

การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤติยิ่งยวด  
THE EXTRACTION OF LIME - PEEL OIL WITH SUPERCRITICAL  
CARBON DIOXIDE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤติยิ่งยวด

THE EXTRACTION OF LIME - PEEL OIL WITH SUPERCRITICAL  
CABON DIOXIDE



กษิต์เดช บวรนนท์

ศุภสิน วงษ์ม่วง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE EXTRACTION OF LIME - PEEL OIL WITH SUPERCRITICAL  
CARBON DIOXIDE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤติยิ่งยวด

The Extraction of Lime - Peel Oil with Supercritical Carbon Dioxide

ผู้จัดทำ

1. นายกษิตเดช บวรธนนนท์ รหัสประจำตัว 56010044
2. นายศุภสิน วงษ์ม่วง รหัสประจำตัว 56011255



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤติยิ่งยวด

นายชิต์เดช บวรนนท์ รหัส 56010044

นายศุภสิน วงษ์ม่วง รหัส 56011255

อ.สยาม สงวนรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2560

## บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤต ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันตั้งแต่ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส และตั้งแต่ 80 ถึง 110 บาร์ตามลำดับ ระยะเวลาการสกัดห่างกันครั้งละ 20 นาที เวลาการสกัดปริมาณน้ำมันผิวมะนาวอิมัลชันถูกวิเคราะห์โดยแบบจำลองโลจิสติก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สถานะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวอยู่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 100 บาร์ ได้น้ำมันหอมระเหยคิดเป็นร้อยละ 0.365 โดยมวล

คำหลัก: คาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤต, การสกัดน้ำมันหอมระเหย

# The extraction of lime - peel oil with supercritical carbon dioxide

Kasidet	Bawontananon	56010044
Supasin	Wongmuong	56011255
Sayam	Saguanrum	Advisor
Year 2017		

## Abstract

This project is to study the optimum state for extraction lime - peel oil with supercritical carbon dioxide. Lime peel is extracted by varying the range of temperature and pressure from 30 to 60°C and from 80 to 110 bar, respectively. Time interval is 20 minutes and logistic-curve analysis is applied to determine saturated oil-extraction time. As a result, the experiment demonstrates that the optimum state for the oil extraction is at 50°C and 100 bar with 0.365 percentage of oil by weight.

**Keywords:** Supercritical carbon dioxide, lime-peel oil.

# กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ ขอขอบคุณอาจารย์สยาม สงวนรัมย์ เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำปริญญาานิพนธ์ รวมถึงติดตามความก้าวหน้าของการจัดทำปริญญาานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว, ผศ.มณฑล ใจกุศล, ดร.บำรุง พ่วงเกิด คณะอาจารย์ สอนปริญญาานิพนธ์ที่สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาและสอนปริญญาานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อุन्नัต พิณโสภณ, ดร.วิฑาตา เจษฎารัตนชัย ที่สละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณนายฐิกร ปรางค์น้อย กรรมการผู้จัดการ บริษัท วายทีพี เอ็นจิเนียริง แอนด์ เมดิคอล ซัพพลาย จำกัด ที่มีส่วนร่วมในการให้คำแนะนำการติดตั้งอุปกรณ์หลักในชุดทดลอง การเลือกซื้อวัสดุอุปกรณ์ วิธีการใช้ที่ถูกต้อง และการบำรุงรักษา เป็นต้น

น้อมรำลึกถึงครูบาอาจารย์ทุกท่าน ทั้งครูเจ้าของวิชา ครูผู้สืบทอดวิชา ครูผู้สอน ทั้งในโลก ตะวันออกและตะวันตก

สุดท้ายขอรำลึกถึงคุณบิดา มารดาญาติพี่น้อง ที่คอยดูแลตลอดระยะเวลาการศึกษาและการจัดทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อน ๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยให้กำลังใจในการเรียนตลอดระยะเวลาการศึกษาและการจัดทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้

คุณค่าอันเป็นประโยชน์พึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอถวายเป็นพระราชกุศลแด่พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้า พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช สมเด็จพระเจ้าอยู่หัวมหาวชิราลงกรณ์ ตลอดจนบูรพกษัตริย์แห่งราชวงศ์จักรีทุกพระองค์ ขออุทิศแด่เจ้าพระยาสุรวงษ์ไวยวัฒน์ (วร บุนนาค) ศ.หลวงพรตพิทยพยัต ท่านเลี่ยม ตลอดจนทุกท่านที่สร้างคุณประโยชน์ให้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนึ่งหากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำกราบขออภัยในโอกาสนี้ด้วย

นายกษิต์เดช บวรธนนท์

นายศุภสิน วงษ์ม่วง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 สมมติฐาน.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.7 แผนการทำงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด.....	4
2.2 คุณสมบัติของของไหลวิกฤตยิ่งยวดที่เกี่ยวข้องกับการสกัด.....	6
2.2.1 คุณสมบัติการถ่ายเท.....	6
2.2.2 คุณสมบัติในการละลายของตัวทำละลาย.....	7
2.2.3 คุณสมบัติในการเลือกสกัด.....	7
2.2.4 ผลของความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย.....	7

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	9
3.1 รูปแบบเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์.....	9
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	10
3.3 วิธีการทดลอง.....	10
3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	10
3.3.2 การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว.....	10
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	12
4.1 ผลการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว.....	12
4.1.1 ที่ความดัน 90 บาร์ เวลา 40 นาที อุณหภูมิ 30, 40, 50, 60 เซลเซียส.....	12
4.1.2 ที่ความดัน 100 บาร์ เวลา 40 นาที อุณหภูมิ 30, 40, 50, 60 เซลเซียส.....	13
4.1.3 ที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส เวลา 40 นาที ความดัน 80, 90, 100, 110 บาร์.....	14
4.1.4 ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลา 40 นาที ความดัน 80, 90, 100, 110 บาร์.....	15
4.2 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย.....	16
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	20
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	20
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	20
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	20
บรรณานุกรม.....	21
ภาคผนวก ก.....	23

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิวิกฤต ความดันวิกฤต และความหนาแน่นวิกฤตของสารบริสุทธิ์ต่าง.....	5
ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ระหว่างของไหลวิกฤตยิ่งยวด ก๊าซและของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์.....	6
ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 90 บาร์ เวลา 40 นาที.....	12
ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 100 บาร์ เวลา 40 นาที.....	13
ตารางที่ 4.3 ผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส เวลา 40 นาที.....	14
ตารางที่ 4.4 ผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลา 40 นาที.....	15
ตารางที่ 4.5 ผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส.....	16
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าของร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไป และร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อร้อยละน้ำหนักน้ำมัน.....	17

