

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BERGAMOT-PEEL OIL SEPARATOR
USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE



รังสินันท์ ณ รังษี
ศรัณย์ โคตรมะณี
อัศวินท์ บุญเลื่อนส่ง

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BERGAMOT-PEEL OIL SEPARATOR
USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BERGAMOT-PEEL OIL SEPARATOR
USING 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 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BERGAMOT-PEEL OIL SEPARATOR USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

ผู้จัดทำ

- | | | |
|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. นายรังสินันท์ | ณ รังษี | รหัสประจำตัว 56011005 |
| 2. นายศรัณย์ | โคตรมะณี | รหัสประจำตัว 56011178 |
| 3. นายอัศวินท์ | บุญเลื่อนส่ง | รหัสประจำตัว 56011441 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.สยาม สงวนรัมย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด

นายรังสินันท์	ณ รังษี	56011005
นายศรัณย์	โคตรมะณี	56011178
นายอัศวินท์	บุญเลื่อนส่ง	56011441
อ.สยาม	สงวนรัมย์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

โครงการนี้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดออกจากคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ชั้นแรกเป็นการออกแบบให้อุปกรณ์แยกสามารถทนความดันได้สูงสุด 70 บาร์ จากนั้นนำอุปกรณ์ต่อพ่วงกับเครื่องสกัดน้ำมันผิวมะกรูด และทดลองสกัดที่สถานะต่าง ๆ พบว่าอุปกรณ์นี้แยกปริมาณน้ำมันได้สูงสุดร้อยละ 0.796 โดยน้ำหนัก ที่ 105 บาร์ 50 เซลเซียส

คำหลัก: อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด, คาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวด, การสกัดน้ำมันหอมระเหย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BERGAMOT-PEEL OIL SEPARATOR USING
SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

Rungsinan Na Rungsri 56011005
Sarun Kotmanee 56011178
Akrawin Boonlaunsong 56011441
Sayam Saguanrum Advisor
Year 2559

ABSTRACT

This project is to design and construct the separator which keeps bergamot-peel oil apart from the supercritical carbon dioxide. For the process of design is started at 70 bar. Then, the device is installed to extraction machine and an experiment is done at different state. The result shows that the separator separates 0.796 percent weight at 105 bar and 50 celsius.

Keywords: Bergamot-peel oil separator, Supercritical carbon dioxide, Fragrance-oil extraction

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ ขอขอบคุณอาจารย์สยาม สงวนรัมย์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ชี้แนะแนวทางในการทำปริญญาานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์สอบปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว, ผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล, ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ และ ผศ.มณฑล ใจกุลศล ที่ให้คำแนะนำเพื่อให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.สมเกียรติ ขวัญพุกฤษ์ ที่ช่วยทำให้ห้องทำโครงงานนี้เย็นขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ที่สนับสนุนวัตถุดิบในการทดลอง

ขอบคุณเพื่อน ๆ ผู้ร่วมทำปริญญาานิพนธ์ทุกคน ที่ให้ความร่วมมือและทุ่มเทร่างกาย แรงใจ จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณนางวาสนา ม่วงโพธิ์ นายทฤษฎ์ สิริโกศากร และเจ้าหน้าที่ทุกคนในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีส่วนในการอำนวยความสะดวกในเรื่องต่าง ๆ

น้อมรำลึกถึงครูบาอาจารย์ทุกท่าน ทั้งครูเจ้าของวิชา ครูผู้สืบทอดวิชา ครูผู้สอน ทั้งในโลกตะวันออกและตะวันตก

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้กำลังใจในการเรียนตลอดสี่ปี

คุณค่าอันเป็นประโยชน์พึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอถวายเป็นพระราชกุศลแด่ พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้า พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช สมเด็จพระเจ้าอยู่หัวมหาวชิราลงกรณ ตลอดจนบูรพกษัตริย์แห่งราชวงศ์จักรีทุกพระองค์ ขออุทิศแด่เจ้าพระยาสุรวงษ์ไวยวัฒน์ (วร บุนนาค) ศ.หลวงพรตพิทยพยัต ท่านเลี่ยม ตลอดจนทุกท่านที่สร้างคุณประโยชน์ให้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนึ่งหากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำกราบขออภัยในโอกาสนี้ด้วย

นายรังสินันท์ ณ รังษี

นายศรัณย์ โคตรมะณี

นายอัศวินท์ บุญเลื่อนส่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญ (ต่อ).....	V
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมติฐาน.....	1
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	1
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	1
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.7 แผนการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีของไหลวิกฤตยิ่งยวด.....	3
2.1.1 คุณสมบัติของของไหลวิกฤตยิ่งยวด.....	5
2.1.2 ผลของความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้สกัดต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด.....	5
2.2 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด.....	7
2.2.1 การคำนวณหาปริมาตร.....	7
2.2.2 การคำนวณหาความเค้นและตัวประกอบความปลอดภัย.....	9
2.2.3 การคำนวณขนาดของโบลต์.....	14
2.3 การเลือกใช้โริง.....	19
2.3.1 การบอกขนาดของโริง.....	20
2.3.2 การหามิติต่าง ๆ ของโริง.....	20
2.4 การเลือกใช้ฟิลเตอร์.....	21
2.4.1 การเลือกใช้วัสดุฟิลเตอร์.....	21
2.4.2 การออกแบบฟิลเตอร์.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	22
3.1 จำนวนปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด	22
3.1.1 ปริมาตรของกรวย	24
3.1.2 ปริมาตรของทรงกระบอก	24
3.1.3 ความสูงของทรงกระบอก	24
3.2 จำนวนความเค้นและตัวประกอบความปลอดภัย	25
3.2.1 ความเค้นและตัวประกอบความปลอดภัยของทรงกระบอก.....	25
3.3 จำนวนโบลต์.....	28
3.4 จำนวนและเลือกชนิดของโอริง	31
3.5 ออกแบบการทดลอง	31
3.6 ขั้นตอนการทดลอง.....	32
3.7 สรุปผลการดำเนินการ.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	33
4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้สกัดน้ำมันผิวมะกรูด	33
4.1.1 อุณหภูมิคงที่ 50 เซลเซียส.....	33
4.1.2 ความดันคงที่ 105 บาร์	34
4.2 ผลของเวลาที่ใช้สกัดน้ำมันผิวมะกรูด.....	35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการทดลอง	38
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	38
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	38
บรรณานุกรม	39
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก.....	41
ภาคผนวก ข.....	42
ภาคผนวก ค.....	44
ภาคผนวก ง	45
ภาคผนวก จ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงวิภูภาคและสถานะวิกฤตของสารบริสุทธิ์.....	3
2.2 แผนภาพแสดงแบบจำลองโลจิสติก ระหว่างร้อยละน้ำมันผิวมะกรูดและเวลาที่ใช้สกัด.....	6
2.3 แผนภาพแสดงตัวประกอบของการอัดตัวได้ของก๊าซ	8
2.4 แผนภาพแสดงความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำต่อผิวทรงกระบอก	9
2.5 แผนภาพแสดงความดันที่กระทำต่อทรงกระบอก	9
2.6 แผนภาพแสดงวงกลมของมอห์ร์.....	11
2.7 แผนภาพแสดงความเค้นที่กระทำต่อผิวทรงกระบอก ณ จุด A	12
2.8 แผนภาพแสดงโบลต์และนัตที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงอันเนื่องมาจากการขันโบลต์และแรงเนื่องจากความดันภายในมากกระทำ.....	14
2.9 แผนภาพแสดงความเค้น-ความเครียด เมื่อมีแรงดึงมากกระทำ.....	15
2.10 แผนภาพแสดงโบลต์และนัตที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงอันเนื่องมาจากการขันโบลต์และแรงเนื่องจากความดันภายในมากกระทำ.....	15
2.11 แผนภาพแสดงตัวแปรที่ใช้หาขนาดของโริง.....	20
4.1 กราฟแสดงผลของความดันที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที.....	33
4.2 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 บาร์ เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที.....	34
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไป ต่อร้อยละน้ำหนักน้ำมัน และร้อยละน้ำหนักน้ำมัน	36
4.4 แบบจำลองโลจิสติกแสดงผลของเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส	37
ก.1 ภาพเขียนแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด.....	41
ค.1 แผนผังแสดงชุดอุปกรณ์ในการทดลอง	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแสดงแผนการดำเนินงาน	2
2.1 ตารางแสดงค่าคงที่วิกฤตของตัวทำละลายบางชนิดที่ใช้เป็นตัวทำละลายของการสกัดสารด้วย ของไหลวิกฤตยิ่งยวด	4
2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ระหว่างของไหลวิกฤตยิ่งยวด ก๊าซและของเหลว ของคาร์บอนไดออกไซด์	4
2.3 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ทำโอริง	19
3.1 ตารางแสดงขนาดท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน	23
4.1 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที	33
4.2 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 บาร์ เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที	34
4.3 ตารางแสดงผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส	35
4.4 ตารางแสดงค่าของร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไป และร้อยละ น้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อร้อยละน้ำหนักน้ำมัน	36
ข.1 ตารางแสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันผิวมะกรูดที่ความดัน 75 บาร์	42
ข.2 ตารางแสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันผิวมะกรูดที่ความดัน 90 บาร์	42
ข.3 ตารางแสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันผิวมะกรูดที่ความดัน 105 บาร์	43
ข.4 ตารางแสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันผิวมะกรูดที่ความดัน 120 บาร์	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสกัดน้ำมันผิวมะกรูดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical carbon dioxide, SCC) เป็นการสกัดด้วยตัวทำละลายที่เป็นก๊าซเฉื่อยต่อปฏิกิริยา ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดด้วยเอสซีซี มีความบริสุทธิ์สูง การสกัดทำที่อุณหภูมิประมาณอุณหภูมิห้อง ทำให้กลิ่นที่ได้คงความเป็นธรรมชาติ ปัญหาจากโครงการที่ผ่านมา [1] ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดต่ำ การสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดจะช่วยทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดให้ทนทานต่อความดันที่ใช้สกัด
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- 1.2.3 เพื่อหาความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สกัดที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุด

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 คาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติอัดตัวได้
- 1.3.2 วัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์เป็นของผสมเนื้อเดียว (Homogeneous mixture)

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดที่ทนแรงดันได้ 70 บาร์

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลการสกัดน้ำมันผิวมะกรูดด้วยเอสซีซี เพื่อทำการออกแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดที่ทนความดันได้สูงสุด 70 บาร์

การสกัดน้ำมันผิวมะกรูดใช้เอสซีซีเป็นตัวทำละลาย ตัวทำละลายนี้ใช้ทฤษฎีของไหลวิกฤตยิ่งยวดและทฤษฎีก๊าซจริงในการออกแบบ ส่วนวัสดุสร้างอุปกรณ์ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมโดยทฤษฎีผนังความดันและทฤษฎีวงกลมมอห์ตถูกใช้ในการคำนวณ และใช้ตัวยึดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทฤษฎีการรับภาระก่อนของตัวยึดภายใต้การรับแรงดึงและทฤษฎีการรับภาระก่อนของโบลต์ภายใต้การรับแรงกระทำแบบสถิตถูกนำมาใช้ในการคำนวณขนาดและจำนวนของตัวยึด

ทดลองสกัดที่ความดัน อุณหภูมิแตกต่างกันเพื่อหาจุดที่เหมาะสมต่อการสกัดน้ำมันผิวมะกรูด และทดลองสกัดที่เวลาต่าง ๆ จะพบว่าผลของเวลาที่ใช้สกัดสอดคล้องกับแบบจำลองโลจิสติก

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดทนทานต่อแรงดันที่ใช้สกัด
- 1.6.2 อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- 1.6.3 หาความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สกัดที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุดได้

1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงแผนการดำเนินงาน

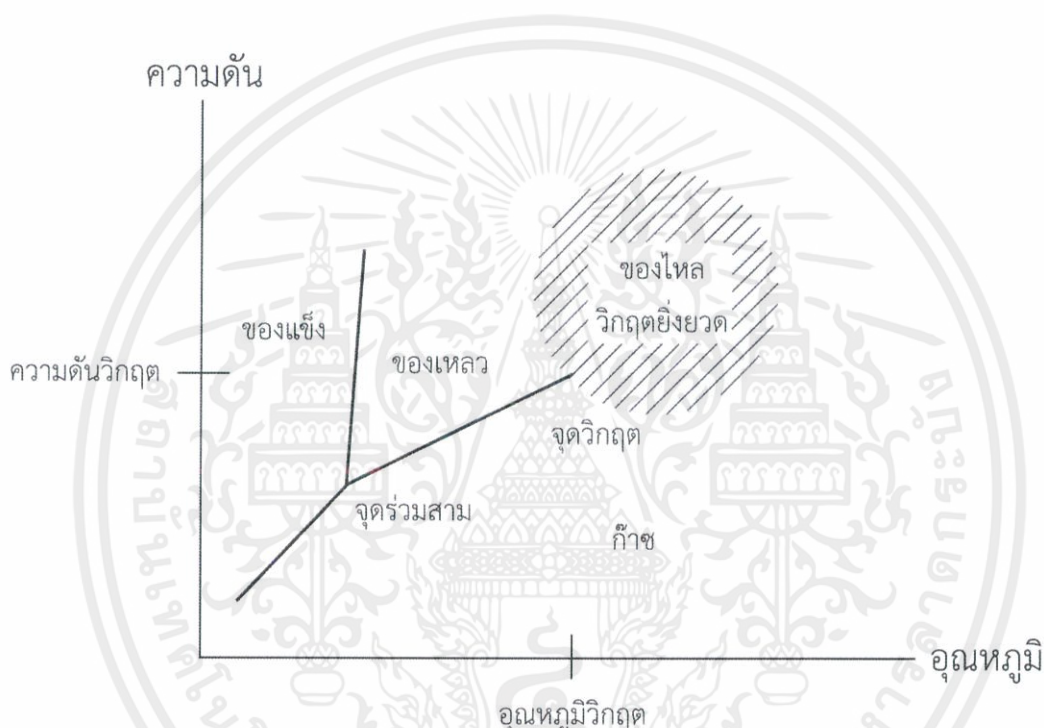
กิจกรรม	ปี 2559				ปี 2560				
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาข้อมูลงานวิจัยในอดีต									
2.ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง									
3.ออกแบบงานวิจัย									
4.คำนวณงานวิจัย									
5.ตรวจสอบความถูกต้อง									
6.สร้างชิ้นงานวิจัย									
7.ทดลองและบันทึกผลการทดลอง									
8.จัดทำข้อมูลและสรุปผลการทดลอง									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของไหลวิกฤตยิ่งยวด

ของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีคุณสมบัติที่ดีทั้งของเหลวและก๊าซ คือ มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลว มีความสามารถในการแพร่ใกล้เคียงกับก๊าซ และยังมีค่าความหนืดที่เหมาะสม ทำให้เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ดี [2]



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงวัฏภาคและสถานะวิกฤตของสารบริสุทธิ์

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

ของไหลวิกฤตยิ่งยวดที่นิยมใช้คือคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะที่จุดวิกฤตมีอุณหภูมิราว 31.1 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสถานะในย่านวิกฤตยิ่งยวดหรือเอสซีซีเป็นตัวทำละลายที่ดี เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและไม่เกิดการตกค้างในตัวถูกละลาย

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าคงที่วิกฤตของตัวทำละลายบางชนิดที่ใช้เป็นตัวทำละลายของการสกัด สารด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด [3]

สารประกอบ	อุณหภูมิวิกฤต		ความดันวิกฤต		ความหนาแน่น วิกฤต (g/mL)
	K	°C	MPa	bar (atm)	
เอทิลีน	283.0	9.9	5.12	51.2 (50.5)	0.23
คาร์บอนไดออกไซด์	304.1	31	7.39	73.9 (72.9)	0.47
ไนตรัสออกไซด์	309.6	36.5	7.26	72.6 (71.7)	0.46
โพรเพน	369.8	96.7	4.26	42.6 (42.0)	0.22
ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	318.8	45.7	3.76	37.6 (37.1)	0.75
เมทานอล	513.4	240.3	7.99	79.9 (78.9)	0.27
น้ำ	627.0	363.9	22.1	221.0 (218.1)	0.32
แอมโมเนีย	405.4	132.3	11.3	113.0 (111.5)	0.24
เอ็น-เพนเทน	469.8	196.7	3.37	33.7 (33.3)	0.23

ของไหลวิกฤตยิ่งยวด หากนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย อนุภาคของแข็งที่เป็นตัวถูกละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลวิกฤตยิ่งยวดและเกิดการถ่ายพลังงานไอออระหว่างอนุภาคกับอนุภาค ทำให้เอนทัลปีลดลงและเกิดการละลายได้ดี นอกจากนี้ของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่ใกล้เคียงกับก๊าซ ทำให้สามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างของของแข็งได้ดี ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ระหว่างของไหลวิกฤตยิ่งยวด ก๊าซและของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์ [4]

วิฤภาคของ คาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์		สารเนฟทาซีนในคาร์บอนไดออกไซด์ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m ² /s)
	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความหนืด (μPa·s)	
ก๊าซ 313 เคลวิน, 1 บาร์	2	16	5.1×10 ⁻⁶
วิกฤตยิ่งยวด 313 เคลวิน, 100 บาร์	632	17	1.4×10 ⁻⁸
ของเหลว 300 เคลวิน, 500 บาร์	1029	133	8.7×10 ⁻⁹

จากตารางที่ 2.2 ของโพลีเอทิลีนยวดยิ่งถูกใช้เป็นตัวสกัดของเหลวเพราะมีอัตราการถ่ายเทมวลเร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลายดีกว่า จากการศึกษาเปรียบเทียบการสกัดระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของเหลวและเอเอสซีซี พบว่าเอเอสซีซีจะมีอัตราการสกัดสูงกว่าประมาณ 2.5 เท่า [5]

2.1.1 คุณสมบัติของของโพลีเอทิลีนยวดยิ่งที่ส่งผลให้การสกัดเกิดขึ้นได้ดีกว่าตัวทำละลายของเหลวทั่วไป [2]

2.1.1.1 คุณสมบัติการถ่ายเท (Transportation property)

ตัวทำละลายที่มีความหนืดต่ำ สัมประสิทธิ์การแพร่สูง ระยะทางในการแพร่ลดลง ปริมาณสารที่สกัดได้เพิ่มขึ้น ความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน การปรับอุณหภูมิและความดันให้เหมาะสมจะทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น คุณสมบัติแบบก้ำกึ่งนี้สอดคล้องกับคุณสมบัติของของโพลีเอทิลีนยวดยิ่ง

2.1.1.2 คุณสมบัติในการละลายของตัวทำละลาย (Solvent power property)

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การละลายของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น แต่ถ้าการละลายของตัวถูกละลายมีค่าลดลง สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มความดันเพื่อเพิ่มความหนาแน่นจนใกล้เคียงกับสถานะเริ่มต้นแล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิ

2.1.1.3 คุณสมบัติในการเลือกสกัด (Selectivity property)

การสกัดน้ำมันผิวมะกรูดสามารถปรับอุณหภูมิและความดันเพื่อให้มีความสามารถในการละลายที่เหมาะสมที่ต้องการ ตัวทำละลายจะถูกปรับให้อยู่ใกล้สถานะโพลีเอทิลีนยวดยิ่ง ดังนั้นของโพลีเอทิลีนยวดยิ่งมีคุณสมบัติในการเลือกสกัด สามารถใช้ในการสกัดลำดับส่วนได้

2.1.2 ผลของความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สกัดต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด

2.1.2.1 ผลของความดันเมื่ออุณหภูมิคงที่

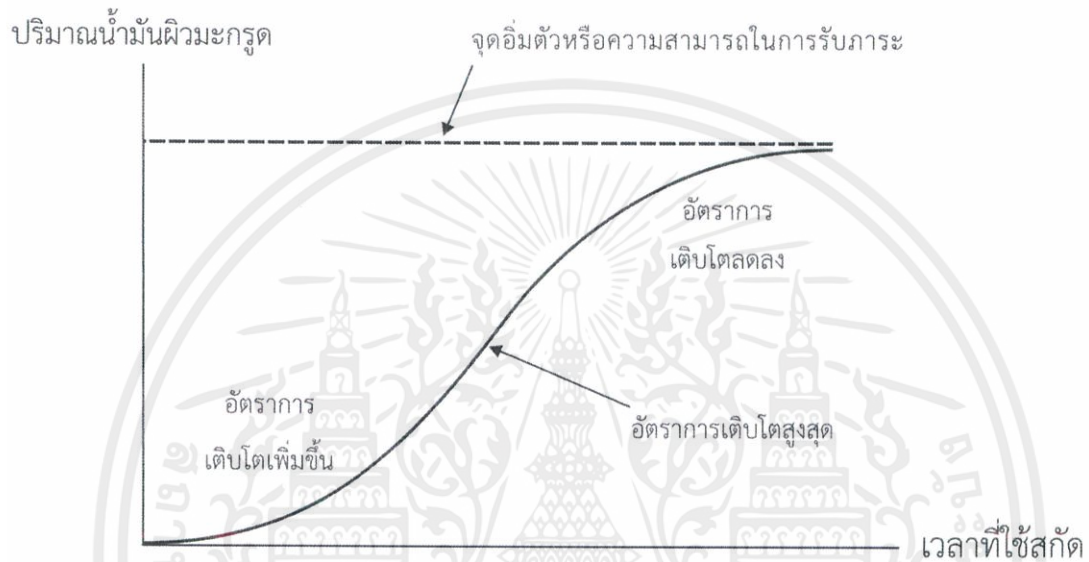
การเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของของโพลีเอทิลีนยวดยิ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาแน่นของของโพลีเอทิลีนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นตามสมการสถานะก้ำกึ่งจริงแบบอัดตัวได้ $P = \rho ZRT$

2.1.2.2 ผลของอุณหภูมิเมื่อความดันคงที่

อุณหภูมิส่งผลต่อการสกัดน้ำมันผิวมะกรูด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของของโพลีเอทิลีนยวดยิ่งลดลง ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิลดลงส่งผลให้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของของโพลีเอทิลีนยวดยิ่งเพิ่มขึ้น

2.1.2.3 ผลของเวลาที่ใช้สกัด

ช่วงแรกของการสกัด อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดยังคงเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดลดลง จนถึงจุดที่ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดเริ่มคงที่เรียกว่าค่าอิ่มตัว (Saturated value) หรือความสามารถในการรับภาระ (Carrying capacity) ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองโลจิสติกดังแสดงในรูปที่ 2.2 แกนตั้งคือ ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดที่สกัดได้ แกนนอนคือเวลาที่ใช้สกัด



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงแบบจำลองโลจิสติก ระหว่างร้อยละน้ำมันผิวมะกรูดและเวลาที่ใช้สกัด

2.2 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด

2.2.1 การคำนวณหาปริมาตร

การสกัดน้ำมันผิวมะกรูดด้วยเอสซีซี ไม่สามารถสมมติเป็นก๊าซอุดมคติได้ เราใช้ทฤษฎีก๊าซจริงของอุณหพลศาสตร์ในการคำนวณหาปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด บริเวณจุดวิกฤตมีความดันและอุณหภูมิสูงเนื่องจากมีพฤติกรรมต่างจากก๊าซอุดมคติโดยอ้างอิงถึงความแตกต่างระหว่างอะตอมและโมเลกุลของก๊าซ สำหรับสมการก๊าซจริงถูกปรับแก้มาจากสมการก๊าซอุดมคติด้วยตัวประกอบอัดตัวได้ (Compressibility factor, Z) ดังสมการ

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

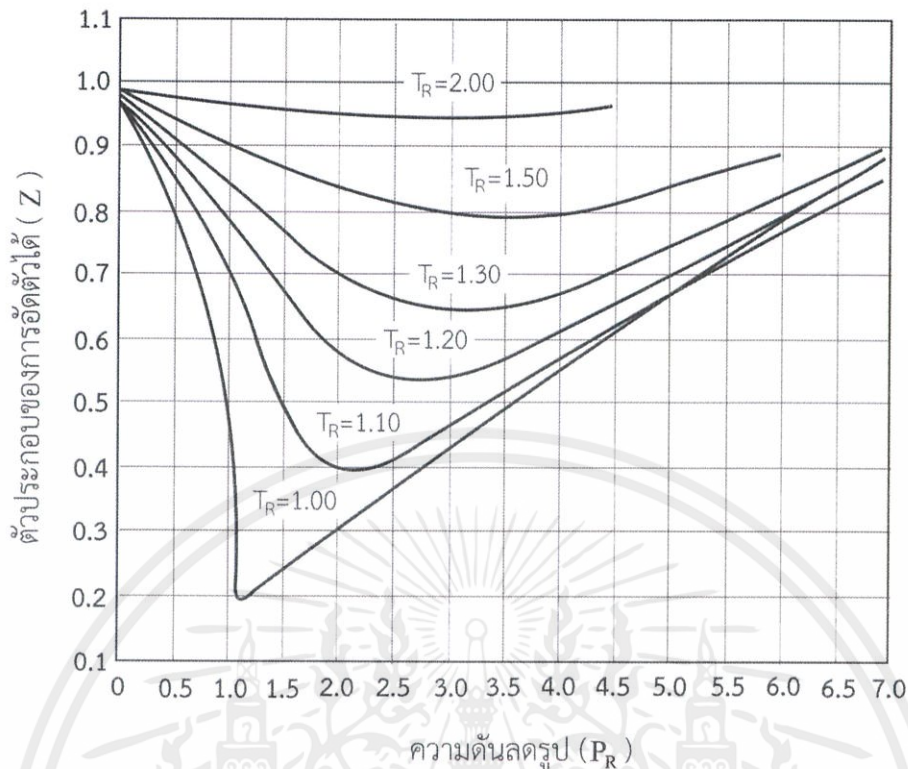
เมื่อ	P	คือ ความดัน
	v	คือ ปริมาตรจำเพาะ
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ
	T	คือ อุณหภูมิ
โดยที่	$Z = 1$	เป็นก๊าซอุดมคติ
	$Z < 1$ หรือ $Z > 1$	เป็นก๊าซจริง

ตัวประกอบอัดตัวได้ของทุก ๆ ก๊าซจะเปลี่ยนไปตามความดันลดรูป (Reduced pressure, P_R) และอุณหภูมิลดรูป (Reduced temperature, T_R) สามารถหาได้จากกราฟรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบอัดตัวได้ ความดันลดรูป และอุณหภูมิลดรูป โดยที่

