ภาคผนวก ข
การออกแบบถังปฏิกรณ์และการคำนวณต้นทุนการผลิต

1. การหาปริมาตรถังสำหรับการออกแบบ

คิดจากกำลังการผลิตจากกลีเซอรอลดิบ 100 กิโลกรัม

ความเข้มข้นกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบ 70 เปอร์เซ็นต์

สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาใช้สัดส่วนโมลกลีเซอรอลต่อไขปาล์มสเตียรีน 2.5 ต่อ 1

กลีเซอรอลดิบ 100 กิโลกรัม มีปริมาณของกลีเซอรอล 70 กิโลกรัม

น้ำหนักโมเลกุลของกลีเซอรอล 92.09 กรัม/โมล

กลีเซอรอล 70 กิโลกรัม คิดเป็นจำนวนโมล = 70,000 กรัม/(92.09 กรัม/โมล)

= 760.126 โมล

ดังนั้นต้องใช้จำนวนโมลของไขปาล์มสเตียรีน = 760.126 โมล/2.5 โมล

= 304.05 โมล

น้ำหนักโมเลกุลของไขปาล์มสเตียรีน 834 กรัม/โมล

ดังนั้นต้องใช้ไขปาล์มสเตียรีนน้ำหนัก = 304.05 โมล x 834 กรัม/โมล

= 253,578 กรัม

ความหนาแน่นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์จากตารางที่ ข.1 ที่ 250 องศาเซลเซียส 1.090625 กรัม/มิลลิลิตร

ปริมาตรของกลีเซอรอลเมื่อมีอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

= (100,000 กรัม) / (1.090625 กรัม/มิลลิลิตร)

= 91,690.54 มิลลิลิตร

= 91.69 ลิตร

ปริมาตรของไขปาล์มสเตียรีนจากตารางที่ ข.2 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.8756 กรัม/มิลลิลิตร

ดังนั้นปริมาตรของไขปาล์มสเตียรีน = (253,578 กรัม)/(0.8756 กรัม/มิลลิลิตร)

= 289604.8 มิลลิลิตร

= 289.60 ลิตร

ปริมาตรรวมของกลีเซอรอลและไขปาล์มสเตียรีน = 91.69 + 289.60 ลิตร

= 381.29 ลิตร

ปรับปริมาตรรวมสาร = 400 ลิตร

เมื่อปริมาตรสารเท่ากับ 400 ลิตร เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาการสูญเสียสารระหว่างการทำปฏิกิริยาเมื่อทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะสุญญากาศจะเกิดฟองขึ้น จึงให้มีพื้นที่ในการเกิดฟอง 1 ใน 3 ของปริมาตรถัง ดังนั้นปริมาตรถังสำหรับการออกแบบถึงเท่ากับ 600 ลิตร

ตารางที่ ข.1 ความหนาแน่นของกลีเซอรอลบริสุทธิ์

อุณหภูมิ (^{o}C)	ความหนาแน่น (g./ml)	อุณหภูมิ (^{o}C)	ความหนาแน่น (g./ml)
0	1.27269	130	1.18729
10	1.26699	140	1.17951
15	1.26443	160	1.16440
20	1.26134	180	1.14864
30	1.25512	200	1.13178
40	1.24896	220	1.11493
54	1.2397	240	1.09857
75.5	1.2256	260	1.08268
99.5	1.2097	280	1.06725
110	1.20178	290	1.05969
120	1.19446		

ที่มา : Junggermann. (1991)

