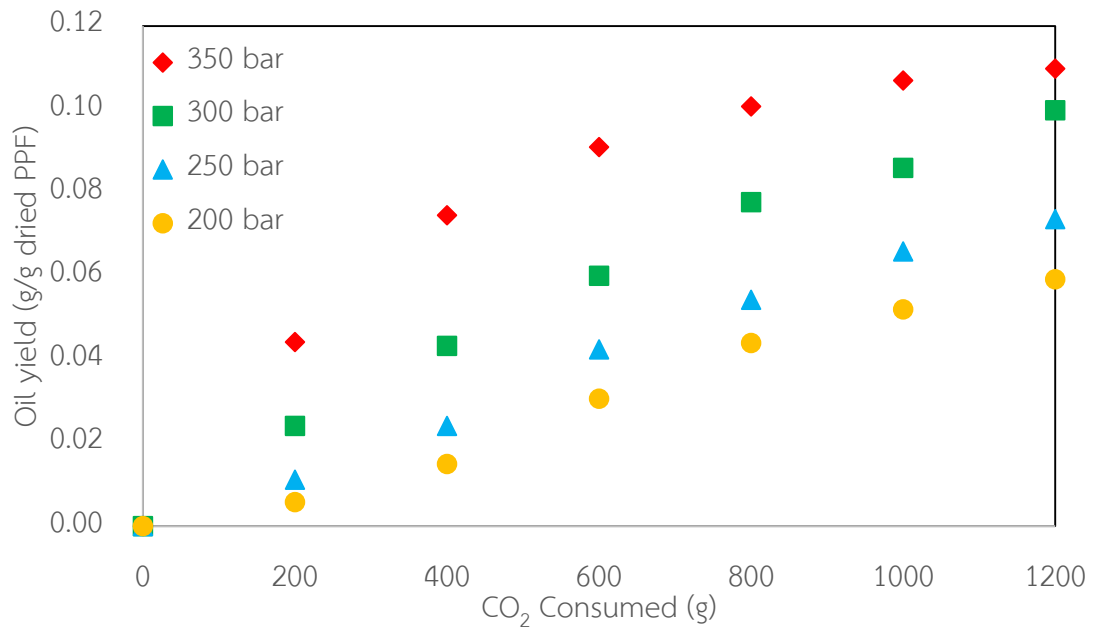
การสกัดน้ำมันและบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์ม ทดลองโดยสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้วิธีสกัดแบบซอกซ์เลตเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งผลได้จากการสกัดน้ำมันและบีตาแคโรทีนทั้ง 2 วิธี แสดงในรูป 4.12 ผลได้การสกัดน้ำมันจากกากใยปาล์มด้วยวิธีซอกซ์เลตโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายได้เท่ากับ 0.17 กรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 17 โดยน้ำหนัก สูงกว่าร้อยละองค์ประกอบน้ำมันในกากใยปาล์มที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปซึ่งอยู่ที่ร้อยละ 5 – 6 โดยประมาณ (187) ทั้งนี้เนื่องมาจากกากใยปาล์มที่ใช้ในการทดลองได้จากการบีบเปลือกนอกปาล์มด้วยเครื่องหีบที่มีกำลังต่ำจึงทำให้ในกากใยปาล์มที่ได้มีน้ำมันตกค้างอยู่มากกว่าในกากใยปาล์มที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เครื่องหีบมีกำลังสูงกว่า สำหรับผลได้การสกัดน้ำมันจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 350 บาร์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลได้การสกัดแบบซอกซ์เลต

แต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมีกำลังการละลายต่ำกว่าเฮกเซน ซึ่งเป็นของเหลว คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ภาวะดังกล่าวมีความหนาแน่นน้อยกว่าเฮกเซนที่อุณหภูมิและความดันปกติ ดังแสดงในตารางที่ 2.10 จึงทำให้ค่าการละลายของน้ำมันในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมีค่าต่ำกว่าค่าการละลายของน้ำมันในเฮกเซน ส่งผลให้ผลได้การสกัดน้ำมันจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตต่ำกว่าการสกัดด้วยเฮกเซน

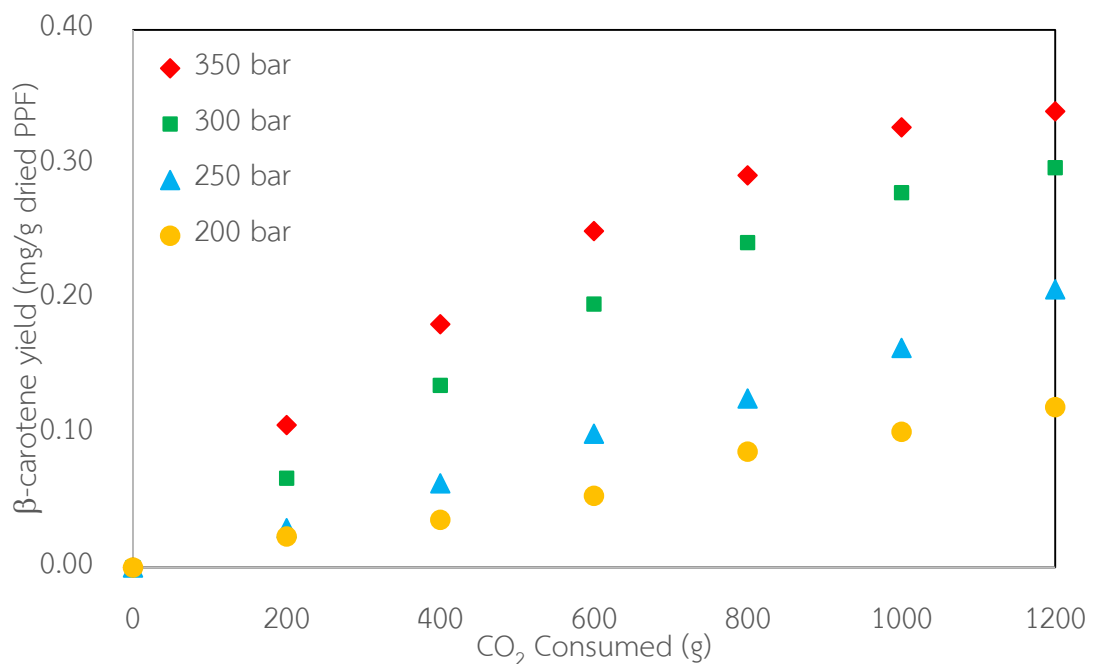
ผลได้การสกัดปีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้วิธีแบบซอกซ์เลต ใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย มีค่าเป็น 1.22 มิลลิกรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง หรือคิดเป็น 1,220 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกากใยปาล์มแห้ง จากงานวิจัยของ Sanagi และคณะ (188) ที่ศึกษาการสกัดปีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยวิธีแบบซอกซ์เลต และใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายเช่นเดียวกัน และผลได้ปีตาแคโรทีนที่สกัดได้เป็น 1,320 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกากใยปาล์มแห้ง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลได้การสกัดปีตาแคโรทีนด้วยตัวทำละลายในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ผลได้ปีตาแคโรทีนที่สกัดจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความดัน 350 บาร์ มีค่าเท่ากับ 0.36 มิลลิกรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง หรือคิดเป็น 360 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกากใยปาล์มแห้ง ซึ่งน้อยกว่าการสกัดด้วยเฮกเซนโดยสกัดด้วยวิธีแบบซอกซ์เลตมาก เนื่องจากอิทธิพลของความหนาแน่นและกำลังการสกัดเช่นเดียวกับการสกัดน้ำมันดังกล่าวในข้างต้น

4.7.1 อิทธิพลของความดันต่อผลได้น้ำมันและปีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

จากการศึกษาผลของความดันต่อผลได้การสกัดน้ำมันและปีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตโดยศึกษาที่อุณหภูมิคงที่ที่ 70 องศาเซลเซียส และดำเนินการที่ความดัน 200 250 300 และ 350 บาร์ จากการทดลองพบว่าผลได้การสกัดน้ำมันและปีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันที่ใช้ในการสกัดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 1,200 กรัม พบว่าผลได้การสกัดน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 0.11 กรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง เมื่อเพิ่มความดันการสกัดจาก 200 บาร์ เป็น 350 บาร์ และสำหรับผลได้การสกัดปีตาแคโรทีนเพิ่มขึ้นจาก 0.12 เป็น 0.34 มิลลิกรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง



รูปที่ 4.13 ผลของความดันต่อผลได้การสกัดน้ำมันจากกากใยปาล์ม
ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

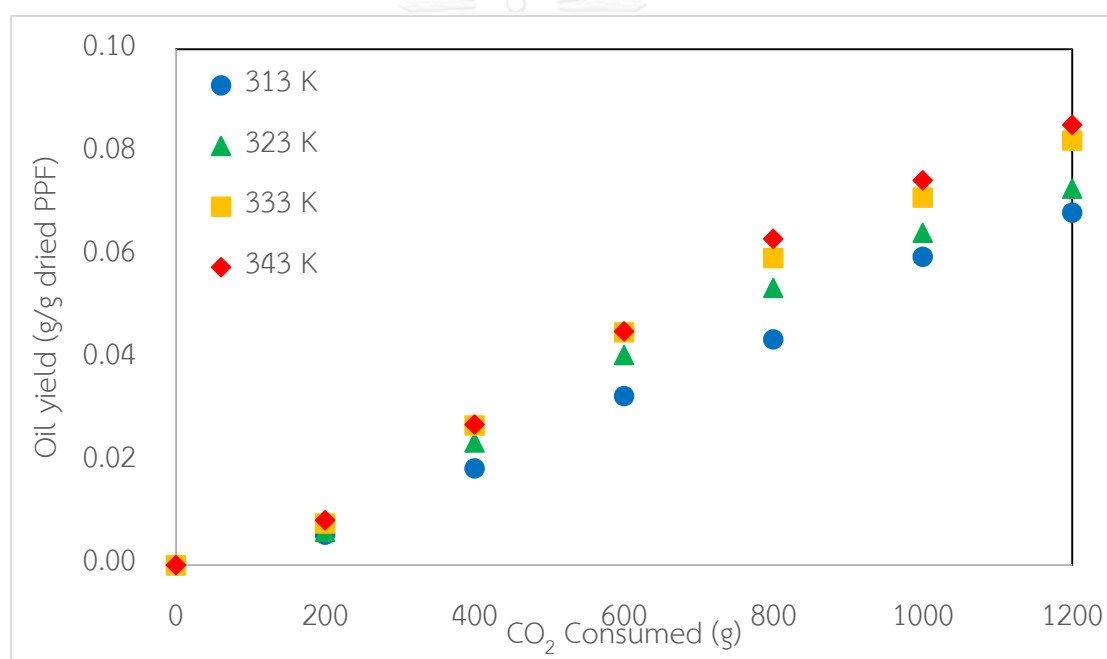


รูปที่ 4.14 ผลของความดันต่อผลได้การสกัดบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์ม
ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงให้เห็นว่าความดันในการสกัดส่งผลต่อผลได้การสกัดทั้งน้ำมันและบีตาแคโรทีน เพราะผลได้การสกัดสามารถเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า สำหรับการสกัดน้ำมันและประมาณ 3 เท่า สำหรับการสกัดบีตาแคโรทีน เมื่อเพิ่มความดันจาก 200 เป็น 350 บาร์ เพราะ

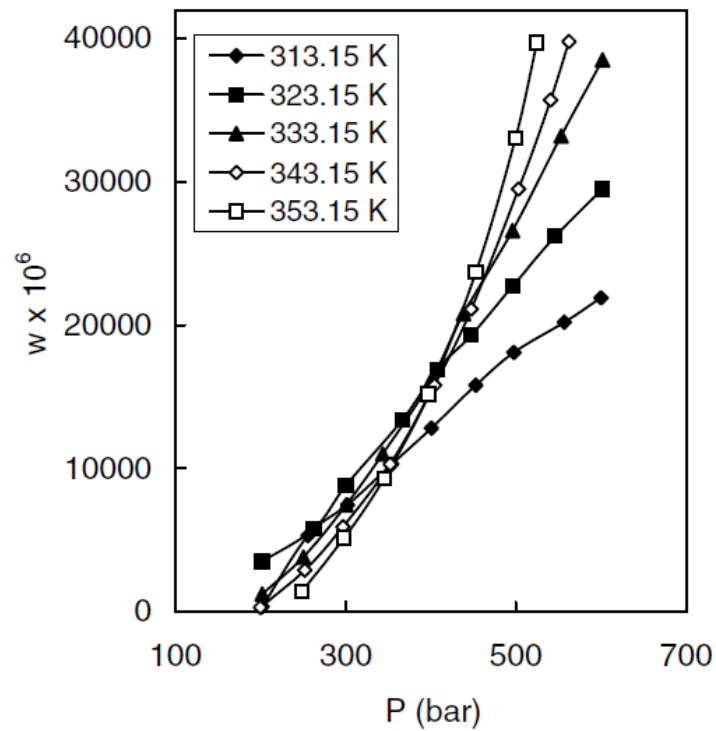
การเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มความหนาแน่นและกำลังการละลายให้แก่ของไหลภาวะเหนือวิกฤต จึงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตสามารถละลายน้ำมันและปีตาแคโรทีนได้มากขึ้น ส่งผลให้การสกัดเกิดขึ้นได้ดี และทำให้ผลได้การสกัดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันการสกัด ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Johannsen และ Brunner (189) ที่ศึกษาค่าการละลายของปีตาแคโรทีนที่ความดัน ต่างๆ กัน พบว่าค่าการละลายของปีตาแคโรทีนในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้น 9.3 เท่า จาก 0.35×10^{-6} เป็น 3.24×10^{-6} กรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเพิ่มความดัน จาก 200 เป็น 350 บาร์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ King (190) ที่ศึกษาค่าการละลายของไตรกลีเซอไรด์ในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต พบว่าค่าการละลายของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น 30.5 เท่า เมื่อเพิ่มความดันในจาก 200 เป็น 345 บาร์ ที่อุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส

4.7.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อผลได้น้ำมันและปีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์ม

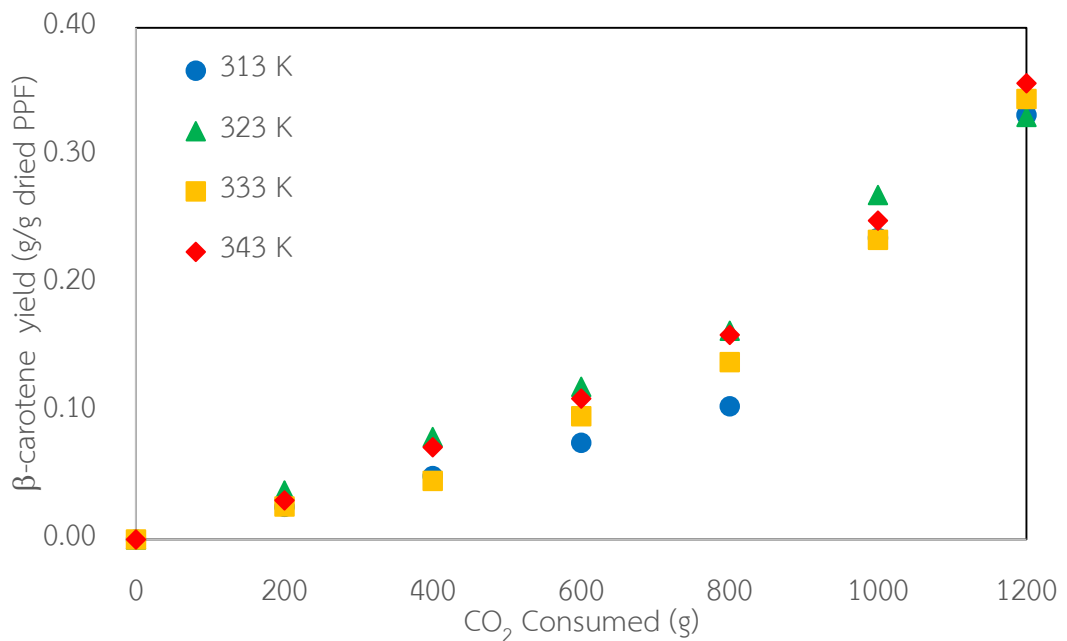


รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้การสกัดน้ำมันจากกากใยปาล์ม ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อผลได้การสกัดน้ำมันและปีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการสกัดช่วยเพิ่มผลได้การสกัดน้ำมันได้ น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.15 กล่าวคือผลได้การสกัดน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 0.07 เป็น 0.09 หรือคิดเป็น 1.25 เท่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการสกัดจาก 40 เป็น 70 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ King (190) ที่พบว่าในช่วงความดัน 200 – 350 บาร์ อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อค่าการละลายของไตรกลีเซอไรด์ ในคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.16