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงสถานะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ.....	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงแบบจำลองโลจิสติก ระหว่างร้อยละน้ำมันผิวมะกรูดและเวลาที่ใช้สกัด.....	8
รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย.....	9
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 90 บาร์.....	12
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 100 บาร์.....	13
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส.....	14
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส.....	15
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อ ร้อยละน้ำหนักน้ำมัน และร้อยละน้ำหนักน้ำมัน.....	18
รูปที่ 4.6 แบบจำลองโลจิสติกแสดงผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะนาว.....	19

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำมันหอมระเหยหรือสารสกัดเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากการสกัดวัตถุดิบต่าง ๆ เช่น พืชสมุนไพร เปลือกผลไม้ มีลักษณะทั่วไปเป็นของเหลวใส มีกลิ่นเฉพาะตัว สามารถระเหยที่อุณหภูมิปกติ กลิ่นและรสของน้ำมันหอมระเหยจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยที่มาจากพืชชนิดต่าง ๆ

การสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) คือ การอาศัยคุณสมบัติของของไหลที่สถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical fluid) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นของไหลกึ่งของเหลวและก๊าซ มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงของเหลว ความสามารถในการแพร่ใกล้เคียงกับก๊าซ มีค่าความหนืดที่เหมาะสม รวมทั้งมีอัตราการถ่ายเทมวลและความสามารถในการทำละลายที่ดี สำหรับตัวทำละลายใช้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีความสามารถในการสกัดสูง ไม่ดูดซับและเปลี่ยนแปลงกลิ่น ง่ายต่อการแยกสารสกัด ความสามารถในการสกัดน้ำมันหอมระเหยออกจากวัตถุดิบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และเวลา

น้ำมันหอมระเหยจากวัตถุดิบต่าง ๆ จะมีอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการสกัดที่เหมาะสม ดังนั้นเพื่อให้ได้น้ำมันหอมระเหยในปริมาณมากที่สุด จึงต้องทดลองเพื่อหาอุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่เหมาะสมในการสกัด

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาความดัน อุณหภูมิและเวลาในการสกัดที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวมากที่สุด

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 คาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติอัดตัวได้

1.3.2 การไหลในท่อไม่คำนึงถึงแรงเสียดทาน

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 สกัดน้ำมันหอมระเหยที่ติดมากับคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวด

1.4.2 ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ความดัน 80 ถึง 110 บาร์ และเวลา 20 ถึง 80 นาที เพื่อหาค่าเหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีการสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

1.5.2 ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการสกัดโดยมี อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้สกัด

1.5.3 ทดลองสกัดผิวมะกรูดโดยอ้างอิงผลจากโครงการที่ผ่านมา [2] และตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์

1.5.4 ทดลองสกัดผิวมะนาว

1.5.5 บันทึกผล

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เข้าใจหลักการของของไหลวิกฤตยิ่งยวด และนำความรู้ที่เรียนมาประยุกต์ใช้ได้จริง

1.6.2 ได้สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากมะนาวและมะกรูด เพื่อให้ได้ผลผลิตมากที่สุด

1.6.3 นำวัตถุดิบที่หาได้ทั่วไปในประเทศไทยมาเพิ่มมูลค่า

## 1.7 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ปี 2560				ปี 2561					
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1.ศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยในอดีต										
2.กำหนดเป้าหมาย ขอบเขต และแผนการดำเนินงาน										
3.ศึกษาองค์ประกอบ การทำงานของเครื่องสกัด และซ่อมบำรุง										
4.ตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของเครื่อง										
5.ทดลองและเก็บผล										
6.จัดทำข้อมูล และสรุปผลการทดลอง										

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานปี 2560 และ 2561

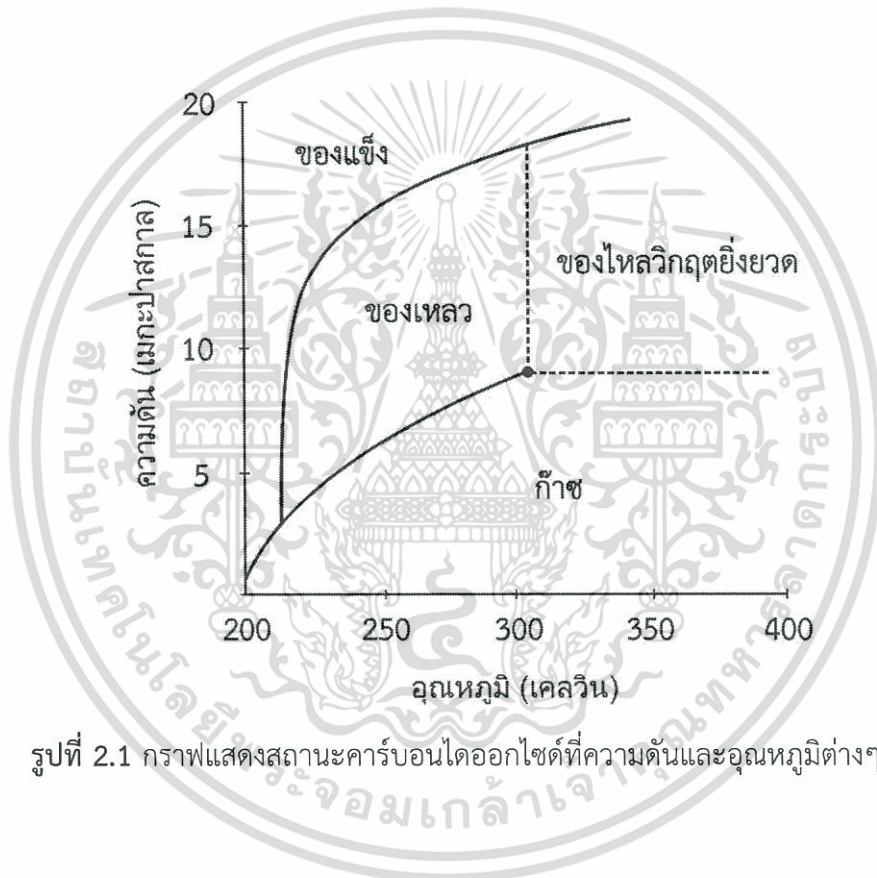
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีของไหลวิกฤตยิ่งยวด

ของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์จากทั้งของเหลวและก๊าซ คือ มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลว มีความสามารถในการแพร่ใกล้เคียงกับก๊าซ และยังมีค่าความหนืดที่เหมาะสม ทำให้เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ดี [2]



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงสถานะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ[3]

จากรูปที่ 2.1 แกนตั้งเป็นความดัน แกนนอนเป็นอุณหภูมิ แผนผังวัฏภาคแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และของไหลวิกฤตยิ่งยวด เส้นแบ่งระหว่างวัฏภาคเรียกว่าเส้นสมดุลวัฏภาค จุดบรรจบเส้นสมดุลวัฏภาคทั้ง 3 เส้นตัดกัน เรียกว่า จุดร่วมสาม (Triple point) และวัฏภาคที่อยู่เหนือจุดวิกฤต เรียกว่า ของไหลวิกฤตยิ่งยวด โดยวัฏภาคนี้นิยมนำมาใช้ในการสกัดน้ำมันหอมระเหย จากวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งของไหลวิกฤตยิ่งยวดที่นิยมใช้คือคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะที่จุดวิกฤตมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสถานะในย่านวิกฤตยิ่งยวดจะเป็นตัวทำละลายที่ดี เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและไม่เกิดการตกค้างในตัวถูกละลาย

ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิวิกฤต ความดันวิกฤต และความหนาแน่นวิกฤตของสารบริสุทธิ์ต่าง ๆ [2]

ธาตุและสารประกอบ	สัญลักษณ์	อุณหภูมิวิกฤต (°C)	ความดันวิกฤต (MPa)	ความหนาแน่นวิกฤต (kg/m <sup>3</sup> )
คาร์บอนไดออกไซด์	CO <sub>2</sub>	31.3	7.29	448
แอมโมเนีย	NH <sub>3</sub>	132.4	11.25	235
น้ำ	H <sub>2</sub> O	374.15	21.83	315
ไนตรัสออกไซด์	N <sub>2</sub> O	36.5	7.11	450
ซีนอน	Xe	16.6	5.76	118
คริปทอน	Kr	-63.8	5.43	91
มีเทน	CH <sub>4</sub>	-82.1	4.581	200
อีเทน	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	32.28	4.81	203
เอทิลีน	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	9.21	4.97	218
โพรเพน	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	96.67	4.19	217
เพนเทน	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	196.6	3.33	232

ของไหลวิกฤตยิ่งยวด หากนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย อนุภาคของแข็งที่เป็นตัวถูกละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลวิกฤตยิ่งยวดและเกิดการถ่ายพลังงานไอออนระหว่างอนุภาคกับอนุภาค ทำให้เอนทัลปีลดลงและเกิดการละลายได้ดี นอกจากนี้ของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่ใกล้เคียงกับก๊าซ ทำให้สามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างของของแข็งได้ดี ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ระหว่างของไหลวิกฤตยิ่งยวด ก๊าซและของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์ [4]

วิฎภาคของคาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์		สารเนพทาสิ้นในคาร์บอนไดออกไซด์
	ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )	ความหนืด ( $\mu Pa \cdot s$ )	สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $m^2/s$ )
ก๊าซ 313 เคลวิน, 1 บาร์	2	16	$5.1 \times 10^{-6}$
วิกฤตยิ่งยวด 313 เคลวิน, 100 บาร์	632	17	$1.4 \times 10^{-8}$
ของเหลว 300 เคลวิน, 500 บาร์	1029	133	$8.7 \times 10^{-9}$

## 2.2 คุณสมบัติและสถานะของของไหลวิกฤตยิ่งยวดที่เกี่ยวข้องกับการสกัด

### 2.2.1 คุณสมบัติการถ่ายเท

ตัวทำละลายที่มีความหนืดต่ำ สัมประสิทธิ์การแพร่สูง ระยะทางในการแพร่ลดลง ปริมาณสารที่สกัดได้เพิ่มขึ้น ความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน การปรับอุณหภูมิและความดันให้เหมาะสมจะทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น คุณสมบัติแบบก๊าซนี้สอดคล้องกับคุณสมบัติของไหลวิกฤตยิ่งยวด

### 2.2.2 คุณสมบัติในการละลายของตัวทำละลาย

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การละลายของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น แต่ถ้าการละลายของตัวถูกละลายมีค่าลดลง สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มความดันเพื่อเพิ่มความหนาแน่นจนใกล้เคียงกับสถานะเริ่มต้นแล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิ

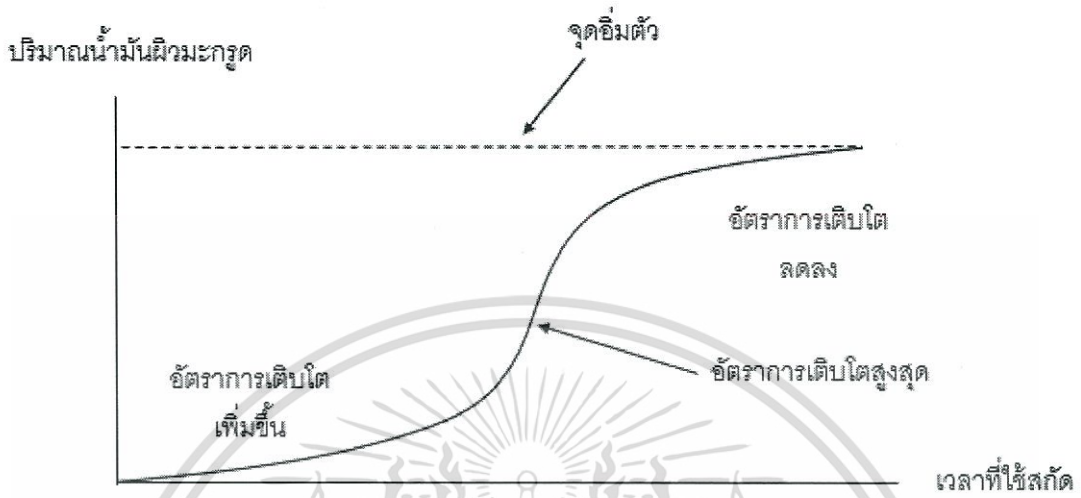
### 2.2.3 คุณสมบัติในการเลือกสกัด

การสกัดน้ำมันผิวมะนาวสามารถปรับอุณหภูมิและความดันเพื่อให้มีความสามารถในการละลายที่เหมาะสมกับสารที่ต้องการ ตัวทำละลายจะถูกปรับให้อยู่ใกล้สถานะวิกฤตยิ่งยวด ดังนั้นของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีคุณสมบัติในการเลือกสกัด สามารถใช้ในการสกัดลำดับส่วนได้

