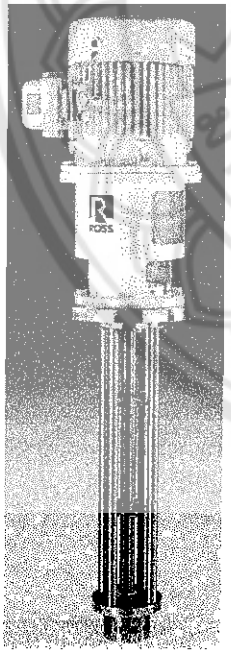
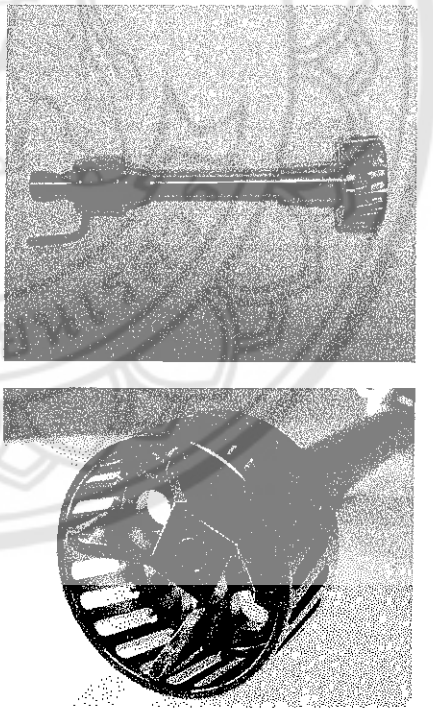
บทที่ 3
วิธีการดำเนินโครงงาน

3.1 สำรวจรวบรวมข้อมูล

เพื่อให้การออกแบบและการเลือกใช้เครื่องปั่นให้เหมาะสมกับการปั่นผสมไขมันกับน้ำ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาข้อมูลของเครื่องปั่นแรงเฉือนสูงแบบ rotor-stator เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาสร้างเครื่องปั่นแรงเฉือนสูงแบบ rotor-stator โดยได้ทำการศึกษาข้อมูลจากบทความทางอินเตอร์เน็ตของบริษัท Silverson และงานวิจัยเรื่อง "CFD analysis of a rotor-stator mixer with viscous fluids" ของ Fabien Barailler, Mourad Hence, Philippe A. Tanguy

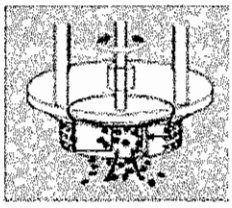
3.1.1 เครื่องปั่นแรงเฉือนสูงของบริษัท Silverson



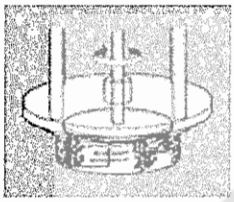


รูปที่ 3.1: เครื่องปั่นแรงเฉือนสูงของบริษัท Silverson *รูปที่ 3.2: rotor-stator ของเครื่องปั่นแรงเฉือนสูง*

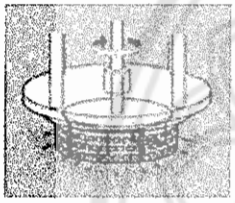
3.1.2 หลักการทำงานของเครื่องปั่นแรงเฉือนสูงแบบ rotor-stator



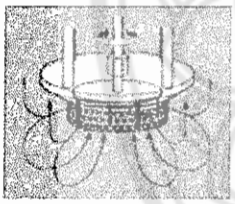
1). การหมุนด้วยอัตราความเร็วสูงของใบพัดเพื่อทำให้มวลของของเหลวผสมกันได้อย่างดีโดยออกแรงดูดของเหลวให้เคลื่อนที่ขึ้นไปข้างบนจากก้นภาชนะเข้าสู่ศูนย์กลางของใบพัด



2). การหมุนของใบพัดทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขับของเหลวไปทางปลายใบพัดแล้วของเหลวจะเคลื่อนที่ออกทางปลายใบพัดเข้าสู่ผนังของ stator