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

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

เมื่อ	P_{cr}	คือ ความดันจุดวิกฤต (Critical pressure)
	T_{cr}	คือ อุณหภูมิจุดวิกฤต (Critical temperature)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงตัวประกอบของการอัดตัวได้ของก๊าซ

การคำนวณหาปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด (Separator) ใช้ทฤษฎีก๊าซจริง ดังนี้

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

เมื่อ	P_{ext}	คือ ความดันของหม้อสกัด
	P_{sep}	คือ ความดันของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
	V_{ext}	คือ ปริมาตรของหม้อสกัด
	V_{sep}	คือ ปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
	Z_{ext}	คือ ตัวประกอบของการอัดตัวได้ภายในหม้อสกัด
	Z_{sep}	คือ ตัวประกอบของการอัดตัวได้ภายในอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
	T_{ext}	คือ อุณหภูมิของหม้อสกัด
	T_{sep}	คือ อุณหภูมิของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาความสูงของทรงกระบอก หาได้จาก

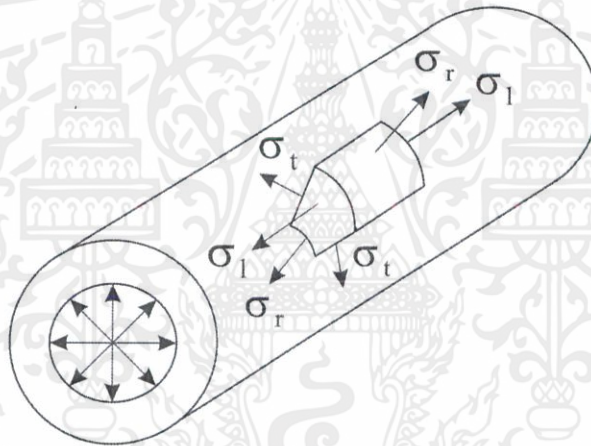
$$V = \pi r^2 h \quad (5)$$

- เมื่อ V คือ ปริมาตรของทรงกระบอก
 h คือ ความสูงของทรงกระบอก
 r คือ รัศมีภายในของทรงกระบอก

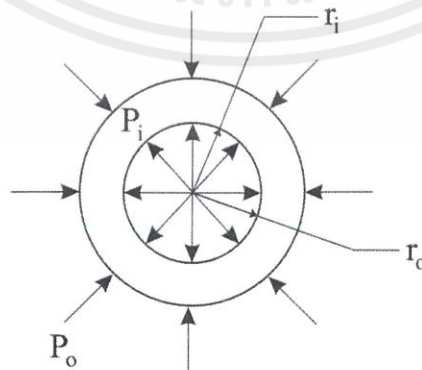
2.2.2 การคำนวณหาความเค้นและตัวประกอบความปลอดภัย

2.2.2.1 ทฤษฎีความเค้นบนผนังของถังความดัน (Thick wall theory)

การคำนวณหาความหนาของอุปกรณ์แยกน้ำมันปิโตรเลียมจะต้องคำนึงถึงความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผนังของหม้อความดันโดยอ้างอิงจากทฤษฎีความเค้นบนผนังของถังความดัน (Thick wall theory) เนื่องจากอัตราส่วนของรัศมีภายในกับความหนา มีค่าน้อยกว่า 20 ดังนี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำต่อผิวทรงกระบอก



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงความดันที่กระทำต่อทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ใช้ในการคำนวณความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำต่อผิวทรงกระบอก

ก) ความเค้นแนวสัมผัส (Tangential stress)

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (6)$$

ข) ความเค้นแนวรัศมี (Radial stress)

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (7)$$

ค) ความเค้นแนวยาว (Longitudinal stress)

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (8)$$

ง) ความเค้นเฉือน (Shear stress)

$$\tau_{xy} = \left| \frac{\sigma_r - \sigma_t}{2} \right| \quad (9)$$

เมื่อ	σ_t	คือ ความเค้นแนวสัมผัส
	σ_r	คือ ความเค้นแนวรัศมี
	σ_l	คือ ความเค้นแนวยาว
	τ_{xy}	คือ ความเค้นเฉือน
	P_i	คือ ความดันภายใน
	P_o	คือ ความดันภายนอก
	r_i	คือ รัศมีภายใน
	r_o	คือ รัศมีภายนอก

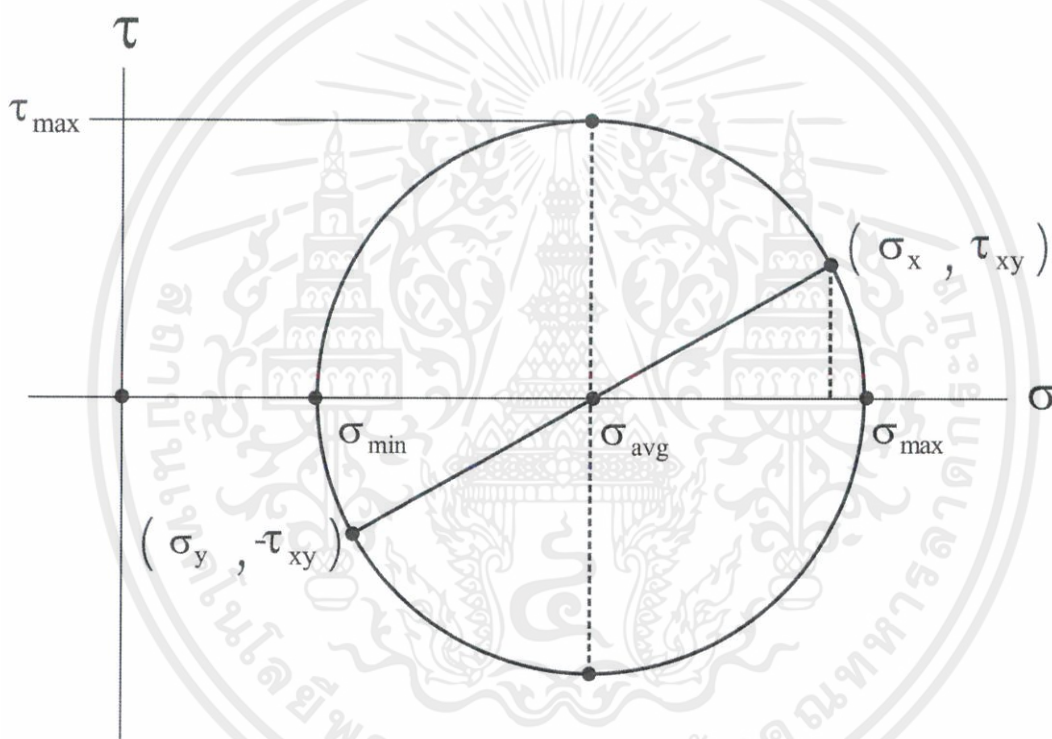
กำหนดให้ $r_i \leq r \leq r_o$ ใช้ $r = r_i$ เนื่องจากพิจารณาความดันที่ผิวด้านในของทรงกระบอกเป็นหลัก

2.2.2.2 ทฤษฎีวงกลมของมอห์ร์ (Mohr's circle)

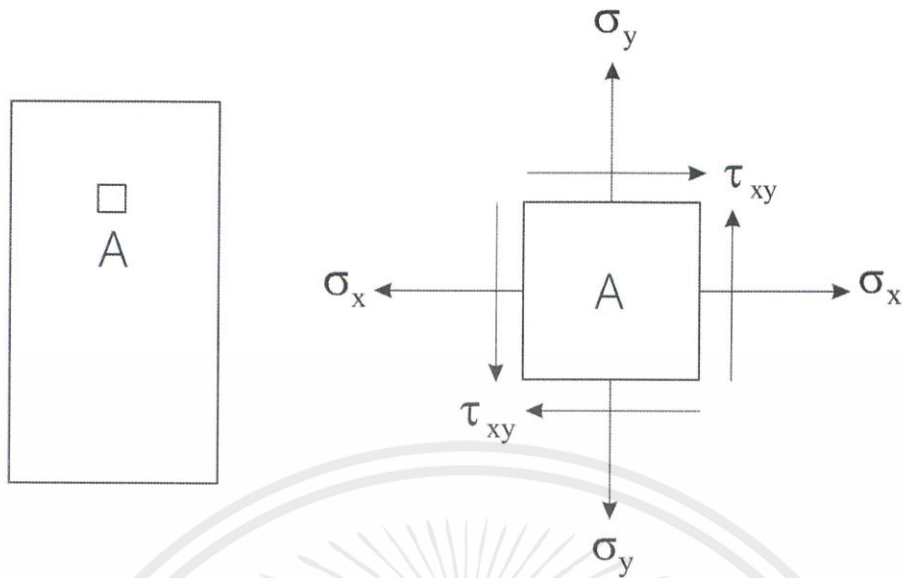
วงกลมของมอห์ร์เป็นเครื่องมือการคำนวณชนิดหนึ่งที่ใช้แสดงความหมายของสมการออกมาในเชิงรูปภาพ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

ก) เพื่อให้รู้และเข้าใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าขององค์ประกอบความเค้นเมื่อมุมมีค่าแปรเปลี่ยนไป

ข) เพื่อให้รู้และเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรง (Stress transformation) ในระนาบที่จุดใด ๆ บนชิ้นส่วนของโครงสร้าง เพื่อหาหน่วยแรงหลัก (Principal stresses) และหน่วยแรงเฉือนในระนาบสูงสุด (Maximum in-plane shear stress) ที่เกิดขึ้นที่จุดดังกล่าว โดยการใช้สมการแปลงหน่วยแรงร่วมด้วย



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงวงกลมของมอห์ร์ (Mohr's circle)



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงความเค้นที่กระทำต่อผิวทรงกระบอก ณ จุด A

สมการที่ใช้ในการคำนวณความเค้นต่าง ๆ ในวงกลมของมอห์ร์

ก) จุดศูนย์กลางของวงกลมมอห์ร์ (Center of Mohr's circle)

$$\sigma_{\text{avg}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (10)$$

ข) รัศมีของวงกลมมอห์ร์ (Radius of Mohr's circle)

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (11)$$

ค) ความเค้นสูงสุดของวงกลมมอห์ร์ (Maximum stress of Mohr's circle)

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (12)$$

ง) ความเค้นต่ำสุดของวงกลมมอห์ร์ (Minimum stress of Mohr's circle)

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (13)$$

จ) ความเค้นเฉือนสูงสุดของวงกลมมอห์ร์ (Maximum shear stress of Mohr's circle)

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (14)$$

เมื่อ	σ_{avg}	คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมมอห์ร์
	R	คือ รัศมีของวงกลมมอห์ร์
	σ_{max}	คือ ความเค้นสูงสุดของวงกลมมอห์ร์
	σ_{min}	คือ ความเค้นต่ำสุดของวงกลมมอห์ร์
	τ_{max}	คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดของวงกลมมอห์ร์
	σ_x	คือ ความเค้นแนวสัมผัส
	σ_y	คือ ความเค้นแนวยาว
	τ_{xy}	คือ ความเค้นเฉือน

นอกจากนี้ความหนาที่เลือกใช้ต้องคำนวณแล้วทำให้ค่าความเค้นสูงสุดและความเค้นเฉือนสูงสุดไม่เกินค่าคุณสมบัติของวัสดุที่เลือกใช้ ตรวจสอบจากการหาตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor, S.F.)

ตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับความเค้นดึง :

$$\text{S.F.}_{\text{tensile}} = \frac{\sigma_{\text{yield}}}{\sigma_{\text{max}}} \quad (15)$$

ตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับความเค้นเฉือน :

$$\text{S.F.}_{\text{shear}} = \frac{\tau_{\text{yield}}}{\tau_{\text{max}}} \quad (16)$$

โดยที่ S.F. > 1

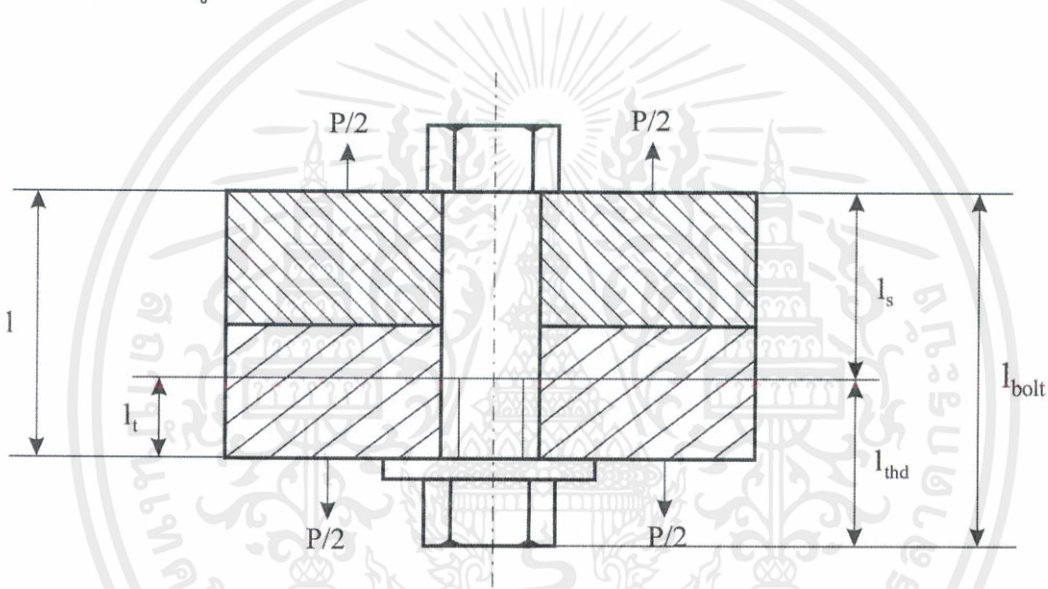
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การคำนวณขนาดของโบลต์

อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด ถูกออกแบบให้สามารถเปิดปิดได้สะดวกเพื่ออำนวยความสะดวกบำรุงรักษาและทำความสะอาดอุปกรณ์ดักจับน้ำมันที่อยู่ภายใน การออกแบบจึงเลือกใช้โบลต์ยึดระหว่างตัวถังและฝาปิด ขนาดของโบลต์สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนในภาวะสถิต (Preloaded fasteners in static loading theory)

2.2.3.1 ทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนในภาวะแรงดึง (Preloaded fastener in tension theory)

โบลต์และนัตถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงเนื่องจากความดันภายในอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดมากกระทำขนาด P นั่นคือชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะถูกแรงดึงขนาด $P/2$ มากกระทำดังแสดงในรูปที่ 2.8

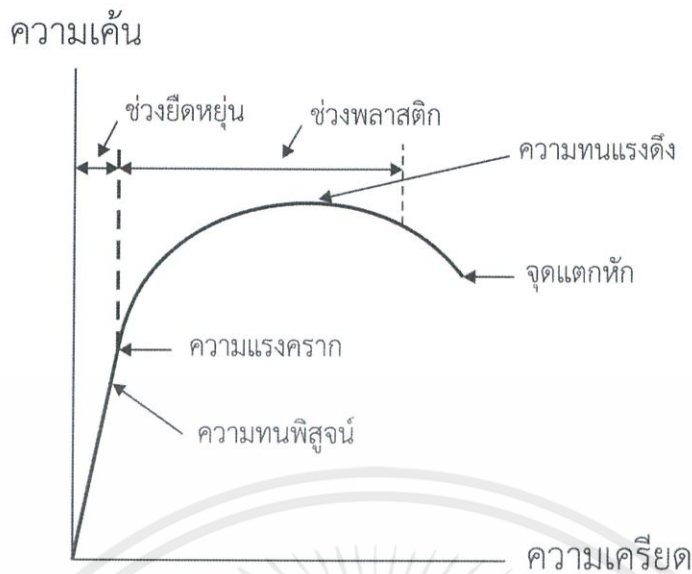


รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงโบลต์และนัตที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงอันเนื่องมาจากการขึ้นโบลต์และแรงเนื่องจากความดันภายในมากกระทำ

การวิเคราะห์เพื่อหาแรงที่กระทำต่อโบลต์ที่เกิดจากความดันภายในดังแสดงในรูปที่ 2.8 มีการวิเคราะห์หาความยาวเกลียวในแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ความยาวของโบลต์ และความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Stiffness of material : K)

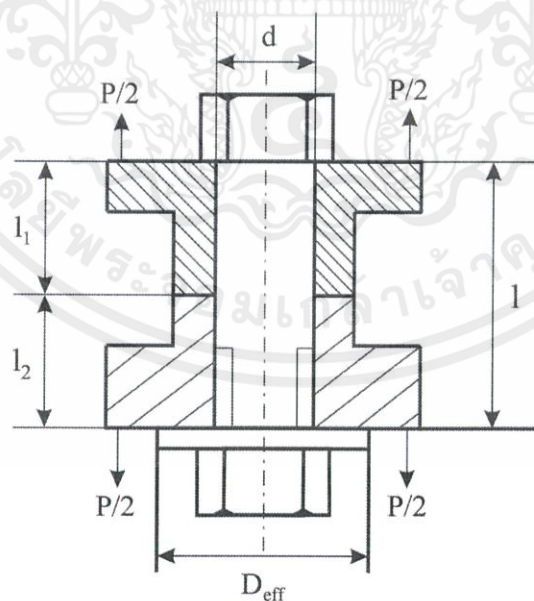
ชิ้นส่วนแต่ละชนิดมีค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุแตกต่างกัน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรักษาสภาพเดิมของชิ้นส่วน หากมีแรงมากกระทำกับชิ้นส่วนส่งผลให้เกิดระยะโก่ง โดยระยะโก่งขึ้นอยู่กับความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุ ซึ่งหาได้จาก

$$K = \frac{P}{\text{deflection}} = \frac{AE}{L} \quad (17)$$



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงความเค้น-ความเครียด เมื่อมีแรงดึงมากกระทำ

ชิ้นงานประกอบที่รับแรงแบบสถิตจะสมมติให้การรับภาระก่อน มีค่าเท่ากับร้อยละ 90 ของความทนพิสูจน์ (Proof strength, σ_p) เมื่อ ความทนพิสูจน์ คือ ความทนที่โบลต์เริ่มเข้าสู่ช่วงพลาสติกหรือการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ซึ่งใกล้เคียงกับความแรงคราก โดยทั่วไปความทนพิสูจน์มีค่าประมาณร้อยละ 85 ถึงร้อยละ 95 ของความแรงคราก ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงโบลต์และนัตที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงอันเนื่องมาจากการขันโบลต์และแรงเนื่องจากความดันภายในมากกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เพื่อหาแรงที่กระทำต่อโบลต์ที่เกิดจากความดันภายในถังดังแสดงในรูปที่ 2.10 มีการวิเคราะห์หาพื้นที่รับแรงของแหวน ความหนาของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และตัวประกอบความปลอดภัย

สำหรับโบลต์ เส้นผ่านศูนย์กลาง (d), ความหนาของวัสดุที่โบลต์ยึด (l) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ความต้านทานการเสีรูปร่างของโบลต์หาได้จาก

$$K_b = \left(\frac{A_t A_b}{A_b I_t + A_t I_s} \right) \cdot E_b \quad (18)$$

- เมื่อ K_b คือ ค่าความยืดหยุ่นของโบลต์
 A_t คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับความเค้นดึงของโบลต์
 A_b คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด
 I_t คือ ความยาวของส่วนที่เป็นเกลียวที่รับแรงตามแนวแกน
 I_s คือ ความยาวของส่วนที่ไม่เป็นเกลียว
 E_b คือ ค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นของโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม

ความยาวของส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (I_s) หาได้จาก

$$I_s = l - I_t \quad (19)$$

ความยาวของส่วนที่เป็นเกลียว (I_{thd}) ตามการใช้โบลต์มาตรฐานสหรัฐอเมริกาหาได้จาก

$$I_{thd} = 2d + 6 \quad (20)$$

ความต้านทานการเสีรูปร่างของวัสดุ (K_m) หาได้จาก

$$\frac{1}{K_m} = \frac{l_1}{A_{m_1} E_1} + \frac{l_2}{A_{m_2} E_2} = \frac{4l_1}{\pi D_{eff_1}^2 E_1} + \frac{4l_2}{\pi D_{eff_2}^2 E_2} \quad (21)$$

- เมื่อ A_m คือ พื้นที่ประสิทธิผลของวัสดุที่ถูกเชื่อมต่อกัน
 (Effective areas of clamped materials)
 D_{eff} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของวัสดุที่ถูกเชื่อมต่อกัน
 (Effective diameters of clamped materials)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าชิ้นงานประกอบเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

$$K_m = \frac{\pi D_{eff}^2 E_m}{4l} \quad (22)$$

$$K_m = \frac{A_m E_m}{4l} \quad (23)$$

2.2.3.2 ทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนของโบลต์ในภาวะสถิต (Preloaded bolts under static loading theory)

กำหนดให้ P เป็นแรงภายนอกที่มากระทำที่ข้อต่อ, P_b เป็นแรงที่กระทำต่อโบลต์ และ P_m เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน ได้สมการสมดุลของแรง ดังนี้

$$P = P_m + P_b \quad (24)$$

แรงที่กระทำต่อโบลต์ (P_b) หาได้จาก

$$P_b = C \cdot P \quad (25)$$

แรงที่กระทำต่อชิ้นงาน (P_m) หาได้จาก

$$P_m = (1 - C) \cdot P \quad (26)$$

เมื่อ P คือ แรงภายนอกที่มากระทำที่ข้อต่อ

C คือ ค่าคงที่ข้อต่อ (Joint constant) โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า 1 หาได้จาก

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m} \quad (27)$$

แรงกดที่กระทำกับวัสดุ (F_m) หาได้จาก

$$F_m = F_i - P_b \quad (28)$$

แรงดึงที่กระทำกับโบลต์ (F_b) หาได้จาก

$$F_b = F_i + P_b \quad (29)$$

โดยที่ F_i คือ ภาระรับก่อน หาได้จาก

$$F_i = 0.9\sigma_p A_t \quad ; \text{ สำหรับแรงสถิต} \quad (30)$$

ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์ ($S.F._{bolt}$) หาได้จาก

$$S.F._{bolt} = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{bolt}} \quad (31)$$

ความเค้นดึงสูงสุดที่กระทำต่อโบลต์ (σ_{bolt}) หาได้จากสมการ

$$\sigma_{bolt} = \frac{F_b}{A_t} \quad (32)$$

เมื่อ

- F_i คือ แรงเริ่มต้นที่มากที่สุดในการขันโบลต์
- σ_p คือ ความทนพิสูจน์
- A_t คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับความเค้นดึงของโบลต์
- σ_{yield} คือ ความแรงครากของโบลต์ (Yield stress of bolt)

ตัวประกอบความปลอดภัยด้านการแยกกันของวัสดุ ($S.F._{separation}$) หาได้จาก

$$S.F._{separation} = \frac{P_o}{P} \quad (33)$$

แรงที่ทำให้วัสดุเริ่มแยกจากกัน (P_o) หาได้จาก

$$P_o = \frac{F_i}{(1-C)} \quad (34)$$

ในการวิเคราะห์จะให้ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์ และตัวประกอบความปลอดภัยด้านการแยกกันของวัสดุมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเลือกใช้โอริง

โอริงแบบสถิต (Static Seals) เป็นโอริงที่อยู่ระหว่างอุปกรณ์ 2 ชิ้นที่อยู่กับที่ การใช้งานลักษณะนี้ถ้าใช้ความดันสูงก็จะสามารถกันรั่วได้ 100% ซึ่งขนาดความแข็งที่เหมาะสมต่อการใช้งานที่ความดันสูง คือ 80 และ 90 ชอร์ โอริงแบบสถิตเป็นโอริงที่ใช้ในงานซีลข้อต่อหรือจุดต่อต่าง ๆ ในเครื่องจักรหรืออุปกรณ์อย่างอื่น ภายใต้แรงดันสูงกว่าโอริงปกติทั่วไป โดยที่ในการทำงานของโอริงนั้นไม่มีส่วนที่สัมผัสกับส่วนที่เคลื่อนที่ ในการใช้งานโอริงนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ แรงดันและอุณหภูมิของจุดที่ใช้งานเพื่อที่จะเลือกค่าความแข็งและวัสดุที่ใช้ทำโอริงได้ถูกต้อง ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ทำโอริง [6]

ยาง	เกรดทางการค้า	ความแข็ง (Shore A)	อุณหภูมิที่ใช้งาน (เซลเซียส)	การประยุกต์ใช้งาน
ยางไนไตรล์ (บูนาเอ็น)	N7	70	-40 ถึง 110	ทนต่อน้ำ และน้ำมันไฮดรอลิกได้ดี เกรด V9 เหมาะกับงานที่ความดันสูง
	N9	90		
ยางฟลูออโรคาร์บอน (ไวทั้น)	V7	70	-35 ถึง 205	ทนต่อสารเคมีได้ดีกว่าอิลาสโทเมอร์อื่นๆ เกรด V9 เหมาะกับงานที่ความดันสูง
	V9	90		
ยางคลอโรพรีน (นีโอพรีน)	C7	70	-55 ถึง 140	ทนต่อน้ำมันไฮดรอลิก ทนต่อสารทำความเย็น และกรดอ่อนได้ดี
ยางเอทิลีนโพรพิลีน	E7	70	-55 ถึง 150	ทนต่อน้ำ กรด เบส และคีโตนได้ดี แต่ทนต่อน้ำมันไฮดรอลิกได้ต่ำ
ยางซิลิโคน	S7	70	-85 ถึง 230	การใช้งานจำกัดเฉพาะภาวะสถิต เหมาะกับของไหล

*ชอร์ (Shore) บ่งบอกถึงประเภทการใช้งาน คือ 70 ชอร์ ใช้สำหรับงานทั่วไป ส่วน 90 ชอร์ ใช้สำหรับงานที่ความดันมากกว่า 100 บาร์

2.3.1 การบอกขนาดของโอริง

การบอกขนาดของโอริงอ้างอิงจากมาตรฐานญี่ปุ่น (JIS2401) โดยการบอกขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ID) และความหนา (W) หรือถูกเรียกว่า โอริงขนาด ID×W

