สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โครงหุ่นยนต์ 5 แกน

นาย นัฐวินท์ กำมหาวงศ์
นาย ศักดิเดช ไตรสุวรรณ
นาย อนุศักดิ์ ชูโลก

เลขหมู่.................................
เลขทะเบียน 62849
วัน,เดือน,ปี 23 ส.ค. 2549

บ. 11b3280x
ร. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 AXIS – ROBOT STRUCTURE

MR.NUTTAWIN GUMMAHAWONG

MR.SUGDIDECH TRAISUWUN

MR.ANUSAK CHULOK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ โครงหุ่นยนต์ 5 แกน
5 AXIS – ROBOT STRUCTURE

นักศึกษา

นายณัฐวินท์	กำมหาวงศ์	**รหัสประจำตัว**	46015712
นายศักดิ์เดช	ไตรสุวรรณ	**รหัสประจำตัว**	46015730
นายอนุศักดิ์	ชูโลก	**รหัสประจำตัว**	46015740

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

(อาจารย์พลชัย โชติปรายนกูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	โครงหุ่นยนต์ 5 แกน
	5 AXIS – ROBOT STRUCTURE
นักศึกษา	นายนัฐวินท์ กำมหาวงศ์ รหัสประจำตัว 46015712
	นายศักดิเดช ไตรสุวรรณ รหัสประจำตัว 46015730
	นายอนุศักดิ์ ชูโลก รหัสประจำตัว 46015740
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	อาจารย์พลชัย โชติปรายนกุล

บทคัดย่อ

โครงงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบและการจัดสร้างโครงหุ่นยนต์ 5 แกน โดยอาศัยหลักการทางวิชาการออกแบบเครื่องจักรกล (Mechanical Engineering Design) และวิชาโรโบติก (Robotic) เป็นหลัก ขั้นตอนการทำงาน เริ่มจากการออกแบบโครงหุ่นยนต์ 5 แกน ด้วยโปรแกรม Mechanical Desktop 6 และออกแบบคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ในส่วนที่ใช้ยกแขน และน้ำหนักส่วนปลายที่เพิ่มเข้าไป และทำการสร้างหุ่นยนต์จากส่วนที่เป็นโครงสร้างฐานขึ้นมา ต่อไปยังข้อต่อและท่อนแขนต่าง ๆ ตามลำดับเสร็จสมบูรณ์ หลังจากนั้นทำการประกอบวงจรไฟฟ้า แบบกระแสสลับจ่ายให้กับมอเตอร์ และทำการประกอบวาล์วลมพร้อมกับทดสอบการเคลื่อนที่และการจับน้ำหนักยกของตัวหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	5 AXIS – ROBOT STRUCTURE	
Student	Mr.Nuttavin	Grammmahawong
	Mr.Sugdidach	Traisuwun
	Mr.Anusak	Chulok
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering	
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
Academic Year	2005	
Thesis Advisor	Mr.Pholchai	Chotiprayanakul

ABTRACT

This project is aimed designing and constructing of 5 Axis Robot Model. This is on the theory of Mechanical Engineering Design and Robotic subject. Firstly, our group started to design a frame work of the robot by program, which is called Mechanical Desktop 6. Then we designed and determined the power of motors that the robot use for lifting its hand and weight. After that, we built the robot from a base to an end - effector, link by link, and connecting them with joints. Finally, we tested its movement and weight lifting capability within 5 kilograms objects.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการจัดสร้างโครงหุ่นยนต์ 5 แกนฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับการสนับสนุนและคำแนะนำของอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างดีตลอดมา ตั้งแต่เริ่มต้นจนปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จ กลุ่มผู้จัดทำโครงงานขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

รศ.พรศักดิ์ อรรถวนิช หัวหน้าภาควิชาวิศวอุตสาหการที่คอยให้คำแนะนำดี ๆ ทุกครั้งที่ต้องการคำตอบ

ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มนรรัตน์ ผู้จัดทำโครงงานขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับบรรยากาศดี ๆ ที่มอบให้ทุกที่ ทุกเวลา

อาจารย์พลชัย โชติปรายนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณสำหรับความรู้ดี ๆ ที่มอบให้ ขอขอบคุณสำหรับรอยยิ้มละมุนทุกครั้งที่ตอบคำถามท่านไม่ถูก ขอขอบคุณสำหรับอุปกรณ์ทุกอย่างที่คอยจัดหาให้ และกำลังใจที่มอบให้ตลอดมา

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล ขอขอบคุณสำหรับคำแนะนำดี ๆ ที่มอบให้ตลอดระยะเวลาในการทำโปรเจคนี้

ผศ.ดร.กรรณชัย กัลป์ยาศิริ ขอบคุณสำหรับคำถามดี ๆ ที่มอบให้ และขอบคุณสำหรับความมีไมตรีของอาจารย์ตลอดมา

