

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลืองอัตโนมัติ
AUTOMATIC SOY MILK MAKING MACHINE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 64203
วัน,เดือน,ปี..... - 7 ก.ย. 2549

b.....
i.....

ปฏิญานិพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลืองอัตโนมัติ

AUTOMATIC SOY MILK MAKING MACHINE

ผู้จัดทำ

1. นาย ธนวัฒน์ เจริญวัฒนกิจ รหัสประจำตัว 44010722
2. นาย ปรัชญา อัมชรพงษ์ รหัสประจำตัว 44010756
3. นางสาวปัทมา เทพวรชัย รหัสประจำตัว 44010756



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลืองอัตโนมัติ

นาย ธนวัฒน์ เจริญวัฒนกิจ 44010722
นาย ปรัชญา อัมชรพงษ์ 44010756
นางสาว ปัทมา เทพรชัย 44010759
ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลืองอัตโนมัติซึ่งจะนำมาผลิตเป็นเครื่องจริง เพื่อไปใช้ในงานอุตสาหกรรมขนาดย่อมหรือในครัวเรือน โดยทำการศึกษาและออกแบบตัวบดและแยกกากถั่วเหลืองอีกทั้งยังออกแบบหม้อต้ม ศึกษาการไหล และการถ่ายเทความร้อนภายในหม้อต้ม น้ำนมถั่วเหลือง

การศึกษาและออกแบบหม้อต้มได้ทำการเลือกใช้ใบกวน 2 แบบ คือ ใบกวนแบบทำมุม 90 องศา กับแนวระดับ (Radial Flow) และ ใบกวนแบบทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ (Axial Flow) ใช้กับหม้อต้มน้ำถั่วเหลือง 6 ลิตร แล้วทำการทดลองเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ทำให้ไม่เกิดการไหม้คืดหม้อและใช้เวลาในการทำให้น้ำเดือดเร็วที่สุด

ซึ่งจะสรุปผลได้ว่าไม่ว่าจะใช้ใบกวนแบบใดที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาทีทำให้ไม่เกิดการไหม้คืดหม้อ และเป็นจุดที่ทำให้น้ำถั่วเหลืองเดือดเร็วที่สุด ส่วนผลจากการเปลี่ยนลักษณะใบกวนได้ข้อสรุปว่า ใบกวนแบบ 90 องศา กับแนวระดับทำให้น้ำนมถั่วเหลืองเดือดเร็วกว่าการใช้ใบกวนแบบ 45 องศา กับแนวระดับ

AUTOMATIC SOY MILK MAKING MACHINE

Mr. Thanawat Charconwattanakit 44010759

Mr. Pratyta Auttavarapong 44010756

Mrs. Pattama Tepwarachai 44010759

Dr. Monsak Pimsarn Advisor

ABSTRACT

The aim of this project is to design an automatic soy milk making machine which will be manufactured and used in small industry or a household. The study and design of a chopper, a dispenser and a soy - milk boiling unit are carried out. Moreover, the study of flow and heat transfer inside the boiler is investigated.

In the study and design of the boiler, two types of a mixer, radial and axial flow, are chosen to be used with the boiler. Later, the optimum operating speeds, leading to unburning of soy milk and minimum boiling time, of those mixers are experimentally studied.

The experimental result indicates that the optimum operating speed for both mixers is 260 rpm. However, the minimum boiling time of the radial flow mixer is less than the time required in the axial flow mixing system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จลงได้ด้วยดีหากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ลำดับที่ 2 ขอบคุณ อาจารย์มณฑล ใจกุศล, อาจารย์พงษ์เจต พรหมวงค์, อาจารย์จินดา เจริญพรพาณิชย์, อาจารย์จำลอง ปรานแก้ว และอาจารย์อีกหลายท่านที่ให้คำแนะนำ, ข้อมูล และความรู้ในด้านต่าง ๆ

ลำดับที่ 3 ขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ และช่วยปฏิบัติงาน

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดีพร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายธนวัฒน์ เจริญวิวัฒนกิจ
นายปรัชญา อัมธรรพงษ์
นางสาวปัทมา เทพวรชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 คำนำ	1
1.2 องค์ประกอบของเมล็ดถั่วเหลือง	1
1.3 อุตสาหกรรมทำน้ำถั่วเหลือง	1
1.4 Literature Review	3
1.5 จุดประสงค์ของ โครงการงาน	4
1.6 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินงานของ โครงการงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่นำมาใช้	5
2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	5
2.2 รูปแบบการไหลของของไหลในถังกวน (Flow Pattern in Agitated Vessel)	8
2.3 การเกิดปรากฏการณ์น้ำวน (Vortex)	9
2.4 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flow)	11
2.5 การส่งกำลัง (Power Input)	12
2.6 ทฤษฎีและการออกแบบใบกวน (Agitator or Impeller Theory and Design)	16
2.7 หลักการเลือกใบพัด (Impeller Selection)	20
2.8 ของเหลวที่มีคุณสมบัติเป็น Newtonian และ Non - Newtonian	20
บทที่ 3 การนำทฤษฎีมาใช้และการคำนวณ	25
3.1 การคำนวณขนาดใบกวนมาตรฐาน	25
3.2 การคำนวณขนาดมอเตอร์ใบค	26
3.3 การคำนวณขนาดมอเตอร์ใบกวน	28
3.4 การคำนวณหาขนาดซีตเตอร์	29
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	31
4.1 การทดลองหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของ ใบกวนแต่ละชนิด ในการคัมน้ำนมถั่วเหลือง	31
4.2 การทดลองเพื่อสังเกตการณ์ไหลของของเหลวภายในถังกวน	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

4.3	การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการไหลของของเหลวโดยใช้โปรแกรม Star CD	37
บทที่ 5	บทวิจารณ์และสรุปผล	43
5.1	สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	43
5.2	ปัญหาที่พบจากการทดลอง	43
5.3	ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง	44
บทที่ 6	หลักการงานและแนวทางการออกแบบ	45
6.1	หลักการงานของเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง	45
6.2	แนวทางการออกแบบและพัฒนาเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง	46
ภาคผนวก ก	วิเคราะห์อัตราผลตอบแทนต่อปีของเครื่องและจุดคุ้มทุน	47
ภาคผนวก ข	ทฤษฎีเพิ่มเติมทางไฟฟ้า	52
บรรณานุกรม		



สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2-1	ตารางแสดงค่า C ของใบกวนชนิดต่างๆ	8
ตารางที่ 3-1	ตารางแสดงขนาดใบกวนมาตรฐาน	25
ตารางที่ 4-1	ตารางแสดงผลที่ได้จากการคัมน้ำถั่วเหลือง โดยใช้ใบกวนแบบไหลตามแนวรัศมี	32
ตารางที่ 4-2	ตารางแสดงผลที่ได้จากการคัมน้ำถั่วเหลือง โดยใช้ใบกวนแบบไหลตามแนวแกน	32
ตารางที่ 6-1	ตารางแสดงหลักการทำงานของเครื่องผลิตน้ำมันถั่วเหลือง	45
ตารางที่ ก-1	ตารางแสดงค่า A/F และ A/P	50
ตารางที่ ก-2	ตารางแสดงค่า A/G	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2 - 1	การไหลแบบ Radial Flow	8
รูปที่ 2 - 2	รูปการไหลแบบ Axial Flow	9
รูปที่ 2 - 3	รูปการไหลแบบ Tangential	9
รูปที่ 2 - 4	รูปแสดงการเกิด Vortex	10
รูปที่ 2 - 5	Off - Center Impeller	10
รูปที่ 2 - 6	Side Entry Impeller	11
รูปที่ 2 - 7	ติดตั้ง Baffles เพื่อป้องกันการเกิด Vortex	11
รูปที่ 2 - 8	รูปแสดงลักษณะการไหลแบบ Laminar และ Turbulent	12
รูปที่ 2 - 9	รูปแสดงลักษณะของ Eddies ที่เกิดขึ้นเมื่อการไหลเป็น Turbulent	12
รูปที่ 2 - 10	General Characteristic of Power Curve	14
รูปที่ 2 - 11	กราฟแสดงค่า Power Characteristic ของถังปั่นชนิดต่างๆ	14
รูปที่ 2 - 12	กราฟแสดงค่า C_p ของระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	16
รูปที่ 2 - 13	ลักษณะการไหลของของไหลเมื่อใช้ใบกวนแบบ Axial Flow Impeller	16
รูปที่ 2 - 14	Axial Flow Impeller	17
รูปที่ 2 - 15	ลักษณะการไหลของของไหลเมื่อใช้ใบกวนแบบ Radial Flow Impeller	17
รูปที่ 2 - 16	Radial Flow Impeller	18
รูปที่ 2 - 17	Anchor Agitator	19
รูปที่ 2 - 18	แผนภูมิแสดงการเลือกใบกวนจากขนาดความหนืดของของเหลว	20
รูปที่ 2 - 19	กราฟแสดงการไหลของของไหลแบบ Newtonian	21
รูปที่ 2 - 20	กราฟแสดงการไหลของของไหลแบบ Time - Independent Non - Newtonian Fluid	21
รูปที่ 2 - 21	กราฟแสดงการไหลของของไหลแบบ Pseudoplastic	22
รูปที่ 2 - 22	กราฟแสดงการไหลของของไหลแบบ Dilatants	22
รูปที่ 2 - 23	กราฟแสดงการไหลของของไหลแบบ Pseudoplastic แบบ Power Low	23
รูปที่ 2 - 24	กราฟแสดงลักษณะการไหลแบบ Time - Dependent Non - Newtonian Fluids	24
รูปที่ 3 - 1	ภาพแสดงแรงที่กระทำกับมวลของถั่วเหลืองบนกรวยแยกกาก	26
รูปที่ 4 - 1	ใบพัดแบบไหลตามแนวแกนและแบบไหลตามแนวรัศมี	32
รูปที่ 4 - 2	ภาพแสดงสภาพหม้อหลังจากคัมน์น้ำถั่วเหลืองโดยใช้ใบกวนแบบไหลตามแนวแกน	33
รูปที่ 4 - 3	ภาพแสดงสภาพหม้อหลังจากคัมน์น้ำถั่วเหลืองโดยใช้ใบกวนแบบไหลตามแนวรัศมี	34
รูปที่ 4 - 4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบพัด และระยะเวลาที่ใช้ในการเดือด	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่	
รูปที่ 4 - 5	รูปแสดงชุดทดลองการศึกษาการไหลของของเหลวภายในถัง	35
รูปที่ 4 - 6	ภาพแสดงขนาดของVortex เมื่อใช้ใบกวนแบบ Radial Flow ที่ความเร็วรอบต่างๆ	36
รูปที่ 4 - 7	ภาพแสดงขนาดของVortex เมื่อใช้ใบกวนแบบ Axial Flow ที่ความเร็วรอบต่างๆ	36
รูปที่ 4 - 8	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 45°	38
รูปที่ 4 - 9	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 45°	38
รูปที่ 4 - 10	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 45°	39
รูปที่ 4 - 11	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 45°	39
รูปที่ 4 - 12	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 45°	40
รูปที่ 4 - 13	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 90°	40
รูปที่ 4 - 14	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 220รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 90°	41
รูปที่ 4 - 15	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 90°	41
รูปที่ 4 - 16	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 90°	42
รูปที่ 4 - 17	ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบกวน 90°	42
รูปที่ 6 - 1	รูปแสดงเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง	45
รูปที่ ข - 1	ภาพแสดงวงจร Half Wave Rectifier	52
รูปที่ ข - 2	ภาพแสดงวงจร Full Wave Rectifier	53
รูปที่ ข - 3	ภาพแสดงวงจร Bridge Rectifier	53
รูปที่ ข - 4	ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ	54
รูปที่ ข - 5	ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ	54
รูปที่ ข - 6	ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันแบบบาย	55
รูปที่ ข - 7	ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันรูปตัวแอล	55
รูปที่ ข - 8	ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันแบบ RC	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่	
รูปที่ ข - 9	ความละเอียดของ ADC จะแปรผันตรงกับจำนวนบิตทางเอาต์พุต	56
รูปที่ ข - 10	แสดงวิธีการพื้นฐานของ ADC	57
รูปที่ ข - 11	แสดงทรานเฟอร์ฟังก์ชันของคอมพาราเตอร์	57
รูปที่ ข - 12	พื้นฐานเบื้องต้นของวงจรถอร์โมคัปเปิล	58
รูปที่ ข - 13	ผังแสดงถึงกฎของวัสดุชั้นกลาง	59
รูปที่ ข - 14	สวิตช์ถูกลอย	60
รูปที่ ข - 15	MCS-51	61
รูปที่ ข - 16	ภาพแสดงขาต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 89C4051 ของ ATMEL	63
รูปที่ ข - 17	โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์	64
รูปที่ ข - 18	ขั้นตอนการทำงานของหน่วย	64
รูปที่ ข - 19	แสดงการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรถ่ายเก็บสัญญาณนาฬิกา หรือออสซิลเลเตอร์และการต่อคาปาซิเตอร์เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน	65
รูปที่ ข - 20	วงจรวอชค็อกไทม์เมอร์	66
รูปที่ ข - 21	วงจรถ่ายเก็บค่าเวลาจริง (RTC, Real Time Clock)	66
รูปที่ ข - 22	วงจรถ่ายเก็บค่าอินพุตเอาต์พุตด้วยไอซี PCF8574	67
รูปที่ ข - 23	วงจรถ่ายแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ด้วยไอซี PCF8591	67
รูปที่ ข - 24	ภาพแสดงมอเตอร์ สปลิต – เฟส	70
รูปที่ ข - 25	ภาพแสดงมอเตอร์คาปาซิเตอร์	71
รูปที่ ข - 26	ภาพแสดงมอเตอร์รีฟลันซ์	72
รูปที่ ข - 27	ภาพแสดงมอเตอร์เจดโพล	72
รูปที่ ข - 28	ภาพแสดงมอเตอร์ยูนิเวอร์แซล	73
รูปที่ ข - 29	ภาพแสดงการแบ่งชนิดของมอเตอร์	74
รูปที่ ข - 30	ภาพแสดงมอเตอร์แบบขนาน	76
รูปที่ ข - 31	ภาพแสดงมอเตอร์แบบอนุกรม	76
รูปที่ ข - 32	ภาพแสดงมอเตอร์แบบผสม	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 คำนำ

ถั่วเหลือง (Soybean (Glycine max L.)) เป็นพืชเก่าแก่มาชนิดหนึ่งในประวัติศาสตร์ไทย มีผู้สันนิษฐานว่าแพร่กระจายมาจากประเทศจีนตอนใต้เข้าสู่ภาคเหนือของประเทศไทย เป็นพืชตระกูลถั่วที่มีความสำคัญยิ่ง ซึ่งได้มีการพัฒนางานถั่วเหลืองกลายเป็นพืชสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทยในปัจจุบัน

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่ให้ทั้งน้ำมันและโปรตีนสูง โดยปกติองค์ประกอบในถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีประโยชน์ต่อมวลมนุษยชาติอย่างอนอกันต์ กล่าวคือ เมล็ดของถั่วเหลืองเหมาะสมทั้งที่จะนำมาแปรรูปเป็นอาหารประเภทที่มีคุณค่าทางโภชนาการเทียบเท่ากับ โปรตีนที่ได้จากการบริโภคเนื้อสัตว์ แต่เป็น โปรตีนที่มาจากพืชที่สามารถผลิตได้ในราคาที่ถูกลงกว่ามาก เช่น ใ้ข้าว และเนื้อเทียมต่าง ๆ

1.2 องค์ประกอบของเมล็ดถั่วเหลือง

มนุษย์ใช้เมล็ดถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบในการประกอบอาหารมาเป็นเวลานานนับพัน ๆ ปี ทั้งนี้เพราะเมล็ดถั่วเหลืองมีคุณค่าทางอาหารที่ดีเด่นกว่าเมล็ดพืชอื่น ๆ คือ ปริมาณน้ำมันและโปรตีนอีกทั้งราคาถูก สามารถปลูกและหาได้ง่าย จากการทดลองในห้องปฏิบัติการของงานวิจัยเคมีพืชและผลผลิตของกองเกษตรพบว่าถั่วเหลืองมีองค์ประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้ คือ

ไขมัน	20.00 %
โปรตีน	40.00 %
คาร์โบไฮเดรต	25.04 %
เกลือแร่ธาตุต่าง ๆ	5.06 %
เส้นใย	1.50 %
ความชื้น	8.40 %

1.3 อุตสาหกรรมทำนํ้านมถั่วเหลือง

ปัจจุบันการใช้ถั่วเหลือง หรือ โดยทั่วไปเรียกว่า นํ้าเต้าหู้ มีมากขึ้นเป็นลำดับ ทั้งนี้ก็เพราะประชาชนเกิดความรู้ความเข้าใจในคุณค่าทางโภชนาการของนํ้านมถั่วเหลืองมากขึ้น ประกอบกับนํ้านมถั่วเหลืองสามารถใช้เป็นอาหารเสริมคิมแทนนํ้านมวัวมากขึ้น ซึ่งนมวัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ส่วนใหญ่แล้วต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศจะทำให้ราคาของนมถั่วเหลืองเมื่อเทียบกับนํ้านมวัวแล้ว นมถั่วเหลืองมีข้อได้เปรียบด้านราคาค่อนข้างมาก

ปัจจุบันเชื่อว่าถั่วเหลืองถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมทำนํ้านมถั่วเหลืองมีสูงถึงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณถั่วเหลืองที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมนุษย์ในปี 2525 โดยที่เริ่มจากอุตสาหกรรมในครัวเรือน จนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น กลุ่มแรกทำนํ้าเต้าหู้ใส่รด ไปขายทั่วไป ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในแหล่งชุมชนแหล่งที่อยู่อาศัย พวกนี้จะทำวันต่อวัน แล้วรอกใส่ขวดหรือถุงพลาสติกโดยไม่มี การผ่านความร้อนอย่างถูกวิธี ทั้งนี้เพื่อจำหน่ายในย่านนั้น ๆ หรือส่งให้ผู้บริโภคเป็นประจำวัน โดยนํ้านมถั่วเหลืองสามารถเก็บในตู้เย็นได้ 2 – 3 วัน กลุ่มที่ 2 เป็นของโรงงานประจำ โดยที่นมนั้นสามารถเก็บในตู้เย็นได้ 2 – 3 วัน กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรม ถือเป็นผู้ผลิตที่มีใบอนุญาตตามกฎเกณฑ์ของกระทรวงอุตสาหกรรมและกระทรวงสาธารณสุข ถือเป็นผู้ผลิตที่มีเลขทะเบียนในการผลิตมีการควบคุมคุณภาพและความสะอาดปลอดภัยเป็นไปตามข้อกำหนด

สำหรับกรรมวิธีในการทำนํ้านมถั่วเหลือง ได้มีผู้ค้นคว้าวิจัยและทดลองกันมากมายทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ของการที่จะให้ได้มาซึ่งนํ้านมถั่วเหลืองที่มีคุณภาพทั้งทางรสชาติและทางกายภาพเป็นไปตามความยอมรับของผู้บริโภคในแต่ละท้องถิ่น กรรมวิธีการผลิตนํ้านมถั่วเหลืองมีอยู่หลายแบบด้วยกันโดยเริ่มตั้งแต่แบบง่าย ๆ ที่ทำกันในบ้านซึ่งเป็นวิธีของจีนโบราณจนถึงสมัยใหม่ ซึ่งมีกระบวนการที่ซับซ้อนในอุตสาหกรรม กรรมวิธีที่ทำอยู่อาจแบ่งเป็น 3 แบบด้วยกันคือ

1. การใช้นํ้าสกัด (Water Extract Process)
2. วิธีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันกับนํ้า (Water Emulsion Process)
3. การใช้โปรตีนบริสุทธิ์ (Protein Isolate Process)

1.3.1 วิธีการใช้นํ้าสกัด (Water Extract Process)

การทำนํ้านมถั่วเหลืองแบบแรกเป็นวิธีการที่ใช้กันมานานจนเรียกว่าเป็นวิธีเก่าแก่ที่สุดอันหนึ่ง โดยการใช้ถั่วเหลืองแช่นํ้าถั่วเหลืองเพื่อให้ถั่วเหลืองนิ่มจะใช้เวลาดังแต่ 1 ชม. ถึง 20 ชม. แล้วแต่อุณหภูมิของนํ้าที่แช่ถั่วเหลือง คือ ถ้านํ้าที่มีอุณหภูมิสูงก็นิ่มตัวเร็วกว่าการใช้นํ้าที่อุณหภูมิต่ำ นํ้าที่กรองออกมาได้จะมีลักษณะคล้ายนํ้านมและมีกลิ่นเหม็นเขียวตามลักษณะของถั่วเหลืองอยู่ ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยหลายชิ้นได้พยายามที่จะทำลายกลิ่นถั่วเหลืองซึ่งจัดว่าเป็นความรู้สึกที่ไม่ต้องการให้มีอยู่ในนํ้านมถั่วเหลืองให้หมดไปโดยใช้วิธีการต่าง ๆ ซึ่งพบว่าการใช้ความร้อนที่ถูกต้องเหมาะสมช่วยขจัดกลิ่นได้และยังทำให้สารต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการถูกทำลายหรือสลายตัวไปได้ ในเรื่องของการปรับปรุงกรรมวิธีทำนํ้านมถั่วเหลือง เพื่อให้เกิดผลดีในด้านคุณค่าโภชนาการการปรับปรุงกรรมวิธีทำนํ้านมถั่วเหลืองนั้นมาดัดที่อุณหภูมิสูง 240 ° F ด้วยหม้อความดัน โดยใช้เวลา 5 นาที ซึ่งนอกจากจะทำลายกลิ่นถั่วเหลืองอันเกิดจาก Enzymes Lipoxygenase แล้วยังทำลายจุลินทรีย์ต่าง ๆ อันอาจปะปนมาในขณะผ่านขั้นตอนการทำด้วยนํ้าที่ได้จะนำมาผ่านเครื่องทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homigenizer)

สำหรับขั้นตอนการผลิตนํ้านมถั่วเหลือง โดยใช้วิธีการใช้นํ้าสกัดนั้น ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อุตสาหกรรมตั้งแต่ในเรือนครัว และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในบ้านเรานั้นเนื่องจากคนไทยเราส่วนใหญ่ซึ่งมีเชื้อสายจีนอยู่มาก ไม่รังเกียจเนื้อถั่วเหลืองที่ติดมากับนํ้านมถั่วเหลือง อีกทั้งกรรมวิธีง่ายต่อการทำใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการผลิตค่อนข้างน้อย

1.3.2 วิธีทำให้เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ (Water Emulsion Method)

กรรมวิธีนี้ค่อนข้างจะเป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมกับการใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลางและใหญ่มากกว่า เนื่องจากต้องการเครื่องจักรมากขึ้น ส่วนขั้นตอนจะคล้ายกันกับการทำแบบวิธีใช้น้ำสกัด (Water Extract Process) จะแตกต่างกันบ้างก็ขั้นตอนบางประการออกก่อนเลือกถั่วที่จะนำมาทำจะต้องผ่านการทำความสะอาดมาแล้ว และแยกเอาเปลือกออกเหลือแต่เนื้อถั่วเหลืองอย่างเดียว จากนั้นจะนำเอาเนื้อถั่วไปอบน้ำที่อุณหภูมิ 165 °C แล้วเข้าเครื่องรีดเป็นแผ่นบาง ๆ (Flaking) โดยให้ความหนาของแผ่นถั่วอยู่ราว 0.008 นิ้ว หรือบางกว่า จากนั้นพับเข้าหากันแล้วผ่าน ไปยังเครื่องทำให้เป็นอันเดียวกัน เช่น อาจเป็น Colloid Mill หรือ Homogenizer ที่ความดันประมาณ 8,000 psi เสร็จแล้วจะผ่าน ไปยังเครื่องกรองน้ำที่ได้ ออกแบบมาเพื่อจะไปผ่านการเค็มแต่งให้เป็นไปตามสูตรที่ต้องการ และให้ความร้อนที่ 200 °F นาน 10 นาที ก่อนจะนำไปบรรจุและฆ่าเชื้อหรือนำไปทำเป็นนํ้านมถั่วเหลือง โดยผ่านเครื่อง Spray Drier

1.3.3 การทำนํ้านมถั่วเหลืองจากโปรตีน (Soy Protein Isolate)

การทำนํ้านมถั่วเหลืองโดยวิธีการใช้โปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองนับเป็นวิธีการทำนํ้านมถั่วเหลืองที่มีคุณภาพสูง และได้มีการนำเอาวิธีการนั้นมาใช้ในด้านอุตสาหกรรมบ้างแล้ว เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น เป็นต้น ทั้งนี้เพราะในประเทศดังกล่าวได้มีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีการใช้ถั่วเหลืองไปอย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง

ในการเอาถั่วเหลืองมาใช้ทำเป็นนํ้านมถั่วเหลืองนั้น อาจทำได้โดยการนำเอา SPI มาละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 50 – 55 °C กวนจนละลายหมด จากนั้นจึงเติมสารปรุงแต่งประเภทน้ำตาล ไขมัน และผสมให้เข้ากันโดยให้ที่ความร้อนที่ 60 °C และรักษาระดับความร้อนนี้ไว้ประมาณ 30 นาที พร้อมการกวนที่สม่ำเสมอ จากนั้นจึงผ่านเข้าเครื่องทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizer) ที่ความดัน 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก 2,500 ปอนด์ ขั้นตอนที่สอง 500 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว จากนั้นทำให้เย็นลงทันทีที่อุณหภูมิ 5 °C

จากความสำคัญและประโยชน์ของนํ้านมถั่วเหลือง อีกทั้งความยุ่งยากในกระบวนการผลิต จึงทำให้มีการพัฒนาเครื่องผลิตนํ้านมถั่วเหลืองที่ทำงาน ได้โดยอัตโนมัติขึ้นในปัจจุบัน

1.4 Literature Review

จากความสำคัญของนํ้านมถั่วเหลืองที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาเครื่องผลิตนํ้านมถั่วเหลืองแบบอัตโนมัติขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกและประหยัดเวลาในการผลิต

เครื่องผลิตนํ้านมถั่วเหลืองแบบอัตโนมัติ นั้น ในช่วงแรกได้มีการประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อม โดยใช้หินโม่บดแล้วใช้ชุดกรองแยกกากต่างหาก ซึ่งชุดกรองแยกกากอาจใช้แบบเกลียวอัดห่อหุ้มด้วยตะแกรง (นายเดชา ศรีสารสกุล, 2540), (นายนิพนธ์ รุ่งแสง, 2542) หรือแบบตะแกรงกรวยคัดใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อสกัดแยกกากถั่วเหลืองออกจากนํ้านมถั่วเหลือง (นายภู อัมมัต ทรงชาติ, 2541) ในปัจจุบันได้มีการประดิษฐ์เครื่องผลิตนํ้านมถั่วเหลืองที่สามารถปั่นและแยกกากในคราวเดียวกัน โดยใช้หลักของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเช่นกันแต่ชุดแยกกากและชุดปั่นอยู่ในตัวเดียวกัน เป็นการประหยัดพลังงานและลดขนาดของเครื่องผลิตนํ้านมถั่วเหลืองลง ซึ่งเป็นการลดความซับซ้อนของเครื่องปั่นแบบเก่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการพัฒนาหม้อต้มน้ำนมถั่วเหลือง ในช่วงแรกได้มีการใช้หม้อต้มแบบใช้แก๊สแล้ว นำน้ำนมถั่วเหลืองผ่านท่อขดที่อยู่ในน้ำร้อน (นายเดชา ศรีสารสกุล, 2540), (นายนิพนธ์ รุ่งแสง, 2542) ซึ่งหม้อต้มแบบนี้มีข้อเสียคือทำความสะอาดยาก โดยต้องใช้กรด ไนตริกผสมน้ำทำความสะอาด แล้วล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำร้อน อีกทั้งการใช้แก๊สยังมีอันตรายอีกด้วย จึงได้มีการพัฒนาหม้อต้มแบบใช้ขดลวดไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดรอบหม้อและติดใบกวนเพื่อกวนน้ำถั่วเหลือง (นายมุฮัมมัด ทรงชาติ, 2541) หม้อต้มในลักษณะนี้สามารถให้ความร้อนได้เร็วเพราะพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมากแต่อดล้างทำความสะอาดยากทั้งใบกวน ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันปัญหาการไหม้ติดหม้ออีกด้วย หลังจากนั้น (มหาวิทยาลัยศรีปทุม) ได้พัฒนาหม้อต้มที่ใช้ไอน้ำมาให้ความร้อน โดยต้มน้ำแล้วนำไอน้ำมาให้ความร้อนแก่น้ำนมถั่วเหลืองในอีกหม้อหนึ่ง หม้อต้มลักษณะนี้แก้ไขปัญหาการไหม้ติดหม้อได้แต่มีความซับซ้อนและราคาค่อนข้างสูง

