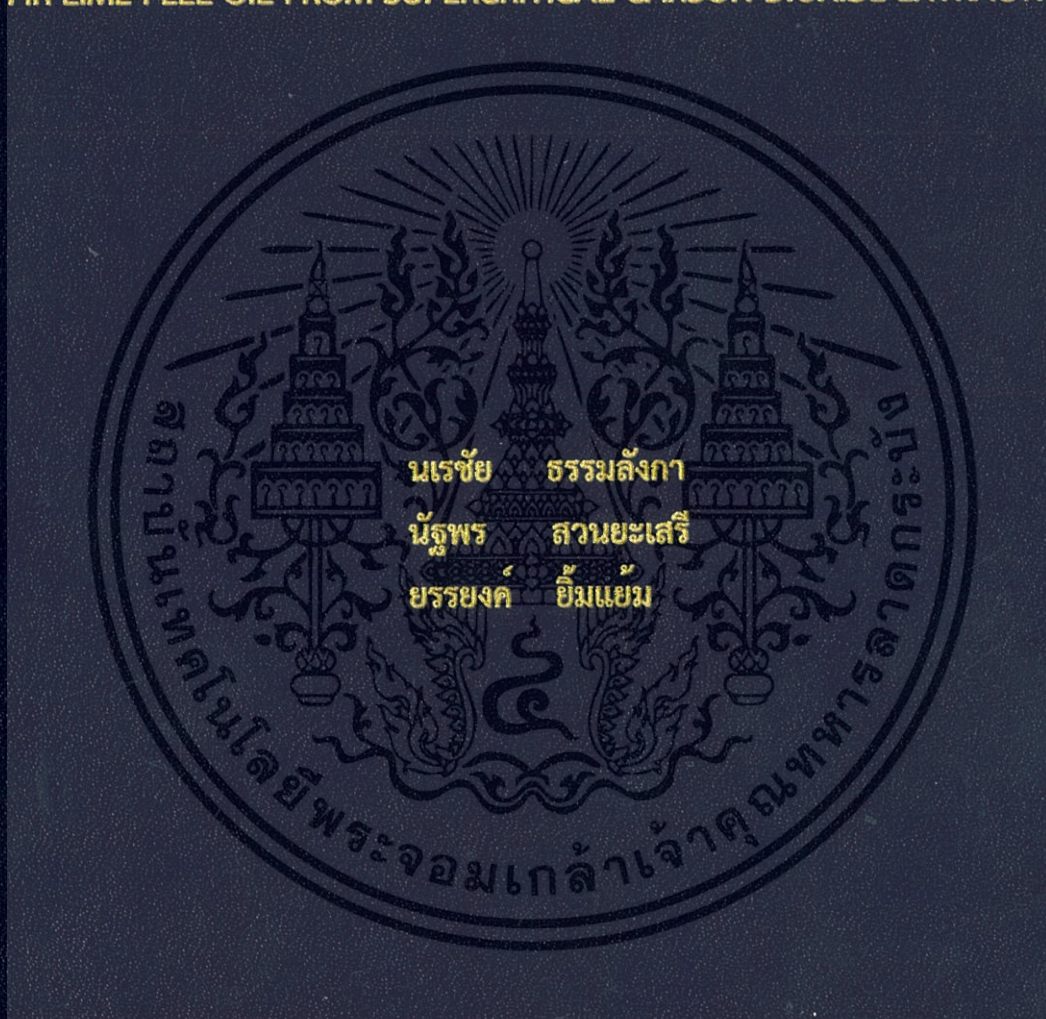


การออกแบบและสร้างหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันผิวมะกรูด  
ที่ถูกสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PRESSURE VESSEL FOR TRAPPING  
KAFFIR LIME-PEEL OIL FROM SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE EXTRACTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและสร้างหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันผิวมะกรูด  
ที่ถูกสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PRESSURE VESSEL FOR TRAPPING  
KAFFIR LIME-PEEL OIL FROM SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE EXTRACTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PRESSURE VESSEL FOR TRAPPING  
KAFFIR LIME-PEEL OIL FROM SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE EXTRACTION



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อปี 2014 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันผิวมะกรูดที่ถูกสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PRESSURE VESSEL FOR TRAPPING KAFFIR LIME-PEEL OIL FROM SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE EXTRACTION

ผู้จัดทำ

1. นาย นเรชัช ธรรมลังกา รหัสประจำตัว 54010678
2. นางสาว นัฐพร สนวนะเสรี รหัสประจำตัว 54010692
3. นาย ยรรงค์ ยิ้มแย้ม รหัสประจำตัว 54011044



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.สยาม สนวนรัมย์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันผิวมะกรูดที่ถูกสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

นายนเรชัย	ธรรมลังกา	54010678
นางสาวนัฐพร	สวนยะเสรี	54010692
นายบรรยงค์	ยิ้มแย้ม	54011044
อาจารย์สยาม	สงวนรัมย์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2557

## บทคัดย่อ

โครงการนี้ให้ความสนใจกับการออกแบบและสร้างหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดที่ถูกสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด หม้อความดันซึ่งรับแรงดันสูงสุดได้ 120 บาร์ ถูกออกแบบและสร้างจากทฤษฎีก๊าซจริง ทฤษฎีผนังบางของหม้อความดัน และทฤษฎีการรับภาระก่อนของฟาสเทนเนอร์ภายใต้แรงสถิตย์ จากนั้นทำการทดลองโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันตั้งแต่ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส และตั้งแต่ 80 ถึง 120 บาร์ตามลำดับ ระยะเวลาการสกัดห่างกันครั้งละ 30 นาที ระยะเวลาการสกัดปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดอิมตัวถูกวิเคราะห์โดยแบบจำลองโลจิสติก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สถานะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดอยู่ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 120 บาร์ ใช้เวลาสกัด 4 ชั่วโมง และได้น้ำมันหอมระเหยคิดเป็นร้อยละ 0.767 โดยมวล

คำหลัก: คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด การสกัดน้ำมันหอมระเหย หม้อความดัน

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PRESSURE VESSEL FOR TRAPPING KAFFIR LIME-PEEL OIL FROM SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE EXTRACTION

Naraychai Thammalangka 54010678  
Nuthaporn Suanyaseree 54010692  
Yanyong Yimyam 54011044  
Sayam Saganrum Advisor  
Year 2014

ABSTRACT

This project is focused on design and constructing of a pressure vessel for trapping kaffir lime-peel oil from supercritical extraction by carbon dioxide. The 120-bar vessel is designed and constructed by using real gas theory, thin-walled theory, and preloaded fasteners in static loading. After that kaffir lime-peel is extracted by varying the ranges of temperature and pressure from 20 to 60 °C, and from 80 to 120 bar, respectively. Time interval for extraction is 30 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 40 °C and 120 bar, with time extraction is 4 hours with 0.767 percentage by mass.

Key words: Supercritical carbon dioxide, Extraction of essential oil, Pressure vessel.

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำปฏิญานิพนธ์ ขอขอบคุณอาจารย์สยาม สงวนรัมย์ เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำปฏิญานิพนธ์ รวมถึงติดตามความก้าวหน้าของการจัดทำปฏิญานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณะอาจารย์สอบปฏิญานิพนธ์ ผศ.ดร.อนุวัต พิณโสภณ รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม และ ดร.เสริมศักดิ์ อยู่เย็น ที่สละเวลาอันมีค่าในการสอบปฏิญานิพนธ์ครั้งนี้ รวมถึงให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ผู้ประสิทธิประสาทวิชาทุกท่านที่ให้ความรู้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกคนในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีส่วนในการอำนวยความสะดวกในเรื่องต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ร้านศรีวิศาล ร้านชัยถาวรรุ่งเรือง และบริษัทนิวแม็ก ที่มีส่วนร่วมในการสร้างอุปกรณ์หลักในชุดทดลอง และจัดหาอุปกรณ์อื่น ๆ ตลอดจนให้คำแนะนำปรึกษาในเรื่องของการออกแบบ การเลือกซื้อวัสดุอุปกรณ์ วิธีการใช้ที่ถูกต้อง และการบำรุงรักษา

สุดท้ายขอรำลึกถึงคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยดูแลตลอดระยะเวลาการศึกษาและการจัดทำปฏิญานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อน ๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยให้กำลังใจส่งเสริมการทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณประโยชน์อันพึงมีจากปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำน้อมถวายเป็นพระราชกุศลแด่ พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว และพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช น้อมอุทิศแด่ เจ้าพระยาสุรวงษ์ไวยวัฒน์ (วร บุนนาค) ท่านเลี่ยม พรตพิทยพยัต ศาสตราจารย์หลวงพรตพิทยพยัต สิ่งศักดิ์สิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตลอดจนครูบาอาจารย์ผู้ประสิทธิประสาทวิชาทั้งทางตรงทางอ้อมทุกท่าน และอุทิศแด่ผู้มีพระคุณของคณะผู้จัดทำทุกท่าน

นายนเรชัย ธรรมลังกา  
นางสาวนัฐพร สอนยะเสรี  
นายยรรยงค์ ยิ้มแย้ม

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญ(ต่อ).....	V
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญรูป(ต่อ).....	VII
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	1
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีของไหลวิฤตยิ่งยวด.....	3
2.1.1 คุณสมบัติของของไหลวิฤตยิ่งยวดที่ส่งผลให้การสกัด.....	4
2.1.2 ผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลาการสกัดที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย.....	5
2.2 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบหม้อความดัน.....	7
2.2.1 การคำนวณหาปริมาตรหม้อความดัน.....	7
2.2.2 การคำนวณหาความหนาของหม้อความดัน.....	9
2.2.3 การคำนวณขนาดของโบลต์.....	11
2.3 การเลือกใช้โอรัง.....	15
2.3.1 การบอกขนาดของโอรัง.....	16
2.3.2 การหามิติต่าง ๆ ของโอรัง.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	18
3.1 การคำนวณหาปริมาตรของหม้อความดัน.....	18
3.2 คำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัย.....	19
3.2.1 ทรงกระบอก.....	19
3.2.2 ทรงกลม.....	19
3.2.3 คำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์.....	19
3.2.4 คำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัยที่เกิดจากการแยกตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม.....	19
3.3 การออกแบบหม้อความดันโดยการคำนวณโดยละเอียด.....	20
3.3.1 คำนวณหาปริมาตรของหม้อความดัน.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 คำนวณความเค้นตามยาว .....	20
3.3.3 การคำนวณโบลต์ .....	22
3.4 การคำนวณ และเลือกชนิดของโอรัง .....	27
3.5 ออกแบบการทดลอง.....	27
3.6 ขั้นตอนการสกัด .....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	29
4.1 ผลการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด.....	29
4.1.1 ที่ความดัน 80 บาร์ .....	29
4.1.2 ที่ความดัน 90 บาร์ .....	33
4.1.3 ที่ความดัน 100 บาร์ .....	37
4.1.4 ที่ความดัน 110 บาร์ .....	41
4.1.5 ที่ความดัน 120 บาร์ .....	45
4.2 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย .....	49
4.2.1 ที่หม้อสกัด .....	49
4.2.2 ที่หม้อสกัดและหม้อแยก .....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง วิจัยาณ์ และข้อเสนอแนะ .....	55
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	55
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	55
5.2 วิจัยาณ์ผลการทดลอง .....	55
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	56
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	64
ภาคผนวก ค.....	66
ภาคผนวก ง .....	67

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 แผนภาพเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์ .....	3
2 โคว์โลจิสติกแสดงปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้เมื่อเวลาผ่านไป .....	6
3 ร้อยละความผิดพลาดเมื่อใช้สมการสถานะของก๊าสอุดมคติ .....	7
4 แผนภาพแสดงตัวประกอบของการอัดตัวของก๊าส .....	8
5 ความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำที่ผิวทรงกระบอก .....	9
6 ความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำที่ผิวทรงกลม .....	10
7 โบลต์ และนัตที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกันเมื่อมีแรงดึงอันเนื่องมาจากการ ขันโบลต์และแรงเนื่องจากความดันภายในกระทำ .....	11
8 โบลต์ และนัตที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงอันเนื่องมาจากการ ขันโบลต์ และแรงเนื่องจากความดันภายในมากกระทำ .....	12
9 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดในการใช้งานของโอริงที่ทำมาจากวัสดุต่าง ๆ .....	16
10 แสดงขนาดของตัวแปรที่ใช้กับสมการคำนวณโอริงข้างต้น .....	17
11 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 80 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	30
12 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อแยก ที่ ความดันเริ่มสกัด 80 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	31
13 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 80 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	32
14 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 90 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	34
15 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อแยก ที่ความดันเริ่มสกัด 90 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	35
16 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 90 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	36
17 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 100 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	38
18 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อแยก ที่ความดันเริ่มสกัด 100 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	39
19 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 100 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	40
20 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 110 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	42
21 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดหม้อแยกที่ ความดันเริ่มสกัด 110 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	43
22 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 110 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
23 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 120 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง.....	46
24 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อแยก ที่ความดันเริ่มสกัด 120 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	47
25 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 120 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	48
26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(dP_{ext}/dt)/P_{ext}$ กับ $P_{ext}$ .....	50
27 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากหม้อสกัด เมื่อสกัดที่ 120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส.....	51
28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(dP_{ext}/dt)/P_{ext}$ กับ $P_{ext}$ .....	53
29 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยโดยรวม เมื่อสกัดที่ 120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส .....	54
30 แผนภาพกระบวนการสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ แบบระบบปิด.....	56
ก.1 ภาพเขียนแบบหม้อความดันสำหรับบรอแยกตัวของน้ำมันหอมระเหยบอกรอยเชื่อม .....	62
ก.2 ภาพเขียนแบบหม้อความดันสำหรับบรอแยกตัวของน้ำมันหอมระเหยบอกรอยขนาดในหน่วยมิลลิเมตร	63
ค.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ในการทดลอง .....	66

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของไหลวิกฤตยิ่งยวด ก๊าซ และของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์.....	4
2 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆที่ใช้ทำโอริง .....	15
3 ขนาดท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน .....	18
4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 80 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	29
5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 90 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	33
6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 100 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	37
7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 110 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	41
8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 120 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง .....	45
9 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากหม้อสกัด เมื่อสกัดที่ 120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส .....	49
10 ตารางแสดงค่าของ $dP_{ext}/dt$ และ $(dP_{ext}/dt)/P_{ext}$ .....	49
11 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยรวม เมื่อสกัดที่ 120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส .....	52
12 ตารางแสดงค่าของ $dP_{tot}/dt$ และ $(dP_{tot}/dt)/P_{tot}$ .....	52
ข.1 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 80 บาร์.....	64
ข.2 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 90 บาร์.....	64
ข.3 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 100 บาร์ .....	65
ข.4 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 110 บาร์ .....	65
ข.5 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 120 บาร์ .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

การสกัดน้ำมันหอมระเหยโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ที่สถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวดเป็นที่นิยมมากในปัจจุบันเนื่องจาก เป็นการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีความบริสุทธิ์สูง คงความเป็นธรรมชาติมากกว่าวิธีอื่น ๆ ปัญหาจากโครงการที่ผ่านมา [1] เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสกัดแต่ละครั้ง มีน้ำมันหอมระเหยบางส่วนติดมากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากหม้อสกัด ทำให้ได้อัตราส่วนของน้ำมันหอมระเหยต่ำ โครงการนี้จึงพัฒนาต่อยอดจากโครงการเดิมที่มีหม้อสกัดเพียงหม้อเดียว โดยการออกแบบหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหยออกจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะก๊าซ เพื่อเพิ่มผลได้ของปริมาณน้ำมันหอมระเหย

### 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อออกแบบ และสร้างหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหยออกจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะไอ

1.2.2 เพื่อสกัดน้ำมันผิวมะกรูด หาสถานะเหมาะสมและเวลาสกัดของน้ำมันผิวมะกรูดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 สามารถออกแบบ และสร้างหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย

1.3.2 หม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย สามารถสกัดน้ำมันหอมระเหยที่ติดมากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะวิกฤตยิ่งยวดได้

1.3.3 หม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย สามารถเพิ่มผลได้ของปริมาณน้ำมันหอมระเหย

1.3.4 อุณหภูมิ ความดัน และเวลาการสกัด มีผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้ และสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ออกแบบ และสร้างหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย ที่ติดมากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวด

1.4.2 สกัดน้ำมันหอมระเหยที่ติดมากับคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวด

1.4.3 ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส ความดัน 80 ถึง 120 บาร์ และเวลา 30 ถึง 90 นาที เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ทำการออกแบบหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย กำหนดให้หม้อความดันรับความดันได้สูงสุดที่ 120 บาร์ และกำหนดขนาดของถังความดันนี้ให้คาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นก๊าซเพื่อแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำมันหอมระเหย ซึ่งใช้ทฤษฎีก๊าซจริง ทฤษฎีหนึ่งบาง และทฤษฎีการออกแบบฟาสเทนเนอร์ที่รับแรงสถิต จากนั้นทำการทดลองโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันตั้งแต่ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส และตั้งแต่ 80 ถึง 120 บาร์ตามลำดับ ระยะเวลาการสกัดห่างกันครั้งละ 30 นาที แล้วบันทึกผลการทดลอง เวลาการสกัดปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดอิมตัวถูกวิเคราะห์โดยแบบจำลองโลจิสติก ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปหาสถานะเหมาะสมที่สุดในการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เข้าใจกระบวนการสกัดน้ำมันหอมระเหยโดยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวด

1.6.2 เข้าใจถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย ทำให้สามารถออกแบบ สร้าง และนำมาใช้ได้จริง

1.6.3 สามารถดักจับน้ำมันหอมระเหย ที่ติดมากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวด ด้วยหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย ทำให้เป็นการลดการสูญเสีย และเพิ่มผลได้ของปริมาณน้ำมันหอมระเหย

1.6.4 สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในระบบอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันหอมระเหยต่อไปได้

## บทที่ 2

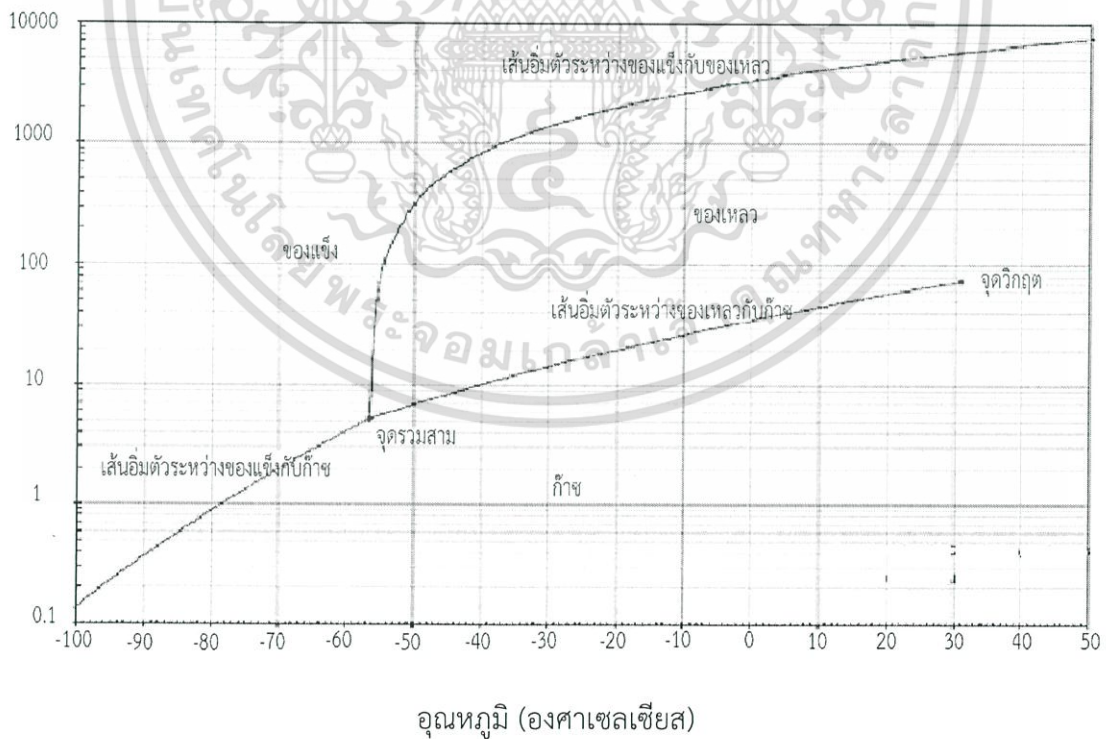
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีของไหลวิกฤตยิ่งยวด

ของไหลวิกฤตยิ่งยวดรวมคุณสมบัติที่ดีที่มีในของเหลวและก๊าซ คือมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลว มีความสามารถในการแพร่ใกล้เคียงกับก๊าซ นอกจากนี้ยังมีค่าความหนืดที่เหมาะสม จึงเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ดี จากรูปที่ 1 แกนตั้งเป็นความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ในสเกลลอการิทึม แกนนอนเป็นอุณหภูมิ มีเฟสปรากฏทั้งหมด 7 เฟส เป็นเฟสเดี่ยว 4 เฟส คือ ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และเฟสของไหลวิกฤตยิ่งยวด และเป็นเฟสผสมอิมิตัว 3 เฟส คือ ของแข็งและก๊าซ ของแข็งและของเหลว และของเหลวและก๊าซ เฟสของไหลเหนือจุดวิกฤตยิ่งยวดที่อยู่ใกล้ ๆ กับจุดรวมสามนี้เองที่ถูกนำมาใช้ในการสกัดน้ำมันหอมระเหย

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สกัดได้ พบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง ปริมาณสารที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดขนาดของอนุภาคเป็นการลดระยะทางในการแพร่ ส่งผลให้สกัดได้น้ำมันในปริมาณที่มากขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์ถูกเลือกใช้เป็นตัวทำละลายเพราะมีความสามารถในการสกัดสูง เป็นก๊าซเฉื่อย ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ [2]

ความดัน (บาร์)