อาจารย์เชาวลิต หามนตรี ขอบคุณสำหรับคำถามดี ๆ เช่นกัน และขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านที่อาจารย์มอบให้เสมอมา

ขอบคุณอาจารย์ท่านอื่น ๆ ที่มิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่มิได้เป็นเพียงแค่สถานศึกษาที่ให้แต่ทักษะทางด้านวิชาการ แต่ยังเป็นบ้านหลังที่สองของพวกกระผมอีกด้วย

ขอบคุณ พ่อ แม่ พี่ น้อง ญาติสนิท และมิตรสหาย เป็นอย่างสูง ในการให้โอกาสด้านการศึกษา ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือทุกประการตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลในการค้นคว้าในการทำปริญญานิพนธ์และแหล่งความรู้ทุกแหล่งอันทรงคุณค่าสำหรับการทำโครงงานนี้

นายณัฐวินท์ กำมหาวงศ์
นายศักดิเดช ไตรสุวรรณ
นายอนุศักดิ์ ชูโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การออกแบบเครื่องจักรกล	2
2.1.1 การออกแบบ	2
2.1.2 กระบวนการในการออกแบบ	3
2.1.3 ข้อควรพิจารณาในการออกแบบ	5
2.1.4 เครื่องมือช่วยเหลือและทรัพยากรในการออกแบบ	6
2.2 เพลา และลิ่ม	7
2.2.1 ชนิดของเพลา	7
2.2.2 จุดสำคัญในการออกแบบเพลา	7
2.3 ตลับลูกปืนชนิดต่างๆ	9
2.3.1 ความสามารถในการใช้งานของตลับลูกปืน	11
2.3.2 วัสดุทำตลับลูกปืน	14
2.3.3 ขนาดระบุของตลับลูกปืน	14
2.3.4 ความสามารถในการรับโหลดของตลับลูกปืน	15
2.3.5 การหล่อลื่นตลับลูกปืน	17
2.4 สายพานและโซ่	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 การขับโดยสายพาน - V 19

2.4.2 การขับด้วยสายพานฟัน 20

2.5 เฟือง 30

2.5.1การจำแนกประเภทของเฟือง 30

2.5.2 การเรียกชื่อส่วนต่าง ๆ ของเฟือง และขนาดของเฟือง 33

2.5.3 เฟืองดอกจอก 35

2.5.4 รูปร่างของดอกจอก 35

2.5.5 สัดส่วนของเฟืองดอกจอก 38

2.6 หุ่นยนต์ 44

2.6.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์และควบคุมหุ่นยนต์ 44

2.6.2 ชนิดของหุ่นยนต์ 45

2.6.3 ลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์ 47

2.6.4 ความแม่นยำของการเคลื่อนที่ 51

2.6.5 จุดปลายแขน 52

2.6.6 กลศาสตร์ของหุ่นยนต์ และสมการของแขนกล 53

2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 53

2.7.1 หลักการทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 53

2.7.2 คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 55

2.7.3 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 56

2.7.4 กำลังหมุนขับของมอเตอร์ 57

2.7.5 การแยกประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 57

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ด้านโครงสร้าง 59

3.1.1 สเกตภาพหุ่นยนต์ 5 แกนด้วยมือ 59

3.1.2 ออกแบบโครงหุ่นยนต์ 5 แกนด้วยโปรแกรม Mechanical Desktop 6 60

3.1.3 ดำเนินการจัดสร้างโครงหุ่นยนต์ 60

3.2 ด้านมอเตอร์ 63

3.2.1คำนวณหาแรง และน้ำหนักที่ปลายแขนของมอเตอร์ 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 คำนวณหาค่ามวลของท่อนแขน.......... 67

3.3 ขั้นตอนการทดลอง.......... 68

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทำงานด้านโครงสร้างหุ่นยนต์.......... 69