ด้วยเหตุผลข้างต้นจึงเป็นสาเหตุให้มีการพัฒนาเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลืองที่สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในการควบคุมและเลือกใช้ชุดปั่นแยกกากที่สามารถปั่นและแยกกากได้ในเวลาเดียวกันซึ่งเป็นที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนของหม้อต้ม ได้พัฒนาขึ้นเพื่อขจัดปัญหาการไหม้ติดหม้อ โดยศึกษาการไหลภายในหม้อต้มเมื่อใช้รูปแบบใบกวนและความเร็วรอบต่าง ๆ และยังสามารถล้างทำความสะอาดได้สะดวก ราคาไม่แพง สามารถใช้ได้ทั้งในอุตสาหกรรมขนาดย่อมและในครัวเรือน

1.5 จุดประสงค์ของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลืองที่สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ
2. ออกแบบหม้อต้มน้ำนมถั่วเหลืองและทดลองหาความเร็วรอบใบพัดที่เหมาะสมที่สามารถต้มน้ำนมถั่วเหลือง ได้โดย ไม่ติดหม้อ

1.6 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ

1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง และวิธีการผลิตน้ำนมถั่วเหลือง
2. สร้างชุดทดลองเพื่อทำการทดลองหาความเร็วรอบและลักษณะใบกวนที่เหมาะสมในการต้มน้ำนมถั่วเหลืองเพื่อไม่ให้เกิดการไหม้ติดหม้อ
3. รวบรวมและวิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องจริง

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ความร้อนเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกันคือ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้ จะเกิดขึ้น ได้ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกัน สำหรับวิศวกรนั้นนอกจากจะเข้าใจถึงกลไกของการเคลื่อนที่ของความร้อนเป็นอย่างดีแล้ว ยังต้องรู้วิธีการที่จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการถ่ายเทความร้อนด้วย

2.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนคือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่าน โมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ (อยู่นิ่ง) การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำเกิดขึ้นบ้างในของเหลวและก๊าซ แต่มักจะแยกไม่ออกจากการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพาความร้อน ความร้อนเคลื่อนที่โดยการนำได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ความร้อนยังเคลื่อนที่ไปได้ โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็งในลักษณะของพลังงานการสั่นสะเทือนอีกด้วย

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้น โดย โจเซฟ โฟริเออร์ (Joseph Fourier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส โฟริเออร์ ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลอง ไว้ดังนี้คือ

$$Q_x = kA \frac{dT}{dX} \quad (2-1)$$

โดยที่ค่า k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของสาร ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านมีหน่วยเป็น W/m · K ในระบบ SI และ Btu/ft · hr · °F ในระบบอังกฤษ A เป็นพื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน และ dT/dX เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

สมการนี้เรียกว่า Fourier Rate Equation ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาโดยอาศัยผลการทดลองจากสมการนี้เราสามารถหาสมการอื่นๆเพื่อใช้ให้เป็นประโยชน์ในการคำนวณเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ ดังจะได้แสดงให้เห็นต่อไป

2.1.2 การพาความร้อน

การพา คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหล การพายังแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การพาแบบบังคับ (Forced Convection) และการพาแบบอิสระ (Free Convection)

การพาแบบบังคับ (Forced Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของไหลและของแข็ง โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็ง โดยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือเครื่องสูบน้ำ

การพาแบบอิสระ (Free Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใดๆที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้ว มีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เป็นคั่นว่าคุณสมบัติต่างๆของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของของไหลและความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็ง เป็นคั่น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาดังนี้คือ

$$q = h (T_b - T_c) \quad (2-2)$$

โดยที่ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat Transfer Coefficient) ซึ่งได้รวมเอาความยุ่งยากทั้งหมดไว้ ถ้าเรารู้วิธีคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนได้ เราก็คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้ สมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นสมการชนิดเอมไพริคัล (Empirical Equation) h มีหน่วยเป็น $W/m^2 \cdot K$ ในระบบ SI และ $Btu/ft^2 \cdot hr \cdot ^\circ F$, q คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล T_b คืออุณหภูมิที่ร้อนกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง) T_c คืออุณหภูมิต่ำกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง)

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

ในการแผ่รังสี ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ดังเช่นในการนำและการพาในการแผ่รังสีความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ การที่จะอธิบายว่าความร้อนเคลื่อนที่ได้อย่างไรนั้น เป็นสิ่งที่ยากจะอธิบายให้เห็นพฤติกรรมทางกายภาพโดยทฤษฎีที่ยอมรับกันมากที่สุดในขณะนี้คือทฤษฎีของ ไอส์ไตน์ (Einstein) กล่าวว่าความร้อนเคลื่อนที่โดยอาศัยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในปี 1884 สตีเฟน และ โบลซ์แมน (Stefan and Boltzmann) ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนสูงสุดโดยการแผ่รังสีจากวัตถุที่มีพื้นที่ A และอุณหภูมิ T ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = \epsilon \sigma A (T_h^4 - T_c^4) \quad (2-3)$$

2.1.4 การพาความร้อนในถังกวน (Convection heat transfer in agitate vessel)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล (h) สามารถคำนวณได้จากค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติ

ต่าง ๆ คือ

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k}$$

= Nusselt number

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k}$$

= Prandtl number

$$\text{Re} = \frac{VD}{\mu}$$

= Reynolds number

$$L/D = \text{Length ratio}$$

$$\frac{\mu}{\mu_w} = \text{Viscosity ratio}$$

= Fluid viscosity at bulk temperature / fluid viscosity at wall temperature

$$\text{Gr} = \frac{\rho^2 D^3 (\beta \Delta T)_g}{\mu^2}$$

= Grashof Number

เมื่อ β คือ Thermal Coefficient of Cubic Expansion, K^{-1}

ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\text{Nu} = C \text{Re}^a \text{Pr}^b \text{Gr}^c \left(\frac{L}{D} \right)^d \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^e \quad (2-4)$$

สำหรับถังกวนจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$\frac{h_j D_j}{k} = C \left(\frac{\rho n D_i^2}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{c \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2-5)$$

เมื่อ h_j คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผนังด้านใน, $W/(m^2K)$

D_j คือ เส้นผ่านศูนย์กลางถัง, m

n คือ ความเร็วรอบใบกวน, rpm

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน, m

C คือ ค่าคงที่ เลือกจากตารางที่ 2-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 9.2 Some literature data for jacketed vessels

Agitator	Baffles	C	$Re = \frac{\rho n D_i^2}{\mu}$
Flat paddle ¹⁴	None	0.36	$300 < Re < 5 \times 10^5$
Propeller, ¹⁵ pitch $h/D = 1.0$			
2 blades	4	0.47	} $1700 < Re < 9.15 \times 10^5$
3 blades	4	0.50	
6 blades	4	0.58	
Six blade turbine ¹⁶	4	0.73	$50 < Re < 4 \times 10^4$

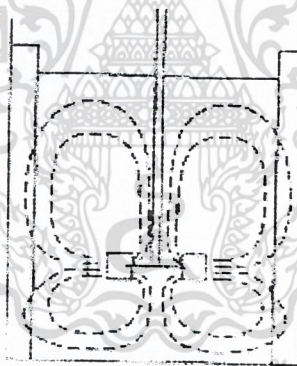
ตารางที่ 2 – 1 ตารางแสดงค่า C ของใบกวนชนิดต่าง ๆ

2.2 รูปแบบการไหลของของไหลในถังกวน (Flow Pattern in Agitated Vessel)

ลักษณะการไหลภายในถังกวนแบ่งเป็น 3 แบบคือ

2.2.1 การไหลตามแนวรัศมี (Radial Flow)

ส่วนใหญ่เกิดจากใบกวนแบบ Flat Blade Impeller หรือ ใบกวนที่ทำมุม 90 องศา กับแนวระดับ ลักษณะการไหลจะแบ่งของไหลแนวรัศมีที่ตีผนังออกเป็นสองส่วน โดยส่วนหนึ่งไหลลงสู่ก้นถัง และไหลกลับขึ้นมาสู่ใบกวน ดังรูปที่ 2-1

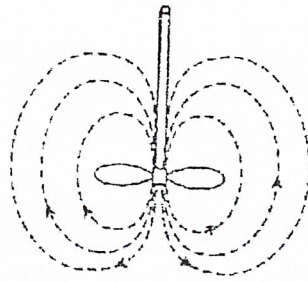


รูปที่ 2-1 รูปแบบการไหลแบบ Radial Flow

2.2.2 การไหลตามแนวแกน (Axial Flow)

ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลแบบตามแนวแกนมักเป็นใบกวนที่เอียงทำมุม 30, 45, 60 องศาเป็นต้น โดยของไหลจะไหลออกจากแกนใบกวนลงสู่ก้นถัง แล้ววนกลับขึ้นมาเข้าใบกวนทางด้านบน ดังรูปที่

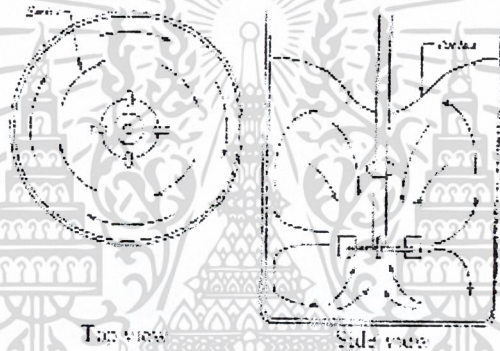
2-2



รูปที่ 2 - 2 รูปแบบการไหลแบบ Axial Flow

2.2.3 การไหลตามแนวเส้นสัมผัสขอบถัง (Tangential)

การไหลตามแนวเส้นสัมผัสขอบถังมักเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วสูง ซึ่งสังเกตได้จากด้านบนของถัง โดยการไหลตามแนวเส้นสัมผัสมักเกิดร่วมกับปรากฏการณ์น้ำวน (Vortex) ดังรูปที่ 2 - 3

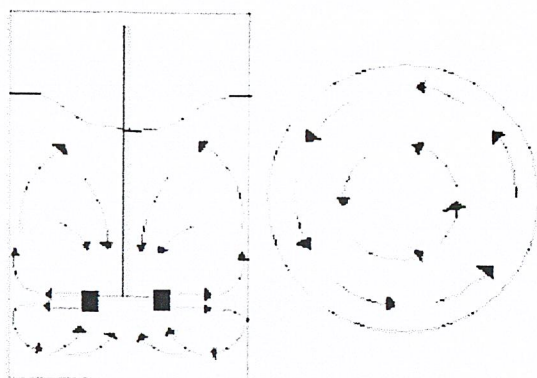


รูปที่ 2-3 รูปแบบการไหลแบบ Tangential

2.3 การเกิดปรากฏการณ์น้ำวน (Vortex)

การเกิดน้ำวน (Vortex) เกิดขึ้นเมื่อของเหลวถูกกวนด้วยใบกวนในถังเรียบไม่มีครีป (Baffles) โดยเมื่อความเร็วของใบกวนสูงขึ้นจะทำให้เกิดน้ำวน (Vortex) มีขนาดใหญ่และลึกขึ้น ความลึกของน้ำวน (Vortex) ที่ลึกถึงผิวใบกวนถือว่าเป็นความลึกวิกฤติ ซึ่งเป็นจุดที่อากาศเริ่มเข้าไปผสมกับของเหลว ส่งผลให้การผสมและการถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งความลึกวิกฤตินี้คำนวณได้จาก

$$\begin{array}{lll} \text{เมื่อ} & Re \leq 3 \times 10^3 & h'/d = 24 Fr Re^{-0.8} \\ & Re \geq 10^4 & h'/d = 2 Fr \end{array}$$

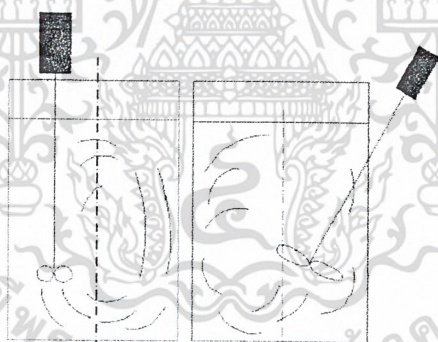


รูปที่ 2 - 4 ไบคววนกวาดของเหลวและอากาศลงมาที่ตัวไบคววนทำให้เกิด Vortex ขึ้นและ ขณะที่เกิดการ Vortex จะเกิดการหมุนของของเหลรรอบ ๆ ถึงทำให้การผสมแย่ง

ปรากฏการณ์การไหลวนของของไหลในถังกวนสามารถป้องกันได้ 3 วิธีต่อไปนี้

2.3.1 ติดตั้งไบคววนแนวเบี่ยงออกจากศูนย์กลาง (Off - Center Impeller)

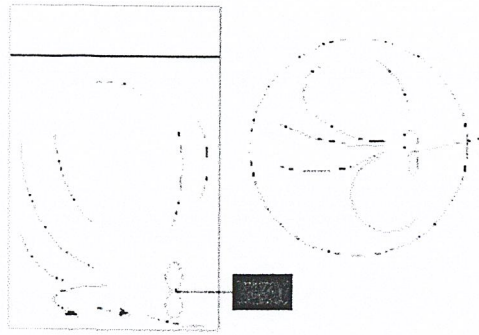
ใช้สำหรับถังกวนขนาดเล็กแกนเพลลาจะติดตั้งเลื่อนจากศูนย์กลางของถังและทำมุมเอียงในแนวตั้งฉากกับแนวเบี่ยงศูนย์กลางดังแสดงในรูปที่ 2 - 5 วิธีนี้เหมาะสำหรับถังกวนขนาดเล็กสำหรับการกวนด้วยความเร็วสูง ที่กำลังสูงๆแรงไม่สมดุลจะรุนแรงมากและเป็นตัวจำกัดการใช้กำลังสูงๆ



รูปที่ 2 - 5 Off - Center Impeller

2.3.2 ติดตั้งตัวกวนด้านข้างของถังกวน (Side Entry Impeller)

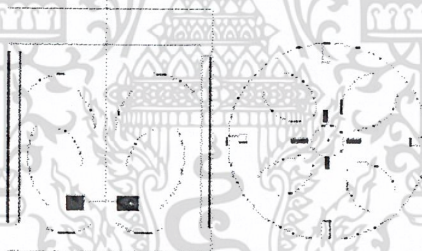
โดยเพลลาทำมุมเอียงหรือขนานกับแนวระดับดังแสดงในรูปที่ 2 - 6 วิธีนี้สามารถใช้ได้กับถังกวนขนาดใหญ่



รูปที่ 2 - 6 Side Entry Impeller

2.3.3 ติดตั้งแผ่นกั้น (Baffles)

วิธีนี้ใช้ได้กับถังกวนขนาดใหญ่ที่มีการกวนในแนวตั้ง ตัวแผ่นกั้นช่วยลดการไหลวนของของไหลโดยการไม่แทรกแซงการไหลในแนวแกนและแนวรัศมีทำให้การผสมและการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น โดยปกติแล้วแผ่นกั้นมักติดตั้งในแนวตั้งและตั้งฉากกับผนังของภาชนะ ลักษณะของแผ่นกั้นและการไหลแสดงในรูปที่ 2 - 7 ปกติแล้วถ้าถังไม่ใหญ่มากๆแผ่นกั้น 4 แผ่นก็เพียงพอสำหรับป้องกันการไหลวนและเกิดหลumnน้ำวนสำหรับถังหั่น ความกว้างของแผ่นกั้นควรไม่เกิน $1/12$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางถัง สำหรับใบกวนไม่ควรเกิน $1/18$

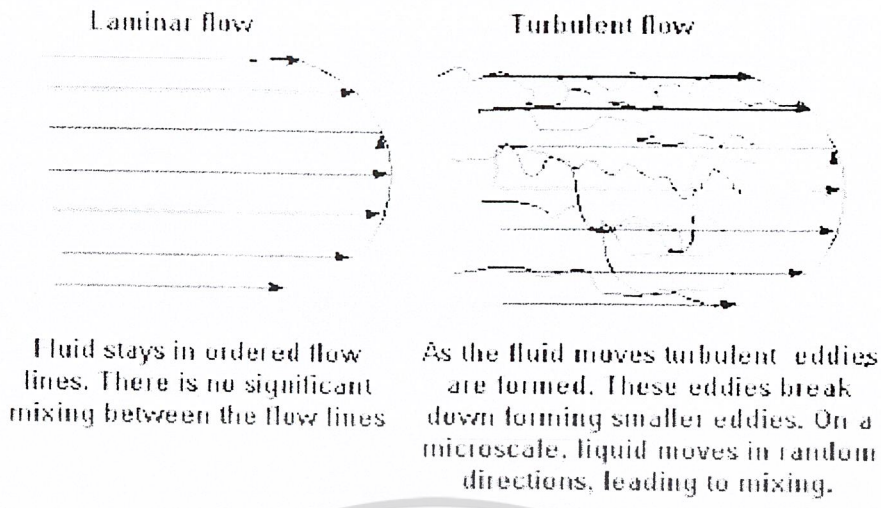


รูปที่ 2 - 7 ติด Baffles เพื่อป้องกันการเกิด Vortex

2.4 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flow)

2.4.1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

ในถังกวน ของไหลจะไหลไปในทิศทางเดียวตามเส้นการไหล (Flow Line) ลักษณะการไหลแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อความเร็วรอบของใบพัดน้อย หรือความหนืดของของไหลมาก การไหลแบบ Laminar จะทำให้การถ่ายเทความร้อน ไม่ดีเพราะ ไม่มีการเคลื่อนที่ข้ามเส้นการไหล



รูปที่ 2 - 8 รูปแสดงลักษณะการไหลแบบ Laminar และ Turbulent

2.4.2 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

ในถึงกวนการไหลจะไม่ไหลไปในเส้นทางเดียวกับเส้นการไหลแต่จะก่อตัวเป็นกลุ่มก้อนของโมเลกุลของของไหล หรือจุดน้ำวนขนาดเล็กเรียกว่า EDDIES เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางการไหลทำให้การถ่ายเทความร้อนและการผสมดีขึ้นเนื่องจากของเหลวมีมวลและความเร็วจึงมีพลังงานจลน์เกิดขึ้น พลังงานจลน์ที่ไหลมากับ Eddies ส่วนหนึ่งจะถูกใช้เพื่อเอาชนะความหนืดและที่เหลือนี้เสียไปกับความร้อน ดังนั้น Eddies จะลดขนาดลงจนถึงขนาดที่พลังงานจลน์มีไม่พอที่จะทำให้กลายเป็น Eddies ขนาดเล็กกว่านี้อีกได้ โดย Eddies ขนาดเล็กที่สุดที่จะเป็นได้สามารถหาได้จากกฎของ “Kolmogorov Eddy Size”



รูปที่ 2 - 9 รูปแสดงลักษณะของ Eddies ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการไหลแบบ Turbulent

2.5 การส่งกำลัง (Power Input)

กำลังที่ต้องการจากมอเตอร์เพื่อใช้ในการกวนของเหลว แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ P กำลังที่ส่งถ่ายให้ของเหลวเพื่อใช้ในการกวนจริง, P_v กำลังที่สูญเสียไปกับแบริ่งและชุดเฟือง และ P_A กำลังที่ต้องใช้ในการเริ่มขับมอเตอร์ ดังนั้นจะได้กำลังที่ต้องการจากมอเตอร์ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_M = P + P_V + P_A$$

โดยกำลังที่มอเตอร์ใช้ในการกวนของเหลวจริง (P) ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆมากมายเช่น ขนาดถัง (D), ความสูงของน้ำ (H) และขนาดใบกวน (d) เป็นต้น

2.5.1 เมื่อของเหลวเป็น Newtonian Liquid

พบว่าถ้ากวนในถังที่ไม่มีครีป (Unbaffled Tank) การก่อตัวของ Vortex จะไม่มีผลต่อกำลังของใบกวน จนกว่า vortex จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนลึกลงไปถึงตัวใบกวนซึ่งจะทำให้อากาศเข้าไปในของเหลว โดยจะส่งผลทำให้กำลังของใบกวนเปลี่ยนไปและยังมีผลทำให้ค่า Froude Number (Fr) = $n^2 d/g$ เปลี่ยนไปด้วย โดยกำลังของใบกวนขึ้นอยู่กับค่า 2 ค่าดังนี้

(1) Power Number หรือ Newton Number

$$Ne = \frac{P}{\rho n^3 d^5} \quad (2-6)$$

(2) Reynolds number

$$Re = \frac{nd^2 \rho}{\mu} \quad (2-7)$$

- เมื่อไหลแบบราบเรียบ ($Re < 20$)

$$P = \text{const}_1 n^2 d^3 \mu \quad (2-8)$$

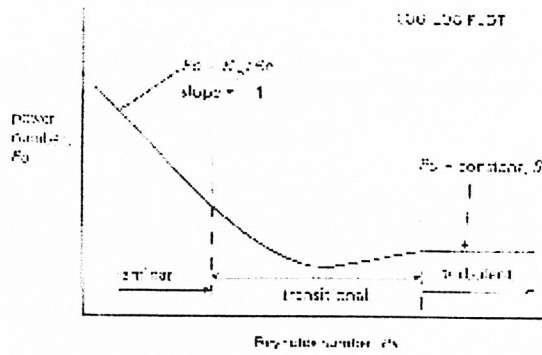
- เมื่อไหลแบบปั่นป่วน ($Re = 5 \times 10^4$)

$$P = \text{const}_2 n^3 d^5 \rho \quad (2-9)$$

และจากความสัมพันธ์ $P = Ne \rho n^3 d^5$ เปรียบเทียบกับที่ได้จากสมการ (2-9) พบว่า

$$Ne = \text{const}_2$$

ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2-10

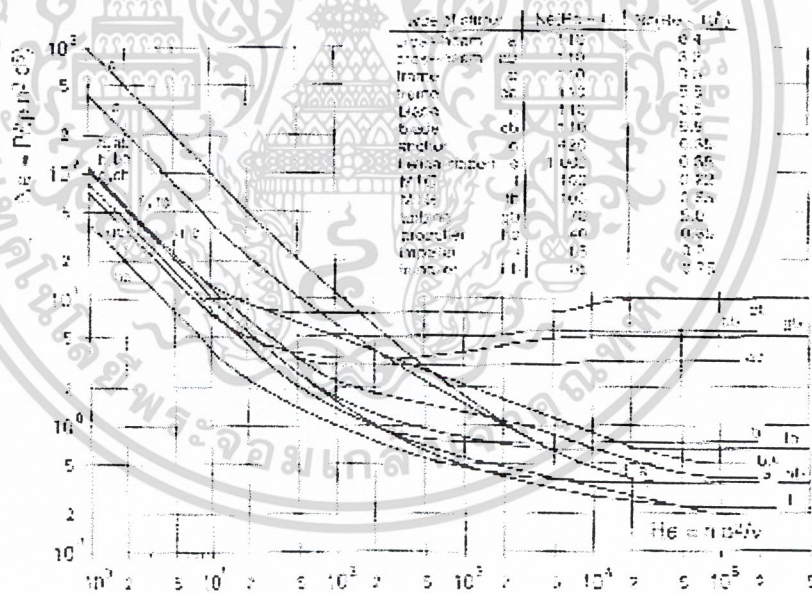


รูปที่ 2 - 10 General Characteristic of Power Curve

ดังนั้นจึงสามารถหาค่ากำลังของใบกวนสำหรับของไหล Newtonian จากสูตร

$$P = Ne \rho n^3 d^5$$

โดยค่า Ne หาได้จาก รูปที่ 2 - 11



รูปที่ 2 - 11 กราฟแสดงค่า Power Characteristic ของอัญป็นชนิดต่าง ๆ

2.5.2 เมื่อของเหลวเป็น Non - Newtonian Liquid

กำลังของใบกวนสำหรับของเหลวแบบ Non - Newtonian liquid จะแตกต่างจากของเหลวแบบ Newtonian Liquid เพียงเล็กน้อย โดยค่า Reynold Number สำหรับของเหลวแบบ Non - Newtonian มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\mu_a} \tag{2-10}$$

เมื่อ μ_a คือความหนืดของของเหลวแบบ Non - Newtonian liquid
 - สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

$$P_o = Ne = K_p \left[\frac{n(2-m)d^2\rho}{K(k_s)^{m-1}} \right]^{-1} \tag{2-11}$$

เมื่อ K_p คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลวแบบ Non - Newtonian

k_s คือ shear rate constant ขึ้นอยู่กับลักษณะของใบกวน

เมื่อ 6 Bladed disc turbine $k_s = 11.5$

2 Bladed paddles $k_s = 10$

3 Bladed propeller $k_s = 10$

Helical ribbons $k_s = 34 - 144 \left(\frac{C}{D}\right)$; $0.026 < \left(\frac{C}{D}\right) < 0.164$

Helical anchors $k_s = 33 - 172 \left(\frac{C}{T}\right)$; $0.02 < \left(\frac{C}{T}\right) < 0.13$

- สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

กำลังสำหรับใบกวนมีผลต่อความเฉื่อยอย่างเดียว (Inertial Effect) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนืด (Viscous Effect) ดังนั้นจึงสามารถนำสูตรคำนวณกำลังใบกวนจากของไหลแบบ Newtonian มาคำนวณได้คือ

$$P = Ne \rho n^3 d^5$$

ค่า Ne เปิดจากรูปที่ 2 - 11

2.5.2 หากำลังจากแรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag Force)

กำลังของใบกวนอาจหาได้จากแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุที่จมในของเหลว (Drag Force) คือ

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A \tag{I}$$

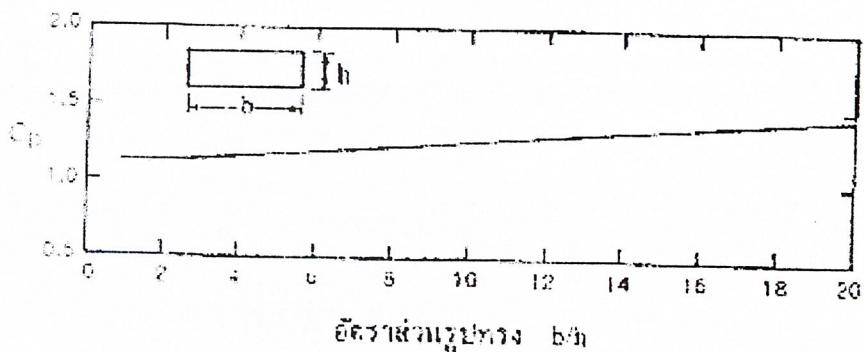
และ $P = F_D v \tag{II}$

จากสมการที่ (I) และ (II) ได้

$$P = C_D \frac{1}{2} \rho v^3 A \tag{2-12}$$

โดยค่า C_D หาได้จากรูปที่ 2 - 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 - 12 กราฟแสดงค่า C_D ของระนาบที่เหลื่อมพื้นผิว

2.6 ทฤษฎีและการออกแบบใบกวน (Agitator or Impeller Theory and Design)

ใบกวนถูกแบ่งประเภทได้โดย 2 ลักษณะดังนี้ คือ

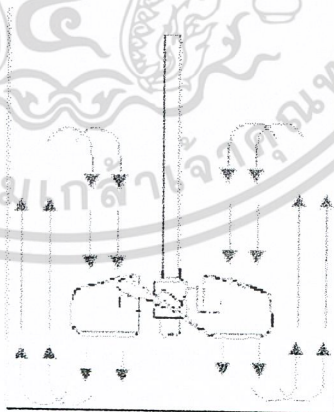
2.6.1 แบ่งตามลักษณะการไหล

แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) ใบกวนซึ่งให้กระแสน้ำไหลของของไหลขนานกับแกนของใบกวน (Axial Flow

Impeller) เช่น

- Propeller
- Pitched bladed turbine
- Pitched curved blade turbine
- Hydrofoils



รูปที่ 2 - 13 ลักษณะการไหลของของไหลเมื่อใช้ใบกวนแบบ Axial Flow Impeller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



