

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องแฟลชดรัมสำหรับแยกน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ

นางสาว ชรชญาณ์ สาริตพิฐกุล

นางสาว นารีรัตน์ พลายชะหาร

ว.พ.
๕๖๑๑
๑๕๔๘

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 62327

วัน,เดือน,ปี 16 ส.ค. 2549

b. 116211๕๗

i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

FLASH DRUM FOR WATER SEPERATION FROM BIODIESEL

MISS THORNCHAYA SATITPITTAKUN

MISS NAREERAT PLYLAHAN

**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR IN ENGINEERING (CHEMICAL ENGINEERING)**

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

เครื่องเฟลชดรัมสำหรับแยกน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ

โดย

นางสาวธรรชญาณ์ สาธิตพิรุณกุล รหัส 45010338

นางสาวนารีรัตน์ พลายละหาร รหัส 45010396

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

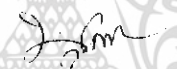
อาจารย์ที่ปรึกษา


รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)


กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริวานิชย์)


กรรมการ
(อาจารย์ศิริพันธ์ มุราชัญญ์ลักษณ์)



ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	เครื่องแฟลชครัมสำหรับแยกน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ	
โดย	นางสาวธรรณานันท์	สาริตพิชกุล
	นางสาวนารีรัตน์	พลายละหาร
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ประกอบ	กิจไชยา
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขาวิศวกรรมเคมี
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและออกแบบรวมถึงสร้างเครื่องแฟลชครัมสำหรับแยกน้ำและเมทานอลออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ ทำให้น้ำมันดีเซลชีวภาพมีปริมาณน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2709 โดยมีค่าไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอาจนำเมทานอลกลับไปใช้เป็นสารตั้งต้นใหม่ การออกแบบทำโดยการคำนวณการควบแน่น และพลังงาน โดยการใช้การแยกน้ำเป็นเกณฑ์ได้ออกแบบแฟลชครัมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร และมีความสูง 1 เมตร และได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของเครื่องแฟลชครัมโดยศึกษาผลของการปรับค่าตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ป้อนเข้าสู่แฟลชครัม อัตราการป้อนของน้ำมันดีเซลชีวภาพ พบว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 45 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนของน้ำมันดีเซลชีวภาพ 450 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ ได้คุณภาพเป็นไปตามมาตรฐาน

Report Title Flash Drum for Water Separation from Biodiesel
By Miss Thornchaya Satitpittakun
 Miss Nareerat Plylahan
Advisor Assoc. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya
Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering
 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project aims to design and build a flash drum which will be used for water and methanol separation from biodiesel. According to The American Society for Testing and Materials (ASTM D2709), the maximum amount of water in biodiesel is 0.05 percent by volume. Methanol from flashing process can also be recovered. This project applied material and energy balance calculation for flash drum design. The flash drum diameter and height were designed to be 0.35 and 1 meter, respectively. The design flash drum was tested for its efficiency by varying feed temperatures and feed flow rates. It was found that at temperature above 45 °C and feed flow rate of 450 L/hr, biodiesel product meets the amount of water requirement.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย
ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เอื้อเฟื่องบประมาณในการทำวิจัย

คุณวันจักร โชครัตนชัย ที่อนุเคราะห์น้ำมันพืชใช้แล้วสำหรับผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ

คุณศัลยเวช เกตุแก้ว นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คุณไพสัน จารุจิต ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการประกอบ ปรับปรุง เครื่อง
แฟลชดรัม

คุณพิมพ์ใจ ภูษนะกิจ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยเหลือในการทำเอกสารประสานงานกับหน่วยงาน
ภายนอกสถาบัน

เจ้าหน้าที่ส่วนควบคุมคุณภาพ แผนกวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง และแผนกคุณภาพ
น้ำมันหล่อลื่น คลังน้ำมันพระโขนง บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ
ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงและคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

สุดท้ายนี้ถ้ามีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

20 มีนาคม 2549

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
สัญลักษณ์.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนการทำงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	3
2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบแฟลชক্রัม.....	3
2.1.1 หลักการทำงานของแฟลชক্রัม.....	3
2.1.2 การคำนวณเพื่อการออกแบบ.....	5
2.2 การตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	8
2.2.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำอิสระในน้ำมันดีเซลชีวภาพตามมาตรฐาน ASTM D2709.....	8
2.2.2 การทดสอบหาปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	11
2.3 การคำนวณ Vapor /Liquid Equilibrium (VLE).....	12
บทที่ 3 การคำนวณการออกแบบแฟลชক্রัม.....	15
3.1 การคำนวณขนาดของแฟลชক্রัม.....	15
3.2 การดุลพลังงาน (Heat balance).....	18
3.2.1 การหาเอนทาลปีของสารป้อน (Enthalpy of feed).....	18
3.2.2 การหาเอนทาลปีของวฏภาคไอ (Enthalpy of vapor).....	19
3.2.3 การหาเอนทาลปีของวฏภาคของเหลว (Enthalpy of liquid).....	20

สารบัญ (ต่อ)

3.2.4 การหาอุณหภูมิและความร้อนที่ให้แก่สารป้อน.....	20
3.3 ผลที่ได้จากการออกแบบ.....	22
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	24
4.1 สารเคมี.....	24
4.2 อุปกรณ์.....	24
4.3วิธีการทดลอง.....	25
4.3.1 การหาปริมาณน้ำที่ละลายได้และน้ำอิสระในน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	25
4.3.2 การหาประสิทธิภาพของแฟลชดรัม.....	26
4.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำอิสระด้วยวิธีเหวี่ยงทดสอบ.....	27
4.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำด้วยการไทเทรตด้วยการใช้เครื่องมือ Karl Fisher Titrator.....	27
บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	28
5.1 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำที่ละลายได้.....	28
5.2 ประสิทธิภาพของแฟลชดรัม.....	29
5.2.1 ปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โดยมวล.....	29
5.2.2 ปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล.....	32
5.3 ผลการคำนวณค่าคงที่สมดุลระหว่างวัฏภาคไอและของเหลว (K-Value)	34
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	36
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	36
6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	36
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	36
เอกสารอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก ก	38

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แฟลชคริม.....	3
2.2 กระบวนการแฟลช.....	6
2.3 Centrifuge tube	11
3.1 ขนาดของแฟลชคริม.....	15
3.2 ขั้นตอนการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ.....	19
3.3 แฟลชคริม.....	23
4.1 แฟลชคริม	24
4.2 เครื่อง Centrifuge ใช้ทดสอบหาปริมาณน้ำอิสระและตะกอน.....	25
4.3 เครื่องทดสอบหาปริมาณน้ำทั้งหมดโดยการไทเทรตด้วย Karl Fisher Titrator.....	25
5.1 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพ (% โดยมวล) ณ อัตราการไหล 100 ลิตรต่อ ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โดยมวล.....	30
5.2 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพ (% โดยมวล) ณ อัตราการไหล 180 ลิตรต่อ ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โดยมวล.....	30
5.3 ปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการแฟลช ที่อัตราการไหลและ อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โดยมวล.....	31
5.4 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพ (% โดยมวล) ณ อัตราการไหล 180 ลิตรต่อ ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล.....	32
5.5 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพ (% โดยมวล) ณ อัตราการไหล 450 ลิตรต่อ ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล.....	33
5.6 ปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการแฟลช ที่อัตราการไหลและ อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล.....	33
ก กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (cmHg) และอุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัว (°C).....	39

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพตามรายละเอียดแบบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน.....	9
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องเหวี่ยงและความเร็วรอบที่ใช้ในการเหวี่ยง.....	10
5.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระและปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่อุณหภูมิห้อง.....	28
5.2 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการฟเลชเมื่อมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โดยมวล.....	29
5.3 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการฟเลชเมื่อมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล.....	32
5.4 ค่า K_{H_2O} ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	34
5.5 ค่า K_{H_2O} ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส.....	35
5.6 ค่า K_{H_2O} ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....	35
ก ไอน้ำอ้อมตัว.....	38

สัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดของแฟลชক্রัม (m^3)
$c_{p,F}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารป้อน ($kJ/kg.K$)
$c_{p,oil}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันดีเซลชีวภาพ ($kJ/kg.K$)
$c_{p,w}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($kJ/kg.K$)
$c_{p,w,v}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ ($kJ/kg.K$)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของถังแฟลช (m)
F	อัตราการไหลเชิงมวลของสารป้อน (kg/hr)
ΔH_F	เอนทาลปีของสารป้อน (kJ/kg)
ΔH_L	เอนทาลปีของวัฏภาคของเหลวที่ได้จากกระบวนการแฟลช (kJ/kg)
ΔH_V	เอนทาลปีของวัฏภาคไอที่ได้จากกระบวนการแฟลช (kJ/kg)
H_F	เอนทาลปีของสารป้อนต่อเวลา (kJ/s)
H_{in}	เอนทาลปีรวมของสารขาเข้าแฟลชক্রัมต่อเวลา (kJ/s)
H_L	เอนทาลปีของวัฏภาคของเหลวที่ได้จากการแฟลชต่อเวลา (kJ/s)
H_{out}	เอนทาลปีรวมของสารขาออกจากแฟลชক্রัมต่อเวลา (kJ/s)
H_V	เอนทาลปีของวัฏภาคไอที่ได้จากการแฟลชต่อเวลา (kJ/s)
K_i	ค่าคงที่สมดุลระหว่างวัฏภาคไอและของเหลวขององค์ประกอบ i
L	อัตราการไหลเชิงมวลของวัฏภาคของเหลว (kg/hr)
M	มวลโมเลกุลของก๊าซ ($kg/kmol$)
\dot{m}_F	อัตราการไหลเชิงมวลของสารป้อน (kg/hr)
\dot{m}_L	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากกระบวนการแฟลช (kg/hr)
$\dot{m}_{w,F}$	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่อยู่ในสารป้อน (kg/hr)
$\dot{m}_{w,v}$	อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำ (kg/hr)
$\dot{n}_{w,F}$	อัตราการไหลเชิงโมลของน้ำที่อยู่ในสารป้อน ($gmol/hr$)
P	ความดันภายในแฟลชক্রัม (atm)
P_i^{sat}	ความดันไอขององค์ประกอบ i บริสุทธิ์ (atm)
Q	อัตราการให้ความร้อนแก่สารป้อน (kJ/s)

R	ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ
r	รัศมีของเฟลซดรัม (m)
rcf	Relative centrifugal force
T	อุณหภูมิภายในเฟลซดรัม (K)
T_F	อุณหภูมิของสารป้อน (K)
T_i	อุณหภูมิของสารป้อนหลังจากได้รับความร้อนก่อนเข้าสู่เฟลซดรัม (K)
T_0	อุณหภูมิห้อง (K)
u_g	Superficial velocity ของวัฏภาค ไอ (m/s)
V	อัตราการไหลเชิงมวลของวัฏภาค ไอ (kg/hr)
\dot{V}_v	อัตราการไหลเชิงปริมาตรในวัฏภาค ไอ (m^3/hr)
\dot{V}_F	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารป้อน (kg/hr)
$\dot{V}_{w,F}$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่อยู่ในสารป้อน (kg/hr)
x_i	อัตราส่วนเชิงมวลขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคของเหลว
y_i	อัตราส่วนเชิงมวลขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคไอ
z_i	อัตราส่วนเชิงมวลขององค์ประกอบ i ในสายป้อน
ρ_l	ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลชีวภาพ (g/cm^3)
ρ_g	ความหนาแน่นของไอน้ำ (g/cm^3)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันราคาน้ำมันในตลาดโลกยังมีแนวโน้มที่จะปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการใช้น้ำมันมีมากกว่ากำลังการผลิต จนทำให้เกิดการเก็งกำไรและมีผลทำให้น้ำมันมีราคาสูงขึ้น สำหรับแนวทางแก้ไขปัญหาระหว่างน้ำมันในประเทศไทย รัฐบาลได้มีนโยบายที่จะหาพลังงานทดแทน โดยเฉพาะการทดแทนน้ำมันดีเซลที่มีราคาสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการชะลอการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากผลกระทบของราคาน้ำมันจะส่งผลกระทบต่อเป็นวงกว้างไปยังอุตสาหกรรมต่างๆ