ตารางที่ ข.2 สมบัติของน้ำมันปาล์ม

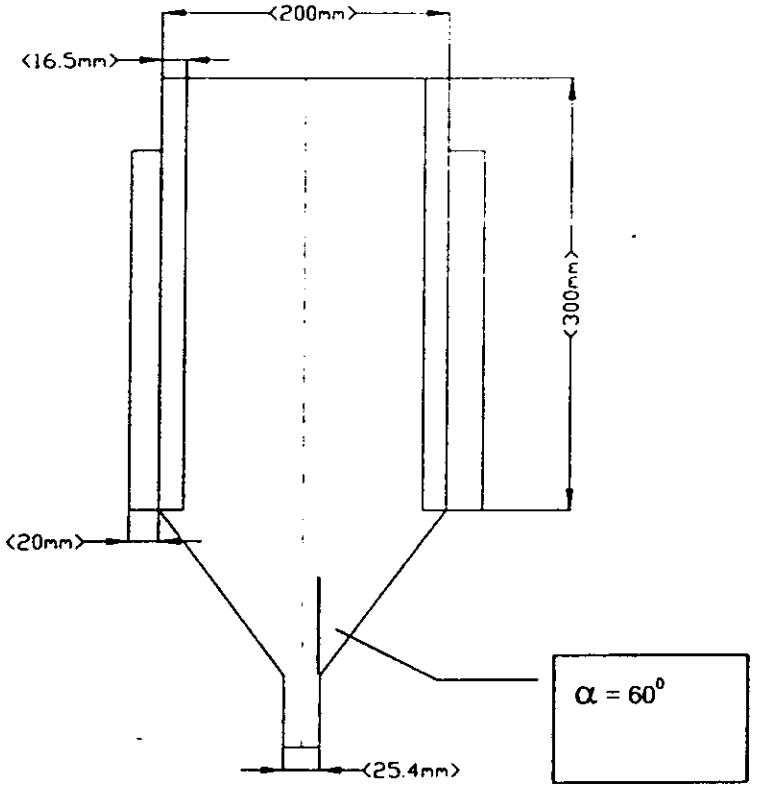
Tests	Oleins	Stearins
Apparent density at		
40 ^{0}C (g/ml)	0.8965-0.8992	
60 ^{0}C (g/ml)		0.8659-0.8756
Refractive index		
n_D 40 ^{0}C	1.4586-1.4592	
n_D 60 ^{0}C		1.4472-1.4511
Saponification value mg KOH/g oil	194-202	193-206

ที่มา : Hui (1996)

2. **การหาขนาดของถังปฏิกรณ์**

ได้ใช้ถังปฏิกรณ์ต้นแบบจากการทดลอง มีสเกลต่างๆ ดังภาพที่ ข.1

ความสูงของทรงกระบอกถัง	30	เซนติเมตร	
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในทรงกระบอกถัง	20	เซนติเมตร	
ดังนั้นอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายในถังต่อความสูง	=	2/3	
ให้เส้นผ่าศูนย์กลางถังปฏิกรณ์ที่จะออกแบบ	=	800	มิลลิเมตร
ดังนั้นความสูงของทรงกระบอกถัง	=	800 x (3/2)	
	=	1,200	มิลลิเมตร



ภาพที่ ข.1 ขนาดของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

หาขนาดของกรวยล่าง

มุม α เท่ากับ 60 องศา จากถังในการทดลอง ดังนั้นในการออกแบบถังใหม่ มุมยอดกรวยของถังใหม่จึงเท่าเดิม

ขนาดของ Buffle

ถังที่ใช้ในการทดลอง	มีความกว้างของ Buffle	=	1.65	เซนติเมตร
	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	=	20	เซนติเมตร
ถังที่ออกแบบใหม่	มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	=	80	เซนติเมตร
ดังนั้น	มีความกว้างของ Buffle	=	(1.65/20) x 80	
		=	6.6	เซนติเมตร