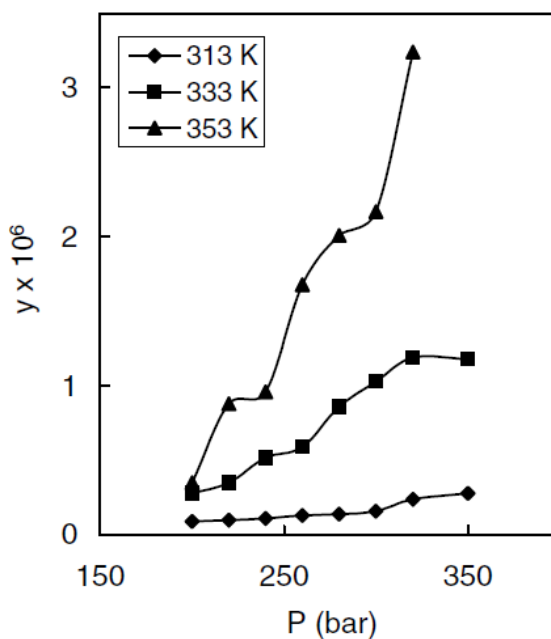


รูปที่ 4.16 ค่าการละลายของเบต้าแคโรทีนในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต



รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้การสกัดบีตาแคโรทีนจากกากไยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

สำหรับผลได้การสกัดบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลได้การสกัดน้ำมัน คือการเพิ่มอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อผลได้การสกัดบีตาแคโรทีน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 แต่จากงานวิจัยของ Johannsen และ Brunner (189) พบว่าค่าการละลายของบีตาแคโรทีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.18

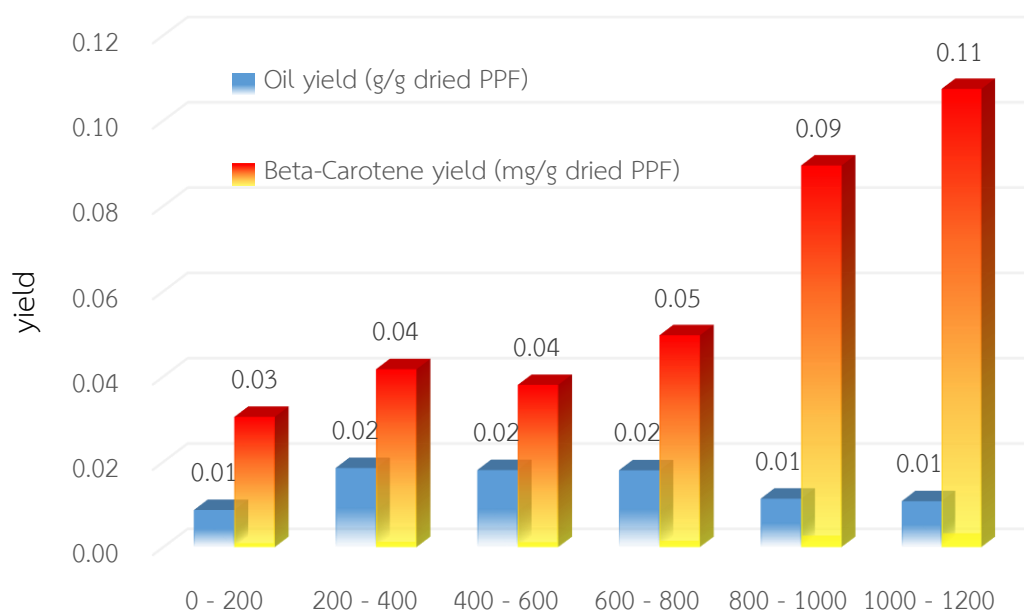


รูปที่ 4.18 ค่าการละลายของบีตาแคโรทีนในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

เนื่องจากบีตาแคโรทีนเป็นสารธรรมชาติที่สามารถละลายได้ดีในไขมัน การสกัดบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบสูง จึงเกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำมันกับบีตาแคโรทีน กล่าวคือ การสกัดบีตาแคโรทีนจะมีแนวโน้มแปรตามแนวโน้มของการสกัดน้ำมัน ดังนั้นแนวโน้มผลได้การสกัดบีตาแคโรทีนจึงไม่เป็นไปตามค่าการละลายจากการศึกษาของ Johannsen และ Brunner เพราะการศึกษาค่าการละลายของบีตาแคโรทีนดังกล่าวไม่มีน้ำมันในระบบจึงไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันของบีตาแคโรทีนกับน้ำมัน

การเพิ่มอุณหภูมิการสกัดเป็นการเพิ่มอัตราการแพร่ภายในของบีตาแคโรทีนและน้ำมัน ซึ่งจะช่วยให้เกิดการถ่ายโอนโมเลกุลของตัวถูกละลายจากอนุภาคของวัสดุบดออกมายังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตได้ดีขึ้น การสกัดจึงเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการลดความหนาแน่นของตัวทำละลายซึ่งส่งผลให้กำลังการละลายของตัวทำละลายลดลง ทำให้การสกัดเกิดขึ้นได้ไม่ดี จากผลของกำลังการสกัดกับอัตราการแพร่ภายในที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิส่งผลให้การเพิ่มอุณหภูมิการสกัดสำหรับการสกัดน้ำมันและบีตาแคโรทีนจาก

กากใยปาล์มส่งผลน้อยมากต่อผลได้การสกัดน้ำมันและบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต



รูปที่ 4.19 ผลได้การสกัดน้ำมันและบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 350 บาร์ ที่ช่วงน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ต่างๆ

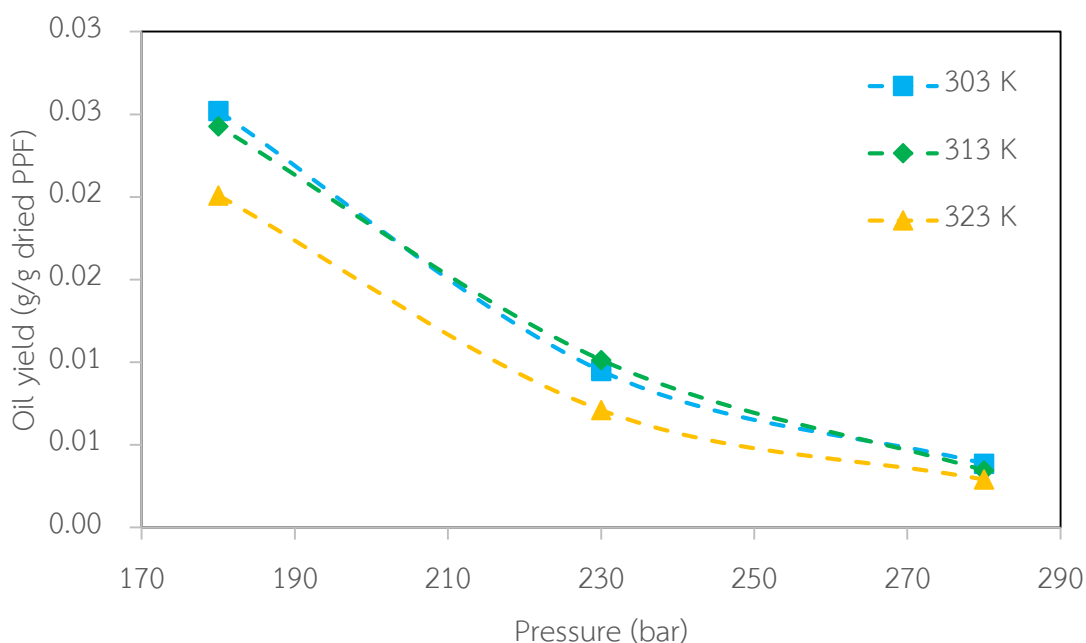
จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าการสกัดน้ำมันและบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต น้ำมันจะถูกสกัดออกมาก่อนจนน้ำมันในวัตถุดิบลดลง บีตาแคโรทีนจึงถูกสกัดออกมา เนื่องจากน้ำมันมีค่าการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า บีตาแคโรทีนมาก ยกตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาที่ความดัน 300 บาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำมันมีค่าการละลายสูงถึง 5,170 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ แต่บีตาแคโรทีนมีค่าการละลายเพียง 2.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.18 ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 จะพบว่าช่วงแรกของการสกัดผลได้น้ำมันจะสูงและมีบีตาแคโรทีนบางส่วนละลายหรือถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันเนื่องจากน้ำมันและบีตาแคโรทีนในวัตถุดิบมีอันตรกิริยาต่อกัน และเมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นได้ว่าผลได้น้ำมันเริ่มลดลงเนื่องจากน้ำมันที่เหลืออยู่ในวัตถุดิบมีน้อยลงแต่ผลได้การสกัดบีตาแคโรทีนกลับสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าในการสกัดน้ำมันและบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต น้ำมันที่มีค่าการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าจึงถูกสกัดออกมาก่อนจากนั้นจึงจะเกิดการสกัด บีตาแคโรทีนเมื่อในวัตถุดิบเหลือน้ำมันน้อยลง

4.7 ผลได้และร้อยละความบริสุทธิ์ของบีตาแคโรทีนที่ได้จากเครื่องแยก

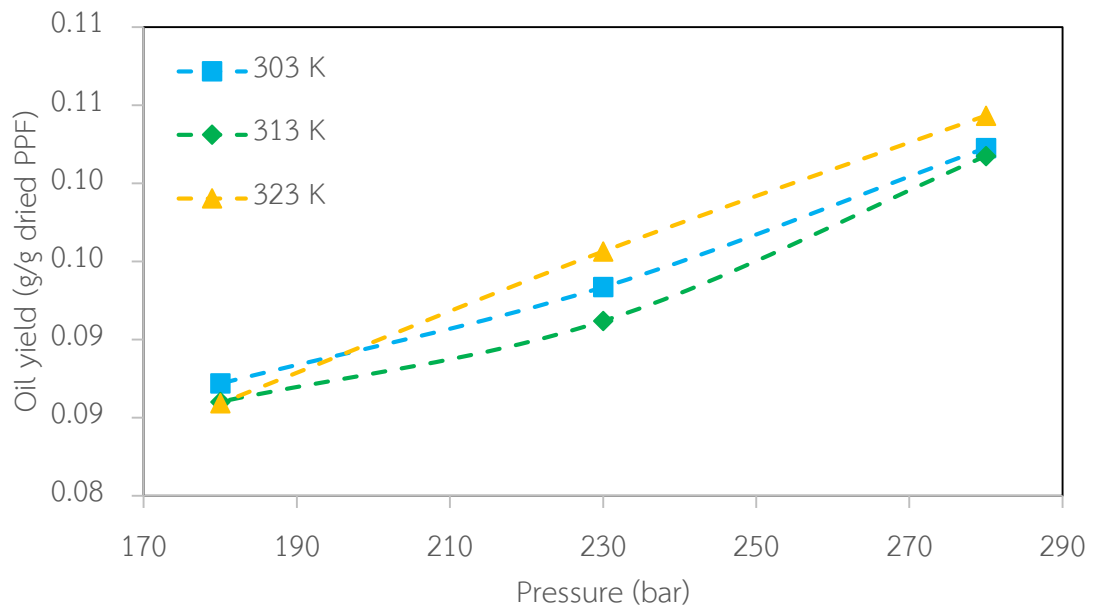
เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำมัน จึงจำเป็นต้องมีหน่วยแยกเพื่อให้บีตาแคโรทีนที่สกัดได้มีความบริสุทธิ์หรือความเข้มข้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เพื่อให้สะดวกแก่การนำไปใช้ ในระบบการสกัดและแยกตัวของไหลภาวะเหนือวิกฤตสามารถใช้ประโยชน์จากค่าการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.16 และ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าการละลายของไตรกลีเซอไรด์มากกว่าค่าการละลายของบีตาแคโรทีนอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นหากดำเนินการสกัดและแยกที่ความดันที่เหมาะสม จะสามารถแยกบีตาแคโรทีนออกจากน้ำมันได้

ในการสกัดและแยกบีตาแคโรทีนจะดำเนินการสกัดที่ความดัน 350 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 1,500 กรัม ของผสมที่ได้ออกจากเครื่องสกัดจะถูกลดความดันและอุณหภูมิลงที่เครื่องแยกเครื่องที่ 1 เป็นความดัน 180 230 และ 280 บาร์ และอุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส และของผสมที่ออกจากเครื่องแยกเครื่องที่ 1 จะถูกลดอุณหภูมิและความดันอีกครั้งที่เครื่องแยกเครื่องที่ 2 เป็นความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง

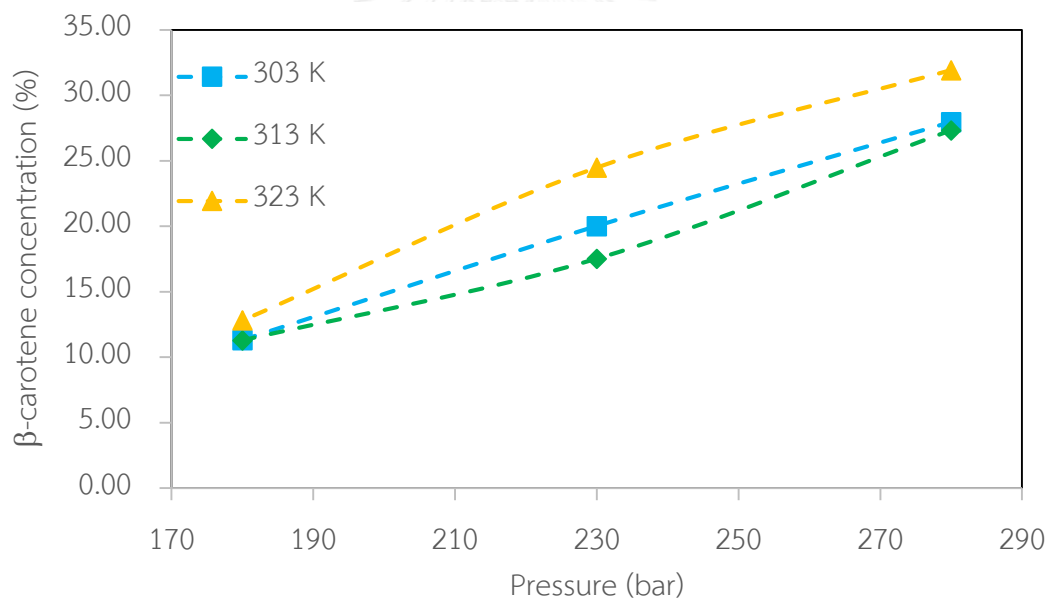
พิจารณาผลของความดันพบว่าเมื่อเพิ่มความดันในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 ผลได้น้ำมันในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 จะลดลง และผลได้น้ำมันในเครื่องแยกเครื่องที่ 2 จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 เนื่องจากการเพิ่มความดันในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 ทำให้ค่าการละลายของน้ำมันในคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น น้ำมันจึงละลายในคาร์บอนไดออกไซด์และออกไปยังเครื่องแยกเครื่องที่ 2 ได้มากขึ้น แต่สำหรับอุณหภูมิไม่มีอิทธิพลต่อผลได้น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.20 ผลได้น้ำมันจากเครื่องแยกเครื่องที่ 1



รูปที่ 4.21 ผลได้น้ำมันจากเครื่องแยกเครื่องที่ 2



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นบีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องสกัดเครื่องที่ 1

รูปที่ 4.22 แสดงผลของอุณหภูมิและความดันในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 ต่อความเข้มข้นบีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องแยกเครื่องที่ 1 พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้นน้ำมันละลายออกไปยังเครื่องแยกเครื่องที่ 2 มากขึ้น อัตราส่วนบีตาแคโรทีนต่อน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 จึงเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว การสกัดปีตาแคโรทีนจากดินฟอกสีใช้แล้ว การสกัดและแยกปีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต สามารถสรุปได้ดังนี้

1) อัตราการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว จะขึ้นกับเวลาการดูดซับ กล่าวคือ อัตราการดูดซับสูงในช่วงเริ่มต้นการดูดซับ จากนั้นอัตราการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง และเข้าสู่สมดุลในที่สุด โดยเวลาสมดุลการดูดซับสำหรับ BE01 BE02 NaB และ CaB เป็น 5 2 8 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ

2) ความจุการดูดซับของตัวดูดซับประเภท BE02 > BE01 > CaB > NaB โดยมีค่าความจุการดูดซับเป็น 474 415 88 และ 48 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าร้อยละการกำจัดของปีตาแคโรทีนที่ภาวะสมดุลเท่ากับ 99.20 86.56 9.11 และ 18.55 ตามลำดับ

3) ความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุลลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซล แต่ร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนตัวดูดซับต่อไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

4) ความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการดูดซับเพิ่มขึ้น

5) กลไกการดูดซับสำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียวสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิช

6) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียวเป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม

7) ร้อยละการสูญเสียไบโอดีเซลในกระบวนการดูดซับ แปรผันตรงกับปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ โดยปริมาณไบโอดีเซลที่สูญเสียคิดเป็น 1 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ

8) ผลได้การสกัดปีตาแคโรทีนจากดินฟอกสีใช้แล้วมีค่าเป็น 0 เนื่องจากปีตาแคโรทีนที่ถูกดูดซับถูกออกซิไดซ์บนพื้นผิวของดินฟอกสี