รูปที่ 1 แผนภาพเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์ (Phase diagram of Carbon dioxide: CO<sub>2</sub>) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้รู้เห็นในแบบฉบับนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีคุณสมบัติแบบก๊าซและของเหลวในตัวเดียวกัน เมื่อถูกนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารหรืออนุภาคในของแข็งในฐานะตัวถูกละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลวิกฤตยิ่งยวด และเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ทำให้เอนทัลปี (Enthalpy) ลดลงจนเกิดการละลายได้ดี ในขณะที่เดียวกันของไหลวิกฤตยิ่งยวดยังมีความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ใกล้เคียงกับก๊าซ ทำให้แพร่เข้าไปในโครงสร้างของของแข็งได้ดี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของไหลวิกฤตยิ่งยวด ก๊าซ และของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์ [1]

สถานะของคาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์		สารแนฟเธลีน ในคาร์บอนไดออกไซด์
	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ความหนืด (μPa.s)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (m <sup>2</sup> /s)
ก๊าซที่ 40 °C 1 bar	2	16	5.10×10 <sup>-6</sup>
ของไหลวิกฤตยิ่งยวดที่ 40 °C 100 bar	632	17	1.40×10 <sup>-8</sup>
ของเหลวที่ 27 °C 500 bar	1029	133	8.70×10 <sup>-9</sup>

ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ ของไหลวิกฤตยิ่งยวดจึงถูกใช้เป็นตัวสกัดของเหลวเพราะมีอัตราการถ่ายเทมวลเร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลาย (Solvent power) ดีกว่า จากการศึกษาเปรียบเทียบการสกัดระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของเหลว และคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด พบว่าเมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดจะได้อัตราการสกัดสูงกว่าประมาณ 2.5 เท่า [4]

2.1.1 คุณสมบัติของของไหลวิกฤตยิ่งยวดที่ส่งผลให้การสกัดเกิดขึ้นได้ดีกว่าตัวทำละลายของเหลวทั่วไป

#### 2.1.1.1 คุณสมบัติการถ่ายเท (Transportation Property)

การถ่ายเทที่ดีคือการที่วัตถุที่นำมาสกัดน้ำมันหอมระเหยสามารถแพร่กระจายออกจากบริเวณสกัดไปสู่บริเวณโดยรอบที่ไหลได้อย่างรวดเร็ว นั่นคือมีอัตราการถ่ายเทมวลสูง ดังนั้นตัวทำละลายที่มีคุณสมบัตินี้มีความหนืดต่ำ สัมประสิทธิ์การแพร่สูง และระยะห่างระหว่างอนุภาคของการแพร่ก็น้อย กล่าวคือ ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก ระยะทางในการแพร่ก็ลดลง ปริมาณสารที่สกัดได้ก็เพิ่มขึ้น ความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน การปรับอุณหภูมิและความดันให้เหมาะสมเป็นการปรับความหนืดให้ต่ำลง การสกัดมีจึงประสิทธิภาพสูงขึ้น คุณสมบัติแบบก๊าซนี้มีในของไหลวิกฤตยิ่งยวด

#### 2.1.1.2 คุณสมบัติในการละลายของตัวทำละลาย (Solvent power property)

ในการสกัดสามารถปรับอุณหภูมิ เพื่อกำหนดปริมาณการละลายของตัวถูกละลายได้ สำหรับของไหลวิกฤตยิ่งยวด การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้มีการละลายของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นของของไหลวิกฤตยิ่งยวดลดลง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของของไหลวิกฤตยิ่งยวดกับตัวถูกละลาย

เพิ่มขึ้น ทำให้โดยรวมแล้วการละลายของตัวถูกละลายมีค่าลดลง แต่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มความดันให้กับของไหลวิกฤตยิ่งยวดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นจนใกล้เคียงกับสถานะเริ่มต้น

### 2.1.1.3 คุณสมบัติในการเลือกสกัด (Selectivity property)

ในการสกัดสามารถปรับอุณหภูมิและความดันเพื่อให้มีความสามารถในการละลายที่เหมาะสมกับสารที่ต้องการและมีสารปนเปื้อนน้อย เช่น หากต้องการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากธรรมชาติ ตัวทำละลายที่มีคุณสมบัติในการแพร่เข้าถูกเลือกใช้ ตัวทำละลายจะถูกปรับให้อยู่ใกล้สถานะวิกฤตยิ่งยวด แต่ความดันไม่สูงมาก เช่น การสกัดน้ำมันหอมระเหยที่ความดัน 60 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หรือถูกปรับให้มีความดันสูงขึ้น เช่น ในการสกัดไข่ที่ความดัน และอุณหภูมิสูง เช่น ความดัน 100 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีคุณสมบัติในการเลือกสกัด สามารถใช้ในการสกัดลำดับส่วนได้ [1]

ต่างจากระบวนการสกัดแบบอื่น ๆ การสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ประหยัดตัวทำละลาย และใช้ได้ดีกับการสกัดสารที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ในที่นี้คาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดถูกเลือกใช้เป็นตัวทำละลายเพราะมีคุณสมบัติคล้ายก๊าซเฉื่อย ไม่ไวไฟ ง่ายต่อการจัดหา ไม่มีกลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ตกค้างในน้ำมันที่สกัดได้ เนื่องจากจะเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้องหลังการสกัด ยิ่งกว่านั้นอุณหภูมิวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องในเขตร้อนชื้น จึงไม่มีปัญหาการเปลี่ยนคุณสมบัติของสารที่สกัดได้อันเนื่องมาจากความร้อน

## 2.1.2 ผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลาการสกัดที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย

### 2.1.2.1 ผลของความดันเมื่ออุณหภูมิคงที่

ที่อุณหภูมิสูง เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้เพิ่มขึ้น เพราะความดันที่เพิ่มส่งผลให้อัตราการสกัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของตัวทำละลายเพิ่มขึ้นตามสมการสถานะแบบอัดตัวได้  $P = pZRT$ <sup>1</sup> ถ้าความดันสูงเกินไป ความหนาแน่นของตัวทำละลายจะเพิ่มขึ้น และทำให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้ลดลง เพราะความหนาแน่นของตัวทำละลายสูงทำให้ความสามารถในการทำละลายเพิ่มขึ้น แต่อันตรกิริยาระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่จึงลดลงด้วย นอกจากนี้ความดันที่สูงเกินความดันวิกฤตมาก ๆ ทำให้ตัวถูกละลายแน่นขึ้น และช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทมวลลดลง

อุณหภูมิต่ำทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จึงมีสภาพคล้ายความดันสูง ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ลดลง ดังนั้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยขึ้นกับค่าความหนาแน่นของตัวทำละลาย และอุณหภูมิในการสกัดที่พอเหมาะ

### 2.1.2.2 ผลของอุณหภูมิเมื่อความดันคงที่

ที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้ลดลงเพราะอุณหภูมิที่เพิ่มส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง

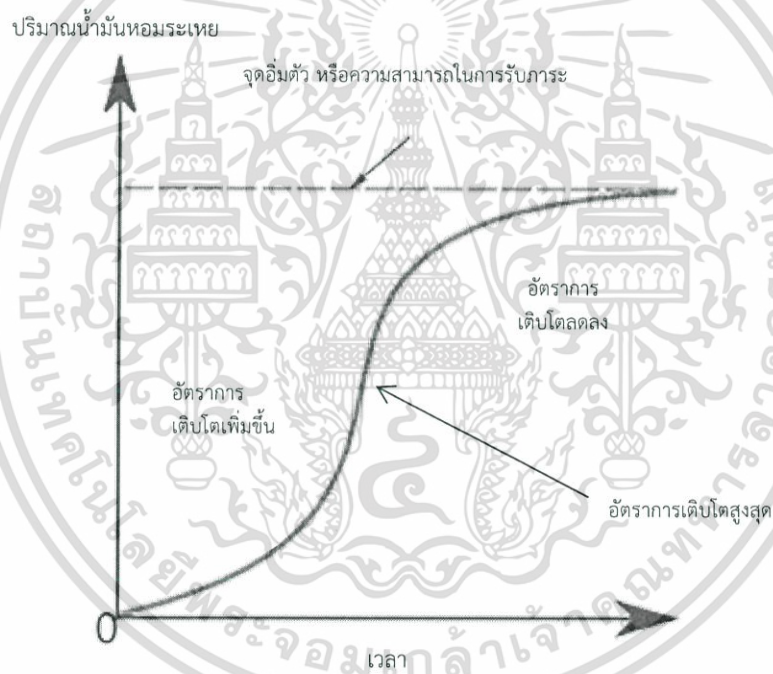
ที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง เพราะอุณหภูมิสูงทำให้อนุภาคของตัวทำละลายแพร่ได้ดีขึ้น

<sup>1</sup> เมื่อ  $P$  คือความดัน,  $p$  คือความหนาแน่น,  $Z$  คือตัวประกอบอัดตัวได้,  $R$  คือค่าคงที่ของก๊าซ และ  $T$  คืออุณหภูมิ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2.3 ผลของเวลาการสกัด

ช่วงแรกของการสกัด ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำมันหอมระเหยยังคงเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลง จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ เรียกว่า ค่าอิ่มตัว (Saturated value) หรือความสามารถในการรับภาระ (Carrying capacity) ซึ่งสอดคล้องกับโค้งโลจิสติกดังรูปที่ 2 แกนตั้งคือปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ แกนนอนคือเวลาที่ใช้ในการสกัด ในตอนแรกอัตราการสกัดต่ำแต่เติบโตคล้ายกับฟังก์ชันเลขชี้กำลัง เพราะตัวถูกละลายยังแพร่ได้โดยสะดวก เมื่อสกัดไปจนถึงเวลาหนึ่งจะถึงจุดที่มีอัตราการสกัดสูงสุด ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนเว้าของกราฟ หลังจากนั้น อัตราการสกัดจะลดลง เพราะการละลายเริ่มมีข้อจำกัด คือ ตัวทำละลายลดลง ตัวถูกละลายมากขึ้น อันตรกิริยาระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายจึงลดลง สุดท้ายอัตราการสกัดจะเป็นศูนย์ การละลายถึงค่าอิ่มตัว

ในธรรมชาติผิวมะกรูดมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยราวร้อยละ 4 [6] แต่การสกัดน้ำมันหอมระเหยจะไม่สามารถสกัดได้ถึงค่านี้



รูปที่ 2 โค้งโลจิสติกแสดงปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้เมื่อเวลาผ่านไป [5]

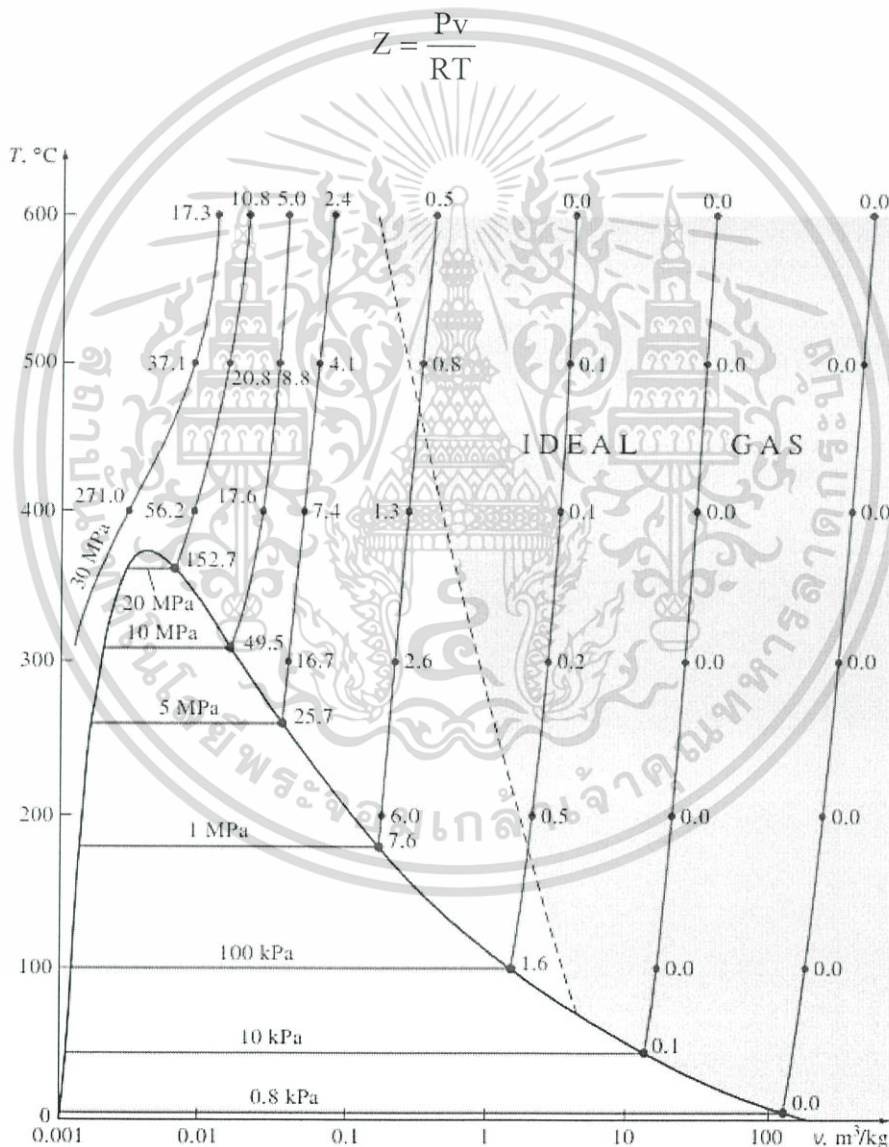
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบหม้อความดัน

### 2.2.1 การคำนวณหาปริมาตรหม้อความดัน

การคำนวณหาปริมาตรของหม้อความดันอ้างอิงจากทฤษฎีก๊าซจริงของอุณหพลศาสตร์ เนื่องจากในกระบวนการสกัด อาศัยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวด จึงไม่สามารถสมมติเป็นก๊าซอุดมคติได้ จากรูปที่ 3 บริเวณที่แรงถูกพิจารณาเป็นก๊าซอุดมคติ แกนตั้งเป็นอุณหภูมิของก๊าซ แกนนอนเป็นปริมาตรจำเพาะของก๊าซ บริเวณใกล้จุดวิกฤตเป็นบริเวณที่มีความดันและอุณหภูมิสูง สมการสถานะที่มีตัวประกอบอัดตัวได้จึงถูกเลือกใช้ในการวิเคราะห์ก๊าซจริง เนื่องจากสารที่อยู่ใกล้จุดวิกฤตมีพฤติกรรมต่างจากก๊าซอุดมคติ สมการก๊าซอุดมคติจึงถูกปรับแก้ด้วยตัวประกอบอัดตัวได้ (Compressibility factor: Z) ดังสมการต่อไปนี้ [7]

$$Z = \frac{Pv}{RT} \quad (1)$$



รูปที่ 3 ร้อยละความผิดพลาดเมื่อใช้สมการสถานะของก๊าซอุดมคติ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

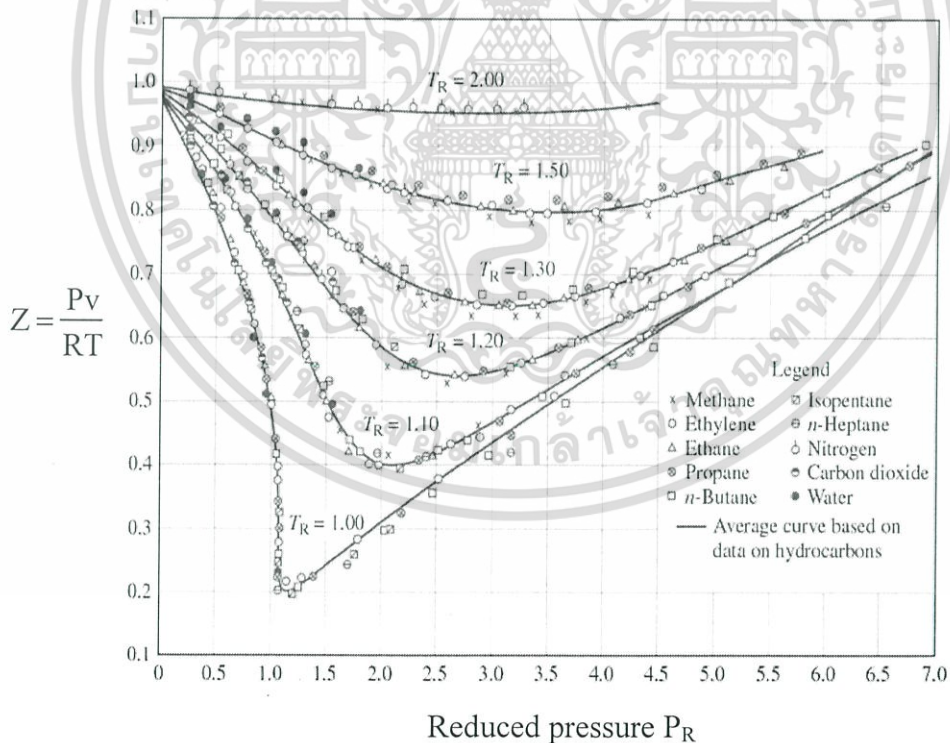
เมื่อ  $P$  = ความดัน  
 $v$  = ปริมาตรจำเพาะ  
 $R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ  
 $T$  = อุณหภูมิ

โดยที่  $Z$  เท่ากับ 1 เป็นก๊าซอุดมคติ ในขณะที่  $Z$  ไม่เท่ากับ 1 เป็นก๊าซจริง ตัวประกอบอัดตัวได้ของทุก ๆ ก๊าซจะเปลี่ยนไปตามความดันลดรูป (Reduced pressure,  $P_R$ ) และอุณหภูมิลดรูป (Reduced temperature,  $T_R$ ) ตามนิยามดังนี้

$$P_R = \frac{P}{P_{Cr}} \quad (2)$$

$$T_R = \frac{T}{T_{Cr}} \quad (3)$$

ตัวประกอบอัดตัวได้หาได้จากกราฟในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบอัดตัวได้ ความดันลดรูป และอุณหภูมิลดรูปซึ่งสามารถใช้ได้กับทุกก๊าซ



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงตัวประกอบของการอัดตัวของก๊าซ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาปริมาตรของหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันหอมระเหยจะใช้ทฤษฎีก๊าซจริงดังนี้

$$\frac{P_{\text{ext}} V_{\text{ext}}}{Z_{\text{ext}} T_{\text{ext}}} = \frac{P_{\text{sep}} (V_{\text{ext}} + V_{\text{sep}})}{Z_{\text{sep}} T_{\text{sep}}} \quad (4)$$

- เมื่อ  $P_{\text{ext}}$  คือ ความดันของหม้อสกัด  
 $P_{\text{sep}}$  คือ ความดันของหม้อดักจับน้ำมันหอมระเหย  
 $V_{\text{ext}}$  คือ ปริมาตรของหม้อสกัด  
 $V_{\text{sep}}$  คือ ปริมาณของหม้อดักจับน้ำมันหอมระเหย  
 $Z_{\text{sep}}$  คือ ตัวประกอบการอัดของหม้อดักจับน้ำมันหอมระเหย  
 $Z_{\text{ext}}$  คือ ตัวประกอบการอัดของหม้อสกัด  
 $T_{\text{sep}}$  คือ อุณหภูมิของหม้อดักจับน้ำมันหอมระเหย  
 $T_{\text{ext}}$  คือ อุณหภูมิของหม้อสกัด

ในการคำนวณหาปริมาตรของทรงกระบอก

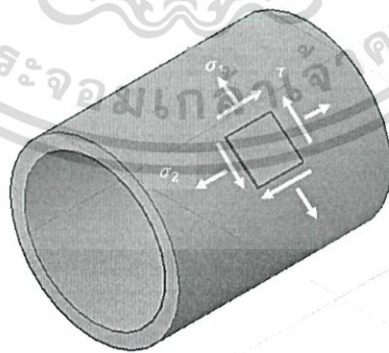
$$V = \pi r^2 h$$

(5)

- เมื่อ  $h$  คือ ความสูงของส่วนที่เป็นทรงกระบอก  
 $r$  คือ รัศมีของทรงกระบอก

### 2.2.2 การคำนวณหาความหนาของหม้อความดัน

เนื่องจากอัตราส่วนของรัศมีภายในกับความหนามากกว่า 10 การคำนวณหาความหนาของหม้อความดันต้องคำนึงถึงความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผนังโดยใช้ทฤษฎีความเค้นบนผนังบางดังนี้ [9]



รูปที่ 5 ความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำที่ผิวทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางของความเค้นรอบในแนวขวาง ความเค้นตามยาวในแนวยาว และความเค้นเฉือนที่กระทำต่อพื้นที่เล็ก ๆ บนผนังของหม้อทรงกระบอกแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งความเค้นรอบ และความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากัน

$$\sigma_1 = \frac{Pr}{2t} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{t} \quad (7)$$

$$\tau_{\max} = \frac{Pr}{2t} \quad (8)$$

เมื่อ  $\sigma_1$  คือ ความเค้นรอบ (Hoop stress) เป็นค่าความเค้นในแนวขวางของหม้อทรงกระบอก

$\sigma_2$  คือ ความเค้นตามยาว (Longitudinal stress) เป็นค่าความเค้นในแนวยาวของหม้อทรงกระบอก

$\tau$  คือ ค่าความเค้นเฉือน



รูปที่ 6 ความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำที่ผิวทรงกลม

ทิศทางของความเค้นรอบในแนวขวาง ความเค้นตามยาว และความเค้นเฉือนที่กระทำต่อพื้นที่เล็ก ๆ บนผนังของทรงกลมแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งความเค้นรอบ และความเค้นตามยาวมีค่าเท่ากัน

$$\sigma = \frac{Pr}{2t} \quad (9)$$

$$\tau_{\max} = \frac{Pr}{4t} \quad (10)$$

ความหนาที่เลือกใช้ต้องแข็งแรงเพียงพอเพื่อรับความเค้นทั้งสามแกนซึ่งตรวจสอบจากการหาตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor: N) ดังนี้ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