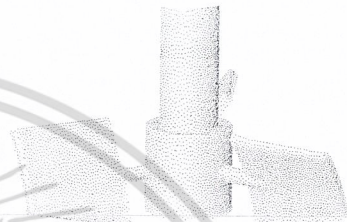
(a)



(b)



(c)

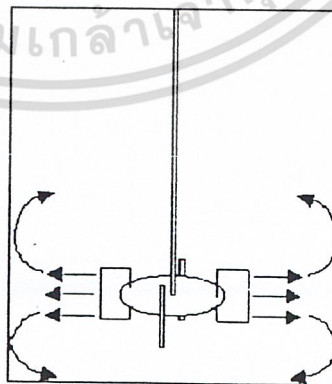


(d)

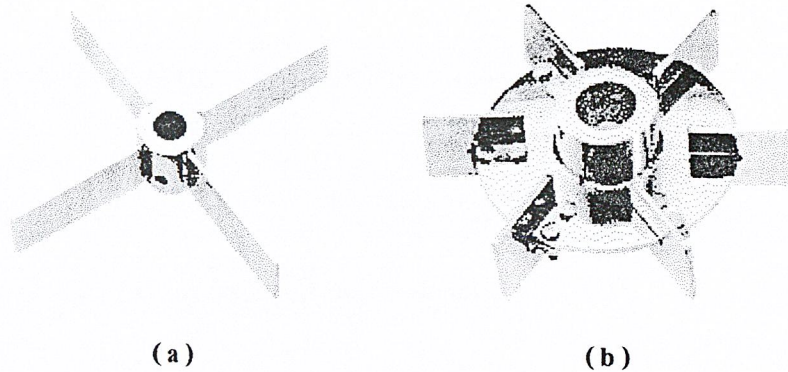
รูปที่ 2 - 14 Axial Flow Impeller ; (a) Propeller (b) Pitch Bladed Turbine
(c) Hydrofoil (d) Pitch Curved Blade Turbine

2) ไบกวนซึ่งให้กระแสการไหลมีทิศทางขนานกับรัศมีของไบกวน (Radial Flow Impeller) เช่น

- Flat-Blade Impeller
- Disk Turbine (Rushton)
- Hollow-Blade Turbine (Smith)



รูปที่ 2 - 15 ลักษณะการไหลของของไหลเมื่อใช้ไบกวนแบบ Radial Flow Impeller



รูปที่ 2 - 16 Radial flow impeller ; (a) Flat – Bladed Impeller (b) Disk Turbine

2.6.2 แบ่งตามลักษณะหรือรูปร่างของใบกวน

แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1) ใบพัด (Propellers)

ใบพัด (Propellers) เป็นใบกวนแบบเกิดการไหลตามแนวแกน (Axial Flow) ใช้สำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ใบพัดขนาดเล็กหมุนด้วยความเร็วรอบตามแนวความเร็วรอบของมอเตอร์ ขณะที่ใบพัดขนาดใหญ่หมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 400-800 rpm กระแสการไหลออกจากใบกวนแบบต่อเนื่องผ่านของเหลวในทิศทางซึ่งกำหนดให้จนกระทั่งกระทบกับผนังหรือกันของภาชนะ ใบกวนแบบใบพัดนี้ใช้ได้ผลดีกับภาชนะซึ่งใหญ่มาก ๆ เนื่องจากกระแสการไหลไม่ตก

กรณีไม่มีการลื่นไถลระหว่างของเหลวกับใบพัด การหมุนหนึ่งรอบของใบพัดจะเคลื่อนที่ของเหลวได้ระยะทางคงที่ตามแนวยาว ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมเอียงของใบพัด อัตราส่วนระหว่างระยะทางนี้กับเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเรียกว่า ระยะ pitch ของ propeller โดย pitch เท่ากับ 1 เรียกว่า square pitch

2) ใบพาย (Paddles)

ใบพาย (Paddles) เป็นใบกวนแบบแบน ๆ ติดอยู่บนเพลลาส่วนใหญ่เป็นแบบ 2 ใบและ 4 ใบ บางทีใบกวนอาจบิดเอียง แต่ส่วนมากจะเป็นแบบตั้ง ใบพายหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำถึงปานกลางประมาณ 20-150 rpm ในงานอุตสาหกรรมความยาวของใบพายส่วนใหญ่ประมาณ 50-80 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ความกว้างของใบประมาณ 10-17 เปอร์เซ็นต์ของความยาวใบพัดขับเคลื่อนของเหลวให้เคลื่อนที่ในแนวรัศมีและแนวสัมผัส โดยเกือบจะไม่มีเคลื่อนที่ในแนวตั้งจากกับใบกวน ถ้าใบกวนไม่เป็นแนวเอียง กระแสการไหลของของเหลวจะเคลื่อนที่ออกข้างนอกสู่ผนังภาชนะ จากนั้นเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงที่ความเร็วรอบต่ำมาก ๆ จะเกิดการกวนอย่างเบา ๆ อ่อน ๆ ในภาชนะที่ไม่มีแผ่นกั้น (Baffled) ถ้าความเร็วรอบสูงของเหลวจะไหลวนรอบ ๆ ผนัง แต่มีการผสมกันน้อยมากดังนั้นจำเป็นต้องใช้แผ่นกั้น สำหรับถังเล็ก ๆ อาจใช้ใบพายหลายใบติดบนแกนเพลลาเดียวกัน การออกแบบใบกวนตามรูปร่างถึงภาชนะเป็นแบบจานหรือรูปครึ่งซีกภาชนะเพื่อที่จะสามารถกวาดเช็ดผิวหน้าผนังภาชนะ ใบกวนแบบนี้เรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Anchor Agitator ซึ่งใช้ป้องกันการเก็บสะสมบนผิวถ่ายเทความร้อนด้วย แต่ใบกวนชนิดนี้ผสมได้ไม่ดี ดังนั้นจึงมักใช้ร่วมกับใบพายความเร็วรอบสูงหรือใบกวนแบบอื่น ๆ ปกติแล้วใบกวนจะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน

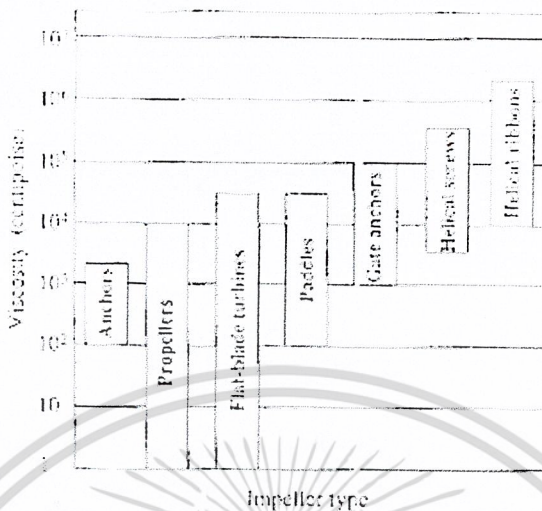
รูปที่ 2 – 17 Anchor Agitator

3) กังหัน (Turbines)

ใบกวนแบบกังหัน (Turbines) ส่วนมากเป็นแบบใบพายขนาดสั้นหลายใบประกอบกัน ติดอยู่บนเพลลาที่จุดศูนย์กลางของถัง ใบกวนหมุนด้วยความเร็วรอบสูงอาจเป็นใบตรงหรือใบโค้ง ติดแบบเอียงหรือแนวตั้งก็ได้ ตัวใบกวนอาจติดตั้งเป็นแบบเปิด (Opened), แบบเปิดกึ่งปิด (Semiclosed) หรือมีแผ่นโลหะกันรอบ (Shrouded) เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนแบบกังหันจะเล็กกว่าแบบใบพาย คือขนาดประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางภาชนะ

ใบกวนแบบกังหัน ใช้งานได้ดีกับของไหลซึ่งมีความหนืดต่าง ๆ กันในของไหล ความหนืดต่ำใบกวนแบบกังหันให้กระแสการไหลแรงตลอดภาชนะ และช่วยกำจัดจุดซึ่งของไหลหยุดนิ่ง (Stagnation point) หรือเคลื่อนที่ช้า ๆ บริเวณใกล้ใบกวนเป็นช่วงกระแสไหลเร็ว เกิดการปั่นป่วนสูงและแรงเฉือนสูง กระแสการไหลหลักเป็นแนวรัศมีและแนวสัมผัสใบกวน โดยส่วนประกอบการไหลแนวสัมผัสก่อให้เกิดการไหลวนและจุดลง (Vortex) ซึ่งแก้ไขได้โดยใช้แผ่นกัน (Baffle) หรือวงแหวนตัวกระจาย (Diffuser ring)

2.7 หลักการเลือกใบพัด (Impeller Selection)



รูปที่ 2 - 18 แผนภูมิแสดงการเลือกใบพัดจากขนาดความหนืดของของเหลว

2.8 ของเหลวที่มีคุณสมบัติเป็น Newtonian และ Non - Newtonian

การแบ่งประเภทของของเหลวโดยพิจารณาจากความหนืดนั้น สามารถแบ่งของเหลวออกเป็น 2 ประเภท คือ

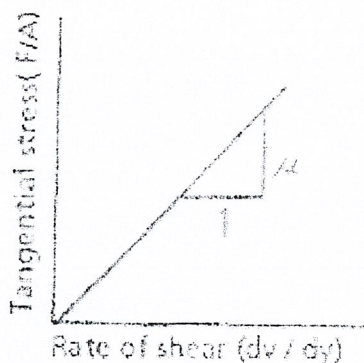
2.8.1 Newtonian Liquid

คือ ของเหลวที่มีความหนืดไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนและประวัติการได้รับแรงเฉือน (Shear history) ความหนืดของของเหลวประเภทนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของของเหลวเท่านั้น shear stress และ shear rate มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\tau = \mu \gamma \tag{2 - 13}$$

เมื่อ

$$\gamma = \frac{du}{dy}$$



รูปที่ 2 - 19 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ Newtonian

2.8.2 Non - Newtonian Liquid

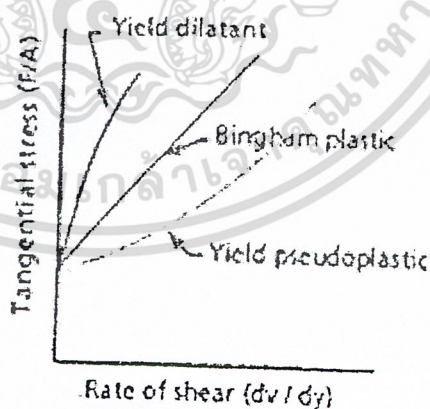
คือ ของเหลวที่มีความหนืดที่แปรตามอัตราเฉือน สามารถแบ่งได้เป็น

1. Time - Independent Non - Newtonian Fluids ได้แก่

- Bingham plastic มีความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ดังนี้

$$\text{Bingham model; } \tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (2-14)$$

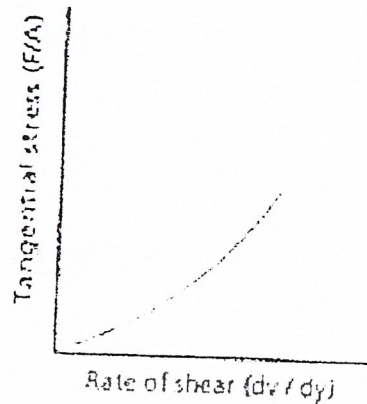
เมื่อ τ_0 คือ yield stress ของเหลวชนิดนี้ต้องได้รับความเค้นเฉือนมากกว่า τ_0 จึงจะเกิดการไหลได้และเมื่อเกิดการไหลแล้ว ความหนืดของของเหลวจะไม่ขึ้นกับ shear rate



รูปที่ 2 - 20 กราฟแสดงลักษณะการไหลแบบ Time - Independent Non - Newtonian Fluid

- Shear - Thinning Fluid หรือ Pseudoplastic Fluid มีความหนืดลดลงตาม shear rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-21 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ Pseudoplastic

- Shear Thickening Fluid หรือ Dilatant Fluid มีความหนืดเพิ่มขึ้นตาม shear rate



รูปที่ 2-22 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ Dilatants

ทั้ง Pseudoplastic fluid และ Dilatants fluid จะมี shear rate และ shear stress มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\text{Power law model ;} \quad \tau = KY^n \quad (2-15)$$

ในกรณีที่ของเหลวมี yield stress จะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\text{Herschel - Bulkeley model ;} \quad \tau = \tau_0 + KY^n \quad (2-16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ K คือ CONSISTENCY INDEX มีความสัมพันธ์กับความหนืดของของเหลวและ n คือ Flow Behavior Index เป็นค่าที่บ่งบอกลักษณะการไหลของของเหลว

เมื่อ $n > 1$; Dilatants Fluid

เมื่อ $n < 1$; Pseudoplastic Fluid

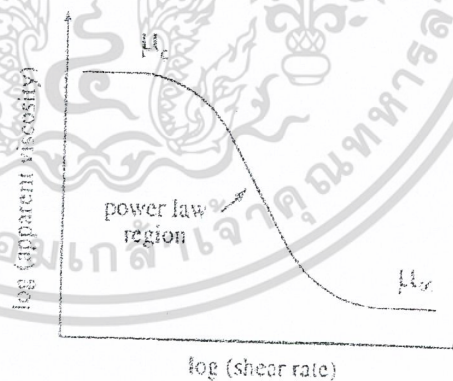
สามารถคำนวณความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity : μ_a) ของของเหลวที่มีลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic และ Dilatant ได้ดังนี้

$$\mu_a = KY^{n-1} \quad (2-17)$$

ของเหลวที่มีลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic คือยังเกิดการกวนของเหลวมากๆ ความหนืดของของเหลวจะลดลง โดยจะแสดงลักษณะดังรูปที่ 2-21 คือ

- ที่อัตราเฉือนต่ำจะแสดงลักษณะการไหลแบบ Newtonian โดยที่ค่าความหนืดคงที่ที่ Zero - shear viscosity : μ_0

- ที่อัตราเฉือนสูงจะแสดงลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic นี้จะเกิดที่ Characteristic time หรือ Time constant (t_c) โดย $t_c = \frac{1}{\gamma}$ เมื่ออัตราเฉือนมีค่าสูงมาก ของเหลวจะมีค่าความหนืดที่คงที่ที่ μ_∞ เรียกว่า Infinite - shear viscosity



รูปที่ 2 - 23 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของไหล Pseudoplastic

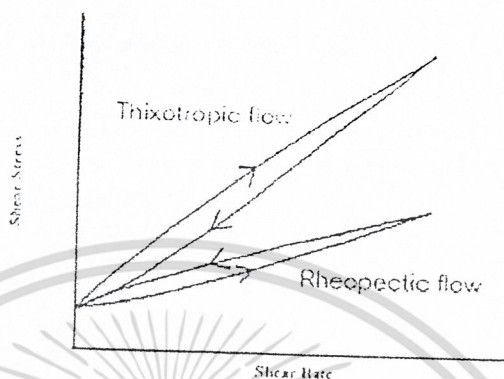
แบบ Power Law

2. Time – Dependent Non – Newtonian Fluids

ลักษณะการไหลที่ขึ้นกับเวลาในการให้อัตราเฉือนด้วยสามารถแบ่งของเหลวในกลุ่มนี้ได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Thixotropic Fluid เป็นของเหลวที่มีความหนืดลดลงเมื่อได้รับอัตราเฉือนที่คงที่ในเวลาที่เพิ่มขึ้น
- Rheopectic fluid เป็นของเหลวที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอัตราเฉือนที่คงที่ในเวลาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 - 24 กราฟแสดงลักษณะการไหลแบบ Time - Dependent
Non - Newtonian Fluids

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีและการคำนวณ

3.1 การคำนวณขนาดใบกวนมาตรฐาน

เนื่องจากของเหลวที่ใช้มีความหนืดต่ำจึงเลือกใบกวนแบบ Impeller ที่มีกรไหลแบบ Radial Flow และ Axial Flow ซึ่งจากตารางที่ 3-1

	type of stirrer	D/d	h/d	b/d	δ/d	
a	cross-beam	1.5	0.15	1.0	0.15	
b	frame	2	0.2	1.5	0.1	
c	blade	2	0.4	1.0		
d	anchor	1.02	0.01	1.0	0.1	
e	helical ribbon	1.02	0.01	1.0	0.1	double helix, pitch 0.5
f	MIG [®]	1.43	0.15	1.0		4 beams
g	turbine	3.33	1.0			6 paddles
h	propeller	3.33	1.5			3 vanes, $\alpha = 25^\circ$
i	impeller	1.5	0.25	0.15		

ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงขนาดใบกวนมาตรฐาน

พบว่าขนาดมาตรฐานคือ ;

$$\frac{D}{d} = 1.5$$

เมื่อ ; D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อต้ม = 24 เซนติเมตร

$$\therefore d = \frac{24}{1.5} = 16 \text{ เซนติเมตร}$$

และจาก $\frac{h}{d} = 0.25$

$$\therefore h = 0.25 \times 16 = 4 \text{ เซนติเมตร}$$

และ $\frac{b}{d} = 0.15$

$$\therefore b = 0.15 \times 16 = 2.4 \text{ เซนติเมตร}$$

โดยที่ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อต้ม

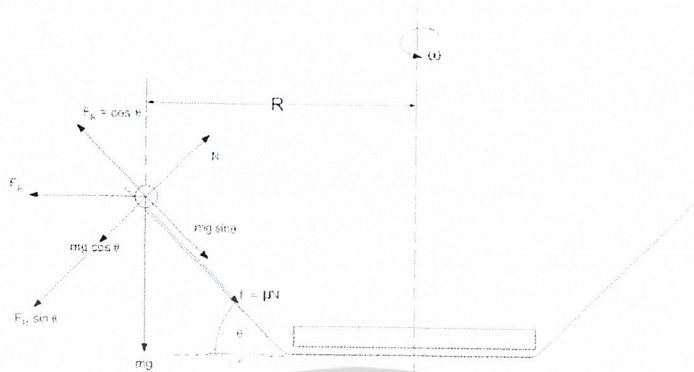
d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน

b คือ ขนาดความกว้างของใบกวน

h คือ ขนาดระยะความสูงของใบกวนจากก้นหม้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กำหนดขนาดมอเตอร์เครื่องบดหัวเหลือง



รูปที่ 3-1 ภาพแสดงแรงที่กระทำกับมวลของหัวเหลืองบนกรวยแยกกาก

$$\tan \theta = \frac{5.5}{5}$$

$$\theta = 47.726^\circ$$

$$N = mg \cos \theta + F_R \sin \theta \quad (I)$$

$$F_R \cos \theta = mg \sin \theta + \mu N \quad (II)$$

จากสมการที่ (I) และ (II) ได้

$$F_R (\cos \theta - \mu \sin \theta) = mg (\sin \theta + \mu \cos \theta)$$

$$F_R = m\omega^2 R$$

$$= mg \frac{(\sin \theta + \mu \cos \theta)}{(\cos \theta - \mu \sin \theta)}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g (\sin \theta + \mu \cos \theta)}{R (\cos \theta - \mu \sin \theta)}} \quad (3-1)$$

กำหนดให้ $\mu = 0.9$ เพราะผิวเป็นตะแกรงและมวลกากหัวเหลืองเปียก

ได้

$$\omega = \sqrt{\frac{9.81 (\sin 47.726 + 0.9 \cos 47.726)}{0.045 (\cos 47.726 - 0.9 \sin 47.726)}}$$

$$\omega = 270.54 \text{ rad/s} = 2587.86 \text{ rpm}$$

\therefore เลือกมอเตอร์ขนาด 2800 rpm \approx 293.2 rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เวลาที่ใช้ในการหมุนหินบดจาก 0 rpm – 2800 rpm เท่ากับ 1 วินาที

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (3-2)$$

$$= \frac{293.2-0}{1-0} = 293.2 \text{ rad/s}^2$$

กำหนดให้; มวลของหินโม้ = 260 กรัม
มวลของถั่ว = 100 กรัม

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{\pi}{4}d^2b} \\ &= \frac{0.26}{\frac{\pi}{4}(0.09)^2(0.005)} = 8173.88 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$I_{\text{หินโม้}} = \rho \int r^2 2\pi r dr \quad (3-3)$$

$$\begin{aligned} &= \rho h(2\pi) \int_0^{0.045} r^3 dr \\ &= \rho h(2\pi) \frac{r^4}{4} \Big|_0^{0.045} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{หินโม้}} &= (8173.88)(2\pi)(0.005)\left(\frac{0.045^4}{4}\right) \\ &= 2.6325 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$I_{\text{ถั่ว}} = mr^2 \quad (3-4)$$

$$= 0.1(0.095)^2 = 0.0009025$$

$$\therefore I_{\text{รวม}} = (9.025 + 2.6325) \times 10^{-4}$$

$$\text{จาก } T = I\alpha \quad (3-5)$$

$$= 11.657 \times 10^{-4} \times 293.2$$

$$= 3417.973 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$P = T\omega \quad (3-6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 3417.973 \times 10^4 \times 293.2 = 100.215 \text{ W}$$

กำหนดให้ ; safety factor = 1.8

$$P = 100.215 \times 1.8 = 180.38 \text{ W}$$

∴ จึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด $\frac{1}{4}$ แรงม้า

3.3 การคำนวณขนาดมอเตอร์ใบกวน

- หากำลังที่ใช้กวนของเหลว

$$\begin{aligned} x_{\text{avg}} &= \frac{x_1 + x_2}{2} \\ &= \frac{8+1}{2} = 4.5 \text{ เซนติเมตร} \\ &= 0.045 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$A = 7 \times 2.5 \times 10^4 = 1.75 \times 10^3 \text{ ตารางเมตร}$$

เลือกใช้ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที

$$\text{จาก } P = Ne (\rho n^3 d^5)$$

และ

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\mu}$$

$$\frac{260 \times 0.16^2 \times 998.2}{60 \times 1.002 \times 10^{-3}} = 6.5 \times 10^6$$

ดังนั้นเป็นการไหลแบบ turbulent

จากรูปที่ 2-11 หาค่า Ne ได้เท่ากับ 0.8

ดังนั้น

$$\begin{aligned} P &= \frac{0.8 \times 998.2 \times 260^3 \times 0.16^5}{60^3} \\ &= 6.8135 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

- หากำลังที่ใช้ขับ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) ของเพลลา

$$I = \int r^2 dm \quad (3-7)$$

$$\begin{aligned} &= \int 2\pi r \rho r^2 dr = 2\pi \rho h \int r^3 dr \\ &= \frac{2\pi \rho h r^4}{4} \Big|_0^R \end{aligned}$$

โดย ;

$$\rho = 7747.2 \text{ kg/m}^3$$

$$I_1 = 7747.2 \times 2 \times \pi \times \frac{1}{4} \times 0.055 \times 0.02^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 1.071 \times 10^{-4} \\
 I_2 &= 7747.2 \times 2 \times \pi \times \frac{1}{4} \times 0.025 \times 0.02^4 \\
 &= 4.8677 \times 10^{-5} \\
 I_3 &= 7747.2 \times 2 \times \pi \times \frac{1}{4} \times 0.135 \times 0.007^4 \\
 &= 3.9448 \times 10^{-6} \\
 I_{\text{tot}} &= I_1 + I_2 + I_3 \\
 &= 159.7218 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

ให้มอเตอร์ขับใบกวานเร่งจาก 0 ถึง 27.227 rad/s (260 rpm) ใช้เวลา 1 วินาที

จาก

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

$$\frac{27.227-0}{1-0} = 27.227 \text{ rad/s}^2$$

และ

$$T = I\alpha$$

$$= 159.7218 \times 10^{-6} \times 27.227$$

$$= 4.3487 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

$$P_I = T\omega$$

$$= 4.3487 \times 10^{-3} \times 27.227$$

$$= 0.1184 \text{ วัตต์}$$

∴ กำลังรวม = $P_{\text{tot}} = P + P_I$

$$= 6.8135 + 0.1184 = 6.932$$

$$\approx 7 \text{ วัตต์}$$

ต้องการความเร็วรอบที่คงที่เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงดังนั้นเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน (shunt motor) เนื่องจากต้องมีกำลังที่ต้องใช้ในการเริ่มขับมอเตอร์ และกำลังที่สูญเสียไปกับแรงเสียดทาน จึงคูณค่า safety factor เท่ากับ 3

∴ ได้กำลังที่ใช้ขับมอเตอร์คือ $P_M = 7 \times 3 = 21$ วัตต์ ดังนั้นเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 63 วัตต์

3.4 การคำนวณหาขนาดฮีตเตอร์ (Heater)

ต้องการต้มน้ำ 6 ลิตรให้เดือดโดยใช้เวลา 10 นาที อุณหภูมิจาก 25 องศาถึง 95 องศา พิจารณาของเหลวมีคุณสมบัติเหมือนน้ำคือ

$$C_p = 4180 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\rho = 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก

$$\dot{Q} = \frac{mC_p \Delta T}{\Delta t} \quad (3-7)$$

$$\dot{Q} = \frac{(6)(4180)(368.15-298.15)}{10 \times 60}$$

$$= 2926 \text{ W.}$$

จากการคำนวณทางทฤษฎี ถ้าใช้ฮีตเตอร์ขนาด 1500 วัตต์จะใช้เวลา

$$\Delta t = \frac{mC_p \Delta T}{\dot{Q}}$$

$$= \frac{(6)(4180)(368.15-298.15)}{1500}$$

$$= 1170.4 \text{ วินาที}$$

$$= 19.51 \text{ นาที} \approx 20 \text{ นาที}$$

จากการทดลองต้มน้ำจริงเมื่อไม่ใช้ใบกวนพบว่าใช้เวลาในการต้ม 45 นาที เนื่องจากการต้มจริงมีการสูญเสียกำลังเนื่องจากการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) สู่อากาศแต่เมื่อใช้ใบกวนกวนน้ำขณะทำการต้มน้ำทำให้การพาความร้อนในหม้อกวนดีขึ้นซึ่งใช้เวลาในการเดือด 26 นาที พบว่า

$$\text{factor} = \frac{26-20}{20} = 0.3$$

∴ เลือกฮีตเตอร์ขนาด $3000 \times 1.3 = 3900 \text{ W}$ เพื่อต้มน้ำเดือดภายใน 10 นาที โดยใช้ใบกวน

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบกวนแต่ละชนิดในการต้มน้ำนมถั่วเหลือง

1) จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อหาความเร็วรอบของใบกวนที่เหมาะสมที่จะทำให้เคี้ยวเร็วและถั่วเหลืองไม่ไหม้ติดหม้อ

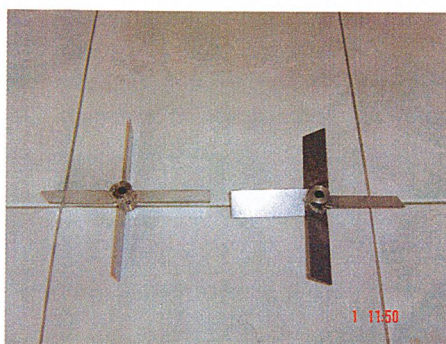
2) อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาไฟฟ้าขนาด 1500 วัตต์
2. หม้อสเตนเลสขนาด 24 นิ้ว
3. มอเตอร์กระแสตรง 63 วัตต์
4. ใบกวนสเตนเลสแบบไหลตามแนวแกนและไหลตามแนวรัศมี
5. เพาเวอร์ซับพลาย
6. กะละมัง
7. เทอร์โมมิเตอร์
8. ถั่วเหลืองแช่น้ำ 750 กรัม
9. ผ้าขาวบาง
10. เครื่องปั่น
11. เครื่องวัดความเร็วรอบ
12. น้ำเปล่า 6 ลิตร

3) ขั้นตอนการทดลอง

1. แช่ถั่วเหลืองหนัก 750 กรัม นาน 5 ชั่วโมง
2. นำถั่วเหลืองที่แช่แล้วมาปั่น โดยใช้อัตราส่วนน้ำ 6 ลิตรต่อถั่ว 750 กรัม
3. คั้นแยกกากด้วยผ้าขาวบาง
4. นำน้ำถั่วเหลืองมาต้มในหม้อสเตนเลส
5. ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยเพาเวอร์ซับพลาย
6. เปลี่ยนใช้ใบกวนทั้ง 2 แบบ (ไหลตามแนวแกนและไหลตามแนวรัศมี)
7. บันทึกเวลาที่ใช้ในการเคี้ยว สภาพหม้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 – 1 ใบพัดแบบไหลตามแนวแกนและแบบไหลตามแนวรัศมี

