

การดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเรซิน

ADSORPTION OF CAROTENOIDS FROM CRUDE PALM OIL USING  
RESIN ADSORBENTS

จตุรรัตน์ อินทร์นา  
JUTHARAT INNA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-220-136

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเรซิน**

**ADSORPTION OF CAROTENOIDS FROM CRUDE PALM OIL USING  
RESIN ADSORBENTS**



**จุฑารัตน์ อินทร์นา**

**JUTHARAT INNA**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี**

**บัณฑิตวิทยาลัย**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ.2550**

**KMITL-2007-EN-m-220-136**

**ADSORPTION OF CAROTENOIDS FROM CRUDE PALM OIL USING  
RESIN ADSORBENTS**

**JUTHARAT INNA**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**KMITL-2007-EN-m-220-136**

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเรซิน
นักศึกษา	นางสาวจุฑารัตน์ อินทร์นา
รหัสประจำตัว	48060117
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา

### บทคัดย่อ

การดูดซับของแคโรทีนอยด์แยกจากน้ำมันปาล์มดิบบนตัวดูดซับเรซิน Copolymer ชนิด Styrene divinyl benzene เกิดขึ้นได้เมื่อเติมตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ในขณะที่ตัวทำละลายอื่น ๆ เช่น เฮกเซน เอทิลอะซีเตต เตตระไฮโดรฟูแรน เมทิลเอทิลคีโตน และอะซีโตน ไม่สามารถช่วยให้เกิดการดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ เรซินชนิด Lewatit® VP OC 1064 สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์เพื่อเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ได้ภายในเวลา 30 นาที โดยมีสมการไอโซเทอมของการดูดซับที่สอดคล้องกับผลการทดลอง คือ  $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^3}$  แบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายผลการทดลองได้ตลอดช่วงความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลาย โดยปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นต่ำ และถึงจุดสูงสุด และปริมาณการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายมีค่าสูง แคโรทีนอยด์ที่ถูกดูดซับบนเรซินดังกล่าวสามารถถูกคายซับได้โดยใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอล และเฮกเซนตามลำดับ โดยแคโรทีนอยด์ไม่เกิดการเสียดสภาพ และเรซินดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ในการดูดซับใหม่หลังจากทำการคายซับได้อย่างน้อย 3 ครั้ง

<b>Thesis Title</b>	Adsorption of Carotenoids from Crude Palm Oil using Resin Adsorbents
<b>Student</b>	Miss Jutharat Inna
<b>Student ID.</b>	48060117
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya

## ABSTRACT

Carotenoids in Crude palm oil (CPO) was adsorbed on resin adsorbents, of styrene divinylbenzene copolymer, by an addition of isopropanol solvent. Other solvents such as hexane, ethyl acetate, tetrahydrofuran, methylethylketone and acetone, did not enhance the adsorption of carotenoids on the resin. Adsorption equilibrium was reached with in 30 minutes by using a resin, namely Lewatit<sup>®</sup> VP OC 1064. A proposed adsorption isotherm,  $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^3}$ , could successfully describe the carotenoids adsorption experimental results. At low carotenoids concentration the model explained an increase of carotenoids adsorption on the resin with respect to the carotenoids concentration in the mixture of CPO and isopropanol. Higher carotenoids concentration in the solution had lower carotenoids adsorption on the resin. Carotenoids were desorbed from the resin by using two solvents, hexane after isopropanol. The resin could be reused for carotenoids adsorption at least 3 times without any change in the adsorption capability.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากคำแนะนำและการแก้ไขข้อบกพร่องของ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ ดร.สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์ ผศ.ดร. สมหมาย ผิวสอาด ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสร์มภ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ซึ่งให้กำเนิด และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้ กำลังใจ ดูแลเอาใจใส่ และให้การสนับสนุนตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ และ คุณพิมพ์ใจ ภูษนะกิจ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ คำแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบคุณนางสาววิชุดา ไชยเขต ที่ให้คำแนะนำการใช้เครื่อง HPLC

ขอขอบคุณที่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ

คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมี ข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับ ณ ที่นี้

จุฑารัตน์ อินทร์นา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แครอทินอยด์.....	4
2.1.1 แหล่งของแครอทินอยด์.....	6
2.1.2 ประโยชน์ของแครอทินอยด์.....	6
2.2 น้ำมันปาล์ม.....	6
2.3 ทฤษฎีการดูดซับ.....	9
2.3.1 กลไกการดูดซับ.....	9
2.3.2 ประเภทของการดูดซับ.....	9
2.3.3 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทาเคมี.....	10
2.3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	11
2.3.5 สมดุลของการดูดซับ.....	13
2.3.6 แบบจำลองสมดุลการดูดซับต่าง ๆ.....	15
2.3.7 การดูดซับในวัฏภาคของเหลว.....	17
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 อุปกรณ์และการดำเนินงานวิจัย.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	24
3.3 สารเคมี.....	24
3.4 วิธีการทดลอง.....	25
3.4.1 การศึกษาตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับแคโรทีนอยด์ จากน้ำมันปาล์มดิบ.....	25
3.4.2 การศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสม.....	26
3.4.3 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ.....	26
3.4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับ.....	26
3.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับ โดยใช้แบบจำลองสมดุลการดูดซับต่าง ๆ.....	27
3.4.6 การศึกษาการคายซับ.....	27
3.4.7 การนำตัวดูดซับเรซินที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่.....	28
3.4.8 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเบต้าแคโรทีน.....	28
3.4.9 การวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์โดยใช้เครื่อง HPLC.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	30
4.1 การศึกษาตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับแคโรทีนอยด์จาก น้ำมันปาล์มดิบ.....	30
4.2 การศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสม.....	31
4.3 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ.....	33
4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับ.....	34
4.4.1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	34
4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ.....	34
4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับ โดยใช้สมการแบบจำลองต่าง ๆ.....	36
4.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับ โดยใช้สมการแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich.....	36
4.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับ โดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา.....	37
4.6 การศึกษาการคายซับ.....	42

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 การนำตัวดูดซับเรซินที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก ก พื้นที่พืคและกราฟของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	48
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองการหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับแคโรทีนอยด์ จากน้ำมันปาล์มดิบของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	50
ภาคผนวก ค ข้อมูลปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	52
ภาคผนวก ง ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	55
ภาคผนวก จ การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับ ข้อมูลจากการคำนวณตามแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	61

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม.....	7
2.2 องค์ประกอบของสารส่วนน้อยในน้ำมันปาล์มดิบ.....	8
2.3 องค์ประกอบของแคโรทีนในน้ำมันปาล์ม.....	8
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับเรซินและความสามารถในการดูดซับ แคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซินชนิดต่างๆ.....	31
4.2 ผลการศึกษาเพื่อเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการละลายน้ำมันปาล์ม เพื่อใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์ด้วยตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	32
4.3 ค่าตัวแปรจากการคำนวณสมการ $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + KC_{Ae})^n}$ โดยใช้โปรแกรม Polymath โดย วิธี Nonlinear regression โดย $n$ มีค่าเท่ากับ 2 และ 3.....	38
4.4 ค่าตัวแปรจากการคำนวณสมการ $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^n}$ โดยใช้ โปรแกรม Polymath โดยวิธี Nonlinear regression โดย $n$ มีค่าเท่ากับ 2 และ 3.....	39
4.5 ปริมาณการคายซับแคโรทีนอยด์จากตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 โดยใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอล และเฮกเซนในการคายซับ.....	42
4.6 ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ที่นำกลับมาใช้ใหม่.....	43
ก. พื้นที่ผิวของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	49
ข. ข้อมูลการทดลองการหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	51
ค. ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	53
ง. ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	56
จ. การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูลจากการ คำนวณตามแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา.....	59

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของแก๊สโรทีนอยด์บางชนิดที่พบในธรรมชาติ.....	4
2.2 ไอโซเทอมทั้ง 6 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC.....	14
2.3 ชนิดของ composite isotherm ตามแบบ Schay.....	18
2.4 ชนิดของ individual isotherm ตามแบบ Schay.....	19
2.4 การดูดซับกรดไขมันในสารละลายเจือจางที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายด้วย charcoal.....	19
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของแก๊สโรทีนอยด์ในสารละลาย ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา.....	33
4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	35
4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064.....	35
4.4 กราฟการวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับแก๊สโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir.....	36
4.5 กราฟการวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับแก๊สโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ด้วยสมการแบบจำลองของ Freundlich.....	37
4.6 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูล จากการคำนวณตามแบบจำลองในสมการที่ 4.1 โดย $n$ มีค่าเท่ากับ 2.....	40
4.7 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูล จากการคำนวณตามแบบจำลองในสมการที่ 4.1 โดย $n$ มีค่าเท่ากับ 3.....	40
4.8 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูล การคำนวณตามแบบจำลองในสมการที่ 4.2 โดย $n$ มีค่าเท่ากับ 2.....	41
4.9 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูล จากการคำนวณตามแบบจำลองในสมการที่ 4.2 โดย $n$ มีค่าเท่ากับ 3.....	41
ก. กราฟสารละลายมาตรฐานเบต้าแก๊สโรทีน.....	49

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของวิตามินพี

แคโรทีนอยด์เป็นสารที่ได้มีการพิสูจน์แล้วว่ามิใช่ประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น แคโรทีนอยด์มีบทบาทสำคัญในการเป็นสารที่ช่วยต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยทำหน้าที่ในการขจัดอนุมูลอิสระ [1] นอกจากนี้ยังพบว่าแคโรทีนอยด์สามารถยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็ง เช่นมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้ [2] จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้แคโรทีนอยด์เป็นสารที่ได้รับความสนใจและเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอางเป็นอย่างมาก

แคโรทีนอยด์ที่ใช้ในทางการค้าส่วนใหญ่ คือ เบต้าแคโรทีน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งมีความแตกต่างจากแคโรทีนอยด์ที่ได้จากธรรมชาติ โดยแคโรทีนอยด์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะเกิดการเผาผลาญได้ยากกว่าแคโรทีนอยด์ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ [3] ดังนั้นแคโรทีนอยด์จากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติจึงได้รับความสนใจ

น้ำมันปาล์มเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์อยู่มาก โดยมีอยู่ประมาณ 500 – 700 ppm [4] ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการเพาะปลูกปาล์มจำนวนมาก และน้ำมันปาล์มก็มีราคาค่อนข้างถูกจึงทำให้อุตสาหกรรมส่วนใหญ่หันมาสนใจการแปรรูปน้ำมันปาล์มให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆเพิ่มมากขึ้น โดยนำมาผลิตเป็นน้ำมันพืช สบู่ น้ำมันไบโอดีเซล เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการแปรรูปจะทำให้เกิดการสูญเสียวิตามินและสารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย โดยในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์ม ในระหว่างกระบวนการผลิตจะมีขั้นตอนในการฟอกสีน้ำมัน ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดการสูญเสียวิตามินที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย โดยเฉพาะแคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นสารที่มีสีส้มจะถูกกำจัดออกไปโดยไม่ได้นำกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งในปัจจุบันนี้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มในกระบวนการฟอกสีน้ำมันจะใช้ดินฟอกสี (clay) เป็นตัวดูดซับสี และดินฟอกสีที่ใช้ในการดูดซับสีจะถูกกำจัดทิ้งโดยไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งวิตามินที่ถูกดินฟอกสีดูดซับไว้ก็จะถูกทำลายไปด้วย ดังนั้นถ้ามีวิธีการที่สามารถแยกสารสี (แคโรทีนอยด์) ที่มีประโยชน์จากน้ำมันปาล์ม และสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ก็นับว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตน้ำมันปาล์มได้อย่างมาก เพราะนอกจากจะเป็นการฟอกสีน้ำมันให้จางลงแล้ว ยังได้วิตามินที่มีประโยชน์ เช่น แคโรทีนอยด์เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้กลับมาใช้ประโยชน์

ดังนั้นการนำตัวดูดซับสังเคราะห์ เช่น เรซิน มาใช้ในการดูดซับสารสีก่อนที่จะนำไปแปรรูป จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เพราะนอกจากจะช่วยดูดซับสีของน้ำมันให้จางลงแล้ว ยังได้สารที่มีประโยชน์อย่างแคโรทีนอยด์กลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย และตัวดูดซับนั้นยังสามารถปรับปรุง

และนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ซึ่งถ้าสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มนอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันปาล์มแล้ว ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษการแยกแคะโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้วิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับเรซิน ซึ่งเป็นวิธีที่มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การกลั่น โม่เลกุล พบว่าวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่สะดวก ใช้ปริมาณตัวทำละลายน้อย หลีกเลี่ยงการเกิดอิมัลชัน และใช้พลังงานต่ำ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงสมมูลของการดูดซับ ซึ่งยังไม่ค่อยมีงานวิจัยที่ได้รายงานถึงข้อมูลสมมูลของการดูดซับแคโรทีนอยด์มากนัก

การแยกดังกล่าวจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แคโรทีนอยด์ที่มีประโยชน์ สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ และมีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่โดยการคายซับ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะช่วยปรับปรุงขั้นตอนในการทำน้ำมันพืชให้บริสุทธิ์ ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการดูดซับแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบบนตัวดูดซับเรซิน
2. ศึกษาสมมูลการดูดซับแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบบนตัวดูดซับเรซิน ที่อุณหภูมิต่างๆ
3. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการอธิบายรูปแบบของกระบวนการดูดซับ
4. ศึกษาการคายซับแคโรทีนอยด์จากตัวดูดซับเรซิน
5. ศึกษาการนำตัวดูดซับเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ในการดูดซับใหม่

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการดูดซับแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบบนตัวดูดซับเรซิน
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมมูลการดูดซับแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มบนตัวดูดซับเรซิน
3. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการอธิบายรูปแบบของกระบวนการดูดซับ
4. ศึกษาการคายซับแคโรทีนอยด์จากตัวดูดซับเรซิน
5. ศึกษาการนำตัวดูดซับเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ในการดูดซับใหม่

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีการดูดซับและกระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับเรซิน
2. สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายรูปแบบของกระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับเรซินได้

3. สามารถแยกแคะโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์ และเป็นสารที่ได้รับความสนใจและเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอางเป็นอย่างมาก

## บทที่ 2

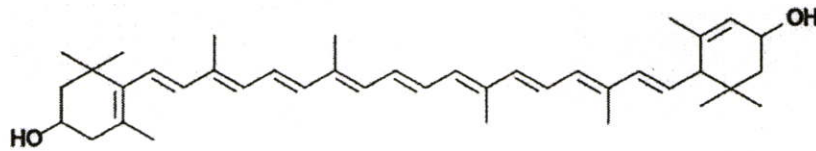
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) [ 5 ]

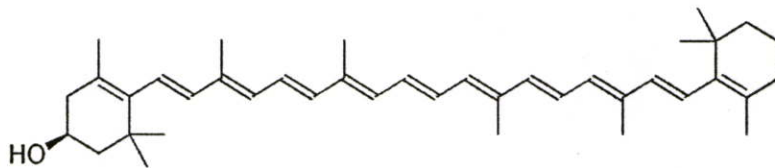
แคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่ทำให้เกิดสีในสารอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยพันธะคู่คอนจูเกตต่อเนื่องกันอยู่ ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเป็นจำนวน 40 อะตอม โดยมีสูตรโครงสร้างได้หลายแบบดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปแคโรทีนอยด์เกิดขึ้นในพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิดที่สังเคราะห์แสงได้ เช่น เห็ดรา เชื้อรา และแบคทีเรียบางชนิด แคโรทีนอยด์มีรงควัตถุมากกว่า 600 ชนิดซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ แซนโทฟิลล์ ( Xanthophylls ) และ แคโรทีน ( Carotene )

แซนโทฟิลล์ ( Xanthophylls ) เป็นรงควัตถุในแคโรทีนอยด์ที่มีโมเลกุลของคาร์บอนไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งได้แก่ ลูทีน ( lutein ) และ ซีแซนทิน ( Zeaxanthin )

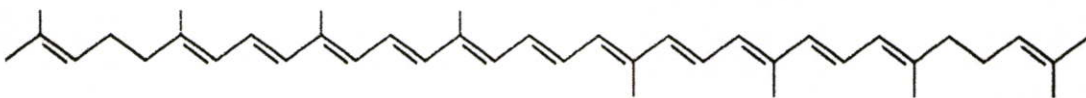
แคโรทีน ( Carotene ) เป็นรงควัตถุในแคโรทีนอยด์ที่มีโมเลกุลของคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเท่านั้น เช่น อัลฟา แคโรทีน ( alphacarotene ) เบต้า แคโรทีน ( betacarotene ) และ ไลโคปีน ( lycopene ) เป็นต้น



Lutein

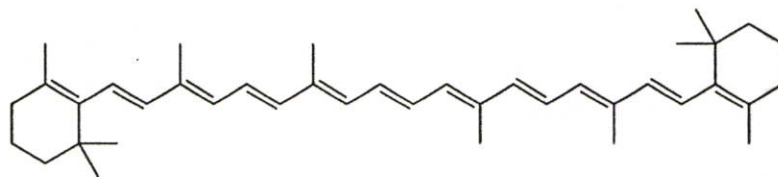


Cryptoxanthin

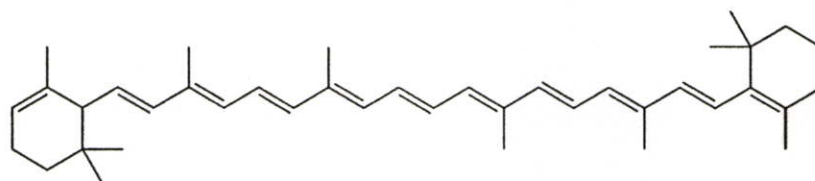


Lycopene

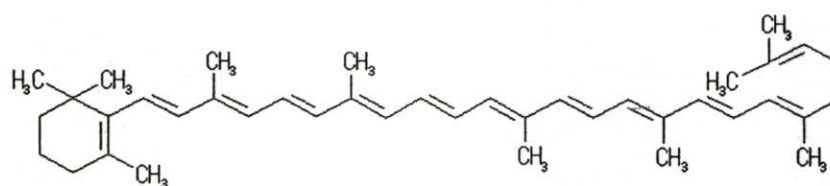
รูปที่ 2.1 สูตร โครงสร้างทางเคมีของแคโรทีนอยด์บางชนิดที่พบในธรรมชาติ [5]