น้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนที่มีบทบาทอย่างมากในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ แต่การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชใช้สำหรับการบริโภค เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง ยังคงมีราคาแพงมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม ดังนั้นจึงมีการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาสังเคราะห์เป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยต้องใช้เมทานอลที่มากเกินไปสำหรับการทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากการทำปฏิกิริยาจะมีเมทานอลที่มากเกินไปและตัวเร่งปฏิกิริยาเหลืออยู่ จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้น้ำล้างเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำมัน ซึ่งจะมีผลทำให้มีน้ำหลงเหลืออยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพจากกระบวนการล้าง ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างเครื่องแฟลชดรัม (Flash drum) เพื่อทำให้น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับการนำไปใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ออกแบบเครื่องแฟลชดรัมสำหรับการแยกน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ
- 1.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ
- 1.2.3 ศึกษาสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้หลังจากการแฟลช

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบเครื่องแฟลชดรัมโดยการดุลมวล (Mass balance) และดุลพลังงาน (Energy balance)
- 1.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เครื่องแฟลชดรัมในการแยกน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ

1.3.3 วิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการเฟลช

1.4 ขั้นตอนการทำงาน

1.4.1 คั้นคว่ำและรวบรวมข้อมูลในการออกแบบเฟลชครัม

1.4.2 ออกแบบเครื่องเฟลชครัม โดยการควบคุมและคุณภาพพลังงาน

1.4.3 ศึกษาสถานะที่มีผลต่อปริมาณน้ำที่ได้หลังจากผ่านเครื่องเฟลชครัม ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ป้อนเข้าสู่เฟลชครัม และอัตราการไหลของสารป้อนของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

1.4.4 วิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านเครื่องเฟลชครัม

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 เรียนรู้การแยกน้ำจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ โดยใช้เครื่องเฟลชครัม

1.5.2 สามารถลดปริมาณน้ำที่อยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพให้เป็นไปตามมาตรฐานคือไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



บทที่ 2

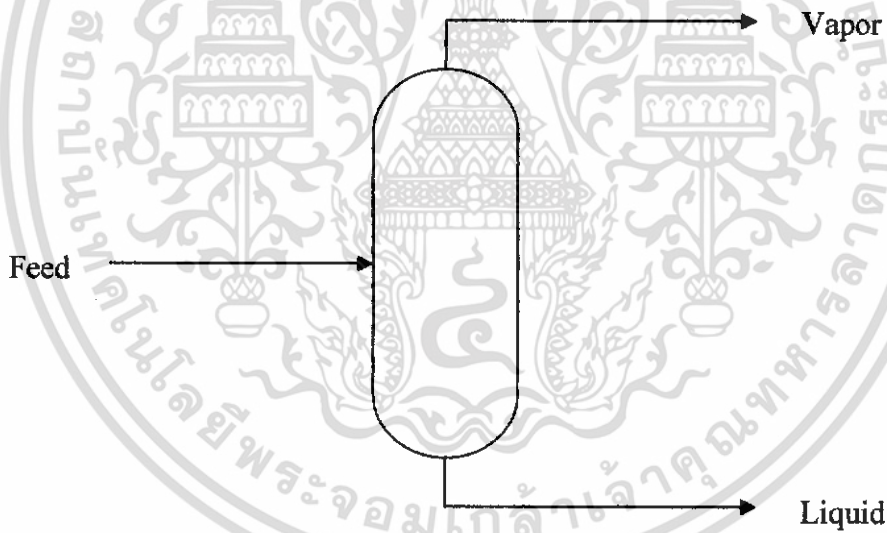
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยและการออกแบบแฟลชক্রัม เพื่อใช้ในการกำจัดน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ปนเปื้อนมาจากกระบวนการผลิตและที่หลงเหลือจากกระบวนการล้าง

2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบแฟลชক্রัม

2.1.1 หลักการทำงานของแฟลชক্রัม [1]

แฟลชক্রัมเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้ในการแยกสารละลายโดยส่วนที่ระเหยง่ายหรือมีจุดเดือดต่ำกว่าจะถูกทำให้ระเหยกลายเป็นไอแยกออกมาจากส่วนที่เป็นของเหลวซึ่งระเหยได้ยาก



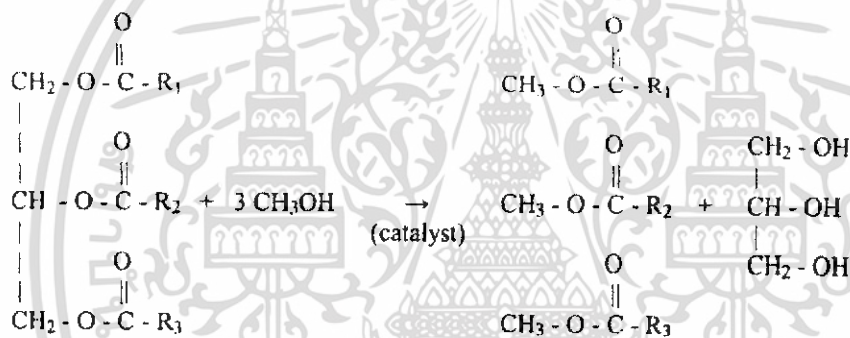
รูปที่ 2.1 แฟลชক্রัม

กระบวนการแฟลชเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อของเหลวไหลผ่านท่อที่ทำการลดความดันในสถานะที่เหมาะสม ส่วนที่ระเหยง่ายหรือมีจุดเดือดต่ำจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ เนื่องจากความดันที่ต่ำลงนั้นจะมีผลทำให้จุดเดือดของสารต่ำลงด้วย ส่วนผสมของวัฏภาค 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคของเหลวและวัฏภาคไอจะไหลผ่านเข้าสู่ตัวถังของแฟลชক্রัม วัฏภาคทั้งสองจะเกิดการแยกออกจากกัน ของเหลวจะไหลออกสู่ภายนอกทางด้านล่างของถัง ส่วนไอจะไหลผ่านออกไปที่ส่วนบนของถัง หรือใน

อีกกรณีอาจทำการลดความดันภายในตัวถังสารละลายจะไหลมาตามท่อแล้วเข้าสู่ตัวถังของเฟลชครัมที่ทำการลดความดัน สารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอในทันทีที่สารละลายไหลเข้าสู่ตัวถัง ของเหลวจะไหลออกที่ส่วนล่างและ ไอจะไหลออกที่ส่วนบนของตัวถัง ในการดำเนินการอาจทำได้ทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์นำเฟลชครัมมาใช้ในการกำจัดน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพ เนื่องจากในมาตรฐานของ ASTM ได้กำหนดไว้ว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพที่สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์จะมีปริมาณน้ำในน้ำมันชีวภาพได้ไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร [2] โดยน้ำที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพเกิดขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ปัจจัยใหญ่ๆ คือ

1. เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ [2] ในกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจะทำการผลิตโดยนำน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล โดยใช้เบสแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา คือ กลีเซอริน และเมทิลเอสเทอร์ หรือที่เรียกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

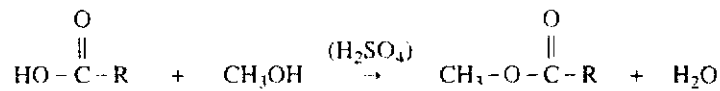


ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Tranesterification)

แต่น้ำมันที่จะนำมาทำการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์ กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสบู่และน้ำขึ้นมา ดังสมการ



ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงมาผลิตเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพ อาจต้องทำการกำจัดกรดไขมันอิสระก่อน โดยนำน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงมาทำปฏิกิริยากับเมทานอล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา คือ เมทิลเอสเทอร์และน้ำ ดังสมการ



จากสมการจะเห็นได้ว่ามีน้ำเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา น้ำที่เกิดขึ้นนั้นส่วนหนึ่งจะละลายอยู่ในชั้นน้ำมันและส่วนใหญ่จะละลายอยู่ในชั้นเมทานอล

2. กระบวนการล้างน้ำมันดีเซลชีวภาพ เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจะมีค้างและเกลือเกิดขึ้นมา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ สบูโซเดียม (Sodium soap) เป็นต้น ทำให้ในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้นั้นมีไอออนเหล่านี้ละลายอยู่ การกำจัดไอออนสามารถทำได้โดยการใช้กรด ซึ่งในกระบวนการล้างจะมีผลทำให้มีปริมาณน้ำจำนวนหนึ่งตกค้างอยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพ

การใช้แฟลชดรัมในการกำจัดน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ จะเป็นการกำจัดเมทานอลที่หลงเหลือในน้ำมันดีเซลชีวภาพจากกระบวนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง เนื่องจากสภาวะการทำงานที่ออกแบบมานั้นจะคิดจากสภาวะที่ใช้สำหรับการระเหยน้ำ แต่เมทานอลมีจุดเดือดที่ต่ำกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อทำการแยกน้ำโดยใช้แฟลชดรัมตามสภาวะที่ทำการออกแบบมา จึงสามารถกำจัดเมทานอลที่หลงเหลืออยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพได้

2.1.2 การคำนวณเพื่อการออกแบบ [3-9]

1. การทำดุลมวลสาร (Mass balance)

สมการดุลมวลสารรวม (Total mass balance) คือ

$$F = V + L \quad (2.1.1)$$

เมื่อ F : อัตราการไหลเชิงมวลของสารป้อน (kg/hr)

V : อัตราการไหลเชิงมวลของวัฏภาคไอ (kg/hr)

L : อัตราการไหลเชิงมวลของวัฏภาคของเหลว (kg/hr)

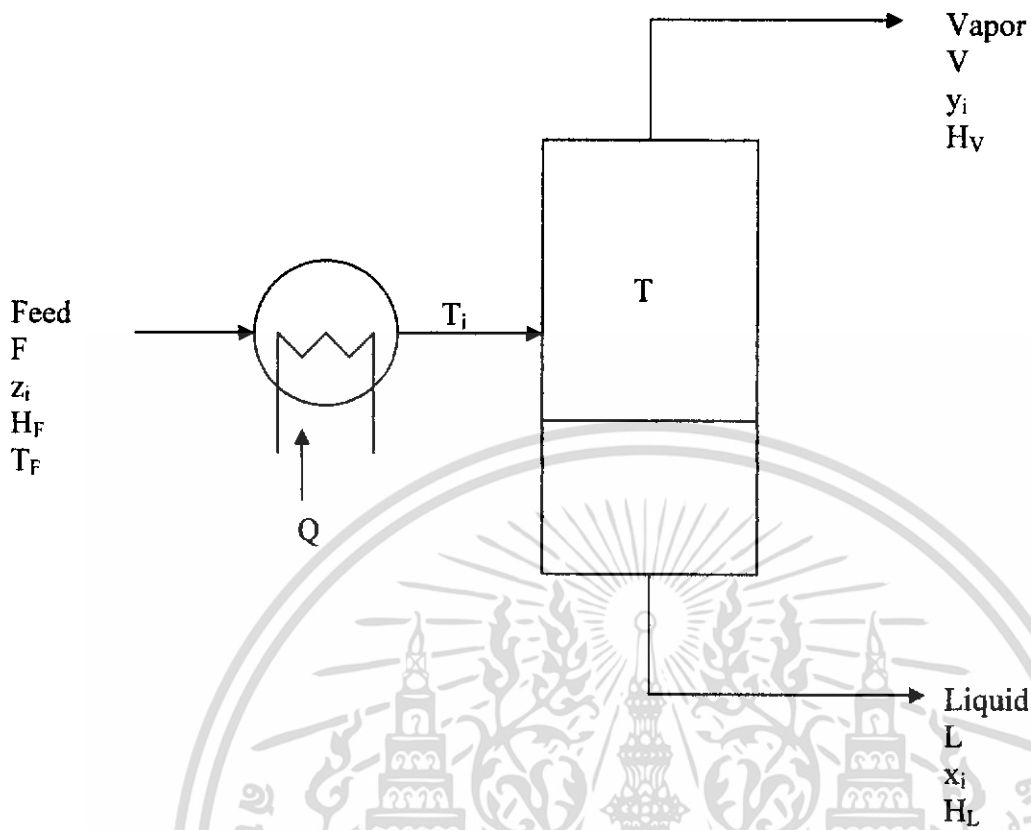
และสมการดุลมวลสารขององค์ประกอบ i (Component balance)

$$z_i F = y_i V + x_i L \quad (2.1.2)$$

เมื่อ z_i : อัตราส่วนเชิงมวล (Mass fraction) ขององค์ประกอบ i ในสารป้อน

y_i : อัตราส่วนเชิงมวล (Mass fraction) ขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคไอ

x_i : อัตราส่วนเชิงมวล (Mass fraction) ขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคของเหลว



รูปที่ 2.2 กระบวนการเฟลช

โดยจากรูปที่ 3.2

T_F : อุณหภูมิของสารป้อน

T_i : อุณหภูมิของสารป้อนหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อน

T : อุณหภูมิภายในเฟลชครัม

2 การทำดุลพลังงาน (Energy balance)

ในการคำนวณดุลพลังงานนี้จะทำให้ทราบว่าต้องทำการให้ความร้อนแก่สายป้อนด้วยอัตราเท่าใด สมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$FH_F + Q = VH_V + LH_L \quad (2.1.3)$$

เมื่อ H_F : เอนทาลปีของสารป้อน (kJ/kg)

H_V : เอนทาลปีของวฏภาคไอ (kJ/kg)

H_L : เอนทาลปีของวฏภาคของเหลว (kJ/kg)

Q : อัตราการให้ความร้อนแก่สารป้อน (kJ/s)

โดยจะทำการกล่าวถึงการคำนวณการทำควมวลาสารและควมปลังงานต่อไปในบทที่ 3

ในการออกแบบเพลชดรัมนั้น จะต้องทำการคำนวณหา Superficial velocity ของวฎภาคไอ เพื่อทำการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหา Superficial velocity ของวฎภาคไอจะใช้สมการของ Souders – Brown [1] ในการคำนวณ คือ

$$u_g = 0.064 \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}} \quad (2.1.4)$$

เมื่อ u_g : Superficial velocity ของวฎภาคไอ (m/s)

ρ_l : ความหนาแน่นของวฎภาคของเหลว (g/cm³)

ρ_g : ความหนาแน่นของวฎภาคไอ (g/cm³)

โดยจะใช้ Ideal gas law ในการคำนวณหาความหนาแน่นของวฎภาคไอ เนื่องจากสภาวะในการดำเนินการของเพลชดรัมต่างๆ ไป เป็นสภาวะที่มีอุณหภูมิปานกลางและความดันต่ำ จึงสามารถทำการสมมติว่าก๊าซในวฎภาคไอประพฤติตัวคล้ายก๊าซอุดมคติ โดย

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} \quad (2.1.5)$$

เมื่อ P : ความดันภายในถังเพลชดรัม

M : มวลโมเลกุลของก๊าซ

R : ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ

T : อุณหภูมิภายในถังเพลชดรัม

สามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของถังเพลชดรัมได้จากสมการ

$$A = \frac{V_v}{u_g} \quad (2.1.6)$$

เมื่อ A : พื้นที่หน้าตัดของถัง (m^2)

\dot{V} : อัตราการไหลเชิงปริมาตรในวัฏภาคไอ (m^3/hr)

เนื่องจากถังเป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังแฟลชครีမ်จะหาได้จากสมการ

$$A = \pi D^2/4 \quad (2.1.7)$$

เมื่อ D : เส้นผ่านศูนย์กลางของถังแฟลชครีမ်

การกำหนด Residence time จะทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณของเหลวที่อยู่ภายในถังได้ Geal D. Ulrich [1] ได้เสนอแนะแนวทางในการออกแบบแฟลชครีမ်ไว้ว่า อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังควรมีค่าประมาณ 3 – 5 และระดับความสูงของถังในส่วนที่อยู่เหนือระดับของเหลวควรมีค่าอยู่ที่ 1 เมตร หรือมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อทำการออกแบบ แฟลชครีမ်เพื่อใช้ในการกำจัดน้ำและเมทานอลออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพ ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงนำแนวทางที่ได้เสนอไว้นี้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ

เมื่อทราบระดับความสูงของส่วนที่อยู่เหนือระดับของเหลว และทราบระดับของเหลวที่อยู่ภายในถัง ณ Residence time ที่กำหนด ก็จะทำให้ทราบความสูงรวมทั้งหมดของถังได้

2.2 การตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ปริมาณน้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ น้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมัน (Bound water) และน้ำอิสระที่ไม่ละลายในน้ำมัน (Free water) การตรวจสอบหาปริมาณน้ำอิสระจะใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM D2709 [10] ส่วนการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีในน้ำมัน (น้ำอิสระและน้ำที่ละลายในน้ำมัน) จะใช้วิธีการทดสอบโดยการไทเทรตด้วยเครื่องมือ Coulometric Karl Fisher Tritator

2.2.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำอิสระในน้ำมันดีเซลชีวภาพตามมาตรฐาน ASTM D2709 [10]

ปัจจุบันมีการส่งเสริมการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ และเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค จึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพ โดยในการทำการวิจัยครั้งนี้ได้อ้างอิงรายละเอียดแบบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. ๒๕๔๘ [11] รายการที่ 9 โดยกำหนดให้มีปริมาณน้ำไม่สูงกว่า 0.05 ร้อยละโดยปริมาตร ใช้เกณฑ์ทดสอบตามมาตรฐาน American Society for Testing and

Materials : ASTM D2709 Standard Test Method for Water and Sediment in Distillate Fuels by Centrifuge

โดยลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพตามรายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงานแสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลชีวภาพตามรายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

รายการ	ข้อกำหนด	มาตรฐาน
1	ความหนาแน่น (kg/m ³)	860 – 900
2	ความหนืด (cSt)	3.5 – 5.0
3	จุดวาบไฟ (60 °C)	ไม่ต่ำกว่า 120
4	กำมะถัน (%โดยมวล)	ไม่สูงกว่า 0.001
5	เถ้าซัลเฟต (%โดยมวล)	ไม่สูงกว่า 0.02
6	น้ำ (%โดยปริมาตร)	ไม่สูงกว่า 0.05
7	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	ไม่สูงกว่า 0.5

การทดสอบคุณภาพตาม ASTM D 2709 ได้อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D 1796 Standard Test Method for Water and Sediment in Fuel Oils by the Centrifuge Method โดยจะต้องทำการคำนวณหาความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการเหวี่ยงทดสอบ วิธีการที่ใช้ในการคำนวณความเร็วรอบในการเหวี่ยงทดสอบมี 2 วิธี คือ

1. ใช้สมการในการคำนวณความเร็วรอบ โดยสมการที่ใช้ คือ

$$rpm = 265 \sqrt{\frac{rcf}{d}} \quad (2.2.1)$$

เมื่อ rcf คือ Relative centrifugal force

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอบเหวี่ยง(นิ้ว)

2. ใช้ตารางในการเลือกความเร็วรอบในการเหวี่ยงทดสอบ

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องเหวี่ยงและความเร็วรอบที่ใช้ในการเหวี่ยง

Diameters of Swing		Rpm at 500 rcf	Rpm at 800 rcf
In	cm		
12	30.5	1710	2160
13	33.0	1650	2080
14	35.6	1590	2000
15	38.1	1530	1930
16	40.6	1480	1870
17	43.2	1440	1820
18	45.7	1400	1770
19	48.3	1360	1720
20	50.8	1330	1680
21	53.3	1300	1640
22	55.9	1270	1600
23	58.4	1240	1560
24	61.0	1210	1530

ส่วนหลอดที่ใช้ในการเหวี่ยงทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D 1796 ได้กำหนดให้ใช้ Centrifuge Tube ซึ่งเป็นหลอดที่มีความสูง 203 มิลลิเมตร มีรูปร่างทรงโคน ดังรูปที่ 2.3

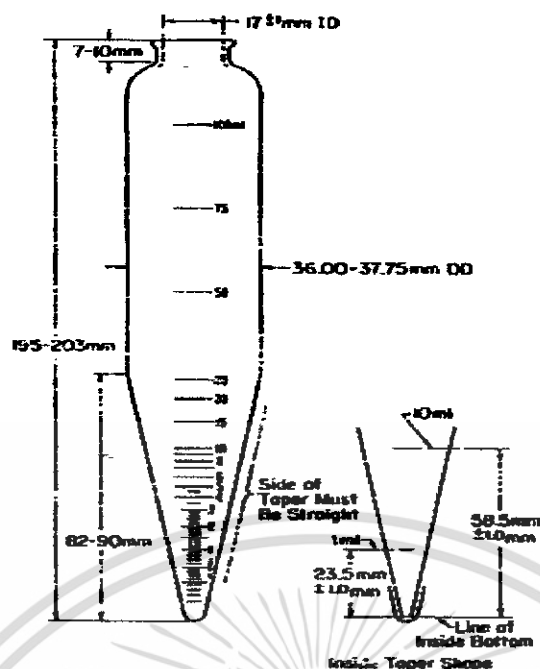
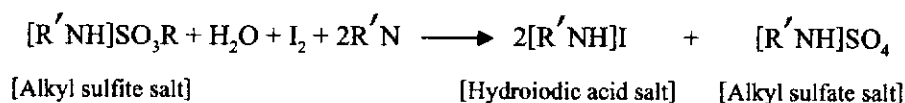
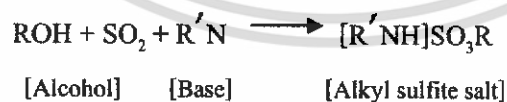


FIG. 1 Eight-Inch (203-mm) Centrifuge Tube

รูปที่ 2.3 Centrifuge Tube

2.2.2 การทดสอบหาปริมาณน้ำทั้งหมด (น้ำอิสระและน้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมัน) ในน้ำมันดีเซล ชีวภาพ [12]

Karl Fisher Titration เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดสอบ หลักการพื้นฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ คือ การใช้ปฏิกิริยา Bunsen ระหว่าง Iodine และ Sulfur dioxide ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในระบบ Non-aqueous ซึ่งจะมีปริมาณของ Sulfur dioxide ที่มากเกินไปอยู่ ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย (Solvent) และใช้เบส Pyridine เป็น Buffering agent โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



แอลกอฮอล์จะทำปฏิกิริยากับ Sulfur dioxide กลายเป็นสาร Intermediate alkyl sulfite salt ซึ่งจะถูกลอกออกด้วย Iodine กลายเป็น Alkyl sulfate salt โดยการทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาคด้วย

แอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะเป็น เมทานอล เอทานอล Diethylene glycol monoethyl ether (DEGEE) หรือแอลกอฮอล์ชนิดอื่นที่เหมาะสม

หลักการทำงานของการวิเคราะห์ด้วย Karl Fischer ใช้น้ำและ Iodine ในอัตราส่วน 1:1 ในการทำปฏิกิริยา Iodine ที่มากเกินไปจากการทำปฏิกิริยาจะถูกตรวจสอบด้วย Voltametrically โดย Indicator electrode จะให้สัญญาณเมื่อถึงจุดยุติในการไทเทรต

ปริมาณน้ำทั้งหมดในตัวอย่างจะถูกคำนวณจากค่าความแตกต่างของปริมาณของ Iodine ที่เป็นสารตั้งต้นและปริมาณของ Iodine ที่ถูกใช้ไปในการไทเทรต

2.3 การคำนวณ Vapor/Liquid Equilibrium (VLE) [7]