4) ผลการทดลอง

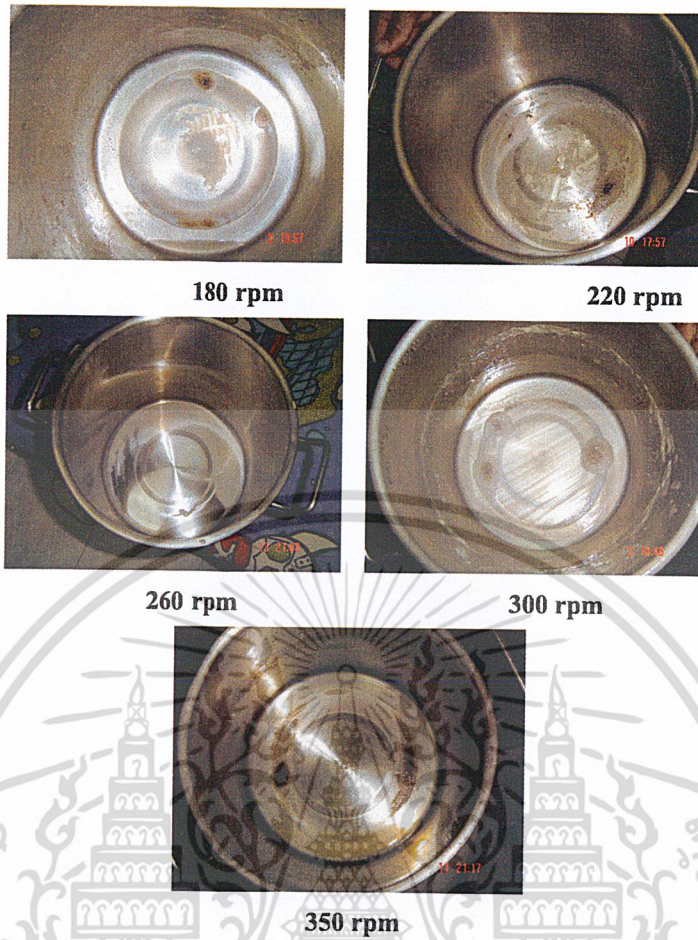
ความเร็วรอบใบพัด	เวลาเดือด	สภาพหม้อ
350 รอบต่อนาที	29.45 นาที	มีคราบเป็นวงตรงกลาง
300 รอบต่อนาที	29.38 นาที	มีคราบเป็นวงตรงกลาง
260 รอบต่อนาที	25.20 นาที	ไม่ติดหม้อ
220 รอบต่อนาที	30.19 นาที	เกิดคราบเป็นวงรอบๆ
180 รอบต่อนาที	33.43 นาที	ติดเป็นรอยไหม้

ตารางที่ 4 – 1 ผลที่ได้จากการต้มน้ำด้วยเครื่องโดยใช้ใบกวนแบบไหลตามแนวรัศมี

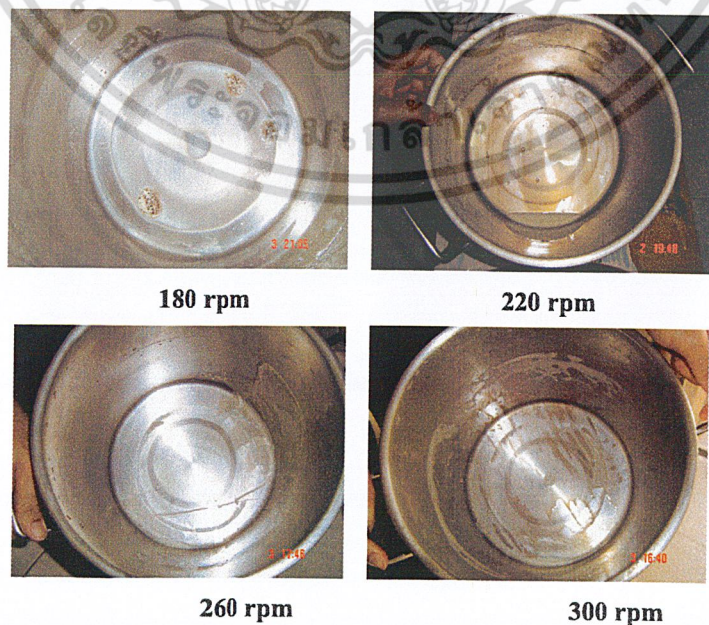
ความเร็วรอบใบพัด	เวลาเดือด	สภาพหม้อ
350 รอบต่อนาที	33 นาที	ติดหม้อ
300 รอบต่อนาที	32 นาที	ติดหม้อ
260 รอบต่อนาที	26 นาที	ไม่ติดหม้อ
220 รอบต่อนาที	36 นาที	เกิดคราบเป็นวงรอบๆ
180 รอบต่อนาที	41 นาที	ติดเป็นรอยไหม้

ตารางที่ 4 – 2 ผลที่ได้จากการต้มน้ำด้วยเครื่องโดยใช้ใบกวนแบบไหลตามแนวแกน
(Axial Flow Impeller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 ภาพแสดงสภาพหม้อหลังจากต้มน้ำแล้วเคลือบโดยใช้ใบกวนแบบไหลตามแนวแกน (Axial Flow Impeller) ที่ความเร็วรอบต่างๆ



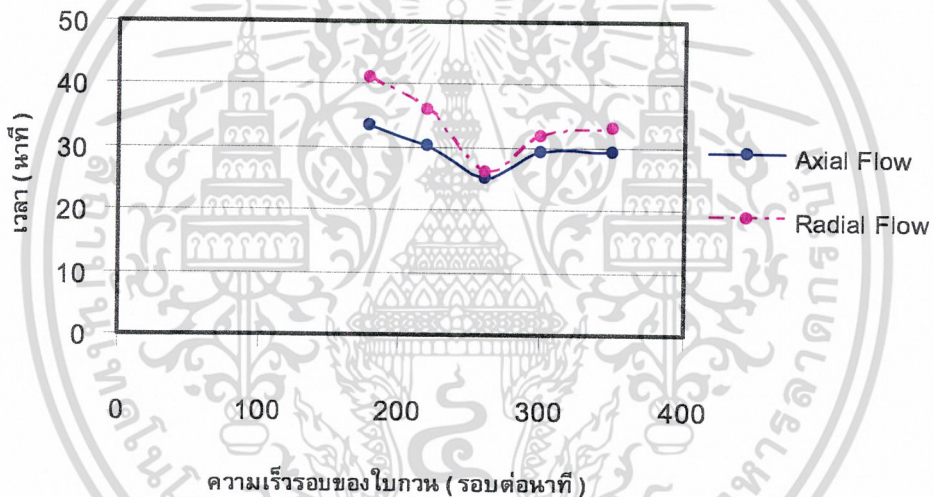
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



450 rpm

รูปที่ 4-3 ภาพแสดงสภาพหม้อหลังจากต้มน้ำถั่วเหลืองโดยใช้ใบกวนแบบไหลตามแนวรัศมี (Radial Flow Impeller) ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

5) สรุปผลการทดลอง



รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบพัดและระยะเวลาที่ใช้ในการเดือด

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ใบกวนที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที ทำให้น้ำถั่วเหลืองเดือดเร็วที่สุดและไม่ไหม้ติดหม้อ โดยเมื่อนำผลการทดลองมาวาดกราฟพบว่าเมื่อใช้ใบกวนที่มีการไหลแบบตามแนวรัศมีจะทำให้น้ำถั่วเหลืองเดือดเร็วกว่าการใช้ใบกวนที่มีการไหลตามแนวแกน

4.2 การทดลองเพื่อสังเกตการไหลของของเหลวภายในถังกวนเมื่อใช้ใบกวนแต่ละชนิด

1) จุดประสงค์การทดลอง

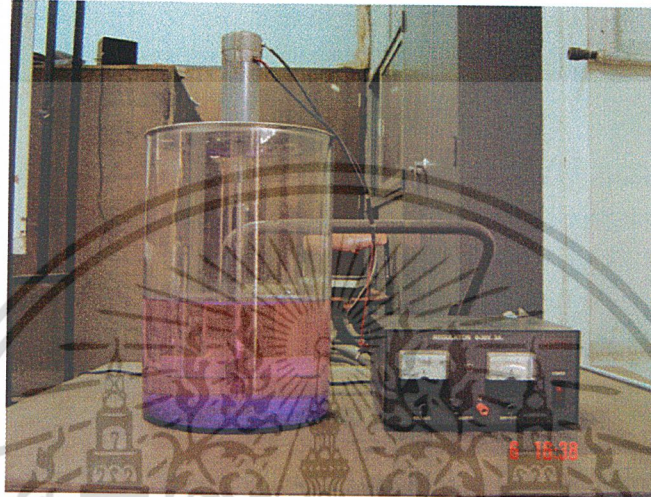
เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของของเหลวและขนาดของ Vortex ที่ความเร็วรอบต่างๆ

2) อุปกรณ์การทดลอง

1. โหลแก้วขนาด 24 เซนติเมตร
2. เพาเวอร์ซัพพลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มอเตอร์กระแสตรง 63 วัตต์
4. ใบกวนสเตนเลสแบบไหลตามแนวแกนและไหลตามแนวรัศมี
5. กากเพชร
6. น้ำเปล่า 6 ลิตร
7. กล้องวิดีโอ



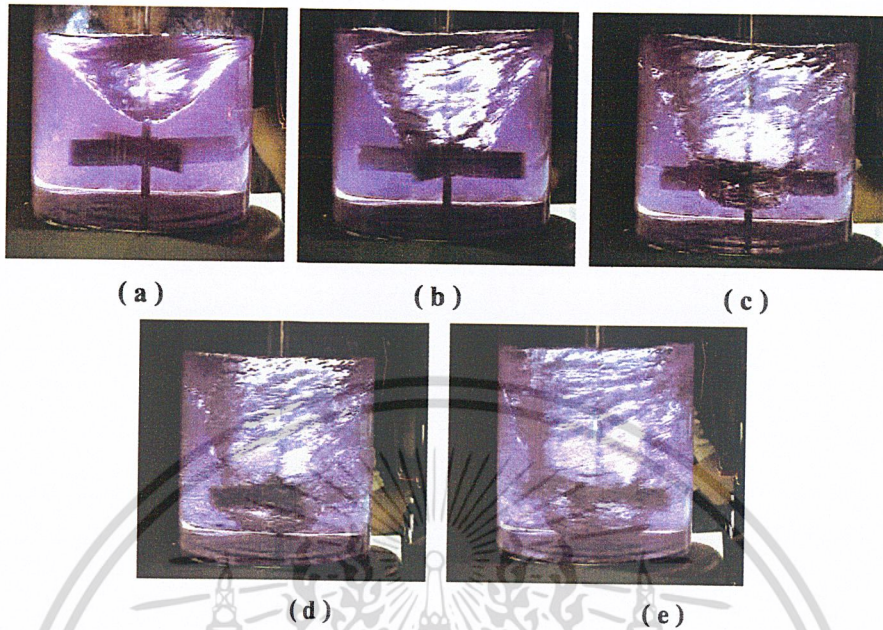
รูปที่ 4-5 รูปแสดงชุดทดลองการศึกษาการไหลของของเหลวภายในถัง

3) ขั้นตอนการทดลอง

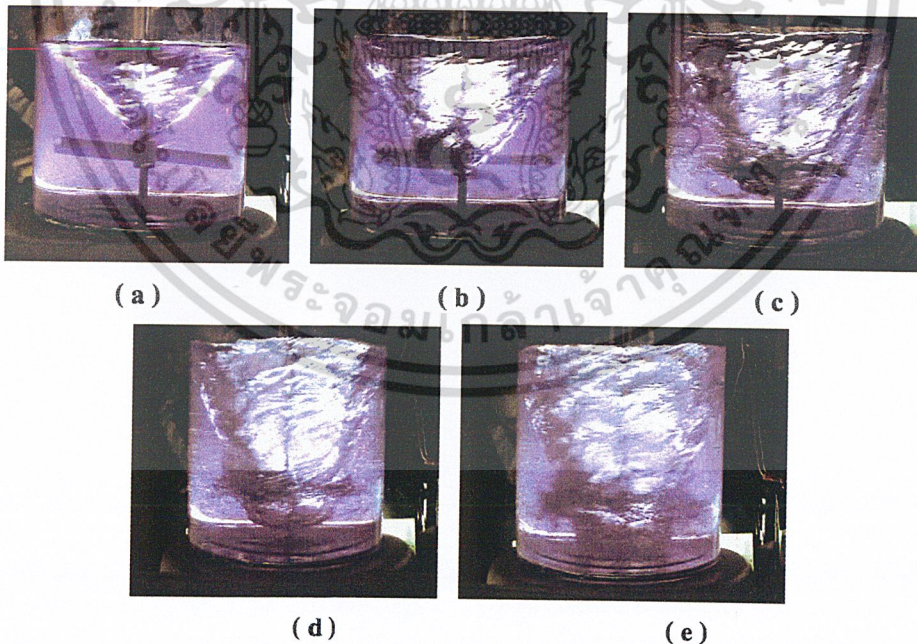
1. นำน้ำเปล่าและกากเพชรใส่โหลแก้ว
2. ทำการทดลองปรับรอบมอเตอร์ด้วยเพาเวอร์ซัพพลาย
3. เปลี่ยนใบกวนทั้งสองแบบ (Axial Flow, Radial Flow)
4. บันทึกภาพการไหลและขนาดของ Vortex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ผลการทดลอง



รูปที่ 4-6 ภาพแสดงขนาดของ Vortex เมื่อใช้ใบกวนแบบ Radial Flow ที่ความเร็วรอบต่างๆ ;
 (a) 180 rpm (b) 220 rpm (c) 260 rpm (d) 300 rpm (e) 350 rpm



รูปที่ 4-7 ภาพแสดงขนาดของ Vortex เมื่อใช้ใบกวนแบบ Axial Flow ที่ความเร็วรอบต่างๆ ;
 (a) 180 rpm (b) 220 rpm (c) 260 rpm (d) 300 rpm (e) 350 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองพบว่าขนาดของ Vortex มีลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามความเร็วรอบของใบกวน โดยที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาทีความลึกของน้ำวน (Vortex) จะอยู่ที่ใบกวนพอดี ทำให้เกิดฟองอากาศถูกดีเข้าผสมกับน้ำ ส่วนที่ความเร็ว 180 และ 220 รอบต่อนาที น้ำวน (Vortex) ยังมีความลึกไม่ถึงใบกวนจึงยังไม่มีฟองอากาศเข้าไปผสม ส่วนที่ความเร็วรอบ 300 และ 350 รอบต่อนาทีฟองอากาศเข้าไปผสมมากและความลึกของน้ำวน (vortex) เกือบถึงก้น โหลแก้ว
2. ส่วนความแตกต่างของขนาดของน้ำวน (Vortex) ไม่แตกต่างมากนักเมื่อใช้ใบกวนแบบ Axial Flow และ Radial Flow แต่ขนาดของน้ำวน (Vortex) เมื่อใช้ใบกวนแบบ Axial Flow จะมีขนาดใหญ่กว่าใบกวนแบบ Radial Flow เพียงเล็กน้อย

4.3 การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการไหลของของเหลวโดยใช้โปรแกรม Star CD

1) จุดประสงค์การทดลอง

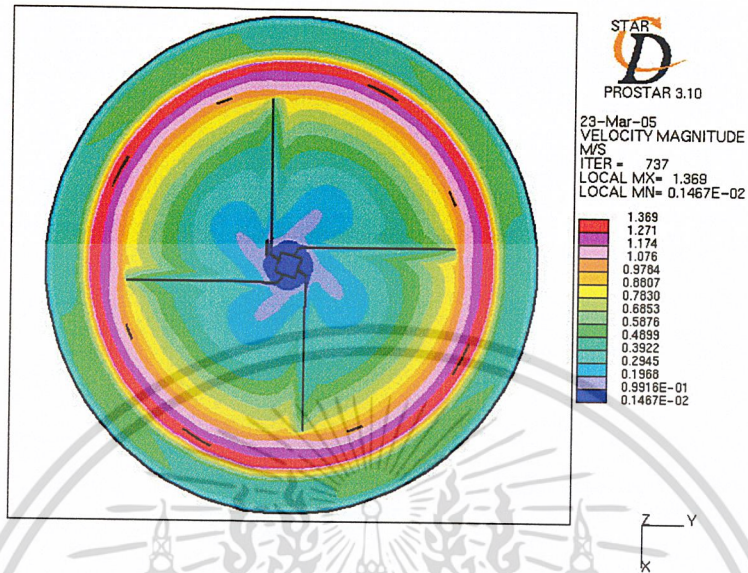
เพื่อศึกษาการกระจายความเร็วภายในหม้อกวน โดยใช้ใบกวนแบบ 90 องศา และ 45 องศาที่ความเร็วรอบต่างๆโดยใช้โปรแกรม Star CD Version 3.10

2) ขั้นตอนการทดลอง

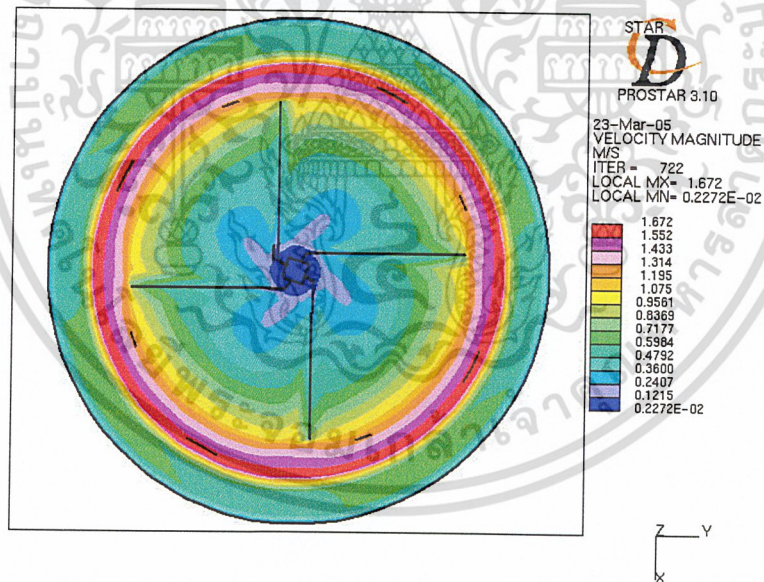
1. จำลองโมเดลถึงผสมจากโปรแกรม Mixpert
2. นำโมเดลไป Import เข้าโปรแกรม Star CD ใส่คุณสมบัติต่างๆ และค่า Boundary Condition
3. เปลี่ยนโมเดลโดยเปลี่ยนใบกวนจาก 45 องศา เป็น 90 องศา และเปลี่ยนความเร็วรอบต่างๆ เป็น 180, 220, 260, 300 และ 350 รอบต่อนาที
4. ตั้งเกศการณ์กระจายตัวและขนาดของเวกเตอร์ความเร็วที่กรณีต่างๆ

3) ผลการทดลอง

- เมื่อใช้ใบกวน 45 องศา (Axial Flow)

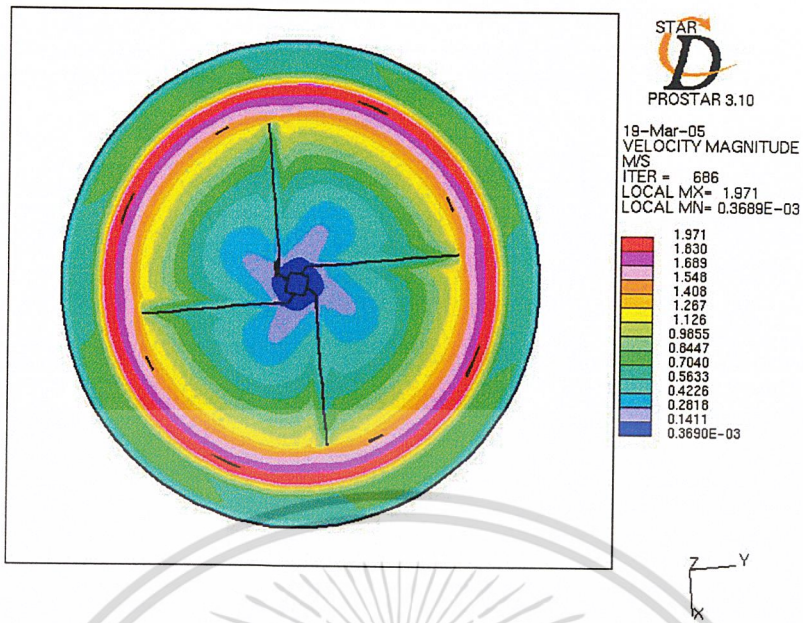


รูปที่ 4 - 8 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

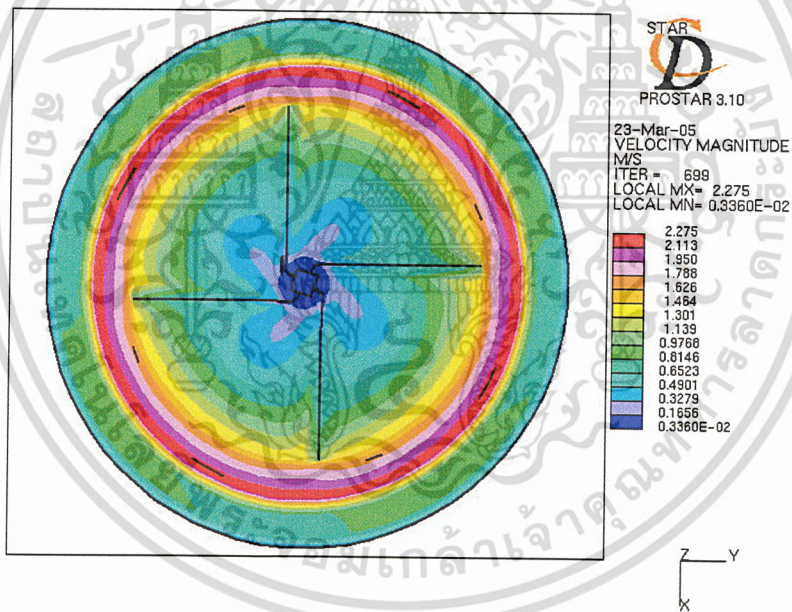


รูปที่ 4 - 9 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

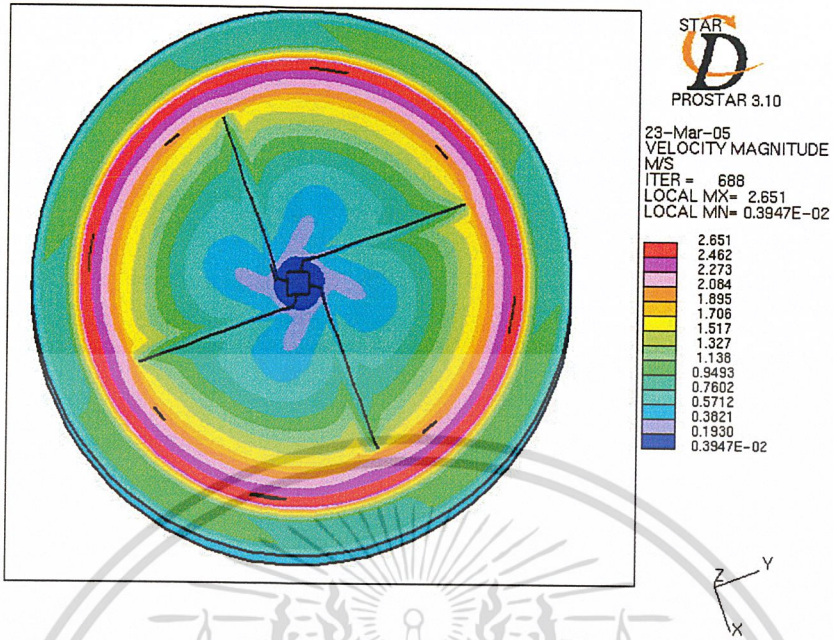


รูปที่ 4 - 10 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที

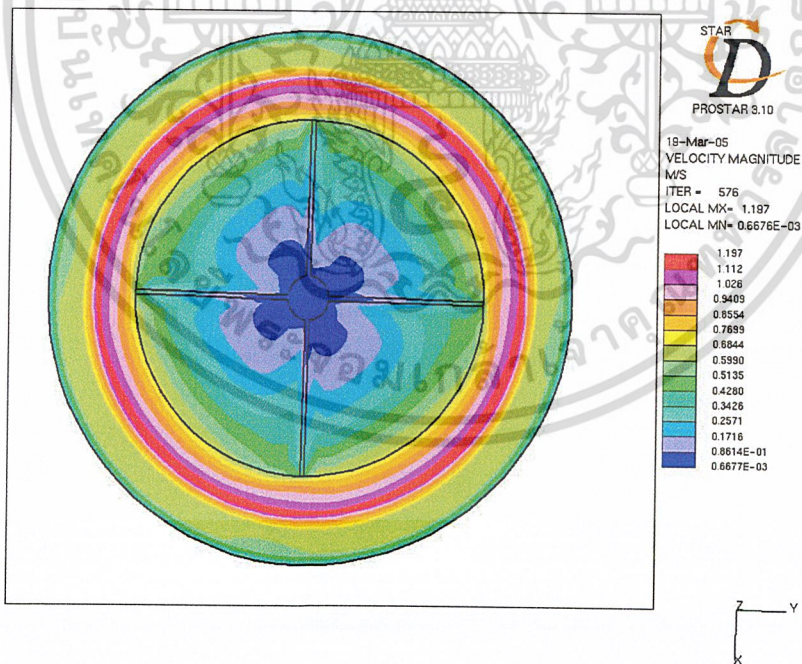


รูปที่ 4 - 11 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

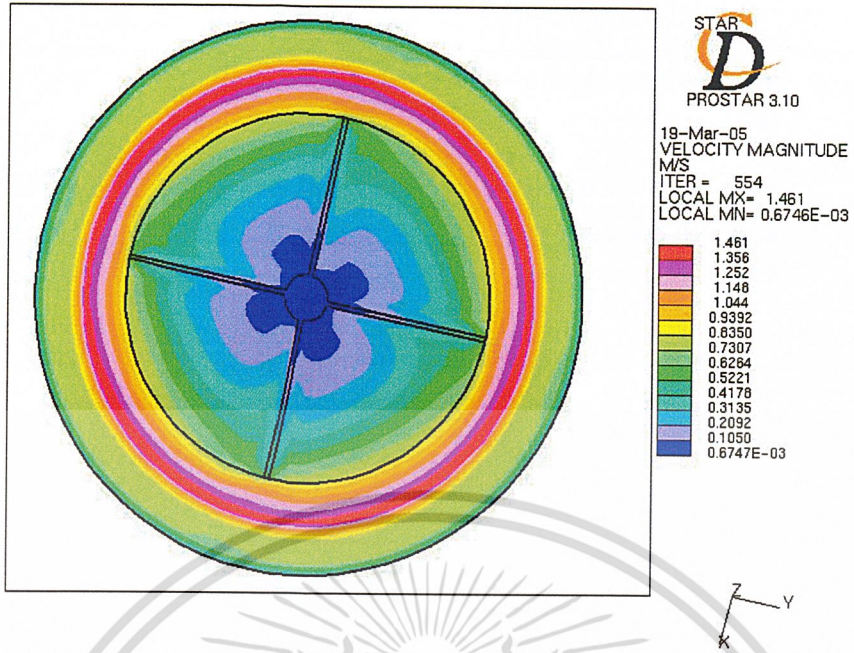


รูปที่ 4 - 12 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที
เมื่อใช้ใบกวน 90 องศา (Radial Flow)