3). การที่ของเหลวเข้าสู่ผนังของ stator นั้นจะเกิดแรงเฉือนที่กระทำต่อของเหลวที่ความเร็วสูงโดยเคลื่อนที่ออกผ่านรูของ stator และกลับเข้าไปผสมกันในภาชนะอีกครั้งหนึ่ง

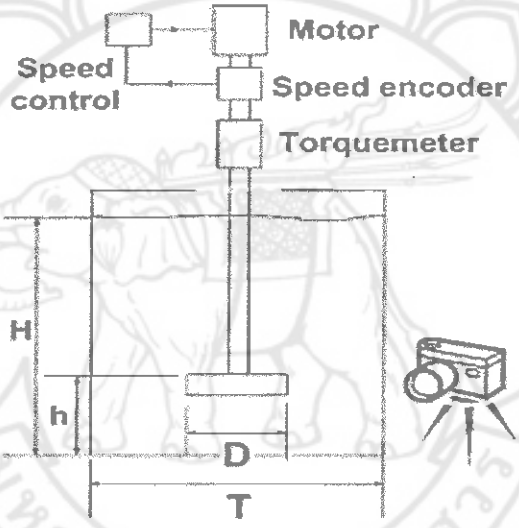


4). ของเหลวที่ออกจาก stator ที่ความเร็วสูงไปผสมกันในภาชนะอาจมีบางส่วนถูกดูดกลับเข้าไปในศูนย์กลางของใบพัดอีกและผ่านขบวนการดังที่กล่าวขั้นต้นนี้ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ

3.2 การออกแบบและการคำนวณ

ในการออกแบบเครื่องปั่นแรงเฉือนสูงแบบ rotor-stator สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ ส่วนประกอบหลักของเครื่องปั่นแรงเฉือนสูงแบบ rotor-stator ซึ่งมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ดังนี้

- ขนาดของถังปั่น
- ขนาดของใบพัด
- ขนาดของ stator
- ขนาดของมอเตอร์และinverter
- ขนาดของเพลา



รูปที่ 3.3 : รูปแบบทั่วไปของเครื่องปั่น

3.2.1 การคำนวณหาขนาดของถัง

ปัจจัยในการเลือกใช้ถังปั่น

- ต้องทำจากวัสดุที่โปร่งใสเพื่อจะได้เห็นทิศทางการไหลขณะทำการปั่น
- ราคาไม่แพงจนเกินไป
- หาซื้อได้ตามท้องตลาด

โดยจะเลือกใช้โหลแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 cm.

ขนาดตามรูปที่ 3.3 คือ

$$T = 22 \text{ cm.}$$

$$H = 30 \text{ cm.}$$

จากสมการ

$$\text{ปริมาตรทรงกระบอก} = \frac{\pi T^2}{4} \times H \qquad (3.1)$$

$$= \frac{(\pi \times 0.22^2)}{4} \times 0.3$$

$$= 0.0114 \text{ m}^3$$

หรือได้ขนาดถังเท่ากับ 11.4 ลิตร

3.2.2 การคำนวณหาขนาดของใบพัด

จากสมการของ Doucet, L., Ascanio, G. and Tanguy, P.A.(2005)

กำหนดค่า $\frac{D}{T} = 0.305$, $\frac{h}{H} = \frac{1}{3}$

จะได้

$$D = 0.305 \times 22$$

$$= 6.71 \text{ cm.}$$

และใบพัดเป็นแบบ 4 ใบพัด โดยแต่ละใบยาว 3.355 cm. สูง 2 cm

โดยใบพัดอยู่สูงขึ้นมาจากก้นถัง

$$h = H \times \frac{1}{3}$$

$$= 30 \times \frac{1}{3}$$

$$= 10 \text{ cm.}$$

3.2.3 การคำนวณหาระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับ stator

จากสมการของ Fabien Barailler, Mourad Heniche, Philippe A. Tanguy (2006)

$$\text{Re} = \frac{\rho N D^2}{\mu} \qquad (3.2)$$

คุณสมบัติของกะทิที่นำมาทดลอง ที่ความเร็วรอบ 100 rpm หรือเท่ากับ 10.47 rad/s มีความหนืด 0.0178 pa.s ความหนาแน่นประมาณ 1000 kg/m^3 จากบทความทางวิชาการของ นายปัญจพนธ์ นามวงศ์