ในการคำนวณเกี่ยวกับ VLE สามารถนำกฎของ Raoult มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณได้ โดยมีสมมติฐาน 2 ข้อที่เป็นพื้นฐานในการคำนวณ คือ

1. วัฏภาคไอประพฤติตัวคล้าย Ideal gas
2. วัฏภาคของเหลวเป็น Ideal solution

จะเห็นได้ว่าจากสมมติฐานข้อแรกนั้นจะทำให้สามารถนำกฎของ Raoult มาประยุกต์ใช้ได้เฉพาะกับระบบที่มีความดันต่ำเท่านั้น

จากสมมติฐานทั้ง 2 ข้อนี้ ทำให้ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$y_i P = x_i P_i^{sat} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.3.1)$$

โดยที่ x_i คือ อัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคของเหลว

y_i คือ อัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคไอ

P คือ ความดันของระบบ

P_i^{sat} คือ ความดันไอขององค์ประกอบ i บริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิของระบบ

อัตราส่วนระหว่างวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวที่สภาวะสมดุล จะหาได้จากสมการ

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (2.3.2)$$

โดยที่ค่า K_i จะเรียกว่า ค่าคงที่สมดุลระหว่างวัฏภาคไอและของเหลวขององค์ประกอบ i หรือ K-Value

จากกฎของ Raoult K-Value จะหาได้จากสมการ

$$K_i = \frac{P_i^{sat}}{P} \quad (2.3.3)$$

จากสมการ (2.3.2) $y_i = K_i x_i$ และ $\sum y_i = 1$ ดังนั้น

$$\sum K_i x_i = 1 \quad (2.3.4)$$

สมการ (2.3.4) จะใช้สำหรับ Bubble point calculation เมื่อทราบค่าของ x_i ในทำนองเดียวกัน สมการที่ใช้ในการคำนวณสำหรับ Dew point calculation คือ

$$\sum \frac{y_i}{K_i} = 1 \quad (2.3.5)$$

สำหรับการคำนวณในระบบการแฟลช จะพิจารณาระบบ 2 วัฏภาคที่ทราบอุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบทั้งหมดของสาร โดยจะเริ่มจากพิจารณาระบบที่ประกอบไปด้วย 1 โมลของสารป้อนต่อหนึ่งหน่วยเวลา ให้ L คือ จำนวนโมลต่อหนึ่งหน่วยเวลาของวัฏภาคของเหลวที่ได้จากกระบวนการแฟลช และ V คือ จำนวนโมลต่อหนึ่งหน่วยเวลาของวัฏภาคไอที่ได้จากกระบวนการแฟลช จะได้สมการจากการทำดุลมวลวัตถุ คือ

$$F = I = L + V \quad (2.3.6)$$

และ

$$z_i = x_i L + y_i V \quad (2.3.7)$$

เนื่องจาก $L = I - V$ ดังนั้น

$$z_i = x_i(I - V) + y_i V \quad (2.3.8)$$

แทนค่า $x_i = y_i / K_i$ และแก้สมการเพื่อหา y_i จะได้

$$y_i = \frac{z_i K_i}{1 + V(K_i - 1)} \quad (2.3.9)$$

แต่เนื่องจาก $\sum y_i = 1$ ดังนั้นสมการ (2.3.9) สำหรับผลรวมของทุกองค์ประกอบคือ

$$\sum \frac{z_i K_i}{1 + V(K_i - 1)} = 1 \quad (2.3.10)$$



บทที่ 3

การคำนวณการออกแบบแฟลชดรัม

3.1 การคำนวณขนาดของแฟลชดรัม

ในการออกแบบครั้งนี้ได้คำนึงถึงอัตราการผลิตและความสามารถในการกำจัดน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นสำคัญ โดยกำหนดอัตราการป้อนน้ำมันดีเซลชีวภาพโดยประมาณคือ 150 ลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และทำการ ควบคุมความดันภายในแฟลชดรัมที่ความดัน 0.3 บรรยากาศ

ในเบื้องต้นได้กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางถังเป็น 0.35 เมตรจะได้ความสูงของถังเป็น 1 เมตร ปริมาตรถังทั้งหมดคือ 96 ลิตร

ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำข้อแนะนำในการออกแบบแฟลชดรัมของ Geal D. Ulrich [1] มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ โดยคำแนะนำในการออกแบบได้กล่าวไว้ว่า ถ้าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของถังมีค่าระหว่าง 0.3-4 เมตร ความสูงของถังทั้งหมดมีค่าระหว่าง 1-20 เมตร และอัตราส่วนของความสูงทั้งหมดต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าระหว่าง 3-5 ระยะจากวิฎภาคของเหลวถึงส่วนบนสุดของถังจะมีค่าประมาณ 1 เมตร หรือมีค่าประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง

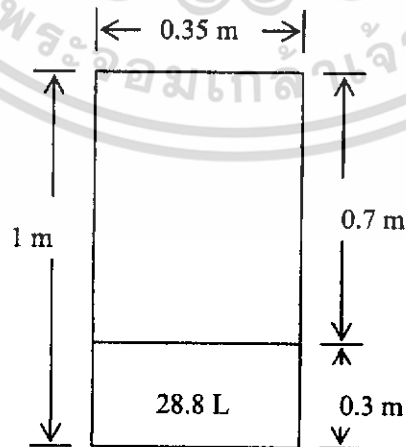
ดังนั้นจึงได้กำหนดให้ระดับของของเหลวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.3 เมตร ซึ่งมีระยะเหนือวิฎภาคของเหลวถึงส่วนบนสุดของถังมีค่าเท่ากับ 0.7 เมตร คิดเป็นปริมาตร Liquid holdup เท่ากับ

$$V = \pi r^2 h \quad (3.1.1)$$

$$V = \pi (0.175\text{m})^2 0.30\text{m}$$

$$V = 0.0288\text{m}^3$$

$$V = 28.8\text{L}$$



รูปที่ 3.1 ขนาดของแฟลชดรัม

จึงได้กำหนดปริมาตรของเหลวภายในถังเท่ากับ 25 ลิตร ซึ่งมี Residence time 10 นาที และความหนาแน่นของสารป้อนมีค่าประมาณ 0.9 g/cm^3 ดังนั้นจะสามารถคิดอัตราการไหลเชิงปริมาตร และอัตราการไหลเชิงมวลของสารป้อนได้ดังนี้

$$\dot{V}_F = \frac{25\text{L}}{10\text{min}} \times \frac{60\text{min}}{\text{hr}} = \frac{150\text{L}}{\text{hr}}$$

$$\dot{m}_F = \frac{150\text{L}}{\text{hr}} \times \frac{0.9\text{g}}{\text{cm}^3} \times \frac{1000\text{cm}^3}{1\text{L}} \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 135 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

เมื่อ \dot{V}_F : อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารป้อน (L/hr)

\dot{m}_F : อัตราการไหลเชิงมวลของสารป้อน (kg/hr)

ในการออกแบบจะกำหนดให้สารป้อนมีน้ำอยู่ประมาณ 0.5 % โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิห้องเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส เมื่อมีอุณหภูมิภายใน แฟลชক্রัมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส หรือ 348 องศาเคลวิน ดังนั้นอัตราการไหลเชิงโมลของปริมาณน้ำที่อยู่ในสารป้อน คือ

$$\dot{n}_{w,F} = \frac{0.5}{100} \times 135 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times \frac{1}{0.018 \frac{\text{kg}}{\text{gmol}}}$$

$$\dot{n}_{w,F} = 37.5 \frac{\text{gmol}}{\text{hr}}$$

เมื่อ \dot{n}_F : อัตราการไหลเชิงโมลของน้ำในสารป้อน (gmol/hr)

และสามารถคำนวณอัตราการไหลของไอน้ำเชิงปริมาตร เมื่อสมมติให้น้ำในสารป้อนระเหยกลายเป็นไอน้ำได้หมด ดังนี้

$$P\dot{V}_{w,F} = \dot{n}RT \quad (3.1.2)$$

$$\dot{V}_{w,F} = \frac{\dot{n}_{w,F}RT}{P} = \frac{37.5 \frac{\text{gmol}}{\text{hr}} \times \left(0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) \times 348\text{K}}{0.30\text{atm}}$$

$$\dot{V}_{w,F} = 3567 \frac{\text{dm}^3}{\text{hr}}$$

$$\dot{V}_{w,F} = 3567 \frac{\text{dm}^3}{\text{hr}} \times \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} \times \frac{1\text{hr}}{60\text{min}}$$

$$\dot{V}_{w,F} = 0.059 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

เมื่อ $V_{w,F}$: อัตราการไหลเชิงปริมาตรของไอน้ำ (m^3/min)
จากสมการ (2.3.1)

$$u_g = 0.064 \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}} \quad m/s \quad (2.3.1)$$

เมื่อ ความหนาแน่นน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าประมาณ 0.9 g/cm^3 ดังนั้นความหนาแน่นของไอน้ำที่ความดัน 0.3 atm และอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสสามารถคำนวณได้จาก

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} = \frac{0.30 \text{ atm} \times 18 \text{ g/mol}}{\frac{0.082 \text{ atm} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 348 \text{ K}}$$

$$\rho_g = 0.189 \frac{\text{g}}{\text{L}} \times \frac{\text{L}}{1000 \text{ cm}^3} = 1.89 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณ Superficial velocity ได้ดังนี้

$$u_g = 0.064 \text{ m/s} \left(\frac{0.9 \text{ g/cm}^3 - (1.89 \times 10^{-4}) \text{ g/cm}^3}{1.89 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3} \right)^{1/2}$$

$$u_g = 4.413 \text{ m/s}$$

$$u_g = 4.413 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 264.8 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

สามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของถังได้ดังนี้

$$\text{Area} = \frac{V_{w,F}}{u_g} = \frac{0.059 \text{ m}^3/\text{min}}{264.8 \text{ m/min}} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (3.1.3)$$

$$A = \pi r^2$$

$$r = 0.845 \text{ cm}$$

ค่ารัศมีที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยแสดงว่าในการออกแบบถังนั้นไม่ได้ถูกจำกัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง

3.2 การดุลพลังงาน (Heat balance) [3,4,5]

จากการทำดุลพลังงานในหัวข้อ 2.1.2 ทฤษฎีการคำนวณเพื่อการออกแบบ สมการ (2.1.3) จะได้ว่า

$$\dot{H}_{in} = \dot{H}_{out} \quad (3.2.1)$$

$$\dot{H}_F + \dot{Q} = \dot{H}_L + \dot{H}_V \quad (3.2.2)$$

เมื่อ \dot{H}_{in} : เอนทาลปีรวมของสารขาเข้าแฟลชดรัมต่อเวลา (kJ/s)

\dot{H}_{out} : เอนทาลปีรวมของสารขาออกจากแฟลชดรัมต่อเวลา (kJ/s)

\dot{H}_F : เอนทาลปีของสารป้อนต่อเวลา (kJ/s)

\dot{Q} : อัตราการให้ความร้อนแก่สารป้อน (kJ/s)

\dot{H}_L : เอนทาลปีของวัฏภาคของเหลวที่ได้จากการแฟลชต่อเวลา (kJ/s)

\dot{H}_V : เอนทาลปีของวัฏภาคไอที่ได้จากการแฟลชต่อเวลา (kJ/s)

สมมติแฟลชดรัมมีสถานะการทำงานเป็น Perfect mixing tank และระบบเป็น Adiabatic ดังนั้น จะทำการคำนวณหาค่าเอนทาลปีของแต่ละสายที่เข้าและออกจากแฟลชดรัมได้ดังนี้

3.2.1 การหาเอนทาลปีของสารป้อน (Enthalpy of feed)

เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของสารป้อนที่อุณหภูมิห้องเป็นอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) ดังนั้นเอนทาลปีของสารป้อนจึงเท่ากับ 0 kJ/kg และอัตราการให้ความร้อนแก่สารป้อนสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = m c_p \Delta T = m_F c_{p,F} (T_i - T_0) \quad (3.2.3)$$