ขนาดของใบพัด

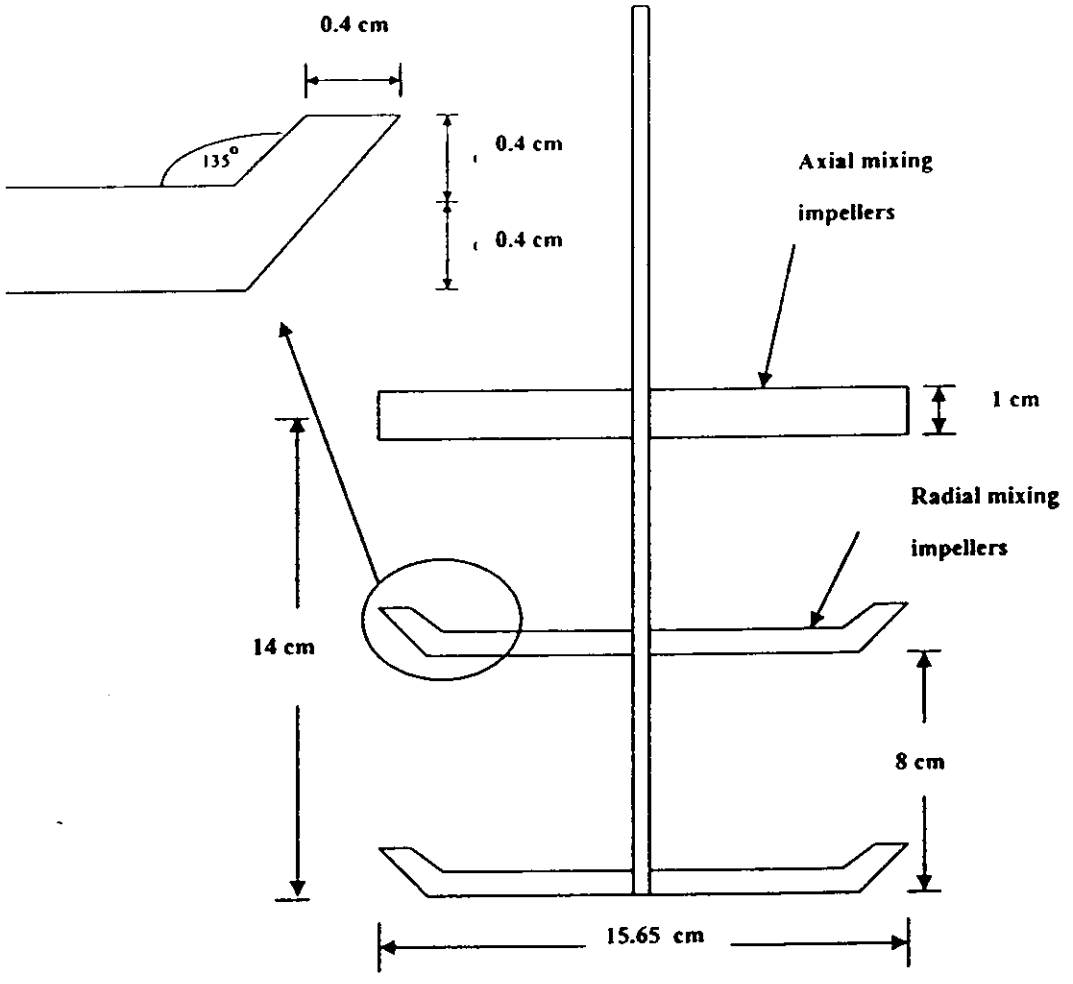
จากภาพที่ ข.2 เป็นขนาดใบพัดที่ใช้ในการทดลอง และรูปทรงดังภาพที่ ข.3

	มีความยาวของใบพัด	=	15.65	เซนติเมตร
	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในถัง	=	20	เซนติเมตร
ถังที่ออกแบบใหม่	มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	=	80	เซนติเมตร
ดังนั้น	ความยาวของใบพัด	=	(15.65/20) x 80	
		=	62.6	เซนติเมตร

คำนวณปริมาตรถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบ

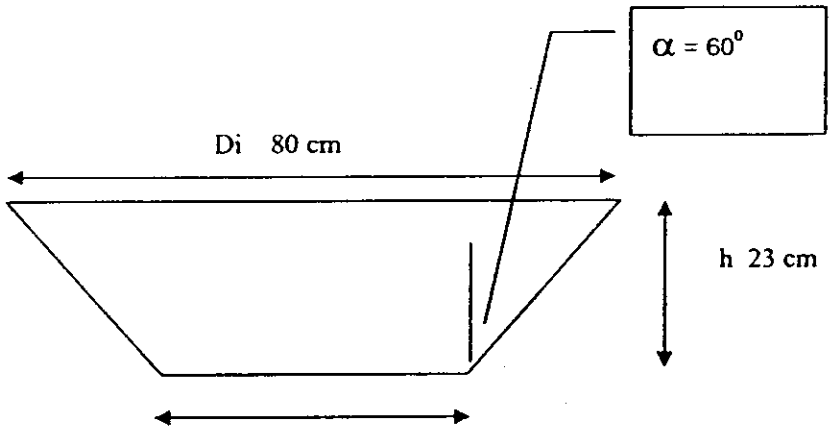
ถังทรงกระบอก	มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (r)	80	เซนติเมตร
	ความสูงทรงกระบอก	120	เซนติเมตร
กรวยล่าง (ภาพที่ ข.4)	มี di	3.81	เซนติเมตร
	ความสูงกรวย	23	เซนติเมตร