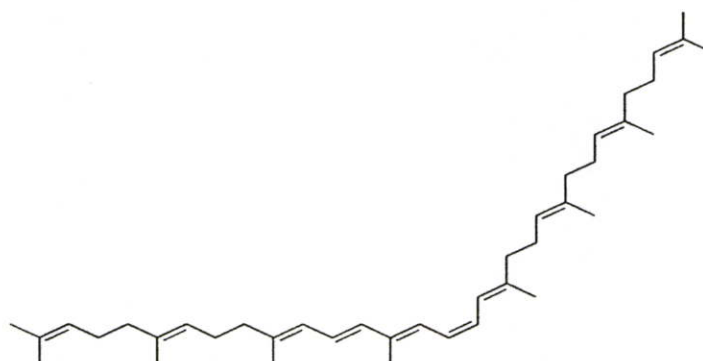
Beta-carotene



Alpha-carotene



Gamma-carotene



Phytofluene

รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของแคโรทีนอยด์บางชนิดที่พบในธรรมชาติ [5]

### 2.1.1 แหล่งของแคโรทีนอยด์ [ 6 ]

แคโรทีนอยด์จะพบได้ในผัก และผลไม้ที่มีสีส้ม เหลือง หรือ แดง เช่น แครอท ฟักทอง หน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพดอ่อน แดงโม แคนตาลูป มะละกอสุก และผักที่มีสีเขียว เช่น บรอกโคลี มะระ ผักบุ้ง ต้นหอม ผักคะน้า ผักตำลึง เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบได้ในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะในน้ำมันปาล์มดิบเป็นแหล่งที่มีแคโรทีนอยด์อยู่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับน้ำมันชนิดอื่น

### 2.1.2 ประโยชน์ของแคโรทีนอยด์ [ 6 ]

แคโรทีนอยด์เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ ( Antioxidant ) ซึ่งทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ ( Free Radicals ) ก่อนที่อนุมูลอิสระจะไปทำปฏิกิริยาทำลายส่วนประกอบต่าง ๆ จนทำให้เซลล์นั้นมีการเจริญเติบโตที่ผิดปกติ เป็นต้นเหตุให้เกิดโรคมะเร็งบางชนิด เช่น มะเร็งในช่องปาก กล้องเสียงดับ หรือภาวะอาหาร โรคเส้นเลือดหัวใจอุดตัน และโรคต่อกระจกในผู้สูงอายุ เป็นต้น นอกจากนี้สารแคโรทีนอยด์ยังมีประโยชน์ต่อร่างกาย และผิวพรรณอย่างมาก คือ ช่วยให้มองเห็นในที่มืดได้ดี ช่วยป้องกันผิวที่อาจเกิดอันตรายจากแสงของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มากับแสงแดดได้ และยังช่วยรักษาสภาพปกติของเซลล์เยื่อบุตาขาว กระจกตา ช่องปาก ทางเดินอาหาร ทางเดินหายใจ รวมถึงทางเดินปัสสาวะให้เป็นปกติ และช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายทำงานได้ดีอีกด้วย

## 2.2 น้ำมันปาล์ม [ 7 ]

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่อนุรักษ์สภาพแวดล้อม ( ecofriendly crop ) เมื่อปลูกปาล์มน้ำมันเป็นระยะเวลานานจะทำให้สภาพนิเวศที่เสียหายไปกลับคืนสู่สภาพธรรมชาติ นอกจากนี้ยังสามารถสกัดองค์ประกอบจากน้ำมันปาล์มได้แก่ กรดไขมันหลายชนิด วิตามินอี และวิตามินเอ นำมาใช้ประโยชน์และใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรม Oleochemical และพลังงานทดแทน

ผลปาล์มน้ำมันให้ผลผลิตน้ำมัน 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์ม ( Palm Oil ) ได้จากการสกัดเนื้อผลปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ( Palm Kernel Oil ) ที่ได้จากการสกัดจากเมล็ดปาล์ม

ผลปาล์ม 1 ผล จะมีน้ำมันปาล์ม 9 ส่วน และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 1 ส่วน น้ำมันที่สกัดจากผลปาล์มสดจะมีเบต้าแคโรทีน ( Beta-Carotene ) โปรวิตามินเอ ( Pro Vitamin A ) และวิตามินอี ( Vitamin E ) ในปริมาณสูง

น้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดไขมันที่อิ่มตัวในสัดส่วนที่สมดุล สำหรับกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้น ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะเดี่ยวโอเลอิก ( mono-unsaturated oleic acid ) ร้อยละ 40 ขณะที่กรดไขมันอิ่มตัวประกอบด้วยกรดปาล์มมิก ( palmitic acid ) ร้อยละ 44% และกรดสเตียริก ( Stearic acid ) ร้อยละ 5 ด้วยสัดส่วนของ

ส่วนผสมดังกล่าว ทำให้น้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติพิเศษ เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารหลายประเภท ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มนอกจากมีองค์ประกอบที่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดไขมันที่อิ่มตัวแล้ว ยังมีองค์ประกอบของสารที่ไม่ใช่กลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนน้อยที่มีประโยชน์เป็นอย่างมาก ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

น้ำมันปาล์มที่สกัดออกในกระบวนการกลั่นยังมีปริมาณแคโรทีนสูงถึงร้อยละ 80 และมีวิตามินอีในสัดส่วนที่สูงมาก จากผลการวิจัยพบว่าวิตามินอีมีคุณสมบัติในการป้องกันการหืนของเซลล์ผิวหนัง โรคหัวใจ และ โรคมะเร็ง จึงมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เช่น วิตามินแคปซูลสำเร็จรูป อาหารเสริม เครื่องสำอาง เป็นต้น

วิตามินเอ แคโรทีนอยด์ และเบต้าแคโรทีน ในน้ำมันปาล์ม เป็นสารต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ทำลายอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นตัวการที่จะทำให้ลายส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ ซึ่งเป็นต้นเหตุของโรคมะเร็ง โดยแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มมีแคโรทีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 11 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยมีเบต้า และอัลฟาแคโรทีนเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 91 ในแคโรทีนอยด์

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม [ 8 ]

ชื่อของกรดไขมัน	ชนิดของกรดไขมัน	ปริมาณที่พบ (%)	
		อยู่ในช่วง	ค่าเฉลี่ย
กรดลอริก	C 12:0	0.1-1.0	0.2
กรดไมริสติก	C14:0	0.9-1.5	1.1
กรดปาล์มิติก	C16:0	41.8-46.8	44.0
กรดปาล์มิตอเลอิก	C16 :1	0.1-0.3	0.1
กรดสเตียริก	C18:0	4.2-5.1	4.5
กรดโอเลอิก	C18 :1	37.3-40.8	39.2
กรดลิโนเลอิก	C18 :2	9.1-11.0	10.1
กรดลิโนเลนิก	C18 :3	0.0-0.6	0.4
กรดอร่าซดิก	C 20:0	0.2-0.7	0.4

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของสารส่วนน้อยในน้ำมันปาล์มดิบ [ 9 ]

	ปริมาณ (ppm)
Carotenoids	500-700
Tocopherol and tocotrienols	600-1,000
Sterols	326-527
Phospholipids	5-130 <sup>a</sup>
Triterpene alcohol	40-80 <sup>a</sup>
Methyl sterols	40-80
Squalene	200-500
Aliphatic alcohols	100-200
Aliphatic hydrocarbon	50

a. โดยประมาณ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของแคโรทีนในน้ำมันปาล์ม [ 10 ]

ชนิดของแคโรทีน	ปริมาณ (%)
Phytoene	1.27
<i>Cis</i> - $\beta$ -Carotene	0.68
Phytofluene	0.06
$\beta$ -Carotene	56.02
$\alpha$ -Carotene	35.16
<i>Cis</i> - $\alpha$ -Carotene	2.49
$\sigma$ -Carotene	0.69
$\gamma$ -Carotene	0.33
$\delta$ -Carotene	0.83
Neurosporene	0.29
$\beta$ -Zeaxarotene	0.74
$\alpha$ -Zeaxarotene	0.23
Lycopene	1.30

## 2.3 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ ( Adsorption ) คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟส โดยเกิดที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างเฟสมีอะตอม โมเลกุลหรือไอออนของสารยึดติดอยู่กับพื้นผิวของของแข็ง ของแข็งที่พื้นผิวเกิดการดูดซับขึ้น เรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารที่ยึดเกาะอยู่ที่พื้นผิวดังกล่าว เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ ( Adsorbate ) [ 11 ] ซึ่งตัวถูกดูดซับอาจอยู่ในวัฏภาคที่เป็นก๊าซหรือเป็นของเหลว โดยแรงที่ทำให้เกิดการดูดซับเป็นแรงที่เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า การดูดซับอาจจำแนกได้เป็น 4 แบบ คือ การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมี และการดูดซับเฉพาะแบบ การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดเนื่องจากบนพื้นผิวดูดซับมีประจุตรงข้ามกับตัวคายซับที่เป็นไอออน การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ ( electrostatic or van der Waals ) และเป็นแรงที่ผันกลับได้ ซึ่งประกอบด้วยแรงลอนดอนดิสเพอร์ชัน ( London dispersion ) และแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ( Electrostatic force ) การดูดซับทางเคมีจะเกิดปฏิกิริยาเป็นพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวคายซับ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ โครงสร้างทางเคมีของตัวดูดซับ ซึ่งแรงนี้จะแข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพและเป็นการดูดซับที่ไม่สามารถผันกลับได้ การดูดซับเฉพาะแบบอาจเกิดเนื่องจากอันตรกิริยาเฉพาะอย่างที่ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวซึ่งแรงนี้อาจมีความแข็งแรงอยู่ในช่วงระหว่างการดูดซับทางกายภาพและเคมี

[ 12 ]

### 2.3.1 กลไกการดูดซับ [ 13 ]

การดูดซับเป็นการถ่ายเทมวลสารจากของเหลวหรือก๊าซจากเนื้อของไหล ( Bulk fluid ) มายังผิวด้านในของของแข็ง การดูดติดผิวของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับเกิดขึ้น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่จากเนื้อของไหล ไปบริเวณผิวด้านนอกของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่ ( Diffusion ) จากผิวด้านนอกของตัวดูดซับเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการดูดซับในรูพรุนของตัวถูกดูดซับที่พื้นที่ผิวภายในของตัวดูดซับซึ่งอาจดูดติดผิวด้วยการแลกเปลี่ยนประจุ แรงทางกายภาพ เคมี หรือทั้งสองอย่างร่วมกัน

### 2.3.2 ประเภทของการดูดซับ [ 14 ]

การดูดซับที่มักกล่าวถึงกัน 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และเคมี มีรายละเอียดที่น่าพิจารณาดังนี้

### 2.3.2.1 การดูดซับทางกายภาพ ( Physical adsorption )

การดูดซับทางกายภาพอาจมีแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงในการดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับทางกายภาพตัวถูกดูดซับ ( Adsorbate ) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเอง องค์ประกอบหลักของการดูดซับทางกายภาพ คือ ธรรมชาติของสาร แรงระหว่างผิวสัมผัส และความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ การดูดซับที่เกิดขึ้นอาจเป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลประเภทมีขั้วทั้งคู่ หรือระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่ หรือระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับ โมเลกุลไม่มีขั้ว

ก. โมเลกุลมีขั้วกับ โมเลกุลมีขั้ว เกิดจากผลของออเรียนเทชัน ( Orientation effect ) คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วแต่ประจุตรงกันข้าม

ข. โมเลกุลไม่มีขั้วกับ โมเลกุลไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย ( Dispersion effect ) คือ โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว สามารถเปลี่ยนเป็นโมเลกุลไดโพลได้ โมเลกุลไดโพล คือ โมเลกุลมีขั้วและไม่มีขั้วในโมเลกุลเดียวกัน ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายู่ด้านใดด้านหนึ่งมากจะทำให้เป็นโมเลกุลไดโพลได้ และเมื่อมีโมเลกุลไม่มีขั้วที่มีลักษณะเดียวกันเข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดกัน โดยแรงดึงดูดระหว่างกันนั้นเป็นแรงที่อ่อน

ค. โมเลกุลมีขั้วกับ โมเลกุลไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการเหนี่ยวนำ ( Induce effect ) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลมีขั้วเข้ามาใกล้กับ โมเลกุลไม่มีขั้วแล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงข้ามกัน หลังจากนั้นจึงเกิดการดึงดูดกัน

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ และเป็นกระบวนการคายความร้อน อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะถูกจำกัดโดยอัตราการเคลื่อนที่ของมวลในวัฏภาคของไหลหรือในตัวดูดซับในกรณีของก๊าซความร้อนของการดูดซับจะสูงเมื่อก๊าซมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

### 2.3.2.2 การดูดซับทางเคมี ( Chemical adsorption )

การดูดซับทางเคมี มีพันธะทางเคมีเป็นแรงในการดูดซับ แรงที่เกิดจะมากกว่าแรงในการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ( Surface site ) ที่สามารถทำการดูดซับได้ พันธะเคมีไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่แข็งแรง มีการจับกันเกิดเป็นสารประกอบเคมี ( Chemical compound )

## 2.3.3 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [14]

2.3.3.1. การดูดซับทางกายภาพส่วนใหญ่จะเกิดจากแรงกระทำแบบที่เกิดการผันกลับ ( Reversible interaction ) ในการดูดซับทางเคมีจะเกิดพันธะเคมีจึงไม่สามารถผันกลับได้ การผันกลับในการดูดซับทางกายภาพนั้นจะทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถหลุดออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับที่เรียกว่า การคายซับ ( Desorption ) ถึงแม้ว่าการคายซับจะเกิดอย่างช้า ๆ เนื่องจากอิทธิพลของการแพร่ แต่ก็เกิดได้เฉพาะที่อุณหภูมิค่าหนึ่งเท่านั้น

2.3.3.2 การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่ว ๆ ไปบนพื้นผิวของตัวดูดซับ คือ จะไม่มีบริเวณจำเพาะ ( specific site ) ในการเกิดกระบวนการดูดซับ ภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับบริเวณจำเพาะ โดยทั่วไปจะเกิดการดูดซับชั้นเดียว

2.3.3.3. แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพคือแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงไฟฟ้าสถิตย์ ความร้อนที่ได้จึงน้อยกว่าการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากพันธะเคมี

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ [ 12 ]

ในกระบวนการทดสอบการดูดซับปัจจัยซึ่งมีผลต่อการออกแบบกระบวนการประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ

#### 2.3.4.1 ลักษณะของตัวถูกดูดซับ ( Characteristics of the Adsorbate )

ลักษณะทางเคมีของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เช่น ขนาดและรูปแบบโครงสร้างของอนุภาคโมเลกุลที่ถูกดูดซับ ขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับนั้นมีความสำคัญ 2 ประการคือ

1. โมเลกุลของสารอินทรีย์เมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายในของเหลวลดลง สารที่มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำจะมีค่า affinity ที่ผิวของแข็งที่ไม่มีขั้วสูงกว่าสารอื่นที่มีขั้วมาก และมีแนวโน้มสะสมความเข้มข้นบนผิวที่เกิดการดูดซับ ขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีผลต่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวภายในที่ถูกดูดซับของตัวดูดซับ ถ้าโมเลกุลของสารมีขนาดใหญ่ การดูดซับจะถูกขัดขวางและความจุของการดูดซับจะลดลง โดยโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีรูปร่างเกะกะกีดขวางไม่สามารถผ่านเข้าไปในตัวดูดซับได้ โมเลกุลขนาดใหญ่จะแพร่ออกจากสารละลายได้ช้ามากและต้องใช้เวลาานสำหรับการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

2. โมเลกุลอาจอยู่ในสถานะที่เป็นไอออนหรือเป็นกลาง เป็นกึ่งไอโซเมอร์หรือเป็นโซ่ตรงล้วนมีผลต่อการแยกสารออกจากสารละลายโดยการดูดซับ รูปแบบของโมเลกุลสามารถส่งผลต่อความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ และรูปแบบของ โมเลกุลยังเป็นตัวกำหนดพลังงานของการดูดซับ ในรูปของแรงที่อนุภาคของโมเลกุลยึดเกาะกับตัวดูดซับ นอกจากนี้ลักษณะของตัวถูกดูดซับยังมีผลต่ออัตราการแพร่ของโมเลกุลผ่านของเหลว ซึ่งอัตราการแพร่เป็นฟังก์ชันกับขนาดโมเลกุล และรูปแบบของ โมเลกุลในตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ

#### 2.3.4.2 ลักษณะของตัวดูดซับ ( Characteristics of the Adsorbent )

คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในการแยกสารหรือตัวถูกดูดซับออกจากสารละลายนั้นมีความสำคัญมาก ลักษณะทางเคมีของตัวดูดซับนั้นประกอบด้วยความสามารถในการแตกตัวเกิดเป็นไอออนของพื้นผิวตัวดูดซับ ชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับ

ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ อาจเปลี่ยนไปเมื่อสัมผัสกับสารละลายชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะเมื่อมีไอออนหรือ หมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวอยู่บนพื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งทำให้เกิดอันตรกิริยาทางเคมี หรือการดูดซับทางเคมี การดูดซับทางเคมีนี้จะทำให้เกิดผลที่แตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ (โดยไม่เกิดการผันกลับ หรือเกิดการผันกลับได้น้อยกว่า ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้อาจมีข้อดีหรือข้อเสียขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ใช้งาน

คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับนั้นมีความสำคัญ ตัวดูดซับอาจอยู่ในรูปแบบที่เป็น เม็ดหรือเป็นอนุภาค ซึ่งอาจมีความหนาแน่นใกล้เคียงหรือแตกต่างจากสารละลายมาก หรือตัวดูดซับอาจมีลักษณะเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจแขวนลอยได้ง่ายในสารละลาย คุณสมบัติทางกายภาพของ อนุภาคตัวดูดซับนั้นมีผลอย่างมากต่อการเลือกนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับบางคุณสมบัติ เช่น พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และการกระจายตัวของพื้นที่ผิวที่ขนาดของรูพรุนต่าง ๆ ในอนุภาคมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยเป็นตัวกำหนดปริมาณความจุของตัวดูดซับที่ใช้งาน และขนาดโมเลกุลที่สามารถดูดซับได้