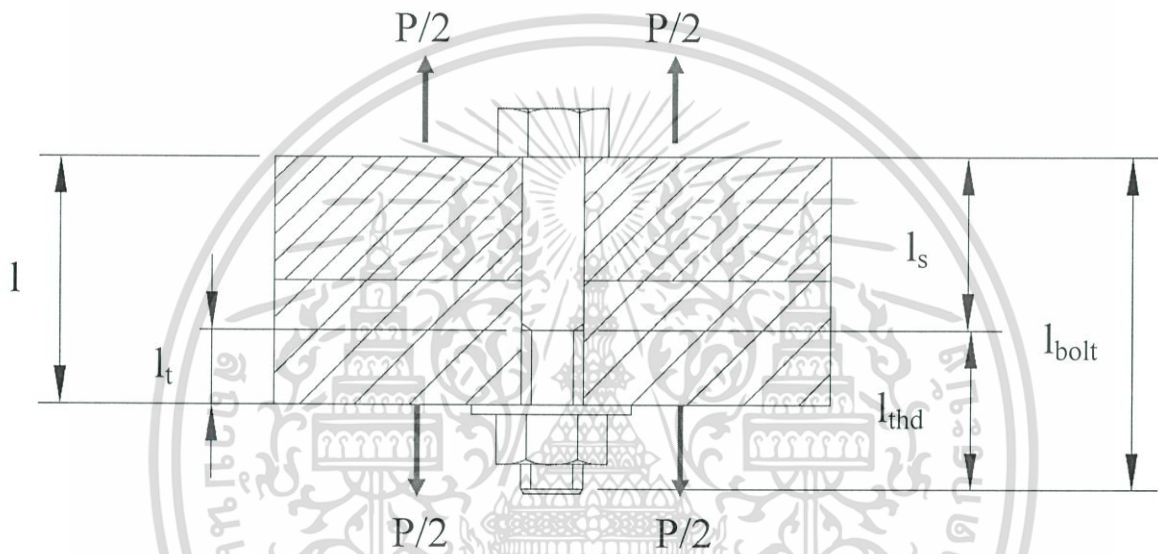
$$N = \frac{\text{theory value}}{\text{design value}}, \text{ เมื่อ } N > 1 \quad (11)$$

### 2.2.3 การคำนวณขนาดของโบลต์

ขนาดของโบลต์คำนวณได้จากทฤษฎีการรับภาระก่อนของฟาสเทนเนอร์ตัวยึดภายใต้การรับแรงแบบสถิตย์ (Preloaded fasteners in static loading)

#### 2.2.3.1 การรับภาระก่อนของตัวยึดภายใต้การรับแรงดึง (Preloaded fastener in tension)

โบลต์ และนัตถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงมากระทำดังรูป



รูปที่ 7 โบลต์ และนัตที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกันเมื่อมีแรงดึงอันเนื่องมาจากการขันโบลต์ และแรงเนื่องจากความดันภายในมากระทำ

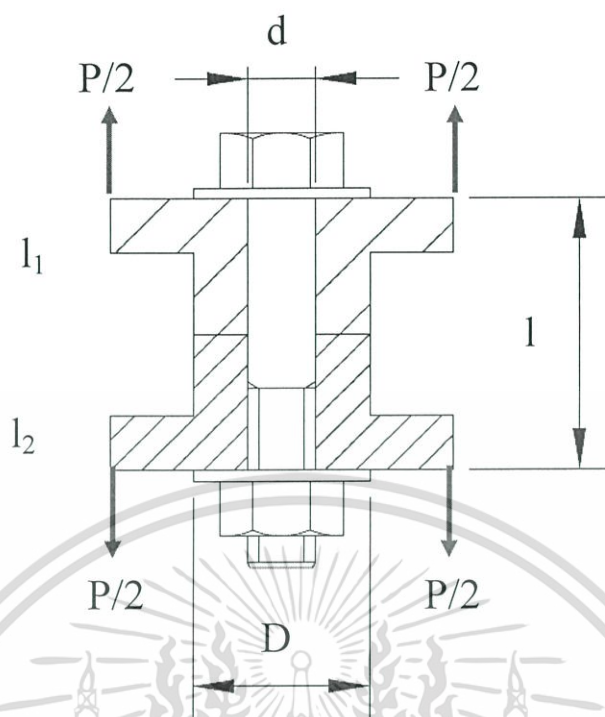
รูปที่ 7 เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาแรงที่กระทำต่อโบลต์ที่เกิดจากความดันภายในถัง และแรงดึงจากการขันโบลต์ มีการวิเคราะห์หาความยาวเกลียวในแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ความยาวของโบลต์ และตัวประกอบความปลอดภัย

ชิ้นงานที่รับแรงแบบสถิตถูกสมมติให้รับภาระก่อน (Preloaded) ร้อยละ 90 ของความเค้นพิสูจน์ได้ (Proof strength,  $S_p$ ) เมื่อความเค้นพิสูจน์ได้คือความเค้นที่โบลต์เริ่มเสียรูปอย่างถาวร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความแรงครากเล็กน้อย [10]

พิจารณารูปที่ 7 ความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (stiffness of material,  $k$ ) หาได้จาก

$$k = \frac{F}{\text{deflection}} = \frac{AE}{L} \quad (12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 โบลต์ และนัตที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงอันเนื่องมาจากการขันโบลต์ และแรงเนื่องจากความดันภายในมากกระทำ

รูปที่ 8 เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาแรงที่กระทำต่อโบลต์ที่เกิดจากความดันภายในถัง และแรงดึงจากการขันโบลต์ มีการวิเคราะห์หาพื้นที่รับแรงของแหวน ความหนาของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และตัวประกอบความปลอดภัย

สำหรับโบลต์ เส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  ความยาวของส่วนที่เป็นเกลียวที่รับแรงตามแนวแกน  $l_t$  และความยาวของชิ้นงานที่ประกอภกันทั้งหมดตั้งรูปที่ 8 ความต้านทานการเสียรูปของโบลต์ได้จาก

$$k_b = \left[ \frac{A_t A_b}{(A_b l_t + A_t l_s)} \right] E_b \quad (13)$$

เมื่อ  $k_b$  = ความต้านทานการเสียรูปของโบลต์

$A_t$  = พื้นที่หน้าตัดที่รับความเค้นดึงของโบลต์

$A_b$  = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

$$l_s = l - l_t \quad (14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวเกลียว  $l_{thd}$  ตามการใช้โบลต์มาตรฐานสหรัฐอเมริกาได้จาก

$$l_{thd} = 2d + 0.25 \quad (15)$$

ความต้านทานการเสีรูปของวัสดุได้จาก

$$\frac{1}{k_m} = \frac{l_1}{A_{m_1} E_1} + \frac{l_2}{A_{m_2} E_2} = \frac{4l_1}{\pi D_{eff_1}^2 E_1} + \frac{4l_2}{\pi D_{eff_2}^2 E_2} \quad (16)$$

เมื่อ  $A_m$  = พื้นที่ประสิทธิผลของวัสดุที่ถูกเชื่อมต่อกัน (Effective areas of the clamped materials)

$D_{eff}$  = เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของวัสดุที่ถูกเชื่อมต่อกัน (Effective diameters of clamped materials)

ถ้าชิ้นงานประกอบเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

$$k_m = \frac{\pi D_{eff}^2 E_m}{4l} \quad (17)$$

$$k_m = \frac{A_m E_m}{l} \quad (18)$$

2.2.3.2 การรับภาระก่อนของโบลต์ภายใต้การรับแรงกระทำแบบสถิตย์ (Preloaded bolts under static loading)

กำหนดให้  $P$  เป็นแรงภายนอกที่มากระทำที่ข้อต่อ  $P_m$  เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน และ  $P_b$  เป็นแรงกระทำที่โบลต์ ได้สมการสมดุลของแรงดังนี้

$$P = P_m + P_b \quad (19)$$

หาแรงกดที่กระทำกับวัสดุ ( $F_m$ ) และแรงดึงที่กระทำโบลต์ ( $F_b$ ) จาก

$$F_m = F_i + P_m \quad (20)$$

$$F_b = F_i + P_b \quad (21)$$

เมื่อ  $F_i$  = ภาระรับก่อน

$$F_i = 0.9S_p A_t, \text{ สำหรับแรงสถิตย์} \quad (22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_m$  และ  $P_b$  หาได้จาก

$$P_b = CP \quad (23)$$

$$P_m = (1 - C)P \quad (24)$$

เมื่อ  $C$  = ค่าคงที่ข้อต่อ (Joint constant) โดยทั่วไปน้อยกว่า 1

$$C = \frac{K_b}{K_m + K_b} \quad (25)$$

ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์ ( $N_y$ ) หาได้จาก

$$N_y = \frac{S_y}{\sigma_b} \quad (26)$$

เมื่อ  $S_y$  คือ ความแรงครากของโบลต์

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t} \quad (27)$$

ตัวประกอบความปลอดภัยที่ด้านการแยกกันของวัสดุ ( $N_{\text{separation}}$ ) หาจาก

$$N_{\text{separation}} = \frac{P_o}{p} \quad (28)$$

เมื่อ  $P_o$  คือ แรงที่ทำให้วัสดุเริ่มแยกจากกัน ซึ่งหาได้จาก

$$P_o = \frac{F_i}{(1 - C)} \quad (29)$$

ในการวิเคราะห์จะให้ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์ และตัวประกอบความปลอดภัยที่ด้านการแยกกันของวัสดุมีค่ามากกว่าหนึ่ง [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การเลือกใช้ออร์ริง

ออร์ริงภายใต้การรับแรงสถิตย์ขนาดความแข็ง 70 ชอร์ 90 ชอร์\* เป็นออร์ริงใช้ในงานในการซีลข้อต่อ หรือจุดต่อต่าง ๆ ในเครื่องจักร หรืออุปกรณ์อย่างอื่น ภายใต้แรงดันสูงกว่าออร์ริงปกติทั่วไป โดยที่ในการทำงานของออร์ริงนั้นไม่มีส่วนที่สัมพันธ์กับส่วนที่เคลื่อนที่ ในการใช้งานออร์ริงนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือแรงดัน และอุณหภูมิ ของจุดที่ใช้งานเพื่อที่จะสามารถเลือกค่าความแข็ง และวัสดุที่ใช้ทำออร์ริงได้ถูกต้องตามตารางที่ 2

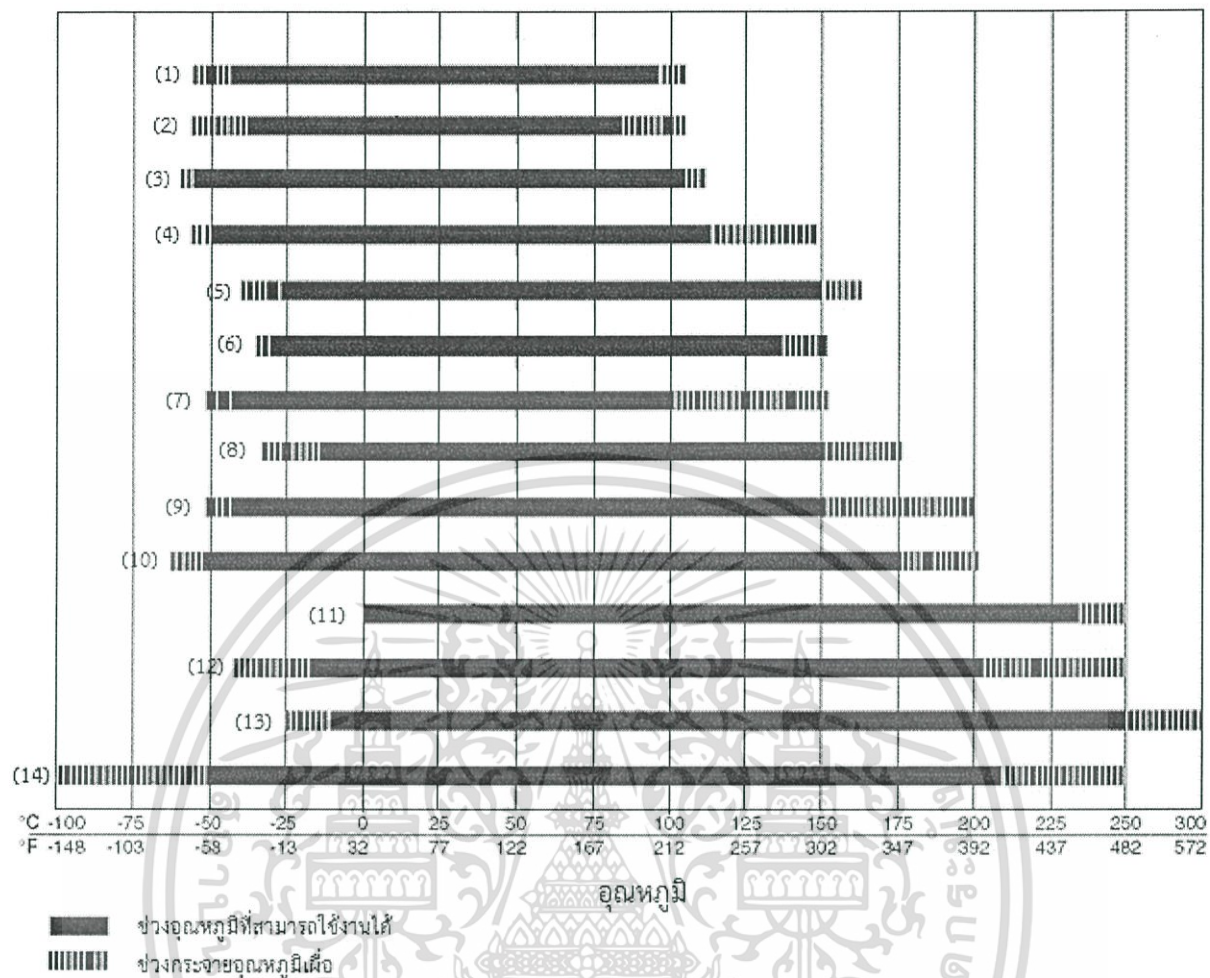
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆที่ใช้ทำออร์ริง [11]

วัสดุที่ใช้ทำออร์ริง	อุณหภูมิที่ใช้งานสูงสุด (Degree Celsius)	ค่าความแข็ง (Shore)	ความต้านทานต่อแรงดึง	เหมาะสำหรับใช้กับ
ยางสังเคราะห์ บลูนา - เอ็น เอ็นอาร์ บี	105	40-95	ดี	น้ำมันเกือบทุกชนิด เช่น น้ำมันไฮดรอลิก ยกเว้นน้ำมันเชื้อเพลิง
นีโอพรีน	105	20-90	ดี	ต่าง กรด น้ำมันหล่อลื่น
ยูรีเทน	70	50-90	ดีมาก	น้ำมันทุกชนิด
ซิลิโคน	230	10-90	ไม่ดี	น้ำมันทุกชนิดยกเว้นน้ำมันเชื้อเพลิงต่าง กรด
ฟูออโรซิลิโคน	205	40-80	ไม่ดี	น้ำ กรด
ฟูออโรอีลาสโตเมอร์	230	60-90	ดี	ใช้ได้กับของไหลเกือบทุกชนิด ยกเว้นสารเคมีประเภท คีโตน และพอลิเอทิลีนที่ใช้น้ำมันที่มีคุณสมบัติเป็นต่าง

\* ชอร์ (Shore) เป็นการบอกถึงประเภทการใช้งาน คือ 70 ชอร์ ใช้สำหรับงานทั่วไป ส่วน 90 ชอร์ ใช้สำหรับงานที่ความดันมากกว่า 100 บาร์ [12]

จากรูปที่ 9 แสดงถึงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม และช่วงกระจายอุณหภูมิเพื่อ สำหรับการเลือกใช้งานออร์ริงแต่ละวัสดุ โดยมีวัสดุดังต่อไปนี้ (1) ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (2) ยางโพลียูรีเทน (3) ยางบิวทิล (4) ยางไนไตรล์ที่อุณหภูมิต่ำ (5) ยางไฮโดรเจนไนไตรล์ (6) ยางไนไตรล์ที่อุณหภูมิสูง (7) ยางครอโรพรีน (8) ยางโพลีเอทิลีน (9) ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (10) ยางฟลูออโรซิลิโคน (11) ยางโพรพิลีน (12) ยางฟลูออโรคาร์บอน (13) ฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (14) ยางซิลิโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดในการใช้งานของโอริงที่ทำมาจากวัสดุต่าง ๆ [11]

### 2.3.1 การบอกขนาดของโอริง

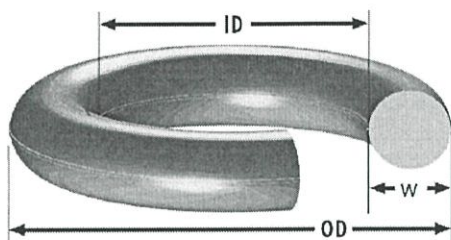
การบอกขนาดของโอริงนิยมบอกขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ID) และความหนา (W) หรือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวโอริง เช่น โอริงขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร หนา 5.3 มิลลิเมตร ถูกเรียกว่า โอริงขนาด 40x5.3 มิลลิเมตร การบอกขนาดของโอริงมีหลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานอเมริกา (AS568 A) และมาตรฐานญี่ปุ่น (JIS2401)

### 2.3.2 การหามิติต่าง ๆ ของโอริง

$$ID = OD - 2W \quad (30)$$

$$W = \frac{OD - ID}{2} \quad (31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แสดงขนาดของตัวแปรที่ใช้กับสมการคำนวณโอรังข้างต้น [11]

รูปที่ 10 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของโอรัง (ID) เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของโอรัง (OD) และความหนาของโอรัง (W)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 การคำนวณหาปริมาตรของหม้อความดัน

การคำนวณหาปริมาตรของหม้อความดันคำนึงถึงสถานะที่คาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนจากของไหลวิกฤตยิ่งยวดเป็นก๊าซ เพื่อให้เกิดการแยกตัวระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำมันหอมระเหย กำหนดให้สถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ในหม้อสกัดเป็น 120 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเลือกสถานะของคาร์บอนไดออกไซด์ในหม้อสกัดและหม้อแยกเป็น 30 บาร์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส คำนวณปริมาตรของหม้อแยกจากสมการ (4) ได้ 1930 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากการออกแบบหม้อความดันใช้ตารางมาตรฐานท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อเลือกขนาดของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน [13]

NPS	Outside Diameter (mm)	Nominal wall thickness											
		Schedule 5s			Schedule 10s			Schedule 40s			Schedule 80s		
		weight (kg/m)	Type	Wall Thickness (mm)	weight (kg/m)	Type	Wall Thickness (mm)	weight (kg/m)	Type	Wall Thickness (mm)	weight (kg/m)	Type	
1/8	10.29				1.24	0.28	0.28	1.73	0.37	0.37	2.41	0.47	0.48
1/4	13.72				1.65	0.5	0.5	2.24	0.64	0.61	3.02	0.8	0.81
3/8	17.15				1.65	0.64	0.64	2.31	0.85	0.86	3.2	1.11	1.12
1/2	21.34	1.65	0.81	0.81	2.11	1.01	1.02	2.77	1.28	1.29	3.73	1.64	1.65
3/4	26.67	1.65	1.03	1.03	2.11	1.27	1.3	2.87	1.7	1.71	3.91	2.22	2.23
1"	33.40	1.65	1.31	1.31	2.77	2.11	2.13	3.38	2.53	2.54	4.55	3.27	3.29
1 1/4	42.16	1.65	1.67	1.68	2.77	2.72	2.74	3.56	3.42	3.45	4.85	4.51	4.45
1 1/2	48.26	1.65	1.92	1.93	2.77	3.14	3.16	3.68	1.09	4.11	5.08	5.46	5.5
2"	60.33	1.65	2.41	2.43	2.77	3.97	4	3.91	5.5	5.53	5.54	7.56	7.61
2 1/2	73.03	2.11	3.75	3.75	3.05	5.32	5.35	5.16	8.72	8.78	7.01	11.5	11.6
3"	88.90	2.11	4.59	4.59	3.05	6.52	6.56	5.49	11.4	11.48	7.62	15.4	15.5
3 1/2	101.60	2.11	5.26	5.26	3.05	7.49	7.54	5.74	13.7	13.8	8.08	18.8	18.9
4"	114.30	2.11	5.94	5.94	3.05	8.45	8.51	6.02	16.2	16.3	8.56	22.5	22.7
5"	141.30	2.77	9.62	9.62	3.4	11.7	11.8	6.55	22	22.1	9.52	31.3	31.5
6"	168.28	2.77	11.4	11.5	3.4	14	11.05	7.11	28.5	28.7	10.37	43	43.3
8"	219.08	2.77	15	15	3.76	20.2	20.3	8.18	43	43.2	12.7	65.3	65.7
10"	273.05	3.4	22.98	23	4.19	28.1	82.2	9.27	60.9	61.3	12.7	82.4	82.9
12"	323.85	3.96	31.75	31.8	4.57	36.3	36.6	9.52	74.5	75	12.7	98.4	99.1
14"	355.60	3.96	34.7	34.9	4.78	41.8	42						
16"	406.40	4.19	42	42.2	4.78	47.8	48.1						
18"	457.20	4.19	47.3	47.6	4.78	53.9	54.2						
20"	508.00	4.78	59.9	60.3	5.54	69.3	69.8						
22"	558.80	4.78	66	66.4	5.54	76.4	76.8						
24"	609.60	5.54	83.4	83.9	6.35	95.4	96						
30"	762.00	6.35	119.5	120.3	7.92	148.8	149.7						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน = 10.7 cm  
 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก = 11.5 cm  
 กำหนดให้ ปริมาตรของส่วนโค้งที่กั้นหม้อ ( $V_{cap}$ ) = 176 cm<sup>3</sup>  
 ดังนั้น ปริมาตรส่วนที่เหลือของหม้อ ( $V$ ) = 1750 cm<sup>3</sup>  
 คำนวณหาความสูงของหม้อ ( $h$ ) ส่วนที่เป็นทรงกระบอกจากสมการ (5)  
 จะได้  $h = 19.5$  cm

## 3.2 คำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัย

### 3.2.1 ทรงกระบอก

ความแรงคราก ( $\sigma_y$ ) ของหม้อซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม SS 304 มีค่า 215 เมกะปาสกาล และความเค้นที่ผนังหนาของทรงกระบอกที่เกิดขึ้นสองทิศทาง คือ ความเค้นตามยาว และความเค้นตามแนวรัศมี