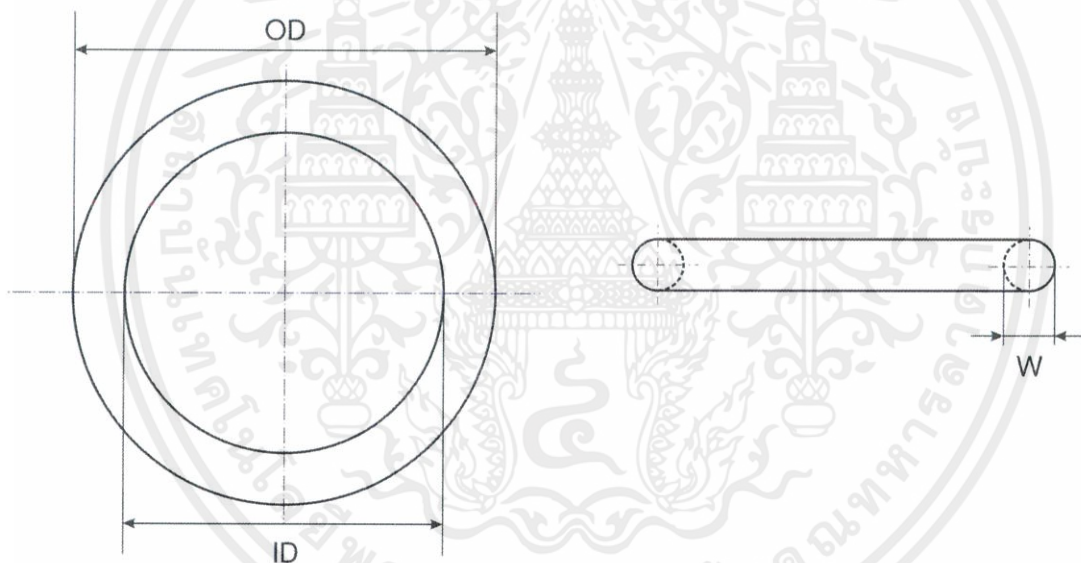
2.3.2 การหามิติต่าง ๆ ของโอริง

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโอริง หาได้จาก

$$ID = OD - 2W \quad (35)$$

ความหนาของโอริง หาได้จาก

$$W = \frac{(OD - ID)}{2} \quad (36)$$



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงตัวแปรที่ใช้หาขนาดของโอริง

2.4 การเลือกใช้ฟิลเตอร์

การสกัดน้ำมันผิวมะกรูดด้วยเอชซีซี พบว่ามีน้ำมันผิวมะกรูดติดมากับคาร์บอนไดออกไซด์สถานะก๊าซที่ปล่อยออกมาจากหม้อสกัดทำให้ได้ปริมาณน้ำมันต่ำ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์แยกน้ำมันออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันมากขึ้น ซึ่งฟิลเตอร์เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีหน้าที่ในการดักจับน้ำมัน โดยอาศัยหลักการกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของฟิลเตอร์จะไม่สามารถผ่านไปได้ ทำให้อนุภาคที่สามารถผ่านไปได้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์สถานะก๊าซ และอนุภาคที่ไม่สามารถผ่านไปได้ คือ น้ำมันผิวมะกรูด เมื่ออนุภาคของน้ำมันผิวมะกรูดที่มาชนมีปริมาณมากขึ้น ทำให้หยดลงตามกฎแรงโน้มถ่วงของโลกส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถไหลผ่านไปได้ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของฟิลเตอร์และมีความหนาแน่นต่ำ จึงสามารถไหลออกไปสู่บรรยากาศได้

2.4.1 การเลือกใช้วัสดุฟิลเตอร์

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นโลหะผสม (Alloy) นิยมใช้เป็นวัสดุในการสร้างเครื่องจักรและอุปกรณ์แปรรูปอาหาร เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน ทนต่อการกัดกร่อน พื้นผิวที่สัมผัสอาหารมีความปลอดภัยและถูกสุขลักษณะ ทำความสะอาดง่าย เป็นกลาง ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร และมีอายุการใช้งานนาน จึงเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุในการสร้างฟิลเตอร์ ชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้สร้างฟิลเตอร์ ประกอบด้วย

- 2.4.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดแผ่นเรียบ
- 2.4.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดแผ่นเรียบ เจาะรู
- 2.4.1.3 ตาข่ายเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 80 ไมครอน

2.4.2 การออกแบบฟิลเตอร์

- 2.4.2.1 ออกแบบให้ใส่ได้พอดีกับอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
- 2.4.2.2 ออกแบบให้มีพื้นที่ตาข่ายมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการชนของอนุภาคน้ำมันผิวมะกรูด
- 2.4.2.3 ออกแบบให้ทนต่อแรงดันที่สภาวะใช้งานได้อย่างปลอดภัย
- 2.4.2.4 ออกแบบให้น้ำมันผิวมะกรูดหยดลงได้อย่างสะดวก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดด้วยเอสซีซีเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มผลได้ของน้ำมันผิวมะกรูด ถูกออกแบบให้ทนความดันได้ 70 บาร์ โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทท่อ โบลต์และนัตประเภท เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นตัวยึดระหว่างฝาปิดและตัวอุปกรณ์ และใช้โอริงความแข็ง 90 ชอร์ ในการ ป้องกันความดันรั่วออกจากอุปกรณ์

3.1 จำนวนปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด

คำนวณปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดได้จากสมการ (4)

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

เมื่อ	P_{ext}	คือ ความดันภายในหม้อสกัด 150 บาร์
	Z_{ext}	คือ ตัวประกอบของการอัดตัวได้ภายในหม้อสกัด 0.41
	T_{ext}	คือ อุณหภูมิภายในหม้อสกัด 60 เซลเซียส
	V_{ext}	คือ ปริมาตรของหม้อสกัด 0.750 ลิตร
	P_{sep}	คือ ความดันภายในอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด 70 บาร์
	Z_{sep}	คือ ตัวประกอบของการอัดตัวได้ภายในอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด 0.89
	T_{sep}	คือ อุณหภูมิภายในอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด 30 เซลเซียส
	V_{sep}	คือ ปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด

แทนค่าลงในสมการ (4)

$$\frac{(150 \times 10^5)(750 \times 10^{-6})}{(0.41)(60 + 273)} = \frac{(70 \times 10^5)[(750 \times 10^{-6}) + V_{\text{sep}}]}{(0.89)(30 + 273)}$$

จะได้

$$V_{\text{sep}} = 2.42 \text{ L}$$

ดังนั้น ปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด 2.42 ลิตร

ปริมาตรของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด (V_{sep}) 2.42 ลิตร การออกแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดใช้ตารางที่ 3.1 เพื่อเลือกขนาดของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขนาดท่อเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน [8]

STAINLESS STEEL PIPES														
WEIGHT & THICKNESS OF SCHEDULE PIPE OF STAINLESS STEEL														
STAINLESS STEEL PIPE DIMENSION AS PER ASTM & WEIGHT (KG) PER MTR. (ANSI B36.19)														
Nominal Bore		Outside Diameter	Sch-5S		Sch-10S		Sch-40S		Sch-80S		Sch-160S		Sch-XXS	
mm	inch		Wt	Weight (Kg/mt)	Wt	Weight (Kg/mt)	Wt	Weight (Kg/mt)	Wt	Weight (Kg/mt)	Wt	Weight (Kg/mt)	Wt	Weight (Kg/mt)
3	1/8	10.3	1.24	0.276	1.24	0.28	1.73	0.37	2.41	0.47	-	-	-	-
6	1/4	13.7	1.24	0.39	1.65	0.49	2.24	0.631	3.02	0.8	-	-	-	-
10	3/8	17.1	1.24	0.49	1.65	0.63	2.31	0.845	3.2	1.1	-	-	-	-
15	1/2	21.3	1.65	0.8	2.11	1	2.77	1.27	3.75	1.62	4.75	1.94	7.47	2.55
20	3/4	26.7	1.65	1.03	2.11	1.28	2.87	1.68	3.91	2.2	5.54	2.89	7.82	3.63
25	1	33.4	1.65	1.3	2.77	2.09	3.38	2.5	4.55	3.24	6.35	4.24	9.09	5.45
32	1 1/4	42.2	1.65	1.65	2.77	2.7	3.56	3.38	4.85	4.47	6.35	5.61	9.7	7.77
40	1 1/2	48.3	1.65	1.91	2.77	3.11	3.68	4.05	5.08	5.41	7.14	7.25	10.16	9.54
50	2	60.3	1.65	2.4	2.77	3.93	3.91	5.44	5.54	7.48	8.74	11.1	11.07	13.44
65	2 1/2	73	2.11	3.69	3.05	5.26	5.16	8.63	7.01	11.4	9.53	14.9	14.2	20.39
80	3	88.9	2.11	4.51	3.05	6.45	5.49	11.3	7.62	15.2	11.1	21.3	15.24	27.65
100	4	114.3	2.11	5.84	3.05	8.36	6.02	16.07	8.56	22.3	13.49	33.54	17.12	41.03
125	5	141.3	2.77	9.47	3.4	11.57	6.55	21.8	9.53	31.97	15.88	49.11	19.05	57.43
150	6	168.3	2.77	11.32	3.4	13.84	7.11	28.3	10.97	42.7	18.2	67.56	21.95	79.22
200	8	219.1	2.77	14.79	3.76	19.96	8.18	42.6	12.7	64.6	23	111.2	22.23	107.8
250	10	273.1	3.4	22.63	4.19	27.78	9.27	60.5	12.7	96	28.6	172.4	25.4	155.15
300	12	323.9	3.96	31.25	4.57	36	9.52	73.88	12.7	132	33.32	238.76	25.4	186.97
350	14	355.6	3.96	34.36	4.78	41.3	11.13	94.59	19.05	158.08	35.71	281.7	-	-
400	16	406.4	4.19	41.56	4.78	47.29	12.7	123.3	21.41	203.33	40.46	365.11	-	-
450	18	457.2	4.19	46.8	4.78	53.42	14.27	155.8	23.8	254.36	45.71	466.4	-	-
500	20	508	4.78	59.25	5.54	68.71	15.09	183.42	26.19	311.2	49.99	564.68	-	-
600	24	609.6	5.54	82.47	6.35	94.45	17.48	255.41	30.96	442.08	59.54	808.22	-	-

*Wt ย่อมาจาก Wall thickness

*Kg/mt ย่อมาจาก Kilogram/meter

เลือกขนาดท่อมาตรฐาน 80 มิลลิเมตร ประมาณ 3 นิ้ว และ Sch-40s

- 1) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 88.9 มิลลิเมตร
- 2) ความหนา 5.49 มิลลิเมตร
- 3) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 77.9 มิลลิเมตร

การออกแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด มี 2 ส่วนหลัก ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริมาตร

- 1) ทรงกระบอก (ใช้เป็นตัวอุปกรณ์)
- 2) ฝาปิดกั้นทรงกระบอกตัน (ภายในออกแบบให้เป็นรูปกรวย)

3.1.1 ปริมาตรของกรวย (V_{cone})

$$V_{\text{cone}} = \frac{1}{3} \pi (3.90)^2 (2.00)$$

จะได้

$$V_{\text{cone}} = 0.0319 \text{ L}$$

ดังนั้น ปริมาตรของกรวย 0.0319 ลิตร

3.1.2 ปริมาตรของทรงกระบอก (V)

จะได้

$$V = 2.42 - 0.0319$$

$$V = 2.39 \text{ L}$$

ดังนั้น ปริมาตรของทรงกระบอก 2.39 ลิตร

3.1.3 ความสูงของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดที่เป็นทรงกระบอก แทนค่าลงในสมการ (5)

จะได้

$$2390 = \pi (3.90)^2 h$$

$$h = 0.5 \text{ m}$$

ดังนั้น ความสูงของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด 0.5 เมตร

3.2 คำนวณความเค้นและตัวประกอบความปลอดภัย

จากตารางที่ 3.1 เลือกขนาดท่อมาตรฐาน 80 มิลลิเมตร ประมาณ 3 นิ้ว, เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 88.9 มิลลิเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 77.9 มิลลิเมตรและความหนา 5.49 มิลลิเมตร

3.2.1 ความเค้นและตัวประกอบความปลอดภัยของทรงกระบอก

อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด ออกแบบให้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม SS304 (Stainless steel SS304) มีความแรงคราก (Yield stress : σ_y) 215 เมกะปาสกาล

3.2.1.1 ความเค้นแนวสัมผัส (Tangential stress) แทนค่าลงในสมการ (6)

$$\sigma_t = \frac{(70 \times 10^5)(39 \times 10^{-3})^2 - (1 \times 10^5)(44.5 \times 10^{-3})^2}{(44.5 \times 10^{-3})^2 - (39 \times 10^{-3})^2} - \frac{(39 \times 10^{-3})^2(44.5 \times 10^{-3})^2[(70-1) \times 10^5]}{(39 \times 10^{-3})^2[(44.5 \times 10^{-3})^2 - (39 \times 10^{-3})^2]}$$

จะได้

$$\sigma_t = 52.5 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นแนวสัมผัส 52.5 เมกะปาสกาล

3.2.1.2 ความเค้นแนวรัศมี (Radial stress) แทนค่าลงในสมการ (7)

$$\sigma_r = \frac{(70 \times 10^5)(39 \times 10^{-3})^2 - (1 \times 10^5)(44.5 \times 10^{-3})^2}{(44.5 \times 10^{-3})^2 - (39 \times 10^{-3})^2} + \frac{(39 \times 10^{-3})^2(44.5 \times 10^{-3})^2[(70-1) \times 10^5]}{(39 \times 10^{-3})^2[(44.5 \times 10^{-3})^2 - (39 \times 10^{-3})^2]}$$

จะได้

$$\sigma_r = -7 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นกดแนวรัศมี 7 เมกะปาสกาล