#### 2.3.4.3 ลักษณะของสารละลาย ( Characteristics of the Solution )

ปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ของลักษณะสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับคือ ค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย อุณหภูมิ และการมีตัวถูกละลายอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบ

ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีผลต่อตัวดูดซับและตัวถูกละลาย ทั้งตัวถูกละลาย และตัวดูดซับอาจมีลักษณะทางเคมีซึ่งได้รับผลจากความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนใน สารละลาย ตัวดูดซับบางตัวมีไอออนไฮโดรเจน หรือ ไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีผลต่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ความสามารถในการละลาย และค่าความจุของการดูดซับโดยตรง สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายในระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจะมีความว่องไวต่อค่าความเป็นกรด-เบสสูง ซึ่งตัวถูกละลายจะเลือกช่วงค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง และจุดที่เกิดการดูดซับได้ สูงที่สุดนั้นเกิดจาก ความสามารถในการละลายที่ต่ำของตัวถูกละลายซึ่งเป็นสารที่ไม่แตกตัวเป็น ไอออนและสามารถเกิดการดูดซับกับตัวดูดซับที่ไม่มีขั้วได้

อุณหภูมิของสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ อัตราของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลของสารจากสารละลายไปยังตัวดูดซับ มีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายและความสามารถในการดูดซับในทิศทางตรงข้ามกัน

ตัวถูกละลายอื่น ๆ อาจแข่งขันกับตัวถูกละลายที่สนใจในการเกิดการดูดซับบนตัวดูดซับ ใด ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการจับตัวแข่งขันกันระหว่างตัวถูกละลาย โดยเฉพาะเมื่อเกิดการดูดซับแบบกายภาพ ซึ่งผันกลับได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางโครมาโตกราฟีเพื่อแยกสารต่าง ๆ ได้

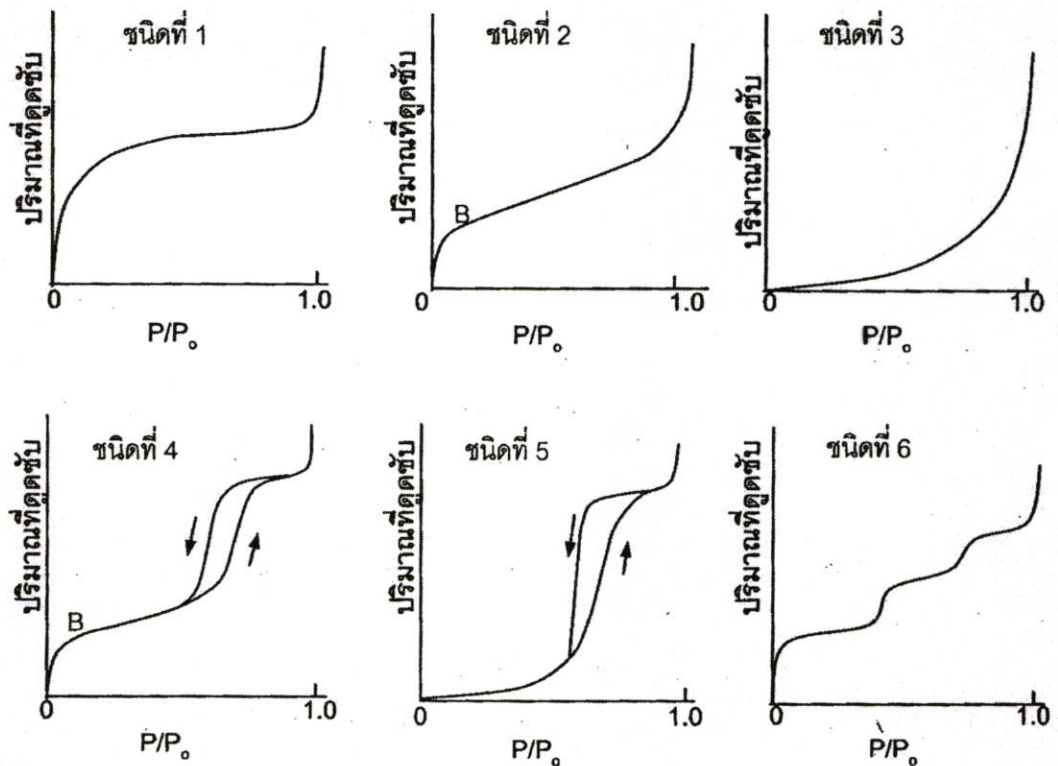
### 2.3.5 สมดุลของการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในอนุภาคของตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิหนึ่ง สำหรับก๊าซความเข้มข้นในวัฏภาคของไหลจะแสดงในรูปร้อยละโดยมวลหรือความดันย่อย สำหรับของเหลวความเข้มข้นจะแสดงในรูปหน่วยมวล เช่น มิลลิกรัมต่อลิตรหรือไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนของแข็งมักแสดงในรูปมวลที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ [ 11 ]

การศึกษาสมดุลและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ( adsorption ) และการคายซับ ( desorption ) เป็นสิ่งที่ช่วยให้เข้าใจกระบวนการแยกได้ดียิ่งขึ้น และสามารถแยกสารได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาใช้อธิบายสมดุลของการดูดซับในงานวิจัยต่าง ๆ เช่น สมการ Langmuir Freundlich [ 15 ] Redlich และ Peterson [ 16 ] และ Radke และ Prausnitz ไอโซเทอม [ 17 ]

การทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับนั้นมีประโยชน์สำหรับการหาค่าความจุของการดูดซับเพื่อความสะดวกในการประเมินค่าการดำเนินงานของกระบวนการสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม และการกำหนดปริมาณตัวดูดซับที่ต้องการในเบื้องต้น นอกจากนี้ไอโซเทอมการดูดซับยังมีบทบาทในการทำนายกระบวนการจำลองสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบการดูดซับ และไอโซเทอมการดูดซับยังใช้สำหรับการประเมินค่าทางทฤษฎี และการอธิบายปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น ค่าความร้อนของการดูดซับ ซึ่งแบบจำลองที่สภาวะสมดุลต่างๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการอธิบายไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพมีความหลากหลาย ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ในปี ค.ศ. 1945 Brunauer ได้จำแนกชนิดของไอโซเทอมเป็น 6 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีชื่อที่เรียกเป็นไปตามระบบ IUPAC [ 18 ]



รูปที่ 2.2 ไอโซเทอมทั้ง 6 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC [18]

ชนิดที่ 1 ( Type I ) เรียกว่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ( Langmuir isotherm ) สำหรับการดูดซับที่ถือว่าเป็นชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ ( Langmuir equation ) ที่มีพื้นผิวของตัวดูดซับมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่มีอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับ ไอโซเทอมแบบนี้มักจะพบในวัสดุที่มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ เช่นซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์บางชนิด ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่ กรณีเช่นนี้ ปริมาตรของรูพรุนจะมีค่ามากกว่าปริมาตรที่ทำให้เกิดการดูดซับชั้นเดียวมาก การดูดซับแบบนี้จะพบในการดูดซับที่ย้อนกลับได้

ชนิดที่ 2 ( Type II ) บางครั้งจะเรียกว่า Sigmoid หรือ ไอโซเทอมรูปตัวเอส ( S-Shaped isotherm ) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่หรือมาโครพอร์ส ( Macroporous ) ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวแล้ว หลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น ดังนั้นปริมาณการดูดซับที่จุด B จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ การดูดซับแบบนี้ย้อนกลับได้

ชนิดที่ 3 ( Type III ) มีรูปร่างเหมือนกระจกเว้า ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน เกิดเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ เช่นการดูดซับของสารที่มีขั้วบนวัสดุที่ไม่มีขั้ว หลังจากที่ผิวหน้าถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกันเองมีสูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ได้แก่การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

ชนิดที่ 4 ( Type IV ) มักจะพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบมีโซพอร์ส ( Mesopore ) คือมีขนาดของรูพรุนขนาดเล็กระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร การดูดซับในช่วงแรกซึ่งมีค่า  $P/P_0$  ต่ำจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า  $P/P_0$  มาก ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบกะปิลารี ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งเกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายซับไม่ทับกัน เพราะการคายซับเกิดได้ยากกว่าเพราะต้องเอาชนะแรงกะปิลารี ขนาดของการควบแน่นในรูขนาดเล็กสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายของขนาดของรูพรุน ( Pore-size distribution ) ได้

ชนิดที่ 5 ( Type V ) เหมือนกับชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า  $P/P_0$  สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ ส่วนฮิสเทอรีซิสจากการดูดซับและการคายซับ ก็เกิดจากการเอาชนะแรงกะปิลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทอมชนิดนี้พบไม่บ่อยนัก

ชนิดที่ 6 ( Type VI ) เรียกว่าเป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได ( Stepped isotherm ) ซึ่งพบได้ไม่บ่อยนัก เกิดจากการดูดซับทีละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของเส้นกราฟ จะขึ้นกับอุณหภูมิ

### 2.3.6 แบบจำลองสมดุลการดูดซับต่าง ๆ

สมการไอโซเทอม 2 สมการที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับ คือ Langmuir และ Freundlich ไอโซเทอม

#### 2.3.6.1 แบบจำลองของ Langmuir [ 12 ]

แบบจำลองนี้เริ่มต้นได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการดูดซับของก๊าซบนวัฏภาคของแข็ง โดยตั้งสมมติฐานว่า พลังงานการดูดซับมีค่าคงที่ และไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุม นั่นคือการดูดซับเกิดขึ้นบนบริเวณจำเพาะ โดยไม่มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ และปริมาณการดูดซับที่สูงที่สุดเกิดขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ถูกปกคลุมโดยตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ความสัมพันธ์จะได้มาจากการพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการควบแน่น และการระเหยของ โมเลกุลของก๊าซที่ผิวของของแข็ง ถ้า  $\theta$  คือเศษส่วนของพื้นที่ผิวตัวดูดซับที่ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียว ดังนั้นอัตราของการระเหยจากพื้นผิวคือ  $\theta$  ซึ่งคล้ายกัน อัตราของการควบแน่นของ โมเลกุลของก๊าซบนพื้นผิวเป็นอัตราส่วนของบริเวณที่ว่างที่เหลืออยู่ หรือ  $(1 - \theta)$  และความดันสัมบูรณ์ของ

ก๊าซ P ซึ่งหาได้จากอัตราที่โมเลกุลสัมผัสกับผิว สมการอัตราการระเหย 2 อัตราที่สภาวะสมดุล แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$k_d\theta = k_aP(1-\theta) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $k_d$  และ  $k_a$  คือ ค่าคงที่ของการระเหยและการควบแน่นตามลำดับ และ  $\theta$  คือสัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุม

$$\theta = \frac{k_aP}{k_d + k_aP} = \frac{bP}{1 + bP} \quad (2.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับ  $b = k_a/k_d$  ซึ่งสัมพันธ์กับเอนทัลปีของการดูดซับ ( $\Delta H$ ) โดย

$$b = b_0e^{-\Delta H/RT} \quad (2.3)$$

ในที่นี้  $b_0$  คือ ค่าคงที่อัตราของเอนโทรปี จากสมการที่ 3 สำหรับระบบที่เป็นของแข็ง-ของเหลว สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$q_e = \frac{Q^0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ  $Q$  คือ ความเข้มข้นที่เกิดจากการปกคลุมอย่างสมบูรณ์บนบริเวณที่สามารถเกิดการดูดซับสารได้บนวฏภาคของแข็ง หรือขอบเขตจำกัดความจุการดูดซับ และ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในวฏภาคของไหลที่สภาวะสมดุล สมการที่ 2.4 สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้หลากหลายดังสมการที่ 2.5, 2.6 และ 2.7

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{Q^0 b} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q^0} + \frac{1}{bQ^0 C_e} \quad (2.6)$$

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หรือ 
$$q_e = Q^0 - \frac{q_e}{bC_e} \quad (2.7)$$

### 2.3.6.2 แบบจำลองของ Freundlich

Freundlich (1962) ได้เสนอแนะว่าข้อมูลสมดุลของการดูดซับนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.8

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $K_F$  และ  $1/n$  คือ ค่าคงที่ สมการที่ (2.8) สามารถเขียนในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.9)$$

### 2.3.7 การดูดซับในวัฏภาคของเหลว [ 19 ]

การดูดซับในวัฏภาคของเหลวจะแตกต่างจากการดูดซับในวัฏภาคก๊าซเนื่องจากในวัฏภาคของเหลวอาจเกิดการดูดซับของตัวถูกดูดซับและตัวทำละลาย หรือสารอื่น ๆ ในสารละลายอาจมีอันตรกิริยาระหว่างสารต่าง ๆ ในกรณีนี้ที่สารละลายของตัวถูกดูดซับเป็นสารละลายเข้มข้น ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับในไอโซเทอมของการดูดซับจะเขียนในรูปของฟังก์ชัน  $m_0 \frac{\Delta w_A}{m_s}$  เมื่อ  $m_0$  คือน้ำหนักเริ่มต้นของสารละลายก่อนการดูดซับ  $\Delta w_A$  คือผลต่างของสัดส่วนมวลของสาร A ในสารละลายก่อนและหลังการดูดซับ และ  $m_s$  คือน้ำหนักของตัวดูดซับ ในระบบสององค์ประกอบ (A+B) ฟังก์ชันดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหลังจากเกิดการดูดซับดังนี้

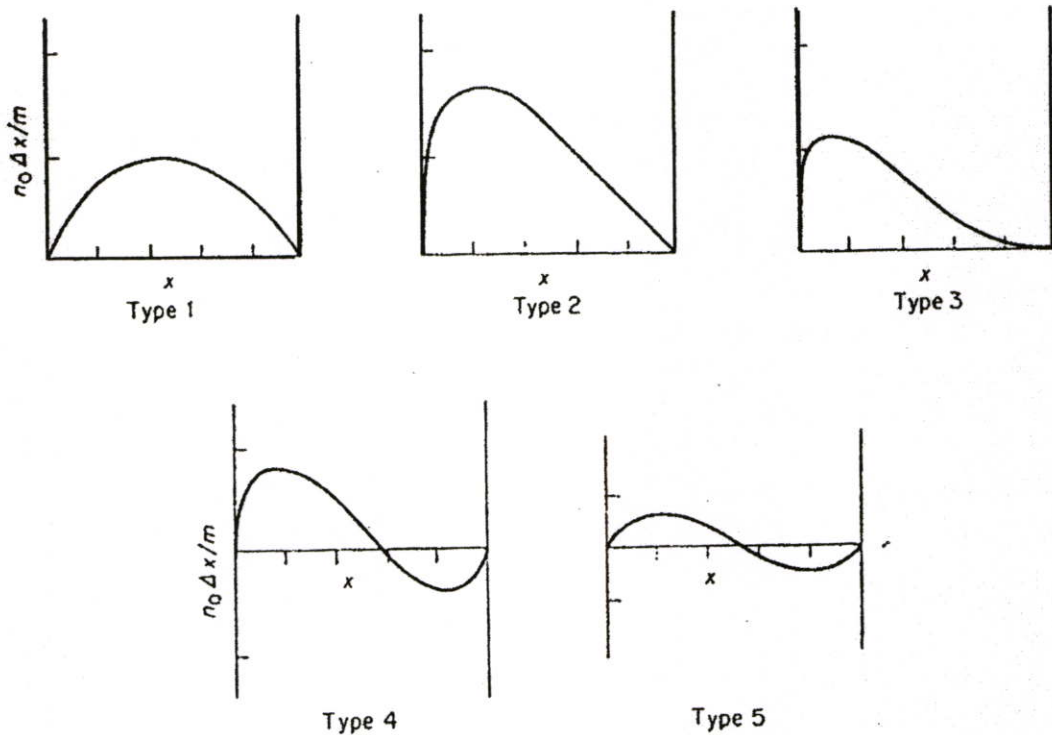
$$m_0 \frac{\Delta w_A}{m_s} = w_{A,s}(1-w_A) - w_{B,s}w_A \quad (2.10)$$

เมื่อ  $w_{A,s}$  และ  $w_{B,s}$  คือน้ำหนักของตัวถูกดูดซับ A และ B ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยค่าทั้งสองจะเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ A และ B ในสารละลาย ไอโซเทอมการดูดซับของสารละลายเข้มข้นเมื่อเขียนในรูปฟังก์ชัน  $m_0 \frac{\Delta w_A}{m_s}$  เรียกว่าคอมโพสิทไอโซเทอม ซึ่งมีอยู่ 5 แบบ ดังรูปที่ 2.3 โดยคอมโพสิทไอโซเทอมดังกล่าวจะเป็นผลรวมของไอโซเทอมของสารแต่ละตัว