เมื่อ T_i : อุณหภูมิของสารป้อนหลังจากได้รับความร้อนก่อนเข้าสู่แฟลชดรัม

T_0 : อุณหภูมิของสารป้อนที่อุณหภูมิห้อง

$c_{p,F}$: ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารป้อน (kJ/kg.K)

เนื่องจากปริมาณน้ำและเมทานอลในสารป้อนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันดังนั้น

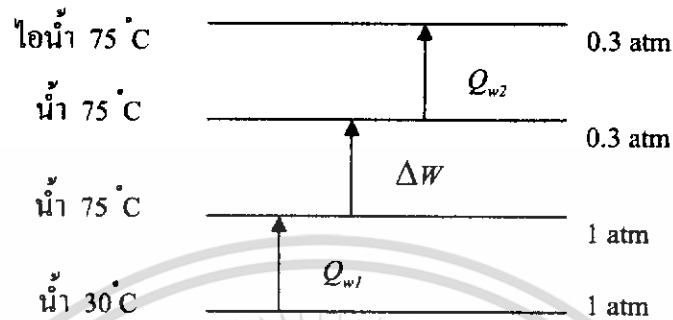
$$c_{p,F} \cong c_{p,oil}$$

$$Q = m_F c_{p,oil} (T_i - T_0) \quad (3.2.4)$$

ซึ่ง $c_{p,oil}$ มีค่าประมาณ 2 kJ/kg.K [13]

3.2.2 การหาเอนทัลปีของวัฏภาคไอ (Enthalpy of vapor)

วัฏภาคไอที่ได้จากกระบวนการแฟลช สามารถสมมติได้ว่ามีเฉพาะไอน้ำเพียงอย่างเดียว และเนื่องจากการระเหยกลายเป็นไอของน้ำเป็น State function ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงขั้นตอนการระเหยกลายเป็นไอของน้ำรูปแบบหนึ่ง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าความร้อนของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำได้ดังนี้

- น้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กลายเป็นน้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

$$Q_{w1} = \dot{m}_{w,v} c_{p,w,v} (T - T_0) \quad (3.2.5)$$

เมื่อ $c_{p,w,v}$: ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg.K)

T : อุณหภูมิภายในแฟลชครัม

- น้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศกลายเป็นน้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความดัน 0.3 บรรยากาศ

$$\Delta W = \Delta PV = V\Delta P + P\Delta V \quad (3.2.6)$$

เนื่องจากในการเปลี่ยนความดันจาก 1 atm ไปเป็น 0.3 atm จะเกิดการขยายตัวของของเหลวเป็นการให้งานออกมา แต่เนื่องจากของเหลวเป็น Incompressible fluid คือปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสมการ (3.2.5) จะได้เป็น

$$\Delta W = \Delta PV \approx V\Delta P \quad (3.2.7)$$

- น้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความดัน 0.3 บรรยากาศ กลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความดัน 0.3 บรรยากาศ

$$Q_{w2} = \dot{m}_{w,v} \Delta H_v \quad (3.2.8)$$

เมื่อ $\dot{m}_{w,v}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำ (kg/hr)

เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนน้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ กลายเป็นน้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความดัน 0.3 บรรยากาศ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ Q_{w1} และ Q_{w2} ดังนั้น

$$\begin{aligned} \dot{H}_v &= Q_{w1} + Q_{w2} \\ \dot{H}_v &= \dot{m}_{w,v} c_{p,w,v} (T - T_0) + \dot{m}_{w,v} \Delta H_v \end{aligned} \quad (3.2.9)$$

3.2.3 การหาเอนทัลปีของวัฏภาคของเหลว (Enthalpy of liquid)

เนื่องจากในวัฏภาคของเหลวที่ได้จากกระบวนการแฟลช คือ น้ำมันดีเซลชีวภาพที่มีปริมาณมากถึง 99.50 % โดยปริมาตร ดังนั้น

$$\dot{H}_L = \dot{m}_L c_{p,oil} (T - T_0) \quad (3.2.10)$$

3.2.4 การหาอุณหภูมิและความร้อนที่ให้แก่สารป้อน

เมื่อนำสมการ 3.2.3 3.2.8 และ 3.2.9 แทนค่าลงในสมการ 3.2.2 จะได้ว่า

$$\dot{m}_F c_{p,F} (T_i - T_0) = \dot{m}_{w,v} c_{p,w,v} (T - T_0) + (\Delta H_v \dot{m}_{w,v}) + \dot{m}_L c_{p,oil} (T - T_0) \quad (3.2.11)$$

ผลการคำนวณการคูณพลังงานตามสมการข้างต้นได้ผลดังต่อไปนี้
เมื่อกำหนดให้

$$\text{Feed}(\dot{m}_F) = 135 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$\text{Vapor}(\dot{m}_{w,v}) = 0.675 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$\text{Liquid}(\dot{m}_L) = 134.325 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$P = 0.3 \text{ atm}$$

$$C_{p,oil} = 2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta H_V = 2,300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_0 = 30^\circ \text{C} = 303 \text{K}$$

$$T = 75^\circ \text{C} = 348 \text{K}$$

$$C_{p,w,v} 30^\circ \text{C} = \left[3.47 + 1.45 \times 10^{-3} (300) \right] \left[8.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right] \left[\frac{1 \text{ kmol}}{18 \text{ kg}} \right] = 1.80 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_{p,w,v} 75^\circ \text{C} = \left[3.47 + 1.45 \times 10^{-3} (348) \right] \left[8.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right] \left[\frac{1 \text{ kmol}}{18 \text{ kg}} \right] = 1.79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

ดังนั้นค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 75 องศาเซลเซียส คือ

$$C_{p,w,v} \text{ average} = 1.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

เมื่อแทนค่าดังกล่าวข้างต้นลงในสมการที่ 3.2.10 จะได้ว่า

$$\left(135 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \left(2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \Delta T = \left[\left(0.675 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 1.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times 45 \text{K} \right) + \left(2300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0.675 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \right] + \left(134.325 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \left(2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (45 \text{K})$$

สามารถคำนวณหาค่าผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิของสารป้อนและอุณหภูมิห้อง (ΔT) ได้คือ

$$\Delta T = 50.7$$

ดังนั้นเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิห้องเป็น 303 เคลวิน จะสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของสารป้อนได้เป็น

$$T_i = 303 + 50.7 = 353.7K$$

$$T_j = 80.7^{\circ}C$$

ดังนั้นอุณหภูมิของสารป้อนก่อนเข้าสู่เพลชดรัมจะมีค่าเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิแก่สารป้อน โดยทำให้สารป้อนมีอุณหภูมิจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียส ได้ดังนี้

$$Q = \dot{m}_F C_{p,oil} \Delta T$$

$$Q = (135 \frac{kg}{hr}) (2 \frac{kJ}{kg \cdot K}) (353.7 - 303K) (\frac{1hr}{3600s})$$

$$Q = 3.8Kw$$

ดังนั้นถ้าใช้ความดัน 0.3 atm และใช้อุณหภูมิของสารป้อนเป็น 30 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการป้อนเชิงมวลของของผสมน้ำมันชีวภาพที่มีน้ำอยู่ในของผสม 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่ากับ $135 \frac{kg}{hr}$ และต้องการให้อุณหภูมิภายในเพลชดรัมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส จะต้องทำให้สายป้อนมีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และใช้พลังงานความร้อนเท่ากับ 3.8 kW

3.3 ผลที่ได้จากการออกแบบ

เพลชดรัมที่ได้ทำการออกแบบมีโครงสร้างดังนี้

วัสดุที่ใช้ทำเป็น โครงสร้าง	โลหะสแตนเลส
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	= 0.35 เมตร
ความสูง	= 1 เมตร
ปริมาตรรวม	= 96 ลิตร
ความสูงของระดับของเหลว	= 0.35 เมตร
อัตราการป้อนสารสูงสุด	= 450 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการให้ความร้อนแก่สารป้อน	= 4 กิโลวัตต์
สารป้อน	น้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการล้าง
ผลิตภัณฑ์	น้ำมันดีเซลชีวภาพที่มีปริมาณน้ำไม่เกิน 0.05 % โดยปริมาตร

เพลชดรัมที่ได้ดำเนินการสร้างในงานวิจัยนี้ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.3

บทที่ 4

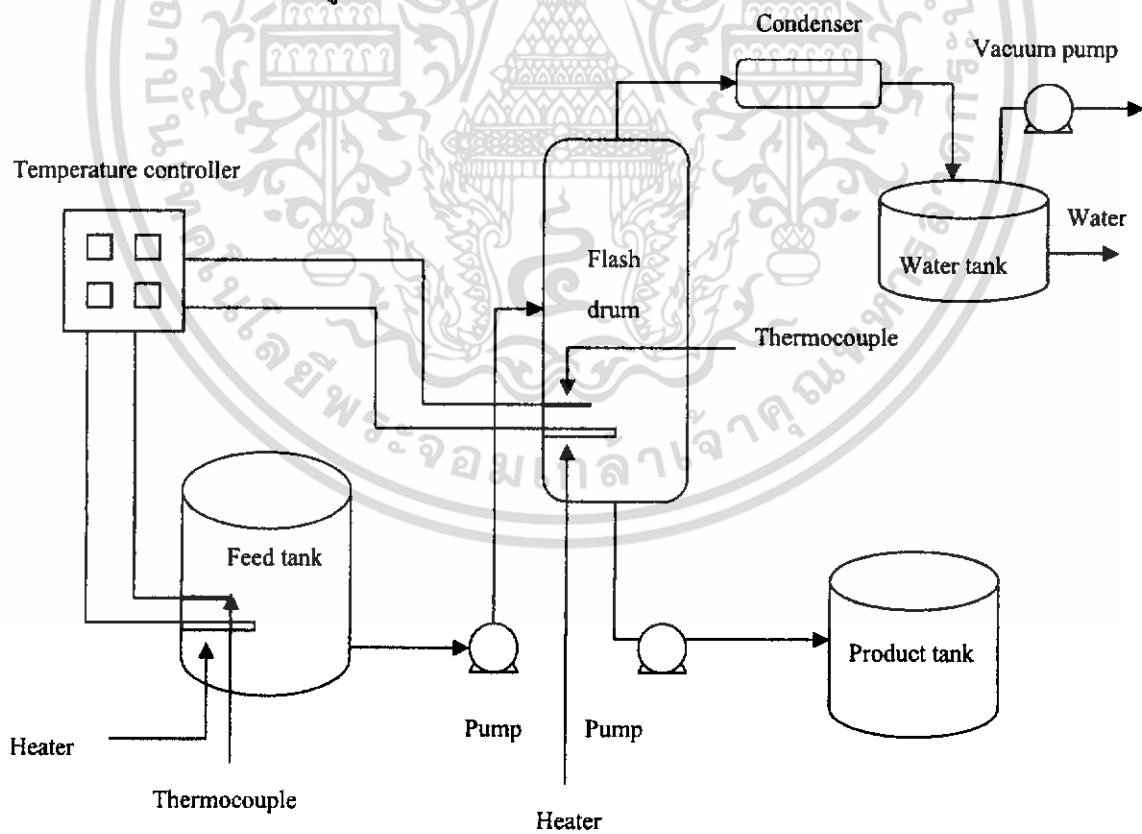
อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

4.1 สารเคมี

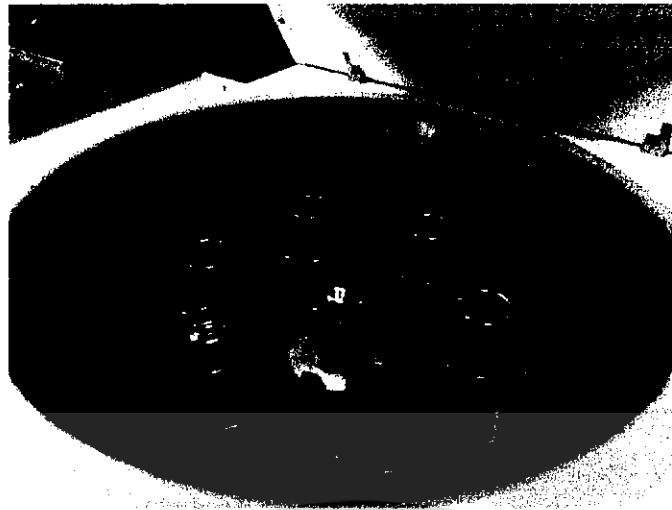
1. น้ำมันดีเซลชีวภาพผ่านกระบวนการล้าง
2. น้ำ