3.2.1.3 ความเค้นแนวยาว (Longitudinal stress) แทนค่าลงในสมการ (8)

$$\sigma_l = \frac{(70 \times 10^5)(39 \times 10^{-3})^2 - (1 \times 10^5)(44.5 \times 10^{-3})^2}{(44.5 \times 10^{-3})^2 - (39 \times 10^{-3})^2}$$

จะได้

$$\sigma_l = 22.8 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นแนวยาว 22.8 เมกะปาสกาล

3.2.1.4 ความเค้นเฉือน (Shear stress) แทนค่าลงในสมการ (9)

$$\tau_{xy} = \left| \frac{-7 - 52.5}{2} \right|$$

จะได้

$$\tau_{xy} = 29.8 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือน 29.8 เมกะปาสกาล

วงกลมมอห์ร์ (Mohr's circle)

3.2.1.5 จุดศูนย์กลางของวงกลมมอห์ร์ (Center of Mohr's circle) แทนค่าลงในสมการ (10)

$$\sigma_{\text{avg}} = \frac{52.5 + 22.8}{2}$$

จะได้

$$\sigma_{\text{avg}} = 37.7 \text{ MPa}$$

ดังนั้น จุดศูนย์กลางของวงกลมมอห์ร์ 37.7 เมกะปาสกาล

3.2.1.6 รัศมีของวงกลมมอห์ร์ (Radius of Mohr's circle) แทนค่าลงในสมการ (11)

$$R = \sqrt{\left(\frac{52.5 - 22.8}{2}\right)^2 + 29.8^2}$$

จะได้

$$R = 33.3 \text{ MPa}$$

ดังนั้น รัศมีของวงกลมมอห์ร์ 33.3 เมกะปาสกาล

3.2.1.7 ความเค้นสูงสุด (Maximum stress) แทนค่าลงในสมการ (12)

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{52.5 + 22.8}{2} + \sqrt{\left(\frac{52.5 - 22.8}{2}\right)^2 + 29.8^2}$$

จะได้

$$\sigma_{\text{max}} = 71 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นสูงสุด 71 เมกะปาสกาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.8 ความเค้นต่ำสุด (Minimum stress) แทนค่าลงในสมการ (13)

$$\sigma_{\min} = \frac{52.5 + 22.8}{2} - \sqrt{\left(\frac{52.5 - 22.8}{2}\right)^2 + 29.8^2}$$

จะได้

$$\sigma_{\min} = 4.36 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นต่ำสุด 4.36 เมกะปาสกาล

3.2.1.9 ความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress) แทนค่าลงในสมการ (14)

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{52.5 - 22.8}{2}\right)^2 + 29.8^2}$$

จะได้

$$\tau_{\max} = 33.3 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนสูงสุด 33.3 เมกะปาสกาล

3.2.1.10 ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงดึง (Safety factor for tensile stress) แทนค่าลงในสมการ (15)

$$\text{S.F.}_{\text{tensile}} = \frac{215}{71}$$

จะได้

$$\text{S.F.}_{\text{tensile}} = 3.03$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงดึง 3.03

3.2.1.11 ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงเฉือน (Safety factor for shear stress) แทนค่าลงในสมการ (16)

$$\text{S.F.}_{\text{shear}} = \frac{186}{33.3}$$

จะได้

$$\text{S.F.}_{\text{shear}} = 6.24$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงเฉือน 6.24

3.3 คำนวณโบลต์

จากตารางมาตรฐานของโบลต์ [7] เลือกโบลต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัว ในการรับแรง และโบลต์เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม

P	คือ แรงที่กระทำต่อโบลต์ 1 ตัว	$P = 5.57 \times 10^3 \text{ N}$
σ_y	คือ ความแรงคราก	$\sigma_y = 276 \times 10^6 \text{ Pa}$
σ_p	คือ ความทนพิสูจน์	$\sigma_p = 235 \times 10^6 \text{ Pa}$
A_t	คือ พื้นที่หน้าตัดของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียว	$A_t = 324 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
A_b	คือ พื้นที่หน้าตัดสูงสุดของโบลต์	$A_b = 353 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
l_{thd}	คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียว	$l_{thd} = 33.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
l_{bolt}	คือ ความยาวของโบลต์	$l_{bolt} = 33.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
l_s	คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่ไม่เป็นเกลียว	$l_s = 0 \text{ m}$
l_t	คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียวในแผ่นวัสดุ	$l_t = 12.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
E_b	คือ ค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นของโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม	$E_b = 188 \times 10^9 \text{ Pa}$
E_m	คือ ค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นของเหล็กกล้าไร้สนิม	$E_m = 188 \times 10^9 \text{ Pa}$
D_{eff}	คือ พื้นที่ประสิทธิผลของวัสดุที่ถูกเชื่อมต่อกัน	$D_{eff} = 394 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

3.3.1 แรงเริ่มต้นที่มากที่สุดในการขันโบลต์ (F_i) แทนค่าลงในสมการ (30)

จะได้

$$F_i = 0.9(235 \times 10^6)(324 \times 10^{-6})$$

$$F_i = 68.4 \times 10^3 \text{ N}$$

ดังนั้น แรงเริ่มต้นที่มากที่สุดในการขันโบลต์ 68.4 กิโลนิวตัน

3.3.2 ค่าคงที่ความแข็งแรงของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (K_m) แทนค่าลงในสมการ (22)

จะได้

$$K_m = \frac{\pi(394 \times 10^{-6})^2(188 \times 10^9)}{4(12.0 \times 10^{-3})^2}$$

$$K_m = 4.83 \times 10^9 \text{ N/m}$$

ดังนั้น ค่าคงที่ความแข็งแรงของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เท่ากับ 4.83 กิกะนิวตันต่อเมตร

3.3.3 ค่าคงที่ความแข็งแรงของโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม (K_b) แทนค่าลงในสมการ (18)

$$K_b = \left[\frac{(324 \times 10^{-6})(353 \times 10^{-6})}{(353 \times 10^{-6})(12.0 \times 10^{-3}) + (324 \times 10^{-6})(0)} \right] (188 \times 10^9)$$

จะได้

$$K_b = 5.06 \times 10^9 \text{ N/m}$$

ดังนั้น ค่าคงที่ความแข็งแรงของโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม 5.06 กิกะนิวตันต่อเมตร

3.3.4 ค่าคงที่จุดเชื่อมต่อ (C) แทนค่าลงในสมการ (27)

$$C = \frac{5.06 \times 10^9}{(5.06 \times 10^9) + (4.83 \times 10^9)}$$

จะได้

$$C = 0.512$$

ดังนั้น ค่าคงที่จุดเชื่อมต่อ 0.512

3.3.5 แรงที่กระทำต่อโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม (P_b) แทนค่าลงในสมการ (25)

$$P_b = (0.512)(5.57 \times 10^3)$$

จะได้

$$P_b = 2.85 \times 10^3 \text{ N}$$

ดังนั้น แรงที่กระทำต่อโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม 2.85 กิโลนิวตัน

3.3.6 แรงที่กระทำต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (P_m) แทนค่าลงในสมการ (26)

$$P_m = (1 - 0.512)(5.57 \times 10^3)$$

จะได้

$$P_m = 2.72 \times 10^3 \text{ N}$$

ดังนั้น แรงที่กระทำต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 2.72 กิโลนิวตัน

3.3.7 แรงทั้งหมดที่กระทำต่อโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม (F_b) แทนค่าลงในสมการ (29)

$$F_b = (68.4 \times 10^3) + (2.85 \times 10^3)$$

จะได้

$$F_b = 71.2 \times 10^3 \text{ N}$$

ดังนั้น แรงทั้งหมดที่กระทำต่อโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม 71.2 กิโลนิวตัน

3.3.8 แรงทั้งหมดที่กระทำต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (F_m) แทนค่าลงในสมการ (28)

$$F_m = (68.4 \times 10^3) - (2.85 \times 10^3)$$

จะได้

$$F_m = 65.5 \times 10^3 \text{ N}$$

ดังนั้น แรงทั้งหมดที่กระทำต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 65.5 กิโลนิวตัน

3.3.9 ความเค้นดึงสูงสุดที่กระทำต่อโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม (σ_{bolt}) แทนค่าลงในสมการ (32)

$$\sigma_{\text{bolt}} = \frac{71.2 \times 10^3}{324 \times 10^{-6}}$$

จะได้

$$\sigma_{\text{bolt}} = 220 \times 10^6 \text{ Pa}$$

ดังนั้น ความเค้นดึงสูงสุดที่กระทำต่อโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม 220 เมกะปาสกาล

3.3.10 ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม ($S.F._{\text{bolt}}$) แทนค่าลงในสมการ (31)

$$S.F._{\text{bolt}} = \frac{276 \times 10^6}{220 \times 10^6}$$

จะได้

$$S.F._{\text{bolt}} = 1.25$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม 1.25

3.3.11 แรงที่ทำให้วัสดุเริ่มแยกจากกัน (P_0) แทนค่าลงในสมการ (34)

$$P_0 = \frac{68.4 \times 10^3}{(1 - 0.512)}$$

จะได้

$$P_0 = 140 \times 10^3 \text{ N}$$

ดังนั้น แรงที่ทำให้วัสดุเริ่มแยกจากกัน 140 กิโลนิวตัน

3.3.12 ตัวประกอบความปลอดภัยด้านการแยกกันของวัสดุ ($S.F._{separation}$) แทนค่าลงในสมการ (33)

$$S.F._{separation} = \frac{140 \times 10^3}{5.57 \times 10^3}$$

จะได้

$$S.F._{separation} = 25.2$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยด้านการแยกกันของวัสดุ 25.2

3.4 การคำนวณและเลือกชนิดของโอริง

ความดันภายในอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดมีค่อนข้างสูงจึงเลือกใช้โอริงแบบสถิต (Static Seals) ซึ่งสามารถทนความดันสูง จากตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ทำโอริง แบ่งประเภทของการใช้งานโอริงเป็น 2 ประเภท คือ ความแข็ง 70 ชอร์และความแข็ง 90 ชอร์ เลือกโอริงที่มีความแข็ง 90 ชอร์ เนื่องจากใช้สำหรับงานที่มีความดันมากกว่า 100 บาร์ และใช้สมการ (34) และ (35) คำนวณหาขนาดของโอริง ได้รัศมีภายใน 89.4 มิลลิเมตร (ความคลาดเคลื่อน ± 0.77 มิลลิเมตร) และได้ความหนา 3.1 มิลลิเมตร (ความคลาดเคลื่อน ± 0.1 มิลลิเมตร)

3.5 ออกแบบการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นสกัดน้ำมันผิวมะกรูดในหม้อสกัดโดยใช้กระบวนการสกัดด้วยเอชซีซี จากนั้นลดความดันภายในหม้อสกัดโดยการปล่อยความดันเข้าสู่อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดเพื่อแยกน้ำมันออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การทดลองสกัดในแต่ละครั้งทดลองที่ความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สกัดแตกต่างกัน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุด จากนั้นใช้แบบจำลองโลจิสติกเพื่อหาจุดอิ่มตัวของปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด

3.6 ขั้นตอนการทดลอง

- 3.6.1 เตรียมวัตถุดิบ
- 3.6.2 ใส่วัตถุดิบในหม้อสกัด
- 3.6.3 ควบคุมอุณหภูมิหม้อสกัด
- 3.6.4 อัตราการบอบได้ออกไซด์เข้าไปในหม้อสกัดจนได้ความดันตามที่กำหนดไว้
- 3.6.5 สกัดทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนด
- 3.6.6 เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากหม้อสกัด เข้าสู่อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด และปล่อยทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนด
- 3.6.7 ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
- 3.6.8 เก็บน้ำมันผิวมะกรูดที่ได้จากอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดใส่ภาชนะ
- 3.6.9 บันทึกผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.7 สรุปผลการดำเนินการ

- 3.7.1 จำนวนปริมาตรและความสูงของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
 - 3.7.1.1 ปริมาตร 2.42 ลิตร
 - 3.7.1.2 ความสูง 0.5 เมตร
- 3.7.2 จำนวนความเค้นและตัวประกอบความปลอดภัยของอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
 - 3.7.2.1 ความเค้นสูงสุด 71 เมกะปาสกาล
 - 3.7.2.2 ความเค้นเฉือนสูงสุด 33.3 เมกะปาสกาล
 - 3.7.2.3 ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงดึง 3.03
 - 3.7.2.4 ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงเฉือน 6.24
- 3.7.3 จำนวนโบลต์
 - 3.7.3.1 ความเค้นสูงสุดที่กระทำต่อโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม 220 เมกะปาสกาล
 - 3.7.3.2 ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์เหล็กกล้าไร้สนิม 1.25
 - 3.7.3.3 แรงที่ทำให้วัสดุแยกจากกัน 140 กิโลนิวตัน
 - 3.7.3.4 ตัวประกอบความปลอดภัยด้านการแยกกันของวัสดุ 25.2
- 3.7.4 การคำนวณและเลือกชนิดของโอริง
 - 3.7.4.1 เลือกโอริงแบบสถิต (Static Seals) ความแข็ง 90 ชอร์
 - 3.7.4.2 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 89.4 มิลลิเมตร (ความคลาดเคลื่อน ± 0.77 มิลลิเมตร)
 - 3.7.4.3 ความหนา 3.1 มิลลิเมตร (ความคลาดเคลื่อน ± 0.1 มิลลิเมตร)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้สกัดน้ำมันผิวมะกรูด