9) ผลได้น้ำมันและปีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยเฮกเซนโดยใช้วิธีสกัดแบบซอกซ์เลตคิดเป็น 0.17 กรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง และ 1.22 มิลลิกรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้งตามลำดับ

10) ผลได้น้ำมันและปีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 350 บาร์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.11 กรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง และ 0.36 มิลลิกรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง ตามลำดับ

11) ผลได้น้ำมันและปีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 350 บาร์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 64.70 และ 29.50 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยเฮกเซนโดยใช้วิธีสกัดแบบซอกซ์เลต

12) ผลได้น้ำมันและปีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความดันการสกัด

13) อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อผลได้น้ำมันและปีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตอย่างมีนัยสำคัญ

14) ในการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต น้ำมันที่อยู่ในวัตถุดิบ จะถูกสกัดออกมาก่อนปีตาแคโรทีนเพราะน้ำมันมีค่าการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าปีตาแคโรทีน

15) ความดันดำเนินการในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 ส่งผลต่อความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้ กล่าวคือเมื่อเพิ่มความดันดำเนินการในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 ความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเพิ่มขึ้น

16) อุณหภูมิดำเนินการในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 ไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ

17) ภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแยกปีตาแคโรทีนในการสกัดปีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ในช่วงที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ความดันสกัด 350 บาร์ อุณหภูมิสกัด 60 องศาเซลเซียส เพราะให้ผลได้ปีตาแคโรทีนสูงสุด ความดันและอุณหภูมิดำเนินการในเครื่องแยกเครื่องที่ 1 เป็น 280 บาร์ และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพราะให้ความเข้มข้นปีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ร้อยละ 31.92 และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ให้ผลได้น้ำมันใกล้เคียงกับอุณหภูมิอื่นๆ ที่ 0.003 กรัมต่อกรัมกากใยปาล์มแห้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ คือ ตัวดูดซับประเภท BE02 เวลาการดูดซับที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง และอัตราส่วนตัวดูดซับที่เหมาะสมคือร้อยละ 0.4 โดยมวลต่อปริมาตร ทั้งนี้ที่ภาวะดำเนินการข้างต้นจะทำให้กระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงเพราะ ใช้เวลาดูดซับและปริมาณตัวดูดซับน้อย และได้ค่าร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนสูง

จากผลการทดลองบ่งชี้อย่างชัดเจนว่าผลได้การสกัดน้ำมันและปีตาแคโรทีนจากกากไยปาล์ม ด้วยวิธีซอกซ์เลตโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายสูงกว่าการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ภาวะเหนือวิกฤติ แต่เนื่องจากเฮกเซนมีความเป็นพิษสูง การสกัดใช้เวลานาน และต้องใช้ความร้อนในการระเหยเฮกเซนออกจากผลิตภัณฑ์ จึงอาจทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนของปีตาแคโรทีน ซึ่งไวต่อแสงและความร้อนได้ ดังนั้นการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยเฉพาะเฮกเซนจึงไม่เหมาะสำหรับการสกัดปีตาแคโรทีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤติสามารถแก้ไขข้อเสียเหล่านี้ได้ เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศจึงง่ายต่อการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ประเภทสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเกิดการสลายตัวทางความร้อน

การแยกปีตาแคโรทีนในกระบวนการสกัดปีตาแคโรทีนจากกากไยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤติให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นปีตาแคโรทีนสูงซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

วิธีที่ 1 เก็บผลิตภัณฑ์แยกช่วงเวลา จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าปีตาแคโรทีนจะถูกสกัดออกมาหลังจากน้ำมันถูกสกัดจนเหลือร้อยละในวัตถุดิบต่ำ ดังนั้นถ้าเก็บผลิตภัณฑ์ในช่วงการสกัดที่ 800 – 1,200 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปีตาแคโรทีนความเข้มข้นสูง สำหรับข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่ต้องติดตั้งหน่วยแยกเพิ่ม แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ได้ เพราะถูกปล่อยสู่ความดันบรรยากาศแล้ว

วิธีที่ 2 ติดตั้งหน่วยแยก เพื่อปรับลดความดันของของผสมที่ได้จากเครื่องสกัดให้ปีตาแคโรทีนแยกออกจากของผสมหรือน้ำมันเพื่อให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น ข้อดีคือสามารถนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ในระบบได้ เพราะคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกลดความดันลงเพียงเพื่อให้ น้ำมันแยกออกจนหมดหรือเกือบหมดซึ่งยังอยู่ในช่วงความดันที่สามารถบีบเพิ่มความดันกลับมาใช้ได้ ข้อเสียคือต้องติดตั้งหน่วยแยกเพิ่ม

ค่าการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นกับความดันดำเนินการเป็นหลัก และมีค่าแตกต่างกันตามธรรมชาติของสารและอันตรกิริยาระหว่างสารเหล่านั้นกับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในน้ำมันที่ประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันหลายชนิด และองค์ประกอบเหล่านี้มีค่าการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกัน ดังนั้นถ้าเพิ่มเครื่องแยกในระบบเพื่อดำเนินการแยกโดยลดความดันเป็นลำดับขั้นหลายๆ ขั้น จึงจะสามารถแยกองค์ประกอบเหล่านั้นให้มีความบริสุทธิ์ได้

รายการอ้างอิง

1. Food and Agriculture Organization Statistical (FAOSTAT) database [Internet]. 2008 [cited 4 December, 2011]. Available from: <http://faostat.fao.org>.
2. การแปรรูปปาล์มน้ำมัน [Internet]. [cited 14 may, 2015]. Available from: <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-02.php>.
3. Ahmad AL, Chan CY, Shuker A. Isolation of carotenes from palm oil mill effluent and its use as a source of carotene. *Desalin Water Treat* 2009;7:251-256.
4. Choo YM, Ma AN, Yap SC. Carotenoid vitamin E and sterols in oils from *elaeis guineensis* Palm Oil Developments 1997;27:1-8.
5. Fernandez XER, Shier NW, Watkins BA. Effect of alkali saponification, enzymatic hydrolysis and storage time on the total carotenoid concentration of costarican crude palm oil. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2000;13:179-187.
6. Low KS, Lee CK, Kong LY. Decolorisation of crude palm oil by acid-activated spent bleaching earth. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 1998;72:67-73.
7. Muhammad SY, Choong TG, Chuah R, Yunus YH, Yap SC. Adsorption of β -carotene onto mesoporous carbon coated monolith in isopropyl alcohol and n-hexane solution: equilibrium and thermodynamic study. *Chemical Engineering Journal* 2010;164:178-182.
8. Ng JH, Tan B. Analysis of palm oil carotenoids by HPLC with diode-array detection. *Journal of Chromatographic Science* 1988;26(463-469).
9. Sabah E, Cinar M, Celik MS. Decolorization of vegetable oils: Adsorption mechanism of b-carotene on acid-activated sepiolite. *Food Chemistry*. 2007;100:1661-1668.
10. Sundram K, Sambanthamurthi R, Tan YA. Palm fruit chemistry and nutrition Asia Pacific *Journal of Clinical Nutrition* 2003;12:335-362.
11. Wahid MB, Abdullah SNA, Henson IE. Oil palm achievements and potential *Plant Prod Sci* 2005;8:288-297.

12. Rossi M, Gianazza M, Alamprese C, Stanga F. The role of bleaching clays and synthetic silica in palm oil physical refining. *Food Chemistry*. 2003;82:291-296.
13. Darnoko D, Cheryan M. Carotenoids from red palm methyl esters by nanofiltration. *Journal of American Oil Chemists Society*. 2006;83:365-370.
14. Chan KW, Baharin BS, Che Man YB, Takagi S. Adsorption isotherm studies of palm carotene extraction by synthetic polymer adsorbent. *Journal of Food Lipids*. 2000;7:127-141.
15. Lau HLN, Choo YM, Ma AN, Chuah CH. Characterization and supercritical carbon dioxide extraction of palm oil (*Elaeis Guineensis*). *Journal of Food Lipids*. 2006;13:210-221.
16. Choo YM, Yap SC, Ong ASH. Production of palm oil carotenoids concentrate and its potential application in nutrition. In: Ong ASH, Packer L (eds) *Lipid-soluble antioxidants, biochemistry and clinical application*. Birkhauser Verlag. 1992:243-253.
17. Choo YM, Yap SC, Ooi CK. Recovered oil from palm-pressed fiber: a good source of natural carotenoids, vitamin E, and sterols *J Am Oil Chem Soc*. 1996;73:599-602.
18. Wei PC, et al. Supercritical Fluid Extraction of Palm Carotenoids. *American Journal of Environmental Sciences*. 2005;4:264-269.
19. What is beta-carotene? What are benefit of beta-carotene? [Internet]. 2012 [cited 4 December 2014]. Available from: <http://www.medicalnewstoday.com/articles/252758.php>.
20. Beta Carotene [Internet]. 2011 [cited 4 December 2014]. Available from: <http://www.nutri-facts.org/eng/carotenoids/beta-carotene/health-functions/>.
21. Hudiyono S, Septian A. Optimization Carotenoids Isolation Of The Waste Crude Palm Oil Using α -Amylase, β -Amylase and Cellulase. . *Journal of Applied Chemistry*. 2012;2:7-12.
22. Data deposited in or computed [Internet]. 2012 [cited 14 December 2014]. Available from: <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/beta-carotene#section=Substance-Categorization-Classification>.

23. O'Neil MJ, (ed.). The Merck Index - An Encyclopedia of Chemicals Drugs and Biologicals. 13 ed. Whitehouse Station, NJ: Merck and Co., Inc.; 2001. 313 p.
24. Osol A, Hoover JE, al. e, (eds.). Remington's Pharmaceutical Sciences. 15 ed. Pennsylvania: Mack Publishing Co.; 1975.
25. Lide DR. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 86 ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis; 2005.
26. Ashford RD. Ashford's Dictionary of Industrial Chemicals. London, England: Wavelength Publications Ltd.; 1994.
27. Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology. 4 ed. New York: NY. John Wiley and Sons.
28. Green FJ. The Sigma-Aldrich Handbook of Stains Dyes and Indicators. Milwaukee: Aldrich Chemical Company, Inc.; 1991.
29. Estimation Program Interface (EPI) Suite [Internet]. [cited Oct 3, 2014]. Available from: <http://www.epa.gov/oppt/exposure/pubs/episuitedl.htm>.
30. Weast RC, (ed.). Handbook of Chemistry and Physics. 60 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc.; 1979.
31. Halliwell B, Gutteridge J. Free Radicals in Biology and Medicine. 3 ed. Oxford: Oxford University Press; 1999.
32. Pfander H. Key to Carotenoids. Basel: Birkhauser Verlag; 1987.
33. Paiva SAR, Russell RM. β -Carotene and other carotenoids as antioxidants. J Am Coll Nutr. 1999;18:426-433.
34. Khachik F, Spangler CJ, Smith JC, Canfield LM, Steck A, Pfander H. Identification quantification and relative concentrations of carotenoids and their metabolites in human milk and serum. Anal Chem.69:1873-1881.
35. Ziegler RG, Mayne ST, Swanson CA. Nutrition and lung cancer. Cancer Causes Control. 1996;7:157-177.
36. Peto R, Doll R, Buckley JD, Sporn MB. Can dietary beta-carotene materially reduce human cancer rates? . Nature 1981;290:201-208.
37. Conn PF, Schalch W, Truscott TG. The singlet oxygen and b-carotene interaction. J Photochem Photobiol B Biol 1991;11:41-47.

38. DiMascio P, Kaiser S, Sies H. Lycopene as the most efficient biological carotenoid singlet oxygen quencher. *Arch Biochem Biophys*. 1989;274:532-538.
39. Burton GW, Ingold KU. β -Carotene: an unusual type of lipid anti-oxidant. *Science*. 1984;224:569-573.
40. Hill TJ, Land EJ, McGarvey DJ, Schalch W, Tinkler JH, TG. T. Interactions between carotenoids and the $\text{CCl}_3\text{O}^\cdot$ radical. *J Am Chem Soc*. 1995;117:8322-8326.
41. Everett SA, Dennis MF, Patel KB, Maddix S, Kundu SC, Willson RL. Scavenging of nitrogen dioxide, thiyl, and sulfonyl free radicals by the nutritional anti-oxidant β -carotene. *J Biol Chem*. 1996;271:3988-3994.
42. Mortensen A, Skibsted LH. Kinetics of parallel electron transfer from β -carotene to phenoxy radical and adduct formation between phenoxy radical and β -carotene. *Free Radic Res* 1996;25:515-523.
43. Christensen RL. The electronic states of carotenoids. In: Frank HA, Young AJ, Britton G, Cogdell RJ, editors. *The Photochemistry of Carotenoids*. Dordrecht: Kluwer Academic; 1999. p. 137-157.
44. Marston G, Truscott TG, Wayne RP. Phosphorescence of β -carotene. *J Chem Soc Faraday Trans*. 1995(91):4059-4061.
45. Edge R. Carotenoid radicals and the interaction of carotenoids with active oxygen species. In: Truscott TG, Frank HA, Young AJ, Britton G, Cogdell RJ, editors. *The Photochemistry of Carotenoids*. Dordrecht: Kluwer Academic; 1999. p. 223-234.
46. Foote CS, Denny RW. Chemistry of singlet oxygen: VIII quenching by β -carotene. *J Am Chem Soc*. 1968;90:6233-6235.
47. Wilkinson F, Ho WT. Electronic energy transfer from singlet molecular oxygen to carotenoids. *Spectrosc Lett*. 1978;11:425-436.
48. Baltshun D, Beutner S, Briviba K, Martin HD, Paust J, Peters M, et al. *Liebigs Ann-Recueil*. 1997;9:1887-1893.
49. Mortensen A, Skibsted LH, Sampson J, Rice-Evans C, Everett SA. Comparative mechanisms and rates of free radical scavenging by carotenoid antioxidants. *FEBS Lett*. 1997;418:91-94.

50. Edge R, Land EJ, McGarvey D, Mulroy L, Truscott TG. Relative one-electron reduction of potentials of carotenoids radical cations and the interactions of carotenoids with the vitamin E radical cation. *JAmChem Soc.* 1998;120:4087-4090.
51. Rice-Evans CA, Sampson J, Bramley PM, Holloway DE. Why do we expect carotenoids to be antioxidants in vivo? *Free Radic Res.* 1997;26:381-398.
52. Martin HD, Ruck C, Schmidt M, Sell S, Beutner S, Mayer B, et al. Chemistry of carotenoid oxidation and free radical reactions. *Pure Appl Chem.* 1999;71:2253-2262.
53. Gruszecki WI. Carotenoids in membranes. In: Frank HA, Young AJ, Britton G, Cogdell RJ, editors. *The Photochemistry of Carotenoids.* Dordrecht: Kluwer Academic; 1999. p. 363-379.
54. Ruban AV, Horton P, Young AJ. Aggregation of higher plant xanthophylls: differences in absorption spectra and in dependency on solvent polarity. *J Photobiol Photobiochem B.* 1993;21:229-234.
55. Handleman GJ, Kujik FJ, Chatterjee A, Krinsky NI. Characterization of products formed during the autoxidation of b-carotene. *Free Radic BiolMed.* 1991;10:427-437.
56. Caris-Veyrat C, Amiot M-J, Ramasseul R, Marchon J-C. Mild oxidative cleavage of b,b-carotene by dioxygen induced by a ruthenium porphyrin catalyst: characterization of products and of some possible intermediates. *N J Chem.* 2001;25:203-206.
57. Liebler DC, Kennedy TA. Epoxide products of b-carotene antioxidant reactions. *Meth Enzymol* 1992;213:472-479.
58. Kennedy TA, Liebler DC. Peroxyl radical oxidation of beta-carotene: formation of beta-carotene epoxides. *Chem Res Toxicol.* 1991;4:290-295.
59. Seidlitz HK, Thiel S, Krins A, Mayer H. Solar radiation at the earth's surface. In: *Giacomoni PU, editor. Sun Protection in Man.* Amsterdam: Elsevier; 2001. p. 705-738.