4.2 ผลการทดสอบหุ่นยนต์.......... 70

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผล.......... 73

5.2 เหตุผลสนับสนุนการทดลอง.......... 73

5.3 ข้อเสนอแนะ.......... 73

บรรณานุกรม.......... 74

ภาคผนวก ก.......... ผก1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เหล็กคาร์บอนที่ผ่านกรรมวิธีดึงเย็นและแต่งผิวให้เรียบสำหรับทำเพลา	9
ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดของค่า *d-n*	12
ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทของตลับลูกปืน และคุณสมบัติต่าง ๆ ของแต่ละประเภท	13
ตารางที่ 2.4 แบบ ขนาด และลักษณะการใช้ของสายพาน	22
ตารางที่ 2.5 หมายเลขระบุ จำนวนฟัน และความยาวมาตรฐานของสายพานฟัน	23
ตารางที่ 2.6 แฟคเตอร์แก้ไขที่ต้องเพิ่มเติมสำหรับกรณีการขับแบบเพิ่มความเร็ว และภายใต้สภาพการทำงานที่ผิดปกติ	25
ตารางที่ 2.7 ความสามารถในการถ่ายทอดกำลังต่อความกว้างหนึ่งนิ้ว (25.4 มม.) ของสายพานฟัน	26
ตารางที่ 2.8 เฟืองประเภทต่างๆ	31
ตารางที่ 2.9 ความเค้นดัด และความเค้นสัมผัสที่ยอมให้ของเฟืองดอกจอก	41
ตารางที่ 2.10 แฟคเตอร์ การใช้เกินกำลัง K_o, C_o	42
ตารางที่ 2.11 แฟคเตอร์การกระจายของโหลด K_m, C_m	43
ตารางที่ 2.12 สัมประสิทธิ์ยืดหยุ่น	43
ตารางที่ 2.13 ชนิดของข้อต่อหุ่นยนต์	44
ตารางที่ 2.14 ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ ที่ขึ้นอยู่กับแกนหลัก	45
ตารางที่ 2.15 คุณลักษณะของหุ่นยนต์	48
ตารางที่ 2.16 การเคลื่อนที่แบบ yaw, pitch และ row	50
ตารางที่ 3.1 การทดลองยกน้ำหนักของหุ่นยนต์	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนในการออกแบบ	4
รูปที่ 2.2 ตลับลูกปืนชนิดต่าง ๆ	10
รูปที่ 2.3 ลิ้นอัดจารบี	17
รูปที่ 2.4 การหล่อลื่นโดยการใช้หัวฉีด ฉีดไอน้ำมันเข้ามายังผิวที่ต้องการหล่อลื่น	17
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสายพาน – V	19
รูปที่ 2.6 สัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของสายพาน – V	19
รูปที่ 2.7 แผนผังการเลือกสายพาน –V	20
รูปที่ 2.8 รูปร่างของร่องสายพาน – V ในมู่เล่สายพาน	20
รูปที่ 2.9 สายพานฟัน	21
รูปที่ 2.10 แผนภูมิการเลือกสายพานฟัน	24
รูปที่ 2.11 สายพาน - V	26
รูปที่ 2.12 สายพาน –V แบบพิเศษ	26
รูปที่ 2.13 สายพาน –V ขอบต่ำ	27
รูปที่ 2.14 สายพาน – V แบบใช้กับงานเบา ๆ (แบบL)	27
รูปที่ 2.15 สายพาน – V แคบ	27
รูปที่ 2.16 สายพาน –V มุมกว้าง	28
รูปที่ 2.17 สายพาน – V ใช้กับงานที่ความเร็วเปลี่ยนไป ๆ มา ๆ	28
รูปที่ 2.18 สายพานท้องฟันขอบต่ำ	28
รูปที่ 2.19 สายพานหกเหลี่ยม	29
รูปที่ 2.20 สายพานฟัน	29
รูปที่ 2.21 สายพานร่องรวม	29
รูปที่ 2.22 สายพานที่ทำจากส่วนผสมของหนังและไนล่อน	29
รูปที่ 2.23 เฟืองชนิดต่างๆ	32
รูปที่ 2.24 การเรียกชื่อส่วนต่างๆ ของเฟือง	34
รูปที่ 2.25 การเรียกชื่อแต่ละส่วนของเฟืองดอกจอก	36
รูปที่ 2.26 เฟืองดอกจอกพิเศษ	36
รูปที่ 2.27 กรวยหลังและเฟือง ตรงเทียบเท่า	37
รูปที่ 2.28 แฟคเตอร์จลน์ของเฟืองดอกจอก	41
รูปที่ 2.29 เฟืองดอกจอกฟันตรงมีมุมกดคัน20° เพลาทำมุม 90°	42
รูปที่ 2.30 เฟืองดอกจอกฟันตรงที่มุกกดคัน 20° และเพลาที่ทำมุมกัน 90°	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.31 หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน........ 45
รูปที่ 2.32 หุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอก........ 46
รูปที่ 2.33 หุ่นยนต์พิกัดทรงกลม........ 46
รูปที่ 2.34 หุ่นยนต์ สคารา........ 46
รูปที่ 2.35 หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน........ 47
รูปที่ 2.36 ระยะที่เอื้อมถึงและสโตรกของหุ่นยนต์ทรงกระบอก........ 48
รูปที่ 2.37 yaw – pitch – roll ของ Tool........ 49
รูปที่ 2.38 ลำดับการหมุนแกน........ 50
รูปที่ 2.39 ระบบ YPR........ 51
รูปที่ 2.40 ระบบ RPY........ 51
รูปที่ 2.41 (ก) วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
(ข) วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ที่เขียนแทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนกลับได้ด้วยแบตเตอร์รี่ E_b........ 55
รูปที่ 2.42 กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง........ 55
รูปที่ 2.43 แสดงแรงที่กระทำต่อแกนเพลาของมอเตอร์........ 57
รูปที่ 3.1 แสดงภาพสเกตโครงหุ่นยนต์ด้วยมือ........ 59
รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบโครงหุ่นยนต์ 5 แกนด้วยโปรแกรม Mechanical Desktop 6........ 60
รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์ แบบที่ 1........ 61
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์ แบบที่ 2........ 62
รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์ แบบที่ 3........ 63
รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์ แบบที่ 4........ 64
รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์ แบบที่ 5........ 65
รูปที่ 3.8 แสดงชุดควบคุมด้วยมือที่ใช้ควบคุมโครงหุ่นยนต์........ 66
รูปที่ 4.1 แสดงโครงหุ่นยนต์ที่เสร็จสมบูรณ์ แบบที่ 1........ 69
รูปที่ 4.2 แสดงโครงหุ่นยนต์ที่เสร็จสมบูรณ์ แบบที่ 2........ 70
รูปที่ 4.3 แสดงการทดลองจับชิ้นงานของหุ่นยนต์ แบบที่ 1........ 71
รูปที่ 4.4 แสดงการทดลองจับชิ้นงานของหุ่นยนต์ แบบที่ 2........ 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของโครงงาน

ปัจจุบันพบว่าในอุตสาหกรรม ในท้องตลาด หรือในการเรียนการสอนด้านวิศวกรรม หุ่นยนต์ส่วนมากจะเป็นหุ่นยนต์แบบข้อต่อหมุน (Articulate – Coordinate หรือเรียกอีกอย่างว่า Revolution Robot) เป็นแบบที่คล้ายคลึงกับแขนของมนุษย์มากที่สุด มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน 5 แกน ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้เกือบทุกตำแหน่งภายในขอบเขตของรัศมีแขน และได้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่หุ่นยนต์เหล่านี้ไม่สามารถจะทำการถอดแยกชิ้นส่วนออกเพื่อศึกษาโครงสร้างภายในได้ ด้วยเหตุต่าง ๆ ทางกลุ่มจึงได้ทำการจัดสร้างหุ่นยนต์ชนิดนี้ เพื่อประโยชน์ในการศึกษา และพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีวิชาการออกแบบเครื่องจักรกล (Mechanical Engineering Design) วิชาโรโบติค (Robotic) และสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบ
2. เพื่อศึกษา และควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ด้วยชุดควบคุมด้วยมือ
3. เพื่อศึกษาการออกแบบ และการคำนวณโครงสร้างของโครงหุ่นยนต์

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. ออกแบบและสร้างโครงหุ่นยนต์ 5 แกน โดยสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ภายในขอบเขตของรัศมีแขนด้วยชุดควบคุมด้วยมือ โดยไม่รวมชุดโปรแกรมควบคุม
2. สร้างโครงหุ่นยนต์ที่สามารถยกน้ำหนักที่ปลายแขน 5 กิโลกรัมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีหุ่นยนต์ใช้ประกอบการเรียนการสอนในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
2. มีหุ่นยนต์ใช้ในการศึกษา และพัฒนาโปรแกรมควบคุมของนักศึกษาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบเครื่องจักรกล

การออกแบบเครื่องจักรกล เป็นวิชาว่าด้วยการนำความรู้ในด้านต่าง ๆ ในสาขาวิศวกรรมเครื่องกลและสาขาที่เกี่ยวข้อง มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรกล การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมีกระบวนการค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งต้องการความเชี่ยวชาญในหลาย ๆ ด้าน เราจำเป็นต้องจัดขั้นตอนในกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีรูปแบบซับซ้อนให้เป็นงานอย่างง่ายหลาย ๆ งานต่อเนื่องกัน ความซับซ้อนของชิ้นงานจะเป็นตัวกำหนดลำดับความสำคัญในการนำแนวคิดแบบใดมาใช้ในการออกแบบ โดยจะเริ่มกล่าวโดยทั่วไปเกี่ยวกับธรรมชาติในการออกแบบ

การออกแบบเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนหลายขั้นตอนที่ต้องทำซ้ำไปซ้ำมา ต้องมีการปรับแต่งแบบให้มีความเหมาะสมและตรงกับความต้องการ การเรียนรู้เพิ่มเติมและหาความชำนาญเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินไปอย่างไม่หยุดยั้ง ในปัจจุบันมีทรัพยากรและเครื่องมือที่ช่วยเหลือการทำงานของนักออกแบบจำนวนมาก ประกอบด้วยแหล่งทรัพยากรทางด้านข้อมูลที่มีอยู่มากมายบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต และเครื่องมือช่วยเหลือในการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในปัจจุบัน อย่างไรก็ดียังมีสิ่งอื่นที่นักออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึง ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของรหัส และมาตรฐาน ความจำเป็นทางด้านเศรษฐกิจ ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ (น.อ.ภานุฤทธิ์ ยุกตะทัต, 2547)