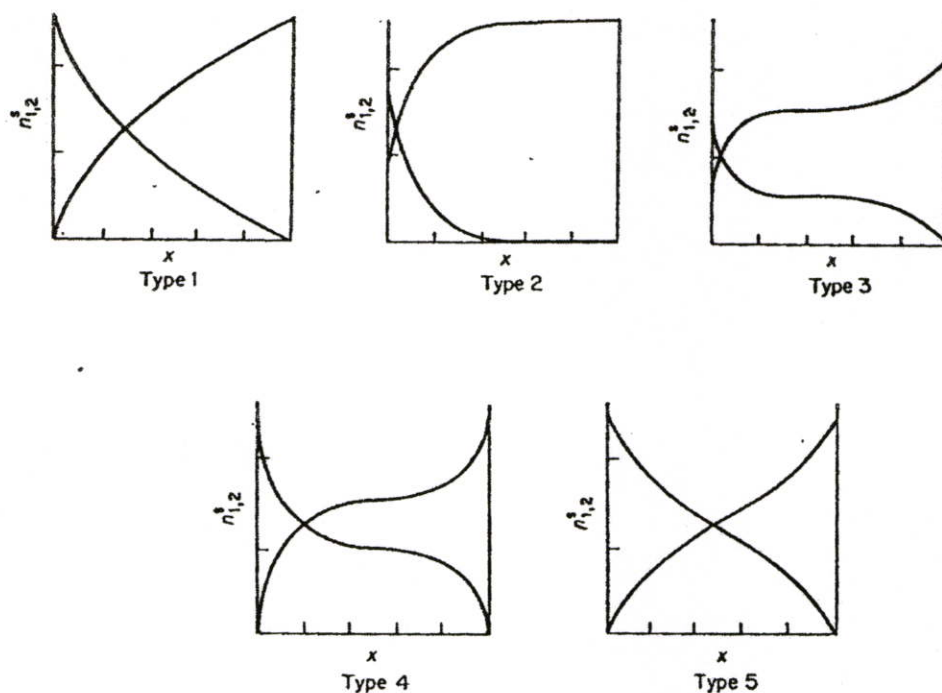
( Individual Isotherm ) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสอดคล้องกับคอมโพสิทไอโซเทอมแต่ละชนิดในรูปที่ 2.3 เมื่อสารละลายเป็นสารละลายเจือจาง เช่น ในกรณีของแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบที่มีความเข้มข้นอยู่ในระดับ 500-700 ppm สมการที่ (2.10) จะลดรูปลงมาเป็น

$$m_0 \frac{\Delta w_A}{m_s} \approx w_{A,s}$$

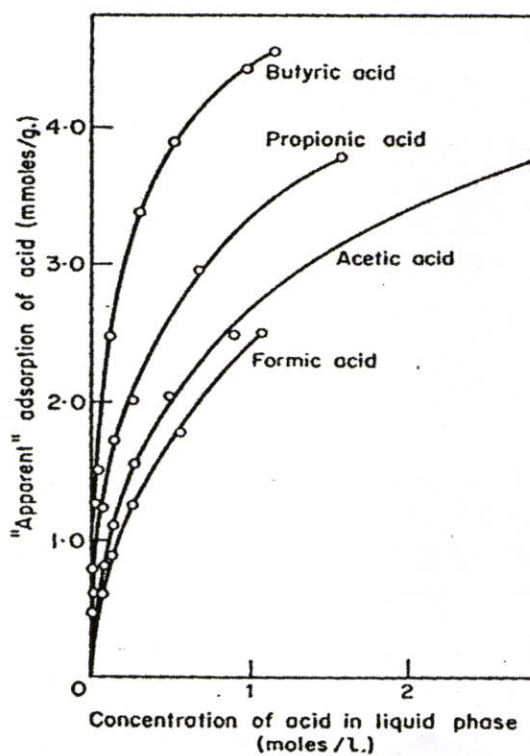
เนื่องจาก  $w_A \ll 1$  หรือพจน์ดังกล่าวในกรณีสารละลายเจือจาง จะเป็นปริมาณของสาร A ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับ โดยพบว่าในกรณีที่เป็นสารละลายเจือจาง ไอโซเทอมของการดูดซับจะมีรูปแบบเหมือนการดูดซับแบบ Langmuir ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.3 ชนิดของ composite isotherm ตามแบบ Schay [19]



รูปที่ 2.4 ชนิดของ individual isotherm ตามแบบ Schay [19]



รูปที่ 2.5 การดูดซับกรดไขมันในสารละลายเจือจางที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายด้วย charcoal [19]

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับแคโรทีนอยด์โดยใช้ตัวดูดซับเรซิน ซึ่งมีดังต่อไปนี้

Baharin B.S. และคณะ [ 20 ] ได้ศึกษาการแยกแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบในคอลัมน์ โดยใช้ synthetic porous polymer ซึ่งได้แก่ Diaion HP-20, alumina และ silicagel จากการทดลองพบว่า Diaion HP-20 เป็นตัวดูดซับที่มีความจุของการดูดซับสูง และมีความสามารถในการแยกแคโรทีน จากน้ำมันปาล์มได้เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากและไม่มีขั้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เรซิน Diaion HP-20 เป็นตัวดูดซับแคโรทีนจากน้ำมันปาล์ม และมีการกำหนดระบบตัวทำละลายเริ่มต้นสำหรับการแยกด้วยคอลัมน์ HP-20 โดยใช้แอลกอฮอล์เบา เช่น เมทานอล เอทานอล และ ไอโซโพรพานอล เป็นตัวทำละลายเริ่มต้น และคอลัมน์ที่แยกเป็นแบบ reverse-phase ต่อจากนั้นจึงใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย ซึ่งสามารถละลายแคโรทีนอยด์ที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวที่ไม่มีขั้วของเรซิน HP-20 ออกมาได้ ซึ่งไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายที่สามารถละลายน้ำมันปาล์มดิบได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวทำละลายเมทานอล และเอทานอล ผลการทดลองพบว่าได้แคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบมีความเข้มข้น 100,000 ppm ซึ่งเพิ่มขึ้น 160 เท่า จากความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำมันปาล์มดิบ องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการแยก และองค์ประกอบของแคโรทีนยังคงเหมือนองค์ประกอบของแคโรทีนที่อยู่ในน้ำมันปาล์มดิบโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

Latip และคณะ [ 21 ] ได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนากระบวนการแยกแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ กัน ทำการผสมตัวดูดซับต่างชนิดกันแล้วนำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับ และหาอัตราส่วนของตัวดูดซับและน้ำมันปาล์มดิบ สำหรับชนิดของตัวดูดซับที่ Latip และคณะ ได้เลือกใช้เป็นเรซินชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีความเป็นรูพรุนสูงได้แก่ Diaion HP-20, SP 850 และ SP 825 เป็นเรซินชนิด styrene divinyl benzene (SDVB) copolymer และเรซินชนิดอื่น ๆ ได้แก่ SP 207 ซึ่งเป็น Brominated SDVB ที่ช่วยเพิ่มความไม่มีขั้ว (Hydrophobicity), Relite Exa 31 เป็น Methacrylic resin, Relite Exa 32 และ Relite Exa 50 เป็น SDVB ผลการศึกษาการดูดซับแคโรทีนของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ พบว่าตัวดูดซับแต่ละชนิดสามารถดูดซับแคโรทีนได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยที่ Diaion HP-20 และ SP 850 สามารถแยกแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุดในขณะที่ SP 207 และ Relite Exa 31 มีความสามารถในการแยกต่ำมาก จากการผสมตัวดูดซับ Diaion HP-20 และ SP 850 เข้าด้วยกันพบว่าร้อยละของการแยกแคโรทีนจากน้ำมัน

ปาล์มดิบเพิ่มมากขึ้น และอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับและน้ำมันปาล์มดิบเท่ากับ 4 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการแยกแคะโรทีน

Latip และคณะ [ 22 ] ศึกษาการแยกแคะโรทีนจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยกระบวนการดูดซับแบบกะ โดยใช้ตัวดูดซับสังเคราะห์และทำการสกัดด้วยตัวทำละลายในแบบแบช จากการทดลองพบว่า แคะโรทีนในน้ำมันปาล์มมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 20,000 ppm หรือ 33.3 เท่าจากความเข้มข้นของแคะโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้น % Recovery ของแคะโรทีนที่แยกได้อยู่ในช่วงร้อยละ 16 ถึงร้อยละ 74 ขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการในการดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเวลาในการดูดซับ เวลาในการสกัดด้วยไอโซโพรพานอล อุณหภูมิของการดูดซับ ผลของการเขย่า และการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ในงานวิจัยนี้ Latip และคณะ ได้เลือกใช้ตัวดูดซับเรซิน HP-20 และ SP 850 ที่มีความพรุนสูง และมีโครงสร้างเป็น styrene divinyl benzene (SDVB) copolymer จากการทดลองศึกษาเวลาในการดูดซับ พบว่าเวลาในการดูดซับที่น้อยที่สุดสำหรับการแยกแคะโรทีนในการทดลองนี้คือ 0.5 ชั่วโมง เวลาในการดูดซับที่ 1.5 ชั่วโมง ทำให้ความเข้มข้นของแคะโรทีนที่แยกได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมากกว่าเวลาในการดูดซับที่ 0.5, 1 และ 2 ชั่วโมง เวลาในการสกัดด้วยไอโซโพรพานอลได้มีการวิเคราะห์ผลโดยดูจากความเข้มข้นของแคะโรทีนสุดท้ายที่ได้ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ และกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายคือที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาผลของการกวนพบว่า การกวนไม่มีผลต่อร้อยละของแคะโรทีนที่สกัดได้ และไม่มีผลต่อความเข้มข้นของแคะโรทีนในระหว่างกระบวนการสกัดด้วยไอโซโพรพานอล และเมื่อนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ 3 ครั้งยังได้ผลการสกัดเหมือนเรซินใหม่

Chan และคณะ [ 23 ] ได้ศึกษาไอโซโทมการดูดซับจากการแยกแคะโรทีนในน้ำมันปาล์ม โดยการใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวดูดซับเรซิน HP-20, Exa 31, Exa32, และ Exa 50 สำหรับแยกแคะโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ การศึกษาไอโซโทมการดูดซับได้ทำการทดลองโดยนำน้ำมันปาล์มดิบมาละลายในเฮกเซน ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผสมจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายน้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้นของแคะโรทีนแตกต่างกัน ใส่ในหลอดแก้วทดลองที่มีเรซิน HP-20 ปริมาณ 1 กรัม บรรจุอยู่ นำไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 70 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และ 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้แยกชั้นเป็นเวลา 5 นาที และแยกสารละลายน้ำมันปาล์มดิบออกจากเรซิน และนำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคะโรทีนโดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Chan และคณะ ได้ทำการทดลองศึกษาไอโซโทมการดูดซับของเรซินตัวอื่นๆ ด้วย โดยทำการทดลองเหมือนกับวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น แต่เปลี่ยนชนิดของเรซินที่ใช้เป็น Exa 31, Exa32, และ Exa 50 นอกจากนี้ Chan และคณะ ได้เปลี่ยนตัวทำละลายจากเฮกเซนเป็นไอโซโพรพานอล

แทน จากการทดลองพบว่า การใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายทำให้เกิดการดูดซับได้มากกว่าการใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายในเรซินทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้ ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุดโดยใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายคือ เรซิน HP-20 ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่ได้จากการใช้เรซิน HP-20 เป็นตัวดูดซับ เมื่อใช้เฮกเซนและไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายคือ 0.06 และ 0.325 กรัมต่อกรัมเรซิน ตามลำดับ แบบจำลองการดูดซับแคโรทีนได้มีการทดสอบเทียบกับผลการทดลองโดยการใช้แบบจำลองไอโซเทอมของ Langmuir โดยแบบจำลองไอโซเทอมของ Langmuir พบว่าเพียงพอสำหรับการอธิบายการดูดซับแคโรทีนด้วยเรซินทั้ง 4 ชนิด

You และคณะ [ 24 ] ได้ศึกษาการแยกแคโรทีนจากน้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มที่ผ่านการไฮโดรไลซิสโดยการดูดซับแบบ Column Chromatography โดยนำน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida Rugosa* เป็นตัวไฮโดรไลซ์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระในน้ำมันเพิ่มมากขึ้น และได้มีการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น และปริมาณแคโรทีนที่เสื่อมสภาพหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส น้ำมันปาล์มที่ผ่านการไฮโดรไลซ์จะถูกนำไปผ่านคอลัมน์ ซึ่งใช้ Diaion HP-20 เป็นตัวดูดซับสำหรับ reverse phase column chromatography ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยไอโซโพรพานอล หรือเอทานอลถูกใช้เป็นตัวทำละลายเริ่มต้น และ นอร์มอลเฮกเซนถูกใช้เป็นตัวทำละลายในการคายซับเอาแคโรทีนออกจากเรซิน วัตถุประสงค์ของการไฮโดรไลซ์น้ำมันปาล์มคือ เพื่อให้เกิดกรดไขมันอิสระในน้ำมันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกรดไขมันอิสระเป็นสารที่มีความมีขั้วสูง แคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นสารที่มีขั้วต่ำจะเข้าจับกับตัวดูดซับ HP-20 ที่มีความมีขั้วต่ำเหมือนกัน ภายในกระบวนการ Column Chromatography การไฮโดรไลซ์น้ำมันปาล์มด้วยเอนไซม์ไลเปสจาก *Candida Rugosa* จะเกิดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินเพิ่มขึ้น 30 และ 60 เท่า ตามลำดับ ในเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส การเสื่อมสภาพหรือการถูกทำลายของแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันปาล์มโอเลอินคิดเป็นร้อยละ 15.56 และ 17.48 ตามลำดับ สำหรับการทำให้ Column Chromatography การใช้ไอโซโพรพานอล หรือเอทานอลเป็นตัวทำละลายเริ่มต้น น้ำมันที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์ พบว่า แคโรทีนที่แยกได้ในแฟรกชันที่ 2 มี % Recovery 36 ถึง 37 สำหรับน้ำมันที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ พบว่าแคโรทีนที่แยกได้ในแฟรกชันที่ 2 มี % Recovery 90 ถึง 96

Khoo และคณะ [ 25 ] ศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีน โดยการใช้ดินฟอกสีชนิดต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับ ซึ่ง Khoo และคณะ ได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้แก่ tonsil, fuller's earth, kaolin และ silica ในการดูดซับเบต้าแคโรทีน จากการทดลองพบว่า ดินฟอกสีที่สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้มากที่สุดคือ tonsil และปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับจะลดลงเมื่อใช้ตัวดูด

ซัพ fuller's earth, kaolin และ silica ตามลำดับ และการดูดซับที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวดูดซับ fuller's earth และ kaolin เป็นการดูดซับแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี สำหรับ silica การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ พลังงานการกระตุ้นของอาร์เรเนียสจากการดูดซับเบต้าแคโรทีน โดยมีอะซิโตนเป็นตัวทำละลายบนตัวดูดซับ tonsil มีค่าเท่ากับ 10 kcal/mol และสำหรับการดูดซับทางเคมี ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องจากมีไอออนของโลหะ เช่น  $Fe^{3+}$  เป็น active site

Liew และคณะ [ 26 ] ศึกษาการดูดซับแคโรทีนจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้ Acid-Treated Rice Hull Ash เป็นตัวดูดซับ ซึ่งเถ้าแกลบ (Rice Hull Ash) นั้นได้จากการนำแกลบมาทำ heat treatment และนำมากระตุ้นด้วยกรดและทำการล้าง ซึ่งพบว่าเป็นตัวดูดซับที่ไม่สามารถดูดซับแคโรทีนออกได้ในน้ำมันปาล์ม ได้ดีเหมือนที่มีการรายงานไว้ในการดูดซับสาร Lutein ในน้ำมันถั่วเหลือง แต่อย่างไรก็ตาม เถ้าแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดแต่ไม่มีการล้างกรดออกจะมีความว่องไวในการดูดซับแคโรทีนสูงกว่าคาร์บอน และ ซิลิกา และมีความว่องไวต่ำกว่าดินฟอกสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมเล็กน้อย เถ้าแกลบ ที่ผ่านการทำ heat treatment ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส เมื่อกระตุ้นด้วยกรดจะเป็นตัวดูดซับที่ว่องไว เถ้าแกลบที่กระตุ้นด้วยกรดแต่ไม่ผ่านการล้างเมื่อนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส จะทำให้มีความว่องไวลดลง กรดที่ถูกดูดซับในเถ้าส่วนที่ทำให้เกิดความว่องไวในการดูดซับ จากการทดลองพบว่าการแยกแคโรทีนออกดีในน้ำมันปาล์มดิบที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากอันตรกิริยาทางเคมีของกรดดูดซับกับแคโรทีน การมี  $Fe^{3+}$  ปริมาณน้อย ๆ ในเถ้าแกลบไม่มีผลต่อการดูดซับแคโรทีน

Sirier และ Guler [ 27 ] ศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนบนตัวดูดซับ Montmorillonite ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด โดย Sirier และ Guler ได้ทำการศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนจากสารละลายที่มีเบนซีนเป็นตัวทำละลายบนตัวดูดซับ Canakkale montmorillonite ของตุรกี ที่มีการกระตุ้นด้วยกรด จากการทดลองพบว่าไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบ Langmuir และมีความร้อนของการดูดซับเท่ากับ 193.5 กิโลจูลต่อโมล ปริมาณของกรดที่ลดลงบนพื้นผิวของดินฟอกสีเท่ากับ  $0.45 \times 10^{-4}$  โมลต่อกรัมของดินฟอกสีหลังการดูดซับ เมื่อทำการ ไตรเอตด้วย diethylamine การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมีโดยเกิดจากอันตรกิริยาของเบต้าแคโรทีนกับบริเวณกรดบนตัวดูดซับ Montmorillonite

## บทที่ 3

# อุปกรณ์และการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการทดลองศึกษาตัวดูดซับเรซินที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์ม
2. ทำการทดลองศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการละลายน้ำมันปาล์มเพื่อใช้ในการศึกษาการดูดซับแคโรทีนอยด์ด้วยตัวดูดซับเรซิน
3. ทำการทดลองศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ
4. ทำการทดลองศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มคิบด้วยตัวดูดซับเรซินที่เหมาะสมที่อุณหภูมิต่าง ๆ
5. ทำการทดลองศึกษาการคายซับแคโรทีนอยด์จากตัวดูดซับเรซิน
6. นำตัวดูดซับเรซินที่ใช้งานแล้วมาทำการดูดซับใหม่

### 3.2 อุปกรณ์การทดลอง

1. ขวดแก้ว ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ขวดรูปชมพู่
3. หลอดหยด
4. ขวดวัดปริมาตร
5. ปิเปต
6. เครื่องชั่ง Mettler Toledo รุ่น AX 205 ที่มีความแม่นยำ  $\pm 0.0001$  กรัม
7. เครื่องเขย่า JANKE & KUNKEL รุ่น HS 500
8. เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Thermo Electron Corporation)
9. เครื่องตรวจวัด UV- Visible (Lab Alliance Model 500) สำหรับ HPLC