3.2.2.1 ความเค้นตามยาวใช้สมการที่ (6) ในการคำนวณ

ความเค้นตามยาว ( $\sigma_1$ ) = 27.1 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัย (S.F) = 7.93

3.2.2.2 ความเค้นตามแนวรัศมีใช้สมการที่ (7) ในการคำนวณ

ความเค้นตามแนวรัศมี ( $\sigma_2$ ) = 54.2 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัย (S.F) = 3.98

### 3.2.2 ทรงกลม

ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผนังทรงกลมแต่ละทิศทางจะมีค่าเท่ากัน และใช้สมการที่ (9) ในการคำนวณ

ความเค้นที่เกิดขึ้น = 27.1 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัย (S.F.) = 7.93

### 3.2.3 คำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์

หลังการออกแบบเมื่อทราบความยาวของโบลต์ ความหนาของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และคุณสมบัติของวัสดุแล้ว คำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์ด้วยสมการ (12) ถึง (26)

ความแรงคราก = 634 เมกะปาสกาล

ความเค้นดึงสูงสุด = 533 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัย (S.F) = 1.19

### 3.2.4 คำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัยที่เกิดจากการแยกตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

คำนวณหาแรงที่ทำให้วัสดุแยกจากกัน และแรงเริ่มต้นกระทำกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วใช้สมการ (28) และ (29) เพื่อคำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัย

ตัวประกอบความปลอดภัย (S.F.) = 7.49

### 3.3 การออกแบบหม้อความดันโดยการคำนวณโดยละเอียด

#### 3.3.1 คำนวณหาปริมาตรของหม้อความดัน

$P_{ext}$ คือ ความดันภายในหม้อสกัด	120	bar
$V_{ext}$ คือ ปริมาตรภายในหม้อสกัด	288	cm <sup>3</sup>
$T_{ext}$ คือ อุณหภูมิภายในหม้อสกัด	60	°C
$Z_{ext}$ คือ ตัวประกอบของการอัดของหม้อสกัด	0.41	
$P_{sep}$ คือ ความดันภายในหม้อแยก	30	bar
$T_{sep}$ คือ อุณหภูมิภายในหม้อแยก	30	°C
$Z_{sep}$ คือ ตัวประกอบของการอัดของหม้อแยก	0.89	

แทนค่าลงในสมการ (4)

$$\frac{P_{ext} V_{ext}}{Z_{ext} T_{ext}} = \frac{P_{sep} (V_{ext} + V_{sep})}{Z_{sep} T_{sep}}$$

จะได้

$$V_{sep} = \frac{(120)(288 \times 0.89)(30 + 273)}{(30)(0.41) \times (60 + 273)}$$

ดังนั้น

$$V_{sep} = 1930 \text{ cm}^3$$

#### 3.3.2 คำนวณความเค้นตามยาว

จากตารางที่ 3 เลือกขนาดท่อมาตรฐาน 40s 4 นิ้ว มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 11.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.7 เซนติเมตร และมีความหนาของผนังท่อ 0.4 เซนติเมตร ปริมาตรของส่วนโค้งด้านล่างเป็น  $1.76 \times 10^2$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นปริมาตรของส่วนที่เป็นทรงกระบอกคือ 1750 ลูกบาศก์เซนติเมตร ได้ความยาวของทรงกระบอก 20 เซนติเมตร

$P$ คือ ความดันภายในหม้อแยก	30	bar
$t$ คือ ความหนาของท่อ	0.4	cm
$r$ คือ รัศมีภายในของหม้อแยก	5.35	cm

##### 3.3.2.1 ทรงกระบอก

###### 1 ความเค้นตามยาว

แทนค่าลงในสมการ (6)

$$\sigma = \frac{Pr}{2t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\sigma_1 = \frac{(30)(5.35)}{(2)(0.4)}$$

ดังนั้น

$$\sigma_1 = 20.3 \text{ MPa}$$

## 2 ความเค้นตามแนวรัศมี

แทนค่าลงในสมการ (7)

จะได้

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{t}$$

$$\sigma_2 = \frac{(30)(5.35)}{(0.4)}$$

ดังนั้น

$$\sigma_2 = 40.6 \text{ MPa}$$

## 3 ความเค้นเฉือน

แทนค่าลงในสมการ (8)

$$\tau_{\max} = \frac{Pr}{2t}$$

จะได้

$$\tau_{\max} = \frac{(30)(5.35)}{(2)(0.4)}$$

ดังนั้น

$$\tau_{\max} = 20.3 \text{ MPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.2 ทรงกลม

#### 1 ความเค้นสูงสุด

แทนค่าลงในสมการ (9)

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{Pr}{2t} = \sigma$$

จะได้

$$\sigma = \frac{(30)(5.35)}{(2)(0.4)}$$

ดังนั้น

$$\sigma = 20.3 \text{ MPa}$$

#### 2 ความเค้นเฉือน

แทนค่าลงในสมการ (10)

$$\tau_{\max} = \frac{Pr}{4t}$$

จะได้

$$\tau_{\max} = \frac{(30)(5.35)}{(4)(0.4)}$$

ดังนั้น

$$\tau_{\max} = 10.2 \text{ MPa}$$

### 3.3.3 การคำนวณโบลต์

#### 3.3.3.1 คำนวณหาแรงกระทำ และตัวประกอบความปลอดภัย

จากตารางมาตรฐานของโบลต์ (Robert L. Norton: Machine Design an integrated approach หน้า 892) เลือกโบลต์ที่ขนาด 7/16 เกสียวละเอียด จำนวน 6 ตัวในการรับแรง และได้แรงที่กระทำต่อโบลต์ ต่อ 1 ตัว คือ  $1.01 \times 10^3$  ปอนด์

$S_p$ คือ ความเค้นพิสูจน์	$8.50 \times 10^3$ psi
$A_t$ คือ พื้นที่หน้าตัดของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียว	$0.118 \text{ in}^2$
$l_{hd}$ คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียว	1.50 in
$l_{bolt}$ คือ ความยาวของโบลต์	1.50 in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A_b$ คือ พื้นที่หน้าตัดสูงสุดของโบลต์	0.150 in <sup>2</sup>
$E_b$ คือ ค่าโมดูลัสสภาพยืดหยุ่นของโบลต์	$3.00 \times 10^6$ psi
$P$ คือ แรงที่กระทำต่อโบลต์ 1 ตัว	$1.01 \times 10^3$ lb
$S_y$ คือ ความต้านทานที่จุดครากสูงสุด	$9.20 \times 10^3$ psi
$l_s$ คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่ไม่เป็นเกลียว	0.00 in
$l_t$ คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียวในแผ่นวัสดุ	0.728 in
$E_m$ คือ ค่าโมดูลัสสภาพยืดหยุ่นของเหล็กกล้าไร้สนิม	$27.5 \times 10^6$ psi

### 1 หาแรงเริ่มต้นมากที่สุดในการขันโบลต์

แทนค่าลงในสมการ

จะได้

$$F_i = 0.9 S_p A_t$$

ดังนั้น

$$F_i = (0.9)(8500)(0.118)$$

$$F_i = 9.08 \times 10^3 \text{ lb} \approx 40 \text{ kN}$$

### 2 หาค่าคงที่ความแข็งของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

แทนค่าลงในสมการ (17)

$$K_m = \frac{\pi D^2 \text{eff} E_m}{4l}$$

จะได้

$$K_m = \frac{(3.14)(0.9^2 + 0.437^2)(27.5 \times 10^6)}{(4)(0.782)}$$

ดังนั้น

$$K_m = 2.05 \times 10^7$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3 หาค่าคงที่ความแข็งของโบลต์

แทนค่าลงในสมการ (13)

$$K_b = \left[ \frac{A_t A_b}{(A_b l_t + A_t l_s)} \right] E_b$$

จะได้

$$K_b = \left[ \frac{(0.118)(0.15)}{(0.15)(0.782) + (0.118)(0)} \right] (30 \times 10^6)$$

ดังนั้น

$$K_b = 4.89 \times 10^6$$

### 4 หาค่าคงที่ของจุดเชื่อมต่อ

แทนค่าลงในสมการ (25)

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m}$$

จะได้

$$C = \frac{4.89 \times 10^6}{2.05 \times 10^7 + 4.89 \times 10^6}$$

ดังนั้น

$$C = 0.192$$

### 5 หาแรงที่กระทำกับโบลต์เนื่องจากความดันในหม้อ

แทนค่าลงในสมการ (23)

$$P_b = CP$$

จะได้

$$P_b = (0.192)(1.00 \times 10^4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$P_b = 194 \text{ lb} = 854 \text{ kN}$$

### 7 หาแรงที่กระทำกับเหล็กกล้าไร้สนิมเนื่องจากความดันในหม้อ

แทนค่าลงในสมการ (24)

$$P_m = (1 - C)P$$

จะได้

$$P_m = (1 - 0.192)(1.00 \times 10^4)$$

ดังนั้น

$$P_m = 816 \text{ lb} = 3.60 \text{ kN}$$

### 8 หาแรงทั้งหมดที่กระทำกับโบลต์

แทนค่าลงในสมการ (21)

$$F_b = F_i + P_b$$

จะได้

$$F_b = 9.08 \times 10^3 + 1.94 \times 10^2$$

ดังนั้น

$$F_b = 9.21 \times 10^3 \text{ lb} = 40.5 \text{ kN}$$

### 9 แรงทั้งหมดที่กระทำกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

แทนค่าลงในสมการ (20)

$$F_m = F_i - P_b$$

จะได้

$$F_m = 9.08 \times 10^3 - 1.94 \times 10^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$F_m = 8.26 \times 10^3 \text{ lb} = 36.3 \text{ kN}$$

### 10 หาค่าความเค้นดึงสูงสุดที่กระทำกับโบลต์

แทนค่าลงในสมการ (27)

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t}$$

จะได้

$$\sigma_b = \frac{9.21 \times 10^3}{0.118}$$

ดังนั้น

$$\sigma_b = 7.81 \times 10^4 \text{ lb} = 344 \text{ kN}$$

### 11 หาดั้วประกอบความปลอดภัยของโบลต์

แทนค่าลงในสมการ (26)

$$N_y = \frac{S_y}{\sigma_b}$$

จะได้

$$N_y = \frac{9.20 \times 10^4}{7.81 \times 10^4}$$

ดังนั้น

$$N_y = 1.17$$

### 12 แรงน้อยที่สุดที่ทำให้แผ่นเสถียรด้านบนเคลื่อนออกจากแผ่นด้านล่าง

แทนค่าลงในสมการ (29)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$P_o = \frac{9.08 \times 10^3}{(1 - 0.192)}$$

ดังนั้น

$$P_o = 1.12 \times 10^4 \text{ lb} = 49.3 \text{ kN}$$

13 หาตัวประกอบความปลอดภัยของการต่อต้านการแยกกันระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมบน และแผ่นด้านล่าง

แทนค่าลงในสมการ (28)

จะได้

$$N_{\text{separation}} = \frac{P_o}{p}$$

ดังนั้น

$$N_{\text{separation}} = \frac{1.12 \times 10^4}{1.01 \times 10^3}$$

$$N_{\text{separation}} = 11.1$$

### 3.4 การคำนวณ และเลือกชนิดของโอริง

ความดันหม้อคอนข้างสูงจึงเลือกใช้โอริงที่สามารถทนความดันสูงได้จากตารางที่ 4 เลือกโอริงที่มีความแข็ง 90 ชอร์ และใช้สมการที่ (30) และ(31) ในการคำนวณหาขนาดของโอริง และได้รับรัศมีภายนอก 129 มิลลิเมตร และกว้าง 3 มิลลิเมตร [11]

### 3.5 ออกแบบการทดลอง

ทำการทดลองเพื่อสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด และแยกน้ำมันหอมระเหยส่วนที่ติดมากับคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของไหลวิกฤตยิ่งยวดจากหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย โดยทำที่อุณหภูมิ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส ความดัน 80 ถึง 120 บาร์ และเวลาการสกัด 1 ชั่วโมง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุดของผิวมะกรูด แล้วทำการทดลองที่ความดัน อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสกัด เพื่อหาเวลาในการสกัดที่ได้ปริมาณหอมระเหยมากที่สุดใช้เวลา 30 ถึง 90 นาที จากนั้นใช้โคงโลจิสติกเพื่อหาจุดอิ่มตัวของปริมาณน้ำมันหอมระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ขั้นตอนการสกัด

- (1) เตรียมผิวมะกรูด
- (2) นำผิวมะกรูดไปชั่งน้ำหนักตามปริมาณที่ต้องการ
- (3) ใส่วัตถุดิบดังกล่าวไว้ในตะแกรงตะขायแล้วนำไปใส่ในหม้อสกัด
- (4) ปิดหม้อสกัด แล้วจัดอุปกรณ์ในการทดลองให้เรียบร้อย
- (5) ตั้งค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลตามที่กำหนดไว้ แล้วอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในหม้อสกัด โดยทำการอัดกระบอกสูบจนกว่าจะได้รับความดันตามที่กำหนดไว้เช่นกัน
- (6) ทิ้งไว้เป็นเวลาตามที่กำหนดไว้ในการทดลอง
- (7) เมื่อถึงเวลาจึงเปิดวาล์วปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากหม้อสกัด เข้าสู่หม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย
- (8) ปล่อยทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนดไว้ แล้วเปิดวาล์วเพื่อปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย
- (9) เก็บน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากหม้อสกัด และที่ได้จากหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย ใส่ภาชนะเก็บน้ำมันหอมระเหยแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- (10) บันทึกผลการทดลองแต่ละครั้ง อันได้แก่ น้ำหนักของวัตถุดิบก่อนทำการทดลอง น้ำหนักของวัตถุดิบหลังทำการทดลอง อุณหภูมิ ความดัน เวลาที่ใช้ในการอัด น้ำหนักของน้ำมันหอมระเหยจากหม้อสกัด และจากหม้อความดันสำหรับรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย ระยะเวลาในการพักเพื่อรอกการแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย และความดันที่จุดสมดุลเพื่อนำไปวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลองต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด

ในช่วงความดัน 80 ถึง 120 บาร์ อุณหภูมิ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

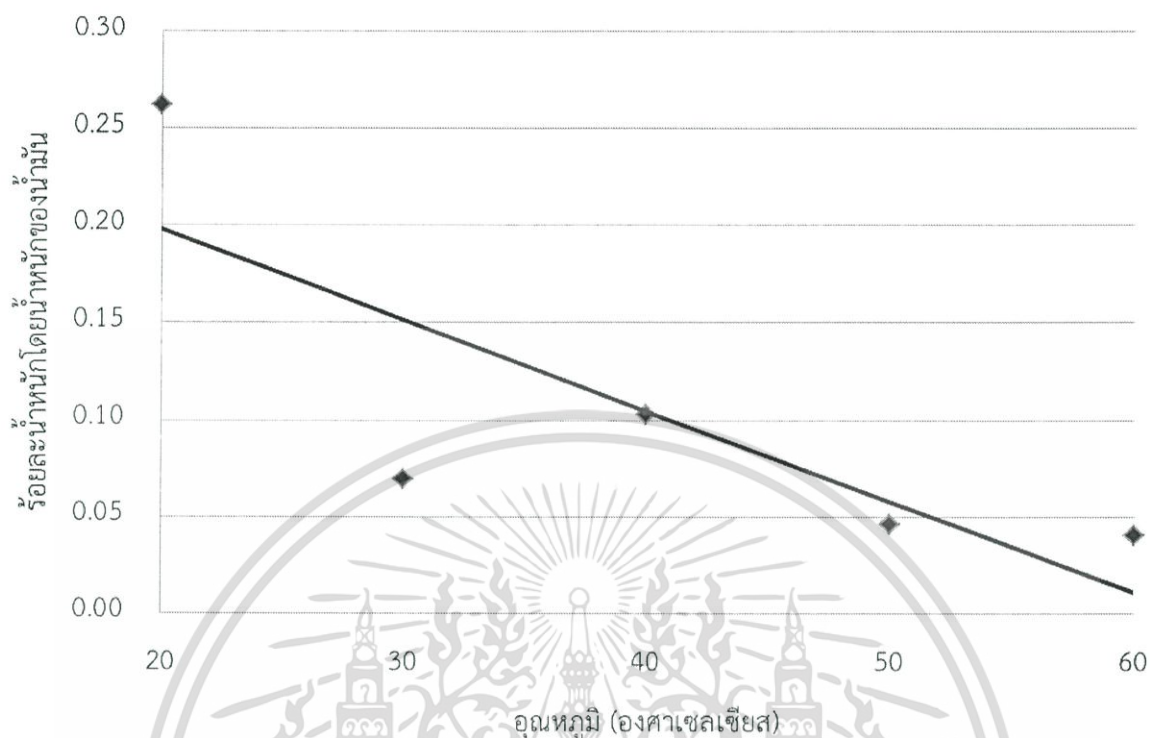
##### 4.1.1 ที่ความดัน 80 บาร์

จากตาราง 4 หาความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด พบว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่สูงสุดของหม้อสกัด และของทั้งหมด เกิดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.262 และร้อยละ 0.264 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิการสกัด 50 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.08 โดยมวล ในขณะที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่น้อยที่สุดจากหม้อสกัด และโดยรวมเกิดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.04 และร้อยละ 0.056 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.002 โดยมวล ซึ่งแสดงว่า ที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิต่ำ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด และโดยรวม มากกว่าที่อุณหภูมิสูง แต่สำหรับหม้อแยก เมื่ออุณหภูมิต่ำปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูด น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 80 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนัก โดยน้ำหนักของ น้ำมันจาก หม้อสกัด	ร้อยละน้ำหนัก โดยน้ำหนักของ น้ำมันจาก หม้อแยก	ร้อยละน้ำหนัก โดยน้ำหนักของ น้ำมันรวม
20	50.293	45.951	0.262	0.002	0.264
30	50.356	46.464	0.070	0.020	0.089
40	50.653	46.576	0.103	0.004	0.107
50	50.022	46.130	0.046	0.080	0.126
60	49.651	47.052	0.040	0.016	0.056

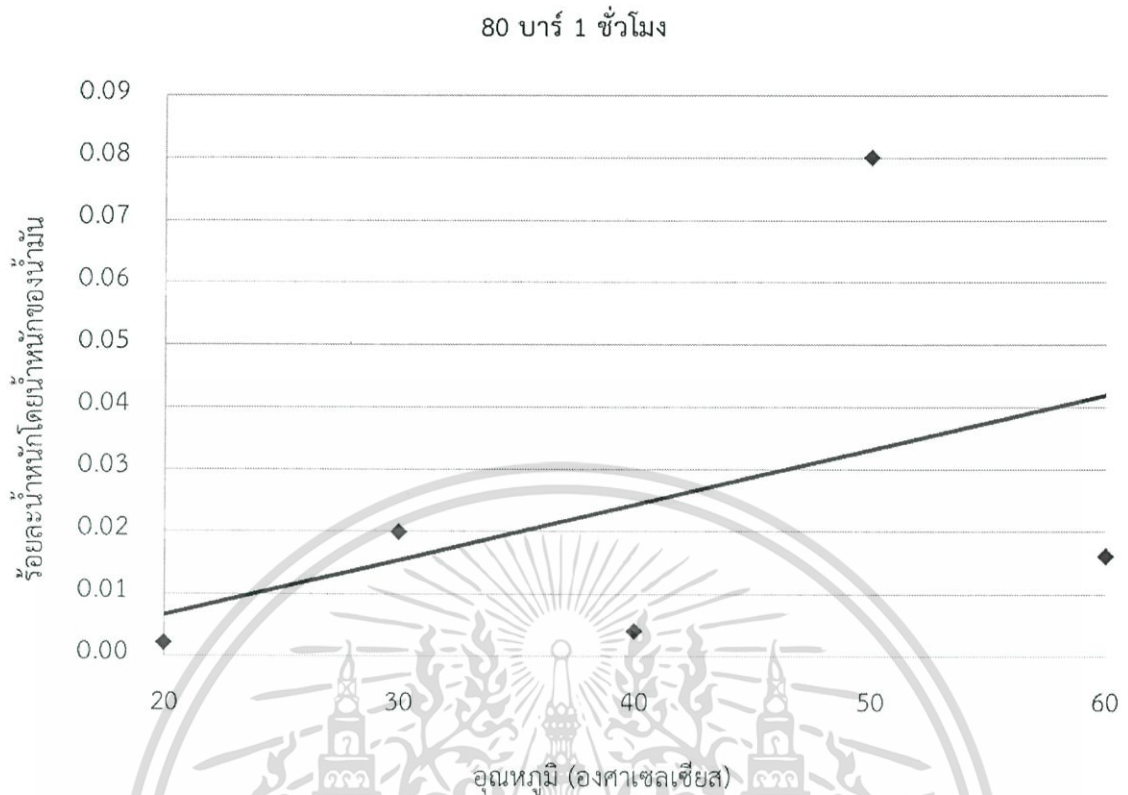
80 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 80 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 11 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.262 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.04 เนื่องจากที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ตามสมการ  $P = \rho ZRT$