60. Wenk J, Brenneisen P, Meewes C, Wlaschek M, Peters T, Blaudschun R, et al. UV-induced oxidative stress and photoaging. *Curr Probl Dermatol*. 2001;29:83-94.
61. Berneburg M, Krutmann J. Photoimmunology DNA repair and photocarcinogenesis. *J Photochem Photobiol B*. 2000;54:87-93.
62. Packer L, Valacchi G. Antioxidants and the response of skin to oxidative stress: vitamin E as a key indicator. *Skin Pharmacol Appl Skin Physiol* 2002;15:282-290.
63. Demmig-Adams B, Adams WJ. Antioxidants in photosynthesis and human nutrition. *Science* 2002;298:2149-2153.
64. Frank HA, Young AJ, Britton G, Cogdell RJ. *The Photochemistry of Carotenoids*. London: Kluwer Academic; 1999.
65. Ortonne JP. Photoprotective properties of skin melanin. *Br J Dermatol*. 2002;146:7-10.
66. Pinnell SR. Cutaneous photodamage oxidative stress and topical antioxidant protection. *J Am Acad Dermatol*. 2003;48:1-19.
67. Krutmann J. Ultraviolet A radiation-induced biological effects in human skin: relevance for photoaging and photodermatosis. *J Dermatol Sci*. 2000;23:S22-S26.
68. Murphy GM. Diseases associated with photosensitivity. *J Photochem Photobiol B*. 2001;64:93-98.
69. Wlaschek M, Tancheva-Poor I, Naderi L, Ma W, Schneider L, Razi-Wolf Z, et al. Solar UV irradiation and dermal photoaging. *J Photochem Photobiol B*. 2001;63:41-51.
70. Balin AK, Allen RG. Oxidative stress and skin cancer. In: Cutler RG, Rodriguez H, editors. *Critical Reviews of Oxidative Stress and Aging: Advances in Basic Science Diagnostics and Intervention*. River Edge, NJ: World Scientific; 2003. p. 955-965.
71. Clydesdale GJ, Dandie GW, Muller HK. Ultraviolet light induced injury: immunological and inflammatory effects. *Immunol Cell Biol* 2001;79:547-568.
72. Cesarini JP. Sunburn and apoptosis. In: Altmeyer P, Hoffmann K, Stücker M, editors. *Skin Cancer and UV Radiation*. Berlin: Springer-Verlag; 1997. p. 94-101.

73. Kulms D, Schwarz T. Molecular mechanisms of UV-induced apoptosis. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2000;16:195-201.
74. Mathews-Roth MM. Carotenoids in erythropoietic protoporphyria and other photosensitivity diseases. *Ann NY Acad Sci.* 1993;691:127-138.
75. Mathews-Roth MM, Pathak MA, Parrish JA, Fitzpatrick TB, Kass EH, Toda K, et al. A clinical trial of the effects of oral beta-carotene on the responses of human skin to solar radiation. *J Invest Dermatol* 1972;59:349-353.
76. Garmyn M, Ribaya-Mercado JD, Russell RM, Bhawan J, Gilchrist BA. Effect of betacarotene supplementation on the human sunburn reaction. *ExpDermatol.* 1995;4:104-111.
77. Wolf C, Steiner A, Ho'nigsmann H. Do oral carotenoids protect human skin against ultraviolet erythema psoralen phototoxicity and ultraviolet-induced DNA damage? *J Invest Dermatol.* 1988;90:55-57.
78. Lee J, Jiang S, Levine N, Watson RR. Carotenoid supplementation reduces erythema in human skin after simulated solar radiation exposure. *Proc Soc Exp Biol Med.* 2000;223:170-174.
79. Davidson G, Kritas S, Butler R. Stressed mucosa. *Nestle Nutr Workshop Ser Pediatr Program.* 2007;59:133-134.
80. Hess S, Zimmermann M. The effect of micronutrient deficiencies on iodine nutrition and thyroid metabolism. *J Vitam Nutr Res.* 2004;74(2):103-115.
81. Pizzorno L, Ferril F. Thyroid. In: Jones D, Quinn S, editors. *Textbook of Functional Medicine.* Gig Harbour, WA: Institute for Functional Medicine; 2005.
82. วิตามินเอ [Internet]. [cited may 14, 2015]. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/วิตามินเอ>.
83. Sen CD, Riedl KM, Narayanasam S, Curley RW, Schwartz SJ, Harrison EH. The Human Enzyme That Converts Dietary Provitamin A Carotenoids to Vitamin A Is a Dioxygenase. *The journal of biological chemistry* 2014;289:13661-1366.
84. Leuenberger MG, Engeloch-Jarret C, Woggon WD. The reaction mechanism of the enzyme-catalyzed central cleavage of b-carotene to retinal. *Angew Chem Int Ed Engl.* 2001;40:2613-2617.

85. Goodman DS, Huang HS, Shiratori T. Mechanism of the biosynthesis of vitamin A from b-carotene. *J Biol Chem* 1966;241:1929-1932.
86. Joshipura KJ, Hu FB, Manson JE, Stampfer MJ, Rimm EB, Speizer FE, et al. The effect of fruit and vegetable intake on risk for coronary heart disease. *Ann Intern Med*. 2001;134:1106-1114.
87. Mozaffarian D, Kumanyika SK, Lemaitre RN, Olson JL, Burke GL, Siscovick DS. Cereal fruit and vegetable fiber intake and the risk of cardiovascular disease in elderly individuals. *JAMA*. 2003;289:1659-1666.
88. Bazzano LA, He J, Ogden LG, Loria CM, Vupputuri S, Myers L, et al. Fruit and vegetable intake and risk of cardiovascular disease in US adults: the first National Health and Nutrition Examination Survey Epidemiologic Follow-up Study. *Am J Clin Nutr* 2002;76:93-99.
89. Liu S, Manson JE, Lee IM, Cole SR, Hennekens CH, Willett WC, et al. Fruit and vegetable intake and risk of cardiovascular disease: the Women's Health Study. *Am J Clin Nutr*. 2000;72:922-928.
90. Joshipura KJ, Ascherio A, Manson JE, Stampfer MJ, Rimm EB, Speizer FE, et al. Fruit and vegetable intake in relation to risk of ischemic stroke. *JAMA*. 1999;282(1233-1239).
91. Sacks FM, Svetkey LP, Vollmer WM, Appel LJ, Bray GA, Harsha D, et al. Effects on blood pressure of reduced dietary sodium and the Dietary Approaches to Stop Hypertension (DASH) diet. *N Engl J Med: DASH-Sodium Collaborative Research Group*; 2001.
92. de Lorgeril M, Salen P, Martin JL, Monjaud I, Delaye J, Mamelle N. Mediterranean diet traditional risk factors and the rate of cardiovascular complications after myocardial infarction: final report of the Lyon Diet Heart Study. *Circulation* 1999;99:779-785.
93. Trichopoulou A, Costacou T, Bamia C, Trichopoulos D. Adherence to a mediterranean diet and survival in a greek population. *N Engl J Med* 2003;348:2599-2608.
94. Young AJ, Lowe GM. Antioxidant and prooxidant properties of carotenoids. *Arch Biochem Biophys*. 2001;385:20-27.

95. Parker RS. Carotenoids in human blood and tissues. *J Nutr.* 1989;119:101-104.
96. Rouquerol F, Rouquerol L, Sing K. Adsorption by powders and porous solids. Academic Press. 1999.
97. Patterson HBW. Bleaching and Purifying Fats and Oils: Theory and Practice. 2 ed. Gary R: List; 2010.
98. Alley ER. Water quality control handbook. New York: Magraw-Hill; 2000.
99. Moreno-Castilla C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon.* 2004;42:83-94.
100. Foo KY, Hameed BH. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal.* 2010;156:2-10.
101. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. *J Am Chem Soc.* 1916;38:2221-2295.
102. Freundlich HMF. Uber die adsorption in losungen. *Phys Chem.* 1906;57:385-470.
103. Lagergren S. About the Theory of So- Called Adsorption of Soluble Substances. Handlingar: Band; 1898.
104. Ho YS, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry.* 1999;34:451-465.
105. Ahmad AL, Chan CY, Shukor SR, Mashitah MD. Adsorption kinetics and thermodynamics of β -carotene on silica-based adsorbent. *Chemical Engineering Journal.* 2009;148:378-384.
106. Wua Z, Li C. Kinetics and thermodynamics of β -carotene and chlorophyll adsorption onto acid-activated bentonite from Xinjiang in xylene solution. *Journal of Hazardous Materials.* 2009;171:582-587.
107. Norris FA. Extraction of fats and oils. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products.* 2. 4 ed. New York: John Wiley & Sons; 1982. p. 230-237.
108. Williams MA. Extraction of lipids from natural sources. In: Gunstone FD, Padley FB, editors. *Lipid Technologies and Applications.* New York: Marcel Dekker; 1997. p. 127-135.
109. Bockisch M. *Nahrungsfette und -Ole.* Stuttgart: Ulmer; 1993.

110. Philip TJ, Rudolf E. Extraction Optimization in Food Engineering. Edited by George Liadakis and Constantina Tzia. 2003.
111. Ronald W. Solvent Extraction Principles and Practice Revised and Expanded 2004.
112. Selva P, Susana BB, Esteban AB. Supercritical Fluid Extraction of Nutraceuticals and Bioactive Compounds 2007.
113. Francis AW. Ternary systems of liquid carbon dioxide. *J Phys Chem.* 1954;58:1099.
114. Stahl E, Quirin KW. Dense gas extraction on a laboratory scale: A survey of recent results. *Fluid Phase Equilibria.* 1983;8:93–105.
115. Palma M, al. e. Fractional extraction of compounds from grape seeds by supercritical fluid extraction and analysis for antimicrobial and agrochemical activities. *J Agric Food Chem.* 1999;47:5044.
116. Leal PF, al. e. Functional properties of spice extracts obtained via supercritical fluid extraction. *J Agric Food Chem.* 2003;51(2520).
117. Vági E, al. e. Essential oil composition and antimicrobial activity of *Origanum majorana* extracts obtained with ethyl alcohol and supercritical carbon dioxide. *Food Res Int.* 2005;38:51.
118. Arlorio M, al. e. Antioxidant and biological activity of phenolic pigments from *Theobromacacao* hulls extracted with supercritical CO₂. *Food Res Int.* 2005;38:1009.
119. McHugh MA, Krukonis VJ. *Supercritical Fluid Extraction: Principles and Practice.* Butterworth, Stoneham: MA; 1986.
120. Ko TF, al. e. Antimutagenicity of supercritical CO₂ extracts of *Terminalia catappa* leaves and cytotoxicity of the extracts to human hepatoma cells. *J Agric Food Chem.* 2003;51:3546.
121. El-Ghorab AH, al. e. Antioxidant activity of Egyptian *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostris* leaf extracts. *Nahrung.* 2003;47:41.
122. Dapkevicius A, al. e. Antioxidant activity of extracts obtained by different isolation procedures from some aromatic herbs grown in Lithuania. *J Sci Food Agric.* 1998;77:140.

123. Carvalho RN. Supercritical fluid extraction from rosemary (*Rosmarinus officinalis*): Kinetic data extract's global yield composition and antioxidant activity *J Supercrit Fluids* 2005;35:197.
124. Ashraf-Khorassani M, Taylor LT. Sequential fractionation of grape seeds into oils polyphenols and procyanidins via a single system employing CO₂-based fluids *J Agric Food Chem.* 2004:2440.
125. Nguyen U, al. e, inventors Process for extracting antioxidants from labiatae herbs. U.S.1991.
126. Mukhopadhyay M. Natural Extracts Using Supercritical Carbon Dioxide. CRC Press, Boca Raton: FL; 2000.
127. Simándi B, al. e. Supercritical carbon dioxide extraction and fractionation of oregano oleoresin. *Food Res Int.* 1998;31:723.
128. Esquivel MM, Ribeiro MA, Bernardo-Gil MG. Supercritical extraction of savory oil: Study of antioxidant activity and extract characterization. *J Supercritical Fluids.* 1999;14:129.
129. del Valle JM, al. e. Recovery of antioxidants from boldo (*Peumus boldus* M.) by conventional and supercritical CO₂ extraction. *Food Res Int.* 2004;37:695.
130. Quitain AT, Katoh S, Moriyoshi T. Isolation of antimicrobials and antioxidants from moso-bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) by supercritical CO₂ extraction and subsequent hydrothermal treatment of the residues. *Ind Eng Chem Res.* 2004;43:1056.
131. López-Sebastian S, al. e. Dearomatization of antioxidant rosemary extracts by treatment with supercritical carbon dioxide. *J Agric Food Chem.* 1998;46:13.
132. Hadolin M, al. e. Isolation and concentration of natural antioxidants with highpressureextraction, . *Innov Food Sci Emerging Technol.* 2004;5:245l.
133. Murga R, al. e. Extraction of natural complex phenols and tannins from grape seeds by using supercritical mixtures of carbon dioxide and alcohol. *J Agric Food Chem.* 2000;48:3408.
134. Gast K, Machado N, Brunner G. Countercurrent extraction of vitamins from crude palm oil. *Supercritical Fluids.* Spain: Ainia; 2004.

135. Señoráns FJ, al. e. Isolation of antioxidant compounds from orange juice by using countercurrent supercritical fluid extraction (CC-SFE). *J Agric Food Chem.* 2001;49:6039.
136. Ribeiro MA, Bernardo-Gil MG, Esquivel MM. *Melissa officinalis* L.: Study of antioxidant activity in supercritical residues. *J Supercritical Fluids.* 2001;21:51.
137. Louli V, Ragoussis N, Magoulas K. Recovery of phenolic antioxidants from wine industry by-products. *Biores Technol.* 2004;92:201.
138. Ibáñez E, al. e. Supercritical fluid extraction and fractionation of different preprocessed Rosemary plants. *J Agric Food Chem.* 1999;47:1400.
139. Gugl̈ustündag̈ O, Temelli F. Correlating the solubility behavior of minor lipid components in supercritical carbon dioxide. *J Supercritical Fluids.* 2004;31:235.
140. S̈anal IS, al. e. Recycling of apricot pomace by supercritical CO₂ extraction. *J Supercritical Fluids.* 2004;32:221.
141. Vasapollo G, al. e. Innovative supercritical CO₂ extraction of lycopene from tomato in the presence of vegetable oil as co-solvent. *J Supercritical Fluids.* 2004;29:87.
142. Cortesi A, al. e. Effect of chemical structure on the solubility of antioxidants in supercritical carbon dioxide: Experimental data and correlation. *J Supercritical Fluids.* 1999;14:139.
143. Johannsen M, Brunner G. Solubilities of the fat-soluble vitamins A D E and K in supercritical carbon dioxide *J Chem Eng Data.* 1997;42:106.
144. Fornari T, al. e. A new development in the application of the group contribution associating equation of state to model solid solubilities of phenolic compounds in SC-CO₂. *Ind Eng Chem Res.* 2005;44:8147.
145. Diaz-Reinoso B, al. e. Supercritical CO₂ extraction and purification of compounds with antioxidant activity. *J Agric Food Chem.* 2006;54:2441.
146. Christov M, Dohrn R. High-pressure fluid phase equilibria: Experimental methods and systems investigated (1994–1999). *Fluid Phase Equilibria.* 2002;202:153.
147. Lucien F, Foster NR. Solubilities of solid mixtures in supercritical carbon dioxide: A review. *J Supercritical Fluids.* 2000;17:111.

148. Díaz S, Espinosa S, Brignole EA. Citrus peel oil deterpenation with supercritical fluids. *J Supercritical Fluids*. 2005;35:49.
149. del Valle JM, de la Fuente JC, Cardarelli DA. Contributions to supercritical extraction of vegetable substrates in Latin America. *J Food Eng*. 2005;67:35.
150. Reverchon E. Supercritical fluid extraction and fractionation of essential oils and related products. *J Supercritical Fluids*. 1997;10:1.
151. Chrastil J. Solubility of solids and liquids in supercritical CO₂. *J Phys Chem*. 1982;86:3016.
152. Chen CC, al. e. Vapor-liquid equilibria of carbon dioxide with linoleic acid α -tocopherol and triolein at elevated pressures. *Fluid Phase Equilibria*. 2000;175:107.
153. Skerget M, Knez Z. Solubility of binary solid mixture β -carotene-capsaicin in dense CO₂. *J Agric Food Chem*. 1997;45:2066.
154. Pereira PJ, al. e. High pressure phase equilibrium for α -tocopherol + CO₂ *Fluid Phase Equilibria*. 2004;216:53.
155. Fang T, al. e. Phase equilibria for binary systems of methyl oleate-supercritical CO₂ and α -tocopherol-supercritical CO₂. *J Supercritical Fluids*. 2004;30:1.
156. Fang T, al. e. Phase equilibria for the ternary system methyl oleate + tocopherol + supercritical CO₂. *J Chem Eng Data*. 2005;50:390.
157. Stoldt J, Saure C, Brunner G. Phase equilibria of fat compounds with supercritical carbon dioxide. *Fluid Phase Equilibria*. 1996;116:399.
158. Stoldt J, Brunner G. Phase equilibrium measurements in complex systems of fats fat compounds and supercritical carbon dioxide *Fluid Phase Equilibria*. 1998;146:269.
159. Cygnarowicz ML, Maxwell RJ, Seider WD. Equilibrium solubilities of β -carotene in supercritical carbon dioxide. *Fluid Phase Equilibria*. 1990;59:57.
160. Tuma D, Schneider GM. Determination of the solubilities of dyestuffs in near and supercritical fluids by a static method up to 180 MPa. *Fluid Phase Equilibria*. 743:158-60.