### 3.3 สารเคมี

- 1 น้ำมันปาล์มคิบ
2. สารมาตรฐานเบต้าแคโรทีน

3. เรซิน Amberlyst 35Dry
4. เรซิน Amberlyst A26OH
5. เรซิน Amberlite XAD16
6. เรซิน Amberlite XAD1600
7. เรซิน Amberlite XAD1180
8. เรซิน Lewatit<sup>®</sup> VP OC 1064
9. เรซิน Lewatit<sup>®</sup> S 6368
10. เฮกเซนเกรดวิเคราะห์
11. เอทิลอะซีเตตเกรดการค้า
12. เตตระไฮโดรฟิวแรนเกรดวิเคราะห์
13. เมทิลเอทิลคีโตนเกรดวิเคราะห์
14. อะซีโตนเกรดวิเคราะห์
15. ไอโซโพรพานอลเกรดวิเคราะห์
16. เฮกเซนเกรด HPLC
17. เมทานอลเกรด HPLC
18. แก๊สไนโตรเจน 99.5%

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การศึกษาตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ

นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยเฮกเซน หรือ ไอโซโพรพานอลโดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 25 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ปริมาณ 10 กรัม และซั่ง เรซิน Amberlyst 35Dry ปริมาณ 1 กรัม เติมลงในขวด นำไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้นเป็นเวลา 5 นาที และแยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากเรซิน แล้วนำสารละลายน้ำมันปาล์มที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์หลังจากการดูดซับ โดยใช้เครื่อง HPLC โดยมีรายละเอียดแสดงไว้ในข้อ 3.4.9

ทำการทดลองซ้ำเหมือนที่กล่าวไปข้างต้น แต่เปลี่ยนชนิดของเรซินจาก Amberlyst 35Dry เป็น Amberlyst A26OH , Amberlite XAD16, Amberlite XAD1600, Amberlite XAD1180, Lewatit<sup>®</sup> VP OC 1064 และ Lewatit<sup>®</sup> S 6368

### 3.4.2 การศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสม

นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยไอโซโพรพานอลโดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 25 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มดิบที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ปริมาณ 10 กรัม และชั่ง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม เติมลงในขวด นำไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้นเป็นเวลา 5 นาที และแยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากเรซิน แล้วนำสารละลายน้ำมันปาล์มที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ โดยใช้เครื่อง HPLC

ทำการทดลองซ้ำเหมือนที่กล่าวไปข้างต้น แต่เปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายจากไอโซโพรพานอล เป็น เฮกเซน เอทิลอะซิเตต เตตระไฮโดรฟูแรน เมทิลเอทิลคีโตน และอะซิโตน

### 3.4.3 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ

นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยไอโซโพรพานอลโดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 10 และ 50 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ปริมาณ 10 กรัม ชั่ง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม เติมลงในขวด นำไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 10, 30 และ 60 นาที แล้วนำสารตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ในสารละลายน้ำมันปาล์ม โดยใช้เครื่อง HPLC

### 3.4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับ

นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยไอโซโพรพานอลโดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 3, 5, 7, 10, 20, 30, 40 และ 50 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ปริมาณ 10 กรัม และชั่ง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม เติมลงในขวด นำไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35, 45, และ 55 องศาเซลเซียส จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้นเป็นเวลา 5 นาที และแยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากเรซิน หลังจากนั้นนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เหลืออยู่ โดยใช้เครื่อง HPLC และนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

$$q_A = \left[ \frac{(C_{A0} - C_{Ae})}{m} \right] \times m_{sol} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $q_A$  = ปริมาณของแคโรทีนอยด์ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เรซินที่สถานะสมดุล (ไมโครกรัม/กรัมเรซิน)

$C_{A0}$  = ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายน้ำมันเริ่มต้น  
(ไมโครกรัม/กรัมสารละลาย)

$C_{Ae}$  = ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายน้ำมันที่สภาวะสมดุล  
(ไมโครกรัม/กรัมสารละลาย)

$m$  = น้ำหนักของตัวดูดซับเรซิน (กรัม)

$m_{sol}$  = น้ำหนักของสารละลายน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = \left[ \frac{(C_{A0} - C_{Ae})}{C_{A0}} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

### 3.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้แบบจำลองสมดุลการดูดซับต่าง ๆ

นำผลการทดลองจากข้อ 3.4.4 ไปวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับด้วยสมการแบบจำลองของ Langmuir Freundlich และแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา

### 3.4.6 การศึกษาการคายซับ

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการดูดซับ และการคายซับ

#### ขั้นตอนที่ 1 การดูดซับ

นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยไอโซโพรพานอลโดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 30 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาณ 150 กรัม และชั่ง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 15 กรัม เติมนลงในขวด นำไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้นเป็นเวลา 5 นาที และแยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากเรซิน หลังจากนั้นนำสารละลายน้ำมันปาล์มหลังการดูดซับไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เหลืออยู่ โดยใช้เครื่อง HPLC

#### ขั้นตอนที่ 2 การคายซับ

นำเรซินที่ผ่านการดูดซับแคโรทีนอยด์ไว้จนถึงจุดสมดุลในขั้นตอนที่ 1 มาปริมาณ 0.176, 0.371, 0.54, 0.704, 1.0037 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร นำมาทำการคายซับ 4 ครั้ง

ครั้งที่ 1 และ 2 ทำการคายซับโดยใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ปริมาณ 10 กรัม แต่ละครั้งนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 3 และ 4 ทำการคายซับโดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซน ปริมาณ 10 กรัม แต่ละครั้งนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

นำสารละลายจากการคายซับทั้ง 4 ครั้ง ไปหาปริมาณแคโรทีนอยด์โดยใช้เครื่อง HPLC

### 3.4.7 การนำตัวดูดซับเรซินที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่

1. นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยไอโซโพรพานอล โดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 30 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มดิบที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ปริมาณ 10 กรัม และซังเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม เติมนลงในขวด นำไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้นเป็นเวลา 5 นาที และแยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากเรซิน หลังจากนั้นนำสารละลายน้ำมันปาล์มหลังการดูดซับไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เหลืออยู่ โดยใช้เครื่อง HPLC
2. นำเรซินที่ผ่านการดูดซับแคโรทีนอยด์ไว้จนถึงจุดสมดุลหรือจุดอิ่มตัวในขั้นตอนที่ 1 มาทำการคายซับ 4 ครั้ง
  - ครั้งที่ 1 และ 2 ทำการคายซับโดยใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ปริมาณ 10 กรัม แต่ละครั้งนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส
  - ครั้งที่ 3 และ 4 ทำการคายซับโดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซน ปริมาณ 10 กรัม แต่ละครั้งนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส
3. นำเรซินที่ผ่านการคายซับจนไม่มีน้ำมันปาล์ม และแคโรทีนอยด์เหลืออยู่ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
4. นำเรซินที่อบจนแห้งแล้วมาทำการดูดซับและคายซับซ้ำตามวิธีที่กล่าวไปในข้อ 1 - 3
5. นำผลการทดลองจากการดูดซับทั้ง 3 ครั้ง มาหาประสิทธิภาพการดูดซับของเรซิน

### 3.4.8 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเบต้าแคโรทีน

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนเข้มข้น 500 ppm โดยชั่งสารมาตรฐานเบต้าแคโรทีนปริมาณ 0.025 กรัม เติมหกเซนเป็นตัวทำละลาย นำสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมหกเซนจนมีปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าจนเป็นเนื้อเดียวกัน
2. เตรียมสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนเข้มข้น 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300 และ 400 ppm โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนในข้อ 1 ปริมาณ 0.2, 0.4, 0.6, 1, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรสารละลายแต่ละขวดให้ได้ 10 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนตามลำดับที่กล่าวมา
3. นำสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่เตรียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC
4. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่พีคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC กับค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีน

### 3.4.9 การวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์โดยใช้เครื่อง HPLC

1. กรองสารที่ต้องการวิเคราะห์ผ่าน Syringe filters ที่มีขนาดของรูที่สารผ่านได้เท่ากับ 0.45 ไมโครเมตร และนำสารที่ทำการกรองแล้วไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC

2. อุปกรณ์และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

คอลัมน์ : ODS-2-HYPERSIL

เครื่องตรวจวัด : UV-Visible ที่ค่าความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร

สารตัวพา : เมทานอล : เฮกเซน 85 : 15

อัตราการไหลของสารตัวพา : 1 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ : 20 ไมโครลิตร

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาตัวดูดซับเรซินที่เหมาะสมในการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ

จากการทดลองศึกษาเพื่อเลือกตัวดูดซับเรซินที่เหมาะสมในการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ ทำการทดลองโดยเลือกจากเรซิน 7 ชนิดคือ Amberlyst 35Dry, Amberlyst A26OH, Amberlite XAD16, Amberlite XAD1600, Amberlite XAD1180, Lewatit® VP OC 1064 และ Lewatit® S 6368 ซึ่งเรซินทุกชนิดมีโครงสร้างพื้นฐานหลักเป็นแบบ styrene divinyl benzene (SDVB) copolymer ซึ่งทำการทดลองศึกษาการดูดซับแคโรทีนอยด์โดยใช้เรซินปริมาณ 1 กรัม สารละลายน้ำมันปาล์มร้อยละ 25 ในตัวทำละลายเฮกเซนหรือไอโซโพรพานอล อัตราเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากการทดลอง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายน้ำมันปาล์มดิบจะไม่เกิดการดูดซับของแคโรทีนอยด์บนเรซินชนิดต่าง ๆ ในขณะที่เมื่อใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายน้ำมันปาล์มดิบพบว่าตัวดูดซับเรซิน Amberlyst A26OH และ Lewatit® S 6368 ไม่สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบได้ เนื่องจากตัวดูดซับเรซินทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวดูดซับแบบมีขั้วชนิด Anionic Resin ในรูปไฮดรอกไซด์ และกลอไรด์ตามลำดับ ซึ่งสารที่ต้องการดูดซับคือ แคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบเป็นตัวถูกดูดซับแบบไม่มีขั้ว สำหรับตัวดูดซับเรซิน Amberlite XAD16, Amberlite XAD1600, Amberlite XAD1180 และ Lewatit® VP OC 1064 เป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบได้ โดยสามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ปริมาณ 294, 454, 295 และ 408 ไมโครกรัมต่อกรัมเรซิน ตามลำดับ เนื่องจากเรซินทั้ง 4 ชนิดเป็นตัวดูดซับแบบไม่มีขั้ว จึงสามารถดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบที่ละลายในไอโซโพรพานอลได้ ซึ่งตัวดูดซับเรซิน Amberlite XAD1600 และ Lewatit® VP OC 1064 สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากตัวดูดซับเรซินทั้ง 2 ชนิด มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกัน สำหรับตัวดูดซับเรซิน Amberlite XAD16 และ Amberlite XAD1180 สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ในปริมาณที่เท่ากัน แต่ตัวดูดซับเรซินทั้ง 2 ชนิดนี้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกันโดยตัวดูดซับเรซิน Amberlite XAD1180 มีปริมาตรรูพรุนมากกว่า Amberlite XAD16 แต่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า สำหรับเรซิน Amberlyst 35Dry เป็นตัวดูดซับ Cationic resin ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจน ซึ่งสามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ในปริมาณ 342 มิลลิกรัมต่อกรัมเรซินแต่การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากสารที่ได้จากการคายซับเกิดเป็นสารตัวใหม่ที่ ไม่ใช่แคโรทีนอยด์

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาจึงได้เลือกใช้ตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 เพื่อทำการศึกษาการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบต่อไป เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสามารถดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับเรซินอีก 5 ชนิด สำหรับตัวดูดซับเรซิน Amberlite XAD1600 เป็นตัวดูดซับเรซินที่สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ในปริมาณมากเช่นกัน แต่มีข้อจำกัดในด้านปริมาณตัวอย่างที่มีอยู่อย่างจำกัดไม่เพียงพอต่อการทำการทดลอง

**ตารางที่ 4.1** คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับเรซินและความสามารถในการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซินชนิดต่างๆ

ชนิดของเรซิน	คุณสมบัติทางกายภาพของเรซิน			ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ (ไมโครกรัม/กรัม) ในตัวทำละลาย	
	ปริมาตร รูพรุน (มิลลิลิตร/ กรัม)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง รูพรุน (Å)	พื้นที่ผิว (เมตร <sup>2</sup> / กรัม)	ไอโซโพรพานอล	เฮกเซน
Amberlyst 35Dry	0.35	300	50	เกิดปฏิกิริยาเคมี	เกิดปฏิกิริยาเคมี
Amberlyst A26OH	0.2	290	30	ไม่เกิดการดูดซับ	ไม่เกิดการดูดซับ
Amberlite XAD16	0.55	-	800	294	ไม่เกิดการดูดซับ
Amberlite XAD1600	1.4	-	700	454	ไม่เกิดการดูดซับ
Amberlite XAD1180	1.4	-	450	295	ไม่เกิดการดูดซับ
Lewatit® VP OC 1064	1.2	50-100	800	408	ไม่เกิดการดูดซับ
Lewatit® S 6368	-	-	-	ไม่เกิดการดูดซับ	ไม่เกิดการดูดซับ

หมายเหตุ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ สารละลายน้ำมันปาล์มดิบเข้มข้นร้อยละ 25 ในตัวทำละลายเฮกเซน และ ไอโซโพรพานอล ใช้เรซินปริมาณ 1 กรัม เขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

#### 4.2 การศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสม

จากการทดลองศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการละลายน้ำมันปาล์มเพื่อใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์ด้วยตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ทำการทดลองโดยเลือกจากตัวทำละลาย 6 ชนิดคือ เฮกเซน เอทิลอะซิเตต เตตระไฮโดรฟิวเรน เมทิลเอทิลคีโตน อะซีโตน และ ไอโซโพรพานอล ซึ่งทำการทดลองโดยใช้เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม สารละลายน้ำมันปาล์มร้อยละ 25 ในตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ เขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากการทดลอง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าตัวทำละลายเฮกเซน เอทิลอะซิเตต เตตระไฮโดรฟิวเรน เมทิลเอทิลคีโตน และอะซีโตนเป็น

ตัวทำละลายที่ไม่ทำให้เกิดการดูดซับ และพบว่าตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการละลายน้ำมันปาล์มเพื่อใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์ด้วยตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 คือ ไอโซโพรพานอล เนื่องจากเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วและสามารถละลายน้ำมันปาล์มดิบได้ น้ำมันปาล์มเป็น โมเลกุลกลีเซอไรด์ของกรดไขมันที่มีส่วนของไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก การมีส่วนของโมเลกุลที่เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่นี้ทำให้น้ำมันปาล์มเป็น โมเลกุลที่แสดงความไม่มีขั้วจึงทำให้แคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้วสามารถละลายในน้ำมันได้ อย่างไรก็ตามโมเลกุลของกลีเซอไรด์ในน้ำมันยังมีหมู่ฟังก์ชันของเอสเทอร์ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงความมีขั้วปานกลาง ดังนั้นการเติมตัวทำละลายแอลกอฮอล์ เช่น ไอโซโพรพานอล ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วจึงเกิดการเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำมันปาล์มแสดงความมีขั้วเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถแยกแคโรทีนอยด์ซึ่งเป็น โมเลกุลที่ไม่มีขั้วออกจากน้ำมันปาล์มได้ โดยโมเลกุลของแคโรทีนอยด์จะเกิดการดูดซับกับตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายในการศึกษาการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 สำหรับตัวทำละลายชนิดอื่นซึ่งมีค่าคงที่ Dielectric constant สูงหรือใกล้เคียงกับไอโซโพรพานอล (ซึ่งน่าจะแสดงความมีขั้วของสารเป็นระดับเดียวกันหรือมากกว่า) ไม่สามารถช่วยให้เกิดการดูดซับของแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มได้ ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่สารเหล่านั้นไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความมีขั้วบน โมเลกุลของกลีเซอไรด์ได้ดีเช่นเดียวกับไอโซโพรพานอล

**ตารางที่ 4.2** ผลการศึกษาเพื่อเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการละลายน้ำมันปาล์มเพื่อใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์ด้วยตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064

ชนิดของตัวทำละลาย	Dielectric constant (20 °C)*	ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ (ไมโครกรัม/กรัม)
เฮกเซน	1.89	ไม่เกิดการดูดซับ
เอทิลอะซีเตต	6.02	ไม่เกิดการดูดซับ
เตตระไฮโดรฟิวแรน	7.6	ไม่เกิดการดูดซับ
เมทิลเอทิลคีโตน	18.5	ไม่เกิดการดูดซับ
อะซีโตน	20.7	ไม่เกิดการดูดซับ
ไอโซโพรพานอล	18.3	408

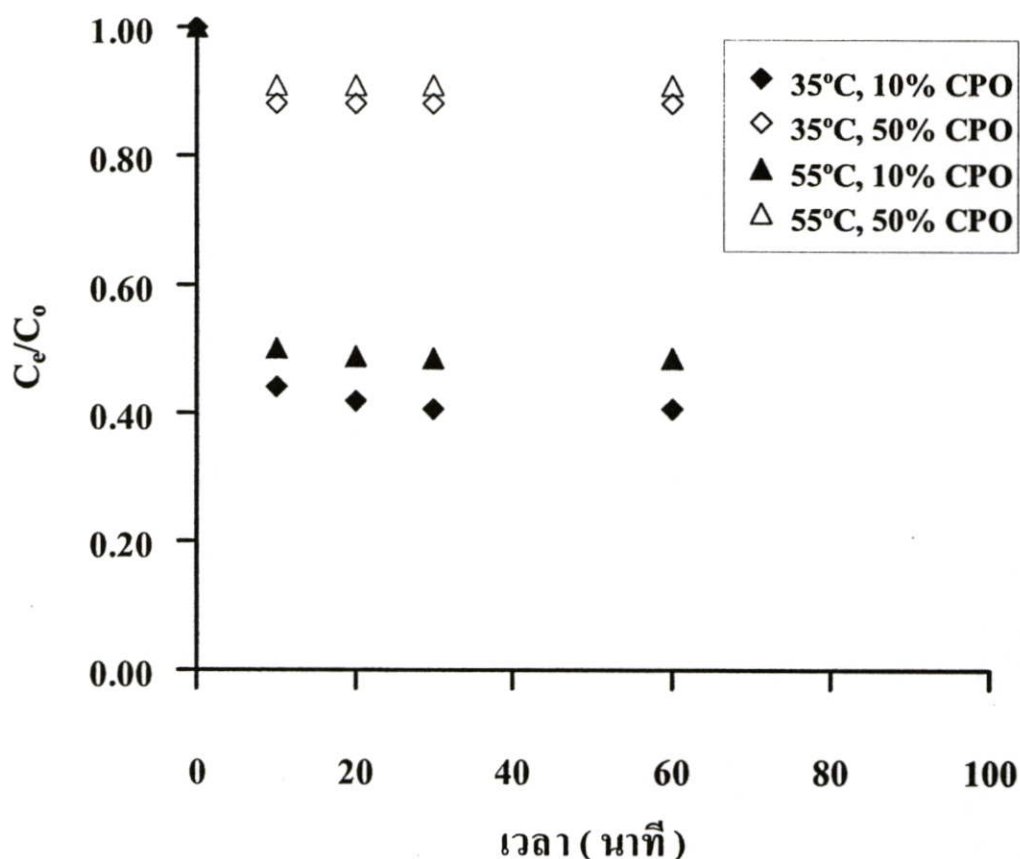
หมายเหตุ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ผสมน้ำมันปาล์มดิบกับตัวทำละลายต่างๆ โดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 25 เรซิน Lewatit® VP OC 1064 MD PH ปริมาณ 1 กรัม เขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