ในช่วงความดัน 75 ถึง 120 บาร์ อุณหภูมิ 30 ถึง 60 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที

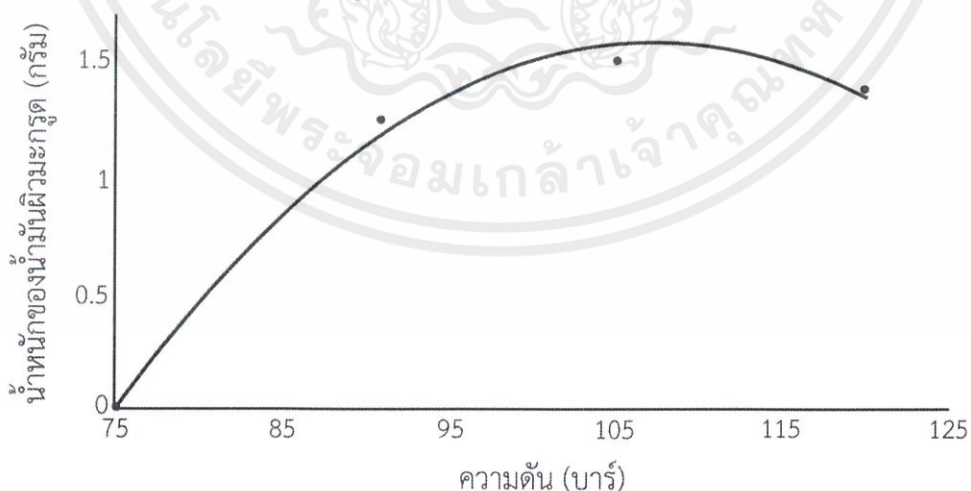
4.1.1 อุณหภูมิคงที่ 50 เซลเซียส

การทดลองสกัดน้ำมันผิวมะกรูด ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักของผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักของผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	น้ำหนักของน้ำจากผิวมะกรูด (กรัม)	น้ำหนักของน้ำมัน (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมัน
75	200	179	0.00	0.00	0.00
90	200	174	11.8	1.24	0.618
105	200	157	27.8	1.49	0.744
120	200	169	23.7	1.38	0.691

ผลของความดันที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด
อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของความดันที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที

ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุด ที่ความดัน 105 บาร์ คิดเป็นร้อยละ 0.744 และน้อยที่สุดที่ความดัน 75 บาร์ คิดเป็นร้อยละ 0 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงว่าที่อุณหภูมิสูง เมื่อความดันต่ำ ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดน้อยกว่าที่ความดันสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง เมื่อความดันต่ำ ความหนาแน่นของเอสซีซีลดลง ตามสมการ $P = \rho ZRT$ ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของเอสซีซีและผิวมะกรูดเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้น ความดันที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุด คือ 105 บาร์

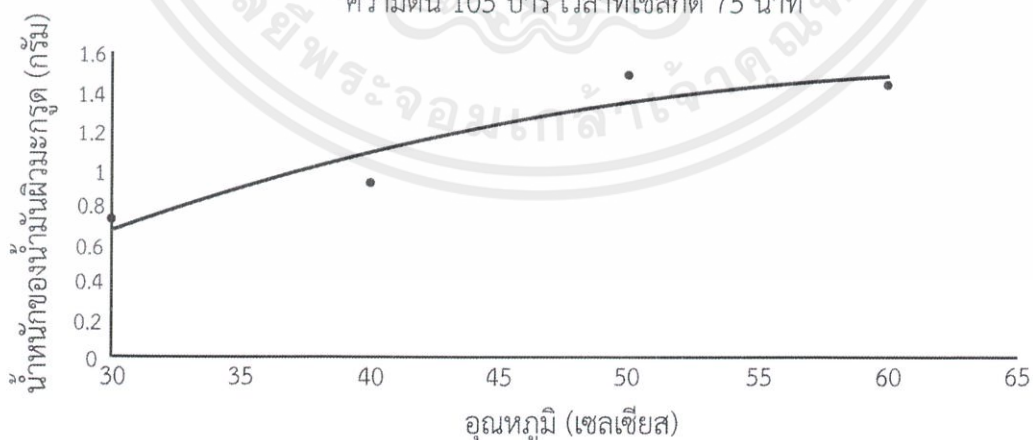
4.1.2 ความดันคงที่ 105 บาร์

การทดลองสกัดน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 บาร์ เวลาที่ใช้สกัดสกัด 75 นาที

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	น้ำหนักของผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักของผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	น้ำหนักของน้ำจากผิวมะกรูด (กรัม)	น้ำหนักของน้ำมัน (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมัน
30	200	194	2.04	0.724	0.362
40	200	179	16.6	0.920	0.460
50	200	174	27.8	1.49	0.744
60	200	178	22.2	1.38	0.719

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ความดัน 105 บาร์ เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 บาร์ เวลาที่ใช้สกัด 75 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุด ที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.744 และน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 30 เซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 0.362 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แสดงว่าที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิต่ำ ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่ความดันสูง เมื่ออุณหภูมิต่ำ ความหนาแน่นของเอสซีซีเพิ่มขึ้น ตามสมการ $P = \rho ZRT$ ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำละลายเพิ่มขึ้น แต่การถ่ายโอนพลังงานระหว่างอนุภาคของเอสซีซีและผิวมะกรูดลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดที่ได้จึงมีค่าลดลง ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุด คือ 50 เซลเซียส

4.2 ผลของเวลาที่ใช้สกัดน้ำมันผิวมะกรูด

ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุด คือ 105 บาร์ และ 50 เซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส

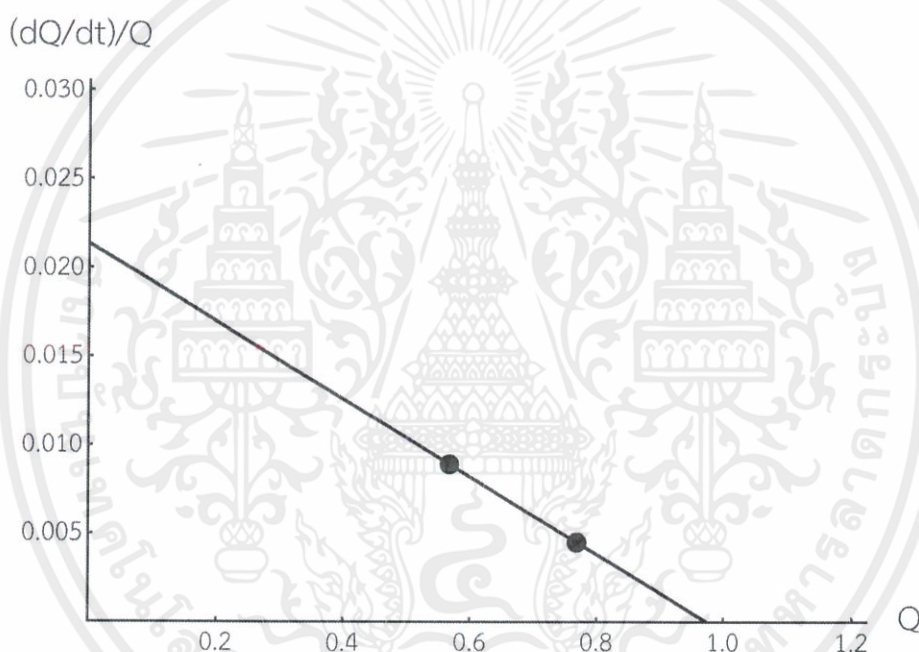
เวลา (นาที)	น้ำหนักของผิวมะกรูดก่อนสกัด (กรัม)	น้ำหนักของผิวมะกรูดหลังสกัด (กรัม)	น้ำหนักของน้ำจากผิวมะกรูด (กรัม)	น้ำหนักของน้ำมัน (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมัน
30	200	178	14.0	0.951	0.476
60	200	176	20.1	1.18	0.588
90	200	178	14.7	1.56	0.780
120	200	171	21.2	1.59	0.796

การทดลองสกัดน้ำมันผิวมะกรูด ที่ความดัน 105 บาร์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาที่ใช้สกัดเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดที่ได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ตามทฤษฎีผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันที่สกัดได้

ช่วงแรกของการทดลองอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้สกัดมากขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าสูงสุด และจะค่อย ๆ ลดลงจนมีอัตราคงที่ สอดคล้องตามทฤษฎีผลของเวลาที่มีต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดที่สกัดได้ และสมการเชิงอนุพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าของร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไป และร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อร้อยละน้ำหนักน้ำมัน

เวลา t (นาท)	ร้อยละน้ำหนักน้ำมัน Q	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไป dQ/dt	ร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อร้อยละน้ำหนักน้ำมัน $(dQ/dt)/Q$
30	0.476	ไม่สามารถหาค่าได้	ไม่สามารถหาค่าได้
60	0.588	0.00507	0.00862
90	0.780	0.00347	0.00444
120	0.796	ไม่สามารถหาค่าได้	ไม่สามารถหาค่าได้



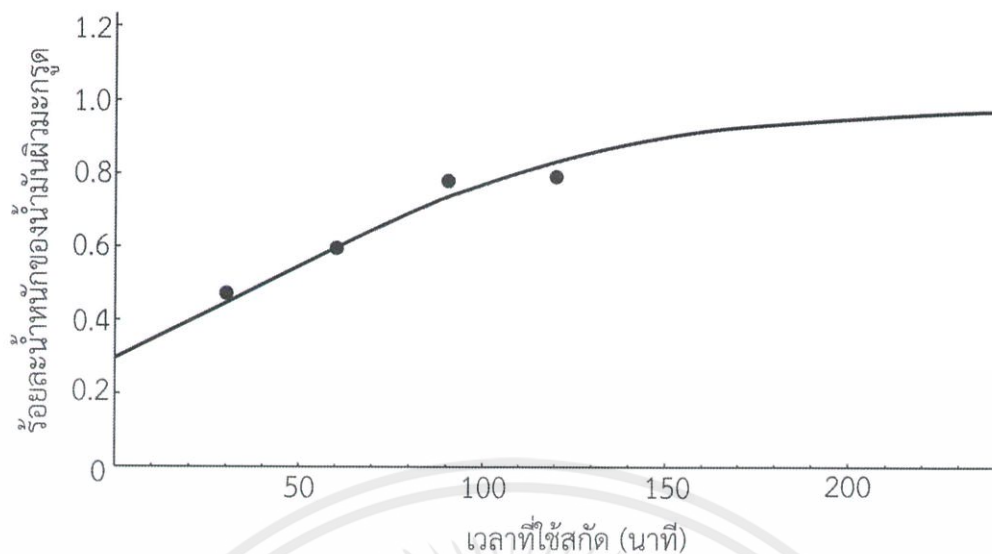
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไปต่อร้อยละน้ำหนักน้ำมัน และร้อยละน้ำหนักน้ำมัน

กำหนดให้ จุดตัดแกน $y=k=0.0214$
 จุดตัดแกน $x=L=0.986$ โดยที่ $L=0.986$ คือความสามารถในการรับภาระร้อยละน้ำหนักน้ำมันที่เริ่มต้นทำนาย $P_0=0.3$

จากสมการ $A = \frac{L - P_0}{P_0}$ แทนค่าจะได้ $A = 2.29$

และจากสมการ $P = \frac{L}{1 + Ae^{-kt}}$ แทนค่าจะได้ $P = \frac{0.986}{1 + 2.29e^{-0.0214t}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แบบจำลองโลจิสติกแสดงผลของเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด

ที่ความดัน 105 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส ตามสมการ
$$P = \frac{0.986}{1 + 2.29e^{-0.0214t}}$$

การสกัดน้ำมันผิวมะกรูด มีปริมาณน้ำมันเริ่มคงที่ ที่ร้อยละ 0.986 เรียกจุดนี้ว่า ความสามารถในการรับภาระ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด สามารถแยกน้ำมันผิวมะกรูดออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเพิ่มปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด โดยความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สกัด เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันผิวมะกรูด ค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดมากที่สุด คือ ความดัน 105 บาร์ อุณหภูมิ 50 เซลเซียส เวลาที่ใช้สกัด 120 นาที ได้ปริมาณน้ำมันผิวมะกรูดคิดเป็นร้อยละน้ำหนักโดยน้ำหนัก 0.796 และผลของเวลาที่ใช้สกัดสอดคล้องกับแบบจำลองโลจิสติก และผลการทดลองสอดคล้องตามทฤษฎี [1]

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองแต่ละครั้งไม่สามารถใช้มะกรูดที่มีคุณสมบัติเหมือนกันได้ทั้งหมด มะกรูดอาจมีปริมาณน้ำมันสะสมที่ผิวไม่เท่ากัน เนื่องจากสภาพดิน สภาพอากาศ ความสดของมะกรูด เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหล ควรศึกษาคุณภาพของน้ำมันผิวมะกรูดว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อสี กลิ่นและระยะเวลาการเก็บรักษา และพัฒนาชุดก้านสุบไฮดรอลิก เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