161. Saldaña MDA, al. e. Comparison of the solubility of β -carotene in supercritical CO₂ based on a binary and a multicomponent complex system. *J Supercritical Fluids*. 2006;342:37.
162. Skerget M, Knez Z, Habulin M. Solubility of β -carotene and oleic acid in dense CO₂ and data correlation by a density based model. *Fluid Phase Equilibria*. 1995;131:109.
163. Baumann D, al. e. Supercritical carbon dioxide extraction of marigold at high pressures: Comparison of analytical and pilot-scale extraction. *Phytochem Anal*. 2004;226:15.
164. Fernández MA, Sáenz MT, García MD. Anti-inflammatory activity in rats and mice of phenolic acids isolated from *Scrophularia frutescens*. *J Pharm Pharmacol*. 1998;50:1183.
165. Zang LY, al. e. Effect of antioxidant protection by p-coumaric acid on low-density lipoprotein cholesterol oxidation. *Am J Physiol Cell Physiol*. 2000;279:C954.
166. Damjanović B, al. e. Extraction of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) seeds with supercritical CO₂: Comparison with hydrodistillation. *Food Chem*. 2005;143:92.
167. Smith RLJ, al. e. Separation of cashew (*Anacardium occidentale* L.) nut shell liquid with supercritical carbon dioxide *Biores Technol*. 2003;1:88.
168. Seger C, al. e. Characterization of supercritical fluid extracts of St. John's Wort (*Hypericum perforatum* L.) by HPLC-MS and GC-MS *Eur J Pharm Sci*. 2004;453:21.
169. Vági E, al. e. Phenolic and triterpenoid antioxidants from *Origanum majorana* L. herb and extracts obtained with different solvents. *J Agric Food Chem*. 2005;17:53.
170. Giannuzzo AN, al. e. Supercritical fluid extraction of naringin from the peel of *Citrus paradisi*. *Phytochem Anal*. 2003;221:14.
171. Hu Q, Hu Y, Xu J. Free radical-scavenging activity of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) extracts by supercritical carbon dioxide extraction. *Food Chem*. 2005;85:91.

172. Davarnejad R, Kassim KM, Zainal A, Sata SA. Supercritical fluid extraction of β -carotene from crude palm oil using CO_2 . *Journal of Food Engineering*. 2008;89:472-8.
173. Mustapa AN, Manan ZA, Azizi CYM, Setianto WB, Omar AKM. Extraction of β -carotene from palm oil mesocarp using sub-critical R134a. *Food Chemistry*. 2011;125:262-7.
174. Saldana MDA, Temelli F, Guigard SE, Tomberli B, Gray CG. Apparent solubility of lycopene and β -carotene in supercritical CO_2 , CO_2 + ethanol and CO_2 + canola oil using dynamic extraction of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 2010;99:1-8.
175. Muhammada MA, Khana TSY, Choonga TG, Chuaha R, Yunusa YH, Yapd T. Desorption of β -carotene from mesoporous carbon coated monolith: Isotherm kinetics and regeneration studies. *Chemical Engineering Journal*. 2011;173:474-479.
176. Huang JH, Liu YF, Liu Y, Wang XG. Effect of attapulgit pore size distribution on soybean oil bleaching. *J Am Oil Chem Soc*. 2007;84:687-692.
177. Wua Z, Li C. Kinetics and thermodynamics of β -carotene and chlorophyll adsorption onto acid-activated bentonite from Xinjiang in xylene solution. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;171(1-3):582-587.
178. Tong JM, Wu ZS, Sun XF, Xu XL, Li C. Adsorption kinetics of β -carotene and chlorophyll from model oil solutions onto acid activated bentonite. *Chin J Chem Eng*. 2008;16:270-276.
179. Alkan M, Demirbas O, Dogan M. Microporous and Mesoporous Materials. 2007;101:388-396.
180. Sabah E, Cinar M, Celik MS. *Food Chemistry* 2007;100:1661-8.
181. Lagergen S. *Handlingar*. 1898;24:1-39.
182. Ho YS, McKay G. *Chemical Engineering Journal*. 1998;70:115-124.
183. Silvaa SM, Sampaioc KA, Cerianib R, Verhéc R, Stevensc C, Greytd WD, et al. Effect of type of bleaching earth on the final color of refined palm oil. *Food Science and Technology*. 2014;59(2):1258-1264.

184. Bonnie TYP, Choo YM. Oxidation and thermal degradation of carotenoids. *J Oil Palm Res.* 2003;2(1):62-78.
185. Krinsky NI, Yeum KJ. Carotenoid-radical interactions. *Biochemical and Biophysical Research Communications.* 2003;305(3):754-760.
186. Mordi RC, Walton JC, Burton GW, Hughes L, Ingold KU, Lindsay DA, et al. Oxidative-degradation of beta-carotene and beta-apo-8'-carotenal. *Tetrahedron.* 1993;49(4):911-928.
187. Neoh BK, Thang YM, Zain MZM, Junaidi A. Palm pressed fibre oil: A new opportunity for premium hardstock? *International Food Research Journal.* 2011;18:769-773.
188. Sanagi MM, See HH, Ibrahim WAW, Naim AA. Determination of carotene tocopherols and tocotrienols in residue oil from palm pressed fiber using pressurized liquid extraction-normal phase liquid chromatography. *Analytica Chimica Acta.* 2005;538:71-76.
189. Johannsen M, Brunner G. *J Chem Eng Data.* 1997;42(1):106-111.
190. King JW. *J Chromatogr Sci.* 1989;27(7):355-364.
191. Chrastil JJ. *Phys Chem.* 1982;86(15):3016-3021.
192. Foster NR, Yun SLJ, Ting SST. *J Supercrit Fluids.* 1991;4(2):127-130.
193. Gordillo D, Pereyra C, Martinez OE. *J J Chem Eng Data.* 2004;49(3):435-438.
194. Mendes RL, Nobre BP, Coelho JP, Palavra AF. *J Supercrit Fluids.* 1999;16(2):99-106.
195. Ram BG, Jae-Jin S. *Solubility in supercritical carbon dioxide.* Boca Raton: CRC Press; 2006.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ข้อมูลและผลการทดลอง

ก1 การดูดซับบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

ก1.1 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับ

ตารางภาคผนวกที่ ก.1 ความเข้มข้นบีตาแคโรทีนในไบโอดีเซลที่เวลาใดๆ สำหรับการดูดซับบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

Adsorbent type	Time (h)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
BE01	0.0	2430.25	2418.57	2414.88	2421.23	8.02
	0.5	1156.12	1137.89	1140.79	1144.93	9.80
	1.0	680.75	684.32	678.90	681.32	2.76
	2.0	400.56	402.51	426.55	409.87	14.48
	5.0	329.15	328.54	326.40	328.03	1.45
	8.0	315.63	313.89	318.05	315.86	2.09
	22.0	333.56	334.25	303.00	323.60	17.84
	32.0	320.75	330.51	324.98	325.41	4.89
	48.0	290.64	300.75	298.98	296.79	5.40
BE02	0.0	2430.25	2418.57	2414.88	2421.23	8.02
	0.5	650.21	641.32	643.71	645.08	4.60
	1.0	300.52	299.15	300.51	300.06	0.79
	2.0	20.01	20.35	20.30	20.22	0.18
	5.0	19.45	19.88	20.70	20.01	0.64
	8.0	19.85	19.66	20.04	19.85	0.19
	22.0	19.02	19.88	19.27	19.39	0.44
	32.0	19.15	19.24	19.21	19.20	0.05
	48.0	19.23	19.56	19.41	19.40	0.17

ตารางภาคผนวกที่ ก.2 ความเข้มข้นปีตาแคโรทีนในไบโอดีเซลที่เวลาใดๆ สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว (ต่อ)

Adsorbent type	Time (h)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
NaB	0.0	2430.25	2418.57	2414.88	2421.23	8.02
	0.5	2385.26	2386.42	2375.94	2382.54	5.75
	1.0	2307.53	2301.22	2308.17	2305.64	3.84
	2.0	2248.74	2258.99	2226.37	2244.70	16.68
	5.0	2210.55	2198.74	2196.11	2201.80	7.69
	8.0	2199.56	2196.73	2206.59	2200.96	5.08
	22.0	2199.99	2199.85	2202.41	2200.75	1.44
	32.0	2198.56	2199.76	2203.42	2200.58	2.53
	48.0	2199.84	2201.53	2200.76	2200.71	0.85
CaB	0.0	2430.25	2418.57	2414.88	2421.23	8.02
	0.5	2300.15	2297.86	2297.40	2298.47	1.47
	1.0	2227.89	2231.54	2230.75	2230.06	1.92
	2.0	2089.55	2091.55	2091.60	2090.90	1.17
	5.0	2000.01	2004.32	1999.42	2001.25	2.68
	8.0	1989.56	1978.96	1972.56	1980.36	8.59
	22.0	1975.43	1976.24	1964.99	1972.22	6.27
	32.0	1972.01	1972.02	1971.97	1972.00	0.03
	48.0	1975.88	1976.72	1962.14	1971.58	8.19

ตารางภาคผนวกที่ ก.3 ความจุการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวตัวดูดซับที่เวลาใดๆ สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

Adsorbent type	Time (h)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
BE01	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	251.75	253.05	251.75	252.18	0.75
	1.0	345.68	342.67	343.01	343.79	1.65
	2.0	401.05	398.35	392.87	397.42	4.17
	5.0	415.16	412.97	412.66	413.59	1.36
	8.0	417.83	415.86	414.31	416.00	1.76
	22.0	414.28	411.84	417.28	414.47	2.73
	32.0	416.81	412.58	412.94	414.11	2.35
	48.0	422.76	418.46	418.08	419.77	2.60
BE02	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	353.18	352.63	351.42	352.41	0.90
	1.0	422.57	420.52	419.52	420.87	1.55
	2.0	478.22	475.84	475.11	476.39	1.63
	5.0	478.33	475.93	475.04	476.43	1.71
	8.0	478.25	475.97	475.17	476.46	1.60
	22.0	478.42	475.93	475.32	476.56	1.64
	32.0	478.39	476.06	475.33	476.59	1.60
	48.0	478.38	475.99	475.29	476.55	1.62

ตารางภาคผนวกที่ ก.4 ความจุการดูดซับบีตาแคโรทีนบนพื้นผิวตัวดูดซับที่เวลาใดๆ สำหรับการดูดซับบีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว (ต่อ)

Adsorbent type	Time (h)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
NaB	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	9.17	6.55	7.94	7.89	1.31
	1.0	25.02	23.92	21.75	23.57	1.66
	2.0	37.01	32.53	38.43	35.99	3.08
	5.0	44.79	44.82	44.60	44.74	0.12
	8.0	47.03	45.23	42.46	44.91	2.30
	22.0	46.94	44.59	43.32	44.95	1.84
	32.0	47.24	44.61	43.11	44.99	2.09
	48.0	46.97	44.25	43.65	44.96	1.77
CaB	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	25.50	23.66	23.03	24.06	1.29
	1.0	39.66	36.66	36.09	37.47	1.92
	2.0	66.78	64.10	63.36	64.75	1.80
	5.0	84.33	81.19	81.43	82.32	1.75
	8.0	86.38	86.16	86.69	86.41	0.27
	22.0	89.15	86.70	88.18	88.01	1.23
	32.0	89.82	87.52	86.81	88.05	1.57
	48.0	89.06	86.60	88.74	88.13	1.33

ตารางภาคผนวกที่ ก.5 ร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนในไบโอดีเซลที่เวลาใดๆ สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

Adsorbent type	Time (h)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
BE01	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	52.43	52.95	52.76	52.71	0.27
	1.0	71.99	71.71	71.89	71.86	0.14
	2.0	83.52	83.36	82.34	83.07	0.64
	5.0	86.46	86.42	86.48	86.45	0.03
	8.0	87.01	87.02	86.83	86.95	0.11
	22.0	86.27	86.18	87.45	86.64	0.71
	32.0	86.80	86.33	86.54	86.56	0.23
	48.0	88.04	87.56	87.62	87.74	0.26
BE02	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	73.25	73.48	73.34	73.36	0.12
	1.0	87.63	87.63	87.56	87.61	0.04
	2.0	99.18	99.16	99.16	99.16	0.01
	5.0	99.20	99.18	99.14	99.17	0.03
	8.0	99.18	99.19	99.17	99.18	0.01
	22.0	99.22	99.18	99.20	99.20	0.02
	32.0	99.21	99.20	99.20	99.21	0.00
	48.0	99.21	99.19	99.20	99.20	0.01

ตารางภาคผนวกที่ ก.6 ร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนในไบโอดีเซลที่เวลาใดๆ สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว (ต่อ)

Adsorbent type	Time (h)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
NaB	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	1.85	1.33	1.61	1.60	0.26
	1.0	5.05	4.85	4.42	4.77	0.32
	2.0	7.47	6.60	7.81	7.29	0.62
	5.0	9.04	9.09	9.06	9.06	0.02
	8.0	9.49	9.17	8.63	9.10	0.44
	22.0	9.47	9.04	8.80	9.11	0.34
	32.0	9.53	9.05	8.76	9.11	0.39
	48.0	9.48	8.97	8.87	9.11	0.33
CaB	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	5.35	4.99	4.86	5.07	0.25
	1.0	8.33	7.73	7.62	7.89	0.38
	2.0	14.02	13.52	13.39	13.64	0.33
	5.0	17.70	17.13	17.20	17.35	0.31
	8.0	18.13	18.18	18.32	18.21	0.10
	22.0	18.71	18.29	18.63	18.54	0.23
	32.0	18.86	18.46	18.34	18.55	0.27
	48.0	18.70	18.27	18.75	18.57	0.26

ตารางภาคผนวกที่ ก.7 ความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนในไปโอดีเซลที่ภาวะสมดุลที่ร้อยละตัวดูดซับต่างๆ

Adsorbent type	% Adsorbent (%wt./V.)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
BE01	0.1	1781.23	1772.8	1764.32	1772.78	8.46
	0.2	1373.39	1367.69	1355.04	1365.37	9.39
	0.4	777.21	757.25	757.40	763.95	11.48
	0.6	437.5	433.57	435.98	435.68	1.98
BE02	0.1	1639.81	1625.01	1621.26	1628.69	9.81
	0.2	1174.49	1177.79	1190.37	1180.88	8.38
	0.4	47.50	23.62	44.23	38.45	12.95
	0.6	18.46	15.57	23.46	19.16	3.99
NaB	0.1	2332.22	2321.02	2318.50	2323.91	7.30
	0.2	2291.41	2283.49	2278.04	2284.31	6.72
	0.4	2252.49	2234.25	2234.92	2240.55	10.34
	0.6	2211.01	2199.39	2216.82	2209.07	8.87
CaB	0.1	2170.07	2157.02	2158.81	2161.97	7.07
	0.2	2034.49	2037.15	2035.83	2035.82	1.33
	0.4	1910.33	1904.01	1907.77	1907.37	3.18
	0.6	1905.07	1884.93	1889.55	1893.18	10.55

ตารางภาคผนวกที่ ก.8 ความจุการดูดซับบีตาแคโรทีนบนพื้นผิวตัวดูดซับที่ภาวะสมดุลที่ร้อยละตัวดูดซับต่างๆ