2.1.1 การออกแบบ

ในการออกแบบ ไม่ว่าจะเป็นการคิดวางแผนเพื่อให้ได้สิ่งที่มีคุณลักษณะตามความต้องการ หรือเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ถ้าส่งผลให้เกิดการผลิตบางสิ่งขึ้นมา ผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องมีฟังก์ชั่นการทำงานอย่างถูกต้อง สามารถใช้งานได้ มีความปลอดภัยในการใช้งาน มีความน่าเชื่อถือ สามารถผลิตได้จริง มีความสามารถในการแข่งขันในตลาด และมีตลาดสำหรับการจำหน่าย

คุณลักษณะเฉพาะสำหรับงานในการออกแบบก็คือ ปัญหาในการออกแบบจะเป็นตัวชี้แนะแนวคิดมาแก้ไขปัญหา ปัญหาบางอย่างก็อาจจะไม่มีผลลัพธ์เลยก็เป็นไปได้ ดังนั้น ในบางสถานการณ์อาจจะจำเป็นต้องใช้ความอดทนในการหาผลลัพธ์ การที่จะผ่อนคลายสถานการณ์เช่นนี้ นักออกแบบอาจจะต้องลดขีดจำกัดบางอย่างในความต้องการลงมาบ้าง และถึงแม้ว่าจะมีผลลัพธ์ แต่นักออกแบบบางคนอาจจะมีความคิดสร้างสรรค์ หรือจินตนาการไม่เพียงพอ ที่จะหาผลลัพธ์นั้น ดังนั้น ปัญหาในการออกแบบแต่ละอย่างจึงขึ้นอยู่กับพรสวรรค์หรือความสามารถพิเศษเฉพาะบุคคลของนักออกแบบด้วย นอกจากนั้นยังเป็นที่แน่นอนว่า ผลลัพธ์ที่ได้มักจะมีมากกว่า 1 หนทาง และผู้ที่รู้ถึงข้อแตกต่างของผลลัพธ์แต่ละอย่างจะเป็นผู้เลือกหนทางที่ดีที่สุด ซึ่งบุคคลผู้นี้จะต้องมีความสามารถในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้ทุกหนทาง โดยมากบุคคลเหล่านี้มักจะเลือกผลลัพธ์ที่มีคุณลักษณะเฉพาะเป็นไปตามความพึงพอใจ หรือมีคุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางอย่างดีกว่าหรือเลือกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเท่าที่จะมีความรู้เพียงพอ อย่างไรก็ดีเมื่อเวลาผ่านไป ผลลัพธ์ที่เลือกนี้อาจจะไม่ใช่สิ่งที่ต้องการอีกต่อไป ดังนั้น ผลลัพธ์นี้จึงมีการแปรเปลี่ยนไปตามกาลเวลา

การออกแบบเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ความคิดสร้างสรรค์ และมีขั้นตอนที่ต้องทำซ้ำจนกว่าจะได้สิ่งที่ต้องการ นอกจากนั้นยังเป็นกระบวนการที่ต้องการให้มีการตกลงใจ บางครั้งการตัดสินใจบางอย่างจำเป็นต้องทำทั้ง ๆ ที่ยังมีข้อมูลประกอบการตัดสินใจน้อยมาก และบ่อยครั้งที่ต้องตัดสินใจตามข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งอาจมีเฉพาะข้อมูลที่ไม่ต้องการมากจนเกินไป อาทิเช่น คนที่ใส่นาฬิกาข้อมือเรือนเดียวจะรู้ว่าขณะนี้เวลาเท่าไร ในขณะที่คนที่ใส่นาฬิกาข้อมือ 2 เรือนจะไม่มีทางแน่ใจได้เลยว่าขณะนี้เวลาเท่าไรแล้ว ดังนั้นในบางครั้งจึงต้องมีการทดลองตัดสินใจตามข้อมูลที่มีและปรับแต่ง จนกว่าจะได้ในสิ่งที่ต้องการ แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดในการตัดสินใจก็คือวิศวกรผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้สึกพอใจกับสิ่งที่ตนเองตัดสินใจ มิฉะนั้นอาจก่อให้เกิดความเครียด และรบกวนจิตใจจนกระทั่งก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพตามมา

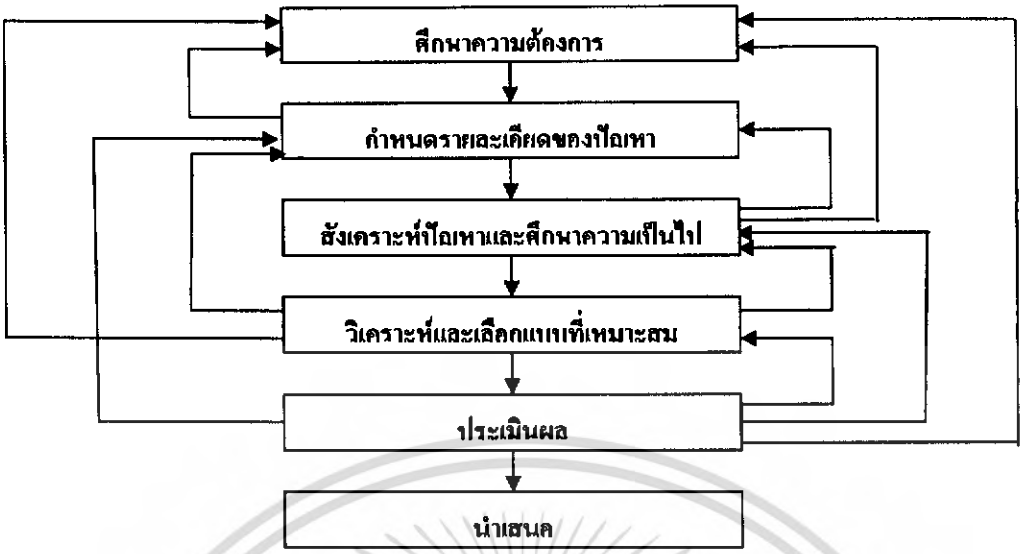
การออกแบบ คือ การสื่อสารที่มีความละเอียดอ่อน ทั้งคำอธิบายที่ใช้และรูปภาพ จะถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นงานจริง ดังนั้น ทักษะการเขียนและการใช้คำอธิบายด้วยวิธีต่าง ๆ จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบวิศวกรผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการสื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถทำงานร่วมกับผู้อื่นที่มีความรอบรู้ในเรื่องต่าง ๆ ที่ตนเองไม่มี หรือมีน้อยกว่าบุคคลต่าง ๆ เหล่านั้น ดังนั้น การมีมนุษย์สัมพันธ์ที่ดีก็คือความสามารถพิเศษอีกอย่างหนึ่งที่นักออกแบบควรจะมี เพื่อที่จะทำให้ประสบผลสำเร็จในการออกแบบ

การมีความคิดสร้างสรรค์ การมีความสามารถในการสื่อสาร และความสามารถในการแก้ไขปัญหาของนักออกแบบ จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบประกอบกับความรอบรู้ทางด้านเทคโนโลยี นอกจากนั้นเครื่องมือทางวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น วิชาคณิตศาสตร์ สถิติ คอมพิวเตอร์ การวาดภาพ และภาษา ยังมีส่วนร่วมในการทำให้ได้ผลลัพธ์การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกแบบนั้น ๆ มีฟังก์ชั่นการทำงานอย่างถูกต้อง สามารถใช้งานได้ มีความปลอดภัยในการใช้งาน มีความน่าเชื่อถือสามารถผลิตได้จริง มีความสามารถในการแข่งขันในตลาด และมีตลาดสำหรับจำหน่าย โดยไม่ต้องคำนึงถึงว่าใครจะเป็นผู้ผลิต และใครจะเป็นผู้ใช้งาน

2.1.2 กระบวนการในการออกแบบ

มีคำถามเป็นจำนวนมากที่วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องหาคำตอบ อาทิเช่น จะเริ่มต้นออกแบบอย่างไร จะต้องมีการจดบันทึกแนวคิดในการออกแบบอย่างไร มีปัจจัยอะไรบ้างที่มีอิทธิพลหรือมีส่วนในการควบคุมการตัดสินใจ และมีขั้นตอนในการออกแบบอย่างไรจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนในการออกแบบ

กระบวนการในการออกแบบตั้งแต่เริ่มต้นจนจบโดยทั่วไปมักจะมีขั้นตอนดังแสดงตามรูปที่ 2.1 (น.อ.ภานุ ฤทธิ์ ยุกตะทัต, 2547) โดยจะเริ่มตั้งแต่การศึกษาความต้องการ และตกลงใจว่าจะทำอย่างไร หลังจากที่ทำการออกแบบซ้ำไปซ้ำมาหลาย ๆ ครั้ง กระบวนการจะสิ้นสุดลงที่การมีแผนดำเนินงานซึ่งตรงกับความต้องการอย่างเป็นที่น่าพอใจ ขั้นตอนการออกแบบหลายๆ ขั้นตอนอาจจำเป็นต้องมีการพิจารณาทบทวนใหม่อยู่ตลอดเวลา ขั้นตอนในการออกแบบที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ เป็นหลักเกณฑ์อย่างกว้าง ๆ ซึ่งในการออกแบบจริงอาจจะมีขั้นตอนที่แตกต่างไปบ้าง