4.2 อุปกรณ์

1. ขวดรูปกรวย
2. บีเปิดพร้อมลูกยาง
3. บีกเกอร์
4. ขวดรูปชมพู
5. Syringe ขนาด 100 ไมโครลิตร
6. เครื่อง Centrifuge
7. เครื่องทดสอบหาปริมาณน้ำโดยการไทเทรตด้วยเครื่อง Karl Fisher Titrator
8. แฟลชดรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แฟลชดรัม



รูปที่ 4.2 เครื่อง Centrifuge ใช้ทดสอบหาปริมาณน้ำอิสระและตะกอน



รูปที่ 4.3 เครื่องทดสอบหาปริมาณน้ำทั้งหมดโดยการไทเทรตด้วย Karl Fisher Titrator

4.3 วิธีการทดลอง

4.3.1 การหาปริมาณน้ำที่ละลายได้และน้ำอิสระในน้ำมันดีเซลชีวภาพ

1. นำน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผ่านกระบวนการล้างมาแล้ว และอาจมีน้ำปริมาณเล็กน้อย ตกค้างอยู่ มาทำการเติมน้ำลงไป ในปริมาณ 0.1 0.5 และ 1 % โดยปริมาตร ตามลำดับที่ อุณหภูมิห้อง
2. เขย่าของผสมทั้งสองในขวดรูปกรวย แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น
3. เก็บตัวอย่างชั้นน้ำมัน นำมาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

4. ส่วนแรกนำไปทดสอบหาปริมาณน้ำอิสระโดยวิธีเหียงทดสอบ

5. ส่วนที่สองนำไปทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่ละลายในน้ำมัน โดยใช้เครื่องมือ Karl

Fisher Titrator

4.3.2 การหาประสิทธิภาพของแฟลชดรัม

การทดลองได้ออกแบบให้ทำการทดลองที่สภาวะความดันคงที่ตลอดการทดลอง คือ ที่ 40 มิลลิเมตรปรอท โดยไม่มีอัตราส่วนป้อนกลับ เนื่องจากปั๊มเฟืองที่มีอยู่ไม่สามารถปั๊มของเหลวภายในถึงสูญญากาศได้

จากภาคผนวก ก ตาราง ก ใช้น้ำอิมตัว ที่ความดัน 40 มิลลิเมตรปรอท ใช้น้ำอิมตัวจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 33 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงได้เลือกการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ซึ่งขั้นตอนในการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

1. อุ่นสารป้อนที่มีปริมาณน้ำ 0.2 % โดยมวล จนได้ระดับอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส
2. ทำการปั๊มสารป้อนเข้าสู่แฟลชดรัมที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้สภาวะความดันภายในแฟลชดรัมที่ความดันคงที่ตลอดการทดลองเท่ากับ 40 มิลลิเมตรปรอท โดยไม่มีอัตราส่วนป้อนกลับ มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง ทำการดำเนินการแฟลชแบบต่อเนื่อง
3. เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-3 โดยปั๊มสารป้อนเข้าสู่แฟลชดรัมด้วยอัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 55 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 โดยใช้สารป้อนที่มีปริมาณน้ำ 0.5 % โดยมวล อัตราการไหลเท่ากับ 180 และ 450 ลิตรต่อชั่วโมง และอุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 45 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำโดยการใช่วิธีเหียงทดสอบและไทเทรตโดยใช้เครื่องมือ Karl Fisher Titrator

4.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำอิสระด้วยวิธีเหวี่ยงทดสอบ

1. กำหนดคุณสมบัติของตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพที่นำมาทดสอบเป็น 21- 32 องศาเซลเซียส
2. เติมน้ำมันดีเซลชีวภาพ 100 มิลลิลิตรลงใน Centrifuge Tube
3. วางหลอดทดสอบลงในเครื่อง จัดหลอดให้สมดุลกัน โดยถ้าเครื่องเหวี่ยงบรรจุหลอดทดสอบได้ 6 หลอด หากจะทดสอบเพียง 2 หลอด ต้องจัดหลอดใส่ไว้ตรงข้ามกัน
4. เหวี่ยงน้ำมันในหลอดตัวอย่างเป็นเวลา 10 นาที โดยใช้ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที
5. บันทึกปริมาณน้ำและตะกอนในหลอดทดสอบ โดยน้ำและตะกอนจะต้องมีปริมาณไม่เกิน 0.05 มิลลิลิตรจึงจะได้คุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด

4.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำด้วยการไทเทรตโดยใช้เครื่องมือ Karl Fisher Titrator

1. ใช้ Syringe ดูดตัวอย่างน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ต้องการทดสอบมาประมาณ 2 มิลลิลิตร
2. ชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่าง
3. ป้อนค่าตัวเลขน้ำหนักของตัวอย่างลงในเครื่อง Karl Fisher Titrator
4. ฉีดสารตัวอย่าง
5. รอจนกระทั่งเครื่อง Karl Fisher Titrator แสดงผล ซึ่งจะแสดงในรูป % โดยมวลของน้ำในสารตัวอย่าง
6. บันทึกผลที่ได้

บทที่ 5

ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

5.1 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำที่ละลายได้

จากการทดลองหาปริมาณและการละลายของน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่อุณหภูมิห้อง โดยการเติมน้ำลงในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผ่านกระบวนการล้างมาแล้วในปริมาณ 0.1 0.5 และ 1 % โดยปริมาตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง ผลการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำแสดงดังตาราง 5.1

ตาราง 5.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระและปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณของน้ำที่เติมในสารป้อน (% โดยปริมาตร)	ปริมาณน้ำอิสระ (% โดยปริมาตร)	ปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมัน (% โดยมวล)
0.1	0	0.192
0.5	0.01	0.493
1	0.04	0.488

จากตาราง 5.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเติมน้ำลงไป ในน้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นปริมาณ 0.1% โดยปริมาตร ทำการเขย่าของผสมและตั้งทิ้งไว้ พบว่าไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างของผสมทั้งสอง แสดงว่าปริมาณน้ำทั้งหมดที่เติมน้ำลงไปละลายอยู่ในน้ำมัน เมื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพ ด้วยการเหวี่ยงทดสอบไม่พบปริมาณน้ำอิสระ และจากการทดสอบหาปริมาณน้ำทั้งหมดด้วยเครื่อง Karl Fisher Tritator สามารถวัดปริมาณน้ำทั้งหมดได้เท่ากับ 0.192 % โดยมวล เนื่องจากไม่พบปริมาณน้ำอิสระ ดังนั้นปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพเป็นน้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมัน

จากการเติมน้ำลงไป ในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผ่านกระบวนการล้างเป็นปริมาณ 0.1% โดยมวล สามารถวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ละลายในน้ำมันได้เท่ากับ 0.192 % โดยมวล แสดงว่าน้ำที่ตกค้างมาจากกระบวนการล้างจะมีค่าประมาณ 0.092 หรือประมาณ 0.1 % โดยมวล

และเมื่อเติมน้ำลงไป ในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ปริมาณ 0.5 และ 1 % โดยปริมาตร จะเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำกับน้ำมัน เมื่อนำชั้นน้ำมันมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำ พบว่ามีปริมาณน้ำอิสระ 0.01 และ 0.04 % โดยปริมาตร ตามลำดับ และมีปริมาณน้ำทั้งหมดเท่ากับ 0.493 และ 0.488 % โดยมวล ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำทั้งหมดที่ตรวจสอบได้จากเครื่อง Karl Fisher Tritator มีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 0.5 % โดยมวล ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าปริมาณน้ำทั้งหมดที่อิมตัวในน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าประมาณ 0.5 % โดยมวล

ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของแฟลชครัมที่สภาวะของสารป้อนมีปริมาณน้ำละลายอยู่เท่ากับ 0.2 และ 0.5 % โดยมวล โดยการเติมน้ำลงไปโดยสารป้อนในปริมาณ 0.1 และ 0.5 % โดยปริมาตร ตามลำดับ

5.2 ประสิทธิภาพของแฟลชครัม

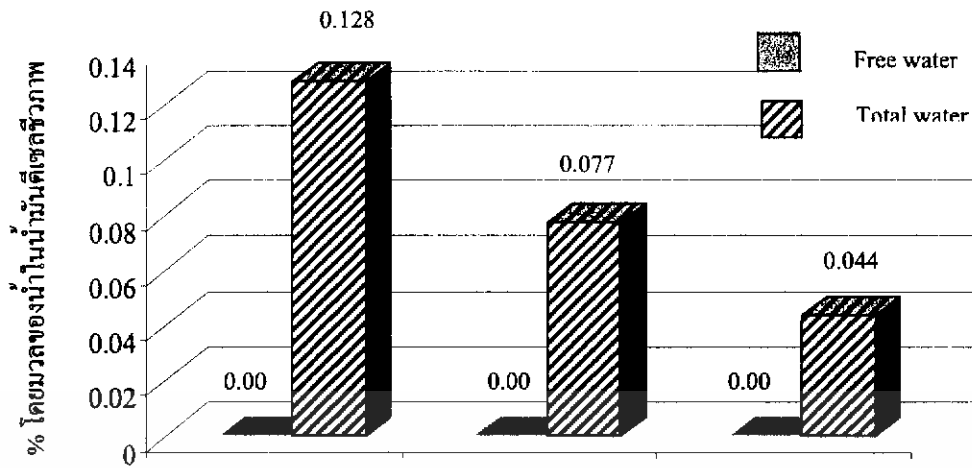
5.2.1 ปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โดยมวล

จากการทำการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของอุณหภูมิของสารป้อน และอัตราการไหลของสารป้อน ที่มีผลต่อปริมาณน้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากกระบวนการแฟลช ที่สภาวะสารป้อนมีปริมาณน้ำเท่ากับ 0.2 % โดยมวล ผลการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการแฟลชแสดงดังตาราง 5.2

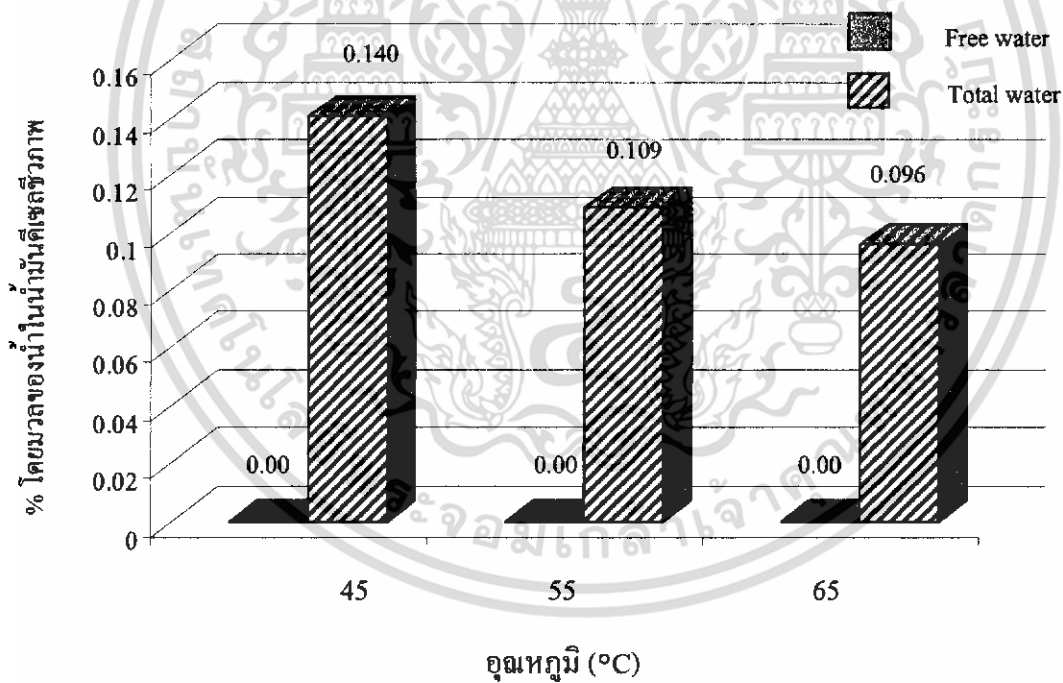
ตาราง 5.2 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการแฟลช เมื่อมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โดยมวล