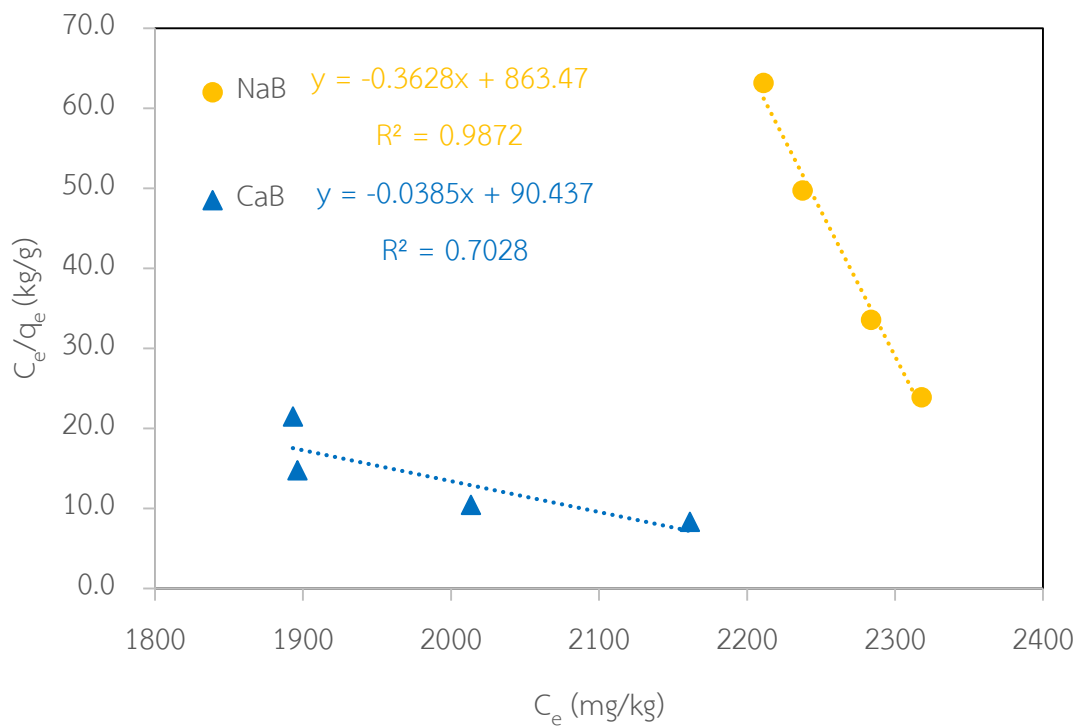
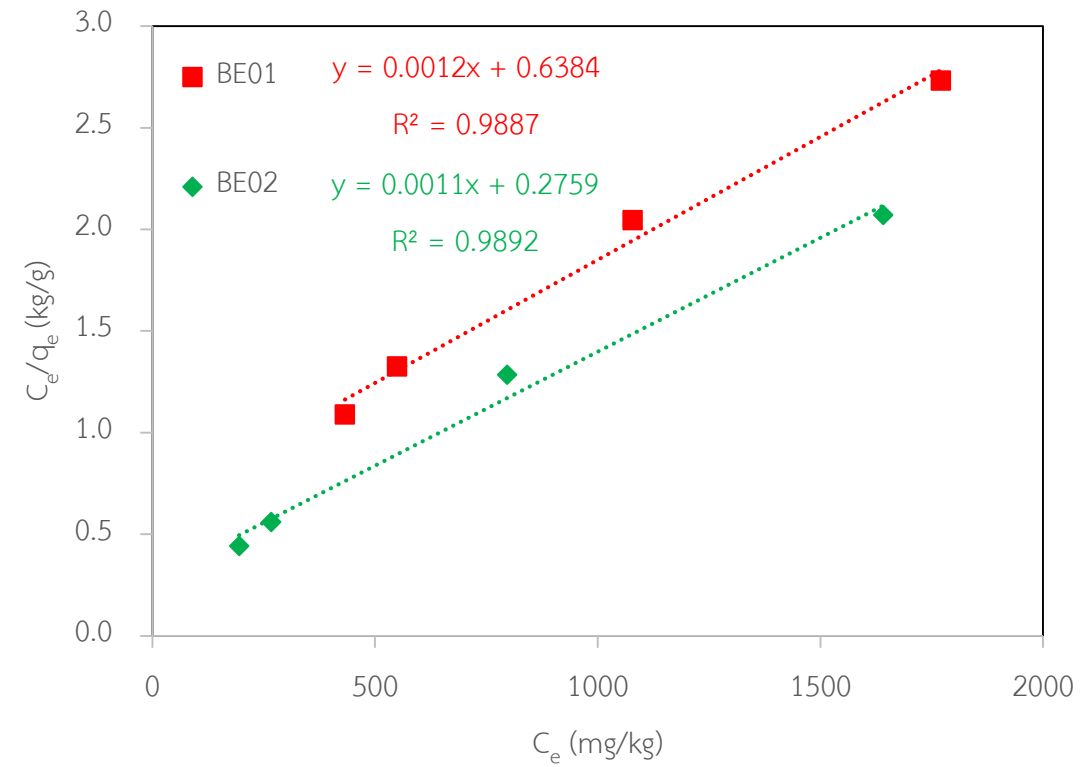
Adsorbent type	% Adsorbent (%wt./V.)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
BE01	0.1	649.02	645.77	650.56	648.45	2.45
	0.2	528.43	525.44	529.92	527.93	2.28
	0.4	413.26	415.33	414.37	414.32	1.04
	0.6	398.55	397.00	395.78	397.11	1.39
BE02	0.1	790.44	793.56	793.62	792.54	1.82
	0.2	627.88	620.39	612.25	620.17	7.82
	0.4	476.55	478.99	474.13	476.56	2.43
	0.6	442.53	440.11	440.41	441.02	1.32
NaB	0.1	98.03	97.55	96.38	97.32	0.85
	0.2	69.42	67.54	68.42	68.46	0.94
	0.4	44.44	46.08	44.99	45.17	0.83
	0.6	36.54	36.53	33.01	35.36	2.04
CaB	0.1	260.18	261.55	256.07	259.27	2.85
	0.2	197.88	190.71	189.52	192.70	4.52
	0.4	129.98	128.64	126.78	128.47	1.61
	0.6	87.53	88.94	87.55	88.01	0.81

ตารางภาคผนวกที่ ก.9 ร้อยละการกำจัดออกของปีตาแคโรทีนบนในไบโอดีเซลที่ภาวะสมดุลที่ร้อยละตัวดูดซับต่างๆ

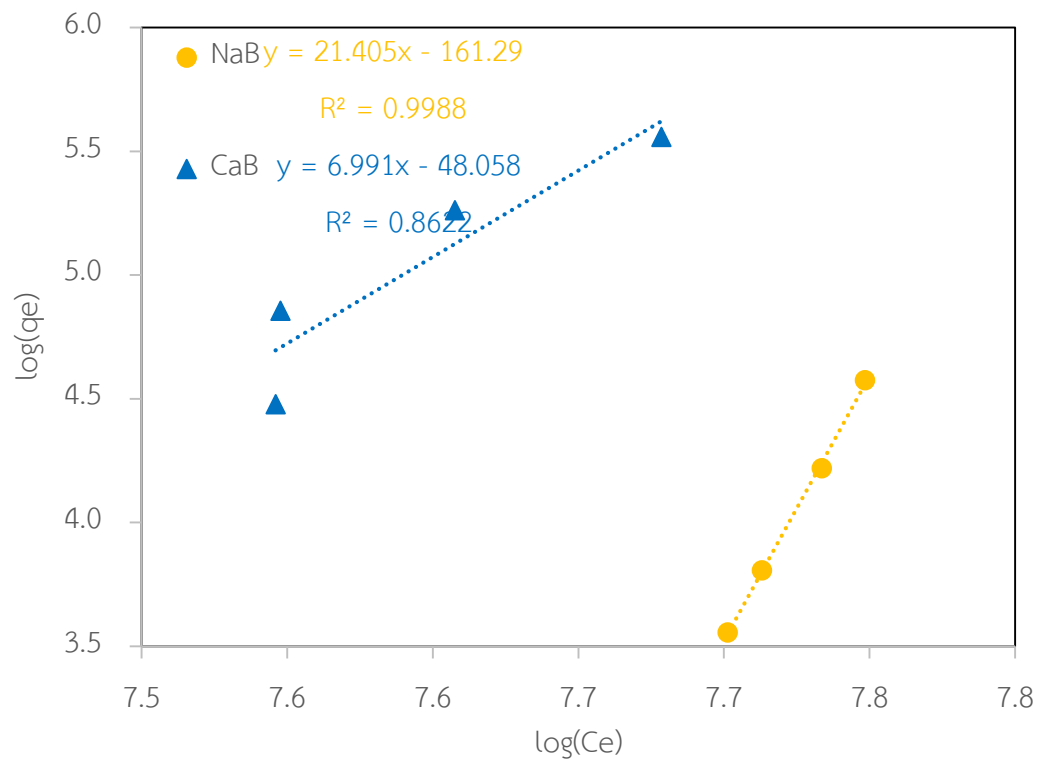
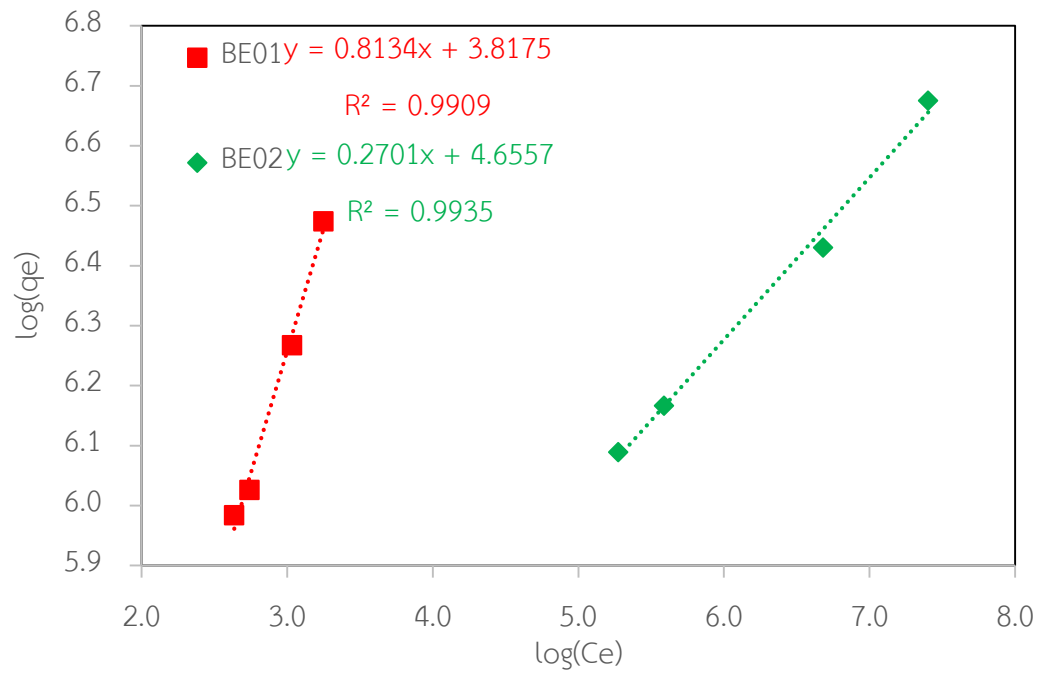
Adsorbent type	% Adsorbent (%wt./V.)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
BE01	0.1	26.71	26.70	26.94	26.78	0.14
	0.2	43.49	43.45	43.89	43.61	0.24
	0.4	68.02	68.69	68.64	68.45	0.37
	0.6	82.00	82.07	81.95	82.01	0.06
BE02	0.1	32.53	32.81	32.86	32.73	0.18
	0.2	51.67	51.30	50.71	51.23	0.49
	0.4	98.05	99.02	98.17	98.41	0.53
	0.6	99.24	99.36	99.03	99.21	0.17
NaB	0.1	4.03	4.03	3.99	4.02	0.02
	0.2	5.71	5.59	5.67	5.65	0.06
	0.4	7.31	7.62	7.45	7.46	0.15
	0.6	9.02	9.06	8.20	8.76	0.49
CaB	0.1	10.71	10.81	10.60	10.71	0.11
	0.2	16.28	15.77	15.70	15.92	0.32
	0.4	21.39	21.28	21.00	21.22	0.20
	0.6	21.61	22.06	21.75	21.81	0.23

ตารางภาคผนวกที่ ก.10 ข้อมูลสำหรับการสร้างไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ และแบบฟรุนด์ลิช

Adsorbent type	C_e (mg/kg)	q_e (mg/g)	C_e/q_e (g/kg)	$\log(C_e)$	$\log(q_e)$
BE01	1772.78	648.45	2.73	3.25	2.81
	1365.37	527.93	2.59	3.14	2.72
	763.95	414.32	1.84	2.88	2.62
	435.68	397.11	1.10	2.64	2.60
BE02	1628.69	792.54	2.06	3.21	2.90
	1180.88	620.17	1.90	3.07	2.79
	38.45	476.56	0.08	1.58	2.68
	19.16	441.02	0.04	1.28	2.64
NaB	2323.91	97.32	23.88	3.37	1.99
	2284.31	68.46	33.37	3.36	1.84
	2240.55	45.17	49.60	3.35	1.65
	2209.07	35.36	62.47	3.34	1.55
CaB	2161.97	259.27	8.34	3.33	2.41
	2035.82	192.70	10.56	3.31	2.28
	1907.37	128.47	14.85	3.28	2.11
	1893.18	88.01	21.51	3.28	1.94



รูปภาคผนวกที่ ก.1 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงก์เมียร์
สำหรับการดูดซับบีตาแคโรทีนจากไปโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ
ด้วยตัวดูดซับประเภท (บน) BE01 และ BE02 (ล่าง) NaB และ CaB



รูปภาคผนวกที่ ก.2 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช
 สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ
 ด้วยตัวดูดซับประเภท (บน) BE01 และ BE02 (ล่าง) NaB และ CaB

ก1.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ตารางภาคผนวกที่ ก.11 ข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง เสมือนและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน สำหรับการดูดซับปีตาแคโรทีน จากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว

Adsorbent type	Time (h)	q_t (mg/g)	$\ln(q_e - q_t)$	t/q_t (h·g/mg)
BE01	0.0	0.00	6.04	-
	0.5	252.18	5.12	0.00
	1.0	343.79	4.33	0.00
	2.0	397.42	3.11	0.01
	5.0	413.59	1.82	0.01
	8.0	416.00	1.33	0.02
	22.0	414.47	1.67	0.05
	32.0	414.11	1.73	0.08
	48.0	419.77	-4.37	0.11
	BE02	0.0	0.00	6.17
0.5		352.41	4.82	0.00
1.0		420.87	4.02	0.00
2.0		476.39	-1.78	0.00
5.0		476.43	-2.06	0.01
8.0		476.46	-2.35	0.02
22.0		476.56	-5.52	0.05
32.0		476.59	-5.07	0.07
48.0		476.55	-5.12	0.10

ตารางภาคผนวกที่ ก.12 ข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง
 เสมือนและแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน สำหรับการดูดซับบีตาแคโรทีน
 จากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับประเภทดินเหนียว (ต่อ)

Adsorbent type	Time (h)	Avg.	$\ln(q_e - q_t)$	t/q_t (h·g/mg)
NaB	0.0	0.00	3.81	-
	0.5	7.89	3.61	0.06
	1.0	23.57	3.06	0.04
	2.0	35.99	2.20	0.06
	5.0	44.74	-1.33	0.11
	8.0	44.91	-2.38	0.18
	22.0	44.95	-3.01	0.49
	32.0	44.99	-4.21	0.71
	48.0	44.96	-3.19	1.07
CaB	0.0	0.00	4.48	-
	0.5	24.06	4.16	0.02
	1.0	37.47	3.93	0.03
	2.0	64.75	3.15	0.03
	5.0	82.32	1.76	0.06
	8.0	86.41	0.55	0.09
	22.0	88.01	-2.02	0.25
	32.0	88.05	-2.41	0.36
	48.0	88.13	-4.90	0.54

ก1.3 ผลของอุณหภูมิการดูดซับ

ตารางภาคผนวกที่ ก.13 ความเข้มข้นของปีตาแคโรทีนในไปโอติเซลที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิดูดซับต่างๆ

Adsorbent type	Temperature (°C)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
BE01	40	1430.04	1439.65	1442.84	1437.51	6.67
	50	1376.00	1387.17	1388.37	1383.85	6.82
	60	1203.12	1223.61	1223.54	1216.76	11.81
	70	942.20	963.89	961.65	955.91	11.93
	80	540.19	557.97	566.99	555.05	13.63
BE02	40	996.20	977.59	988.67	987.49	9.36
	50	862.81	865.74	856.11	861.55	4.94
	60	687.42	671.70	671.74	676.95	9.06
	70	412.91	438.98	445.61	432.50	17.29
	80	62.41	43.67	72.85	59.64	14.79
NaB	40	2306.45	2298.13	2295.94	2300.17	5.54
	50	2283.92	2288.31	2289.95	2287.40	3.12
	60	2254.21	2271.51	2262.38	2262.70	8.65
	70	2182.90	2193.69	2199.33	2191.98	8.35
	80	2032.48	2034.46	2024.49	2030.48	5.28
CaB	40	2092.53	2091.49	2085.17	2089.73	3.98
	50	2029.83	2045.91	2050.15	2041.96	10.72
	60	1986.11	1971.27	2004.54	1987.31	16.67
	70	1867.39	1874.84	1876.87	1873.03	4.99
	80	1654.70	1655.80	1694.66	1668.38	22.76

ตารางภาคผนวกที่ ก.14 ความจุการดูดซับปีตาแคโรทีนบนพื้นผิวตัวดูดซับที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิ
ดูดซับต่างๆ

Adsorbent type	Temperature (°C)	RUN 1	RUN 2	RUN 3	Avg.	SD.
BE01	40	501.11	498.77	499.69	499.86	1.18
	50	528.43	525.44	527.51	527.13	1.53
	60	615.83	608.55	611.69	612.02	3.65
	70	747.74	740.52	745.44	744.57	3.69
	80	950.98	946.78	947.01	948.26	2.36
BE02	40	720.44	733.56	731.65	728.55	7.09
	50	787.88	790.39	799.35	792.54	6.03
	60	876.55	888.99	893.51	886.35	8.78
	70	1015.33	1007.24	1009.00	1010.52	4.25
	80	1192.53	1208.11	1199.38	1200.01	7.81
NaB	40	58.03	62.55	63.99	61.52	3.11
	50	69.42	67.54	67.05	68.00	1.25
	60	84.44	76.08	81.13	80.55	4.21
	70	120.49	115.62	113.33	116.48	3.66
	80	196.54	196.53	202.62	198.56	3.52
CaB	40	166.18	167.55	171.63	168.45	2.84
	50	197.88	190.71	189.52	192.70	4.52
	60	219.98	228.64	212.82	220.48	7.92
	70	280.000	277.64	278.02	278.55	1.27
	80	387.53	388.94	371.08	382.52	9.93