2.1.2.1 <u>การศึกษาความต้องการ</u>

ในบางครั้งการออกแบบจะเริ่มขึ้นเมื่อมีผู้ใดผู้หนึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความต้องการ ดังนั้น ก่อนที่จะเริ่มทำการออกแบบ วิศวกรจะต้องศึกษาถึงความต้องการของสังคมว่า มีความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะใดบ้าง ในขั้นตอนนี้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ความคิดสร้างสรรค์เป็นอย่างสูง เนื่องจากบางครั้งความต้องการที่ว่านี้อาจเป็นเพียงความรู้สึกที่คลุมเครือ หรือลางสังหรณ์ที่ไม่ค่อยจะถูกต้อง โดยมากความต้องการในเบื้องต้นมักจะไม่มีความชัดเจน ดังนั้น วิศวกรผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องศึกษาความต้องการให้เข้าใจอย่างลึกซึ้ง ตัวอย่างเช่น หากมีความต้องการที่จะได้เครื่องจักรสำหรับปิดผนึกอาหารแช่แข็ง วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องศึกษาสภาวะแวดล้อมในการนำไปใช้งานด้วย อาทิเช่น มีข้อจำกัดในเรื่องความดังของเสียงหรือไม่ ต้องการที่จะนำไปใช้ในการปิดผนึกสำหรับภาชนะในรูปแบบต่าง ๆ หรือไม่ จากนั้นจึงกำหนดปัญหาที่จะทำการออกแบบ

2.1.2.2 <u>การกำหนดรายละเอียดของปัญหา</u>

หลังจากที่ทราบความต้องการ และสามารถกำหนดเรื่องที่จะทำการออกแบบได้แล้ว วิศวกรจะต้องกำหนดหลักเกณฑ์ที่จะใช้ในการออกแบบของสิ่งนั้น และกำหนดรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของชิ้นงานที่จะทำการออกแบบ ไม่ว่าจะเป็นขนาดของเนื้อที่ที่ต้องการ และข้อจำกัดต่าง ๆ โดยทั่วไปการกำหนดรายละเอียดมักจะกำหนดคุณลักษณะเฉพาะตามมาตรฐานอุตสาหกรรม หรือข้อกำหนดของสมาคมผู้ผลิต ในขั้นตอนนี้ วิศวกรผู้ออกแบบอาจเริ่มต้นจากการกำหนดลักษณะเฉพาะในเบื้องต้นของชิ้นงานโดยใช้รูปแบบที่ง่ายที่สุด และกำหนดว่ามีอินพุตและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุตเท่าไร มีข้อจำกัดอะไรบ้าง และต้องการให้มีคุณภาพในการทำงานอย่างไร จากนั้นก็ค่อย ๆ เพิ่มเติมองค์ประกอบต่าง ๆ ตามที่ได้ศึกษามาจากความต้องการ จนในที่สุดก็จะได้รายละเอียดคุณลักษณะทั้งหมดของงานที่ทำการออกแบบ คุณลักษณะเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดว่าจะมีราคาเท่าไร ต้องการผลิตจำนวนมากเท่าไร อุณหภูมิในการใช้งานเท่าไร และมีความน่าเชื่อถือเท่าไร

2.1.2.3 <u>การสังเคราะห์ปัญหาและศึกษาความเป็นไปได้</u>

เมื่อกำหนดหลักเกณฑ์และรายละเอียดที่จะใช้ในการออกแบบแล้ว ก็ต้องนำรายละเอียดของปัญหาเหล่านั้นมาศึกษาความเป็นไปได้ของสิ่งที่จะทำการออกแบบ ทั้งในด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์โดยแยกการกระทำของเครื่องจักรกลตามกลุ่มการทำงาน และเขียนวิธีการแก้ปัญหาทุกวิธีที่เป็นไปได้ในรูปแบบทั่วไป และแยกพิจารณาในทุกวิธี ทำการสังเคราะห์และศึกษาความเป็นไปได้โดยหาข้อดี-ข้อเสีย สำหรับการแก้ปัญหาแต่ละวิธี ด้วยการสเกตเป็นรูปแบบอย่างง่าย หากผลของการศึกษาพบว่าไม่สามารถที่จะออกแบบชิ้นงานตามความต้องการได้ ก็จำเป็นที่จะต้องทบทวนหลักเกณฑ์และรายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการออกแบบเสียใหม่

2.1.2.4 <u>การวิเคราะห์และเลือกแบบที่เหมาะสม</u>

เมื่อทราบว่ามีความเป็นไปได้ในการที่จะสร้างชิ้นงานให้เป็นไปตามแบบ ก็จะต้องวิเคราะห์ว่าจะสามารถใช้งานได้ดีเพียงใด อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจแค่ไหน หรือมีประสิทธิภาพเป็นไปตามความต้องการมากน้อยเพียงใด นอกจากนั้นวิศวกรผู้ออกแบบยังต้องเปิดใจให้กว้างในการยอมรับแนวความคิดแบบใหม่ ๆ ของผู้อื่นมาประกอบการวิเคราะห์แนวทางการออกแบบ โดยทั่วไปมักจะมีหนทางเลือกในการออกแบบหลายหนทาง ในขั้นตอนนี้วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องตกลงใจเลือกวิธีการในการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดและสามารถใช้ชิ้นงานนั้นอย่างมีประโยชน์สูงสุด เพื่อใช้ในการออกแบบในเบื้องต้น