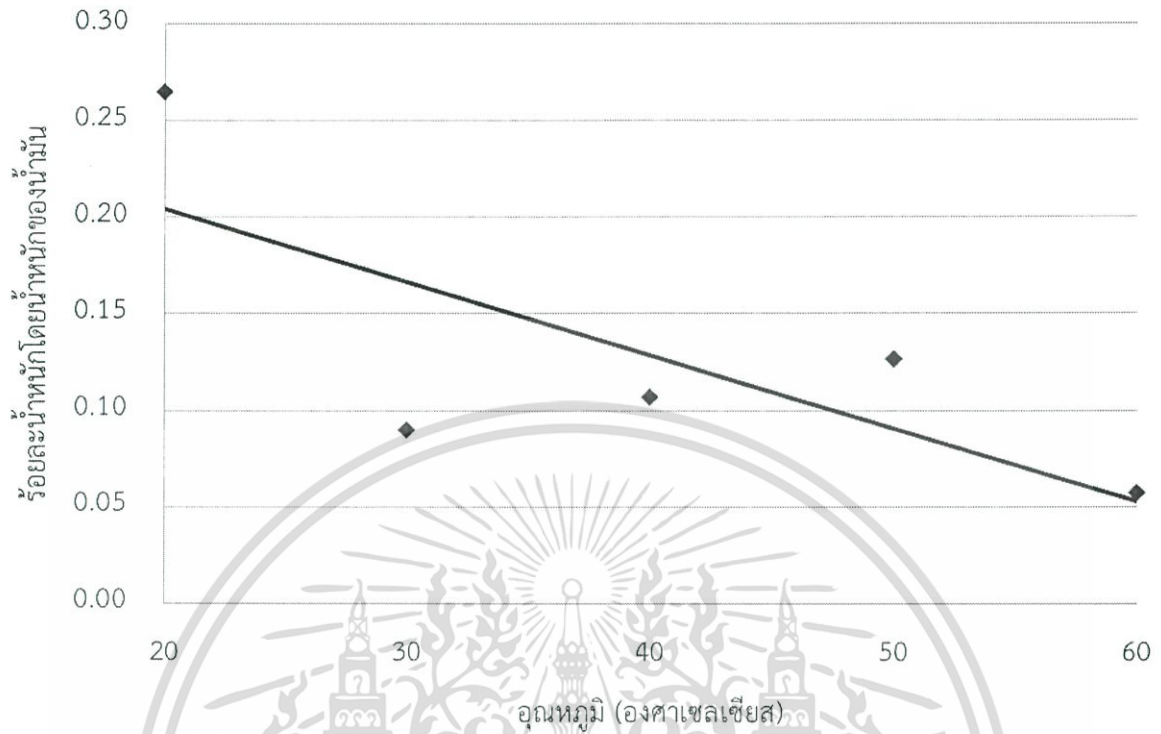
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อแยก ที่ความดันเริ่มสกัด 80 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 12 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.08 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่น้อยที่สุด อยู่ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.002 เพราะอุณหภูมิสูงทำให้น้ำมันหอมระเหย ระเหยออกมาจากหม้อสกัดเข้าสู่หม้อแยกมากกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจุดเดือดของน้ำมันหอมระเหยต่ำ

80 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 13 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 80 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 13 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.264 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.056 เนื่องจากที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ตามสมการ  $P = \rho ZRT$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ที่ความดัน 90 บาร์

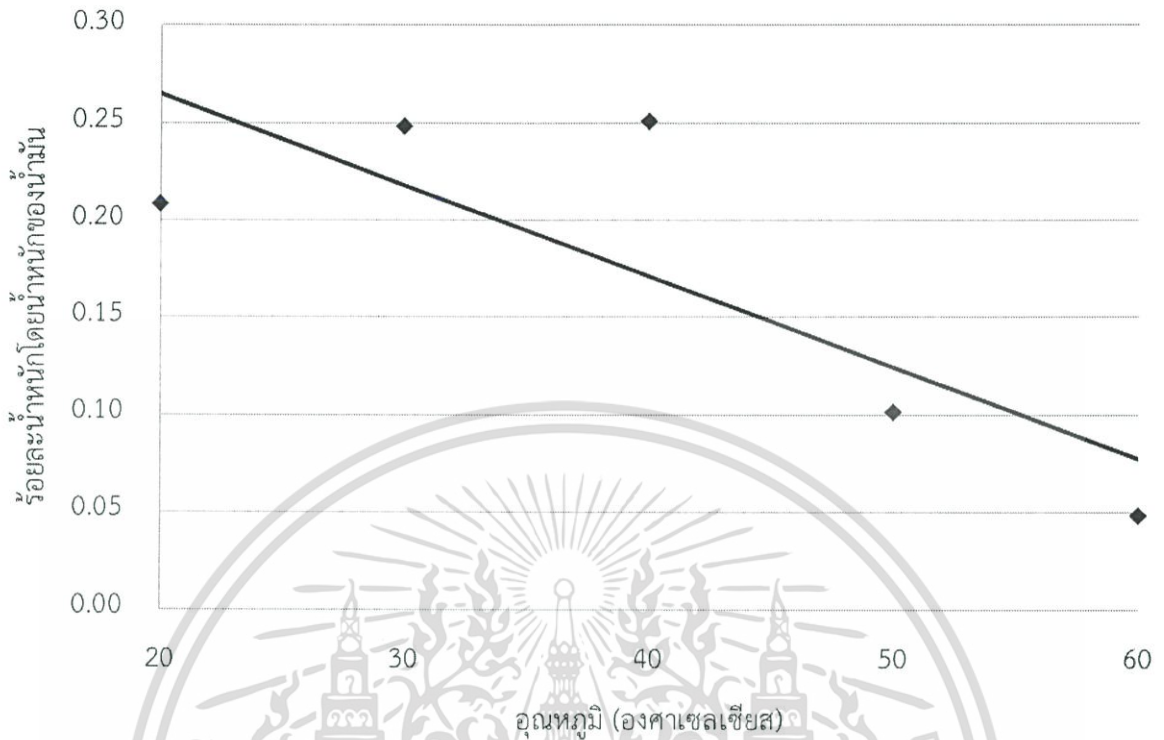
จากตารางที่ 5 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่มากที่สุดจากหม้อสกัด และของทั้งหมด เกิดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.251 และร้อยละ 0.338 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิการสกัด 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.107 โดยมวล ในขณะที่ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่น้อยที่สุดจากหม้อสกัด และของทั้งหมดเกิดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.048 และร้อยละ 0.154 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.034 โดยมวล ซึ่งแสดงว่า ที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิต่ำ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด และโดยรวม มากกว่าที่อุณหภูมิสูง แต่สำหรับหม้อแยก เมื่ออุณหภูมิต่ำ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูด น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 90 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อแยก	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันรวม
20	50.390	42.120	0.208	0.044	0.252
30	50.325	43.757	0.248	0.034	0.282
40	50.223	49.946	0.251	0.088	0.338
50	50.514	39.805	0.101	0.053	0.154
60	50.254	43.599	0.048	0.107	0.155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

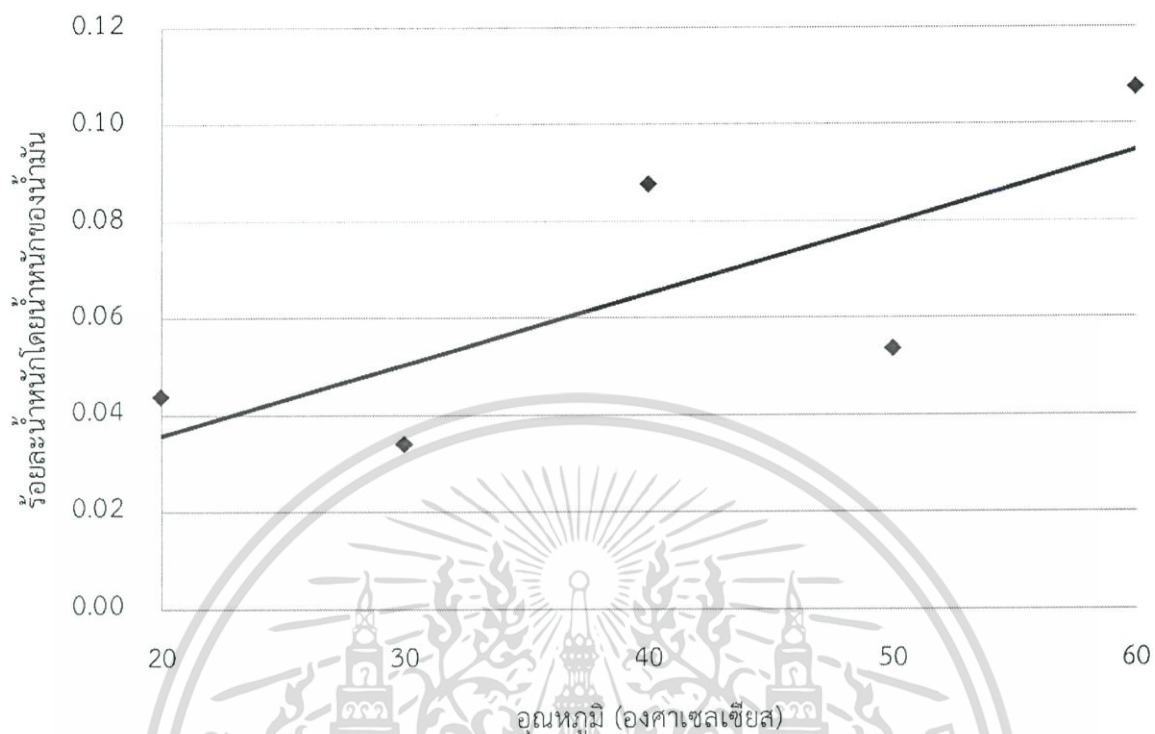
## 90 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 14 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 90 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 14 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.251 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.048 เนื่องจากที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ตามสมการ  $P = pZRT$

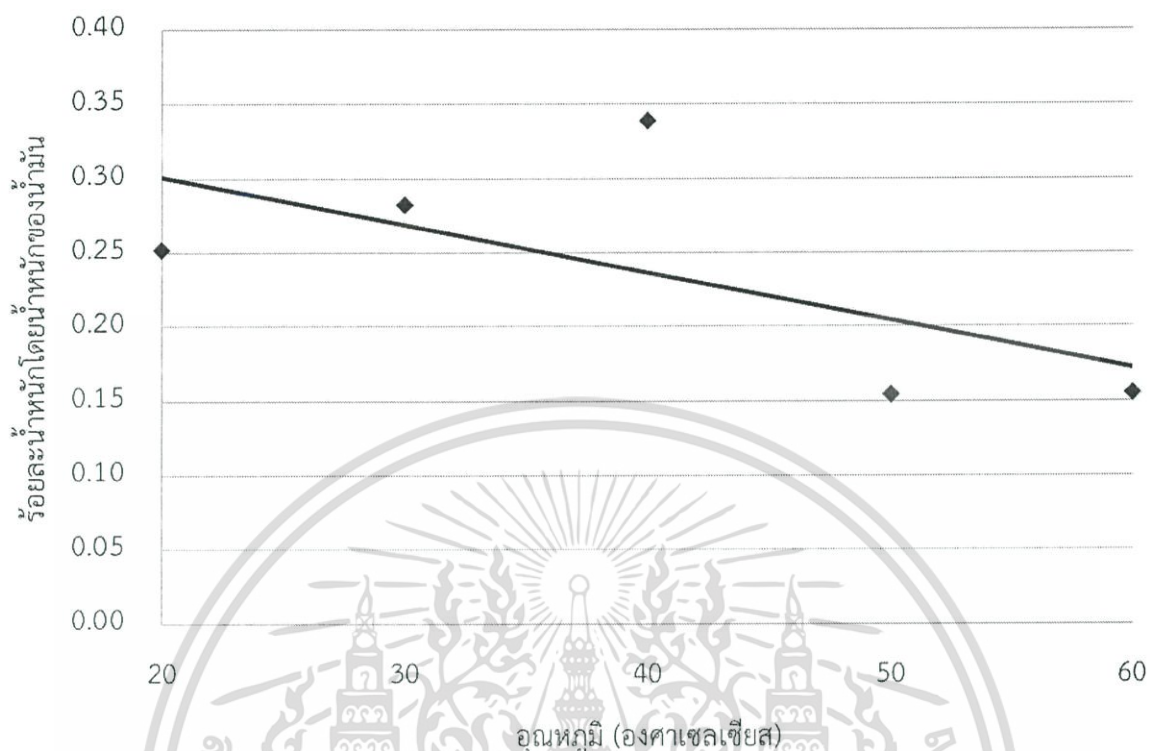
## 90 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 15 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อแยก ที่ความดันเริ่มสกัด 90 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 15 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.08 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่น้อยที่สุด อยู่ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.034 เพราะอุณหภูมิสูงทำให้น้ำมันหอมระเหย ระเหยออกมาจากหม้อสกัดเข้าสู่หม้อแยกมากกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจุดเดือดของน้ำมันหอมระเหยต่ำ

## 90 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 16 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 90 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

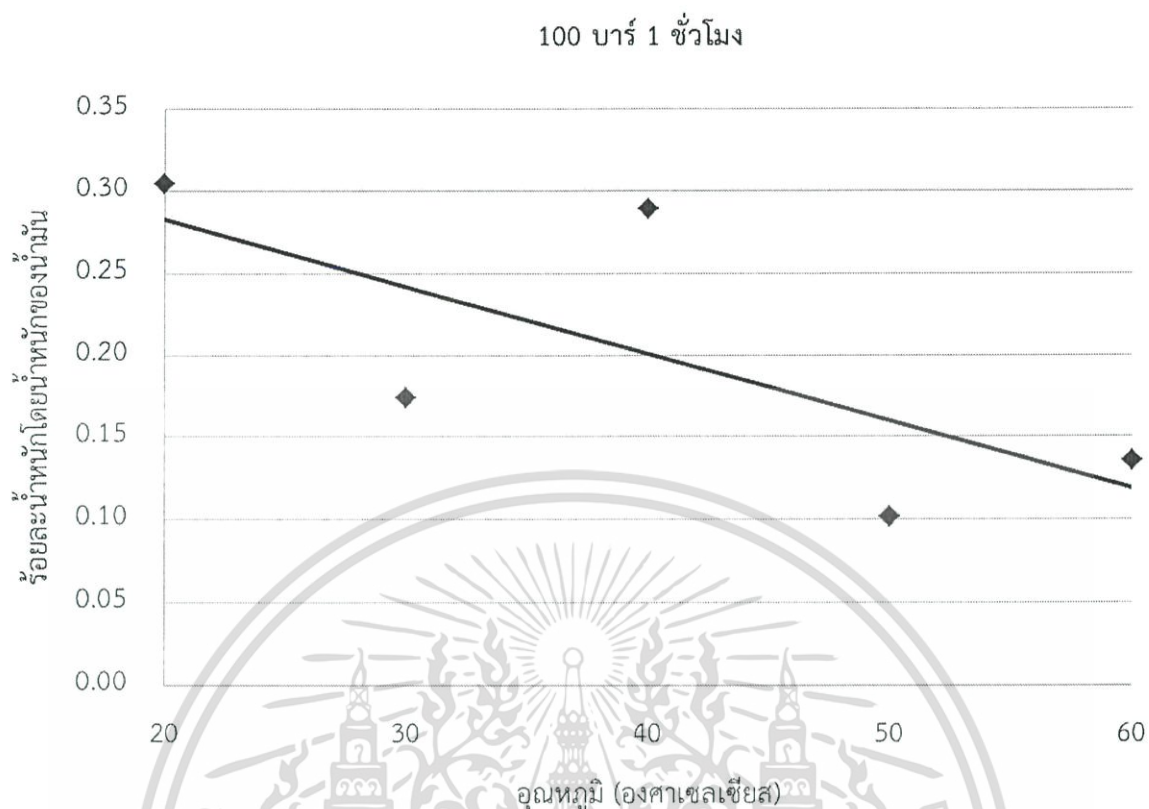
จากรูปที่ 16 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.252 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ตามสมการ  $P = \rho ZRT$  และที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.154

#### 4.1.3 ที่ความดัน 100 บาร์

จากตารางที่ 6 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่มากที่สุดจากหม้อสกัด และของทั้งหมด เกิดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ 40 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.305 และร้อยละ 0.309 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิการสกัด 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.172 ในขณะที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่น้อยที่สุดจากหม้อสกัด และของทั้งหมดเกิดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.102 และร้อยละ 0.145 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.004 โดยมวล ซึ่งแสดงว่า ที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิต่ำ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด และโดยรวม มากกว่าที่อุณหภูมิสูง แต่สำหรับหม้อแยก เมื่ออุณหภูมิต่ำปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูด น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 100 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

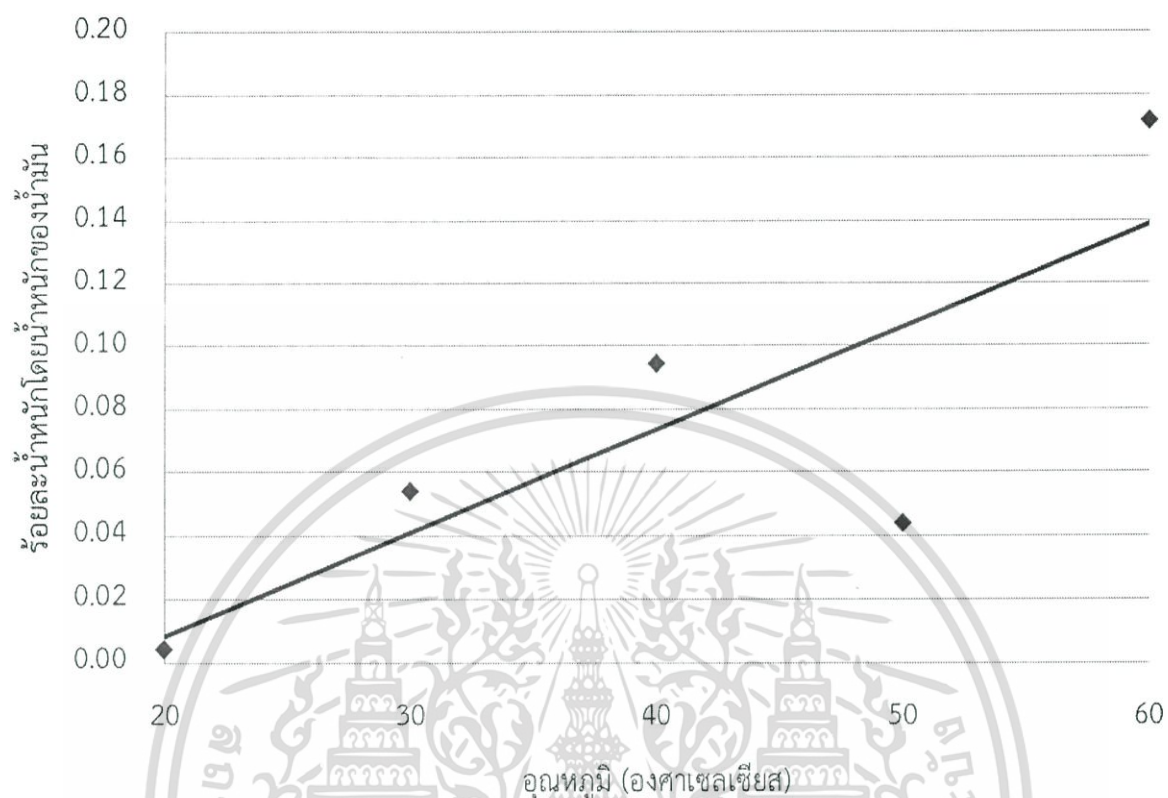
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อแยก	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันรวม
20	49.907	46.124	0.305	0.004	0.309
30	50.125	41.203	0.174	0.054	0.227
40	50.900	43.327	0.289	0.094	0.383
50	50.180	37.442	0.102	0.044	0.145
60	47.203	34.967	0.136	0.172	0.307



รูปที่ 17 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 100 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

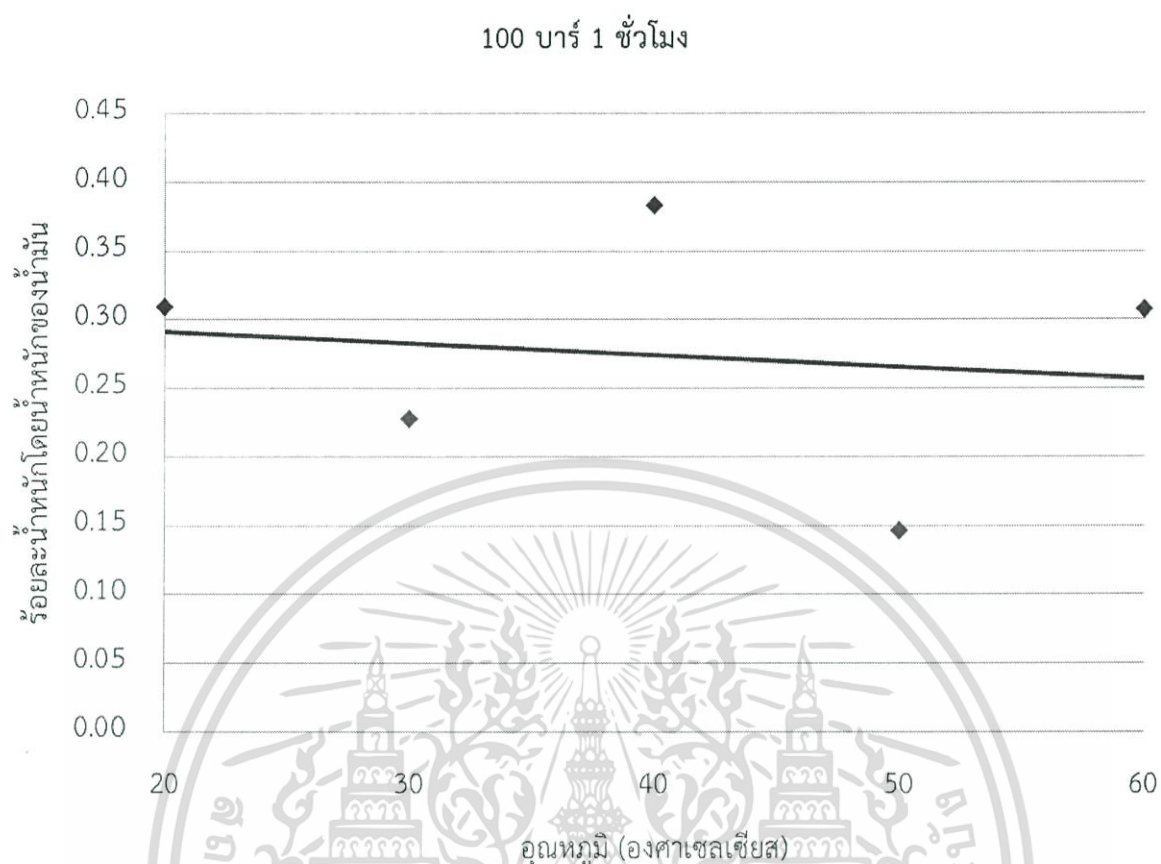
จากรูปที่ 17 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.305 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ตามสมการ  $P = \rho ZRT$  และที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.102