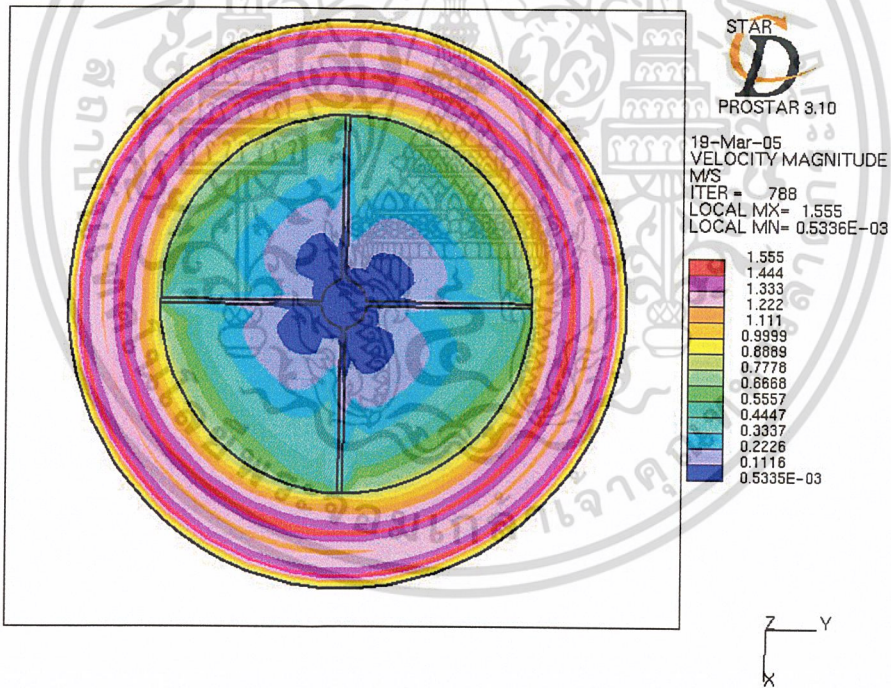


รูปที่ 4 - 13 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

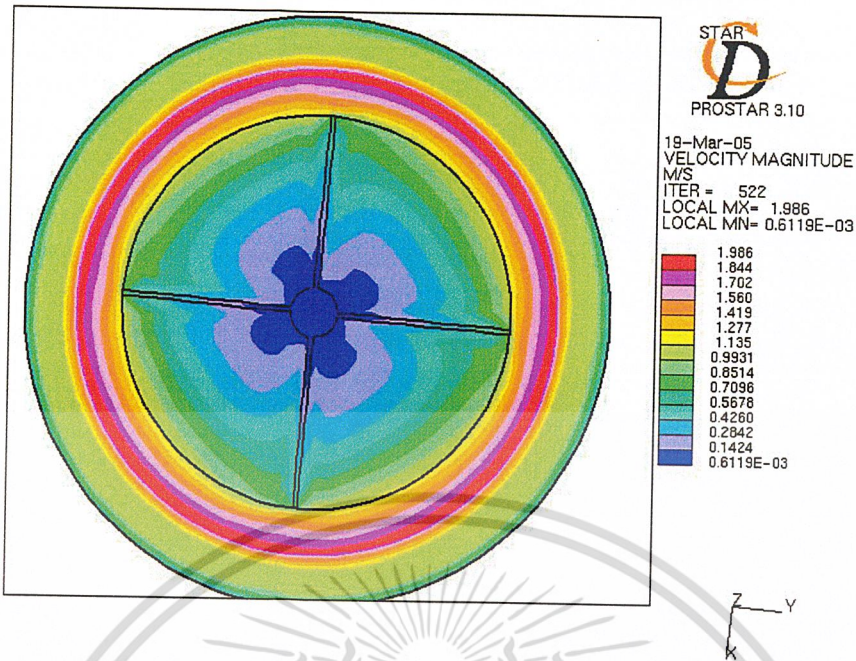


รูปที่ 4 - 14 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที

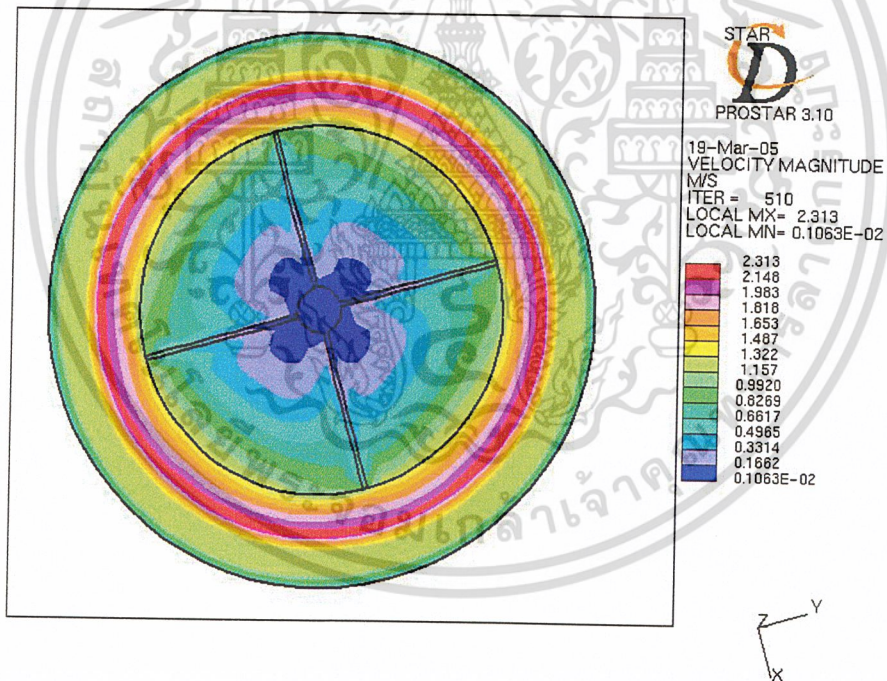


รูปที่ 4 - 15 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 16 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที



รูปที่ 4 - 17 ภาพแสดงขนาดและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที

4) สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การกระจายตัวของความเร็วที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที มีการกระจายตัวของความเร็วสม่ำเสมอ ส่วนที่ความเร็วรอบ 180, 220, 300 และ 350 รอบต่อนาที การกระจายตัวของความเร็วมีลักษณะแยกเป็นชั้นระหว่างความเร็วต่ำและความเร็วสูง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ใบกวนแบบ Axial flow และ Radial flow พบว่าใบกวนแบบ Radial flow มีการกระจายความเร็วดีกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุปผล

5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบกวนแต่ละชนิดที่ใช้ในการกวนน้ำถั่วเหลือง

- 1) จากผลการทดลองเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการคัม น้ำถั่วเหลืองพบว่าที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที (rpm) น้ำถั่วเหลืองจะเดือดเร็วที่สุดและไม่ไหม้ติดหม้อ ส่วนที่ความเร็วรอบอื่นใช้เวลาในการเดือดมากกว่าและเกิดการไหม้ติดหม้อ
- 2) จากผลการทดลองเพื่อสังเกตลักษณะการไหลและขนาดของ Vortex พบว่าขนาดของ Vortex มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆตามความเร็วรอบ โดยก้นของ Vortex เริ่มถึงใบกวนที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที (rpm) และที่ความเร็วรอบสูงกว่า 260 รอบต่อนาที (rpm) ก้นของ Vortex เริ่มสัมผัสก้นหม้อจึงเกิดการสูญเสียความร้อนถ่ายเทสู่อากาศเป็นสาเหตุให้เดือดช้า ส่วนที่ความเร็วรอบต่ำการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ ใบกวนส่วนสาเหตุที่ทำให้เกิดการไหม้ติดก้นหม้อที่ความเร็วรอบสูงเกิดจากความหนาแน่นของอากาศเพชรที่ก้นหม้อและชั้นของของเหลวบางๆที่ก้นหม้อ และที่ความเร็วรอบต่ำเกิดการไหม้ติดเพราะมีความเร็วไม่สูงพอ
- 3) จากการศึกษาการกระจายตัวของเวกเตอร์ความเร็วโดยใช้โปรแกรม Star CD จากผลที่ได้พบว่าการกระจายตัวของความเร็วที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที (rpm) ค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบ 180, 220, 300 และ 350 รอบต่อนาที (rpm) จึงเป็นการยืนยันผลการถ่ายเทความร้อนว่าน้ำถั่วเหลืองเดือดเร็วที่สุดที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที (rpm) ส่วนการใช้ใบกวนแบบ Axial flow พบว่าการกระจายความเร็วไม่สม่ำเสมอเท่าแบบ Radial flow จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนแบบ Radial flow ดีกว่า
- 4) ในการเลือกใช้ใบกวนสำหรับติดตั้งในเครื่องทำน้ำถั่วเหลืองจึงเลือกใช้ใบกวนแบบ Radial Flow เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบ Axial Flow และเลือกกวนที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาที (rpm)

5.2 ปัญหาที่พบจากการทดลอง

- 1) การวัดค่าคุณสมบัติของของเหลวเช่น ρ , C_p และ μ เป็นคณันยังต้องการเครื่องมือวัดที่ถูกต้องและเที่ยงตรงสูง ทำให้การคิดค่ากำลังของมอเตอร์แม่นยำยิ่งขึ้น
- 2) ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลาในการเตรียมงานนาน คือต้องแช่ถั่วไว้ข้าม 6 ชั่วโมง
- 3) ขนาดของถังค่อนข้างแคบ เมื่อกวนของเหลวแล้ว Vortex ยกขึ้นมาสูงบางครั้งทำให้เกิดการล้นหกเลอะ
- 4) เกิดสัญญาณรบกวนที่ไม่โครคอนโทลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) มอเตอร์บดแรงบิดไม่สูงพอ

5.3 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง

- 1) ควรหาเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆที่มีความถูกต้องเที่ยงตรงสูง
- 2) ควรทดลองด้วยใบกวนลักษณะต่างๆออกไปอีกเพื่อหาความสัมพันธ์ควรเพิ่มขนาดมอเตอร์ที่ใช้ในการบดและเพิ่มขนาดฮีตเตอร์เพื่อรันระยะเวลาในการทำงานในแต่ละรอบลง
- 3) ควรเพิ่มวงจรถดสัญญาณรบกวน
- 4) คิดครีปให้กับหม้อเพื่อลดการเกิด Vortex และเพิ่มการถ่ายเทความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

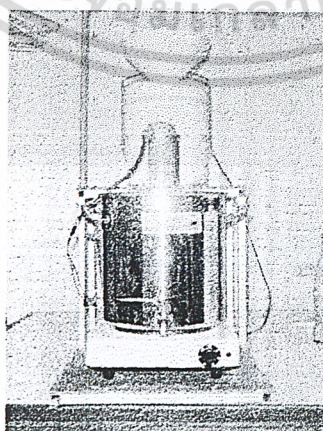
บทที่ 6

หลักการงานและแนวทางการออกแบบ

6.1 หลักการทำงานของเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง

ลำดับที่	อินพุท	กระบวนการ	เอาต์พุท
1	เสียบปลั๊กไฟ	ไฟเลี้ยงวงจรควบคุม	ไฟสีแดง (1) โช่ว (ready)
2	กดปุ่ม Start	มอเตอร์บดถั่วเหลือง, ป้อนน้ำ และพัคลมมอเตอร์ทำงาน	ไฟสีแดง (2) โช่ว (grinding)
3	Level Switch เตือนน้ำถึง 6 ลิตร	- มอเตอร์บดถั่วเหลือง, ป้อนน้ำและ พัคลมมอเตอร์หยุดทำงาน - มอเตอร์โอบกวนและฮีตเตอร์ทำงาน	ไฟสีส้ม (1) โช่ว (boiling)
4	Thermocouple วัดอุณหภูมิได้ 90°C	ฮีตเตอร์หยุดทำงาน	- ไฟสีเขียว (1) โช่ว (Finish) - แสดงอุณหภูมิ 90°C
5	กดปุ่ม Stop	- มอเตอร์โอบกวนหยุดทำงาน - เปิดก๊อกน้ำนมถั่วเหลืองออกมา รับประทาน	ไฟสีแดง (1) โช่วอีกครั้ง (Ready for further cycle)

ตารางที่ 6 - 1 แสดงหลักการงานของเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง



รูปที่ 6 - 1 รูปแสดงเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 แนวทางการออกแบบและพัฒนาเครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง

6.2.1 เครื่องบดและแยกกากถั่วเหลือง

เครื่องบดแยกกากถั่วเหลืองที่ใช้อยู่เป็นแบบที่สามารถบดและแยกกากในคราวเดียวซึ่งถูกผลิตขึ้นมาเพื่อสนองความต้องการบริโภคในครัวเรือนจึงบดได้คราวละไม่มาก ทำให้ใช้เวลานาน ซึ่งการพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อมควรเพิ่มกำลังของมอเตอร์ เช่น เลือกขนาดครึ่ง แรงม้า แต่ควรคงความเร็วรอบให้เท่าเดิมไว้เพื่อรักษาประสิทธิภาพในการสกัดแยกกาก

6.2.2 หม้อคั้นน้ำนมถั่วเหลือง

จากการทดลองพบว่าการคั้นน้ำถั่วเหลืองที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาทีจะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ ใช้เวลาในการเดือดน้อยและไม่ไหม้คั้นหม้อ แต่จากหลักการทางทฤษฎีพบว่า ถ้าติดครีบบนหม้อคั้น (Baffled) จะทำให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าแบบไม่ติดครีบบน (Unbaffled) เพื่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นควรเลือกหม้อคั้น โดยเลือกให้มีการติดครีบบนที่หม้อ

6.2.3 ชุดควบคุม

จากปัญหาที่พบในชุดควบคุมคือมีสัญญาณรบกวน (Noise) เกิดขึ้นจากเครื่องใช้ไฟฟ้า กระแสสลับ เช่น ปั้มน้ำ มอเตอร์หรือฮีตเตอร์ ทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลค่อนข้างคลาดเคลื่อน ซึ่งในที่นี้ในชุดต้นแบบได้มีการแก้ไขสัญญาณรบกวนด้วยการเขียน โปรแกรมใหม่โดยบวกค่าคลาดเคลื่อนเข้าไปใน โปรแกรม ซึ่งจะช่วยให้แก้ไขได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งถ้าต้องการขจัดปัญหาในส่วนนี้จะต้องใช้วงจรขจัดสัญญาณรบกวนซึ่งจะช่วยให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้คงที่ขึ้น

6.2.4 อุปกรณ์อื่นๆ

เพื่อความอัตโนมัติอย่างสมบูรณ์ควรเพิ่มชุดป้อนถั่วเหลืองที่ทำงานได้อย่างอัตโนมัติด้วย และเปลี่ยนมาใช้วาล์วปิด - เปิดน้ำแบบควบคุมด้วย ไฟฟ้าจะทำให้การใช้งานสะดวกขึ้น

ภาคผนวก ก

วิเคราะห์อัตราผลตอบแทนต่อปีของเครื่องและจุดคุ้มทุน

1. รายละเอียดของเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายดังนี้

1.1	ราคาเครื่อง	12,000	บาท
1.2	มูลค่าซาก	3,000	บาท
1.3	อายุการใช้งาน	5	ปี
1.4	ค่าซ่อมบำรุงเมื่อสิ้นปี		
	ปีที่ 1	500	บาท
	เพิ่มปีละ	200	บาท
1.5	เครื่องใช้งาน	5	ชม. / วัน
1.6	ใช้แรงงานในการผลิต	1	คน
1.7	กำลังทั้งหมดที่เครื่องผลิตน้ำแก้วเหลืองใช้	1	คน
1.8	ราคาขายน้ำแก้วเหลือง	3	บาท/ถุง
	1 ลิตร มี	4	ถุง
1.9	ผลิตน้ำแก้วเหลือง	30	ลิตร/วัน
1.10	จำนวนวันผลิต	365	วัน/ปี
1.11	ใช้ถั่วเหลือง	3.75	ก.ก. / วัน
	ราคา	20	บาท / ก.ก.
1.12	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	2	บาท / หน่วย
1.13	ค่าแรงงาน	20	บาท / ชม.
1.14	ใช้น้ำตาล	2.5	ก.ก./วัน
	กิโลกรัมละ	15	บาท

2. ต้นทุนคงที่ (ค่าเสื่อมแบบทวนจม)

$$\text{ค่าเสื่อมราคา} + \text{ดอกเบี้ย} = P(A/P, i\%, n) - L(A/F, i\%, n)$$

จากตารางที่ ก - 1 อัตราดอกเบี้ย 10 % ที่ $n = 5$ จะได้ค่า ;

$$A/P = 0.26380$$

$$A/F = 0.16380$$

$$\begin{aligned} \therefore P(A/P, i\%, n) - L(A/F, i\%, n) &= (12,000 \times 0.26380) - (2,000 \times 0.16380) \\ &= 2,838 \quad \text{บาท/ปี} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ต้นทุนแปรผัน

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าซ่อมบำรุงต่อปี} &= 500 + 200 (A/G, 10\%, 5) \\
 \text{จากตารางที่ ก-2 ได้ } (A/G, 10\%, 5) &= 1.81; \\
 &= 500 + (200 \times 1.81) \\
 &= 862 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ค่าแรงในการผลิต} &= (20 \text{ บาท/hr})(5 \text{ hr/วัน})(365 \text{ วัน/ปี}) \\
 &= 21,900 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= (2 \text{ kW})(3 \text{ hr/วัน})(2 \text{ บาท/kW} \cdot \text{hr})(365 \text{ วัน/ปี}) \\
 &= 2,288 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ค่าถั่วเหลือง} &= (3.75 \text{ kg/วัน})(365 \text{ วัน/ปี})(20 \text{ บาท/kg}) \\
 &= 27,375 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ค่าน้ำตาล} &= (2.5 \text{ kg/วัน})(15 \text{ บาท/kg})(365 \text{ วัน/ปี}) \\
 &= 13,688 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ต้นทุนแปรผันรวม} &= 85,725 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ต้นทุนทั้งหมด} &= 2,838 + 85,725 \\
 &= 88,563 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{รายได้จากการขาย} &= (3 \text{ บาท/ถุง})(4 \text{ ถุง/ลิตร})(30 \text{ ลิตร/วัน})(365 \text{ วัน/ปี}) \\
 &= 131,400 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{กำไรสุทธิ} &= 131,400 - 88,563 \\
 &= 42,837 \text{ บาท/ปี} \\
 \therefore \text{อัตราผลตอบแทนต่อปี} &= \frac{\text{กำไรสุทธิ} \times 100}{\text{เงินลงทุนทั้งหมด}} \\
 &= \frac{42837 \times 100}{88563} \% \\
 &= 48.36 \%
 \end{aligned}$$

4. เปรียบเทียบจุดคุ้มทุน (BEP : Break Event Point)

$$\begin{aligned}
 \text{ให้ } N &= \text{จำนวนวันที่ใช้ในการผลิต (วัน/ปี)} \\
 \text{4.1 กรณีใช้เครื่องผลิต} \\
 \text{ต้นทุนคงที่} &= 2,838 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ต้นทุนแปรผัน ได้แก่} \\
 \text{ค่าซ่อมบำรุง} &= 862 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ค่าแรงการผลิต} &= (20)(5)(N) = 100N \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= (2)(5)(2)(N) = 20N \text{ บาท/ปี} \\
 \text{ค่าถั่วเหลือง} &= 27,375 \text{ บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าน้ำตาล} &= 13,688 \quad \text{บาท/ปี} \\
 \text{ต้นทุนแปรผันรวม} &= 862 + 100N + 20N + 27,375 + 13,688 \\
 &= 120N + 41,925 \quad \text{บาท/ปี} \\
 \text{ต้นทุนทั้งหมด} &= 2,838 + 120N + 41,925 \\
 &= 120N + 44,763 \quad \text{บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

4.2 กรณีใช้คนผลิต

4.2.1 ใช้แรงงานในการผลิต	1	คน
4.2.2 ใช้เวลาผลิต	7	hr/วัน
4.2.3 ใช้เวลาการขาย	3	hr/วัน
ต้นทุนแปรผัน		

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าแรงการผลิต} &= (20)(7)(N) = 140N \quad \text{บาท/ปี} \\
 \text{ค่าตัวเหลือง} &= 27,375 \quad \text{บาท/ปี} \\
 \text{ค่าน้ำตาล} &= 13,688 \quad \text{บาท/ปี} \\
 \text{ต้นทุนทั้งหมด} &= 140N + 41,063 \quad \text{บาท/ปี} \\
 \text{BEP (เครื่อง)} &= \text{BEP (คน)} \\
 120N + 44,763 &= 140N + 41,063 \\
 3,700 &= 20N \\
 N &= 185 \quad \text{วัน/ปี}
 \end{aligned}$$

∴ ถ้าทำการขายมากกว่า 185 วัน ควรเลือกใช้เครื่องผลิตน้ำนมตัวเหลือง

5. ข้อสรุปเกี่ยวกับเครื่องทำน้ำตัวเหลือง

- (1) สามารถช่วยผ่อนแรงได้
- (2) ประหยัดเวลาในการผลิต
- (3) สะดวกในการใช้งานและทำความสะอาด
- (4) จุดคุ้มทุนใช้ระยะเวลา 185 วัน

อัตราดอกเบี้ย 10 %

n	ระบบจ่ายทีละงวด		ระบบจ่ายเป็นอนุกรม				n
	Compound Amount Factor CAF	Present Worth Factor PWF	Sinking Fund Factor SFF	Capital Recovery Factor CRF	Compound Amount Factor SCAF	Present Worth Factor SPWF	
1	1.1000	0.9091	1.000 00	1.100 00	1.000	0.909	1
2	1.2100	0.8264	0.476 19	0.576 19	2.100	1.736	2
3	1.3310	0.7513	0.302 11	0.402 11	3.310	2.487	3
4	1.4641	0.6830	0.215 47	0.315 47	4.641	3.170	4
5	1.6105	0.6209	0.163 80	0.263 80	6.105	3.791	5
6	1.7716	0.5645	0.129 61	0.229 61	7.716	4.355	6
7	1.9487	0.5132	0.105 41	0.205 41	9.487	4.868	7
8	2.1436	0.4665	0.087 44	0.187 44	11.436	5.335	8
9	2.3579	0.4241	0.073 64	0.173 64	13.579	5.759	9
10	2.5937	0.3855	0.062 75	0.162 75	15.937	6.144	10
11	2.8531	0.3505	0.053 96	0.153 96	18.531	6.495	11
12	3.1384	0.3186	0.046 76	0.146 76	21.384	6.814	12
13	3.4523	0.2897	0.040 78	0.140 78	24.523	7.103	13
14	3.7975	0.2633	0.035 75	0.135 75	27.975	7.367	14
15	4.1772	0.2394	0.031 47	0.131 47	31.772	7.606	15
16	4.5950	0.2176	0.027 82	0.127 82	35.950	7.824	16
17	5.0545	0.1978	0.024 66	0.124 66	40.545	8.022	17
18	5.5599	0.1799	0.021 93	0.121 93	45.599	8.201	18
19	6.1159	0.1635	0.019 55	0.119 55	51.159	8.365	19
20	6.7275	0.1486	0.017 46	0.117 46	57.275	8.514	20
21	7.4002	0.1351	0.015 62	0.115 62	64.002	8.649	21
22	8.1403	0.1228	0.014 01	0.114 01	71.403	8.772	22
23	8.9543	0.1117	0.012 57	0.112 57	79.543	8.883	23
24	9.8497	0.1015	0.011 30	0.111 30	88.497	8.985	24
25	10.8347	0.0923	0.010 17	0.110 17	98.347	9.077	25
26	11.9182	0.0839	0.009 16	0.109 16	109.182	9.161	26
27	13.1100	0.0763	0.008 26	0.108 26	121.100	9.237	27
28	14.4210	0.0693	0.007 45	0.107 45	134.210	9.307	28
29	15.8631	0.0630	0.006 73	0.106 73	148.631	9.370	29
30	17.4494	0.0573	0.006 08	0.106 08	164.494	9.427	30
31	19.1943	0.0521	0.005 50	0.105 50	181.943	9.479	31
32	21.1138	0.0474	0.004 97	0.104 97	201.138	9.526	32
33	23.2252	0.0431	0.004 50	0.104 50	222.252	9.569	33
34	25.5477	0.0391	0.004 07	0.104 07	245.477	9.609	34
35	28.1024	0.0356	0.003 69	0.103 69	271.024	9.644	35
40	45.2593	0.0221	0.002 26	0.102 26	442.593	9.779	40
45	72.8905	0.0137	0.001 39	0.101 39	718.905	9.863	45
50	117.3909	0.0085	0.000 86	0.100 86	1 163.909	9.915	50
55	189.0591	0.0053	0.000 53	0.100 53	1 880.591	9.947	55
60	304.4816	0.0033	0.000 33	0.100 33	3 034.816	9.967	60
65	490.3707	0.0020	0.000 20	0.100 20	4 893.707	9.980	65
70	789.7470	0.0013	0.000 13	0.100 13	7 887.470	9.987	70
75	1 271.8952	0.0008	0.000 08	0.100 08	12 708.954	9.992	75
80	2 048.4002	0.0005	0.000 05	0.100 05	20 474.002	9.995	80
85	3 298.9690	0.0003	0.000 03	0.100 03	32 979.690	9.997	85
90	5 313.0226	0.0002	0.000 02	0.100 02	53 120.226	9.998	90
95	8 556.6760	0.0001	0.000 01	0.100 01	85 556.760	9.999	95
100	13 780.6123	0.0001	0.000 01	0.100 01	137 796.123	9.999	100

ตารางที่ ก - 1 ตารางแสดงค่า A/F และ A/P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gradient to Uniform Series Conversion Factor (GUSF)

n	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	10%	n
2	0.50	0.50	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48	2
3	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	3
4	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.40	1.38	4
5	1.98	1.96	1.94	1.92	1.90	1.88	1.86	1.85	1.81	5
6	2.47	2.44	2.41	2.39	2.36	2.33	2.30	2.28	2.22	6
7	2.96	2.92	2.88	2.84	2.81	2.77	2.73	2.69	2.62	7
8	3.45	3.40	3.34	3.29	3.24	3.20	3.15	3.10	3.00	8
9	3.93	3.87	3.80	3.74	3.68	3.61	3.55	3.49	3.37	9
10	4.42	4.34	4.26	4.18	4.10	4.02	3.95	3.87	3.73	10
11	4.90	4.80	4.70	4.61	4.51	4.42	4.33	4.24	4.06	11
12	5.38	5.26	5.15	5.03	4.92	4.81	4.70	4.60	4.39	12
13	5.86	5.72	5.59	5.45	5.32	5.19	5.06	4.94	4.70	13
14	6.34	6.18	6.02	5.87	5.71	5.56	5.42	5.27	5.00	14
15	6.81	6.63	6.45	6.27	6.10	5.93	5.76	5.59	5.28	15
16	7.29	7.08	6.87	6.67	6.47	6.28	6.09	5.90	5.55	16
17	7.76	7.52	7.29	7.07	6.84	6.62	6.41	6.20	5.81	17
18	8.23	7.97	7.71	7.45	7.20	6.96	6.72	6.49	6.05	18
19	8.70	8.41	8.12	7.83	7.56	7.29	7.02	6.77	6.29	19
20	9.17	8.84	8.52	8.21	7.90	7.61	7.32	7.04	6.51	20
21	9.63	9.28	8.92	8.58	8.24	7.92	7.60	7.29	6.72	21
22	10.10	9.70	9.32	8.94	8.57	8.22	7.87	7.54	6.92	22
23	10.56	10.13	9.71	9.30	8.90	8.51	8.14	7.78	7.11	23
24	11.02	10.55	10.10	9.65	9.21	8.80	8.39	8.01	7.29	24
25	11.48	10.97	10.48	9.99	9.52	9.07	8.64	8.23	7.46	25
26	11.94	11.39	10.85	10.33	9.83	9.34	8.88	8.44	7.62	26
27	12.39	11.80	11.23	10.66	10.12	9.60	9.11	8.64	7.77	27
28	12.85	12.21	11.59	10.99	10.41	9.86	9.33	8.83	7.91	28
29	13.30	12.62	11.96	11.31	10.69	10.10	9.54	9.01	8.05	29
30	13.75	13.02	12.31	11.63	10.97	10.34	9.75	9.19	8.18	30
31	14.20	13.42	12.67	11.94	11.24	10.57	9.95	9.36	8.30	31
32	14.65	13.82	13.02	12.24	11.50	10.80	10.14	9.52	8.41	32
33	15.10	14.22	13.36	12.54	11.76	11.02	10.32	9.67	8.52	33
34	15.54	14.61	13.70	12.83	12.01	11.23	10.50	9.82	8.61	34
35	15.98	15.00	14.04	13.12	12.25	11.43	10.67	9.96	8.71	35
40	18.18	16.89	15.65	14.48	13.38	12.36	11.42	10.57	9.10	40
45	20.33	18.70	17.16	15.70	14.36	13.14	12.04	11.04	9.37	45
50	22.44	20.44	18.56	16.81	15.22	13.80	12.53	11.41	9.57	50
60	26.53	23.70	21.07	18.70	16.61	14.79	13.23	11.90	9.80	60
70	30.47	26.66	23.21	20.20	17.62	15.46	13.67	12.18	9.91	70
80	34.25	29.36	25.04	21.37	18.35	15.90	13.93	12.33	9.96	80
90	37.87	31.79	26.57	22.28	18.87	16.19	14.08	12.41	9.98	90
100	41.34	33.99	27.84	22.98	19.23	16.37	14.17	12.45	9.99	100