ปริมาตรทรงกระบอก	เท่ากับ	¶ x (40^2) x 120	
	เท่ากับ	603,429	ลูกบาศก์เซนติเมตร
	เท่ากับ	603.43	ลิตร



ภาพที่ ข.2 ขนาดของใบพัดที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ ข.3 รูปทรงใบพัดที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ข.4 ขนาดกรวยล่างของถังปฏิกรณ์ที่ได้ออกแบบ

ปริมาตรกรวย = 0.262 h (Di^2+ Didi + di^2)

= 63.67 ลิตร

ปริมาตรของส่วนประกอบอื่นๆ ภายใน จากการอ่านค่าด้วยโปรแกรม Mechanical Desktop ได้ปริมาตรส่วนต่างๆ ดังนี้

1. Buffle = 1.49 ลิตร
2. คอยล์ร้อน = 10.57 ลิตร
3. ใบพัด = 1.71 ลิตร

ดังนั้นปริมาตรของถังเมื่อไม่คิดปริมาตรของฝาถัง เท่ากับ ปริมาตรของถัง – ปริมาตรของ Buffle – ปริมาตรของคอยล์ร้อน – ปริมาตรของใบพัด

เท่ากับ 667 – 1.49 – 10.57 – 1.71

เท่ากับ 626.33 ลิตร

2. การหาความหนาของเหล็กที่ใช้

เนื่องจากถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบต้องสามารถทำงานภายใต้ความดันและสภาพสุญญากาศ จึงต้องออกแบบทั้งสองสภาวะ ว่าความหนาแต่ละสภาวะมากน้อยแค่ไหน

2.1. ถังความดันภายใต้ความดันภายนอก

(1) ฝาถังปฏิกรณ์

ออกแบบเป็นหัวถังครึ่งวงรี 2 : 1

กำหนดอุณหภูมิในการออกแบบ = อุณหภูมิให้งาน + 30 องศาเซลเซียส

= 200 + 30

= 230 องศาเซลเซียส

การคำนวณเมื่อ P = ความดันออกแบบภายนอก 1.055 kg/cm^2g

D_0 = เส้นศูนย์กลางภายนอกของหัวถัง (มิลลิเมตร)

R_0 = 0.9 D_0 สำหรับหัวถังทรงรี

เมื่อสมมุติความหนาถัง : t = 2.5 มิลลิเมตร

R_0 = 0.9 (805)

= 724.5 มิลลิเมตร

คำนวณหาค่า A = $0.125/(R_0/t)$

= 0.125/(724.5/2.5)

= 0.000431

นำค่า A ไปหาค่า B จากภาพที่ 33 ได้ B = 350

ได้ B = 350

คำนวณค่า P_a = $B/(R_0/t)$

= 350/(724.5/2.5)

= 1.208 kg/cm^2

เมื่อเปรียบเทียบ P_a กับ P ความหนาที่สมมุติ t = 2.5 มิลลิเมตร อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

(2) ตัวถังปฏิกรณ์

ออกแบบเป็นทรงกระบอก

การคำนวณเมื่อ P = ความดันออกแบบภายนอก 1.055 kg/cm^2g

D_0 = เส้นศูนย์กลางภายนอกของหัวถัง (มิลลิเมตร)

L_0 = ความยาวของทรงกระบอก

= 1,250 มิลลิเมตร

เมื่อสมมุติความหนาถัง : t = 2 มิลลิเมตร

D_0 = 804 มิลลิเมตร

L/D_0 = 1.555

D_0/t = 402

หาค่า A ได้ 0.0013 และนำค่า A ไปหาค่า B ต่อ

ได้ B = 430

P_a = $2B/3(D_0/t)$

= 1.43 kg/cm^2

เมื่อเปรียบเทียบ P_a กับ P ความหนาที่สมมุติ t = 2 มิลลิเมตร. อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