## 100 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 18 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อแยก ที่ความดันเริ่มสกัด 100 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 18 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.172 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่น้อยที่สุด อยู่ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.004 เพราะอุณหภูมิสูงทำให้น้ำมันหอมระเหย ระเหยออกมาจากหม้อสกัดเข้าสู่หม้อแยกมากกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจุดเดือดของน้ำมันหอมระเหยต่ำ



รูปที่ 19 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 100 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 19 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.305 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากที่ความดันต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ตามสมการ  $P = \rho ZRT$  แต่อัตราการลดลงต่ำ เนื่องจากสภาวะที่ความดันสูง และปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.145

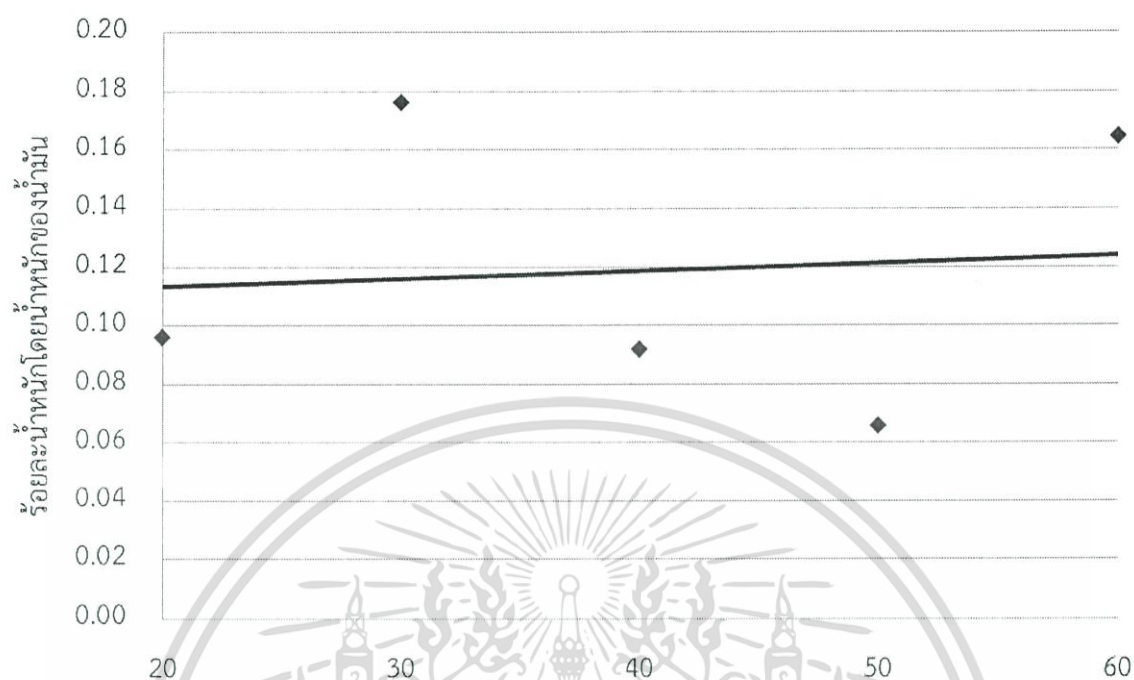
#### 4.1.4 ที่ความดัน 110 บาร์

จากตารางที่ 7 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่มากที่สุดจากหม้อสกัด และของทั้งหมด เกิดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.176 และร้อยละ 0.304 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิการสกัด 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.14 ในขณะที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่น้อยที่สุดจากหม้อสกัด และของทั้งหมด เกิดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.066 และร้อยละ 0.1 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.004 โดยมวล ซึ่งแสดงว่า ที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิสูงจนถึงค่าที่เหมาะสม ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด และโดยรวม มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่สำหรับหม้อแยก เมื่ออุณหภูมิต่ำปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูด น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 110 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อแยก	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันรวม
20	50.127	41.212	0.096	0.004	0.100
30	50.570	40.944	0.176	0.036	0.212
40	50.120	43.920	0.092	0.054	0.146
50	50.223	39.126	0.066	0.086	0.151
60	49.947	41.490	0.164	0.140	0.304

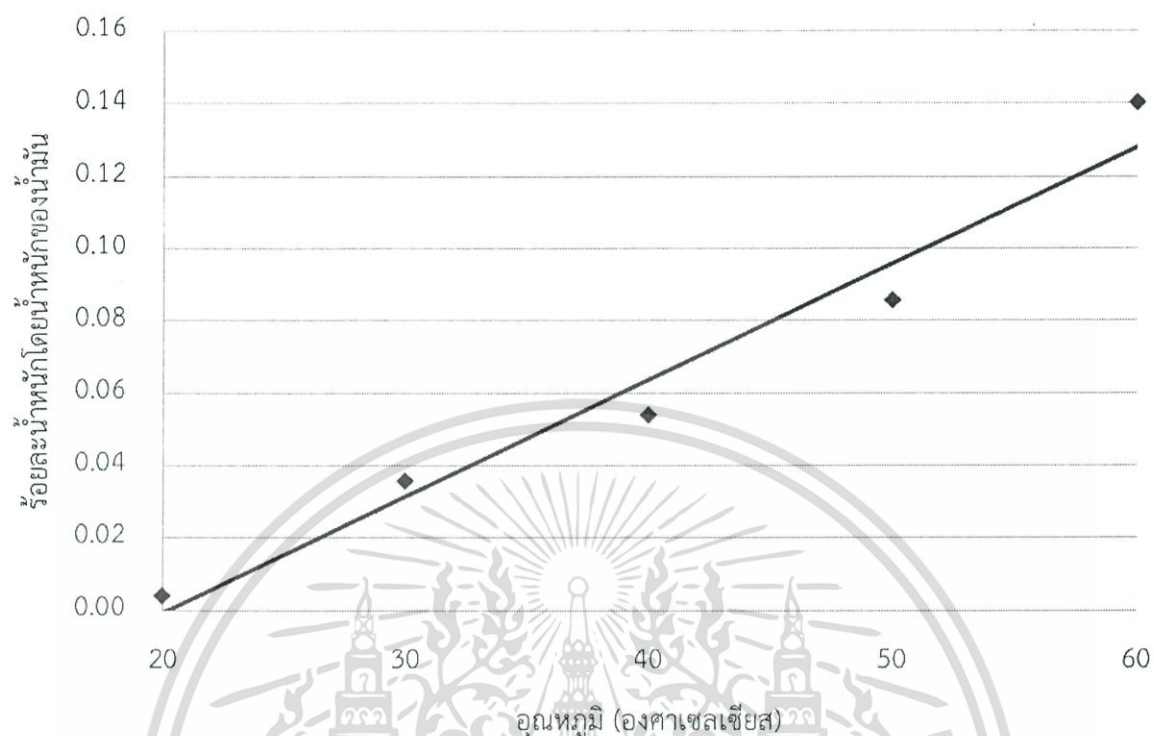
## 110 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 20 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 110 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 20 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.066 และปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.176 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แม้ทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง แต่ส่งผลให้อนุภาคของตัวทำละลายแพร่ได้ดีขึ้น

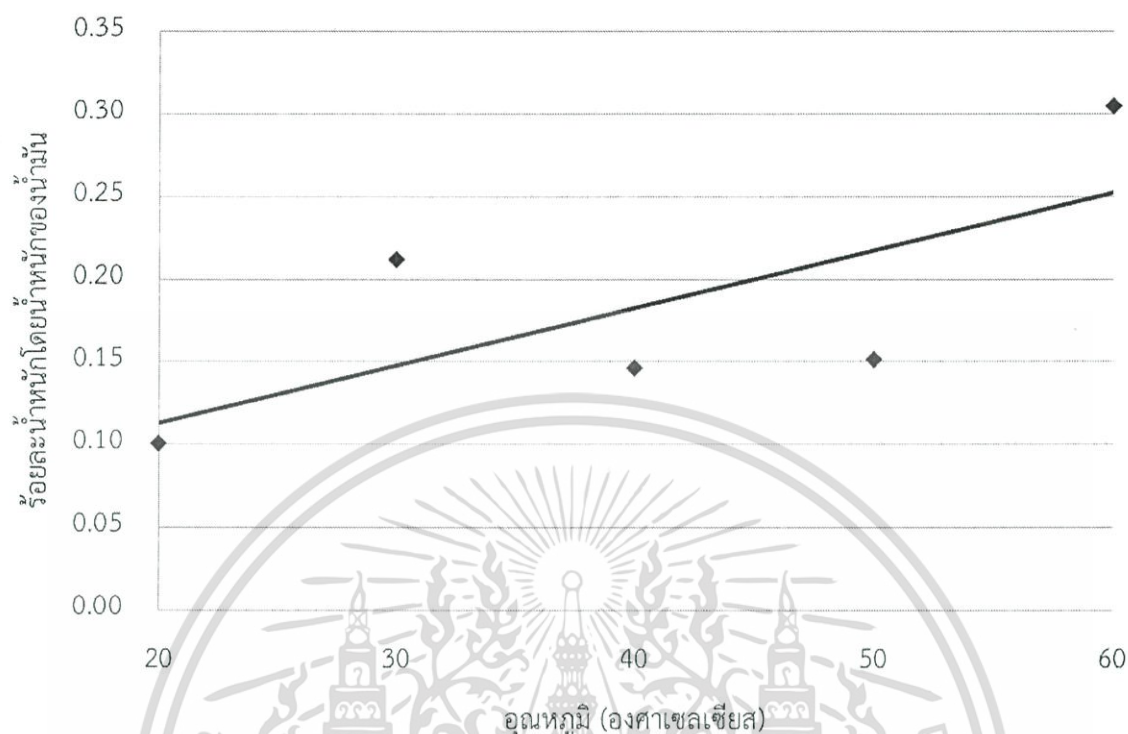
## 110 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 21 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดหม้อแยก ที่ความดันเริ่มสกัด 110 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 21 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.14 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่น้อยที่สุด อยู่ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.004 เพราะอุณหภูมิสูงทำให้น้ำมันหอมระเหย ระเหยออกมาจากหม้อสกัดเข้าสู่หม้อแยกมากกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจุดเดือดของน้ำมันหอมระเหยต่ำ

## 110 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 22 กราฟแสดงผลของอนุหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 110 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 22 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อนุหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.1 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออนุหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากที่ความดันสูง เมื่ออนุหภูมิเพิ่มขึ้น แม้ทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง แต่ส่งผลให้อนุภาคของตัวทำละลายแพร่ได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงเห็นว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด คือที่อนุหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.304

#### 4.1.5 ที่ความดัน 120 บาร์

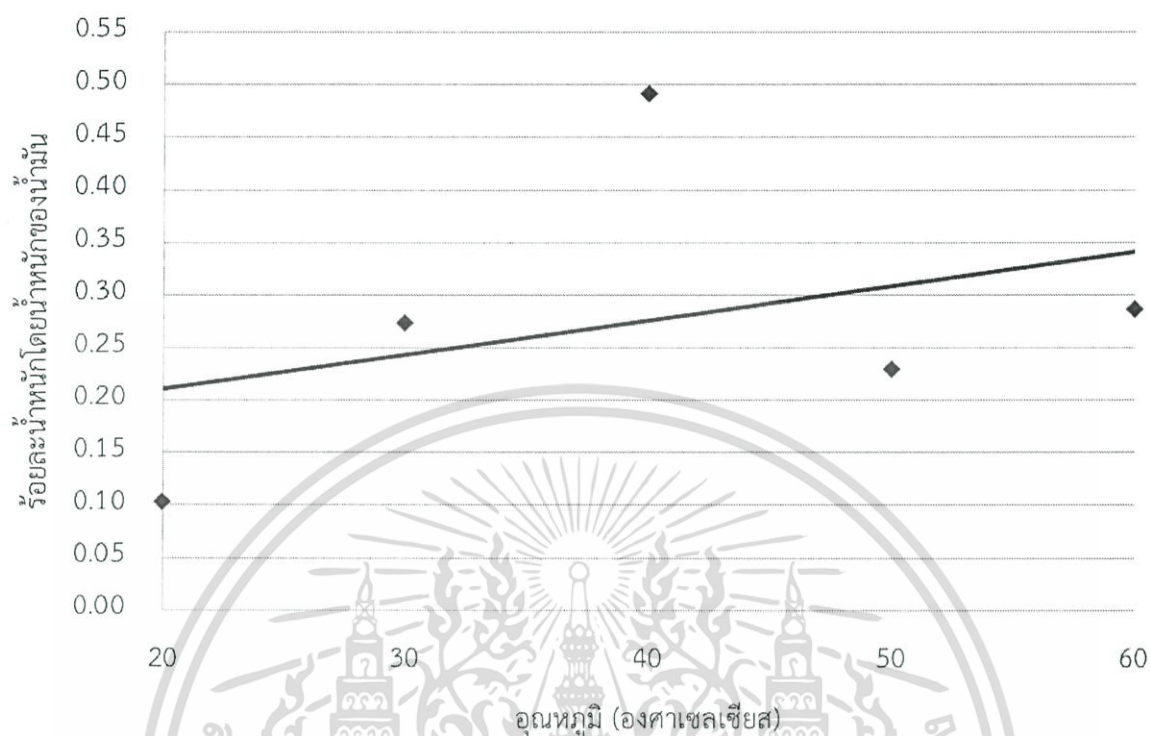
จากตารางที่ 8 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่มากที่สุดจากหม้อสกัด ของทั้งหมด และหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.491 0.628 และ 0.14 โดยมวลตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดที่น้อยที่สุดจากหม้อสกัด และของทั้งหมด เกิดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.102 และร้อยละ 0.109 โดยมวลตามลำดับ สำหรับหม้อแยก เกิดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.002 โดยมวลซึ่งแสดงว่า ที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงค่าที่เหมาะสม ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด และโดยรวมมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่สำหรับหม้อแยก เมื่ออุณหภูมิต่ำปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูด น้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูด ที่ความดัน 120 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อแยก	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันรวม
20	47.820	41.980	0.102	0.006	0.109
30	50.189	46.877	0.273	0.002	0.275
40	50.140	40.617	0.491	0.138	0.628
50	50.145	36.929	0.229	0.058	0.287
60	50.012	42.587	0.286	0.072	0.358

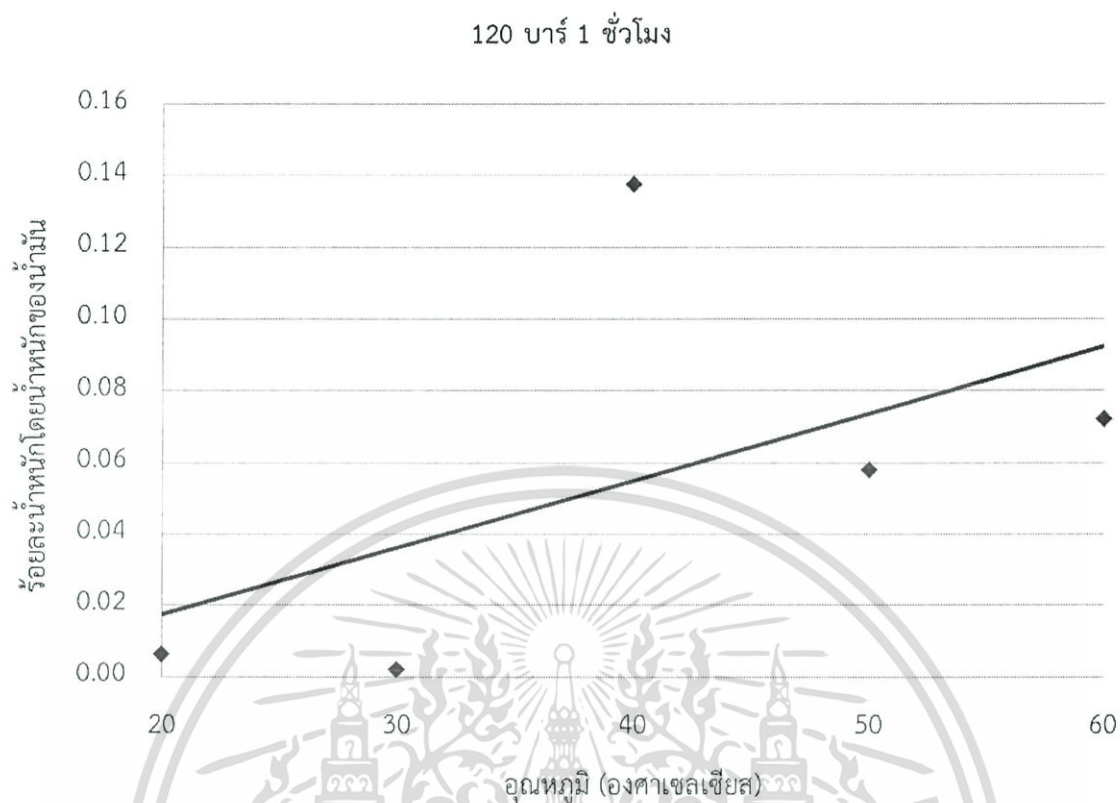
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 120 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 23 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัด ที่ความดัน 120 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

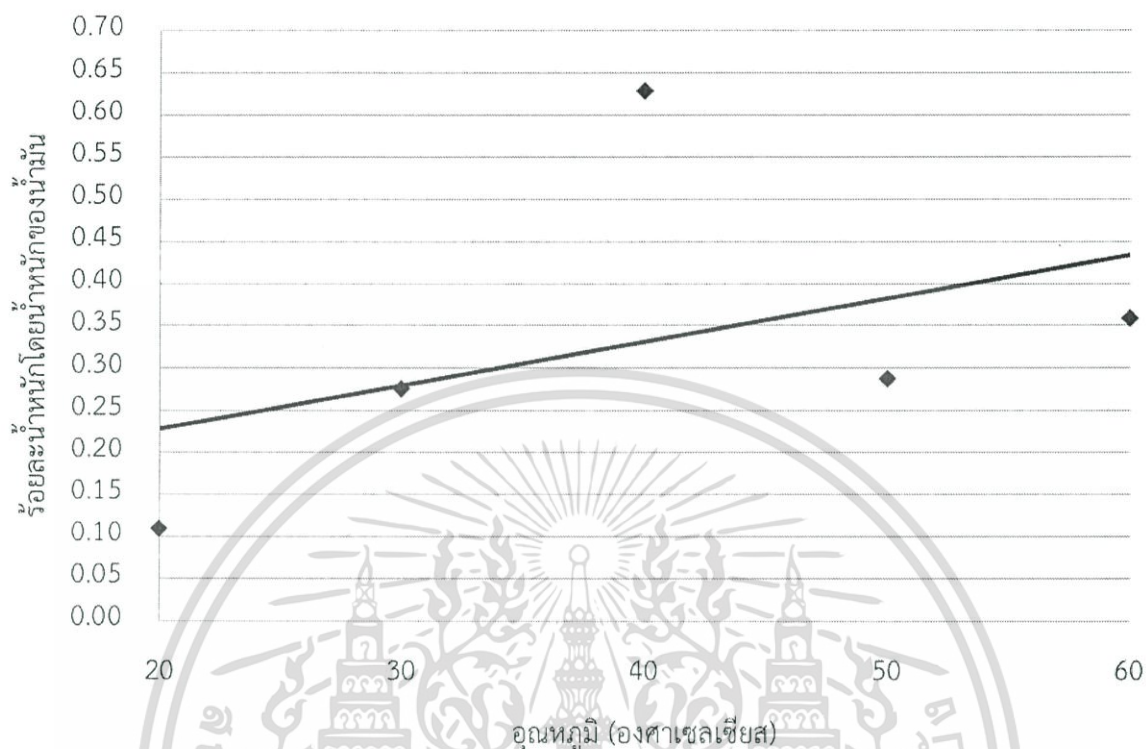
จากรูปที่ 23 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.491 และปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.102 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แม้ทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง แต่ส่งผลให้อนุภาคของตัวทำละลายแพร่ได้ดีขึ้น



รูปที่ 24 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่หม้อสกัด ที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อแยก ที่ความดันเริ่มสกัด 120 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 24 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.138 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่น้อยที่สุด อยู่ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.006 เพราะอุณหภูมิสูงทำให้น้ำมันหอมระเหย ระเหยออกจากหม้อสกัดเข้าสู่หม้อแยกมากกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจุดเดือดของน้ำมันหอมระเหยต่ำ

## 120 บาร์ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 25 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดรวม ที่ความดัน 120 บาร์ เวลาสกัด 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 25 พบว่า ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.628 ซึ่งเป็นปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบที่ช่วงความดัน และอุณหภูมิที่ใช้ทดลองทั้งหมด ในขณะที่ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุด คือที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.109 เส้นแนวโน้มแสดงว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แม้ทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง แต่ส่งผลให้อนุภาคของตัวทำละลายแพร่ได้ดีขึ้น

## 4.2 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย

เมื่อสกัดที่ความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด (120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส)

### 4.2.1 ที่หม้อสกัด

จากตารางที่ 9 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัดเพิ่มขึ้น โดยตามทฤษฎีผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ จะมี ณ เวลาหนึ่งที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่จุดนั้น เรียกว่า ความสามารถในการรับภาระ ซึ่งสอดคล้องกับ ค้างโกลจิสติก ทำให้สามารถคาดคะเนเวลาที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ได้ ดังนี้