บรรณานุกรม

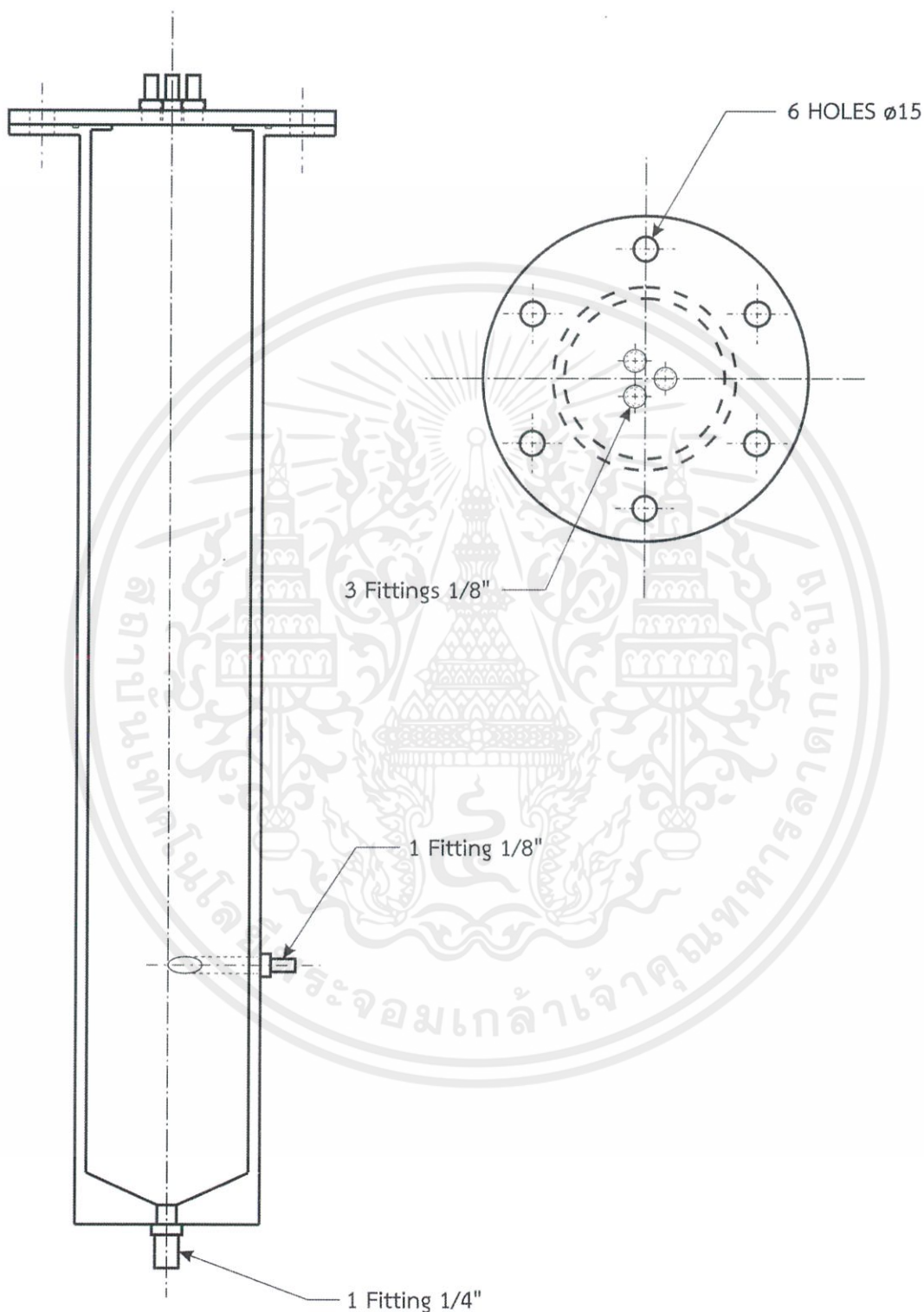
- [1] เทพสุรียา ลาสา, ธนวัฒน์ คงวัฒนา, นนทป์วิธ คลังหิรัญ พ.ศ.2555 :
ปฏิญญาพนธ์ การสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.
- [2] นเรชัย ธรรมลังกา, นัฐพร สวนยะเสรี, ยรรยงค์ ยิ้มแย้ม พ.ศ.2557 :
ปฏิญญาพนธ์ การออกแบบและสร้างหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันผิวมะกรูดที่ถูกสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.
- [3] King JW, France JE. **Basic principles of analytical supercritical fluid extraction.**
In: Wenclawiak B, editor. **Analysis with supercritical fluids: Extraction and chromatography.** Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992. 214.
- [4] Williams. J.R. and Clifford. A.A. 2000. **Supercritical Fluid Method and Protocols.**
New Jersey : Human Press.
- [5] Dobson. P. 1993. **Oil Processing.** London : The United Nations Development Fun for Woman.
- [6] ดารณี เจริญสุข : **ยางโอริง. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย.**
- [7] Richard G. Budynas, J.Keith Nisbett. **Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition.** United states of America, McGraw-Hill Education, 2006.
- [8] B.Lalbhai & Co. **Stainless Pipes & Tubes.** [Online]. Available :
<http://blalbhai.com/pipes-tubes/stainless-steel-erw-seamless-pipes/>. 2017.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ภาพเขียนแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด



รูปที่ ก.1 ภาพเขียนแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด และ วิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 75 บาร์

ความดัน (bar)	สัดส่วน ความดัน $(\frac{P}{P_{cr}})$	อุณหภูมิ (C)	สัดส่วน อุณหภูมิ $(\frac{T}{T_{cr}})$	ตัวประกอบของ การอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg · K)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
75	1.01	30	0.965	0.460	0.189	284
75	1.01	40	1.28	0.810	0.189	156
75	1.01	50	1.60	0.920	0.189	134
75	1.01	60	1.93	0.960	0.189	124

ตารางที่ ข.2 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 90 บาร์

ความดัน (bar)	สัดส่วน ความดัน $(\frac{P}{P_{cr}})$	อุณหภูมิ (C)	สัดส่วน อุณหภูมิ $(\frac{T}{T_{cr}})$	ตัวประกอบของ การอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg · K)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
90	1.21	30	0.965	0.190	0.189	873
90	1.21	40	1.28	0.780	0.189	206
90	1.21	50	1.60	0.900	0.189	173
90	1.21	60	1.93	0.970	0.189	159

ตารางที่ ข.3 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 105 บาร์

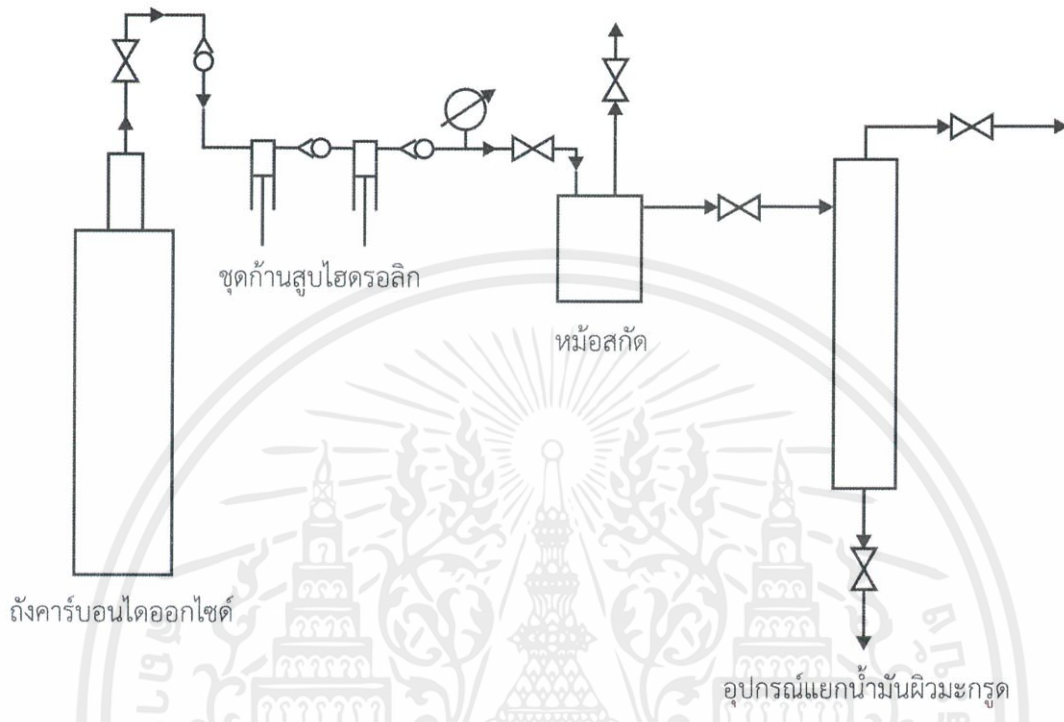
ความดัน (bar)	สัดส่วน ความดัน $(\frac{P}{P_{cr}})$	อุณหภูมิ (C)	สัดส่วน อุณหภูมิ $(\frac{T}{T_{cr}})$	ตัวประกอบของ การอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg · K)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
105	1.42	30	0.965	0.240	0.189	764
105	1.42	40	1.28	0.780	0.189	228
105	1.42	50	1.60	0.890	0.189	193
105	1.42	60	1.93	0.960	0.189	174

ตารางที่ ข.4 แสดงความหนาแน่นในหม้อสกัดน้ำมันที่ความดัน 120 บาร์

ความดัน (bar)	สัดส่วน ความดัน $(\frac{P}{P_{cr}})$	อุณหภูมิ (C)	สัดส่วน อุณหภูมิ $(\frac{T}{T_{cr}})$	ตัวประกอบของ การอัดตัวของก๊าซ (Z)	ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/kg · K)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
120	1.62	30	0.965	0.270	0.189	776
120	1.62	40	1.28	0.770	0.189	263
120	1.62	50	1.60	0.890	0.189	221
120	1.62	60	1.93	0.950	0.189	201

ภาคผนวก ค.

รูปอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ ค.1 แผนผังแสดงชุดอุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมวัตถุดิบที่ต้องการศึกษา
2. ชั่งวัตถุดิบให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนด
3. ชั่งน้ำหนักถังคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนทำการสกัด
4. ใส่วัตถุดิบดังกล่าวลงในถุงตะแกรงไร้สนิม แล้วนำไปใส่ในหม้อสกัด
5. ปิดหม้อสกัดแล้วจัดอุปกรณ์ในการทดลองให้เรียบร้อย
6. ควบคุมอุณหภูมิโดยการนำหม้อสกัด แช่ลงในน้ำที่มีอุณหภูมิที่กำหนดไว้
7. อัดคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในหม้อสกัดโดยทำการอัดกระบอกสูบจนกว่าจะได้รับความดันตามที่กำหนดไว้
8. สกัดทิ้งไว้เป็นเวลาตามที่กำหนดไว้ในกาทดลอง
9. เมื่อสกัดจนครบเวลาที่กำหนดไว้ ให้เปิดวาล์วปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากหม้อสกัด เข้าสู่อุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
10. ปล่อยทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนดไว้ แล้วเปิดวาล์วเพื่อปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
11. เก็บน้ำมันผิวมะกรูดที่ได้จากอุปกรณ์ใส่ภาชนะเก็บ
12. ชั่งน้ำหนักน้ำมันผิวมะกรูดที่ได้
13. ชั่งน้ำหนักถังคาร์บอนไดออกไซด์ หลังทำการสกัด
14. บันทึกผลการทดลองแต่ละครั้ง ได้แก่ น้ำหนักของวัตถุดิบก่อนทำการทดลอง, น้ำหนักของวัตถุดิบหลังทำการทดลอง, อุณหภูมิที่ควบคุมการสกัด, ความดัน, เวลาที่ใช้การสกัด, อุณหภูมิกระเปราะเปียก, อุณหภูมิกระเปราะแห้ง, ความชื้นสัมพัทธ์, น้ำหนักของน้ำจากหม้อสกัดและน้ำหนักของน้ำมันผิวมะกรูดจากอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูด
15. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.
สถานที่ติดต่อ และจัดซื้ออุปกรณ์

1. บริษัท เอ็ม เจ บางกอกควาล์วและฟิตติ้ง จำกัด
 เจ้าหน้าที่ วาล์วและฟิตติ้งสแตนเลส
 ที่อยู่: 88/8 หมู่ 14 ถนนกิ่งแก้ว ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540
 โทรศัพท์: 0-2062-1599 โทรสาร: 0-2062-1590
2. บริษัท ซีทีวี ฮาร์ดแวร์ จำกัด
 เจ้าหน้าที่อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์
 ที่อยู่: 6/31 หมู่ 10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 0-2737-2330-1
3. ร้านชัยถาวรรุ่งเรือง
 เจ้าหน้าที่ช่างและช่างคาร์บอนไดออกไซด์
 ที่อยู่: 6/35 หมู่ 10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 0-2360-5741
4. ห้างหุ้นส่วนจำกัด บี.ไอ.จี.เอ็นจิเนียริง
 ผลิตชิ้นงานสแตนเลส
 ที่อยู่: 332/36 หมู่ 10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 08-7936-3509
5. ห้างหุ้นส่วนจำกัด สห เจนเนอรอล แอนด์ ซัพพลาย
 เจ้าหน้าที่อะไหล่อุตสาหกรรม ยาง-พลาสติก
 ที่อยู่: 330 หมู่ 10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 02-737-2266
6. บริษัท มหธารา โลหะภัณฑ์ จำกัด
 เจ้าหน้าที่โบลต์และน๊อตสแตนเลส
 ที่อยู่: 2/1 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 02-737-2207-8 โทรสาร: 02-737-2209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้