(3) ตัวกรวยถัง

การคำนวณเมื่อ P

ข้อมูลกรวยที่ได้ออกแบบ

α = ครึ่งหนึ่งของมุมยอด, องศา

= 60^0

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ณ ปลายด้านใหญ่, มิลลิเมตร

L = ความยาวของกรวย, มิลลิเมตร

D_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ณ ปลายด้านเล็ก, มิลลิเมตร

เมื่อสมมุติความหนาถัง : t = 3 มิลลิเมตร

t_e = $t \cos \alpha$

= 1.5 มิลลิเมตร

L_e = $(L/2)(1 + D_2/D_1)$

= 123.625 มิลลิเมตร

L_e/D_1 = 123.625/800

= 0.154

D_1/t_e = 800/1.5 = 533

นำค่า L_e/D_i และ D/t_e ไปหาค่า A จากภาพที่ 28 ได้ A = 0.0009

นำค่า A ไปหาค่า B ได้ B = 420

แทนค่าในสูตร P_a = $4B/(3(D/t_e))$

= $(4 \times 420)/(3 \times 533)$

= $1.05\ kg/cm^2$

เมื่อเปรียบเทียบ P_a กับ P ความหนาที่สมมุติ t = 3 มิลลิเมตร อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

2.2.ถังภายใต้ความดันภายใน

(1) ฝาถังปฏิกรณ์

ออกแบบเป็นหัวถังครึ่งวงรี 2 : 1

การคำนวณเมื่อ P = ความดันออกแบบ 1.25 บาร์ ($1.275\ kg/cm^2$)

D = เส้นศูนย์กลางภายนอกภายใน (800 มิลลิเมตร)

E = ประสิทธิภาพรอยเชื่อมต่อ (1)

S = ค่าความเค้นของแผ่น SA-240 316L ที่ 315 องศาเซลเซียส มีค่า 731 kg/cm^2

แทนค่าเพื่อหาความหนาจากสูตร t = PD/(2SE-0.2P)

= $(1.275 \times 800)/(2 \times 731 \times 1 - 0.2 \times 1.275)$

= 0.7 มิลลิเมตร

(2) ตัวถังปฏิกรณ์ทรงกระบอก

การคำนวณเมื่อ R = รัศมีภายใน 400 มิลลิเมตร

สูตรการคำนวณความหนา t = PR/(2SE + 0.4P)

แทนค่า t = $(1.275 \times 400)/((2 \times 731 \times 1) + (0.4 \times 1.275))$

= 0.35 มิลลิเมตร

(3) ตัวกรวยถัง

ข้อมูลกรวยที่ได้ออกแบบ

α = ครึ่งหนึ่งของมุมยอด, องศา

= 60^0

E = ประสิทธิภาพรอยเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 0.6 เมื่อรอยต่อชนที่เชื่อมเดี่ยวโดย ไม่มีแผ่นประกบหลัง

สูตรการคำนวณความหนา t = $PD/2\cos\alpha(SE-0.6P)$

แทนค่า t = $((1.275*800)/(2 \times \cos 60^{0} \times (731 \times 0.6 - (0.6 \times 1.275)))$

= 2.33 มิลลิเมตร

เมื่อดูความหนาที่ได้จากการคำนวณทั้งการคำนวณภายใต้ความดันภายนอกและภายในจะเห็นว่าความหนาที่ได้จากการคำนวณภายใต้แรงดันภายนอกมีค่ามากที่สุด คือ 3 มิลลิเมตร มาใช้ในการออกแบบโดยให้ส่วนถังทั้ง 3 ส่วนมีความหนาอย่างต่ำ 3 มิลลิเมตร

นำค่าที่ได้มาบวกกับค่าเผื่อการกัดกร่อน อีก 2 มิลลิเมตร จึงได้ความหนาของเหล็ก 5 มิลลิเมตร แต่ในท้องตลาดไม่มีเหล็ก 316L ที่หนาขนาดดังกล่าวได้ โดยมีขนาดที่ใกล้เคียงอยู่ที่ 6 มิลลิเมตร จึงใช้เหล็ก 316L ที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร ในการออกแบบถังปฏิกรณ์