### 2.2.4 ผลของความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย

โดยทั่วไปปริมาณน้ำมันหอมระเหยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวทำละลาย และอุณหภูมิถ้าพิจารณาที่ความดันคงที่ ถ้าความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้จะลดลงเนื่องจากความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ตามสมการสถานะของก๊าซจริง  $P = \rho ZRT$  แต่ถ้าความดันสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้กลับเพิ่มขึ้น แม้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง เช่นเดียวกันหากพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ ถ้าอุณหภูมิต่ำ เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้จะลดลง แม้ความหนาแน่นของตัวทำละลายจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวทำละลายเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ส่วนถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ ถ้าอุณหภูมิสูง เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากขึ้น ตามสมการสถานะของก๊าซจริง  $P = \rho ZRT$  แต่เมื่อความดันเกินจุดวิกฤตมากเกินไปทำให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงได้ แม้ว่าอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแพร่ของอนุภาคตัวทำละลายอย่างรวดเร็ว ทำให้สกัดน้ำมันออกมาได้ปริมาณมาก ส่วนความหนาแน่นของตัวทำละลายสูง ทำให้ความสามารถในการทำละลายเพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง อย่างไรก็ตาม ความดันที่สูงเกินไปทำให้การถ่ายเทมวลลดลง จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำมันลดลงด้วย

ผลของเวลาการสกัดที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย พบว่าช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้เริ่มคงที่ หรือเรียกว่า จุดอิ่มตัว ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองโลจิสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แกนตั้งคือปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดที่สกัดได้ แกนนอนคือเวลาที่ใช้สกัด



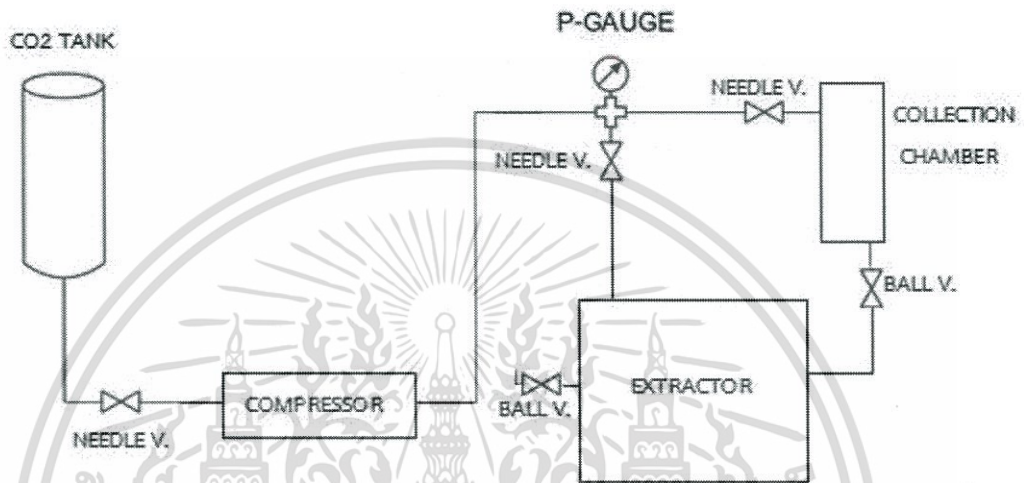
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงแบบจำลองโลจิสติก ระหว่างร้อยละน้ำมันผิวมะกรูดและเวลาที่ใช้สกัด [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.1 รูปแบบเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย

จากรูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย โดยมีกระบวนการทำงานเริ่มจาก เปิดถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไหลผ่านวาล์วเข็ม เข้าสู่ชุดส่งแรงดัน จากนั้น จะทำการอัดความดัน โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูงจะไหลผ่านวาล์วเข็ม เข้าสู่หม้อสกัด เมื่อได้ความดันที่ต้องการ ให้ทำการปิดวาล์วเข็ม จากนั้นเมื่อได้อุณหภูมิและความดันที่ต้องการแล้ว ให้ปล่อยทิ้งไว้ในระยะเวลาที่กำหนด เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการเปิดบอลวาล์ว คาร์บอนไดออกไซด์จะแยกออกจากน้ำมันหอมระเหยไหลเข้าสู่ถังพักก๊าซ เป็นการสิ้นสุดกระบวนการ

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
2. ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว
3. วาล์วกันกลับ
4. วาล์วเข็ม
5. บอลวาล์ว
6. กระบอกสูบไฮดรอลิก
7. หม้อสกัดความดันสูง
8. มาตรวัดความดัน
9. ชุดแยกสาร
10. ถังพักก๊าซ

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำมะนาวมาจากแหล่งเดียวกัน สกัดหนึ่งครั้งใช้น้ำหนักของผิวมะนาว 100 กรัม จะใช้มะนาวประมาณ 20 ถึง 30 ลูกขึ้นอยู่กับขนาดของมะนาวแต่ละลูก จากนั้นทำการฝานผิวของเปลือกมะนาวออกให้บาง และมีขนาดสม่ำเสมอ พยายามให้ติดเนื้อเยื่อสีขาวน้อยที่สุด มะนาวที่ใช้ควรเก็บไว้ไม่เกิน 2 วันก่อนใช้งาน เพื่อยังคงความสดของมะนาวไว้