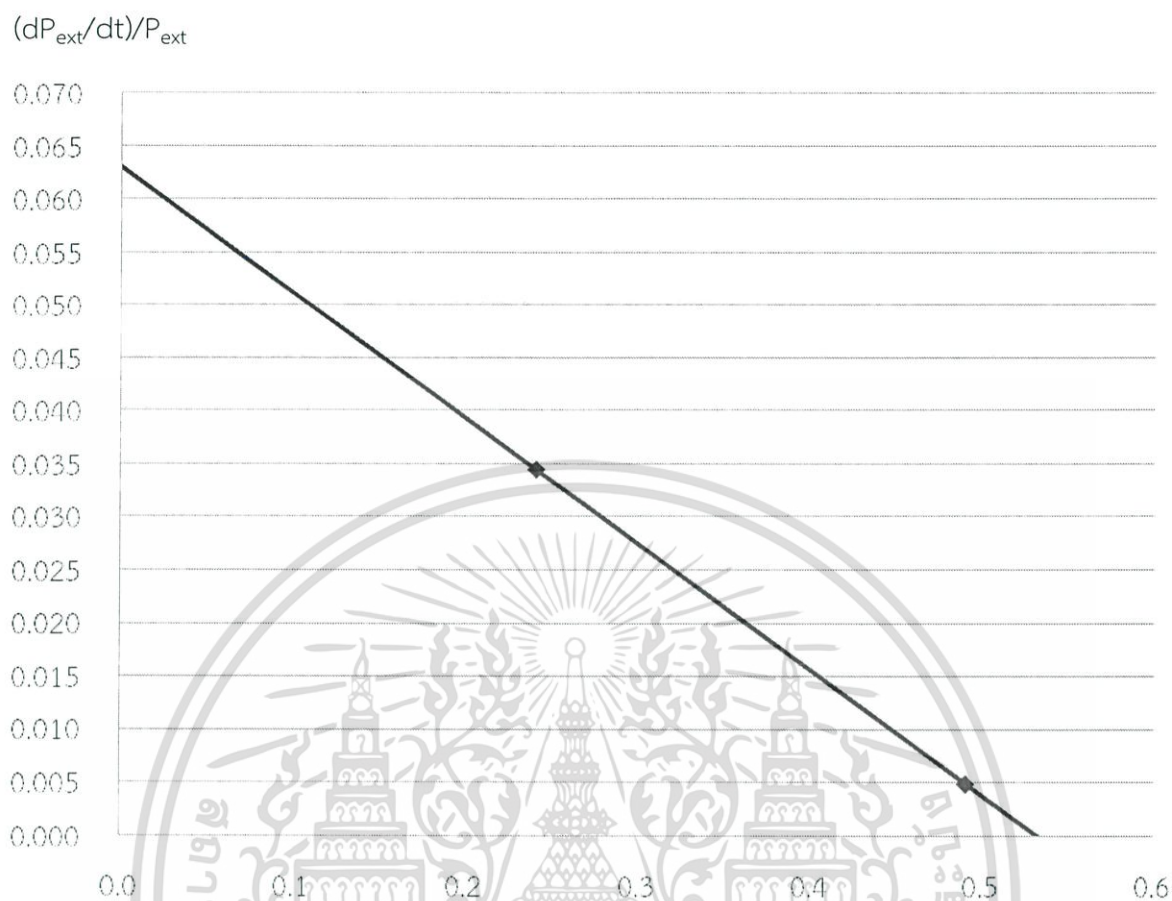
ตารางที่ 9 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากหม้อสกัด เมื่อสกัดที่ 120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส

เวลาสกัด (นาท)	น้ำหนักผิวมะกรูด ก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักผิวมะกรูด หลังสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมัน จากหม้อสกัด
0	50.152	40.629	0
30	49.295	40.959	0.241
60	50.140	40.617	0.491
90	50.657	39.670	0.563

ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่าของ  $dP_{ext}/dt$  และ  $(dP_{ext}/dt)/P_{ext}$

เวลาสกัด (นาท)	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด ( $P_{ext}$ )	$dP_{ext}/dt$	$(dP_{ext}/dt)/P_{ext}$
30	0.241	0.008	0.034
60	0.491	0.002	0.005
90	0.563	-	-

จากตารางที่ 10 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(dP_{ext}/dt)/P_{ext}$  กับร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด ( $P_{ext}$ ) ได้ดังนี้



รูปที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(dP_{ext}/dt)/P_{ext}$  กับ  $P_{ext}$

จากรูปที่ 26 กำหนดให้จุดตัดแกน  $y = k = 0.063$

จุดตัดแกน  $x = L = 0.530$  โดยที่  $L$  คือความสามารถในการรับภาระ

จากสมการโค้งโลจิสติก [15]

$$P = \frac{L}{1 + Ae^{-kt}} \quad (32)$$

กำหนดให้  $P$  คือ ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมัน

$t$  คือ เวลา (นาท)

$A$  คือ ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น

คำนวณหาค่า  $A$  จากสมการโลจิสติก

เมื่อแทนค่า  $L = 0.530$

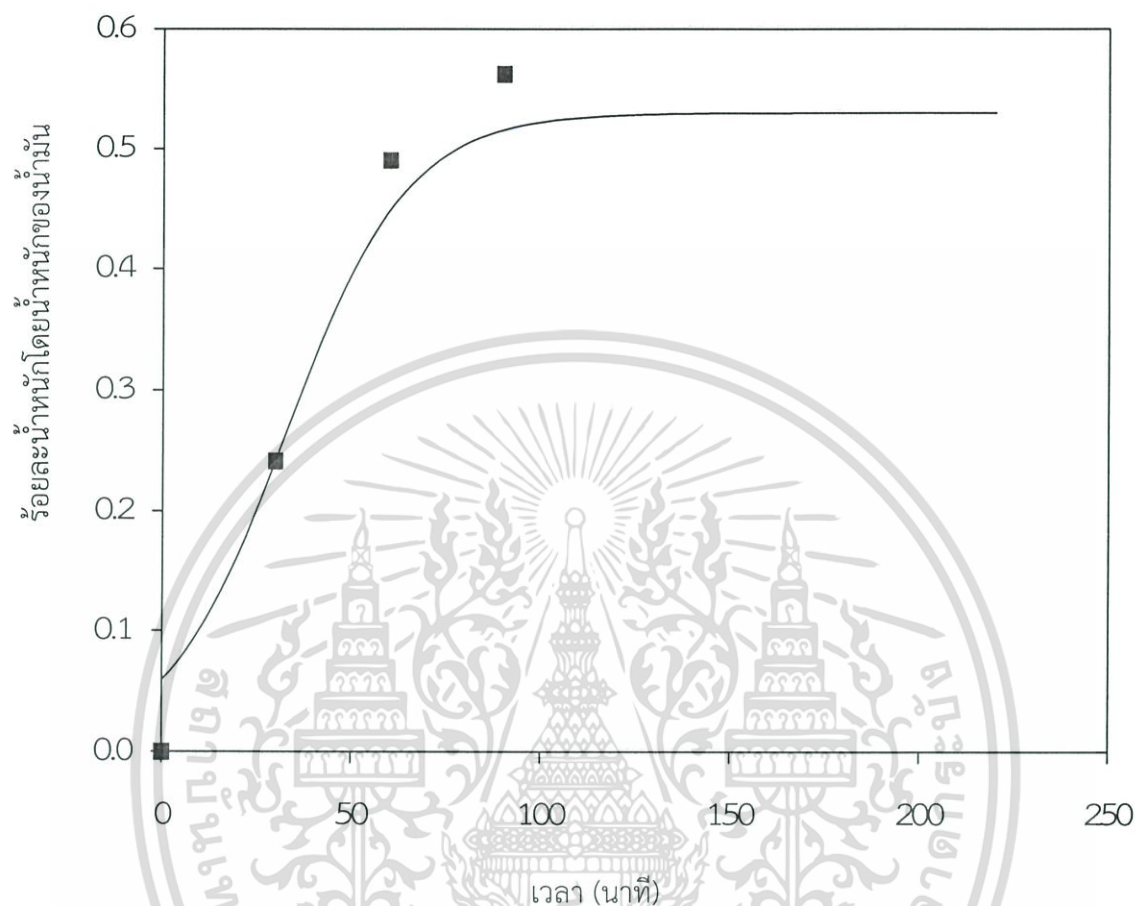
$k = 0.063$

$t = 30, 60, 90$  และ  $P = 0.241, 0.491, 0.563$  ตามลำดับ

เลือก ค่า  $A$  ที่เหมาะสม คือ 7.91.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันมะกรูดจากหม้อสกัด และเวลาดังนี้



รูปที่ 27 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากหม้อสกัด เมื่อสกัดที่ 120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 27 พบว่า ช่วงแรกร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดที่หม้อสกัดเพิ่มขึ้นในอัตราการเติบโตที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปยังคงเพิ่มขึ้นอยู่แต่อัตราการเติบโตลดลง จนถึง ณ เวลานั้นที่ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ ที่ร้อยละ 0.53 เรียกจุดนี้ว่า ความสามารถในการรับภาระ ซึ่งตรงกับเวลาการสกัด 3 ชั่วโมง 24 นาที

#### 4.2.2 ที่หม้อสกัด และหม้อแยก

จากตารางที่ 11 พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดจากหม้อสกัดเพิ่มขึ้น โดยตามทฤษฎีผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ จะมี ณ เวลาหนึ่งที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่จุดนั้น เรียกว่า ความสามารถในการรับภาระ ซึ่งสอดคล้องกับ โค้งโลจิสติก ทำให้สามารถคาดคะเนเวลาที่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ได้ ดังนี้

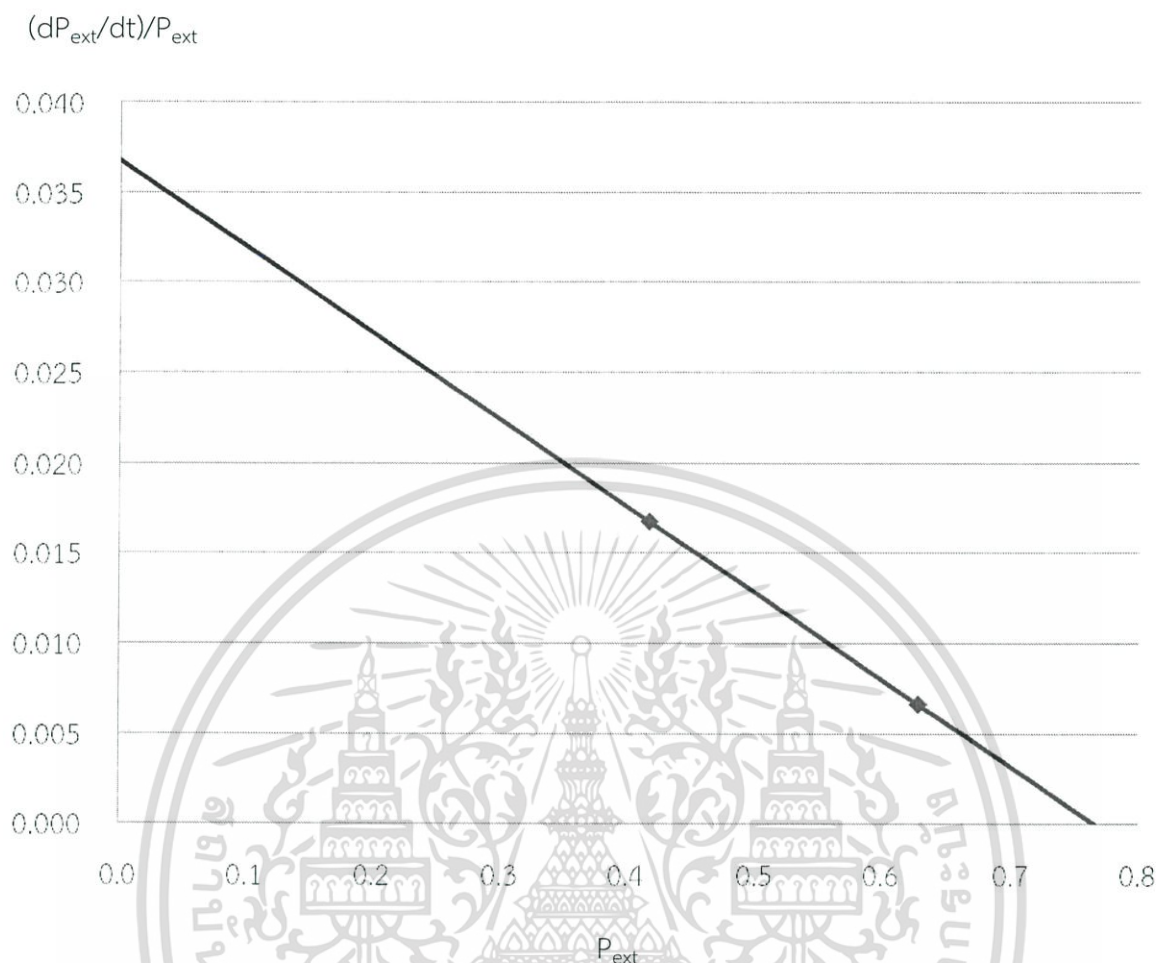
ตารางที่ 11 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยรวม เมื่อสกัดที่ 120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส

เวลาสกัด (นาท)	น้ำหนักผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด และหม้อแยก
0	50.152	40.629	0
30	49.295	40.959	0.418
60	50.140	40.617	0.628
90	50.657	39.67	0.754

ตารางที่ 12 ตารางแสดงค่าของ  $dP_{tot}/dt$  และ  $(dP_{tot}/dt)/P_{tot}$

เวลาสกัด (นาท)	ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด และหม้อแยก ( $P_{tot}$ )	$dP_{tot}/dt$	$(dP_{tot}/dt)/P_{tot}$
30	0.418	0.007	0.017
60	0.628	0.004	0.007
90	0.754	-	-

จากตารางที่ 10 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(dP_{tot}/dt)/P_{tot}$  กับร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันจากหม้อสกัด และหม้อแยก ( $P_{tot}$ ) ได้ดังนี้



รูปที่ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(dP_{ext}/dt)/P_{ext}$  กับ  $P_{ext}$

จากรูปที่ 28 กำหนดให้จุดตัดแกน  $y = k = 0.037$

จุดตัดแกน  $x = L = 0.767$  โดยที่  $L$  คือความสามารถในการรับภาระ

จากสมการโค้งโลจิสติก จากสมการที่ (32)

กำหนดให้  $P$  คือ ร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมัน

$t$  คือ เวลา (นาท)

$A$  คือ ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น

คำนวณหาค่า  $A$  จากสมการโลจิสติก

เมื่อแทนค่า  $L = 0.767$

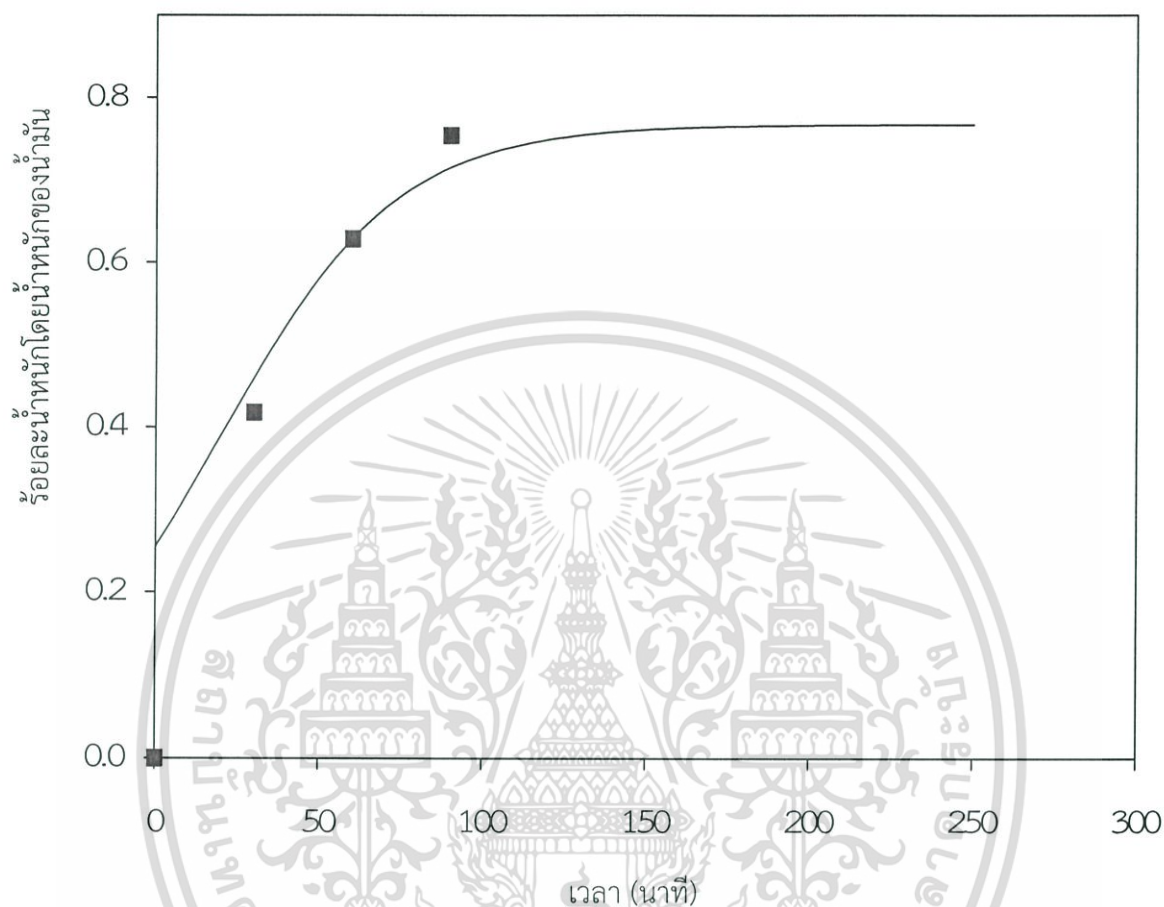
$k = 0.037$

$t = 30, 60, 90$  และ  $P = 0.418, 0.628, 0.754$  ตามลำดับ

เลือก ค่า  $A$  ที่เหมาะสม คือ 2.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดโดยรวม และเวลาดังนี้



รูปที่ 29 ผลของเวลาสกัดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยโดยรวม เมื่อสกัดที่ 120 บาร์ 40 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 29 พบว่า ช่วงแรกร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดที่หม้อสกัดเพิ่มขึ้นในอัตราการเติบโตที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปยังคงเพิ่มขึ้นอยู่แต่อัตราการเติบโตลดลงจนถึง ณ เวลานั้นที่ร้อยละน้ำหนักร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนักของปริมาณน้ำมันหอมระเหยเริ่มคงที่ ที่ร้อยละ 0.767 เรียกจุดนี้ว่า ความสามารถในการรับภาระ ซึ่งตรงกับเวลาการสกัด 4 ชั่วโมง

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง วิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการใช้ทฤษฎีก๊าซจริงในการออกแบบค่าที่ออกแบบได้ความดันสมมูล 30 บาร์ สำหรับการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำมันผิวมะกรูด จากการวัดค่าจริงได้ความดันสมมูล 40 บาร์ เนื่องจากปริมาตรของจุดศูนย์ตายบนของกระบอกสูบไม่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ ปริมาตรนี้ทำให้ระบบโดยรวมมีปริมาตรสูงขึ้นเมื่อถึงความดันถูกลดความดัน ความดันที่จุดสมมูลใหม่จะมีแนวโน้มมากขึ้น จึงทำให้ค่าความดันที่ได้สูงกว่าที่ออกแบบ

จากการใช้ทฤษฎีผนังบาง และการวิเคราะห์แบบรับภาระสถิตก่อนของฟาสเทนเนอร์ ช่วยให้สามารถออกแบบหม้อความดันที่มีความปลอดภัย จุดอ่อนแอที่สุดของการออกแบบคือโบลต์ของหม้อแยกทั้ง 6 ตัว ซึ่งมีตัวประกอบความปลอดภัยเป็น 1.18 ตัวประกอบความปลอดภัยนี้มีค่าน้อยเนื่องจากถูกคำนวณจากภาระสถิตย์สูงสุด ในการใช้งานจริงย่อมต่ำกว่าภาระนี้ทำให้ยังคงมีความปลอดภัยอยู่นอกจากนี้การออกแบบยังคำนึงให้ความเสียหายเกิดขึ้นจากโบลต์ก่อนหม้อความดัน เพื่อป้องกันความเสียหายของหม้อความดันซึ่งเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสูงกว่า

จากการเลือกใช้โริงโดยคำนึงถึงความดันสูงสุดที่หม้อแยกรับได้ตามมาตรฐานของญี่ปุ่น (JIS2401) ช่วยทำให้โริงมีอายุการใช้งานยาวนานจากการทดลองพบว่าโริงหนึ่งชิ้นใช้งานได้ 70 ครั้ง ที่ความดันประมาณ 100 บาร์

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า หม้อแยกช่วยเพิ่มปริมาณน้ำมันหอมระเหย โดยการปรับความดัน อุณหภูมิ และเวลาในการสกัด ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการสกัดน้ำมันจากผิวมะกรูด สำหรับหม้อสกัดสถานะเหมาะสมที่สุด คือ ความดัน 120 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง 24 นาที ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดที่สกัดได้คิดเป็นร้อยละ 0.53 โดยมวล ผลของเวลาที่ใช้สกัดสอดคล้องกับแบบจำลองโลจิสติก หากพิจารณาปริมาณน้ำมันหอมระเหยทั้งหมด กล่าวคือทั้งหม้อสกัดและหม้อแยก สถานะเหมาะสมที่สุด คือ ความดัน 120 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดที่สกัดได้คิดเป็นร้อยละ 0.767 โดยมวล ผลของเวลาที่ใช้สกัดสอดคล้องกับแบบจำลองโลจิสติก การทดลองแสดงให้เห็นว่าหม้อแยกเพิ่มปริมาณน้ำมันคิดเป็นร้อยละ 30.4