3. **คำนวณขนาดมอเตอร์ที่ใช้**

วิวัฒน์ (2543) กล่าวว่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานซึ่งต้องต้องใช้ในการกวน (คิดจากกำลังของมอเตอร์ที่ใช้) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวที่กวน ผลการสำรวจพบว่ามีการใช้งานที่สุดในช่วง 0.25 HP/m^3 แต่ในกรณีที่ทำปฏิกิริยาเคมีขณะกวนด้วย อัตราส่วนนี้ก็จะประมาณ 1 HP/m^3

จากน้ำหนักรวมของสารที่ทำปฏิกิริยาอยู่ที่ 360 กก.

คิดความหนาแน่นของสารอยู่ที่ 1 ลิตร/กก.

จะได้ปริมาตรสารประมาณ (1 ลิตร/กก.) x 360 กก. = 360 ลิตร หรือ 0.36 m^3

เพราะฉะนั้นกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ = 0.36 m^3 x 1 HP/m^3

= 0.36 HP

= 0.27 kW

กำลังมอเตอร์ในท้องตลาดมีที่ 0.37 kW ดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 0.37 kW มาใช้

4. คำนวณหาจำนวนขดคอยล์ความร้อน

ไขปาล์มสเตียรีน ความหนาแน่น ใช้ที่อุณหภูมิ 60 ^{0}C 0.8659 ก./มล. (Hui, 1996)

ความจุความร้อนจำเพาะ (Cp) จาก Hui (1996)

Cp (kcal/kg) = 0.47 + 0.00073 x T

= 0.47 + 0.00073 x 200

= 0.616 kcal/kg ^{0}C

แปลงให้เป็นหน่วย BTU/lb ^{0}F

= (0.616 kcal/kg. ^{0}C) x ((1 BTU/lb)/(0.252 kcal/kg))

x (1 ^{0}C/(5/9)^{0}F)

= 4.4 BTU/lb ^{0}F

น้ำหนักสารรวม กลีเซอรอลดิบ +ไขปาล์มสเตียรีน เท่ากับ 354 กก. (780.57 lb)

อุณหภูมิของสารเข้า 80 ^{0}C (176 ^{0}F)

อุณหภูมิที่ต้องการ 200 ^{0}C (392 ^{0}F)

ความร้อนที่ต้องเพิ่มให้กับสารละลาย = น้ำหนักสาร x ความจุความร้อนจำเพาะ x อุณหภูมิสารที่เพิ่มขึ้น

= mCp ΔT

= (780.57) x (4.4 BTU/lb ^{0}F) x (392-176) ^{0}F

= 741,853.73 BTU

ต้องการให้ร้อนขึ้นภายใน 30 นาที (0.5 hr.) = 741,853.73 BTU /0.5 hr

= 1,483,707.46 BTU /hr

น้ำมันถ่ายเทความร้อนสูง มี U = 225 BTU/ft^{2} hr ^{0}F

ความต้องการให้อุณหภูมิของสารเริ่มต้นที่ 80 องศาเซลเซียส สูงถึง 200 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 30 นาที

หาจำนวนของคอยล์ร้อนที่ต้องใช้จาก $\dot{Q} = UA (t_1 - t_2)$

โดยที่ $\dot{Q}$ คืออัตราความร้อนถ่ายเทออกจากคอยล์สู่ของเหลว (BTU /hr)

U คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (BTU/ft^{2} hr ^{0}F)

A คือพื้นที่ผิวคอยล์ด้านนอก (ft^{2})

t_1 คืออุณหภูมิเฉลี่ยของ Hot oil ในคอยล์ (^{0}F) และสมมุติว่าคงที่ (572 ^{0}F)

t_2 คืออุณหภูมิเฉลี่ยของสารละลายหรือของเหลวในถังต้ม (^{0}F) และสมมุติว่าคงที่

t_2 = (392 + 176)/2

= 284 ^{0}F

แทนค่า

1,483,707.46 BTU /hr. = (225 BTU/ft^2 hr ^{0}F) x A x (572-284) ^{0}F

A = 22.90 ft^2

สมบัติของท่อที่จะใช้เป็นคอยล์ ใช้ขนาด 0.5 นิ้ว มี เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 21.7 mm. (0.071176 ft)