ตารางที่ ก - 2 ตารางแสดงค่า A/G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ทฤษฎีเพิ่มเติมทางไฟฟ้า

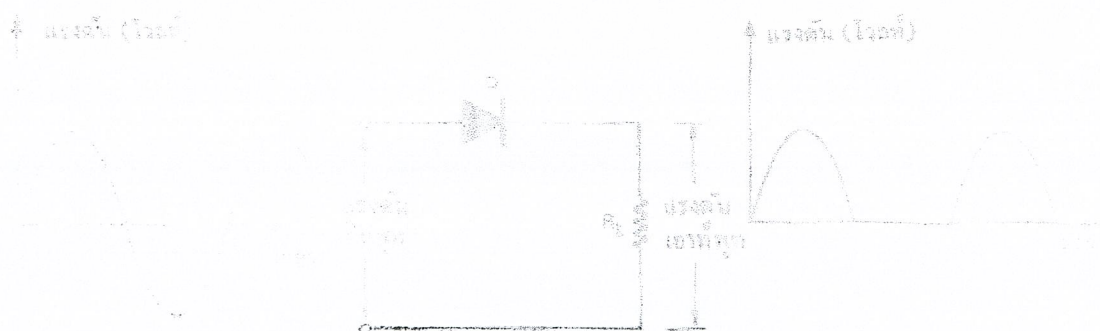
1. การแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง

การแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงจะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า ไดโอด โดยไดโอดประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิดมาต่อกันคือ สารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N

- สารกึ่งตัวนำชนิด N มีคุณสมบัติที่มีอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนมาก นั่นคือมีพาหะข้างมากเป็นลบ มีระดับพลังงานสูงดังนั้นเมื่อรับพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้
- สารกึ่งตัวนำชนิด P มีลักษณะที่อะตอมมีช่องว่างระหว่างกันมาก เรียกว่า โฮล ซึ่งถ้าอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ๆ โฮล ได้รับความพลังงานเพียงเล็กน้อยก็สามารถมารวมตัวกับโฮลได้ โดยสารกึ่งตัวนำชนิด P มีพาหะข้างมากเป็นบวก

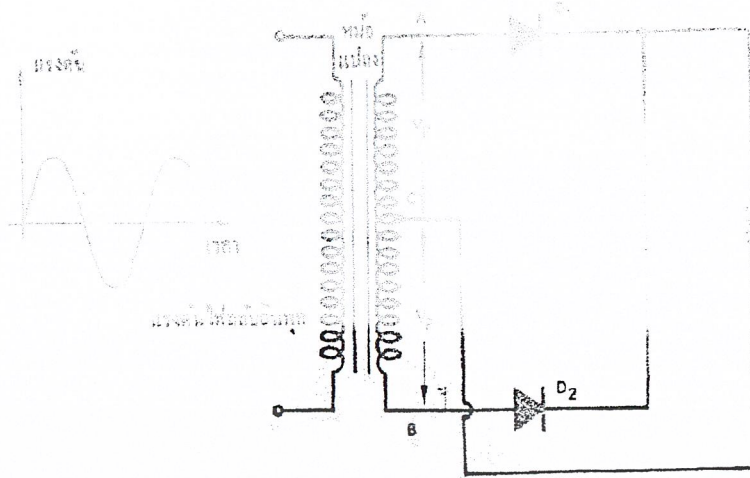
เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิด P มาต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่รอยต่อจะกั้นไม่ให้พาหะลบไปรวมกับพาหะบวกเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า ไดโอด เมื่อต่อขั้วบวกเข้าด้าน P และขั้วลบเข้าด้าน N การเคลื่อนที่ของกระแสเป็นแบบไปแอสตรงซึ่งอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าด้าน N ทำให้พลังงานสูงอิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮลได้ แต่ถ้าต่อขั้วลบเข้าด้าน P และต่อขั้วบวกเข้าด้าน N จะทำให้อิเล็กตรอนไหลเข้าด้าน P เรียกไปแอสกลับ อิเล็กตรอนที่ไหลเข้าด้าน P จะไปดันอิเล็กตรอนในด้าน N ให้ออกห่างจากรอยต่อมากขึ้นทำให้กระแสไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อได้แต่ก็ยังมีพาหะบวกเคลื่อนที่จำนวนเล็กน้อยที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปรวมกับอิเล็กตรอนฝั่ง N ได้เรียกกระแสรั่วไหล แต่ก็ถือได้ว่าเป็นจำนวนน้อยมาก

จากคุณสมบัติของ ไดโอดที่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียวนั้น จึงได้มีการนำไดโอดมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงดังรูป

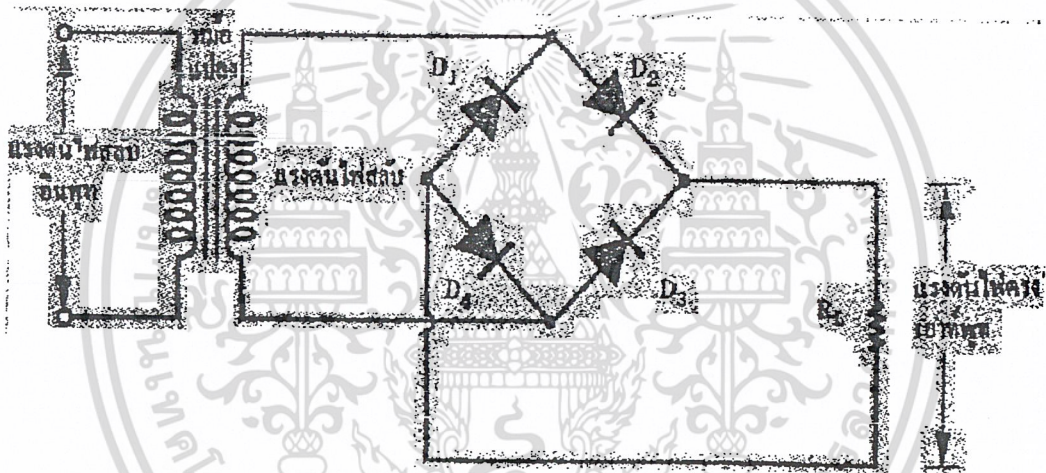


รูปที่ ข - 1 ภาพแสดงวงจร Half Wave Rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข - 2 ภาพแสดงวงจร Full Wave Rectifier



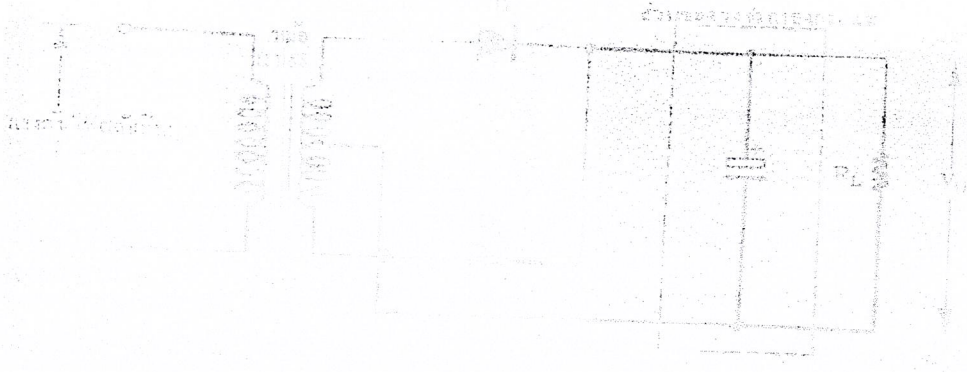
รูปที่ ข - 3 ภาพแสดงวงจร Bridge Rectifier

โดยกระแสที่ได้หลังจากการแปลงจะมีลักษณะเป็นคลื่นครึ่งลูก (Half Wave) จึงต้องมีการกรองกระแสให้ได้กระแสดรงที่เรียบขึ้นซึ่งวงจรกรองกระแสมีหลายแบบดังนี้

1) วงจรกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ

วงจรกรองแรงดันแบบนี้ประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่อเชื่อมคร่อมเอาต์พุต ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เก็บประจุไว้ในตัวมัน ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าสูงสุดด้วย เมื่อแรงดันเอาต์พุตลดลงมาเป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ช่วยจ่ายประจุให้ไหลลด ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งแรงดันเอาต์พุตของ Rectifier มีค่ามากกว่า ก็ประจุเข้าไปยังตัวเก็บประจุอีกครั้งเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

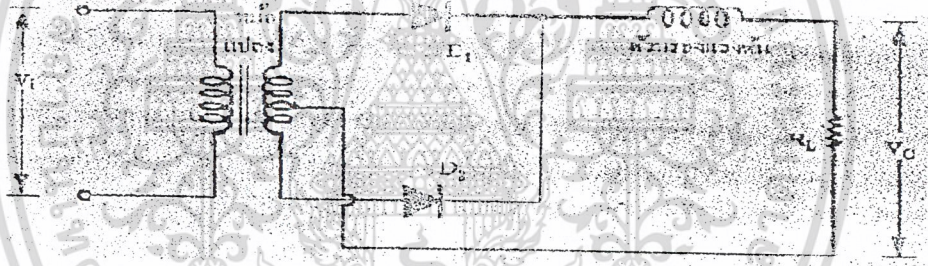
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข - 4 ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ

2) วงจรกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ

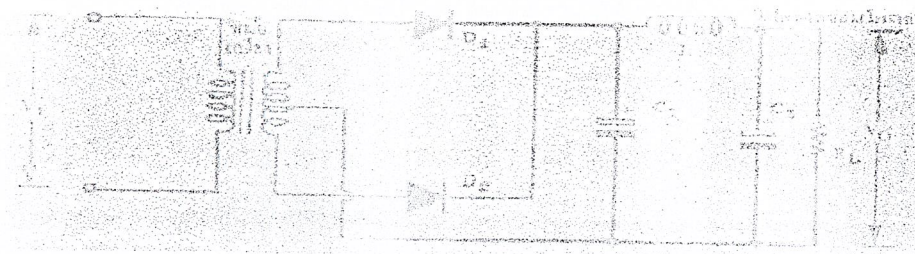
ตัวเหนี่ยวนำจะเก็บสะสมพลังงานไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในทางเพิ่มขึ้นสนามแม่เหล็กก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่จะเพิ่มอย่างช้าๆเมื่อกระแสในวงจรลดลงพลังงานส่วนนี้จะคายออกมาเป็นการเพิ่มกระแสภายในตัว



รูปที่ ข - 5 ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ

3) วงจรกรองแรงดันแบบพาส

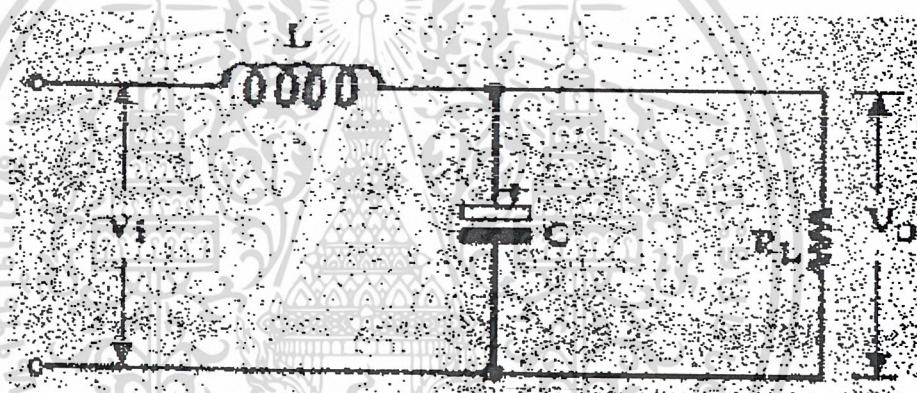
ในวงจรกรองแรงดันแบบพาสตัวเก็บประจุ C_1 ทำหน้าที่เป็นตัวกรองแรงดันเหมือนกับวงจรกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุดังที่กล่าวมาแล้ว ในขณะที่แรงดันลดลงตัวเก็บประจุ C_2 ทำหน้าที่เช่นเดียวกับตัวเก็บประจุ C_1 ส่วนตัวเหนี่ยวนำ L ทำหน้าที่กรองให้กระแสเรียบขึ้น



รูปที่ ๖ - ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันแบบพาย

4) วงจรกรองแรงดันรูปตัวแอล

ในวงจรนี้ตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแส และตัวเก็บประจุทำหน้าที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ทำให้แรงดันรีปเปิ้ลลดลงไปมาก ดังนั้นแรงดันเอาท์พุทจึงได้เป็นค่าเฉลี่ยไม่ใช่ค่าสูงสุด



รูปที่ ๗ - ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันรูปตัวแอล

5) วงจรกรองแรงดันแบบ RC

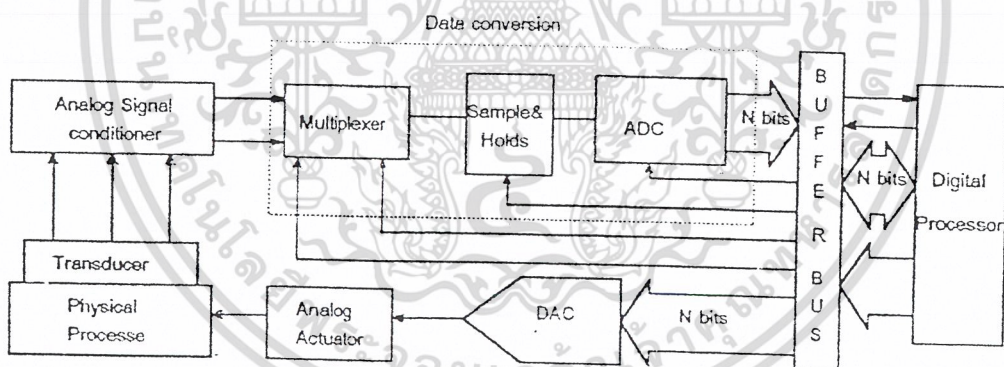
ในบางกรณีการพันลวดเป็นตัวเหนี่ยวนำมีปัญหาบางประการในเรื่องข้อยุ่งยากและการวัดค่า ดังนั้นวงจรแบบ RC จึงใช้ตัวต้านทานแทนตัวเหนี่ยวนำ ตัวต้านทานจะทำหน้าที่เพิ่มค่าคงตัวเวลาของการคายประจุบนตัวเก็บประจุ C_1 และตัวเก็บประจุ C_2 แต่มีข้อเสียคือมีกำลังสูญเสียบนตัวต้านทานเมื่อกระแสมา

รูปที่ ข - 8 ภาพแสดงวงจรกรองแรงดันแบบ RC

2. ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter)

A/D Converter หรือ ADC ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณอินพุตที่เป็นอนาลอกให้เป็นจำนวนจำกัดของดิจิทัลบิต ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปของเวิร์ดทางดิจิทัลซึ่งกลายเป็นรหัสเลขฐานสองที่แทนระดับแต่ละระดับของสัญญาณอนาลอกในขณะที่ ADC กำลังแปลงสัญญาณอยู่

ความละเอียดของ ADC จะคล้ายกับความละเอียดของ DAC อย่างมาก กล่าวคือ จำนวนบิตทางเอาต์พุตมีหลายๆบิต ความละเอียดของ ADC ตัวนั้นจะมีมากขึ้นด้วยเช่น ADC ขนาด 12 บิต ก็ความละเอียดเท่ากับ 12 เป็นต้น ดังรูปที่ ข - 9



รูปที่ ข - 9 ความละเอียดของ ADC จะแปรผันตรงกับจำนวนบิตทางเอาต์พุต

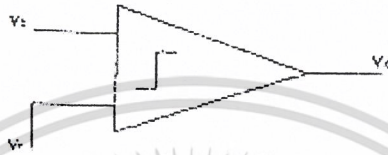
ค่าเวลาการแปรผัน (Conversion Time) เป็นเกณฑ์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของ ADC ตามที่ได้เห็นมาว่าการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลไม่ได้เกิดขึ้นโดยทันทีทันใด แต่ต้องมีการผ่านกระบวนการต่างๆด้วย เหตุผลที่ผลลัพธ์ต้องการเวลาช่วงเวลาหนึ่งที่จะทำการสุ่ม (Sample) สัญญาณอินพุตและให้สัญญาณดิจิทัลที่เป็นรหัสไบนารีออกมาที่เอาต์พุต ดังนั้นค่าเวลาการแปรผันคือ ช่วงเวลาที่ต้องการการกระทำกระบวนการให้เสร็จสิ้น ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณไมโครเซคคันสำหรับ DAC ความเร็วสูงและเป็นมิลิเซคคันสำหรับ ADC แบบธรรมดาเนื่องจากการเปลี่ยน ADC นั้นจะต้องการขบวนการชิงโครโนสตีที่แน่นอนและแม่นยำ แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาจึงต้องมีไว้ในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

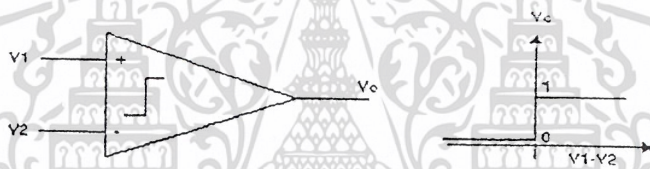
2.1 วิธีการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

1) Basic Conversion Method

วิธีการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบง่าย ๆ แสดงดังรูปที่ ข - 10 แรงดันอินพุทที่ไม่ทราบค่า V_x จะต่อเข้ากับค่าอินพุทขาหนึ่งของอนาลอกคอมพารามิเตอร์ และแรงดันอ้างอิงที่ขนาดแปรตามเวลา V_r ต่อเข้ากับค่าอินพุทอีกขาหนึ่งของคอมพารามิเตอร์ ลักษณะของทรานเฟอร์ฟังก์ชันของคอมพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ ข - 11 ถ้าแรงดันอินพุท V_1 มากกว่า V_2 แล้วแรงดันเอาต์พุทจะเป็นลอจิก 1 ถ้าอินพุท V_1 น้อยกว่า V_2 แล้วเอาต์พุทจะเป็นลอจิก 0



รูปที่ ข - 10 แสดงวิธีการพื้นฐานของ ADC



รูปที่ ข - 11 แสดงทรานเฟอร์ฟังก์ชันของคอมพารามิเตอร์

3. เซนเซอร์

เซนเซอร์วัดอุณหภูมิพื้นฐานแบ่งเป็น 2 ชนิด

3.1 Resistance - Temperature Detector (RTD)

เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของโลหะ เมื่อโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลของโลหะเกิดการสั่น ทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านในโลหะได้ง่าย นั่นคือความต้านทานของโลหะสูงขึ้น โดยปกติเราจะใช้ RTD ร่วมกับวงจร Bridge โดยมอง RTD เป็นตัวต้านทานตัวหนึ่ง เมื่อจ่ายกระแสเข้าวงจร Bridge แล้ววัดสัญญาณที่ออกมาทำให้เราสามารถหาค่าความต้านทาน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิได้

3.2 Thermister

เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการคล้าย RTD แต่ตัวกลางที่ใช้คือสารกึ่งตัวนำ มีคุณสมบัติคือเมื่ออุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำสูงขึ้นจะทำให้ห่อสมรรถนะมีพลังงานสูงขึ้นจนกระทั่งสามารถทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนข้ามช่องพลังงานจนสามารถนำไฟฟ้าได้ นั่นคือความต้านทานลดลง โดยมักใช้ร่วมกับวงจร Bridge เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

ในปี 1821, T. J. Seebeck ค้นพบว่าเมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างขั้วต่อของโลหะสองชนิดที่ต่างกัน ต่อมาพบว่า ความจริงแล้วศักย์มาจากสองแหล่งที่ต่างกัน เกิดจากการที่ความต้านทานของโลหะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เมื่อนำโลหะที่ต่างชนิดกันมารับความร้อนก็จะทำให้การนำไฟฟ้าต่างกันและเมื่อนำโลหะทั้งสองชนิดนั้นมาต่อกันเป็นวงรอบ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า จากสูตร

$$e = \int (Q_A - Q_B) dT$$

ซึ่งจากสูตรจะพบว่าถ้าใช้โลหะชนิดเดียวกันจะทำให้ $Q_A = Q_B$ จึงไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซีเบค

ในทางตรงกันข้ามถ้าจ่ายกระแสเข้าวงรอบของโลหะต่างชนิดกันนี้จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งนั่นคือเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่จุดปลายของโลหะทั้งสองข้างเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เพลเทียร์



รูปที่ ข - 12 พื้นฐานเบื้องต้นของวงจรเทอร์โมคัปเปิล

ถ้าต่อวงจรของเทอร์โมคัปเปิล, ดังรูปที่ ข - 12 จำเป็นต้องมีตัวนำอย่างน้อยสองเส้น เป็นผลให้เกิดสองขั้วต่อ p และ q ถ้าไม่คำนึงถึง Thomson effect แรงเคลื่อนไฟฟ้ารวม (Net emf) จะเป็นผลแตกต่างจาก Peltier emfs ที่ขั้วต่อทั้งสอง ถ้าอุณหภูมิ T_1 และ T_2 เท่ากัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองจะเท่ากันแต่ตรงกันข้ามทำให้ไม่มีกระแสไหล อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิต่างกันแรงเคลื่อนไฟฟ้าย่อมไม่สมดุล กระแสจะไหล แรงเคลื่อนไฟฟ้ารวม เป็นฟังก์ชันของวัสดุที่ใช้ต่อวงจร และ อุณหภูมิ ของขั้วต่อทั้งสอง อย่างไรก็ตามค่าความสัมพันธ์จริงหาได้จากห้องทดลอง (Empirical) และข้อมูลอุณหภูมิ-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ต้องใช้จากฐานการทดลองนี้ จากความจริงที่สำคัญที่ว่าเป็นผลที่เกิดขึ้นซ้ำเหมือนเดิมทำให้สามารถใช้เป็นวิธีวัดอุณหภูมิที่ไว้วางใจได้

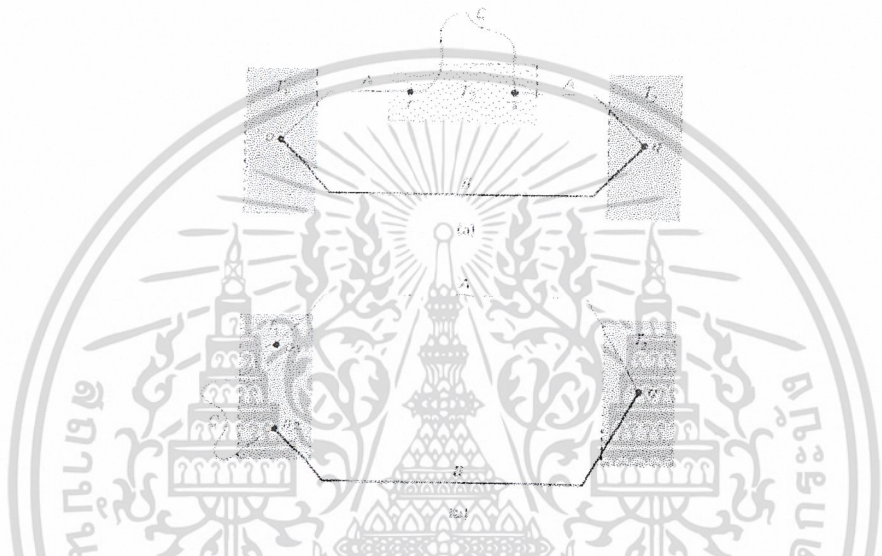
ข้อสังเกต พึงระลึกว่าจะต้องมีขั้วต่อ 2 ขั้ว เสมอ โดยปรกติขั้วหนึ่งใช้ตรวจวัดอุณหภูมิที่ต้องการทราบ นิยมเรียกว่า ขั้วร้อน (Hot หรือ Measuring Junction) ขั้วที่สองถูกตรึงไว้ที่ อุณหภูมิที่ทราบค่า นิยมเรียกว่า ขั้วเย็น (Cold หรือ Reference Junction)

4.1 กฎประยุกต์ของเทอร์โมคัปเปิล (Application Laws for Thermocouples)

นอกจาก Seebeck effect แล้วยังมีบางกฎที่วงจรความร้อนไฟฟ้า (Thermoelectric Circuits) ยึดถือตาม ดังนี้ :

4.1.1 กฎของวัสดุคั่นกลาง (Law of Intermediate Metals)

การแทรกวัสดุโลหะอื่นคั่นกลางในวงจรเทอร์โมคัปเปิลจะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้ารวม ถ้าขั้วต่อทั้งสองที่เกิดจากโลหะที่สามนั้นมีอุณหภูมิเท่ากัน



รูปที่ ข - 13 ผังแสดงถึงกฎของวัสดุโลหะคั่นกลาง

การประยุกต์ใช้กฎนี้ ดังในส่วน (a) ของรูปที่ ข - 13 ถ้ามีโลหะที่สาม C แทรกเข้าไป และถ้าขั้วต่อใหม่ r และ s รักษาไว้ที่อุณหภูมิ T_2 ผลรวมศักดาไฟฟ้าของวงจรจะคงเดิม ลักษณะเช่นนี้ทำให้การแทรกอุปกรณ์หรือวงจรการวัดได้โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อหน้าที่การวัดอุณหภูมิของวงจรเทอร์โมคัปเปิล ในรูป (b) โลหะที่สามอาจแทรกเข้าที่ขั้ววัดหรือ ขั้วอ้างอิงก็ได้ ครอบงำที่ p_1 และ p_2 ถูกรักษาให้อยู่ที่อุณหภูมิเดียวกัน T_1 ทำให้สามารถใช้วัสดุเชื่อมต่อย่างอื่นเช่น การบัดกรีในการผลิตเทอร์โมคัปเปิล นอกจากนั้นทำให้สามารถฝัง เทอร์โมคัปเปิล ที่พื้นผิวหรือภายในวัตถุทั้งที่เป็นตัวนำและไม่ใช่ตัวนำได้โดยยังสามารถใช้งาน เทอร์โมคัปเปิล ได้เหมือนเดิม

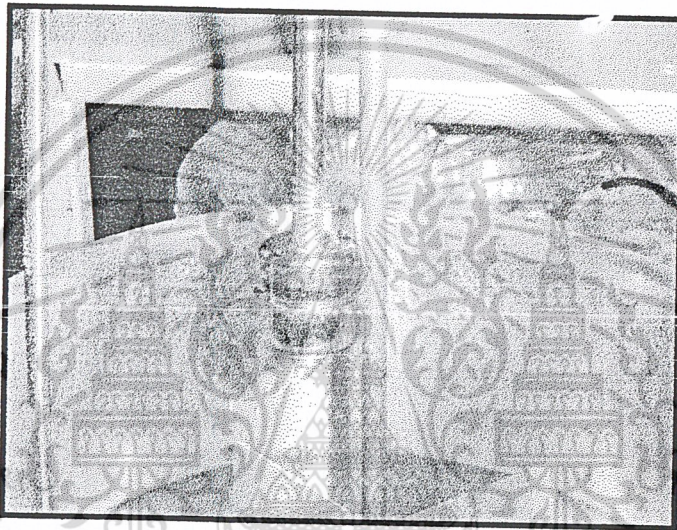
4.1.2 กฎของอุณหภูมิคั่นกลาง (Law of Intermediate Temperatures)

ถ้าวงจรเทอร์โมคัปเปิลอย่างง่าย ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e_1 เมื่อขั้วต่อทั้งสองอยู่ที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 และเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e_2 เมื่อขั้วต่อทั้งสองอยู่ที่อุณหภูมิ T_2 และ T_3 จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า $e_1 + e_2$ เมื่อขั้วต่อทั้งสองอยู่ที่อุณหภูมิ อุณหภูมิ T_1 และ T_3 .