#### 3.3.2 การสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว

นำผิวมะนาว 100 กรัม ใส่ลงในหม้อสกัดความดันสูง จากนั้นทำการคุมอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ใช้คือ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการ ให้ทำการเปิดถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ก๊าซไหลเข้าสู่หม้อสกัดความดันสูง จากนั้นทำการอัดแรงดันด้วยชุดกระบอกสูบไฮดรอลิก โดยความดันที่ใช้คือ 80, 90, 100, 110 บาร์ เมื่อได้ความดันที่ต้องการ ให้ทำการจับเวลา โดยเวลาที่ใช้ในการสกัดคือ 40 นาที ระหว่างนี้ต้องคอยคุมอุณหภูมิไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด ให้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จับน้ำมันผิวมะนาว ไปยังชุดแยกสาร เพื่อทำการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำมันผิวมะนาว จากนั้นทำการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ถังพักก๊าซ ทำการเปิดบอลวาล์วที่ติดอยู่กับชุดแยกสาร เพื่อนำน้ำมันหอมระเหยออกมาบรรจุไว้ในหลอดบรรจุ เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการการสกัดหนึ่งครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนทำการสกัดทุกครั้ง ให้วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องทดลอง และทำการเปิดคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปไล่คราบน้ำมันหรืออากาศที่ค้างอยู่ในท่อของชุดทดลองให้หมด หลังจากสิ้นสุดการสกัด ก่อนที่จะทำการเปิดฝาหม้อสกัดความดันสูง ต้องมั่นใจว่าไม่มีความดันตกค้างอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

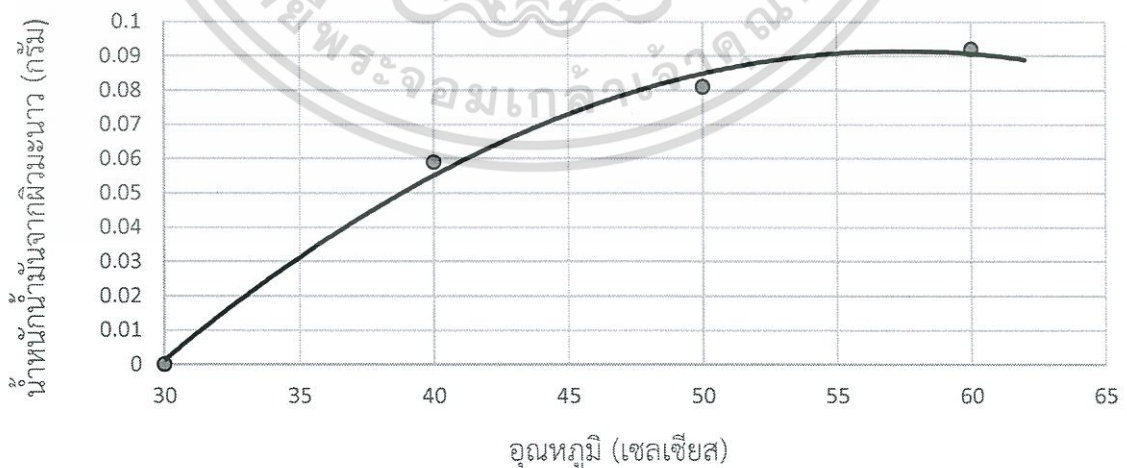
#### 4.1 ผลการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว

##### 4.1.1 ที่ความดัน 90 บาร์ เวลา 40 นาที

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 90 บาร์ เวลา 40 นาที

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	น้ำหนักของผิวมะนาวก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักของผิวมะนาวหลังสกัด (กรัม)	น้ำหนักน้ำจากผิวมะนาวที่อยู่ในถังสกัด (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันจากผิวมะนาวในถังแยก (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันต่อน้ำหนักก่อนสกัดของผิวมะนาว
30	100	94	0	0	0
40	100	90	4.02	0.059	0.059
50	100	84	8.78	0.081	0.081
60	100	79	9.33	0.092	0.092

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันจากผิวมะนาว ที่ความดัน 90 บาร์ เวลา 40 นาที



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 90 บาร์

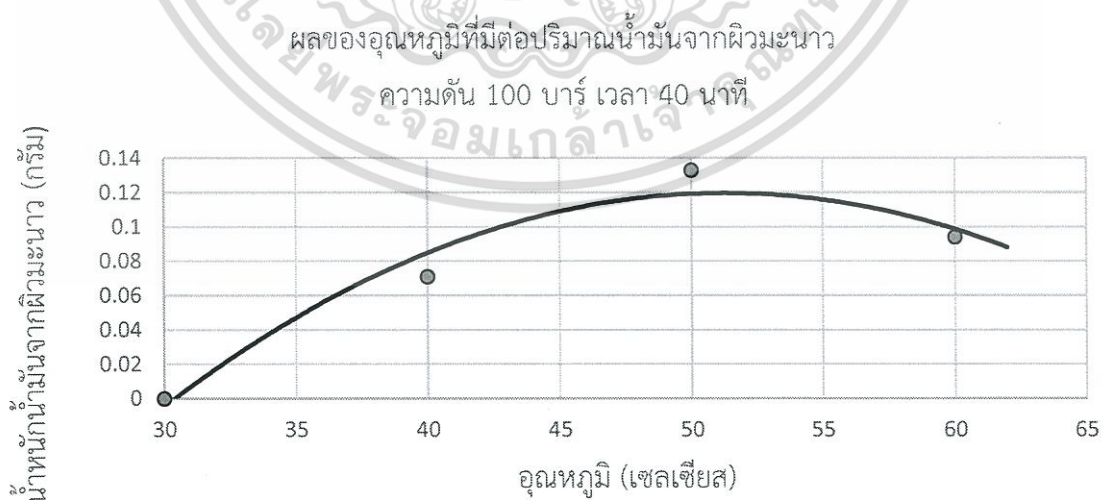
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.092 และน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 30 เซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงว่าที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิต่ำ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ไหลวิกฤตยิ่งยวดเพิ่มขึ้น ตามสมการ  $P = \rho ZRT$  ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำละลายเพิ่มขึ้น แต่การถ่ายโอนพลังงานระหว่างอนุภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ไหลวิกฤตยิ่งยวดลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวที่ได้จึงมีค่าลดลง ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวมากที่สุดเมื่อสกัดที่ความดัน 90 บาร์ คือ 60 เซลเซียส

#### 4.1.2 ที่ความดัน 100 บาร์ เวลา 40 นาที

ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 100 บาร์ เวลา 40 นาที

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	น้ำหนักของผิวมะนาว ก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักของผิวมะนาวหลัง สกัด (กรัม)	น้ำหนักน้ำจากผิวมะนาวที่อยู่ในถังสกัด (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันจากผิวมะนาว ในถังแยก (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันต่อน้ำหนักของผิวมะนาว ก่อนสกัด
30	100	90	0	0	0
40	100	85	3.10	0.071	0.071
50	100	84	9.02	0.133	0.133
60	100	84	8.46	0.094	0.094



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 100 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