ก1.4 ปริมาณสูญเสียของบีตาแคโรทีนในกระบวนการดูดซับ

ตารางภาคผนวกที่ ก.15 ปริมาณสูญเสียของบีตาแคโรทีนในกระบวนการดูดซับ

Adsorbent amount (g)	Biodiesel weight loss (g)			
	BE01	BE02	NaB	CaB
0.1	0.10	0.11	0.10	0.10
0.2	0.23	0.25	0.20	0.21
0.3	0.37	0.37	0.31	0.31
0.4	0.40	0.40	0.38	0.39
0.5	0.54	0.51	0.50	0.51

ก2 การสกัดบีตาแคโรทีนจากของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม

ก2.1 การสกัดด้วยวิธีแบบ soxhlet

ตารางภาคผนวกที่ ก.16 ผลได้น้ำมันและบีตาแคโรทีนจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย

Solvent	PPF wt. (g)	Oil yield (g)	Oil yield (g/g dried PPF)	β -carotene yield (mg)	β -carotene yield (mg/g dried PPF)
Hexane	16.1704	2.4687	0.1665	18.1419	1.2239
Petroleum ether	14.7214	1.6993	0.1259	15.3670	1.1388

ก2.2 ผลของความดันต่อผลได้การสกัดสำหรับการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์
ภาวะเหนือวิกฤต

ตารางภาคผนวกที่ ก.17 ผลได้น้ำมันจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะ
เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสที่ความดันต่างๆ

Pressure (bar)	CO ₂ used (g)	Oil yield (g/g dried PPF)				Oil yield acc. (g/g dried PPF)
		RUN 1	RUN 2	Avg.	SD. (x10 ³)	
200	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.006	0.006	0.006	0.13	0.006
	400	0.009	0.009	0.009	0.11	0.015
	600	0.016	0.016	0.016	0.07	0.031
	800	0.012	0.014	0.013	1.35	0.044
	1000	0.008	0.009	0.008	0.67	0.052
	1200	0.007	0.007	0.007	0.24	0.059
250	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.012	0.011	0.011	0.53	0.011
	400	0.013	0.013	0.013	0.18	0.024
	600	0.018	0.019	0.018	0.61	0.042
	800	0.013	0.011	0.012	0.93	0.054
	1000	0.013	0.011	0.012	1.31	0.066
	1200	0.009	0.007	0.008	1.34	0.074

ตารางภาคผนวกที่ ก.18 ผลได้น้ำมันจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

Pressure (bar)	CO ₂ used (g)	Oil yield (g/g dried PPF)				Oil yield acc. (g/g dried PPF)
		RUN 1	RUN 2	Avg.	SD. (x10 ³)	
300	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.025	0.023	0.024	1.51	0.024
	400	0.019	0.019	0.019	0.05	0.043
	600	0.016	0.018	0.017	1.56	0.060
	800	0.018	0.017	0.018	1.03	0.078
	1000	0.008	0.009	0.008	0.88	0.086
	1200	0.013	0.015	0.014	1.05	0.100
350	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.045	0.044	0.044	0.48	0.044
	400	0.031	0.030	0.030	0.57	0.075
	600	0.018	0.015	0.016	2.07	0.091
	800	0.011	0.009	0.010	1.25	0.101
	1000	0.006	0.007	0.006	0.50	0.107
	1200	0.003	0.003	0.003	0.03	0.110

ตารางภาคผนวกที่ ก.19 ผลได้บีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสที่ความดันต่างๆ

Pressure (bar)	CO ₂ used (g)	β-carotene yield (mg/g dried PPF)				β-carotene yield acc. (g/g dried PPF)
		RUN 1	RUN 2	Avg.	SD. (x10 ³)	
200	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.026	0.021	0.023	3.41	0.023
	400	0.012	0.013	0.012	0.45	0.036
	600	0.017	0.018	0.018	1.05	0.053
	800	0.032	0.034	0.033	0.85	0.086
	1000	0.014	0.016	0.015	1.29	0.101
	1200	0.017	0.020	0.018	1.96	0.119
250	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.030	0.029	0.029	0.22	0.029
	400	0.033	0.034	0.033	0.81	0.063
	600	0.038	0.036	0.037	1.42	0.100
	800	0.026	0.027	0.026	0.54	0.126
	1000	0.035	0.040	0.037	3.45	0.163
	1200	0.044	0.044	0.044	0.03	0.207

ตารางภาคผนวกที่ ก.20 ผลได้บีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะ
เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสที่ความดันต่างๆ

Pressure (bar)	CO ₂ used (g)	β-carotene yield (mg/g dried PPF)				β-carotene yield acc. (g/g dried PPF)
		RUN 1	RUN 2	Avg.	SD. (x10 ³)	
300	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.065	0.068	0.066	1.94	0.066
	400	0.069	0.069	0.069	0.12	0.136
	600	0.062	0.059	0.060	1.67	0.196
	800	0.045	0.047	0.046	1.59	0.242
	1000	0.038	0.036	0.037	0.85	0.279
	1200	0.013	0.024	0.019	7.87	0.298
350	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.106	0.106	0.106	0.56	0.106
	400	0.079	0.071	0.075	5.78	0.181
	600	0.066	0.073	0.069	5.03	0.250
	800	0.042	0.040	0.041	1.44	0.292
	1000	0.038	0.034	0.036	2.70	0.328
	1200	0.012	0.013	0.012	0.62	0.340

ก.2.3 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้การสกัดสำหรับการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์
ภาวะเหนือวิกฤต

ตารางภาคผนวกที่ ก.21 ผลได้น้ำมันจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะ
เหนือวิกฤตที่ความดัน 350 บาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	CO ₂ used (g)	Oil yield (g/g dried PPF)				Oil yield acc. (g/g dried PPF)
		RUN 1	RUN 2	Avg.	SD. (x10 ³)	
40	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.006	0.006	0.006	0.21	0.006
	400	0.013	0.013	0.013	0.07	0.019
	600	0.016	0.012	0.014	2.33	0.033
	800	0.010	0.012	0.011	0.81	0.044
	1000	0.016	0.016	0.016	0.55	0.060
	1200	0.009	0.008	0.009	1.04	0.068
50	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.006	0.007	0.006	0.44	0.006
	400	0.018	0.016	0.017	1.36	0.024
	600	0.018	0.016	0.017	1.37	0.041
	800	0.013	0.013	0.013	0.60	0.054
	1000	0.013	0.009	0.011	2.59	0.064
	1200	0.009	0.008	0.009	0.16	0.073

ตารางภาคผนวกที่ ก.22 ผลได้น้ำมันจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 350 บาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ)

Temperature (°C)	CO ₂ used (g)	Oil yield (g/g dried PPF)				Oil yield acc. (g/g dried PPF)
		RUN 1	RUN 2	Avg.	SD. (x10 ³)	
60	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.008	0.008	0.008	0.25	0.008
	400	0.019	0.019	0.019	0.29	0.027
	600	0.018	0.018	0.018	0.65	0.045
	800	0.015	0.014	0.014	0.63	0.059
	1000	0.011	0.013	0.012	1.38	0.071
	1200	0.011	0.011	0.011	0.07	0.082
70	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.009	0.008	0.009	1.07	0.009
	400	0.019	0.018	0.019	1.11	0.027
	600	0.018	0.018	0.018	0.23	0.045
	800	0.017	0.019	0.018	1.31	0.063
	1000	0.012	0.011	0.011	0.36	0.075
	1200	0.013	0.009	0.011	2.89	0.085

ตารางภาคผนวกที่ ก.23 ผลได้บีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 350 บาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	CO ₂ used (g)	β-carotene yield (mg/g dried PPF)				β-carotene yield acc. (g/g dried PPF)
		RUN 1	RUN 2	Avg.	SD. (x10 ³)	
40	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.026	0.026	0.026	0.07	0.026
	400	0.022	0.026	0.024	2.88	0.050
	600	0.027	0.025	0.026	1.35	0.076
	800	0.031	0.026	0.029	3.95	0.104
	1000	0.138	0.125	0.131	8.74	0.236
	1200	0.097	0.095	0.096	1.06	0.332
50	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.040	0.037	0.038	1.64	0.038
	400	0.043	0.041	0.042	1.48	0.080
	600	0.038	0.041	0.040	2.29	0.120
	800	0.043	0.045	0.044	1.55	0.163
	1000	0.105	0.107	0.106	1.70	0.270
	1200	0.064	0.058	0.061	3.84	0.330

ตารางภาคผนวกที่ ก.24 ผลได้บีตาแคโรทีนจากการสกัดกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตที่ความดัน 350 บาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ)

Temperature (°C)	CO ₂ used (g)	β-carotene yield (mg/g dried PPF)				β-carotene yield acc. (g/g dried PPF)
		RUN 1	RUN 2	Avg.	SD. (x10 ³)	
60	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.027	0.025	0.026	0.73	0.026
	400	0.020	0.020	0.020	0.29	0.046
	600	0.052	0.049	0.050	1.55	0.096
	800	0.042	0.043	0.042	0.85	0.139
	1000	0.098	0.094	0.096	2.81	0.234
	1200	0.113	0.107	0.110	4.19	0.345
70	0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
	200	0.032	0.029	0.031	1.47	0.031
	400	0.042	0.041	0.042	0.42	0.072
	600	0.036	0.040	0.038	3.28	0.110
	800	0.052	0.047	0.050	3.86	0.160
	1000	0.088	0.091	0.089	2.66	0.249
	1200	0.107	0.108	0.107	0.60	0.357

ก3 การแยกบีตาแคโรทีนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดบีตาแคโรทีนจากกากใยปาล์มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต

ก3.1 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อผลได้และความเข้มข้นของบีตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องแยก

ตารางภาพผนวกที่ ก.25 ผลได้น้ำมันและบีตาแคโรทีนจากเครื่องแยกเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2

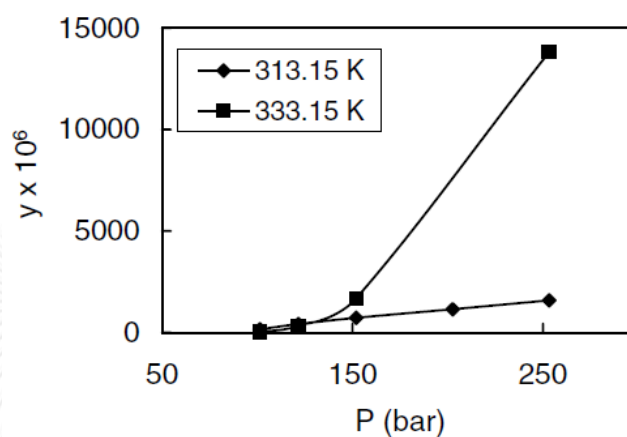
Pressure (bar)	Temperature (°C)	Oil yield (g/g dried PPF)		β-carotene yield (mg/g dried PPF)		β-carotene concentration at 1 st Fractionator (%wt)
		1 st Fractionator	2 nd Fractionator	1 st Fractionator	2 nd Fractionator	
280	30	0.0039	0.1023	0.1080	0.2540	27.97
	40	0.0095	0.0934	0.1898	0.1600	20.02
	50	0.0252	0.0872	0.2850	0.0940	11.31
230	30	0.0035	0.1018	0.0943	0.2650	27.33
	40	0.0101	0.0912	0.1775	0.1670	17.52
	50	0.0243	0.0860	0.2740	0.0980	11.29
180	30	0.0029	0.1043	0.0927	0.2730	31.92
	40	0.0071	0.0956	0.1740	0.1760	24.48
	50	0.0201	0.0859	0.2574	0.1010	12.81

ภาคผนวก ข

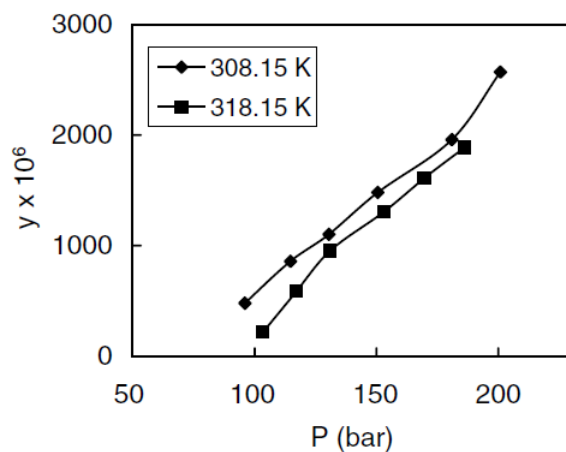
ค่าการละลายของน้ำมันและบีตาแคโรทีนในคาร์บอนไดออกไซด์

Oleic acid ($C_{18}H_{34}O_2$; MW=282.46) (191)

T (K)	P (bar)	$y \times 10^6$
313.15	101.3	170
	121.6	419
	152.0	724
	202.7	1160
	253.3	1594
333.15	101.3	26
	121.6	348
	152.0	1684
	253.3	13820

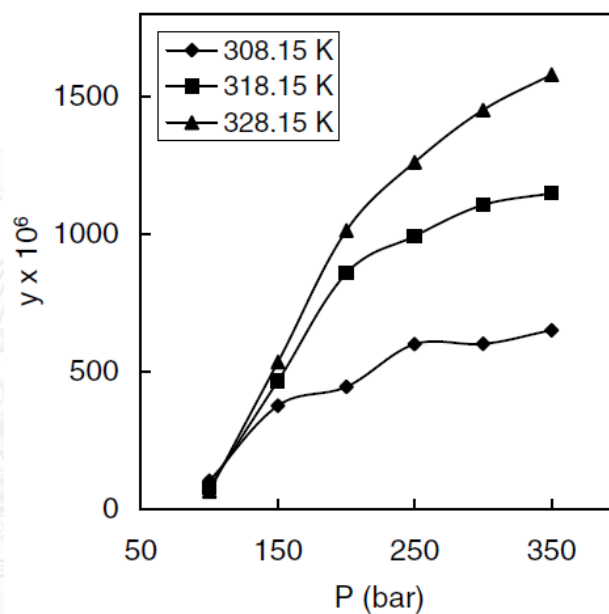
Oleic acid ($C_{18}H_{34}O_2$; MW=282.46) (192)

T (K)	P (bar)	$y \times 10^6$
308.15	96.0	480
	114.7	857
	130.6	1103
	150.6	1480
	180.9	1958
	200.9	2570
	257.0	3500
318.15	103.4	217
	117.2	587
	131.0	953
	153.1	1306
	169.6	1610



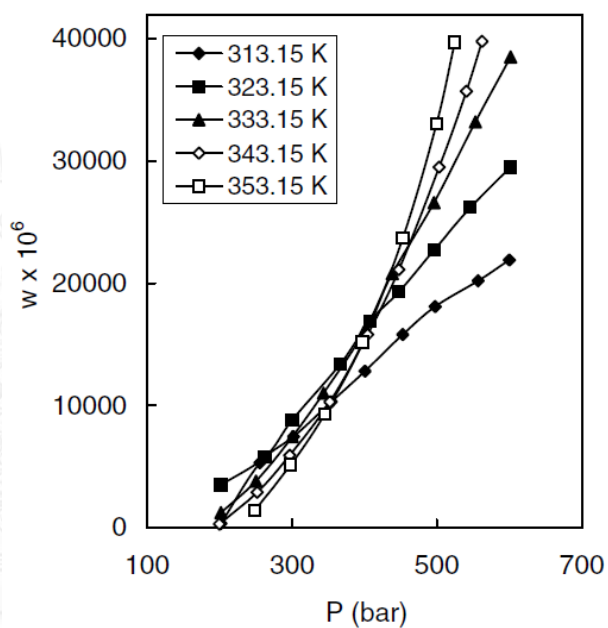
Palmitic acid ($C_{16}H_{32}O_2$; MW=256.42) (193)

T (K)	P (bar)	$y \times 10^6$
308.15	100	103
	150	376
	200	445
	250	599
	300	601
	350	650
318.15	100	79
	150	466
	200	858
	250	992
	300	1105
	350	1147
328.15	100	65
	150	535
	200	1013
	250	1260
	300	1450
	350	1579

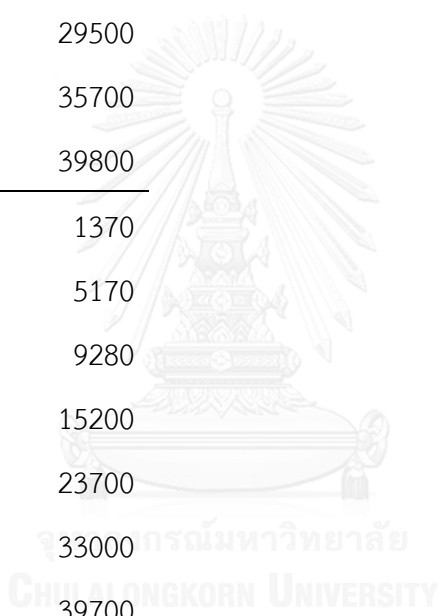


Triglycerides (190)

T (K)	P (bar)	w $\times 10^6$	
313.15	202	350	
	256	5320	
	302	7450	
	354	10300	
	401	12800	
	453	15800	
	498	18100	
323.15	557	20200	
	600	21900	
	202	3500	
	263	5780	
	300	8820	
	367	13400	
	408	16900	
333.15	448	19300	
	496	22700	
	546	26200	
	602	29500	
	202	1220	
	250	3800	
	300	7450	
343.15	343	11000	
	399	16000	
	439	20800	
	353.15	496	26600