แทนค่าลงในสมการ

$$\text{Re} = \frac{1000kg/m^3 \times 10.47rad/s \times 0.0671^2 m^2}{0.0178 pa.s}$$

$$\text{Re} = 2648.3$$

จากสมการของ Fabien Barailler, Mourad Heniche, Philippe A. Tanguy (2006)

$$\text{Re} = \frac{\rho V_{tip} \delta_{gap}}{\mu} \quad (3.3)$$

โดยที่

$$V_{tip} = 3.14 \times \text{D} \times \text{N} \quad (3.4)$$

$$= 3.14 \times 0.0671 \text{ m.} \times 100 \text{ rpm.}$$

$$V_{tip} = 21 \text{ m/s}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\delta_{gap} = \frac{2648.3 \times 0.0178 pa.s}{1000kg/m^3 \times 21 m/s}$$

$$\delta_{gap} = 0.0022 \text{ m} = 2.2 \text{ mm.}$$

จะได้ขนาดของ stator เท่ากับ 6.71 cm+(0.22 cm × 2) = 7.15 cm.

ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของ stator คือ 7.15 cm. สูง 2.3 cm.

และเราอาจหาค่า shear stress maximum จากความสัมพันธ์ของสมการที่กล่าวมา

$$\tau_{max} = \mu \times \frac{V_{tip}}{\delta_{gap}} \quad (3.5)$$

$$= 0.0178 \text{ pa. s} \times \left(\frac{21}{0.0022}\right) \text{s}^{-1}$$

$$= 170 \text{ pa}$$

3.2.4 การคำนวณหากำลังและขนาดของเพลา

จากสมการ Shaft Work

เนื่องจากไม่สามารถหาแรง F ได้โดยตรง จะหาค่า Torque จาก

$$\text{Torque} = \tau \times \upsilon_{tank} \quad (3.6)$$

$$= 170\ \text{N/m}^2 \times 0.0114\ \text{m}^3$$

$$= 1.938\ \text{N.m}$$

การหากำลัง

$$P = \text{Torque} \times \omega \quad (3.7)$$

$$P = 1.938\ \text{N.m.} \times 10.47\ \text{rad/s}$$

$$= 20.29\ \text{W}$$

ตารางที่ 3.1 กำลังที่จำนวนรอบต่างๆโดยให้ความหนืดคงที่ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

จำนวนรอบ (rpm)	ω (rad/s)	T(N•m)	P (W)	P×safety factor เท่ากับ 3
100	10.47	1.938	20.29	60.87
200	20.94	3.887	81.39	244.17
300	31.42	5.83	183.18	549.54
400	41.89	7.776	325.74	977.22
500	52.36	9.72	508.94	1526.82

3.2.5 การคำนวณหาขนาดของเพลา

จากสมการ $\tau_{\text{stainless steels}} = \dfrac{16T}{\pi D^3}$ (3.8)

$$D^3 = \frac{16T}{\mu\tau_{\text{stainless steel}}}$$

$$= ((16\times1.938)/\ 240\times10^6)/\ \pi\ \ \text{m}^3$$

$$= 4.11\times10^{-8}$$

$$D = 0.0034517\ \ \text{m}$$

ในที่นี้จะใช้ค่าความปลอดภัย(safety factor เท่ากับ 3) จะได้ขนาดเพลาเท่ากับ 0.010355 m. หรือ 1.03 cm.

3.2.6 การเลือกใช้มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์

3.2.6.1 ประเภทของมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถแบ่งประเภทออกได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ มอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสสลับ และสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

1). มอเตอร์กระแสตรง

- ชนิดต่อขดลวดสนามแยก
- ชนิดต่อขดลวดสนามแบบขนาน
- ชนิดต่อขดลวดแบบอนุกรม
- ชนิดต่อขดลวดสนามแบบผสม (ทั้งขนานและอนุกรม)

2). มอเตอร์กระแสสลับ

ชนิดเฟสเดียว

- แบบ Resistance Split-Phase
- แบบ Capacitor-Start Induction-Run
- แบบ Permanent Split Capacitor
- แบบ Capacitor-Start Capacitor-Run
- แบบ Shaded-Pole
- แบบ Universal