### 5.2 วิจัยผลการทดลอง

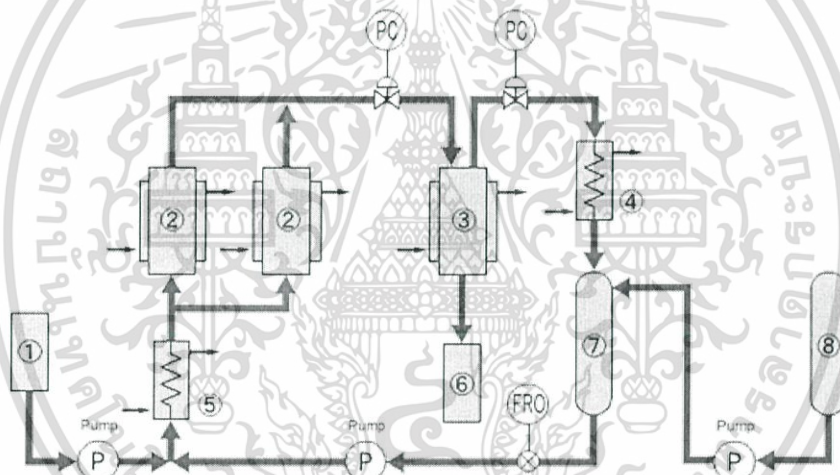
ผลการทดลองมีการคาดเคลื่อนเนื่องจากปัจจัยในหลาย ๆ ส่วน ทั้งที่เกิดจากผู้ทดลองเอง และชุดการทดลอง เริ่มตั้งแต่การเตรียมผิวมะกรูด ที่การควบคุมให้ขนาด หรือความหนาให้เท่ากันนั้นทำได้ยาก อุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิล และชุดก้านสูบไฮดรอลิกที่เป็นของชุดการทดลองเดิม ซึ่งอาจไม่ได้มีการตรวจสอบประสิทธิภาพโดยละเอียดก่อนนำมาใช้ทดลองต่อ ความถี่ในการอัดก้านสูบของผู้ทดลองที่ส่งผลต่อความดันในการสกัด ขั้นตอนการเก็บผลผลิตที่ได้ออกจากหม้อสกัด และหม้อแยก เช่น การแยกน้ำมันออกจากน้ำ อาจมีน้ำบางส่วนติดไปกับปริมาณน้ำมันที่วัดได้ หรือแยกน้ำมันจากน้ำออกมาไม่หมด รวมถึงการทำ ความสะอาดหม้อสกัด และหม้อแยก ก่อนทดลองครั้งต่อไป ตลอดจนความแม่นยำในการอ่านค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก อุปกรณ์การวัดที่ใช้ในการทดลอง เช่น เกจวัดความดัน เทอร์โมคัปเปิล เทอร์โมมิเตอร์ และเครื่องชั่ง เป็นต้น

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยหลัก ๆ ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และเวลาสกัด แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น ขนาด หรือความหนาของวัตถุดิบ ปริมาณความชื้นในวัตถุดิบ และอัตราการไหลของตัวทำละลาย ดังนั้นควรมีการศึกษาถึงผลของปัจจัยดังกล่าวที่มีต่อปริมาณน้ำมันด้วย หรือหาวิธีการควบคุมเพื่อลดความคาดเคลื่อนของผลการทดลอง นอกจากนี้ควรมีการศึกษาคุณภาพของน้ำมันหอมระเหย ว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อสี กลิ่น และระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นต้น รวมถึงปรับปรุงพัฒนาชุดการทดลองให้ทันสมัยมากขึ้น โดยในส่วนของก้านสูบไฮดรอลิกอาจมีอุปกรณ์ กลไกต่าง ๆ เพิ่มเติม ซึ่งช่วยลดความคาดเคลื่อนจากการอัดก้านสูบของผู้ทดลองที่ส่งผลต่อความดันในการสกัด รวมถึงการทำหม้อแยกเพิ่มเพื่อให้สามารถกักจับน้ำมันหอมระเหยได้มากขึ้น และควบคุมอัตราการไหลของตัวทำละลายได้ตลอดจนการทำชุดการทดลองให้เป็นระบบปิด เพื่อนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง และพัฒนาการสกัดให้ดีขึ้น โดยการใช้หม้อสกัดแบบขนาน ดังรูป 33



รูปที่ 30 แผนภาพกระบวนการสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ แบบระบบปิด [16]

จากรูปที่ 30 แสดงกระบวนการสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยั้งยวดแบบระบบปิด ซึ่งเป็นการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ และพัฒนาการสกัดโดยการใช้หม้อสกัดแบบขนาน จะเห็นว่าในรูปมีหม้อสกัด 2 หม้อ ทำหน้าที่สกัดน้ำมันหอมระเหยส่วนแรกออกมา จากนั้น น้ำมันหอมระเหยส่วนที่เหลือ ที่ติดกับคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยั้งยวดจากทั้ง 2 หม้อ จะถูกปล่อยเข้าสู่หม้อแยก เพื่อแยกน้ำมันหอมระเหยต่อไป สำหรับการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ แสดงถึงการให้ความร้อนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยทิ้งจากหม้อแยกก่อนนำไปใช้

หมายเลข 1 คือ ถัง CO<sub>2</sub>

หมายเลข 2 คือ หม้อสกัด

หมายเลข 3 คือ หม้อแยก

หมายเลข 4 คือ เทอร์โมคัปเปิล

หมายเลข 5 คือ เทอร์โมคัปเปิล

หมายเลข 6 คือ ถังเก็บน้ำมันหอมระเหย

หมายเลข 7 คือ ถังเก็บ CO<sub>2</sub> หมุนเวียน

หมายเลข 8 คือ ถัง CO<sub>2</sub> หมุนเวียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเว็บไซต์นี้จะเห็นคุณค่าการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

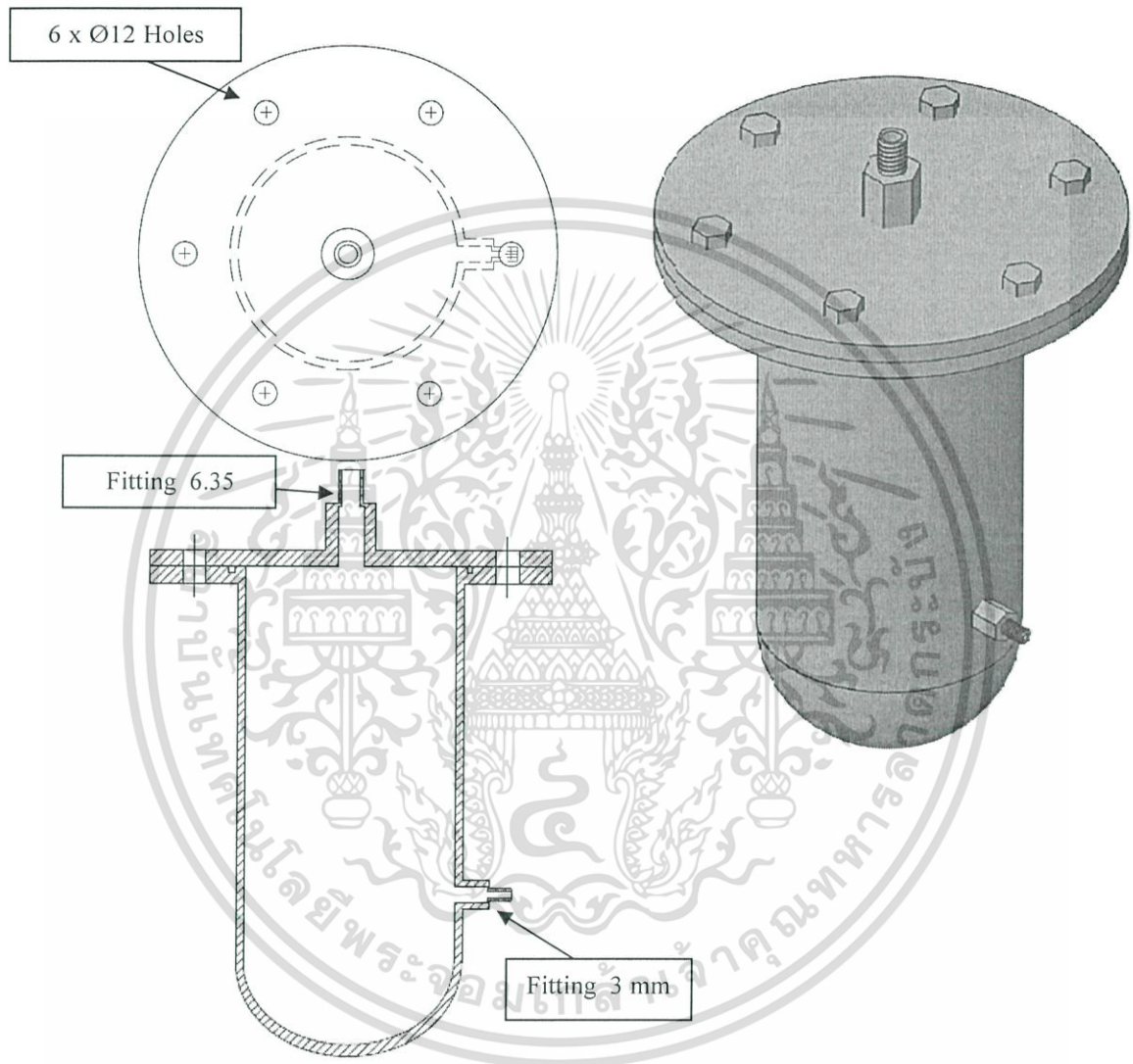
- [1] เทพสุริยา ลาสา, ธนวัฒน์ คงวัฒนา, นนทปวีร์ คลังหิรัญ พ.ศ.2555 : ปริญญาานิพนธ์ การสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล.
- [2] Richard. 1982. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สกัดได้ของน้ำมันถั่วเหลือง.
- [3] Phase diagram of Carbon dioxide.  
URL : [http://decarboni.se/publications/co2-liquid-logistics-shipping-concept-llsc- %E2%80%93-business-model-report/appendix-1-co2temperature \\_ phase \\_ diagram.svg.png](http://decarboni.se/publications/co2-liquid-logistics-shipping-concept-llsc-%E2%80%93-business-model-report/appendix-1-co2temperature_phase_diagram.svg.png).
- [4] Dobson. 1993. การศึกษาอัตราการสกัดเปรียบเทียบการสกัดระหว่าง CO<sub>2</sub> ที่เป็นของเหลว และ CO<sub>2</sub> วิฤตยิ่งยวด.
- [5] Logistic graph  
URL: [http://study.com/cimages/multimages/16/logistic\\_growth\\_graph.png](http://study.com/cimages/multimages/16/logistic_growth_graph.png)
- [6] The percentage of essential oils of kaffir lime peel.  
URL:<http://prayod.com/%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B8%94-leech-lime/>
- [7] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. 2011. Thermodynamics : an engineering approach. 7th ED. Singapore : McGraw-Hill.
- [8] Comparison of Z factors for various gases.  
URL: <http://www.mae.wvu.edu/~smirnov/mae320/figs/F3-12.jpg>
- [9] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston Jr., John T. Dewolf, David F. Mazurek. 2009. Mechanics of Materials. 5th ED. Singapore : McGraw-Hill.
- [10] Robert L. Norton. 2011. Machine Design: an integrated approach. 4<sup>th</sup> ED. New Jersey : Pearson.
- [11] Properties of material and range of temperature for O-ring.  
URL: <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=9491&section=9>
- [12] การเลือกใช้ซีลของโอริง  
URL: [http://specseal.co.th/en/faq/faq\\_ori.html](http://specseal.co.th/en/faq/faq_ori.html)
- [13] ตารางท่อเหล็กกล้าไร้สนิม  
URL: <http://www.juckglea.com/page9.html>
- [14] ตารางมาตรฐานโอริง  
URL: <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=11712&section=9&rcount=Y>
- [15] Hughes-Hallett, Gleason, Mccallum, ET AL. 2010. Calculus : Single and Multivariable. 5th ED. Asia. Wiley.
- [16] แผนภาพการสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ แบบระบบปิด

เอกสาร URL: <http://www.kakoki.co.jp/english/products/p-013/img/fig1.png> ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



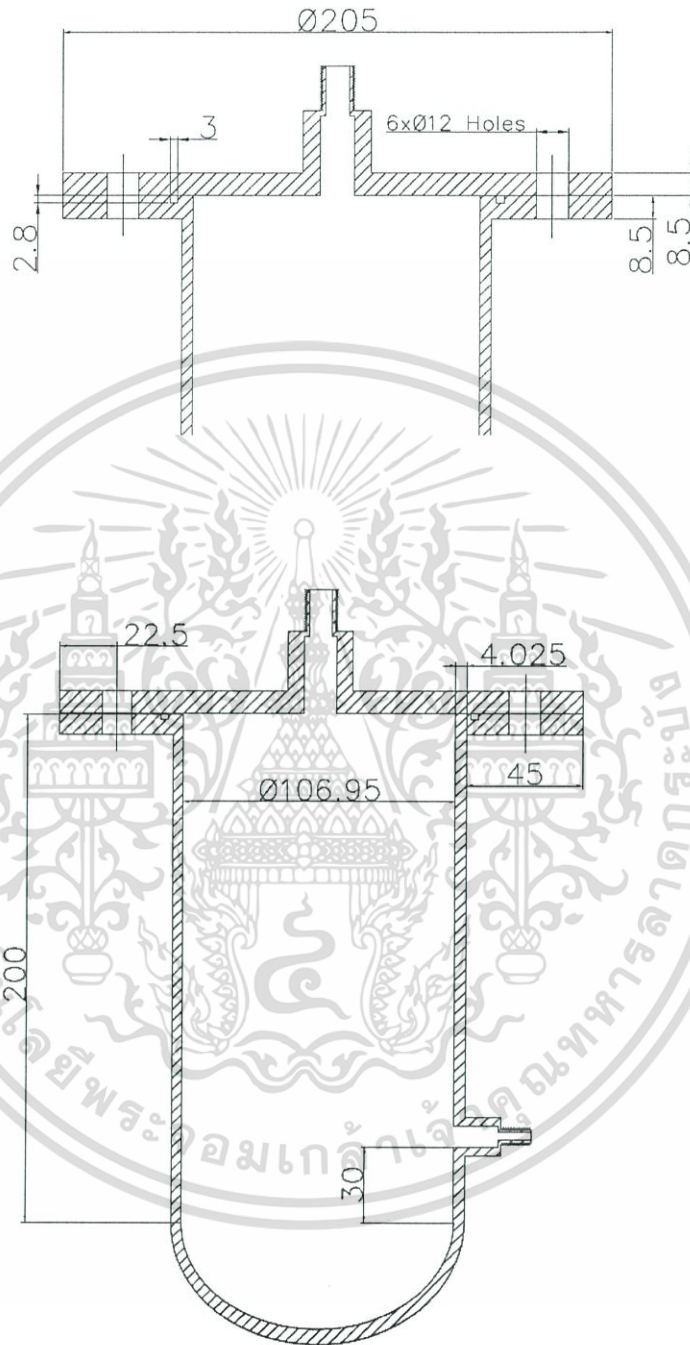
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
ภาพเขียนแบบหม้อความดัน



รูปที่ ก.1 ภาพเขียนแบบหม้อความดันสำหรับรอยแตกตัวของน้ำมันหอมระเหยบอกรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 ภาพเขียนแบบหม้อความดันสำหรับรอกแยกตัวของน้ำมันหอมระเหยบอกขนาดในหน่วยมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## ตารางที่ใช้ในการออกแบบหม้อความดัน และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตาราง ข.1 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 80 บาร์

ความดัน (bar)	สัดส่วนความดัน ( $P/P_{cr}$ )	อุณหภูมิ (Degree celsius)	สัดส่วนอุณหภูมิ ( $T/T_{cr}$ )	ตัวประกอบของการอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg.K)	ความหนาแน่น ( $Kg/m^3$ ) $\times 10^3$
80	1.08	20	0.963	0.110	0.189	1.31
80	1.08	30	0.996	0.190	0.189	0.735
80	1.08	40	1.02	0.270	0.189	0.501
80	1.08	50	1.06	0.440	0.189	0.297
80	1.08	60	1.09	0.550	0.189	0.231

ตาราง ข.2 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 90 บาร์

ความดัน (bar)	สัดส่วนความดัน ( $P/P_{cr}$ )	อุณหภูมิ (Degree celsius)	สัดส่วนอุณหภูมิ ( $T/T_{cr}$ )	ตัวประกอบของการอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg.K)	ความหนาแน่น ( $Kg/m^3$ ) $\times 10^3$
90	1.21	20	0.963	0.110	0.189	1.48
90	1.21	30	0.996	0.190	0.189	0.828
90	1.21	40	1.02	0.290	0.189	0.525
90	1.21	50	1.06	0.430	0.189	0.343
90	1.21	60	1.09	0.520	0.189	0.275

ตาราง ข.3 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 100 บาร์

ความดัน (bar)	สัดส่วนความดัน ( $P/P_{cr}$ )	อุณหภูมิ (Degree celsius)	สัดส่วนอุณหภูมิ ( $T/T_{cr}$ )	ตัวประกอบของการอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg.K)	ความหนาแน่น ( $Kg/m^3$ ) $\times 10^3$
100	1.35	20	0.963	0.110	0.189	1.64
100	1.35	30	0.996	0.190	0.189	0.920
100	1.35	40	1.02	0.280	0.189	0.604
100	1.35	50	1.06	0.430	0.189	0.381
100	1.35	60	1.09	0.510	0.189	0.311

ตาราง ข.4 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 110 บาร์

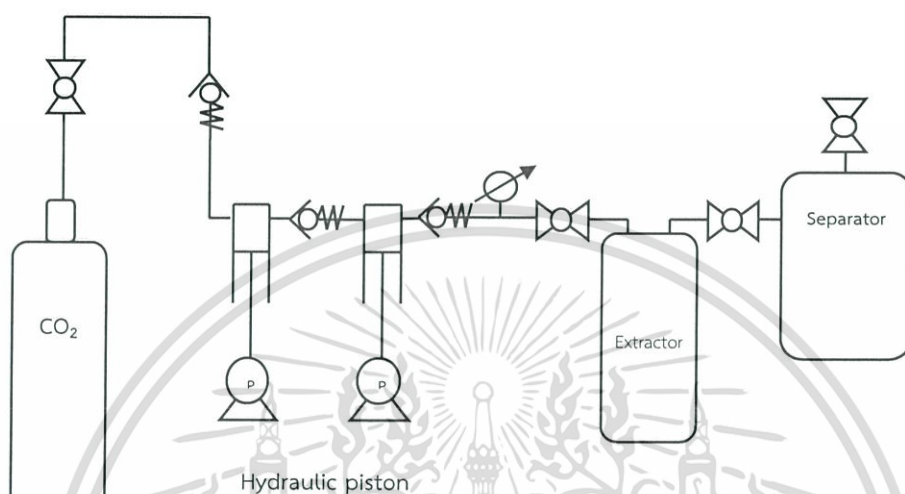
ความดัน (bar)	สัดส่วนความดัน ( $P/P_{cr}$ )	อุณหภูมิ (Degree celsius)	สัดส่วนอุณหภูมิ ( $T/T_{cr}$ )	ตัวประกอบของการอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg.K)	ความหนาแน่น ( $Kg/m^3$ ) $\times 10^3$
110	1.48	20	0.963	0.11	0.189	1.80
110	1.48	30	0.996	0.19	0.189	1.01
110	1.48	40	1.02	0.28	0.189	0.664
110	1.48	50	1.06	0.39	0.189	0.462
110	1.48	60	1.09	0.47	0.189	0.372

ตาราง ข.5 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 120 บาร์

ความดัน (bar)	สัดส่วนความดัน ( $P/P_{cr}$ )	อุณหภูมิ (Degree celsius)	สัดส่วนอุณหภูมิ ( $T/T_{cr}$ )	ตัวประกอบของการอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg.K)	ความหนาแน่น ( $Kg/m^3$ ) $\times 10^3$
120	1.62	20	0.963	0.11	0.189	1.97
120	1.62	30	0.996	0.19	0.189	1.10
120	1.62	40	1.02	0.28	0.189	0.724
120	1.62	50	1.06	0.36	0.189	0.546
120	1.62	60	1.09	0.42	0.189	0.454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.  
รูปอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ ค.1 แผนผังแสดงอุปกรณ์ในการทดลอง

หมายเหตุ



คือ วาล์วแบบลูกทรงกลม (Ball Valve) เป็นวาล์วที่เปิด และปิดโดยการหมุนลูกทรงกลมซึ่งมีรูเจาะผ่านศูนย์กลาง ในตำแหน่งเปิดเต็มทีรูดังกล่าวจะอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการไหล และจะปิดสนิทเมื่อหมุนทรงกลมไปเป็นมุม 90 องศา



คือ เซควาล์วแบบสปริง (Check Valve Spring Loaded) เป็นวาล์วที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการไหลย้อนกลับ โดยใช้สปริงเป็นตัวดันลูกเหล็กปิดเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับ



คือ เกจวัดความดัน (Pressure gauge) เป็นอุปกรณ์วัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.  
**สถานที่ติดต่อ และจัดซื้ออุปกรณ์**

1. บริษัท ศรีวิศาล เกษรา จำกัด เป็นโรงกลึง เหล็กกล้าไร้สนิม ผลิต ขายส่ง-ปลีก การผลิตโลหะชั้นมูลฐาน ติดต่อเพื่อสั่งทำหม้อความดันสำหรับบรอกแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย

ชอยฉลองกรุง 59 ถนน ฉลองกรุง ลำปลาทิว ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร. 0-2739-4283-4 แฟกซ์ 0-2737-2060

2. บริษัท สเป็คซัล จำกัด เป็นบริษัทรับออกแบบ และผลิตซิล ติดต่อเพื่อซื้อซิลของหม้อความดันสำหรับบรอกแยกตัวของน้ำมันหอมระเหย

99/5 ม.13 ต.บางแก้ว อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540 โทร. 0-2316-4262 แฟกซ์ 0-2316-4260

3. บริษัท นิวแม็ก จำกัด ตัวแทนจำหน่าย และนำเข้าอุปกรณ์นิวแมติก ไฮดรอลิก ออโตเมชัน ปัม วาล์ว ข้อต่อ ป้มลม ไส้กรอง ท่อ และอุปกรณ์อื่นๆ ติดต่อเพื่อซื้อวาล์วความดัน

107/1 ถ.เฉลิมพระเกียรติ ร.9 แขวงประเวศ เขตประเวศ กรุงเทพฯ 10250 โทร. 02-7268000 แฟกซ์ 02-7268266-9 อีเมลล์ sales@pneumax.co.th

4. บริษัท บ่วยกี (1999) จำกัด เป็นบริษัทจำหน่ายเหล็กกล้าไร้สนิม ติดต่อเพื่อซื้อท่อเหล็กกล้าไร้สนิม

55-55 ถนนตรีมิตร แขวงสัมพันธวงศ์ เขตสัมพันธวงศ์ กรุงเทพมหานคร 10100 โทร. 0-2235-9555-9 แฟกซ์ 0-2233-9988

5. ร้านชัยถาวรรุ่งเรือง ติดต่อเพื่อซื้อหม้อคาร์บอนไดออกไซด์

330/35 ม.10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร. 0-2738-6197