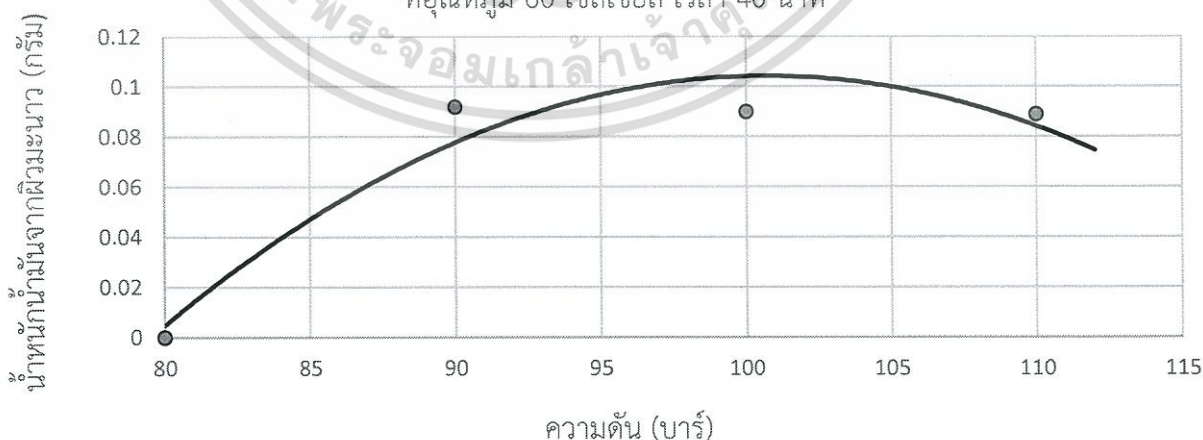
ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.133 และน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 30 เซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 แสดงว่าที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิต่ำ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ไหลวิกฤตยิ่งยวดเพิ่มขึ้น ตามสมการ  $P = \rho ZRT$  ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำละลายเพิ่มขึ้น แต่การถ่ายโอนพลังงานระหว่างอนุภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ไหลวิกฤตยิ่งยวดลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวที่ได้จึงมีค่าลดลง ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวมากที่สุดเมื่อสกัดที่ความดัน 100 บาร์ คือ 50 เซลเซียส

#### 4.1.3 ที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส เวลา 40 นาที

ตารางที่ 4.3 ผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส เวลา 40 นาที

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักของผิวมะนาวก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักของผิวมะนาวหลังสกัด (กรัม)	น้ำหนักน้ำจากผิวมะนาวที่อยู่ในถังสกัด (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันจากผิวมะนาวในถังแยก (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันต่อน้ำหนักของผิวมะนาวก่อนสกัด
80	100	90	2.03	0	0
90	100	79	9.33	0.092	0.092
100	100	84	8.46	0.090	0.090
110	100	85	7.16	0.089	0.089

ผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส เวลา 40 นาที



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

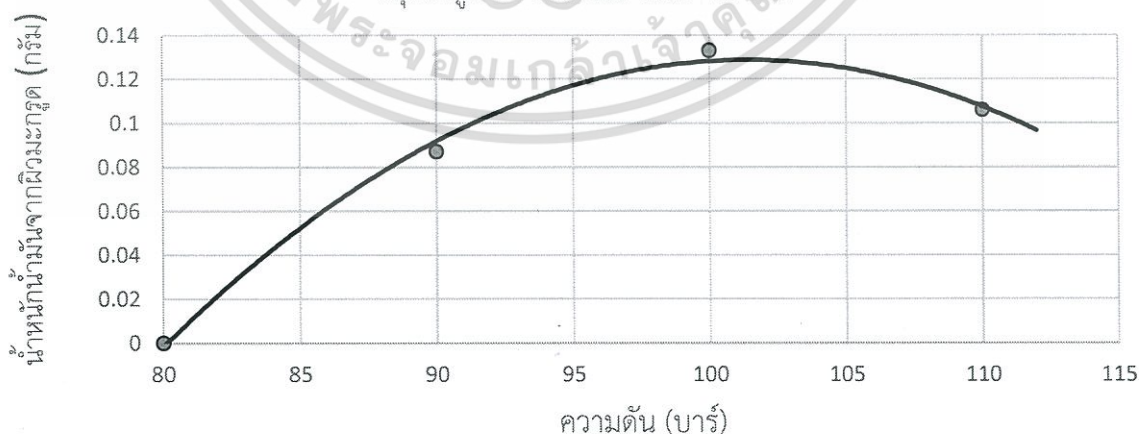
ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวมากที่สุด ที่ความดัน 100 บาร์ คิดเป็นร้อยละ 0.092 และน้อยที่สุดที่ความดัน 80 บาร์ คิดเป็นร้อยละ 0 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงเมื่อความดันต่ำ ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวน้อยกว่าที่ความดันสูง เนื่องจากอุณหภูมิสูงเมื่อความดันต่ำ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดลดลง ตามสมการ  $P = \rho ZRT$  ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดและผิวมะนาวเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้น ความดันที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวมากที่สุดเมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส คือ 90 บาร์

#### 4.1.4 ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลา 40 นาที

ตารางที่ 4.4 ผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลา 40 นาที

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักของผิวมะนาวก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักของผิวมะนาวหลังสกัด (กรัม)	น้ำหนักน้ำจากผิวมะนาวที่อยู่ในถังสกัด (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันจากผิวมะนาวในถังแยก (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันต่อน้ำหนักของผิวมะนาวก่อนสกัด
80	100	96	0	0	0
90	100	88	5.33	0.087	0.087
100	100	84	9.02	0.133	0.133
110	100	88	6.76	0.106	0.106

ผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลา 40 นาที



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวมากที่สุด ที่ความดัน 100 บาร์ คิดเป็นร้อยละ 0.133 และน้อยที่สุดที่ความดัน 80 บาร์ คิดเป็นร้อยละ 0 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4 แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงเมื่อความดันต่ำ ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวน้อยกว่าที่ความดันสูง เนื่องจากอุณหภูมิสูงเมื่อความดันต่ำ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดลดลง ตามสมการ  $P = \rho ZRT$  ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดและผิวมะนาวเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้น ความดันที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะนาวมากที่สุดเมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส คือ 100 บาร์

#### 4.2 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย

ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวมากที่สุด คือ 100 บาร์ และ 50 เซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว ที่ความดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส

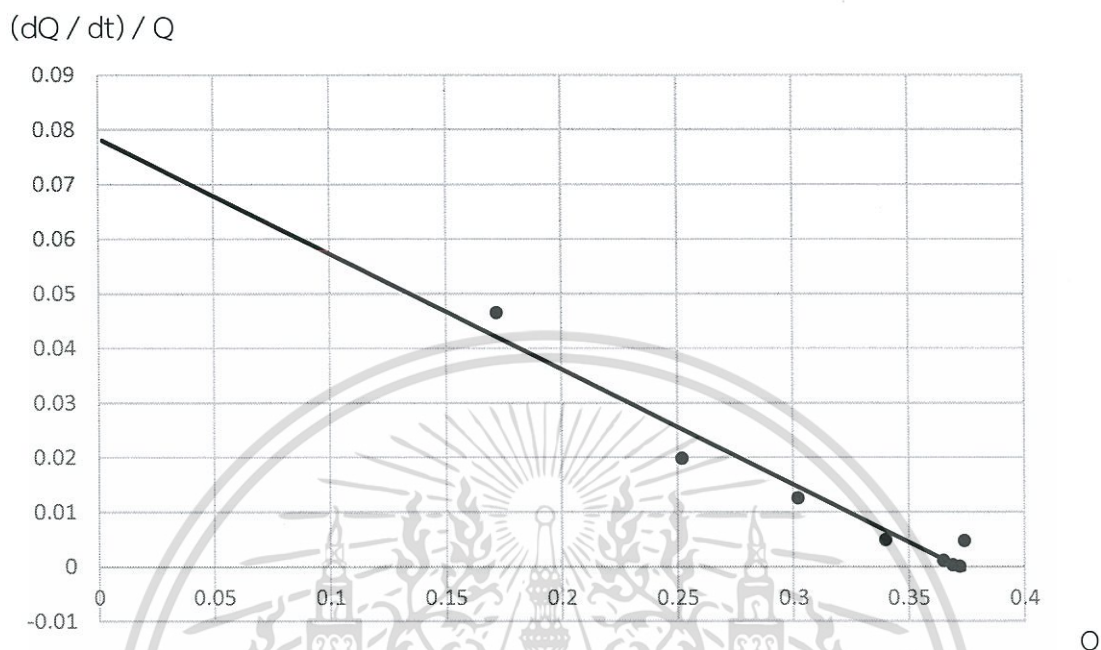
เวลาสกัด (นาทีก)	น้ำหนักของผิวมะนาวก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักของผิวมะนาวหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันต่อน้ำหนักของผิวมะนาวก่อนสกัด Q
5	200	190	0.172
15	200	190	0.252
25	200	189	0.302
35	200	190	0.340
50	200	184	0.365
60	200	186	0.369
90	200	186	0.372
210	200	176	0.374

จากตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวเพิ่มขึ้น โดยตามทฤษฎีผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ จะมี ณ เวลาหนึ่งที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่จุดนั้น เรียกว่า ความสามารถในการรับภาระ ซึ่งสอดคล้องกับโค้งโลจิสติก ทำให้สามารถคาดคะเนเวลาที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าของร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไป และร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อร้อยละน้ำหนักน้ำมัน

เวลาสกัด t (นาที)	ร้อยละน้ำหนัก น้ำมัน Q	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่ เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไป $dQ / dt$	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไป ต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อร้อยละ น้ำหนักน้ำมัน $(dQ / dt) / Q$
5	0.172	0.00800	0.04651
15	0.252	0.00500	0.01984
25	0.302	0.00380	0.01258
35	0.340	0.00167	0.00490
50	0.365	0.00040	0.00109
60	0.369	0.00010	0.00027
90	0.372	0.00001	0.00004
210	0.374	0.00178	0.00476

จากตารางที่ 4.6 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อร้อยละน้ำหนักน้ำมัน  $((dQ / dt) / Q)$  กับร้อยละน้ำหนักน้ำมัน  $(Q)$  ได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อ ร้อยละน้ำหนักน้ำมัน และร้อยละน้ำหนักน้ำมัน

กำหนดให้

$$\text{จุดตัดแกน } y = k = 0.0785$$

$$\text{จุดตัดแกน } x = L = 0.371 \quad \text{โดยที่ } L = 0.371 \quad \text{คือความสามารถในการ}$$

รับภาระ

$$\text{ร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เริ่มต้นทำนาย } P_0 = 0.172$$

จากสมการ

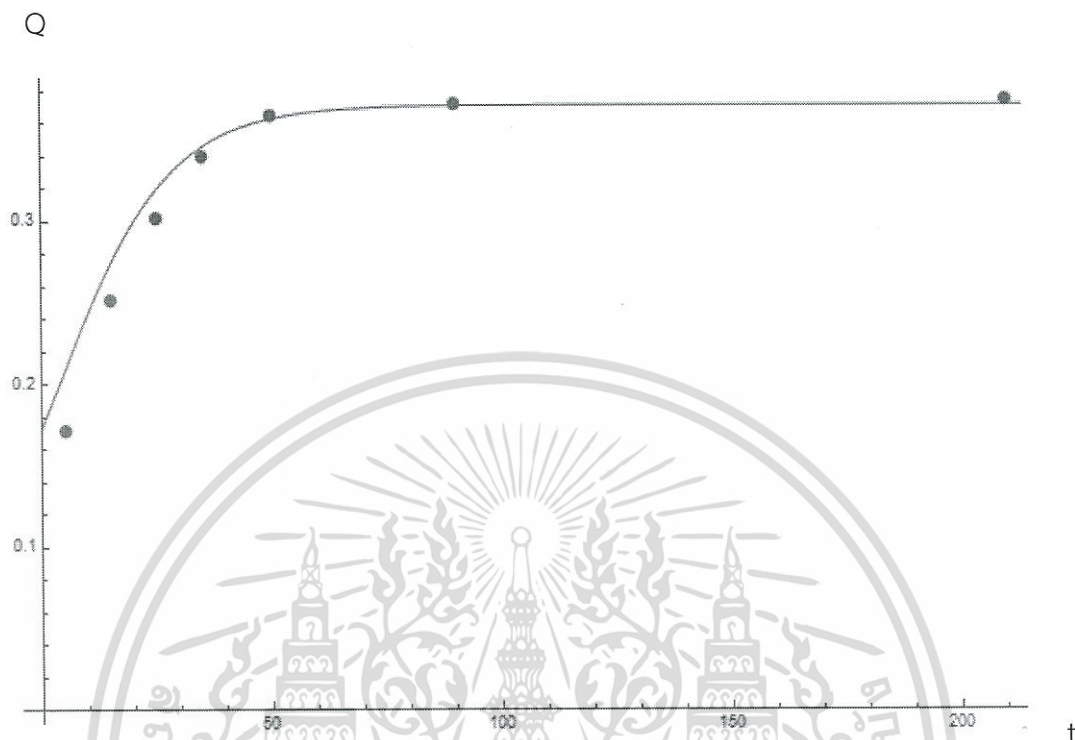
$$A = \frac{L - P_0}{P_0} \quad \text{แทนค่าจะได้ } A = 1.158$$