ชนิดสามเฟส

- แบบโรเตอร์กรงกระรอก
- แบบโรเตอร์ขดลวดพัน

มอเตอร์ซิงโครนัส

- ชนิด Cylindrical-Pole
- ชนิด Salient-Pole

มอเตอร์คอมมิวเตเตอร์

มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์อื่น ๆ

- มอเตอร์รีแอคชั่น
- มอเตอรฮีสเตอรีซีส
- มอเตอร์พัลส์ หรือจังหวะ

มอเตอร์ที่นิยมใช้มากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส แบบกรงกระรอก เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือ มีโครงสร้างเป็นแบบง่ายและแข็งแรง ใช้งานได้สะดวก บำรุงรักษาและซ่อมแซมได้ง่าย และราคาถูก

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการเลือกใช้มอเตอร์

ความต้องการของโหลด	ชนิดของมอเตอร์ที่เหมาะสม		ชนิดของงาน
	กระแสสลับ	กระแสตรง	
ต้องการความเร็วรอบคงที่แน่นอนโดยไม่คำนึงถึงโหลด	Synchronous motor	-	โรงงานซีเมนต์ เครื่องอัดอากาศขนาดแรงม้าสูง ๆ เครื่องเป่าลม
ต้องการความเร็วรอบเกือบคงที่ตั้งแต่ไม่มีโหลดจนถึงเต็มพิกัดโหลด	มอเตอร์เหนี่ยวนำ	Shunt Motor	เครื่องกลึง, Milling M/C เครื่องเจียร์ (grinding M/C)
ต้องการแบบปรับความเร็วรอบได้และความเร็วรอบเกือบคงที่ตั้งแต่ไม่มีโหลด จนถึงเต็มพิกัดโหลด	- Wound-Rotor - Induction Motor - Shunt Commutator motor	Shunt Motor แบบ Ward-Leonard	ลิฟต์ เครื่องม้วน Crane Hoist เครื่องทำกระดาษทิสชู เครื่องเป่าลม ปั๊มน้ำ
ต้องการแบบเปลี่ยนความเร็วรอบได้หลายชั้นและความเร็วรอบเกือบคงที่ในแต่ละโหลด	มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายความเร็วรอบ	Shunt Motor แบบ Ward-Leonard	-
ต้องการแบบความเร็วรอบลดลงตามโหลดที่เพิ่มขึ้น	Series Commutator Motor	Series Motor	รถไฟฟ้า รถยนต์
ต้องการแบบที่สามารถใช้การเปลี่ยนโหลดอย่างกระทันหัน มอเตอร์หมุนกลับทางได้อย่างรวดเร็วและสามารถปรับความเร็วรอบได้	Ligner System		Winch ของเครื่องรีด Ingot ขนาดใหญ่

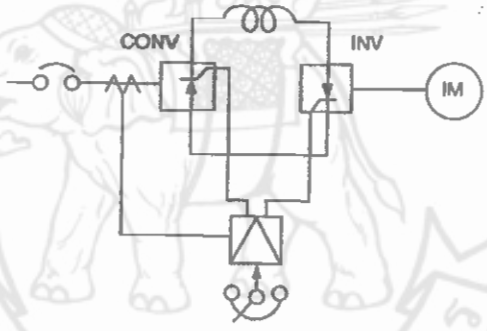
การเลือกใช้ขนาดของมอเตอร์ ต้องเลือกให้เหมาะกับกำลังออกและแรงดันมอเตอร์ที่ใช้มีมาตรฐานแรงดันตามขนาดดังนี้

200 V Class	0.37 kW -120 kW
400 V Class	0.37 kW – 500 kW
3 kV Class	37 kW-1000 kW
6 kV Class	220 kW and over
11 kV Class	1000 kW and over

ในการเลือกมอเตอร์นั้น จะต้องพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของภาระอย่างรอบคอบ เพื่อจะเลือกมอเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาพใช้งาน ลักษณะของภาระที่จะต้องคำนึงถึงมีดังนี้