เส้นรอบวงท่อ = (22/7) x 0.071194 ft

= 0.2238 ft

คอยล์ต้องออกแบบให้ยาว = 22.90 ft^2 / 0.2238 ft

= 102.33 ft

ในการออกแบบสามารถออกแบบให้คอยล์แต่ละเส้นยาวได้ 1,050 mm หรือ 3.444 ft

ดังนั้นต้องออกแบบคอยล์ให้มีจำนวน = 102.33 ft /3.444 ft

= 29.70 แถว

คิดประสิทธิภาพที่ 75 % จำนวนคอยล์ = 29.70 / 0.75

= 39.61 แถว

= 40 แถว

แต่เนื่องจากไม่สามารถออกแบบให้ใช้คอยล์ขนาด 0.5 นิ้ว จำนวน 40 แถว บรรจุในถังปฏิกรณ์ที่ได้ออกแบบได้ ได้ออกแบบให้มีขนาดสูงสุดได้ 26 แถว เมื่อคำนวณระยะเวลาที่จะใช้ในการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ต้องใช้ 1.8 ชม. หรือ 1 ชม. 46 นาที

6. การคำนวณต้นทุนการผลิต

คำนวณจากการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ที่ผ่านการกำจัดกลีเซอรอลออกแล้วปริมาณสารที่ได้มีน้ำหนัก 5.125 กิโลกรัม

6.1 ต้นทุนจากวัตถุดิบ

ต้นทุนจากวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 รายละเอียดของต้นทุนจากวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	หน่วยนับ		ปริมาณการใช้		ราคา (บาท)
	ราคา(บาท)	หน่วย	ใช้	หน่วย	
1.ไขปาล์มสเตียรีน	18	กก.	4.327	กก.	77.89
2. แก๊ส	18.90	กก.	0.65	กก.	12.29
3. น้ำหล่อเย็น	0.01	ล.	180	ล.	1.8
4. น้ำแข็งบดสำหรับการดักจับน้ำที่ระเหย	1	กก.	3	กก.	3
5. กรด HCl 37 % commer. Grade.	19.26	กก.	0.071	กก.	1.36
6. แก๊สไนโตรเจน	50.16	กก.	0.022	กก.	1.11
7. น้ำล้างร้อน	0.01	ล.	6	ล.	0.06
8. เกลือป่น	8	กก.	0.225	กก.	1.8
รวม					99.31

6.2 ต้นทุนจากพลังงานไฟฟ้า

ต้นทุนจากพลังงานไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.4 รายละเอียดของต้นทุนจากพลังงานไฟฟ้า

เครื่องไฟฟ้า	กำลัง (kW)	เวลาที่ใช้ (ชม.)	หน่วยที่ใช้	ค่าไฟ (บาท/ หน่วย)	ค่าไฟฟ้า (บาท)
1. มอเตอร์ใบพัดกวน	0.62	1.01	0.626	3	1.88
2. ปั๊มสุญญากาศ	0.55	0.85	0.468	3	1.40
รวม					3.28

6.3 ต้นทุนจากค่าแรงงาน

ต้นทุนจากค่าแรงงานแสดงดังตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 รายละเอียดของต้นทุนจากค่าแรงงาน

	เวลาทำงาน (ชม.)	วันทำงาน	ค่าแรง/วัน (บาท)		เงิน (บาท)
แรงงาน	4	0.5	200		100
รวม					100

6.4 ต้นทุนต่อน้ำหนักสารที่ได้ 1 กิโลกรัม

ต้นทุนต่อน้ำหนักสารที่ได้ 1 กิโลกรัมแสดงดังตารางที่ ข.6

ตารางที่ ข.6 ต้นทุนการผลิตสาร 1 กิโลกรัม

รายการต้นทุน		ต้นทุน (บาท)	ต้นทุนต่อสารผสมที่ผลิตได้ 1 กก. (บาท/กก.)
1. วัตถุดิบ		99.31	19.38
2.พลังงานไฟฟ้า		3.28	0.64
3. ค่าแรงงาน		100	19.51
รวม	รวมค่าแรง	202.59	39.53
	ไม่รวมค่าแรง	102.59	20.02