และจากสมการ

$$P = \frac{L}{1 + Ae^{-kt}} \quad \text{แทนค่าจะได้ } P = \frac{0.371}{1 + 1.158e^{-0.0785t}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำมันหอมระเหยของผิวมะนาว และเวลาดังนี้



รูปที่ 4.6 แบบจำลองโลจิสติกแสดงผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะนาว

$$\text{ที่ความดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส ตามสมการ } P = \frac{0.371}{1 + 1.158e^{-0.0785t}}$$

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ช่วงแรกร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวเพิ่มขึ้นในอัตราการเติบโตที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปยังคงเพิ่มขึ้นอยู่แต่อัตราการเติบโตลดลงจนถึง ณ เวลาหนึ่งที่ร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ ที่ร้อยละ 0.371 เรียกจุดนี้ว่า ความสามารถในการรับภาระ

## วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ในการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว สถานะที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่ความดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลา 50 นาที ปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวที่สกัดได้คิดเป็นร้อยละ 0.365 โดยมวล ผลของเวลาที่ใช้สกัดสอดคล้องกับแบบจำลองโลจิสติก

### 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยนั้น มีหลายปัจจัยที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่แตกต่างกัน โดยมีปัจจัยหลัก คือความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสกัด ส่วนปัจจัยรองก็มีอาทิเช่น เวลาในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ ขนาดของการหั่นผิวมะกรูดให้เท่ากันสม่ำเสมอ และปัจจัยที่เราไม่สามารถควบคุมได้ คือปริมาณน้ำมันที่อยู่ในผิวมะนาวแต่ละลูก ขนาดของมะนาวที่นำมาทำการทดลอง ความหนาของผิวมะนาว และค่าความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ของการทดลอง เช่น เกจความดัน เทอร์โมมิเตอร์ และเครื่องชั่งวัตถุเปียก เป็นต้น ซึ่งมะนาวที่เรานำมาสกัดนั้นควรหาจากแหล่งเดียวกัน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. วัตถุดิบที่นำมาสกัดควรเป็นวัตถุดิบที่สดใหม่ เนื่องจากการสังเกตของผู้ทำการทดลองนั้นเห็นว่าการนำวัตถุดิบที่จะสกัดมาเองนั้นจะทำให้ได้น้ำมันหอมระเหยมากกว่าวัตถุดิบที่ซื้อจากร้านค้า
2. การสกัดด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องใช้ความดันสูง จึงควรที่จะทำให้อุณหภูมิและข้อต่อเป็นแนวตรงอยู่เสมอเพื่อลดการรั่วไหลออกสู่บรรยากาศ
3. ควรมีการศึกษาคุณภาพของน้ำมันหอมระเหยว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อสี กลิ่น และระยะเวลาการเก็บรักษา
4. ควรมีการวัดความดันที่จุดต่าง ๆ ให้ละเอียดมากขึ้นและมีการคุมอัตราการไหลอย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น
5. ควรมีการศึกษาคุณภาพของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลแบบระบบปิดให้มีความบริสุทธิ์ ไม่มีน้ำมันหอมระเหยปนกลับมากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอาจทำให้การสกัดมีคุณภาพสูงมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] นเรชัย ธรรมลังกา, นัฐพร สวานยะเสรี, ยรรยงค์ ยิ้มแย้ม พ.ศ.2557:ปริญญานิพนธ์ การออกแบบและสร้างหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันผิวมะกรูดที่ถูกสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล.
- [2] คีต สร้อยทอง, ธนพล สุกใส, ปิยะพงษ์ พงษ์ภัทระวิทย์ พ.ศ.2559: ปริญญานิพนธ์ การออกแบบและสร้างเครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดแบบวงจรถัด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล.
- [3] รังสินันท์ ณ รังษี, ศรัณย์ โคตรมะณี, อัครวินทร์ บุญเลื่อนส่ง พ.ศ.2559: ปริญญานิพนธ์ การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล.
- [4] Williamss. J.R. and Clifford. A.A. 2000 Supercritical Fluid Method and Protocols. New Jersey : Human Press.
- [ 5] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design,” 10th ed., United states of America, McGraw-Hill Education, 2015.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## สถานที่ติดต่อ ทดสอบ สิ่งทำ และจัดซื้ออุปกรณ์เครื่องมือ

1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด สห เจนเนอรอล แอนด์ ซัพพลาย เป็นร้านที่จำหน่ายซีลโอริง

ห้างหุ้นส่วนจำกัด สห เจนเนอรอล แอนด์ ซัพพลาย

330 หมู่ 10 แขวงลำปลาทิว แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10310

โทรศัพท์: 0-2737-2266

2. บริษัท ชัยถาวรรุ่งเรือง จำกัด เป็นร้านจำหน่ายถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

บริษัท ชัยถาวรรุ่งเรือง จำกัด

6/35 หมู่ 10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์: 0-2360-5741

3. บริษัท เอ็ม เจ บางกอกควาล์ว แอนด์ ฟิตติ้ง จำกัด เป็นตัวแทนจำหน่ายวาล์ว ท่อ เกจวัดความดัน และฟิตติ้ง

บริษัท เอ็ม เจ บางกอกควาล์ว แอนด์ ฟิตติ้ง จำกัด

ที่อยู่: 88/8 หมู่ 14 ถนนกิ่งแก้ว ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

โทรศัพท์: 0-2062-1599 โทรสาร: 0-2062-1590

4. บริษัท วายทีพี เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ เมคคอล ซัพพลาย จำกัด เป็นตัวแทนจำหน่าย วาล์ว และท่อ สแตนเลส

บริษัท วายทีพี เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ เมคคอล ซัพพลาย จำกัด

ที่อยู่: 70/84 หมู่ 5 ตำบลเสาธงหิน อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี 11140

โทรศัพท์: 083-921-8442