อัตราการไหลของสารป้อน (L/hr)	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำอิสระ (%โดยปริมาตร)	ปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมัน (%โดยมวล)
100	45	0	0.128
	55	0	0.077
	65	0	0.044
180	45	0	0.140
	55	0	0.109
	65	0	0.096

จากผลการทดลองในตาราง 5.2 เมื่อนำมาทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่เหลือจากการแฟลช จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2

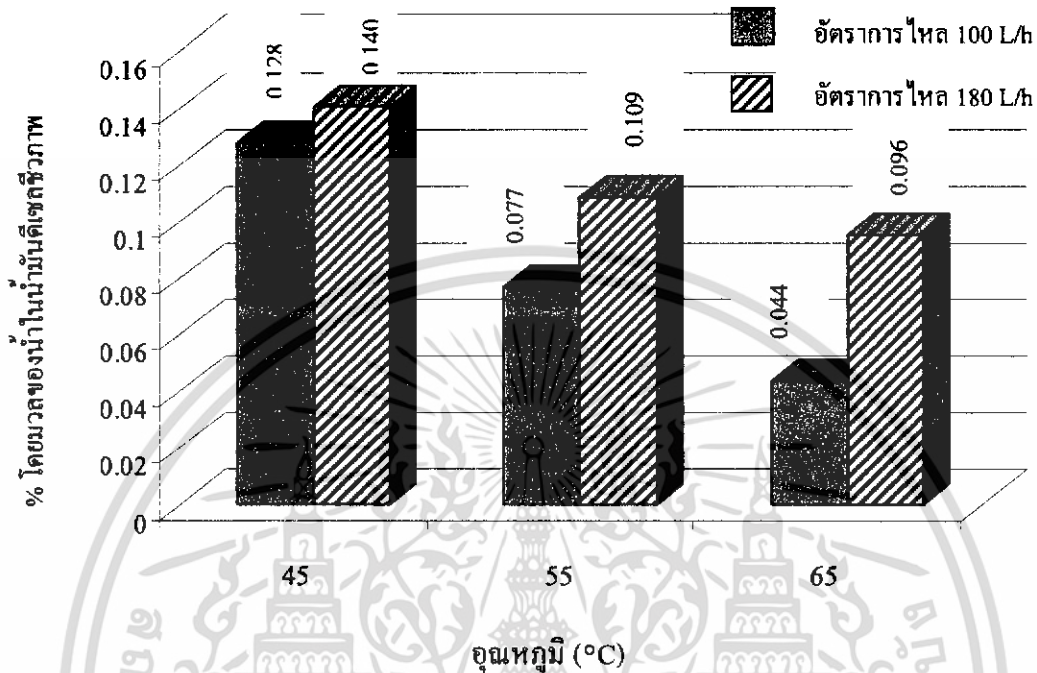


รูปที่ 5.1 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพ (% โคยมวล) ณ อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โคยมวล



รูปที่ 5.2 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพ (% โคยมวล) ณ อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โคยมวล

เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่
เหลือจากการเฟลซ จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการเฟลซ ที่อัตราการไหล
และอุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.2 % โดยมวล

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารป้อนเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณน้ำทั้งหมด
ในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่หลงเหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการเฟลซลดลง ทั้งนี้เนื่องจากในสถานะที่
ความดันคงที่ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลให้น้ำระเหยกลายเป็นไอได้มากขึ้น

จากรูปที่ 5.3 จะพบว่าที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 180 ลิตรต่อชั่วโมง จะมีปริมาณน้ำ
ทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่หลงเหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการเฟลซมากกว่าที่อัตราการไหลของ
สารป้อนเท่ากับ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการไหลของสารป้อนต่ำๆ อนุภาคเล็กๆ ของ
น้ำมันที่ป้อนเข้าสู่ถังเฟลซจะมีเวลาที่น้ำจะระเหยได้มากขึ้น ก่อนที่อนุภาคของน้ำมันจะตกลงสู่ก้นถัง
เป็นผลให้สามารถลดปริมาณน้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ดีกว่าที่อัตราการไหลของสารป้อน
สูงๆ

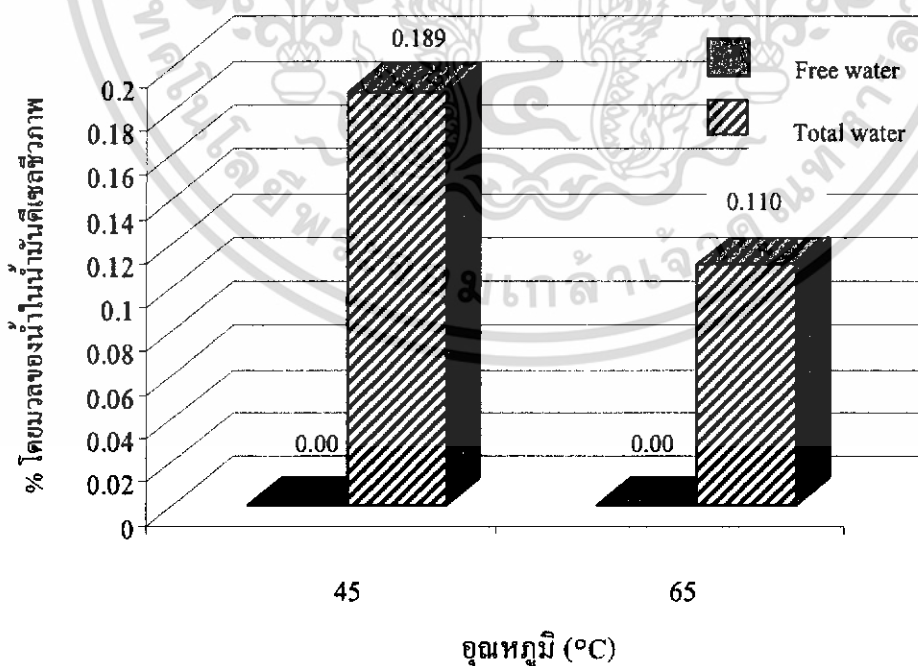
5.2.2 ปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล

จากการทำการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของอุณหภูมิของสารป้อน และอัตราการไหลของสารป้อน ที่มีผลต่อปริมาณน้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากกระบวนการแฟลช ที่สภาวะสารป้อนมี ปริมาณน้ำเท่ากับ 0.5 % โดยมวล ผลการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่าน กระบวนการแฟลชแสดงดังตาราง 5.3

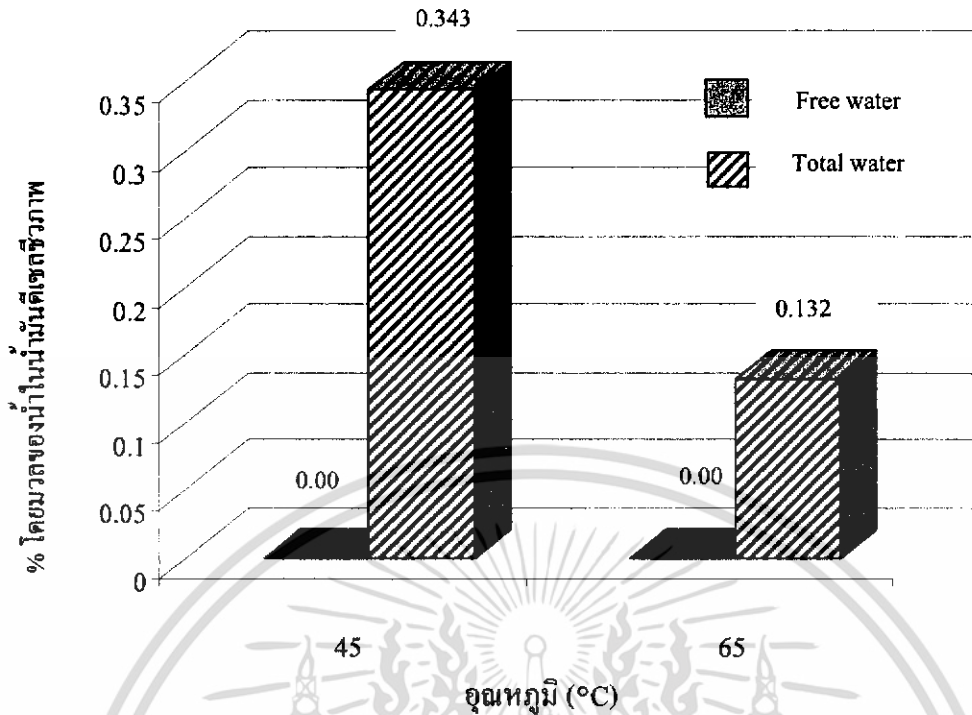
ตาราง 5.3 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการแฟลช เมื่อมี ปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล

อัตราการไหลของ สารป้อน (L/hr)	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำอิสระ (%โดยปริมาตร)	ปริมาณน้ำทั้งหมดใน น้ำมัน (%โดยมวล)
180	45	0	0.189
	65	0	0.110
450	45	0	0.343
	65	0	0.132

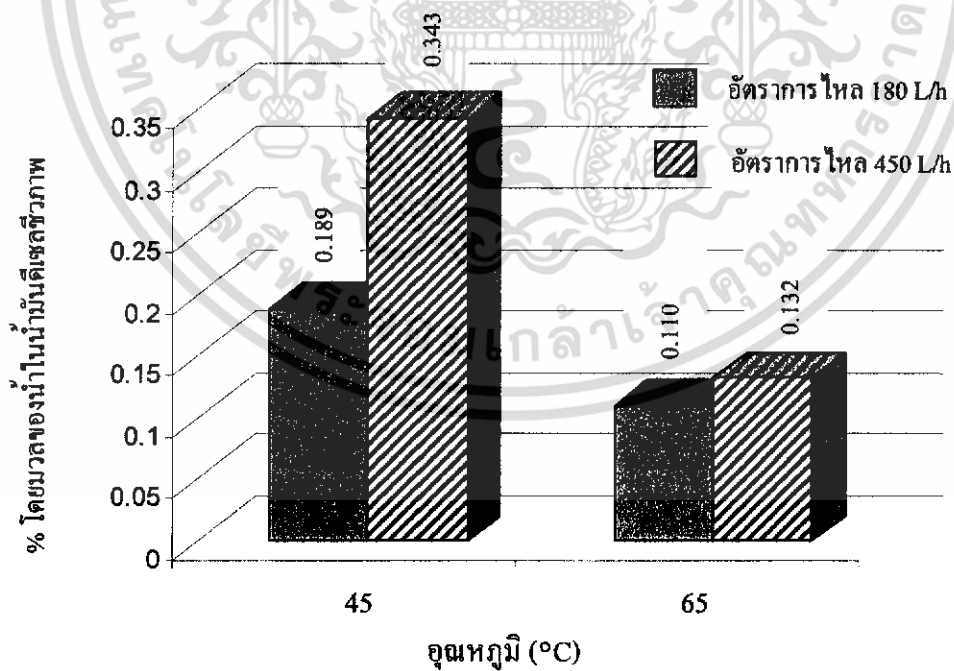
จากผลการทดลองในตาราง 5.2 เมื่อนำมาทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ ปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่เหลือจากการแฟลช จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดง ในรูปที่ 5.4 และ 5.5