- กำลังที่ต้องการของภาระ
- ความเร็วรอบและแรงบิด
- วิธีการสตาร์ทและจำนวนการสตาร์ทต่อชั่วโมง
- ภาระต้องการควบคุมความเร็วหรือไม่
- ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของภาระ
- กรรมวิธีการเบรค
- ภาระมีการหมุนกลับหรือไม่
- ตำแหน่งที่ติดตั้งมอเตอร์และสภาพแวดล้อม

3.2.7 อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.4 : การควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ

วิธีนี้เป็นวิธีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ V V V F อินเวอร์เตอร์ (inverter) หรือไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (cyclo-converter) ดังตัวอย่างรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นการปรับค่าแรงดันและความถี่ที่จะป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก โดยวิธีนี้เป็นวิธีควบคุมแรงดันและความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เพราะฉะนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์นั้น วิธีนี้จะใช้ได้ดีกับการเปลี่ยนความเร็วรอบที่โหลดแฟกเตอร์ต่ำ 80% และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง

ในกรณีที่จะใช้วิธีนี้กับอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้แล้ว สามารถทำได้โดยใช้ V V V F ที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์นั้น ๆ อนึ่ง ชิ้นส่วนสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในระบบ V V V F นั้น ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ (ขนาด 11 kW – 132 kW) หรือใหญ่กว่า จะใช้ไทริสเตอร์ (thyristor) ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก (3.5 kW – 5.5 kW) จะใช้ทรานซิสเตอร์ (transistor)

หมายเหตุ :V V V F = Variable Voltage Variable Frequency

ตารางที่ 3.3 การควบคุมความเร็วรอบของ AC มอเตอร์

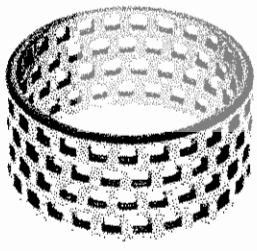
ชนิดของมอเตอร์	วิธีควบคุมความเร็วรอบ
มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอก (squirrel-cage induction motor)	ควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ (V V V F) Eddy current coupling control hydraulic coupling Control)
มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์แบบพันขดลวด (wound-rotor motor) หรือแบบมีวงแหวนลื่น (Slip Ring Motor)	ควบคุมความต้านทานของโรเตอร์ ควบคุม Secondary magnetic field (Stationary selbius) ควบคุม secondary magnetic field. (super synchronous selbius)
ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor)	ควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ (V V V F) Non-commutator motor (thyrister motor)

ในโครงงานชิ้นนี้ได้เลือกใช้งานมอเตอร์แบบกระแสสลับ ชนิด 3 เฟส แบบโรเตอร์กรงกระรอก แรงดัน 220/360 V.Class (ไฟบ้าน 220 V) กำลัง 1-2 kW และเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ขนาด 1.5 kW เพื่อให้เพียงพอต่อกำลังของมอเตอร์ที่เลือกใช้งาน

3.3 การทดสอบเครื่องปั่นแรงเฉือนสูงแบบ rotor-stator โดยใช้วัตถุดิบในการปั่นเป็นกะทิ

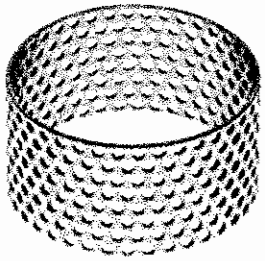
ในการทดสอบการปั่นกะทิด้วยเครื่องปั่นแรงเฉือนสูงแบบ rotor-stator จะใช้ stator ในการทดลองทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

-Square Hole High Shear Screen



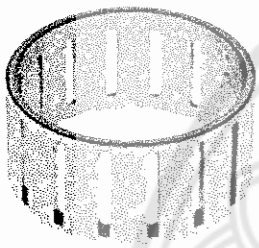
โดยที่รูสี่เหลี่ยมจตุรัส 1 รูจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.25 cm^2 จำนวนรูทั้งหมด 58 รู จึงมีพื้นที่เปิดด้านข้างรวมเท่ากับ 14.5 cm^2 และช่องเปิดด้านบน-ด้านล่างมีพื้นที่รวม 86.016 cm^2 ดังนั้น stator ชนิดนี้จึงมีพื้นที่เปิดรวมทั้งหมดเท่ากับ 100.516 cm^2และมีพื้นที่ปิดรวมทั้งหมดเท่ากับ 62.21 cm^2 ดังนั้นคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ปิดต่อพื้นที่เปิดเท่ากับ 1 : 1.616