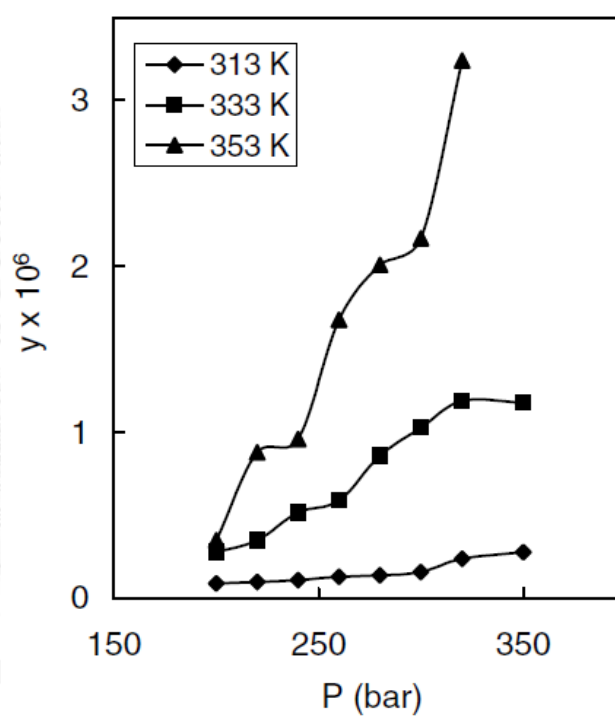


	553	33200
	602	38500
343.15	200	304
	252	2890
	297	5930
	352	10300
	404	15800
	448	21100
	503	29500
	541	35700
	562	39800
353.15	248	1370
	299	5170
	345	9280
	397	15200
	453	23700
	500	33000
	525	39700



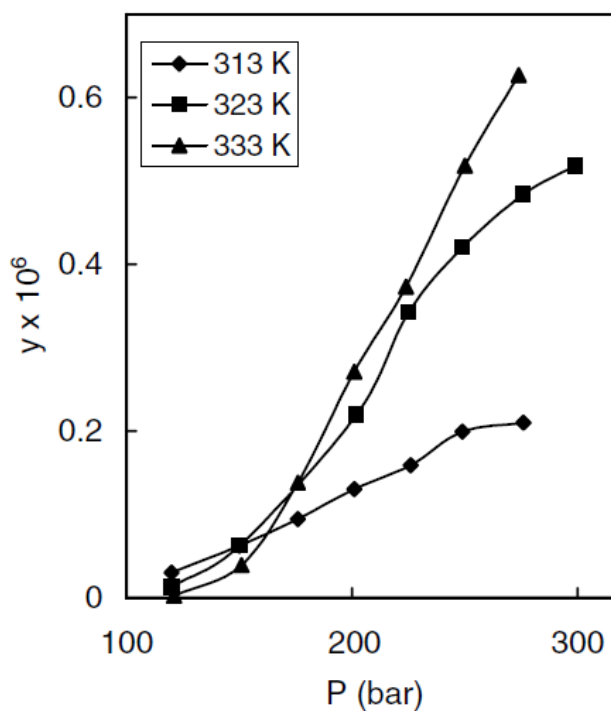
β -Carotene ($C_{40}H_{56}$; MW=536.87) (189)

T (K)	P (bar)	$y \times 10^6$
313	200	0.09
	220	0.1
	240	0.11
	260	0.13
	280	0.14
	300	0.16
	320	0.24
	350	0.28
333	200	0.28
	220	0.35
	240	0.52
	260	0.59
	280	0.86
	300	1.03
	320	1.19
	350	1.18
353	200	0.35
	220	0.88
	240	0.96
	260	1.68
	280	2.01
	320	3.24



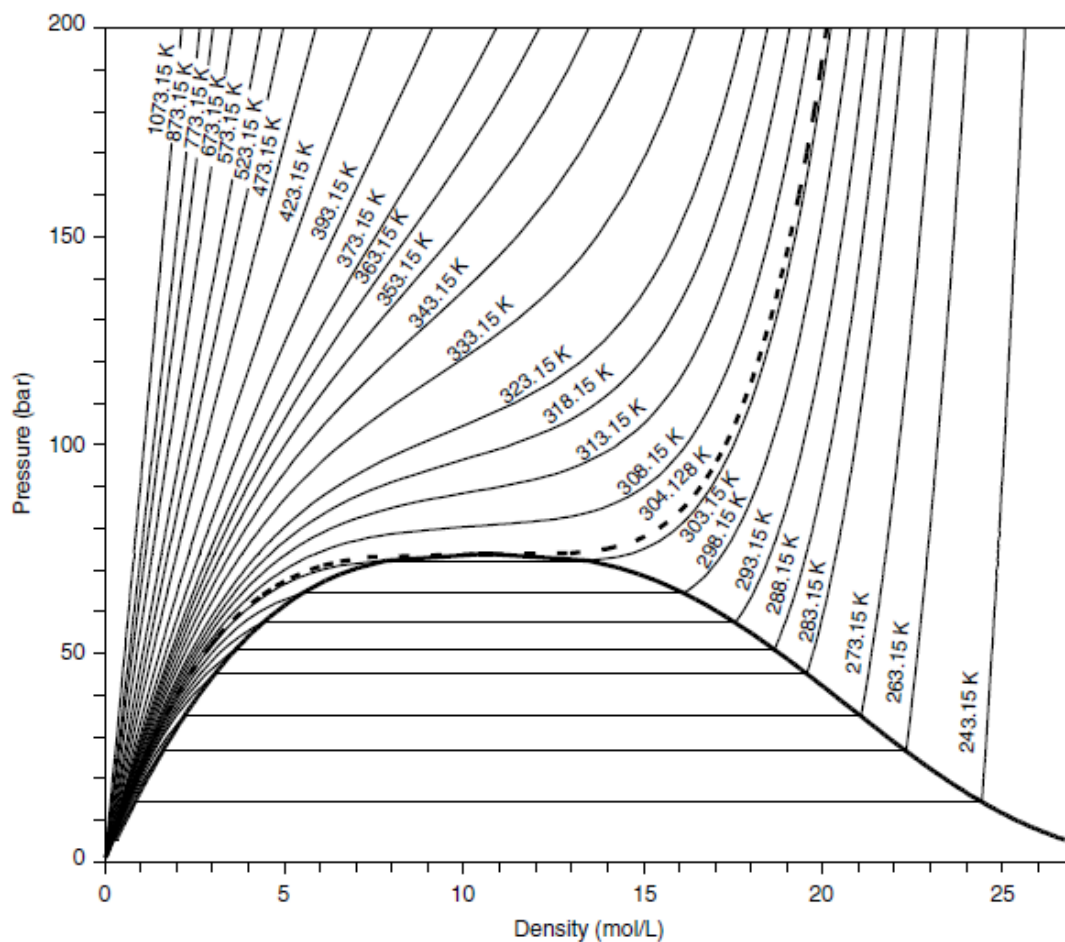
β -Carotene ($C_{40}H_{56}$; MW=536.87) (194)

T (K)	P (bar)	$y \times 10^6$
313	120	0.030
	150	0.062
	176	0.094
	201	0.130
	226	0.159
	249	0.199
	276	0.210
	299	0.518
323	120	0.013
	150	0.062
	202	0.219
	225	0.342
	249	0.420
	276	0.484
	299	0.518
	333	121
151		0.039
176		0.138
201		0.271
224		0.373
250		0.518
274		0.627



ภาคผนวก ค

ข้อมูลความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์



รูปภาคผนวกที่ ค.1 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันใดๆ (195)

ตารางภาคผนวกที่ ค.1 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิใดๆ (195)

T (°C)	T (K)	P (bar)	Density (mol/L)	
			Sat Liq.	Sat Vap.
-56.558	216.59	5.18	26.777	0.31268
-56	217.15	5.31	26.732	0.32000
-55	218.15	5.54	26.650	0.33340
-54	219.15	5.78	26.568	0.34730
-53	220.15	6.03	26.485	0.36160
-52	221.15	6.29	26.402	0.37640
-51	222.15	6.55	26.318	0.39160
-50	223.15	6.82	26.234	0.40730
-49	224.15	7.10	26.150	0.42350
-48	225.15	7.39	26.065	0.44020
-47	226.15	7.69	25.979	0.45740
-46	227.15	8.00	25.894	0.47520
-45	228.15	8.32	25.807	0.49350
-44	229.15	8.64	25.720	0.51230
-43	230.15	8.98	25.633	0.53170
-42	231.15	9.33	25.545	0.55170
-41	232.15	9.68	25.457	0.57230
-40	233.15	10.05	25.368	0.59350
-39	234.15	10.42	25.278	0.61540
-38	235.15	10.81	25.188	0.63780
-37	236.15	11.20	25.097	0.66100
-36	237.15	11.61	25.006	0.68480
-35	238.15	12.02	24.914	0.70930
-34	239.15	12.45	24.821	0.73450

ตารางภาคผนวกที่ ค.2 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ (ต่อ)

T (°C)	T (K)	P (bar)	Density (mol/L)	
			Sat Liq.	Sat Vap.
-33	240.15	12.89	24.727	0.7605
-32	241.15	13.34	24.633	0.7872
-31	242.15	13.80	24.539	0.8147
-30	243.15	14.28	24.443	0.8430
-29	244.15	14.76	24.347	0.8720
-28	245.15	15.26	24.250	0.9020
-27	246.15	15.77	24.152	0.9328
-26	247.15	16.29	24.053	0.9645
-25	248.15	16.83	23.953	0.9971
-24	249.15	17.38	23.853	1.0306
-23	250.15	17.94	23.752	1.0651
-22	251.15	18.51	23.649	1.1006
-21	252.15	19.10	23.546	1.1371
-20	253.15	19.70	23.442	1.1747
-19	254.15	20.31	23.336	1.2134
-18	255.15	20.94	23.230	1.2532
-17	256.15	21.58	23.122	1.2942
-16	257.15	22.24	23.014	1.3364
-15	258.15	22.91	22.904	1.3799
-14	259.15	23.59	22.792	1.4246
-13	260.15	24.29	22.680	1.4707
-12	261.15	25.01	22.566	1.5182
-11	262.15	25.74	22.451	1.5671
-10	263.15	26.49	22.334	1.6175

ตารางภาคผนวกที่ ค.3 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิใดๆ (ต่อ)

T (°C)	T (K)	P (bar)	Density (mol/L)	
			Sat Liq.	Sat Vap.
-9	264.15	27.25	22.216	1.6694
-8	265.15	28.03	22.096	1.7230
-6	267.15	29.63	21.852	1.8353
-5	268.15	30.46	21.727	1.8941
-4	269.15	31.30	21.600	1.9548
-3	270.15	32.16	21.472	2.0176
-2	271.15	33.04	21.341	2.0824
-1	272.15	33.94	21.208	2.1494
0	273.15	34.85	21.073	2.2188
1	274.15	35.78	20.936	2.2905
2	275.15	36.73	20.796	2.3648
3	276.15	37.70	20.653	2.4418
4	277.15	38.69	20.508	2.5216
5	278.15	39.70	20.360	2.6044
6	279.15	40.72	20.208	2.6905
7	280.15	41.77	20.054	2.7799
8	281.15	42.83	19.895	2.8730
9	282.15	43.92	19.733	2.9699
10	283.15	45.02	19.567	3.0711
11	284.15	46.15	19.396	3.1767
12	285.15	47.30	19.220	3.2871
13	286.15	48.47	19.039	3.4029
14	287.15	49.66	18.853	3.5244
15	288.15	50.87	18.660	3.6521

ตารางภาคผนวกที่ ค.4 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิใดๆ (ต่อ)

T (°C)	T (K)	P (bar)	Density (mol/L)	
			Sat Liq.	Sat Vap.
16	289.15	52.11	18.460	3.7868
17	290.15	53.37	18.252	3.9293
18	291.15	54.65	18.036	4.0803
19	292.15	55.96	17.810	4.2410
20	293.15	57.29	17.573	4.4127
21	294.15	58.65	17.323	4.5971
22	295.15	60.03	17.059	4.7963
23	296.15	61.44	16.777	5.0130
24	297.15	62.88	16.474	5.2510
25	298.15	64.34	16.144	5.5154
26	299.15	65.84	15.780	5.8138
27	300.15	67.36	15.368	6.1581
28	301.15	68.92	14.889	6.5691
29	302.15	70.51	14.300	7.0900
30	303.15	72.14	13.481	7.8415
30.978	304.13	73.77	10.625	10.6250

ตารางภาคผนวกที่ ค.5 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะอิ่มตัวที่ความดันใดๆ (195)

P (bar)	T (°C)	T (K)	Density (mol/L)	
			Sat Liq.	Sat Vap.
5.18	-56.56	216.59	26.777	0.3127
5.5	-55.17	217.98	26.664	0.3311
6	-53.12	220.04	26.494	0.3599
7	-51.19	221.96	26.334	0.3887
7	-49.37	223.78	26.181	0.4175
8	-47.65	225.51	26.035	0.4463
8	-46.01	227.15	25.894	0.4751
9	-44.44	228.71	25.759	0.5040
9	-42.94	230.21	25.628	0.5329
10	-41.50	231.65	25.501	0.5619
10	-40.12	233.03	25.379	0.5909
11	-37.50	235.65	25.143	0.6492
12	-35.06	238.09	24.919	0.7079
13	-32.76	240.39	24.705	0.7669
14	-30.58	242.57	24.499	0.8264
15	-28.52	244.63	24.300	0.8863
16	-26.56	246.59	24.108	0.9467
17	-24.68	248.47	23.922	1.0076
18	-22.89	250.26	23.740	1.0691
19	-21.16	251.99	23.563	1.1312
20	-19.50	253.65	23.389	1.1938
21	-17.90	255.25	23.219	1.2572
22	-16.36	256.79	23.053	1.3212
23	-14.86	258.29	22.889	1.3859

ตารางภาคผนวกที่ ค.6 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะอิ่มตัวที่ความดันใดๆ (ต่อ)

P (bar)	T (°C)	T (K)	Density (mol/L)	
			Sat Liq.	Sat Vap.
24	-13.42	259.73	22.727	1.4513
25	-12.01	261.14	22.568	1.5175
26	-10.65	262.50	22.410	1.5846
27	-9.32	263.83	22.255	1.6524
28	-8.03	265.12	22.101	1.7211
29	-6.78	266.37	21.948	1.7908
30	-5.55	267.60	21.796	1.8614
31	-4.36	268.79	21.646	1.9330
32	-3.19	269.96	21.496	2.0056
33	-2.05	271.10	21.347	2.0793
34	-0.93	272.22	21.199	2.1541
35	0.16	273.31	21.051	2.2301
36	1.23	274.38	20.904	2.3074
37	2.28	275.43	20.757	2.3859
38	3.30	276.45	20.609	2.4658
39	4.31	277.46	20.462	2.5471
40	5.30	278.45	20.315	2.6299
41	6.27	279.42	20.167	2.7142
42	7.22	280.37	20.019	2.8002
43	8.16	281.31	19.870	2.8880
44	9.08	282.23	19.720	2.9775
45	9.98	283.13	19.570	3.0690
46	10.87	284.02	19.418	3.1626
47	11.74	284.89	19.266	3.2583

ตารางภาคผนวกที่ ค.7 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะอิ่มตัวที่ความดันใดๆ (ต่อ)

P (bar)	T (°C)	T (K)	Density (mol/L)	
			Sat Liq.	Sat Vap.
48	12.6	285.75	19.112	3.3563
49	13.45	286.6	18.956	3.4568
50	14.28	287.43	18.798	3.56
51	15.11	288.26	18.639	3.6659
52	15.91	289.06	18.477	3.7749
53	16.71	289.86	18.313	3.8871
54	17.5	290.65	18.146	4.0029
55	18.27	291.42	17.976	4.1225
56	19.03	292.18	17.803	4.2462
57	19.78	292.93	17.625	4.3745
58	20.53	293.68	17.444	4.5078
59	21.26	294.41	17.257	4.6467
60	21.98	295.13	17.065	4.7917
61	22.69	295.84	16.867	4.9437
62	23.39	296.54	16.661	5.1035
63	24.08	297.23	16.447	5.2723
64	24.77	297.92	16.223	5.4514
65	25.44	298.59	15.988	5.6427
66	26.11	299.26	15.738	5.8485
67	26.77	299.92	15.47	6.072
68	27.41	300.56	15.181	6.3179
69	28.05	301.2	14.862	6.593
70	28.68	301.83	14.504	6.9083
71	29.3	302.45	14.086	7.2839

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักรพันธ์ แสนวนง เกิดเมื่อวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2533 จังหวัดสกลนคร สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนมัธยมวานรนิวาส สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 เข้าศึกษา ต่อระดับปริญญาโทวิทยาศาสตรบัณฑิต ในสาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเคยนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ The 6th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology and The 21 th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers เมื่อวันที่ 21 เมษายน พ.ศ. 2558