จากกฎนี้ทำให้สามารถแก้ไขค่าขีดต่อทุกขุมที่อาจทราบค่าอุณหภูมิแต่อาจควบคุมโดยตรงไม่ได้ รวมทั้งสามารถใช้ตารางเทอร์โมคัปเปิลที่อ้างอิง อุณหภูมิมาตรฐาน (เช่น 0°C) แม้ว่าไม่มีขีดต่อใดเลยในการวัดจริงอยู่ที่ อุณหภูมิมาตรฐาน

4.1.3 สวิตช์ลากลอยควบคุมระดับของเหลว (Level Switch)

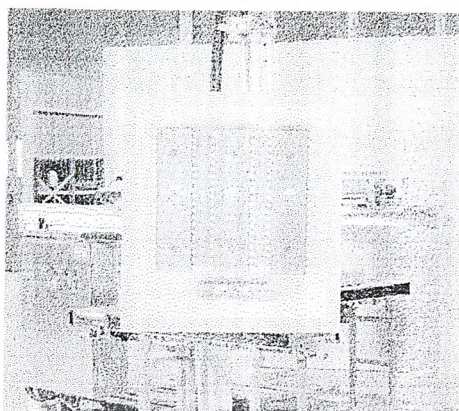
หลักการการทำงานของสวิตช์ลากลอยคือทำหน้าที่เป็นสวิตช์ปิด-เปิดในระบบไฟฟ้าแต่ปิด-เปิดโดยใช้แรงลอยตัวของของเหลวมาดันลูกลอยขึ้นลงเพื่อเปิด-ปิด ดังรูปที่ ข - 14



รูปที่ ข - 14 สวิตช์ลากลอย

5. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS 51)

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็น ไอซีชิพประเภทหนึ่งที่น่าสนใจมากๆ จากการที่ได้เรียนรู้และนำไปใช้งานจริงทำให้เกิดความประทับใจในความสามารถที่มีอยู่อย่างเหลือเฟืออีกทั้งความยืดหยุ่นในการออกแบบระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนเพิ่มลดหน้าที่ในการทำงานของระบบได้อย่างสะดวกง่ายดาย ผู้ออกแบบวงจรระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่จำเป็นต้องมีความเชี่ยวชาญในวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากนักโดยเฉพาะวงจรรอนาล็อก ซึ่งไม่ค่อยได้ใช้ในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ ข - 15 MCS-51

5.1 คุณสมบัติของ MCS-51

คุณสมบัติที่สำคัญๆ ของชิพ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีดังนี้

- ต้องการแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์เพียงชุดเดียว
- มีหน่วยความจำสำหรับ เก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานอยู่ภายใน ชิพจำนวน 4 กิโลไบต์ (เบอร์ 8031 , 8032 ไม่มีหน่วยความจำในส่วนนี้ ส่วนเบอร์ 8052 มีหน่วยความจำในส่วนนี้ 8 กิโลไบต์ และสำหรับเบอร์ 83C51FB จะมีหน่วยความจำในส่วนนี้รวมทั้งสิ้น 16 กิโลไบต์)
- มีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลทั่วไป (RAM) อยู่ภายในชิพจำนวน 128 ไบต์ (ใน 8031 , 8051) หรือ 256 ไบต์ (ในเบอร์ 8032 , 8052)
- สามารถใช้หน่วยความจำสำหรับโปรแกรมและข้อมูลที่อยู่ภายนอกชิพได้อย่างละ 64 กิโลไบต์ แยกจากกัน
- คำสั่งส่วนใหญ่ใช้เวลาทำงานเพียง 1 ไมโครวินาที เมื่อใช้คริสตอลความถี่ 12 เมกะเฮิรตซ์
- มีพอร์ตที่สามารถรับหรือส่งข้อมูลได้ทั้ง 2 ทิศทาง จำนวน 4 พอร์ต พอร์ตละ 8 บิต หรือสามารถใช้งานเป็นพอร์ตขนาด 1 บิต ใช้งานรวมทั้งสิ้น 32 พอร์ต
- รับและส่งข้อมูลแบบอนุกรมได้ในตัว โดยสามารถกำหนดอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล (Bad rate) ได้ตั้งแต่ 300 ถึง 375 กิโลบิตต่อวินาที
- จัดลำดับความสำคัญของสัญญาณอินเทอร์รัพต์ได้ 2 ระดับ
- มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานเป็น ไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์เพื่อบันทึกจำนวนสัญญาณนาฬิกาภายในชิพ หรือนับการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณภายนอกขนาด 16 บิต จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้สำหรับนับจำนวนพัลส์ วัดความกว้างของพัลส์หรือใช้วัดช่วงเวลา (ในเบอร์ 8052 จะมี 3 ตัว)
- หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในบางส่วน สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทั้งระดับ ไบต์และระดับบิต เพื่อให้การออกแบบโปรแกรมและการควบคุมระบบทำงานได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีคำสั่งคูณและหารเลขขนาด 8 บิตในตัวเอง
- สามารถประมวลผลแบบบูลีนเพื่อใช้ในงานควบคุม โดยเฉพาะ
- ใช้โปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-48 (Upwardly Compatible) ได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ที่จัดว่าเป็นเบอร์พื้นฐานในตระกูลนี้คือเบอร์ 8051, 8751 และ 8031 ซึ่งมีจำนวนขาภายนอก 40 ขาเท่ากัน ใช้เวลาและสัญญาณในการปฏิบัติคำสั่งแต่ละคำสั่งเท่ากัน (มีไทม์มิ่งไดอะแกรมเหมือนกัน) ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน สิ่งที่แตกต่างกันในระหว่างเบอร์ทั้งสามคือ ขนาดของหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิพ (On Chip Program on Memory) ซึ่งมีไว้เพื่อตอบสนองความต้องการที่ไม่เหมือนกัน ดังจะกล่าวต่อไป

- เบอร์ 8751

มีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิพเป็น EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) ขนาด 4 กิโลไบต์ ทำให้สามารถใช้รังสีอัลตราไวโอเลตในการลบโปรแกรมเก่าที่มีอยู่ และบรรจุโปรแกรมใหม่ลงไปได้ทันที ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการแก้ไขหรือปรับปรุงโปรแกรม ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เบอร์ 8751 มีไว้ใช้งานที่เป็นการพัฒนาเบื้องต้น (Prototyping) ซึ่งจำเป็นต้องทดสอบโปรแกรมเพื่อหาข้อผิดพลาด (Bugs) และแก้ไขให้เรียบร้อยก่อนทำการผลิตจริง การแก้ไขโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตและการบรรจุโปรแกรมที่แก้ไขใหม่สามารถทำได้ในจำนวนครั้งที่จำกัด ทั้งนี้เพราะหน่วยความจำที่เป็น EPROM เมื่อใช้ไปนานจะเกิดการเสื่อมสภาพทำให้ไม่สามารถบรรจุโปรแกรมเข้าไปได้

- เบอร์ 8051

หลังจากการทดสอบโปรแกรมจนไม่พบข้อผิดพลาดแล้ว จะเป็นช่วงของการผลิตจริง ซึ่งต้องพิจารณาถึงต้นทุนเป็นอันดับแรก ในการผลิตจริงจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8051 ซึ่งมีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในเป็น ROM (Read Only Memory) ขนาด 4 กิโลไบต์ แทน เพราะราคาต่ำกว่ามาก แต่มีข้อจำกัดตรงที่ไม่สามารถแก้ไขโปรแกรมที่ได้บรรจุไปแล้วไม่ว่าจะด้วยวิธีการใดก็ตาม

- เบอร์ 8031

เบอร์นี้ไม่มีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมในชิพ แต่สามารถใช้หน่วยความจำเพื่อเก็บโปรแกรมที่อยู่ภายนอกได้มากถึง 64 กิโลไบต์ ซึ่งอาจใช้เป็น ROM , PROM , EPROM ตามความต้องการของผู้ผลิต เบอร์ 8031 นี้มีไว้ใช้ในกรณีที่โปรแกรมมีขนาดเล็กกว่า 4 กิโลไบต์ หรือมากกว่า 4 กิโลไบต์

(เบอร์ 8071 และ 8051 จะใช้โปรแกรมจากหน่วยความจำภายนอกได้เองเมื่อโปรแกรมมีความยาวเกิน 4 กิโลไบต์ หรืออาจบังคับให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสองเบอร์ใช้โปรแกรมจากหน่วยความจำภายนอกเพียงอย่างเดียวด้วยการต่อขา 31 (EA) ลงกราวด์ ทำให้มีคุณสมบัติเหมือน 8031 ที่ไม่มีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิพ)

5.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์

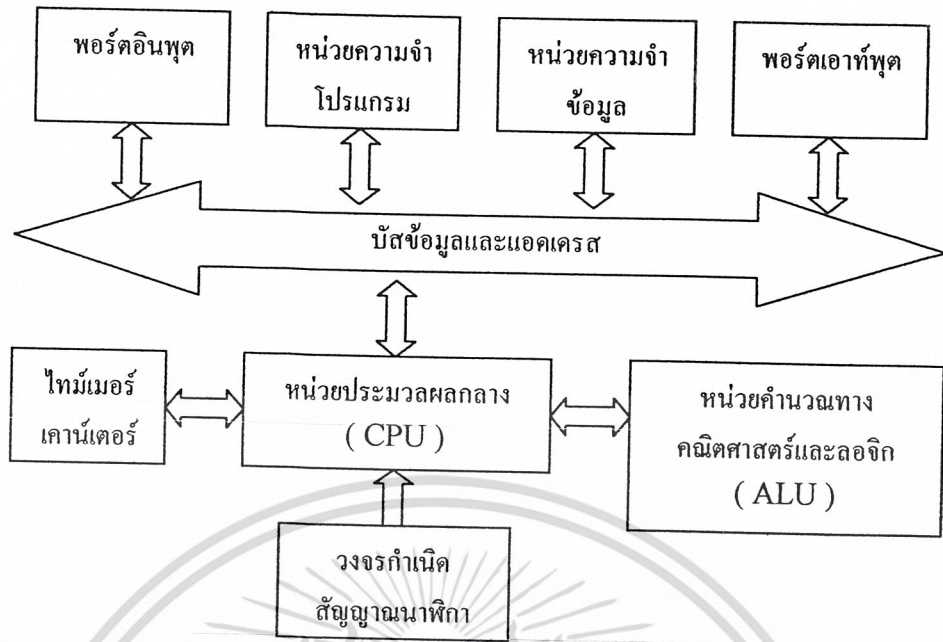
ไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละรุ่น ของบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายส่วนใหญ่มีโครงสร้างหลักเหมือนกัน คือ โครงสร้างภายนอกมีขาต่างๆ หลายขา รูปที่ ข - 16 แสดงภาพขาต่างๆของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 89C4051 ของ ATMEL อธิบายความหมายและหน้าที่ใช้งานได้ดังนี้

- ขารับแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจร (ขา VCC และขา GND)
- ขารับสัญญาณนาฬิกาสำหรับเป็นตัวกำหนดจังหวะการทำงาน (XTAL₁ และ XTAL₂)
- ขาสัญญาณอินพุต/เอาต์พุต (ขาที่นำหน้าด้วยตัวอักษร P และตามด้วยตัวเลข) ส่วนใหญ่สามารถเป็นได้ทั้งขาอินพุตและเอาต์พุตขึ้นอยู่กับการกำหนดในโปรแกรม
- ขารับสัญญาณรีเซต (RST) เพื่อกำหนดให้ระบบกลับไปเริ่มต้นทำงานใหม่ที่บรรทัดคำสั่งแรก
- ขาควบคุมการทำงานอื่นๆของระบบ ได้แก่ ขา ~EA ขา ALE และขา ~PSEN เพื่อใช้ติดต่อกับวงจรต่อพ่วงภายนอกไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้แก่หน่วยความ RAM แบบภายนอก หรือ ไอซีขยายพอร์ต 8255 เป็นต้น

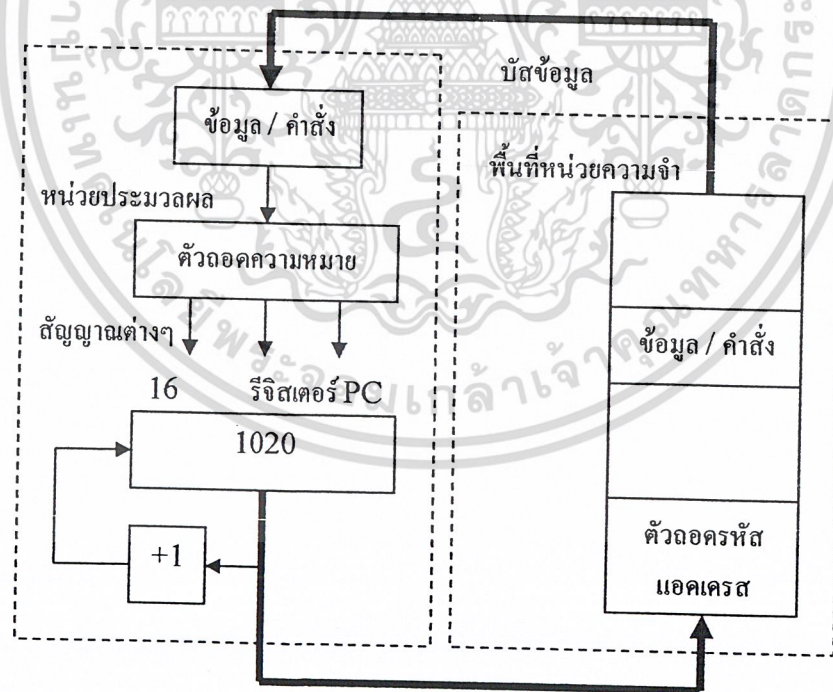
PDIP/Cerdip

(T2)	P1.0	1	40	VCC
(T2 EX)	P1.1	2	39	P0.0 (AD0)
	P1.2	3	38	P0.1 (AD1)
	P1.3	4	37	P0.2 (AD2)
(ES)	P1.4	5	36	P0.3 (AD3)
(MOSI)	P1.5	6	35	P0.4 (AD4)
(MISO)	P1.6	7	34	P0.5 (AD5)
(SCK)	P1.7	8	33	P0.6 (AD6)
	RST	9	32	P0.7 (AD7)
(RXD)	P3.0	10	31	EA/VPP
(TXD)	P3.1	11	30	ALE/PROG
(INT0)	P3.2	12	29	PSEN
(INT1)	P3.3	13	28	P2.7 (A15)
(T0)	P3.4	14	27	P2.6 (A14)
(T1)	P3.5	15	26	P2.5 (A13)
(WR)	P3.6	16	25	P2.4 (A12)
(RD)	P3.7	17	24	P2.3 (A11)
	XTAL2	18	23	P2.2 (A10)
	XTAL1	19	22	P2.1 (A9)
	GND	20	21	P2.0 (A8)

รูปที่ ข - 16 ภาพแสดงขาต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 89C4051 ของ ATMEL



รูปที่ ข - 17 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

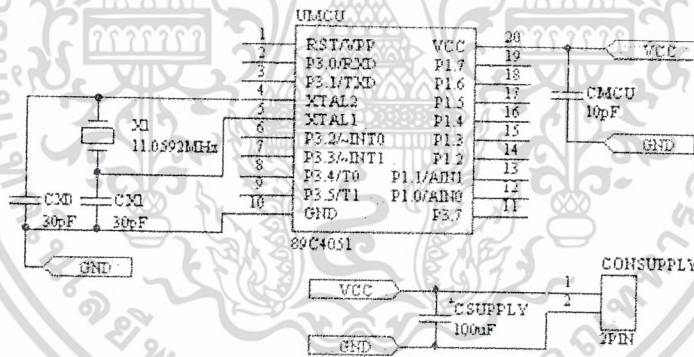


รูปที่ ข - 18 ขั้นตอนการทำงานของหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโครงสร้างภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้ดูรูปที่ ข - 17 ประกอบด้วยหน่วยย่อยหลายหน่วย ทำหน้าที่ต่างๆ โดยการสั่งการมาจากหน่วยประมวลผลกลาง ไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัทผู้ผลิตแต่ละรายส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในเหมือนกัน จะมีแตกต่างไปบ้างก็เป็นเรื่องของฟังก์ชันพิเศษเพิ่มเติมหรือขีดความสามารถในการทำงานที่เพิ่มมากขึ้น เช่นมีวงจรวอร์ชค็อกไทม์เมอร์ภายในตัว มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ภายในตัว ทำงานได้เร็วขึ้น หรือมีจำนวนพอร์ตอินพุตเอาต์พุตมากขึ้น เป็นต้น

รูปที่ ข - 18 แสดงขั้นตอนในการทำงานหน่วยประมวล ผู้เขียนจะขอไม่อธิบายลึกเกินไป เนื่องจากสามารถหาอ่านได้จากหนังสือไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีวางขายตามร้านขายหนังสือทั่วไปซึ่งจะอธิบายได้ละเอียดและลึกกว่าในบทความนี้ที่ต้องการกล่าวถึงภาพโดยรวมและมุมมองในด้านอื่นมากกว่า จึงคงอธิบายได้โดยย่อ คือระบบเริ่มต้นทำงานด้วยหน่วยประมวลผล (จริงๆแล้วต้องกล่าวว่าเริ่มที่วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาเพราะเป็นตัวขับเคลื่อนการทำงานทั้งหมดของระบบ) หน่วยประมวลผลทำหน้าที่อ่านข้อมูลคำสั่งแปลข้อมูลคำสั่งออกเป็นการดำเนินการ และดำเนินการตามคำสั่งนั้นๆ เมื่อหน่วยประมวลผลทำงานเสร็จเรียบร้อย 1 คำสั่ง ก็จะเลื่อนไปอ่านข้อมูลคำสั่งในหน่วยความจำถัดไปเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ หรือถ้ามีคำสั่งกระโดดข้ามไปที่หน่วยความจำตำแหน่งอื่นใดหน่วยประมวลผลก็จะกระโดดไปยังตำแหน่งที่ระบุในข้อมูลคำสั่งนั้นๆ

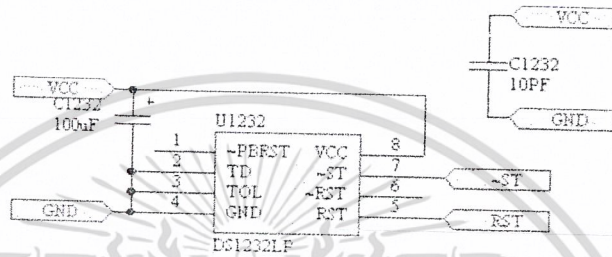


รูปที่ ข - 19 แสดงการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา หรือออสซิลเลเตอร์และการต่อคาปาซิเตอร์เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน

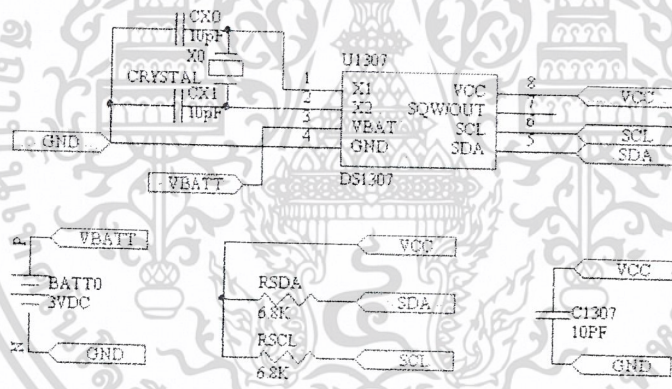
5.3 วงจรประกอบ

การที่จะนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์ไปใช้งานนั้น ไม่ใช่มีเพียงแค่อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียวก็สามารถทำงานได้แล้ว หากแต่ยังต้องมีวงจรถ่วงเพิ่มเติมอีก ที่เรียกว่า Peripheral Circuit หรือ Support Circuit วงจรที่มีความสำคัญและจำเป็นต้องมีในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์คือวงจรวอร์ชค็อกไทม์เมอร์ ทำหน้าที่ตรวจสอบคุณภาพการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ว่ายังอยู่ในสภาพปกติหรือไม่หลักการตรวจสอบคือแทรกคำสั่งกลับคำสั่งสัญญาณของขาเอาต์พุตขาใดขาหนึ่งลงภายในตัวโปรแกรม

ให้ครอบคลุมทั่วโปรแกรมในลักษณะที่ว่า เมื่อโปรแกรมทำงานตามปกติจะมีการกลับค่าสัญญาณบนขาเอาต์พุตขานี้ทุกๆ ช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นต่อขาเอาต์พุตดังกล่าวเข้ากับไอซีวอชดีค็อกไทม์เมอร์ ถ้าหากไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานตามปกติ วอชดีค็อกไทม์เมอร์จะตรวจพบการกลับค่าสัญญาณเรื่อยๆ ก็จะไม่ทำอะไรเกิดขึ้นแต่เมื่อไรที่วอชดีค็อกไทม์เมอร์ตรวจไม่พบการกลับค่าสัญญาณภายในช่วงเวลาหนึ่งที่ยาวนานกว่าช่วงเวลาระหว่างการกลับค่าสัญญาณแต่ละครั้งแสดงว่าไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดปัญหาหรือทำงานผิดพลาด ดังนั้น วอชดีค็อกไทม์เมอร์ก็จะส่งสัญญาณไปรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์ให้กลับมาทำงานที่จุดเริ่มต้นใหม่อีกครั้งหนึ่ง



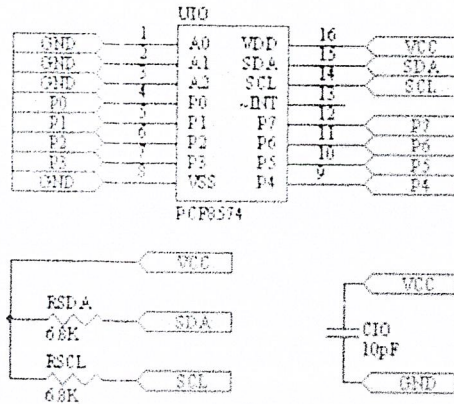
รูปที่ ข - 20 วงจรวอชดีค็อกไทม์เมอร์



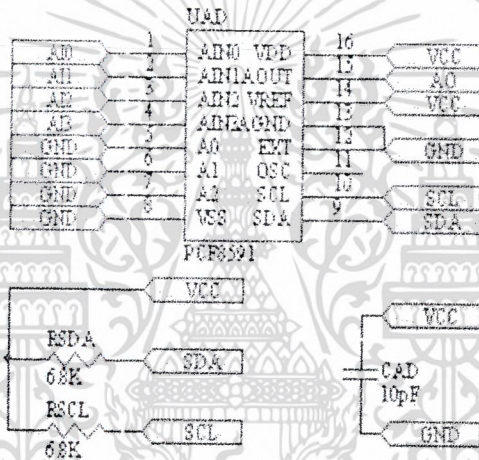
รูปที่ ข - 21 วงจรให้กำเนิดฐานเวลาจริง (RTC, Real Time Clock)

การเพิ่มขยายจำนวนพอร์ตอินพุตเอาต์พุตสามารถทำได้โดยสะดวกง่ายดายโดยใช้ไอซีขยายพอร์ตเบอร์ PCF8574 โดยที่ไอซี 1 ตัวสามารถเพิ่มจำนวนขาอินพุตและเอาต์พุตรวมกันได้ 8 ขา และไมโครคอนโทรลเลอร์ 1 ตัว สามารถต่อพ่วงไอซี PCF8574 ได้ 8 ตัว ซึ่งหมายความว่า สามารถขยายเพิ่มขาอินพุตเอาต์พุตได้ถึง 64 ขาซึ่งนับเป็นจำนวนที่มากกว่าการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ในงานทั่วไป (รูปที่ ข - 22) หากระบบไมโครคอนโทรลเลอร์มีการรับหรือส่งสัญญาณอนาล็อก 0 - 5 โวลต์ กับวงจรต่อพ่วงภายนอก ไอซีเบอร์ PCF8591 สามารถทำหน้าที่ตรงนี้ได้เป็นอย่างดี ไอซี PCF8591 จำนวน 1 ตัวสามารถรับสัญญาณอนาล็อกได้ 4 ช่อง และส่งสัญญาณอนาล็อกได้ 1 ช่อง และเช่นเดียวกันกับไอซีขยายพอร์ต PCF8574 คือ สามารถต่อไอซี PCF8591 เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ 8 ตัว (รูปที่ ข - 23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข - 22 วงจรเพิ่มขาอินพุตเอาต์พุตด้วยไอซี PCF8574



รูปที่ ข - 23 วงจรแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ด้วยไอซี PCF8591

5.4 โครงสร้างซอฟต์แวร์

ในด้านโครงสร้างซอฟต์แวร์นั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ของผู้ผลิตแต่ละรายจะมีชุดคำสั่งไม่เหมือนกัน คำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051 จะเหมือนกับ ATME1 แต่ไม่เหมือนกับ PIC หรือ ST โครงสร้างของโปรแกรมโดยทั่วไปที่นิยมใช้กัน มี 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ โครงสร้างแบบอินเตอร์รัพท์ (Interrupt) และ โครงสร้างแบบโพลลิ่ง (Polling) ความหมายของทั้ง 2 ประเภทนี้คืออะไร จะขออธิบายตามที่เข้าใจดังนี้ โครงสร้างแบบอินเตอร์รัพท์ (Interrupt)

โปรแกรมที่มีโครงสร้างแบบอินเตอร์รัพท์จะมีลักษณะพิเศษคือรอรับคำสั่งให้ทำงานจากหน่วยต่างๆ ภายในระบบ เช่นวงจรถ่ายโมเมอร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์หรือจากอุปกรณ์ภายนอก เช่นสัญญาณแจ้งจากคีย์บอร์ดว่ามีคนกดแป้นคีย์บอร์ดแล้วให้เตรียมรอรับข้อมูล หากคำสั่งแบบนี้ก็คือการทำอินเตอร์รัพท์นั่นเองขณะที่ยังไม่มีสัญญาณอินเตอร์รัพท์เกิดขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะวนลูปไปเรื่อยๆ โดยไม่ได้ทำงานอะไร คล้ายกับการนอนหลับ หรือเข้าสู่สถานะ ไอเดิล (Idle State) ครั้นเมื่อเกิดเหตุการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต้องการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงาน ระบบจะสร้างสัญญาณอินเตอร์รัพท์ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะเป็นการปลุกให้ตื่นมาทำงานให้สอดคล้องกับสัญญาณอินเตอร์รัพท์นั้นๆ ด้วยลักษณะการทำงานแบบนี้ จึงเหมาะกับงานแบบมัลติทาสกิ้ง

5.5 โครงสร้างแบบโพลลิง (Polling)

โครงสร้างแบบโพลลิงแตกต่างจากแบบอินเตอร์รัพท์ตรงที่มีการทำงานตลอดเวลาลักษณะการทำงานเป็นแบบวนลูบเหมือนกัน แตกต่างกันตรงที่ในแต่ละลูบของโครงสร้างแบบโพลลิง จะมีการทำงานเสมอ ทำงานหลายๆ ส่วนใน 1 ลูบแต่ไม่ได้เสร็จสิ้นลงภายในลูบเดียวเสมือนกับการแบ่งเวลาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ไปทำงานส่วนนั้นๆ ส่วนนี้ที่ซึ่งลักษณะอย่างนี้ ก็คือการทำงานแบบมัลติทาสกิ้งเช่นเดียวกับการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันทั่วไป

โครงสร้างโปรแกรมแบบโพลลิงที่เห็นนี้ เป็นโครงสร้างที่จำลองเอามาจากรูปแบบการทำงานของ PLC เริ่มตั้งแต่การเริ่มทำงานครั้งแรกมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของระบบ จากนั้น ระบบจะเข้าสู่ลูบการทำงานประกอบด้วยตรวจสอบค่าตัวแปรต่างๆ ตรวจสอบหาข้อผิดพลาดจากนั้นก็อ่านค่าสัญญาณอินพุตจากภายนอก ซึ่งอาจเป็นสัญญาณจากแป้นคีย์บอร์ดสัญญาณจากเซนเซอร์ เป็นต้น เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าสัญญาณอินพุตเรียบร้อยแล้วขั้นต่อไปคือการประมวลผลโดยนำค่าสัญญาณอินพุตมาคิดคำนวณร่วมกับค่าตัวแปรระบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์และการทำงานตามตามที่กำหนดในโปรแกรม เมื่อคำนวณเสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะเลื่อนไปสู่ขั้นตอนการสร้างสัญญาณเอาต์พุตส่งไปให้อุปกรณ์ภายนอกที่ต่อพ่วงอยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ทำงานตามผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานครบ 1 ลูบแล้วก็จะกระโดดไปที่จุดเริ่มต้นลูบใหม่อีกเพื่อทำงานวนลูบไปเรื่อยๆ ผู้ที่ยังไม่เคยเขียนโปรแกรมแบบนี้อาจสงสัยว่าเมื่อทำงานเสร็จครบทุกขั้นตอนแล้วทำไมยังต้องย้อนกลับไปทำงานใหม่อีกเหมือนกับการเขียนโปรแกรมสมัยเรียนหนังสือที่แบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ เมื่อทำงานครบทุกขั้นตอนก็จบแนวทางแบบนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาให้ออกแบบโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เพราะลักษณะในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์คือรับรู้การเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตและพร้อมที่จะทำงานให้สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตนั้นๆ ตลอดเวลา