- Emuisor Screens



โดยที่รูวงกลม 1 รูจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.332cm^2 จำนวนรูทั้งหมด 58 รู จึงมีพื้นที่เปิดด้านข้างรวมเท่ากับ 19.246 cm^2 และช่องเปิดด้านบน-ด้านล่างมีพื้นที่รวม 86.016 cm^2 ดังนั้น stator ชนิดนี้จึงมีพื้นที่เปิดรวมทั้งหมดเท่ากับ 105.262 cm^{2}และมีพื้นที่ปิดรวมทั้งหมดเท่ากับ 57.464 cm^2 ดังนั้นคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ปิดต่อพื้นที่เปิดเท่ากับ 1 : 1.832

-Slotted Disintegrating Head



โดยที่รูร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า 1 ร่องจะมีพื้นที่เท่ากับ 1.495 cm^2 จำนวนร่องทั้งหมด 18 ร่อง จึงมีพื้นที่เปิดด้านข้างรวมเท่ากับ 26.91 cm^2 และช่องเปิดด้านบน-ด้านล่างมีพื้นที่รวม 86.016 cm^2 ดังนั้น stator ชนิดนี้จึงมีพื้นที่เปิดรวมทั้งหมดเท่ากับ 112.926 cm^{2}และมีพื้นที่ปิดรวมทั้งหมดเท่ากับ 49.8 cm^2 ดังนั้นคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ปิดต่อพื้นที่เปิดเท่ากับ 1 : 2.268

3.3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

1). เครื่องปั่นแรงเฉือนสูงแบบ rotor-stator

2). หลอดทดลอง

3). กะทิสด 100 ลิตร

4). อุปกรณ์จับเวลา

5). กล้องถ่ายภาพ

3.3.2 วิธีการทำการทดลอง

1). เทกะทิสดลงในถังปั่น

2). เปิดสวิทซ์อินเวอร์เตอร์และปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 400, 800 และ1200 rpm

3). กดปุ่มสั่งการทำงานที่อินเวอร์เตอร์

4). จับเวลาในการปั่น 20 นาทีต่อการปั่น 1 ถัง

5). นำกะทิที่ได้จากการปั่นใส่ในหลอดทดลอง

6). สังเกตและบันทึกผลการทดลอง

7). ทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1-6 โดยเปลี่ยน stator ทั้ง 3 แบบที่ใช้ในการทดลอง

3.3.3 กำหนดตัวแปรไร้หน่วยเพื่อการเก็บผลการทดลอง

อัตราส่วนของระยะเวลาการแยกชั้นที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาการแยกชั้นของกะทิที่ไม่ผ่านกระบวนการปั่น เท่ากับ

$$\frac{(t_2 - t_1)}{t_1} \qquad (3.9)$$

โดยที่ t_1 = เวลาการเริ่มแยกชั้นของกะทิที่ไม่ผ่านกระบวนการปั่น

t_2 = เวลาการเริ่มแยกชั้นของกะทิที่ทำการปั่น

ตัวอย่างการคำนวณ

stator แบบรูวงกลม ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm จะมีอัตราส่วนของระยะเวลาการแยกชั้นที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาการแยกชั้นของกะทิที่ไม่ผ่านกระบวนการปั่น เท่ากับ

$$\frac{(t_2 - t_1)}{t_1}$$

โดยที่ t_1 = 5 นาที

t_2 = 40 นาที

ดังนั้นอัตราส่วนจึงมีค่าเท่ากับ $\frac{40-5}{5} = 7$

3.3.4 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแยกชั้นของน้ำ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแยกชั้นของน้ำ} = \frac{\text{รอยแยกชั้นระหว่างไขมันกับน้ำที่สังเกตพบ}}{\text{ความสูงของชั้นกะทิในหลอดทดลอง}} \times 100 \qquad (3.10)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

กะทิที่ผ่านการปั่น stator แบบรูวงกลม ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm จะเริ่มเกิดการแยกชั้นในเวลา 40 นาที ที่ 42 cc

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแยกชั้นของน้ำ} = \frac{42}{50} \times 100$$

$$= 84\ \%$$