\* ค่า Dielectric constant เป็นค่าที่บอกถึงความมีขั้วของสาร โดยข้อมูลนี้ได้มาจาก Handbook of Chemistry & Physics, 1990-1991 [28]

### 4.3 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ

การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ทำการทดลองโดยใช้เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม สารละลายน้ำมันปาล์มในไอโซโพรพานอลเข้มข้นร้อยละ 10 และ 50 เขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 20, 30, 60 และ 120 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 จากกราฟพบว่าตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 มีอัตราการดูดซับแคโรทีนอยด์ที่เร็วมากในช่วง 10 นาทีแรก จากนั้นการดูดซับจะเริ่มลดลงและคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟที่ได้ แสดงว่าเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน คือ ประมาณ 30 นาที

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เวลาในการทดลองหาไอโซโทมการดูดซับเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เพียงพอที่ทำให้การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างแท้จริง



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา

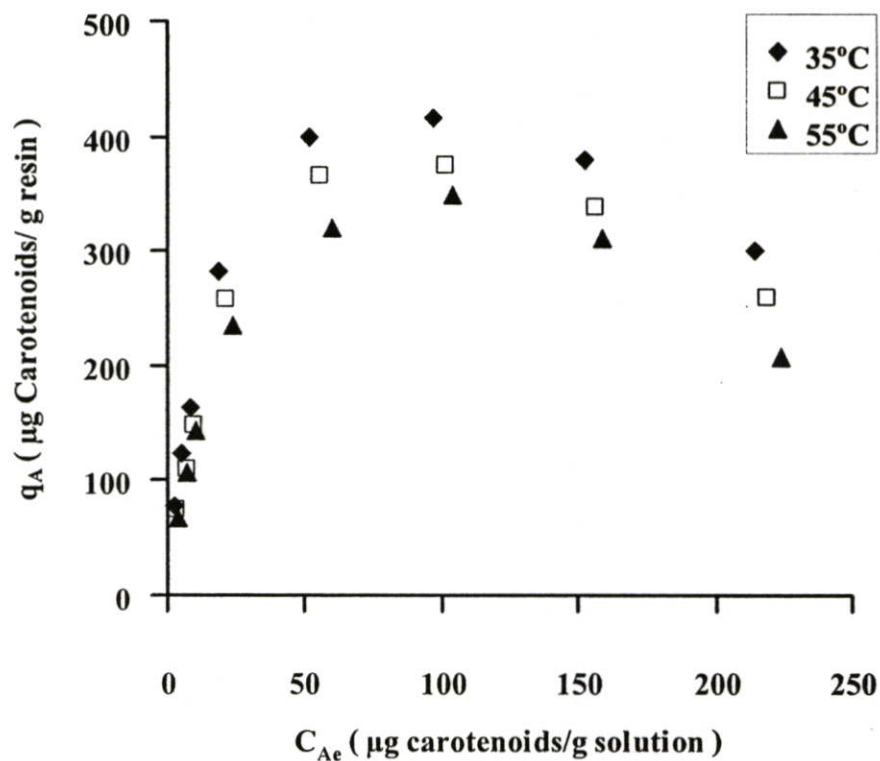
## 4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับ

### 4.4.1 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

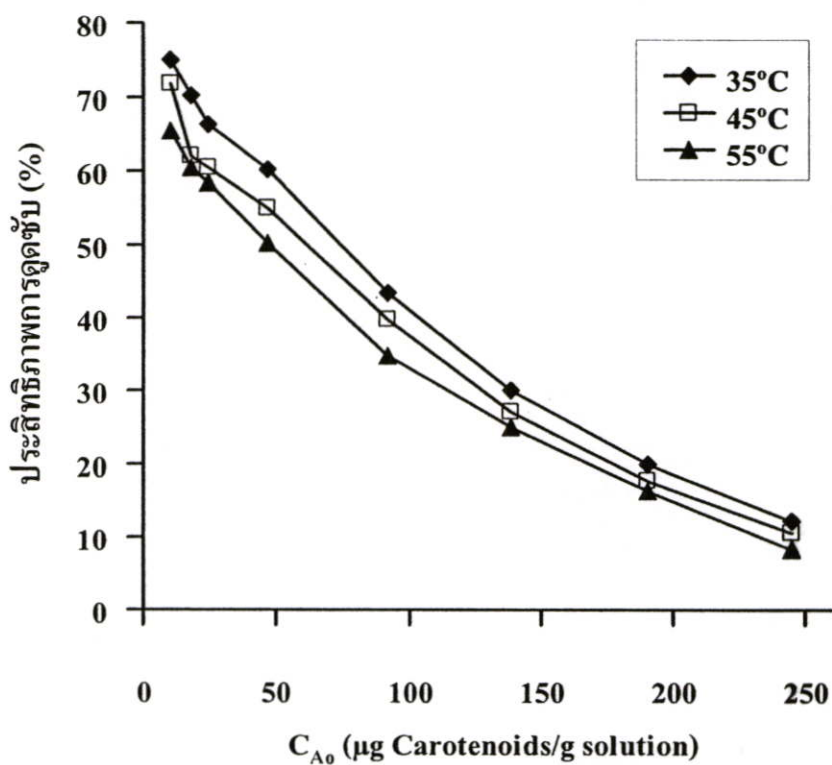
การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ทำการทดลองศึกษาโดยใช้เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม สารละลายน้ำมันปาล์มในไอโซโพรพานอลเข้มข้นร้อยละ 3, 5, 7, 10, 20, 30, 40 และ 50 เขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 จากกราฟไอโซเทอมการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายน้ำมันปาล์มต่ำกว่า 100 ไมโครกรัมต่อกรัมสารละลาย ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณการดูดซับของแคโรทีนอยด์บนตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 จะเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์มากกว่า 100 ไมโครกรัมต่อกรัมสารละลาย พบว่าปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ในสารละลายน้ำมันปาล์มของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 กลับมีค่าลดลง ซึ่งปริมาณการดูดซับที่ลดลงนั้นเนื่องมาจาก เมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์มากกว่า 100 ไมโครกรัมต่อกรัมสารละลาย ความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มในของผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะมีปริมาณของไอโซโพรพานอลในของผสมลดลงทำให้สารละลายน้ำมันปาล์มมีความมีขี้ผึ้งลดลง จึงทำให้โมเลกุลของแคโรทีนอยด์ถูกดูดซับบนตัวดูดซับเรซินได้ในปริมาณที่น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 เมื่อไม่มีการเติมตัวทำละลายไอโซโพรพานอลผสมกับน้ำมันปาล์มจะไม่มีการดูดซับของแคโรทีนอยด์เกิดขึ้น สำหรับผลของอุณหภูมิในการดูดซับพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นกระบวนการคายความร้อน

### 4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ โดยการนำข้อมูลสมมูลของการดูดซับที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ มาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 4.3 จากกราฟพบว่าการดูดซับมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายน้ำมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้แคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นสารที่ละลายในน้ำมันปาล์มและมีอยู่ในปริมาณ 500 ppm ซึ่งมีอยู่ในปริมาณน้อย ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์จึงเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำมันในสารละลายด้วย ทำให้สารละลายน้ำมันปาล์มแสดงความไม่มีขี้ผึ้งเพิ่มขึ้น โมเลกุลของแคโรทีนอยด์จึงเกิดการดูดซับกับตัวดูดซับที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ลดลง สำหรับผลของอุณหภูมิในการดูดซับพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064

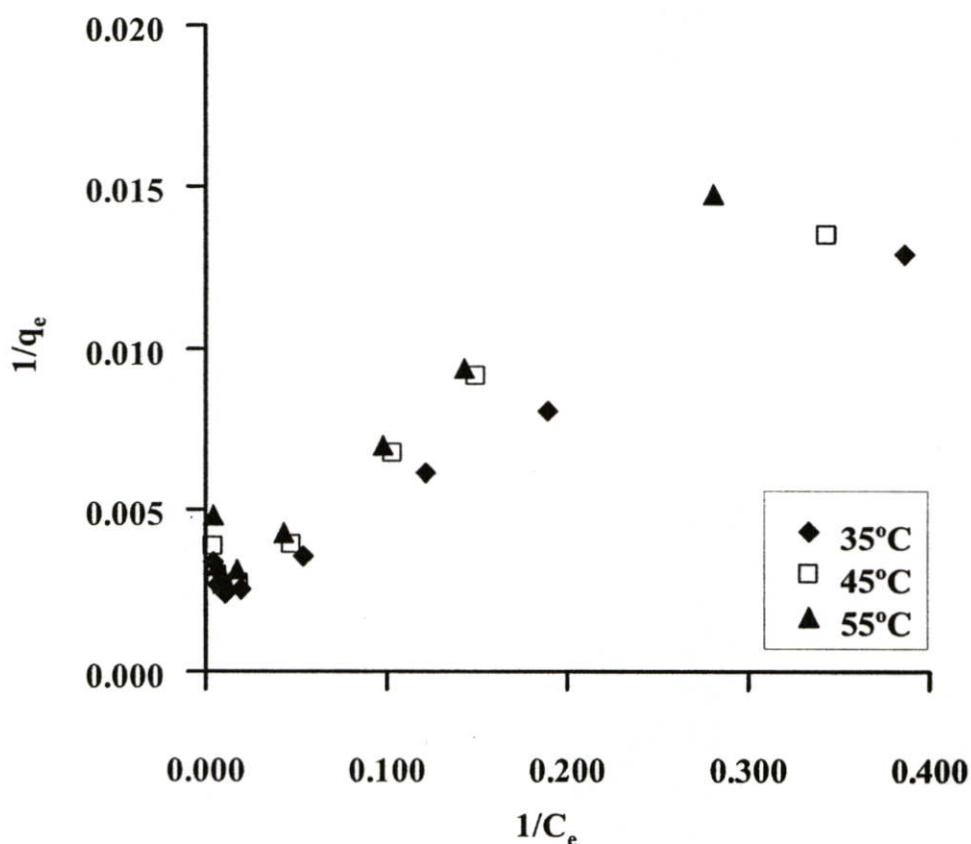


รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064

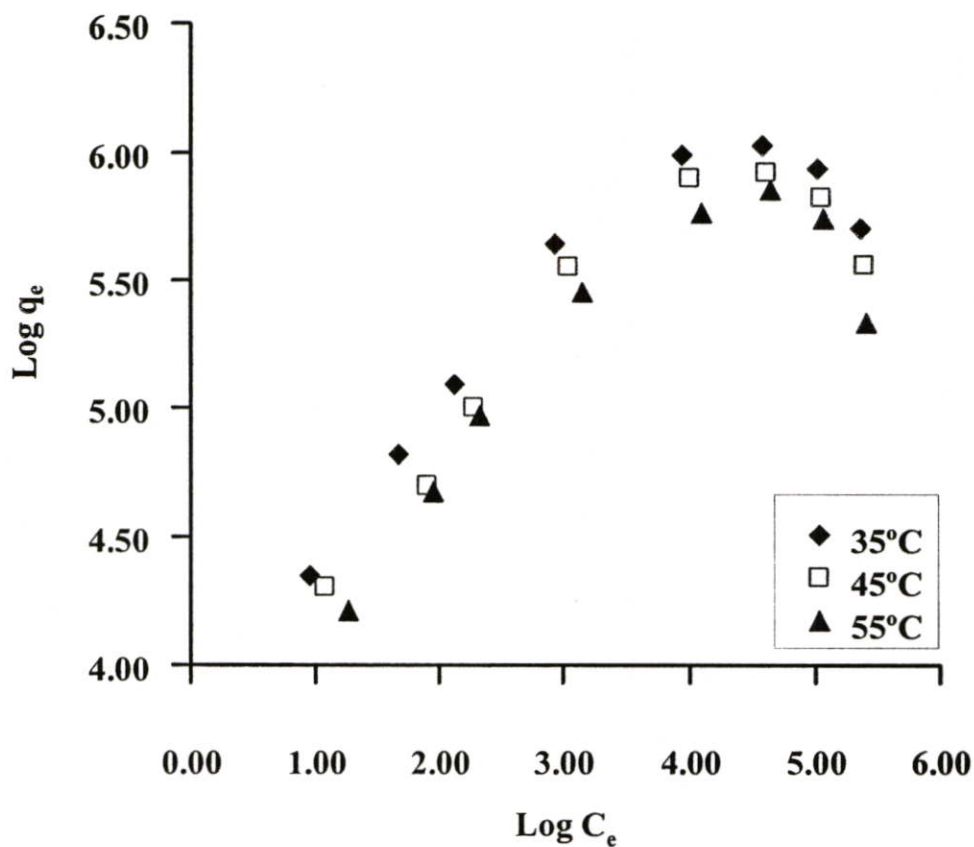
#### 4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการแบบจำลองต่าง ๆ

##### 4.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich

เมื่อนำผลการทดลองการดูดซับแคโรทีนอยด์บนตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 มาทดสอบว่าปริมาณการดูดซับสอดคล้องกับสมการแบบจำลองแบบใด โดยสมการที่นำมาทดสอบ 2 สมการคือ Langmuir และ Freundlich ซึ่งเป็นสมการที่ได้รับการยอมรับการใช้งานทั่วไป จากการทำสมการของ Langmuir และ Freundlich ให้เป็นสมการเชิงเส้นตามสมการที่ 2.6 และ 2.9 เมื่อนำมาเขียนกราฟได้ผลดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าสมการทั้งสองไม่สามารถให้เส้นกราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งจากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 ข้างต้นมีลักษณะเส้นไอโซเทอมไม่สอดคล้องกับรูปแบบไอโซเทอมตามสมการของ Langmuir และ Freundlich จึงอาจกล่าวได้ว่าไอโซเทอมที่ได้จากการทดลองนี้น่าจะมีความซับซ้อนเกินกว่าที่จะอธิบายได้ด้วยสมการแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอแนะแบบจำลองเพิ่มเติม ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 4.4 กราฟการวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



รูปที่ 4.5 กราฟการวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ด้วยสมการแบบจำลองของ Freundlich

#### 4.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา

เนื่องจากแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich ไม่สามารถอธิบายไอโซเทอมที่ได้จากผลการทดลองการดูดซับแคโรทีนอยด์ในสารละลายน้ำมันปาล์มดิบบนเรซิน จึงได้นำเสนอแบบจำลองขึ้นมาใหม่ โดยสังเกตจากรูปแบบของไอโซเทอมที่ได้มีปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายมีค่าต่ำ และถึงจุดสูงสุดจึงค่อย ๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ในสารละลายสูงขึ้น แบบจำลองที่น่าจะสอดคล้องกับผลการทดลองดังกล่าวจะปรับปรุงจากแบบจำลองของ Langmuir ในสมการที่ 2.4 โดยเพิ่มเลขยกกำลังในส่วนของพจน์ตัวหาร ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae})^n} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $n$  มีค่ามากกว่า 1 เช่น เป็นตัวเลขจำนวนเต็ม 2 หรือ 3 แบบจำลองดังกล่าวจะทำให้  $q_A$  ลดลงเมื่อ  $C_{Ae}$  มีค่ามาก ๆ เมื่อทดสอบแบบจำลองดังกล่าวโดยใช้ค่า  $n$  เป็น 2 และ 3 และคำนวณหาค่า  $k$  และ  $K_A$  โดยใช้โปรแกรม Polymath โดยวิธี Nonlinear regression ได้ค่าดังกล่าวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ค่าตัวแปรจากการคำนวณสมการ  $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1+K_A C_{Ae})^n}$  โดยใช้โปรแกรม Polymath โดยวิธี Nonlinear regression โดย  $n$  มีค่าเท่ากับ 2 และ 3

อุณหภูมิ (°C)	ค่าตัวแปรจากการทดลองจากสมการ $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1+K_A C_{Ae})^2}$			ค่าตัวแปรจากการคำนวณจากสมการ $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1+K_A C_{Ae})^3}$		
	$k$	$K_A$	$R^2$	$k$	$K_A$	$R^2$
35 °C	24.6519	0.01456	0.9904	20.9519	0.00699	0.9733
45 °C	20.5448	0.01371	0.9876	17.8127	0.00671	0.9875
55 °C	18.2663	0.01371	0.9596	15.8079	0.00669	0.9706

และเมื่อนำค่า  $k$  และ  $K_A$  ที่ได้มาคำนวณหาค่า  $q_A$  ตามสมการที่ (4.1) และนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 แบบจำลองตามสมการที่ 4.1 เมื่อ  $n$  เท่ากับ 2 จะทำนายผลการทดลองได้ดีในช่วงความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ต่ำและกลาง แต่จะมีความแตกต่างจากผลการทดลองมากเมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์สูง ในขณะที่แบบจำลองตามสมการที่ 4.1 เมื่อ  $n$  เท่ากับ 3 จะทำนายได้ไม่ดีนักในช่วงความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ปานกลาง โดยแบบจำลองที่ 4.1 เมื่อ  $n$  เท่ากับ 2 และ 3 มีค่า sum square error (SSE) เท่ากับ 15.78 และ 17.47 ตามลำดับ