รูปที่ 5.4 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพ (% โดยมวล) ณ อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล



รูปที่ 5.5 ปริมาณน้ำอิสระและน้ำทั้งหมดอยู่ในน้ำมันดีเซลชีวภาพ (% โดยมวล) ณ อัตราการไหล 450 ลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่เหลือจากการแฟลช จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากผ่านกระบวนการแฟลช ที่อัตราการไหลและอุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำในสารป้อนเท่ากับ 0.5 % โดยมวล

จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารป้อนเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่หลงเหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการฟเลชลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 5.2.1

จากรูปที่ 5.6 จะพบว่าที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 450 ลิตรต่อชั่วโมง จะมีปริมาณน้ำทั้งหมดในน้ำมันดีเซลชีวภาพที่หลงเหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการฟเลชมากกว่าที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 5.2.1 เช่นกัน

5.3 ผลการคำนวณค่าคงที่สมดุลระหว่างวัฏภาคไอและของเหลว (K-Value)

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่สมดุลระหว่างวัฏภาคไอและของเหลว (K-Value) ของน้ำ หรือ K_{H_2O} คือ สมการ (2.3.2)

$$K_{H_2O} = \frac{y_{H_2O}}{x_{H_2O}} \quad (2.3.2)$$

โดย y_{H_2O} มีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากในวัฏภาคไอที่ได้จากกระบวนการฟเลช คือ ไอน้ำ เพียงอย่างเดียว

ผลการคำนวณหาค่า K_{H_2O} แสดงดังตาราง 5.4 - 5.6

ตาราง 5.4 ค่า K_{H_2O} ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

ปริมาณน้ำในสารป้อน (% โดยมวล)	อัตราการไหลของสารป้อน (L/hr)	K_{H_2O}
0.2	100	48.57
	180	42.41
0.5	100	32.38
	450	17.85
เฉลี่ย		35.30

ตาราง 5.5 ค่า K_{H_2O} ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

ปริมาณน้ำในสารป้อน (% โดยมวล)	อัตราการไหลของสารป้อน (L/hr)	K_{H_2O}
0.2	100	83.33
	180	55.55
0.5	100	-
	450	-
เฉลี่ย		69.44

ตาราง 5.6 ค่า K_{H_2O} ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ปริมาณน้ำในสารป้อน (% โดยมวล)	อัตราการไหลของสารป้อน (L/hr)	K_{H_2O}
0.2	100	141.67
	180	62.50
0.5	100	55.65
	450	45.45
เฉลี่ย		76.32

จากผลการคำนวณพบว่าค่า K_{H_2O} จะไม่ขึ้นกับอัตราการไหลและปริมาณน้ำในสารป้อน แต่จะขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น

โดยที่ค่า K_{H_2O} เฉลี่ยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งค่า K_{H_2O} ที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียสมีค่าเฉลี่ยเท่า 35.30 69.44 และ 76.32 ตามลำดับ

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าแฟลชครัมที่ได้ทำการออกแบบและสร้างมานั้น สามารถนำมาใช้ในการระเหยน้ำออกจากน้ำมันดีเซลชีวภาพได้เป็นอย่างดี สามารถลดปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพจนมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน โดยสามารถลดปริมาณน้ำในน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ในปริมาณสูงสุดถึง 78.25 % กำลังการแฟลชสูงสุดที่อัตราการแฟลช 450 ลิตรต่อชั่วโมง

จากการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการแฟลช ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำจะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแฟลชเพิ่มขึ้น และจะมีประสิทธิภาพที่อัตราการแฟลชไม่สูงจนเกินไป เนื่องจากที่อัตราการไหลของสารป้อนต่างๆ อนุภาคเล็กๆ ของน้ำมันภายในถังแฟลชจะมีเวลาในการทำให้น้ำระเหยได้มากขึ้น ก่อนที่อนุภาคของน้ำมันจะตกลงสู่ก้นถัง

6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ค่า K_{H_2O} ที่คำนวณได้ดังตาราง 5.4 – 5.6 ที่อุณหภูมิเดียวกัน อาจมีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง ดังนั้นหากทำการทดลองซ้ำหลายครั้งและมีการควบคุมสภาวะที่ใช้ในการทดลองให้คงที่ตลอดการทดลองจะทำให้สามารถลดความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทำการทดลองจะพบปัญหาในการทดลองบางประการ ดังนี้

1. แฟลชครัมที่สร้างขึ้นไม่มีระบบในการปรับและควบคุมความดัน ทำให้ไม่สามารถปรับความดันภายในแฟลชครัมได้ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองที่สภาวะความดันคงที่ตลอดการทดลอง คือที่ความดันต่ำสุดที่แฟลชครัมสามารถทำได้
2. ปั๊มเฟือง (Gear pump) ที่ใช้ในการปั๊มอัตราส่วนป้อนกลับมีกำลังในการปั๊มไม่เพียงพอที่จะเอาชนะความดันต่ำภายในแฟลชครัมได้ ทำให้ไม่สามารถทำการปั๊มอัตราส่วนป้อนกลับได้ เป็นผลให้ต้องดำเนินการทดลองแบบไม่มีอัตราส่วนป้อนกลับตลอดการทดลอง
3. มีการติดตั้งระบบ Circulation ภายในถังสารป้อน และมีการให้ความร้อนแก่สารป้อนโดยขดลวดให้ความร้อน แต่เนื่องจากปั๊มเฟืองที่ใช้มีขนาดไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการกระจายความร้อนได้ไม่ดี ผู้ทำการวิจัยจึงได้ทำการแก้ปัญหาโดยใช้มีพายกววนสารป้อนในถังในขณะที่มีการให้ความร้อน เพื่อให้มีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึง

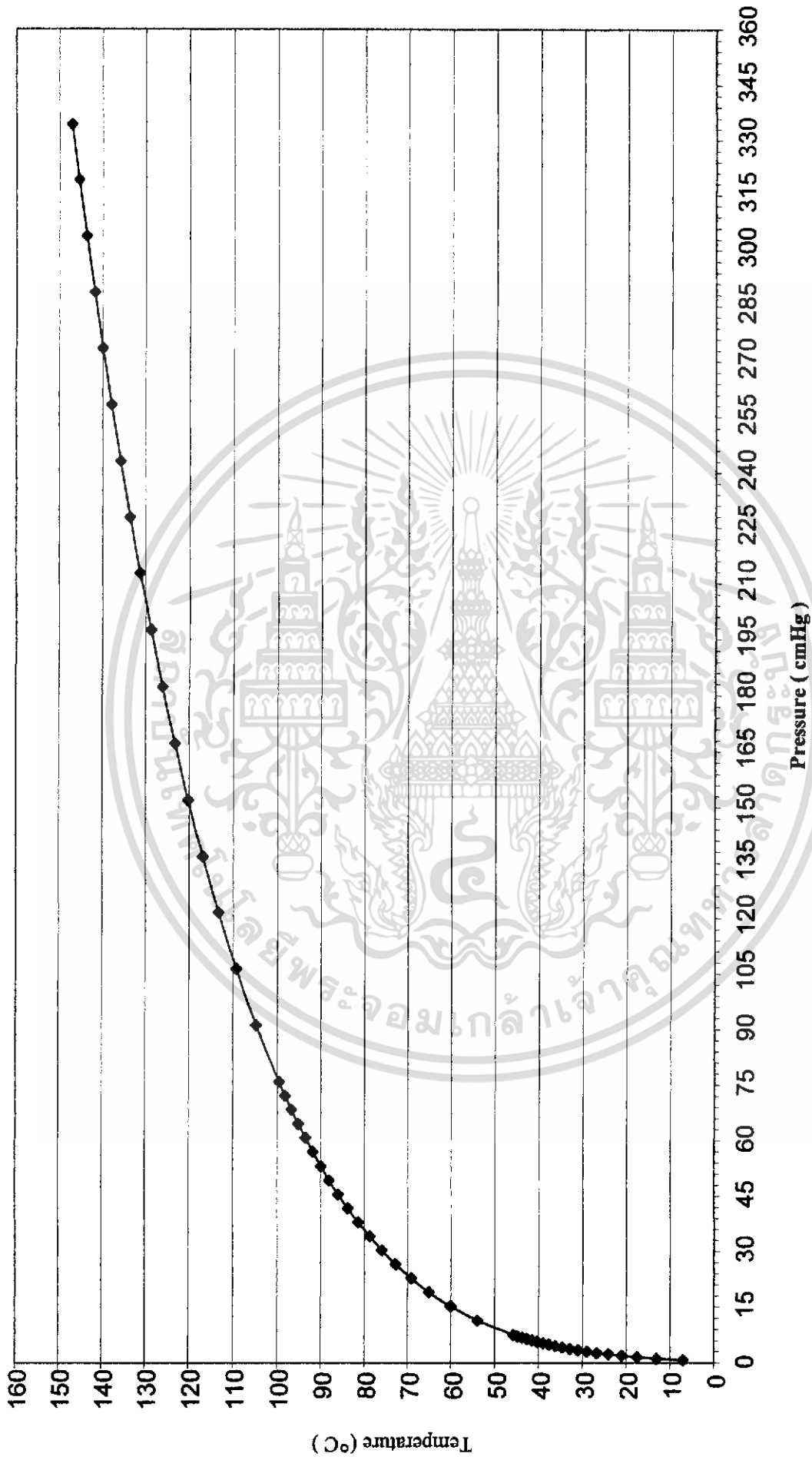
เอกสารอ้างอิง

- [1] Gael D. Ulrich. *A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1984
- [2] Martin Mittelbanch & Claudia Remschmidt. *Biodiesel The Comprehensive Handbook*. Austria: Martin Mittelbanch (Publisher). 2004.
- [3] Holman J.P. *Heat Transfer*. 9th ED. New York: McGraw-Hill. 2002.
- [4] A.F. Mills. *Basic heat & mass transfer*. New Jersey: Prentice-hell. 1999
- [5] Frank P. Incropera, David P. Dewitt. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 3rd ED. Singapor: John Wiley & sons. 1990
- [6] Christie John Geankoplis. *Transport Processes and Separation Processes Principles (Include unit operation)*. International Edition. 4th ED. New Jercy: Prentice Hall. 2003.
- [7] J.M. Smith, H.C. Van Ness and M.M. Abbott. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. International Edition. 6th ED. Singapore: McGraw-Hill. 2001.
- [8] J.P. Holman. *Thermodynamics*. 4th ED. Singapor:McGraw-Hill. 1998
- [9] Kennenth Wark, JR. Donald E.Richards. *Thermodynamics*. 6th ED. Singapor:McGraw-Hill. 1999
- [10] American Society for Testing and Materials. *1992 annual book of ASTM standards*. Philadelphia: ASTM. 1992
- [11] กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. *การกำหนดค่านิยมและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน*. กรุงเทพฯ. 2548
- [12] <http://www.emdchemicals.com>
- [13] Perry, R.H., D.W. Green, and J.O. Maloney. *Perry's Chemical Engineers' Handbooks*. 7th ED. New York: McGraw-Hill. 1997.

ภาคผนวก ก
ตารางไอน้ำ

ตาราง ก ไอน้ำอิ่มตัว [5]

Temperature (°C)	Pressure(mmHg)	Pressure(cmHg)
6.98	7.6	0.76
13.04	11.4	1.14
17.51	15.2	1.52
21.1	19	1.9
24.1	22.8	2.28
26.69	26.6	2.66
28.98	30.4	3.04
31.03	34.2	3.42
32.9	38	3.8
34.61	41.8	4.18
36.18	45.6	4.56
37.65	49.4	4.94
39.02	53.2	5.32
40.32	57	5.7
41.53	60.8	6.08
42.69	64.6	6.46
43.79	68.4	6.84
44.83	72.2	7.22
45.83	76	7.6
54	114	11.4
60.09	152	15.2
64.99	190	19
69.12	228	22.8



รูปที่ ๓ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (cmHg) และอุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัว (°C)