โครงสร้างแบบโพลลิง ดูเสมือนกับว่าโปรแกรมทำงานที่ละส่วนตามลำดับไปเรื่อยๆ ไม่ใช่มัลติทาสกิ้ง แต่หากเราออกแบบให้การทำงาน 1 ลูบใช้เวลาสั้นๆ ก็จะเป็นเสมือนกับเวลาไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงาน โปรแกรมย่อยส่วนต่างๆ พร้อมกันแบบมัลติทาสกิ้ง

6. มอเตอร์ไฟฟ้า (ELECTRIC MOTOR)

มอเตอร์ไฟฟ้าคือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกล โดยอาศัยหลักการดูดและผลักของสนามแม่เหล็ก การหมุนของมอเตอร์ โดยสมมติว่า ถ้ามีขั้วแม่เหล็กอยู่ตรงข้ามขั้วต่างกัน เรียกว่า โพล (Pole) ซึ่งจะให้สนามแม่เหล็กออกมาเรียกว่า ฟลักซ์ฟลักซ์ (Field Flux) เหล็กแท่งหนึ่งที่ตั้งอยู่ที่แกนหมุนก็ให้สนามแม่เหล็กออกมาเรียกว่า อาร์เมเจอร์ฟลักซ์ (Armature Flux) ถ้าเริ่มวางตำแหน่งแม่เหล็กให้เอียงนิดๆ พอให้มีแรงผลักเริ่มแรก แท่งแม่เหล็กจะถูกขั้วแม่เหล็กหัวท้ายทั้งสองผลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้หมุนตามเข็มนาฬิกาไป เมื่อแท่งแม่เหล็กหมุนไปได้ 180 องศา เราก็จะทำการสลับขั้วแม่เหล็กที่หมุนนั้นกลับกัน แท่งแม่เหล็กก็จะถูกผลักให้หมุนต่อไปเรื่อย ๆ ในทางปฏิบัติการกลับขั้วแม่เหล็กที่หมุนนี้ใช้คอมมิเตอร์เป็นตัวเปลี่ยนแปลงขั้วแม่เหล็กไฟฟ้านี้

มอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งออกตามแหล่งจ่ายกระแสไฟที่ใช้ได้เป็นสองประเภท

1. มอเตอร์กระแสสลับ
2. มอเตอร์กระแสตรง

6.1 มอเตอร์กระแสสลับ (AC MOTOR)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งออกตามระบบไฟฟ้าได้ 2 จำพวก ดังนี้

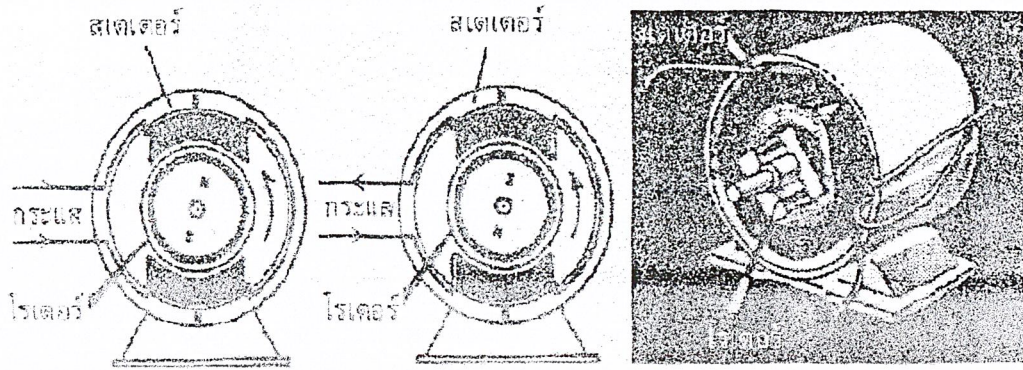
1. Single Phase Motor เป็นมอเตอร์ชนิด 1 เฟส 220 โวลต์ แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ ดังนี้
 - 1.1. Split phase Motor
 - 1.2. Capacitor Motor
 - 1.3. Replusion Motor
 - 1.4. Shaded Pole Motor
 - 1.5. Universal Motor
2. Three Phase Motor เป็นมอเตอร์ 3 เฟส 380 โวลต์ แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ ดังนี้
 - 2.1 Synchronuse Motor
 - 2.2 Slip Ring Motor
 - 2.3 Induction Motor

6.1.1 มอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียว

มี 5 แบบคือ

1) มอเตอร์สปลิต-เฟส

มอเตอร์ชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่ามอเตอร์ชนิดแยกเฟสสตาร์ท เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าประเภทเฟสเดียวที่มีใช้กันอยู่แพร่หลายมากที่สุด โดยเฉพาะมอเตอร์ที่มีขนาด 1/20 ถึง 1/3 แรงม้า ซึ่งมีใช้กันอยู่ในพัดลม โบลเวอร์ ปัมป์ชนิดต่างๆ เครื่องซักผ้า เครื่องมือไฟฟ้าชนิดต่างๆ เครื่องปรับอากาศ และอุปกรณ์อื่นๆ คุณสมบัติหลักๆ ได้แก่ มีความเร็วคงที่ แรงบิดปานกลาง และมักมีสวิตช์แรงเหวี่ยง



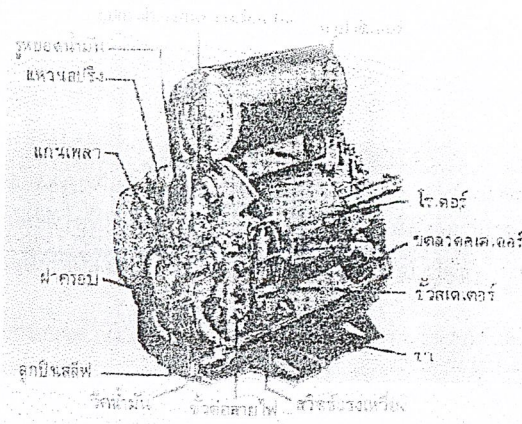
รูปที่ ข - 24 ภาพแสดงมอเตอร์ สปลิต - เฟส

2) มอเตอร์คาปาซิเตอร์

มอเตอร์คาปาซิเตอร์ได้รับการปรับปรุงมาจากมอเตอร์สปลิต-เฟส ส่วนใหญ่จะใช้ในเครื่องทำความร้อน ตู้เย็น เครื่องอัดอากาศ และเครื่องปรับอากาศ ที่ซึ่งต้องการแรงบิดคอนออกตัวสูง (High Starting Torques) มอเตอร์คาปาซิเตอร์ยังแบ่งออกเป็น 5 ชนิดคือ

- มอเตอร์คาปาซิเตอร์ - สตาร์ท
- มอเตอร์คาปาซิเตอร์ - สตาร์ทและรัน
- มอเตอร์คาปาซิเตอร์ - แยกถาวร
- มอเตอร์คาปาซิเตอร์สองสปีด
- มอเตอร์คาปาซิเตอร์หลายสปีด

มอเตอร์คาปาซิเตอร์เป็นมอเตอร์สปลิต - เฟสซึ่งมีขดลวดสองชุดที่มีเฟสต่างกัน เฟสที่ต่างกันหรือแยกจากกันทำให้เกิดแรงบิดสำหรับออกตัวมอเตอร์ มอเตอร์คาปาซิเตอร์ปรับปรุงจากมอเตอร์สปลิต-เฟส โดยการเพิ่มคาปาซิเตอร์เข้าไปในตัวหนึ่งในวงจรของมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์มีแรงบิด (ทอร์ค) ขณะออกตัวมากขึ้น คุณสมบัติโดยทั่วไปจะมีความเร็วคงที่



รูปที่ ข - 25 ภาพแสดงมอเตอร์คาปาซิเตอร์

3) มอเตอร์รีฟลักชัน

หลักการของมอเตอร์ชนิดนี้ ทราบกันแล้วว่ามอเตอร์ประกอบด้วยขดลวดอยู่กับที่ (สเตเตอร์) และขดลวดที่หมุน (โรเตอร์หรืออาร์มาเจอร์) สเตเตอร์ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆซ้อนกันและมีขดลวดพันอยู่รอบๆขั้วมอเตอร์ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขั้วมอเตอร์ จำนวนขั้วจะสัมพันธ์กับความเร็วขณะทำงาน ถ้าใส่ขดลวดที่หมุนได้เข้าไปในสเตเตอร์ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสเตเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดของโรเตอร์ ขดลวดของโรเตอร์จะถูกพันเหมือนอาร์มาเจอร์หรือมัดขั้วคัมของมอเตอร์ยูนิเวอร์แซลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำในโรเตอร์ในทิศทางที่ทำให้ขั้วที่ผลักกัน ยังแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด

- มอเตอร์รีฟลักชันตรง
- มอเตอร์รีฟลักชัน - คอมเพนเซต
- มอเตอร์รีฟลักชัน - สตาร์ด
- มอเตอร์รีฟลักชัน - เหนี่ยวนำ

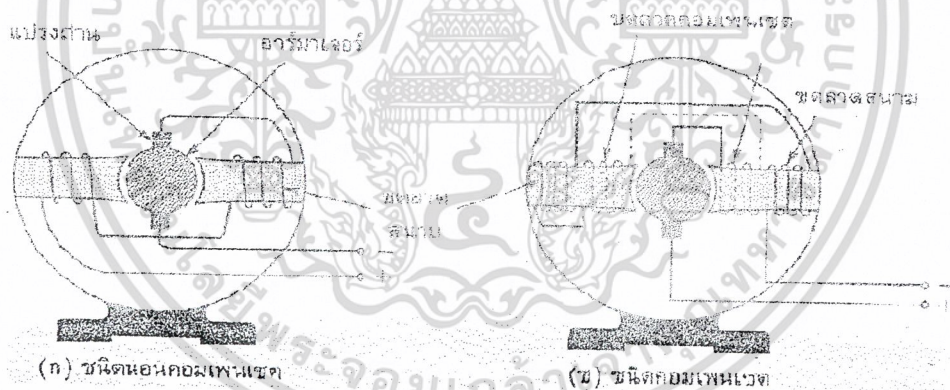
คุณสมบัติโดยทั่วไปจะมีความเร็วคงที่ มีแรงบิดออกตัวสูงมาก มีการใช้งานโดยทั่วไปโดยเฉพาะงานที่ต้องการแรงบิดสูง เช่น ปั่นต่างๆ เครื่องอัดอากาศ รอก อุปกรณ์สำหรับเตรียมอาหาร อุปกรณ์ในโรงซ่อมบำรุงต่างๆ เครื่องมือที่ใช้ทำงานไม้เครื่องจักร มอเตอร์ที่ใช้ในฟาร์ม และอื่นๆ

5) มอเตอร์ยูนิเวอร์แซล

มอเตอร์ยูนิเวอร์แซลเป็นการพัฒนาที่สำคัญในวงการมอเตอร์ไฟฟ้า มันมีขนาดเล็ก เป็นมอเตอร์อนุกรมที่สามารถทำงานได้ทั้งแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและกระแสสลับ การทำงานของมอเตอร์จะเหมือนกันไม่ว่าจะใช้งานแบบใด จึงมีชื่อว่ายูนิเวอร์แซล มีความหมายว่าแห่งจักรวาลสากลทั่วตลอดไป และครอบจักรวาล มีสัญลักษณ์มอเตอร์และมีการใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากมอเตอร์พันแบบอนุกรม ลักษณะการทำงานจึงคล้ายกับมอเตอร์อนุกรมแบบกระแสตรงขนาดของมอเตอร์อยู่ระหว่าง 0 ถึง 3/4 แรงม้า แรงม้าที่ต่ำมากอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1/150 แรงม้า มีการใช้งานในจักรเย็บผ้า พัดลม เครื่องมือใช้มือถือต่างๆ เครื่องฉายภาพยนตร์ และเครื่อง โคนहनวด แรงม้าที่สูงขึ้นมาจะอยู่ระหว่าง 1/150 ถึง 3/4 มีใช้งานในเครื่องดูดฝุ่น เครื่องพิมพ์ดีดไฟฟ้า เครื่องฉายภาพยนตร์ กล้องถ่ายรูป เครื่องคิดเลขไฟฟ้า และเครื่องคิดเงินสดมีคุณสมบัติ มีความเร็วสูงและแรงบิดสูงในมอเตอร์ที่ไม่มีคู่มือวางน้ำหนักบางตัวจะปรับความเร็วโดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ หรือ โดยขดลวดสนามที่มีแท็บหรือใช้เกียร์ทดรอบเพื่อให้ได้รอบที่ต่ำลงเหมาะสมกับการใช้งาน

แบ่งออกเป็นสองชนิด คือ

- ชนิดคอมเพนเซต
- ชนิดนอนคอมเพนเซต



รูปที่ ข - 28 ภาพแสดงมอเตอร์ยูนิเวอร์แซล

6.1.2 มอเตอร์กระแสสลับสามเฟส

มี 3 แบบคือ

1) มอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัสมีการพันสเตเตอร์เหมือนมอเตอร์แบบมาตรฐานเพียงแต่ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายให้โรเตอร์ บางครั้งเรียกแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนี้ว่า เอ็กไซเตอร์ และบางทีเอ็กไซเตอร์นี้จะติดอยู่บนแกนเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกันกับมอเตอร์ มอเตอร์จึง โครนส์มีแรงบิดออกตัวเป็นศูนย์จึงต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มเติมเข้าช่วยในการออกสตาร์ท

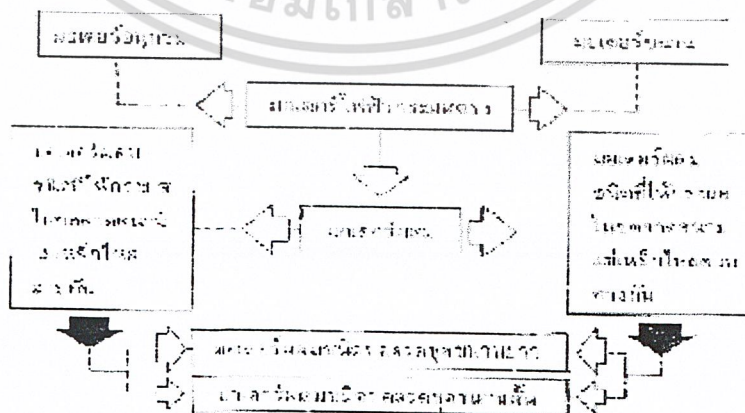
2) มอเตอร์กรงกระรอก

มอเตอร์แบบนี้ทำงานด้วยหลักการเหนี่ยวนำ โรเตอร์กรงกระรอกประกอบด้วยแกนเหล็กอยู่บนเพลากลม มีทองแดงหรือทองเหลืองเป็นแท่งวางอยู่ตามความยาวของแกนเพลลา โดยอยู่ในสลีต ปิดหัวท้ายของแท่งโลหะด้วยวงแหวนปิดทำให้แท่งทองแดงหรือทองเหลืองเชื่อมต่อกันเป็นวงจรปิดภายใน โรเตอร์ โครงสร้าง โรเตอร์จึงคล้ายกรงกระรอก หรือหนูถีบจักรออกก้าลังกาย มอเตอร์กรงกระรอกมีแรงบิดออกตัวที่ต่ำจนถึงปานกลางแต่ความเร็วค่อนข้างจะคงที่ จึงมีใช้กันอยู่ในพัดลม สายพานลำเลียง เครื่องอัดอากาศ และเครื่องปั๊มโลหะ แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กจะมีการใช้มอเตอร์กรงกระรอกได้ทั่วไปในที่ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าสลับสามเฟสให้ใช้อยู่

3) มอเตอร์โรเตอร์พันขดลวด

ถึงแม้ว่ามอเตอร์ โรเตอร์พันขดลวด จะมีหลักการคล้ายกับมอเตอร์กรงกระรอกแต่ก็มีส่วนต่างที่สำคัญคือ มอเตอร์ โรเตอร์พันขดลวดที่ โรเตอร์จะพันด้วยขดลวดที่หุ้มฉนวนไว้แทนแท่งทองแดงหรือทองเหลืองอย่างของ โรเตอร์กรงกระรอก และขดลวดที่พันไว้ก็ไม่ได้ต่อคircuitวงจรอย่างถาวรเหมือน โรเตอร์กรงกระรอก หลักการสตาร์ทออกตัวของมอเตอร์พันขดลวดเหมือนกับของมอเตอร์กรงกระรอกแต่โรเตอร์พันขดลวดไม่ได้ต่อคircuitวงจรอย่างถาวร ดังนั้นมอเตอร์โรเตอร์พันขดลวดจึงมีใช้กันส่วนใหญ่ในอุปกรณ์หนัก ซึ่งต้องการแรงบิดออกตัวสูงและต้องการอัตราการเร่งสู่การทำงานเต็มกำลังที่สม่ำเสมอ หรือในอุปกรณ์ที่ต้องการปรับความเร็วได้เช่น ในลิฟต์ เครน รอกไฟฟ้า สายพานลำเลียง คอมเพรสเซอร์

6.2 มอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR)



รูปที่ ข - 29 ภาพแสดงการแบ่งชนิดของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

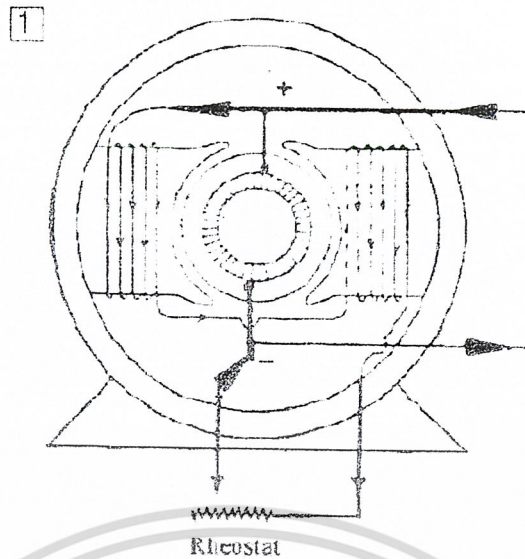
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบ่งออกเป็น 4 ชนิดย่อยๆ ได้ดังนี้

1. Series Motor
3. Shunt Motor
4. Compound Motor
5. Universal Motor

6.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าตรงแบบชัณฑ์ (D.C. Shunt Motor)

สิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วว่า มอเตอร์จะหมุนได้ก็ต้องมีสนามแม่เหล็ก 2 ชุดมาผลักดัน ในมอเตอร์ไฟฟ้าตรงแบบชัณฑ์นี้ สนามแม่เหล็กก็จะมี 2 ชุดเช่นกัน สนามแม่เหล็กชุดแรกเป็นชุดใหญ่ซึ่งพันอยู่รอบทุ่นอาร์เมเจอร์ (ตัวหมุน) กระแสส่วนใหญ่มักจะไหลเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์ในขณะที่ทำงาน การป้อนกระแสเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์นั้นต้องป้อนผ่านคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านซึ่งจะควบคุมการจ่ายแรงดันให้แก่ขดลวดชุดที่ต้องการให้เกิดสนามแม่เหล็กให้สัมพันธ์กับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างและการพันจะไม่นำมากล่าวในที่นี้ ส่วนขดลวดอีกชุดที่แยกออกไปพันรอบโพลทั้งสองเรียกว่า ขดลวดชัณฑ์ (Shunt Coil) ซึ่งจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กคงที่เป็นฟิลด์ฟลักซ์ทำหน้าที่ออกแรงผลักดันทุ่นอาร์เมเจอร์ให้หมุนไป มอเตอร์ไฟฟ้าตรงแบบชัณฑ์นี้มีเทคนิคในการนำไปใช้งานเพิ่มเติมได้อีกด้วย ดังนี้

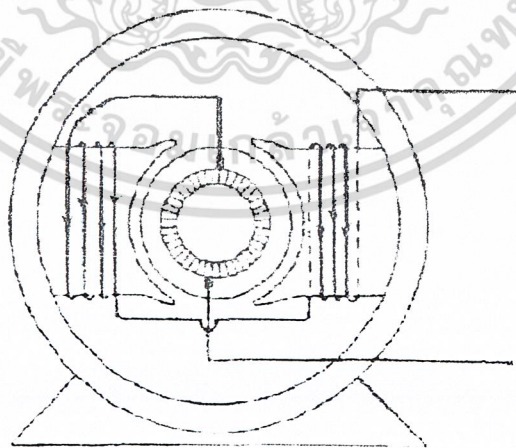
- ใช้ในการควบคุมแรงม้าให้คงที่แต่ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงได้ ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลเข้าสู่ขดลวดฟิลด์โดยการต่อความต้านทานปรับค่าได้อนุกรมเข้าไปในวงจรขดลวดชัณฑ์ เมื่อฟลักซ์หรือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดชัณฑ์ลดลงความเร็วก็จะเพิ่มขึ้น เช่น เพิ่มขึ้นสองเท่าแล้วแต่แรงหมุนจะลดลงครึ่งหนึ่งเช่นกัน ฉะนั้นผลคูณของความเร็วกับแรงหมุนจึงคงที่ นั่นคือแรงม้าของมอเตอร์คงที่นั่นเอง
- ใช้ในการควบคุมแรงหมุนให้คงที่แต่ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงได้ ทำได้โดยรักษาสนามแม่เหล็กของขดลวดชัณฑ์ให้คงที่ แต่กลับมารับแรงดันที่ป้อนให้แก่ขดลวดอาร์เมเจอร์ การทำแบบนี้ทำให้ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟตรงถึง 2 ชุด ชุดหนึ่งจ่ายให้กับชัณฑ์ อีกชุดหนึ่งจ่ายให้กับอาร์เมเจอร์
- ใช้ในการควบคุมโหลดที่มีความเร็วตกลงตามแรงหมุน โหลดบางชนิด เช่น พัดลมและปั๊มน้ำมันจะมีความเร็วลดลงเมื่อแรงหมุนลดลง ซึ่งขัดกับลักษณะสมบัติของมอเตอร์ตัวเปล่าที่ว่าโหลดมากขึ้นรอบจะต่ำลง การปรับกระแสทำได้โดยการต่อความต้านทานอนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์



รูปที่ ข - 30 ภาพแสดงมอเตอร์แบบขนาน

6.2.2 มอเตอร์ไฟตรงแบบอนุกรม (D.C. Series Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้จะมีขดลวดอยู่ 2 ชุด เหมือนกับมอเตอร์ไฟตรงแบบขนาน แต่ขดลวดที่สร้างฟลักซ์นี้จะต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ ขดลวดฟลักซ์จะพันรอบโพลเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กฟลักซ์ขึ้น กระแสที่ไหลผ่านขดลวดฟลักซ์นี้จะเท่ากับกระแสอาร์เมเจอร์เพราะต่ออนุกรมกันอยู่ มอเตอร์ไฟตรงชนิดนี้จะให้ลักษณะสมบัติแตกต่างออกไป จากมอเตอร์ไฟตรงแบบขนาน งานที่ใช้มอเตอร์ชนิดนี้ส่วนใหญ่ต้องการแรงหมุนเริ่มแรกสูงถึง 500% ของค่าเต็มพิกัด ซึ่งมากกว่าแรงหมุนสูงสุดที่มอเตอร์ไฟตรงแบบขนานทำได้

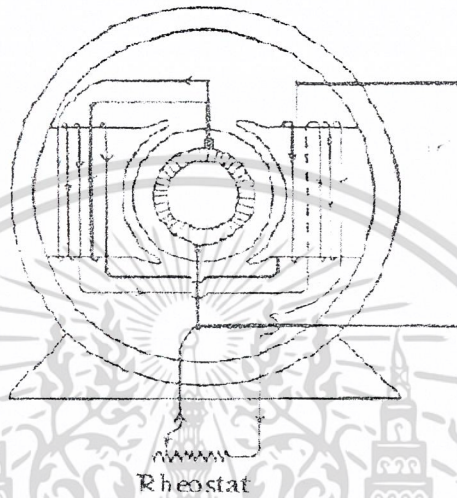


รูปที่ ข - 31 ภาพแสดงมอเตอร์แบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 ไฟตรงแบบคอมปาวด์ (D.C. Compound Motor)

เป็นมอเตอร์ที่เกิดจากการนำเอาลักษณะสมบัติของแบบขั้วและแบบอนุกรมมารวมกัน ลักษณะสมบัติของมอเตอร์ไฟตรงแบบคอมปาวด์นั้นอยู่ระหว่างมอเตอร์ 2 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว โดยความเร็วจะไม่เพิ่มค่าสูงมากนักเมื่อ โหลดตกลง ทำให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางขึ้นกว่ามอเตอร์แบบอนุกรม และให้แรงหมุนเริ่มต้นได้สูงกว่ามอเตอร์แบบขั้ว



รูปที่ ข - 32 ภาพแสดงมอเตอร์แบบผสม

6.2.4 มอเตอร์แบบยูนิเวอร์แซล (Universal Motor)

เป็นชนิดของมอเตอร์ไฟตรงแบบอนุกรม ซึ่งออกแบบมาให้ใช้ได้ทั้งไฟตรงและไฟสลับ ส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์ขนาดเล็ก ๆ ไม่เกิน 3/4 แรงม้า ให้ความเร็วไม่สม่ำเสมอขึ้นกับโหลด ข้อดีของมอเตอร์แบบนี้คือ ควบคุมความเร็วได้ง่ายโดยการต่อตัวต้านทานปรับค่าได้อนุกรมเข้าไปสำหรับไฟตรง หรือถ้าไฟสลับเข้ามาก็สามารถควบคุมความเร็วโดยใช้ SCR (Silicon Controlled Rectifier) มอเตอร์แบบนี้ที่พบเห็นกันบ่อยคือ สว่านไฟฟ้า มอเตอร์จักร ฯลฯ

บรรณานุกรม

1. Kevin M. Daugherty, Analog-to-Digital Conversion : a practical approach, Mc Graw - Hill, 1994.
2. ไพบูลย์ นาคมหาชาติสินธุ์, กนกพร คุณชัยเจริญกุล, อิเล็กทรอนิกส์ : หลักการและการประยุกต์ใช้งาน, Mc Graw - Hill, 2541.
3. ระบบไฟฟ้า ชุดที่ 5, บริษัท เอ็มแอนดีอี จำกัด, กรุงเทพฯ, 2546.
4. วันสุระ ศรีใสดี, ประยุกต์ \ อินเทอร์เน็ต ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ภาคปฏิบัติ, บริษัท สำนักพิมพ์ดวงกมลจำกัด, กรุงเทพฯ, 2542.
5. ยืน ภู่วรรณ, ทฤษฎีและการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 1, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ, 2544.
6. นภัทร วัฒนเทพินทร์, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, พิมพ์ครั้งที่ 4, สกายบุ๊กส์, กรุงเทพฯ, 2542.
7. ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานันท์, การออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2528.
8. Industrial Controls & Measuring, บริษัท เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ จำกัด, 2002.
9. www.9engineer.com
10. Edward L. Paul, Victor A. Atiemo - Obeng, Suzanne M. Kresta. Handbook of industrial mixing, A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
11. Gary B. Tatterson. Scaleup and Design of Industrial Mixing Process, McGraw-Hill.
12. Marko Zlokarnik. Stirring Theory and Practice, Wiley - Vch.
13. Jamal M. Saleh, Ph.D., PE (2002). Fluid Flow Handbook, McGraw-Hill, ISBN : 0-07-136372-6.
14. Aksell. Lydersen. Fluid Flow and Heat Transfer, Wiley.
15. Bruce R. Munson, Donald F. Young, Theodore H. Okiishi. Fundamentals of Fluid Mechanics, 4th edition, Wiley.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้