สมการแบบจำลองอีกสมการที่ได้เสนอขึ้นมาคือสมการที่ 4.2 โดยปรับปรุงจากสมการที่ 4.1 โดยเพิ่มค่าคงที่และความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มดิบเข้าไปในสมการในส่วนของพจน์ตัวหาร

$$q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1+K_A C_{Ae} + K_O C_O)^n} \quad (4.2)$$

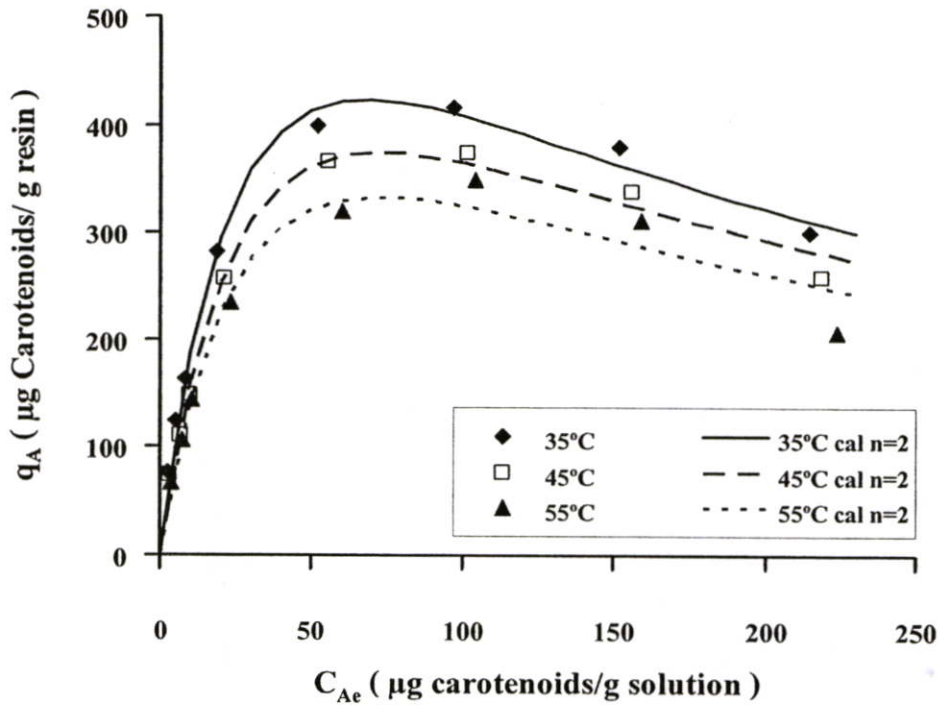
แบบจำลองดังกล่าวจะทำให้  $q_A$  ลดลงเมื่อ  $C_{Ae}$  และ  $C_O$  มีค่ามาก ๆ เมื่อทดสอบแบบจำลองดังกล่าวโดยใช้ค่า  $n$  เป็น 2 และ 3 และคำนวณหาค่า  $k$ ,  $K_A$  และ  $K_O$  โดยใช้โปรแกรม Polymath โดยวิธี Nonlinear regression ได้ค่าดังกล่าวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และเมื่อนำค่า  $k$ ,  $K_A$  และ  $K_O$  ที่ได้มาคำนวณหาค่า  $q_A$  ตามสมการที่ (4.2) และ

นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 แบบจำลองนี้พบว่าให้ผลการทำนายปริมาณการดูดซับของแคโรทีนอยด์ได้ดีกว่าแบบจำลองสมการที่ 4.1 โดยเฉพาะเมื่อ  $n$  เท่ากับ 3 จะมีค่า SSE เพียง 13.15 น้อยกว่าแบบจำลองเมื่อ  $n$  มีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งมีค่า SSE เท่ากับ 14.79 การเพิ่มพจน์ความเข้มข้นน้ำมันปาล์มดิบเข้าไปในส่วนของตัวหารในสมการที่ 4.2 เพื่อแสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มดิบอาจถูกดูดซับบนเรซินได้ โดยจะมีผลต่อการดูดซับของแคโรทีนอยด์เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มดิบมีปริมาณสูง ค่า  $K_O$  เมื่อ  $n$  เท่ากับ 2 มีค่าติดลบซึ่งไม่สอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นทางกายภาพ ในขณะที่เมื่อ  $n$  มีค่าเท่ากับ 3 ค่า  $k$ ,  $K_A$  และ  $K_O$  มีค่าเป็นบวก โดยค่า  $K_O$  มีค่าน้อยกว่า  $K_A$  ประมาณ 10,000 เท่า แบบจำลองนี้อาจพิจารณาได้ว่าเป็นเพียงสูตรอย่างง่าย ( Empirical formular) ที่ทำนายผลการดูดซับของแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบบนตัวดูดซับเรซิน อย่างไรก็ดี การดูดซับดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความมีขี้ของน้ำมันปาล์มดิบโดยการเติมไอโซโพรพานอลปริมาณมากเพียงพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดความมีขี้ขึ้นบนกลีเซอไรด์ (น้ำมันปาล์มดิบ) ทำให้เรซินมีความจำเพาะเจาะจงในการเลือกดูดซับแคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขี้ได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมไอโซโพรพานอลอย่างเพียงพอในสารละลาย

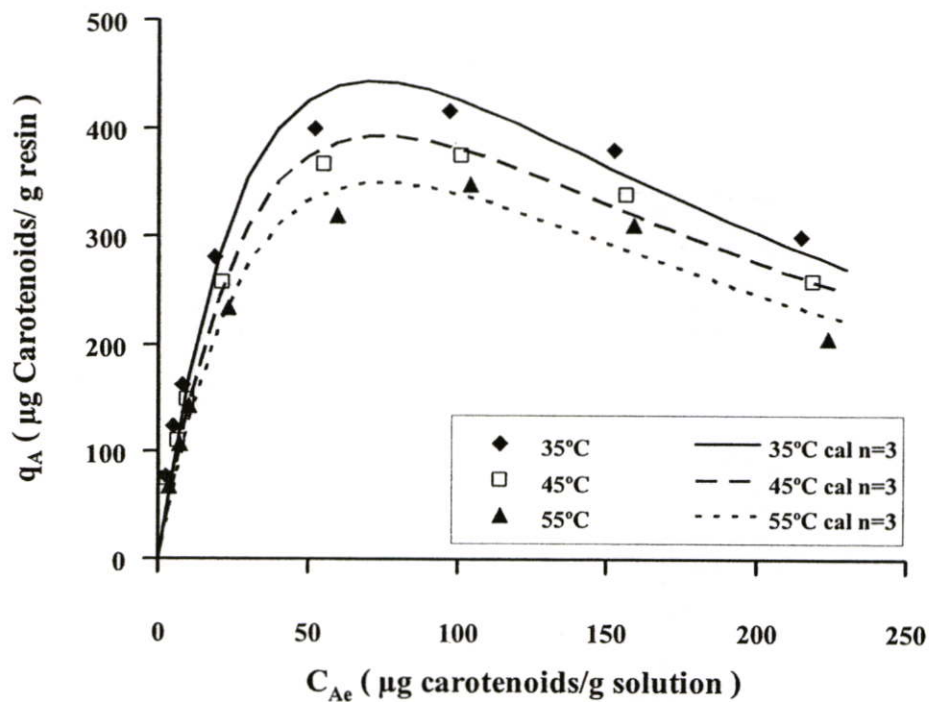
ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรจากการคำนวณสมการ  $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^n}$  โดยใช้โปรแกรม

Polymath โดยวิธี Nonlinear regression โดย  $n$  มีค่าเท่ากับ 2 และ 3

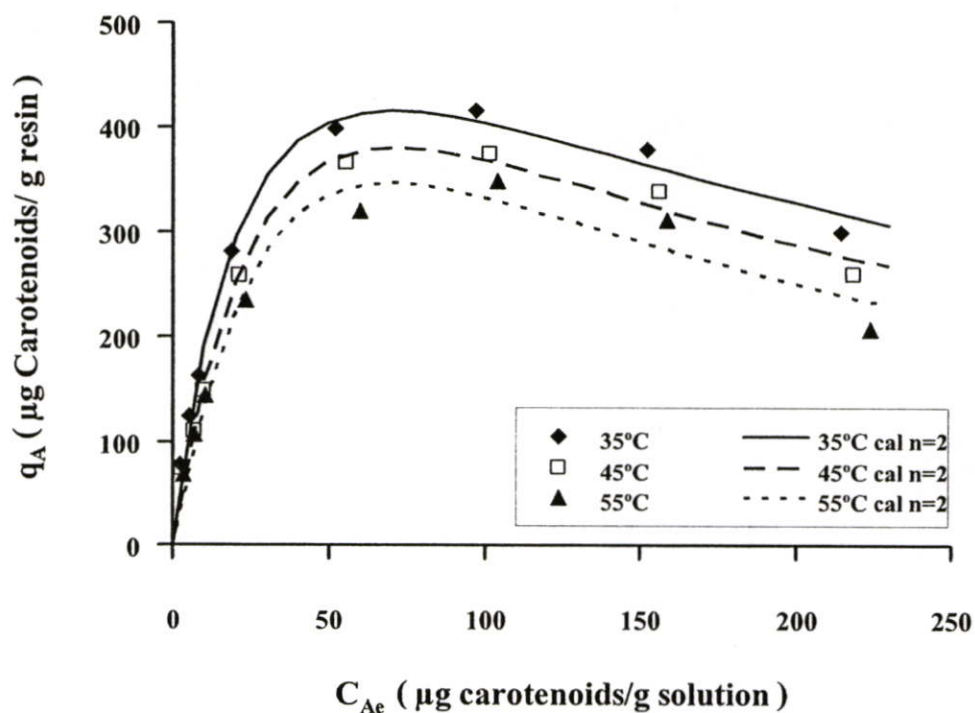
อุณหภูมิ (°C)	ค่าตัวแปรจากการทดลองจากสมการ				ค่าตัวแปรจากการคำนวณจากสมการ			
	$q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^2}$				$q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^3}$			
	$k$	$K_A$	$K_O$	$R^2$	$k$	$K_A$	$K_O$	$R^2$
35 °C	27.4734	0.0136	$6.585 \times 10^{-8}$	0.9918	30.9002	0.00417	$1.457 \times 10^{-7}$	0.9946
45 °C	18.6325	0.0147	$-6.121 \times 10^{-8}$	0.9889	21.1984	0.00533	$6.882 \times 10^{-8}$	0.9925
55 °C	14.4474	0.0163	$-1.535 \times 10^{-7}$	0.9673	16.3340	0.00641	$1.366 \times 10^{-8}$	0.9708



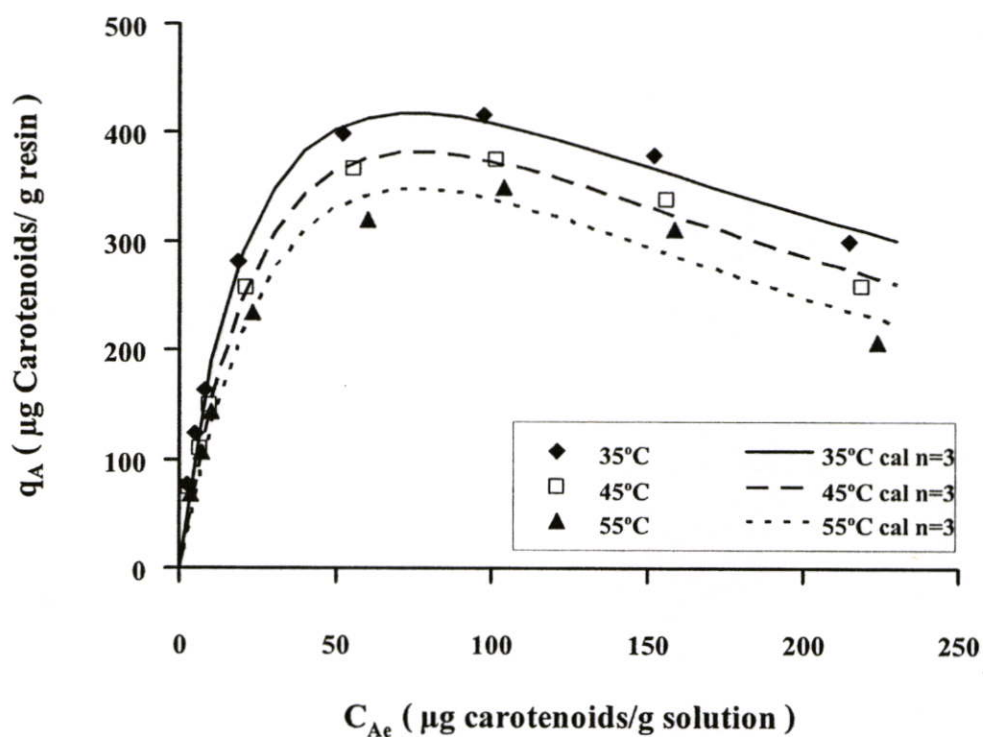
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูลจากการคำนวณตามแบบจำลองในสมการที่ 4.1 โดย  $n$  มีค่าเท่ากับ 2



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูลจากการคำนวณตามแบบจำลองในสมการที่ 4.1 โดย  $n$  มีค่าเท่ากับ 3



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูลการคำนวณตามแบบจำลองในสมการที่ 4.2 โดย  $n$  มีค่าเท่ากับ 2



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูลจากการคำนวณตามแบบจำลองในสมการที่ 4.2 โดย  $n$  มีค่าเท่ากับ 3

#### 4.6 การศึกษาการคายซับ

การศึกษาการคายซับแคโรทีนอยด์จากตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ทำการทดลองการดูดซับโดยใช้เรซินปริมาณ 15 กรัม สารละลายน้ำมันปาล์มเข้มข้นร้อยละ 30 ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอลปริมาณ 150 กรัม ความเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากนั้นแยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากเรซิน และนำสารละลายน้ำมันปาล์มไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ HPLC พบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ถูกดูดซับไว้ในเม็ดเรซินเท่ากับ 464 ไมโครกรัมแคโรทีนอยด์ต่อกรัมเรซิน และทำการคายซับโดยแบ่งเรซินนำมาคายซับปริมาณ 0.18, 0.37, 0.54, 0.70 และ 1.00 กรัม ทำการคายซับโดยใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอลสำหรับการคายซับใน 2 ครั้งแรกเพื่อละลายน้ำมันบางส่วนที่ติดอยู่ระหว่างเม็ดเรซินออก และทำการคายซับโดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนอีก 2 ครั้ง เพื่อคายซับแคโรทีนอยด์ออกจากตัวดูดซับเรซิน ผลการทดลองแสดงข้อมูลปริมาณการคายซับดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณการคายซับแคโรทีนอยด์จากตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 โดยใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอล และเฮกเซนในการคายซับ

ปริมาณแคโรทีนอยด์ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัมต่อกรัม)	น้ำหนักของเรซิน (กรัม)	ปริมาณการคายซับด้วยตัวทำละลาย (ไมโครกรัม)		
		ไอโซโพรพานอล		เฮกเซน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1
464	0.176	53	12	33
	0.371	94	16	72
	0.540	124	41	126
	0.704	146	61	183
	1.0037	172	72	257

ปริมาณการคายซับแคโรทีนอยด์ด้วยตัวทำละลายไอโซโพรพานอลเสมือนว่าจะมีปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ถูกคายซับออกมามากกว่าปริมาณที่ถูกดูดซับ เนื่องจากแคโรทีนอยด์ที่ละลายอยู่ในสารละลายที่ติดค้างอยู่ระหว่างเม็ดเรซินจะถูกละลายออกมาในไอโซโพรพานอลเมื่อใช้ไอโซโพรพานอลคายซับจึงมีสารละลายส่วนนี้ปนเปื้อนมากับแคโรทีนอยด์ที่ถูกคายซับออกมาจากเรซินบางส่วน ในขณะที่การคายซับโดยใช้เฮกเซนหลังการใช้ไอโซโพรพานอลคายซับจะเป็นการคายซับแคโรทีนอยด์ที่ถูกดูดซับไว้เป็นส่วนใหญ่บนเรซิน และเมื่อใช้เฮกเซนคายซับครั้งที่ 2 พบว่ามีปริมาณแคโรทีนอยด์เหลืออยู่น้อยมาก และสารละลายที่ได้จากการคายซับก็ไม่มีสีเหมือนกับการ

คายซับในขั้นตอนก่อนหน้าที่สารละลายที่ได้จากการคายซับจะมีสีเหลืองของแคโรทีนอยด์ออกมาด้วย

#### 4.7 การนำตัวดูดซับเรซินที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่

การศึกษากำหนดตัวดูดซับเรซินที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่ จากการทดลองในข้อ 3.4.7 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า เรซินที่ผ่านการดูดซับแคโรทีนอยด์แล้วเมื่อทำการคายซับเอาแคโรทีนอยด์ออก และนำไปดูดซับใหม่ในครั้งที่ 2 และ 3 พบว่าเรซินยังดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ โดยมีปริมาณการดูดซับใกล้เคียงกับการดูดซับของเรซินใหม่ ซึ่งจะอนุมานได้ว่าเรซินชนิดนี้สามารถนำกลับมาใช้ในการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบได้อีกอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์บนตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ที่นำกลับมาใช้ใหม่

การดูดซับครั้งที่	ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์จากสารละลายน้ำมันปาล์มของตัวดูดซับเรซิน (ไมโครกรัมต่อกรัมเรซิน)
1	316
2	300
3	294

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ตัวดูดซับเรซินแบบไม่มีขั้วที่มีโครงสร้างเป็น Styrene divinyl benzene สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบได้เมื่อใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย และไม่สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้เมื่อใช้เฮกเซน เอทิลอะซิเตต เตตระไฮโดรฟูแรน เมทิลเอทิลคีโตน และอะซิโตนเป็นตัวทำละลาย เมื่อเลือกเรซินชนิด Lewatit® VP OC 1064 จากกลุ่มเรซินดังกล่าวเป็นตัวดูดซับพบว่า การดูดซับดังกล่าวสามารถเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้ภายในเวลา 30 นาที และไอโซเทอมของการดูดซับที่ได้ไม่สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองทั่วไป เช่น Langmuir หรือ Freundlich เนื่องจากปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และปริมาณการดูดซับจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลายลดลง แสดงให้เห็นการแปรผันกลับกับความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารละลาย เมื่อความเข้มข้นสูงจึงได้เสนอแบบจำลองที่ปรับปรุงจากสมการของ Langmuir โดยเพิ่มเลขยกกำลังในพจน์ของส่วนทั้งหมดในแบบจำลองดังนี้  $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae})^n}$  และ  $q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^n}$  เมื่อ  $n$  เป็น 2 และ 3 โดยแบบจำลองแบบหลังที่เสนอขึ้น ได้พิจารณาผลของความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มดิบที่มีต่อปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ พบว่าแบบจำลองแบบหลังเมื่อ  $n$  มีค่าเท่ากับ 3 ให้ผลการทำนายผลการทดลองได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น ๆ การที่กลีเซอไรด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นในสารละลายอาจพิจารณาได้ว่าส่งผลให้สารละลายมีความมีขั้วลดลงเนื่องจากมีปริมาณไอโซโพรพานอลลดลงซึ่งอาจ ( ส่งผลให้เกิดการโพลาริเซชันของไอโซโพรพานอลที่มีต่อกลีเซอไรด์ในหมู่เอสเทอร์ลดลง ) ทำให้ความแตกต่างระหว่างความมีขั้วของแคโรทีนอยด์และกลีเซอไรด์ลดลง ยังผลให้การดูดซับแคโรทีนอยด์บนเรซินมีปริมาณน้อยลง อาจเป็นไปได้ที่เรซินจะดูดซับกลีเซอไรด์ได้มากขึ้น ซึ่งการตรวจสอบดังกล่าวทำการทดลองให้ผลที่ตรงตรงได้ยาก เนื่องจากการวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอไรด์ที่ลดลงในปริมาณน้อย ๆ ในสารละลายทำให้ตรงตรงได้ยาก แคโรทีนอยด์ที่ถูกดูดซับบนเรซินสามารถถูกคายซับได้โดยไม่เกิดปฏิกิริยาเป็นสารเคมีอื่น โดยใช้ไอโซโพรพานอลและเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย และเรซินที่ใช้ในการดูดซับนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หลายครั้งโดยไม่เกิดการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Burton, G.W. and Ingold, K.U. 1984. Beta Carotene: An unusual type of lipid antioxidant. *Science*, 224: pp.569-573
- [2] Slattery, M.L., Benson J., Curtin K., Ma K.N., Schaeffer D. and Potter J.D., 2000. Carotenoids and colon cancer. *Am. J. Clin. Nutr.*, 71: pp. 575-582.
- [3] Goh, S.H., 1996. Carotene controversy. *Malaysian Oil Sci. and Technol.*, 5: 17.
- [4] Yap, S.C., 1995. Palm oil carotenes: Chemistry and technology. Ph. D Thesis, University of Malaya, Kuala Lumpur, pp: 94.
- [5] Carotenoids [Online]. Available : <http://WWW.en.wikipedia.org/wiki/Carotenoid>. 2007.
- [6] เบต้าแคโรทีน สารสีส้มเพื่อสุขภาพ[Online]. Available : [http://WWW.elibonline.com/doctors/food\\_betacarotene1.html](http://WWW.elibonline.com/doctors/food_betacarotene1.html). 2007.
- [7] ปาล์มน้ำมัน...จากน้ำมันพืชถึงไบโอดีเซล [Online]. Available : <http://WWW.roiet.doae.go.th/phonthong/reagir1/ปาล์มน้ำมัน.doc>. 2007.
- [8] Palm oil [Online]. Available : [http://WWW.en.wikipedia.org/wiki/Palm\\_oil](http://WWW.en.wikipedia.org/wiki/Palm_oil). 2007.
- [9] Choo Yuen May. “ Palm oil carotenoids ”. *Food and nutrition bulletin*, vol 15, no. 2, June (1993/1994).
- [10] Puah Chiew Wei. “ Supercritical Fluid Extraction of Palm Carotenoids. ” *American Journal of Environmental Sciences*, vol 4, no. 1, 2005. pp.264-269
- [11] McCabe, Warren L., Smith, Julian C. and Harriott, Peter. 2005. *Unit Operation of Chemical Engineering*. 7 thed. Singapore: McGraw-Hill.
- [12] Frank L. Slejko. *Adsorption Technology : A Step-by-Step Approach to Process Evaluation and Application*. New York and Basel : Tall Oaks Publishing, Inc. 1985. pp. 9-40
- [13] Samuel D.F. and Osman M.A. *Adsorption Process for Water Treatment*. Stoneham: Butterworth Publishers. 1987. pp. 14-23.
- [14] Douglas M.R. *Encyclopedia of Separation Technology, A Kirk-Othmer Encyclopedia*. New York : John Wiley & Sons. 1997. vol. 1.
- [15] Proctor, A., and Toro-Vazquez, J. F. (1996). The Frundlich isotherm in studying adsorption in oil processing. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 73, 1627–1633.
- [16] Redlich, O., and Peterson, D. L. (1959). A useful adsorption isotherm. *Journal of Physical Chemistry*, 63, 1024–1026.

- [17] Radke, C. J., and Prausnitz, J. M. (1972). Adsorption of organic solutes from dilute aqueous solution on GAC. *Industrial and Engineering Chemistry Research Fundamentals*, 11, 445-451.
- [18] จตุพร วิชาคุณ , นุรักษ์ กฤษดา นุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2547.
- [19] KIPLING, J.J. 1965. Adsorption from Solution of Non-Electrolytes. London New York: Academic press 1965. pp. 23-67
- [20] Baharin, B.S., Abdul Rahman, K., Abdul Karim, M.I., Oyaizu, T., Tanaka, Y., and Takaki, S. " Separation of Palm Carotene from Crude Palm Oil by Adsorption Chromatography with a Synthetic Polymer Adsorbent." *JAOCS*, vol. 75, no 3.1998. pp. 399-404.
- [21] Latip, R.A., Baharin, B.S., Che Man, Y.B., and Abdul Rahman, R. " Evaluation of Different Types of Synthetic Adsorbents for Carotene Extraction from Crude Palm Oil. " *JAOCS*, vol. 77, no 12. 2000. pp. 1277-1280.
- [22] Latip, R.A., Baharin, B.S., Che Man, Y.B., an Rahman, R.A. "Effect of Adsorption and Solvent Extraction Process on the Percentage of Carotene Extracted from Crude Palm Oil. " *JAOCS*, vol. 78, no 1. 2001. pp. 83-87.
- [23] Chan, K.W., Baharin, B.S., Che Man, Y.B. " Adsorption Isotherm Studies of Palm Carotene Extraction by Synthetic Polymer Adsorbent. " *Journal of Food Lipids*, no 7. March 2001. pp. 127-140.
- [24] You, L.L., Baharin, B.S., Quek, S.Y., and Abdullah, M.A. " Recovery of Palm Carotene from Palm Oil and Hydrolyzed Palm Oil by Adsorption Column Chromatography. " *Journal of Food Lipids*, no 7. January 2002. pp. 87-93.
- [25] Khoo, L.E., K.Y., Morsingh, F., and Liew, K.Y. " The Adsorption of  $\beta$ -Carotene I. by Bleaching Earths. " July 1979. pp. 672-675.
- [26] Liew, K.Y., Yee, A.H., and Nordin, M.R. " Adsorption of Carotene from Palm Oil by Acid-Treated Rice Hull Ash. " *JAOCS*, vol. 70, no 5. May 1993. pp. 539-541.
- [27] Sarier, N. and Guler, C. " $\beta$ -Carotene Adsorption on Acid-Activated Montmorillonite. " *JAOCS*, vol. 65, no 5. May 1988. pp. 776-779.
- [28] David R. Lide. *CRC Hanbook of Chemistry and Physics*. 71<sup>st</sup> ed<sup>n</sup>. USA. 1990-1991.

ภาคผนวก

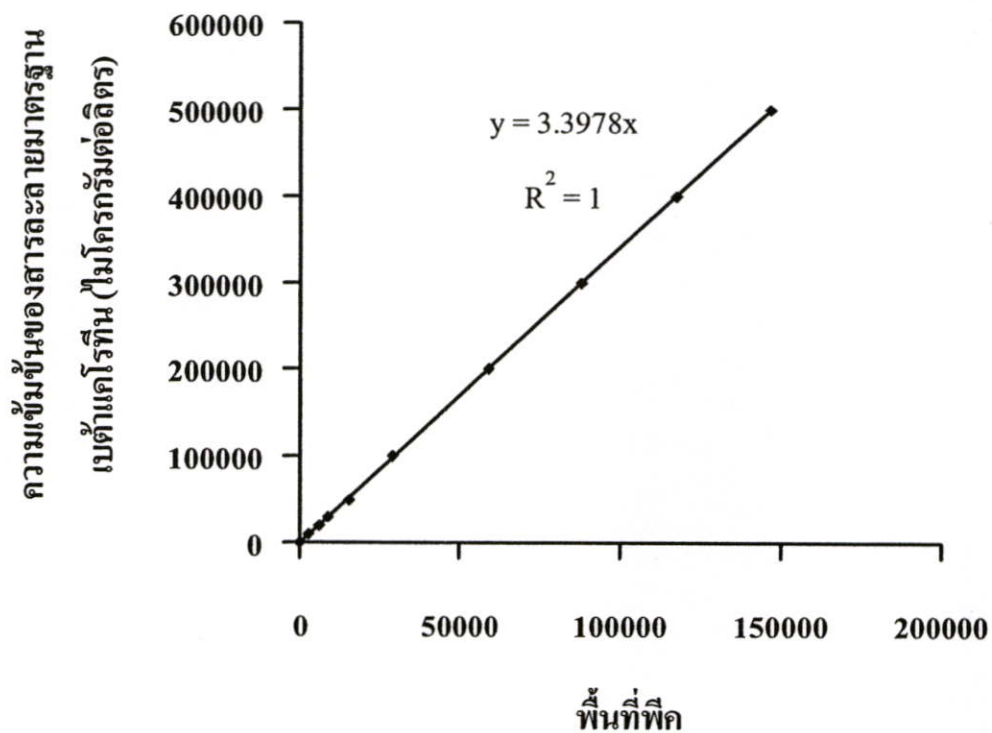
ภาคผนวก ก

พื้นที่ฝึกและกราฟของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีน  
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก. พื้นที่ปลูกของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

พื้นที่ปลูก	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคโรทีนออกด์ (ไมโครกรัมต่อลิตร)
0	0
2887	10,000
6277	20,000
8709	30,000
15482	50,000
29237	100,000
59223	200,000
88235	300,000
117647	400,000
147058	500,000



รูปที่ ก. กราฟสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีน

ภาคผนวก ข

**ข้อมูลการทดลองการหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับแคโรทีนอยด์  
จากน้ำมันปล่ามดิบของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064**

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข. ข้อมูลการทดลองการหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ  
ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064

เวลา (นาที)	35 °C			
	สารละลายน้ำมันปาล์มดิบใน ไอโซโพรพานอลร้อยละ 10		สารละลายน้ำมันปาล์มดิบใน ไอโซโพรพานอลร้อยละ 50	
	$C_{A0} = 44.4$ ( $\mu\text{g/g}$ solution)		$C_{A0} = 233.9$ ( $\mu\text{g/g}$ solution)	
	$C_{Ac}$	$C_{Ac}/C_{A0}$	$C_{Ac}$	$C_{Ac}/C_{A0}$
0	44.4	1.00	233.9	1.00
10	19.2	0.44	202.8	0.88
20	18.2	0.42	202.8	0.88
30	17.7	0.41	202.8	0.88
60	17.7	0.41	202.6	0.88
เวลา (นาที)	55 °C			
	สารละลายน้ำมันปาล์มดิบใน ไอโซโพรพานอลร้อยละ 10		สารละลายน้ำมันปาล์มดิบใน ไอโซโพรพานอลร้อยละ 50	
	$C_{A0} = 44.41$ ( $\mu\text{g/g}$ solution)		$C_{A0} = 233.88$ ( $\mu\text{g/g}$ solution)	
	$C_{Ac}$	$C_{Ac}/C_{A0}$	$C_{Ac}$	$C_{Ac}/C_{A0}$
0	44.4	1.00	233.9	1.00
10	19.2	0.50	202.8	0.91
20	18.2	0.49	202.8	0.91
30	17.7	0.48	202.8	0.91
60	17.7	0.48	202.6	0.91

หมายเหตุ สภาวะการทดลอง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม สารละลายน้ำมันปาล์ม  
เข้มข้นร้อยละ 10 และ 50 เขย่า 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ก

ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน

Lewatit® VP OC 1064

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค. ปริมาณการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

35 °C			
ความเข้มข้นของ น้ำมันปาล์ม (ร้อยละ)	$C_{A_0}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$C_{A_e}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$q_A$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g resin )
3	10.3	2.6	77.3
5	17.7	5.3	123.9
7	24.6	8.3	163.0
10	46.8	18.6	281.7
20	91.8	51.9	399.1
30	138.9	97.2	416.4
40	190.1	152.1	379.6
50	244.6	214.6	299.8
45 °C			
ความเข้มข้นของ น้ำมันปาล์ม (ร้อยละ)	$C_{A_0}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$C_{A_e}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$q_A$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g resin )
3	10.3	2.9	74.1
5	17.7	6.7	109.6
7	24.6	9.7	148.5
10	46.8	21.0	257.5
20	91.8	55.2	366.1
30	138.9	101.4	374.6
40	190.1	156.3	338.3
50	244.58	218.67	259.05

หมายเหตุ สภาวะการทดลอง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม ความเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

## ตารางที่ ค. (ต่อ)

55 °C			
ความเข้มข้นของ น้ำมันปลา (ร้อยละ)	$C_{A_0}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$C_{A_e}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$q_A$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g resin )
3	10.3	3.6	67.7
5	17.7	7.0	106.8
7	24.6	10.2	143.8
10	46.8	23.3	234.5
20	91.8	59.8	319.8
30	138.9	104.0	348.8
40	190.1	159.0	310.9
50	244.58	223.9	206.9

หมายเหตุ สภาวะการทดลอง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม ความเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

ภาคผนวก ง

ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน  
Lewatit® VP OC 1064 ที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

## ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง. ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับแคโรทีนอยด์ของตัวดูดซับเรซิน Lewatit® VP OC 1064 ที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

35 °C			
ความเข้มข้นของ น้ำมันปาล์ม (ร้อยละ)	$C_{A_0}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$C_{A_e}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)
3	10.3	2.6	74.9
5	17.7	5.3	70.1
7	24.6	8.3	66.4
10	46.8	18.6	60.2
20	91.8	51.9	43.5
30	138.9	97.2	30.0
40	190.1	152.1	20.0
50	244.6	214.6	12.3
45 °C			
ความเข้มข้นของ น้ำมันปาล์ม (ร้อยละ)	$C_{A_0}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$C_{A_e}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)
3	10.3	2.9	71.8
5	17.7	6.7	62.1
7	24.6	9.7	60.5
10	46.8	21.0	55.0
20	91.8	55.2	39.9
30	138.9	101.4	27.0
40	190.1	156.3	17.8
50	244.6	218.67	10.6

หมายเหตุ สภาวะการทดลอง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม ความเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

## ตารางที่ ง. (ต่อ)

55 °C			
ความเข้มข้นของ น้ำมันปลา (ร้อยละ)	$C_{A_0}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	$C_{A_e}$ ( $\mu\text{g}$ carotenoids/ g solution )	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)
3	10.3	3.6	65.5
5	17.7	7.0	60.4
7	24.6	10.2	58.5
10	46.8	23.3	50.1
20	91.8	59.8	34.8
30	138.9	104.0	25.1
40	190.1	159.0	16.4
50	244.6	223.9	8.5

หมายเหตุ สภาวะการทดลอง เรซิน Lewatit® VP OC 1064 ปริมาณ 1 กรัม ความเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

ภาคผนวก จ

การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลอง  
กับข้อมูลจากการคำนวณตามแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา

## ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ. การเปรียบเทียบข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับจากการทดลองกับข้อมูลจากการคำนวณ  
ตามแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา

ค่า $q_A$ จาก ผลการทดลอง	ค่า $q_A$ จากการคำนวณโดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา			
	$q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae})^n}$		$q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^n}$	
	$n = 2$	$n = 3$	$n = 2$	$n = 3$
35°C				
77.3	59.3	51.5	63.4	66.1
123.9	112.2	99.2	117.0	117.9
163.0	162.3	146.3	165.7	162.2
281.7	284.1	270.3	286.7	286.9
399.1	415.1	429.6	408.3	407.7
416.4	410.8	429.9	406.5	410.1
379.6	362.9	362.8	364.5	366.3
299.8	311.0	287.7	317.4	312.9
45°C				
74.1	55.3	48.9	52.2	54.6
109.6	115.5	104.7	111.2	113.0
148.5	155.4	143.2	152.7	149.5
257.5	260.3	252.2	258.2	258.9
366.1	367.4	382.1	373.6	371.9
374.6	364.5	380.7	368.3	372.2
338.3	325.0	323.9	323.6	325.5
259.1	280.9	259.4	275.2	270.6

## ตารางที่ จ. (ต่อ)

ค่า $q_A$ จาก การทดลอง	ค่า $q_A$ จากการคำนวณโดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอแนะขึ้นมา			
	$q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae})^n}$		$q_A = \frac{kC_{Ae}}{(1 + K_A C_{Ae} + K_O C_O)^n}$	
	$n = 2$	$n = 3$	$n = 2$	$n = 3$
55°C				
67.7	59.1	52.4	51.5	53.5
106.8	106.4	96.4	97.8	97.7
143.8	143.3	132.2	138.8	133.1
234.5	244.7	238.8	239.7	240.0
319.8	329.9	344.7	341.7	343.2
348.8	322.9	337.4	333.0	335.7
310.9	287.3	286.3	285.1	286.4
206.9	247.1	227.4	233.9	229.4

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

นางสาวจุฑารัตน์ อินทร์นา

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 2 สิงหาคม 2524 ที่จังหวัดชัยนาท

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี)

สถานที่สำเร็จการศึกษา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา จังหวัดกรุงเทพฯ

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2547

ผลงานทางวิชาการ

“การขยายสเกลการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพ”

การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์

แห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 14, 2547

“การดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้

ตัวดูดซับเรซิน”การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและ

เคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 17, 2550