2.1.2.5 <u>การประเมินผล</u>

เมื่อทำการออกแบบในเบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนที่นับว่ามีความสำคัญในกระบวนการออกแบบก็คือการประเมินผล ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างต้นแบบตามรายละเอียด แล้วจึงทำการประเมินผลด้วยการทดสอบสมรรถนะ และการทำงานของชิ้นงานที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น ถ้าต้นแบบนั้นไม่สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการก็ต้องทำการปรับปรุงแก้ไข แล้วทำการทดสอบใหม่ ทำเช่นนี้จนวิศวกรผู้ออกแบบพึงพอใจต่อชิ้นงานนั้น ๆ ภายใต้ขีดจำกัดในด้านราคา ขนาด และอื่น ๆ

2.1.2.6 <u>การนำเสนอแบบ</u>

ขั้นตอนสุดท้ายในการออกแบบคือ การสื่อสารที่จะสามารถนำไปสู่วิธีการออกแบบเพื่อการผลิตนั่นคือ การนำเสนอไม่ว่าจะเป็นการนำเสนอด้วยคำพูด การเขียน การวาดภาพ โดยแบบที่นำเสนอจะต้องมีความสมบูรณ์และชัดเจน จากนั้นจึงเริ่มทำการออกแบบเพื่อทำการผลิตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ข้อควรพิจารณาในการออกแบบ

ในบางครั้งความทนทานของชิ้นงานที่ส่วนประกอบในระบบ จะเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณารูปทรงทางเรขาคณิตและขนาดของชิ้นงาน ในกรณีเช่นนี้ความแข็งแรงของชิ้นงานจึงเป็นข้อพิจารณาหลักในการออกแบบ นอกจากนั้นยังมีคุณลักษณะเฉพาะที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบอีกหลายประการ ดังต่อไปนี้

- ฟังก์ชันในการทำงาน
- ความเค้น / ความเครียด
- การบิดรูป / ความยืดหยุ่น / ความแข็งแกร่ง
- การสึก
- การกัดกร่อน
- ความปลอดภัย
- ความน่าเชื่อถือ
- สามารถผลิตได้
- มีความเป็นเอกลักษณ์
- ราคา
- แรงเสียดทาน
- น้ำหนัก
- เสียง
- รูปลักษณ์
- รูปทรง
- ขนาด
- การควบคุม
- อุณหภูมิการใช้งาน
- พื้นผิว
- การหล่อลื่น
- มีตลาด
- การบำรุงรักษา
- ปริมาณการผลิต
- มีแหล่งทรัพยากรในการผลิต

ข้อพิจารณาทางด้านราคาของชิ้นงาน นับว่ามีบทบาทสำคัญในกระบวนการตกลงใจในการออกแบบ การศึกษาปัจจัยในด้านราคา ไม่ว่าจะเป็นต้นทุนหรือราคาขาย โดยมากมักจะใช้เวลาเท่ากับการศึกษาความต้องการทั้งหมดในการออกแบบชิ้นงาน

งบประมาณในการลงทุนมักจะขึ้นอยู่กับค่าแรงและค่าวัสดุซึ่งมักจะสูงขึ้นทุก ๆ ปี แต่ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตก็ดูเหมือนว่าจะลดลงได้เช่นกัน เป็นต้นว่ามีการใช้เครื่องมืออัตโนมัติ และหุ่นยนต์ประเภทต่าง ๆ มาใช้แทนแรงงานคน นอกจากนั้นราคาต้นทุนในการผลิตยังผันแปรไปตามพื้นที่ ๆ ตั้งโรงงาน ไม่ว่าจะเป็นค่าแรง ค่าขนส่ง และค่าภาษี สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้จึงนับว่าเป็นจุดเริ่มต้นที่วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก

2.1.4 เครื่องมือช่วยเหลือและทรัพยากรในการออกแบบ

ในปัจจุบัน มีเครื่องมือและทรัพยากรที่ช่วยเหลือวิศวกรผู้ออกแบบในการแก้ปัญหาการออกแบบอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรมที่สามารถจำลองชิ้นงานที่ออกแบบให้โดยอัตโนมัติ นอกเหนือจากเครื่องมือต่าง ๆ แล้ววิศวกรผู้ออกแบบยังต้องการข้อมูลทางด้านเทคนิค ตั้งแต่ระดับพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ จนกระทั่งคุณลักษณะเฉพาะของชิ้นส่วนต่าง ๆ ข้อมูลเหล่านี้มีอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ตั้งแต่หนังสือ แค็ตตาล็อก แผ่นพับโฆษณา หรือแม้กระทั่งข้อมูลทางอินเตอร์เน็ต

โปรแกรมประเภท CAD (Computer – Aides Design) เป็นซอฟต์แวร์ช่วยเหลือในการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการแสดงผลรูปแบบ 2 มิติที่วิศวกรออกแบบ ให้เป็นรูปแบบ 3 มิติโดยอัตโนมัติ และสามารถส่งผลลัพธ์ที่ได้ไปยังเครื่องมือช่วยในการผลิตเพื่อสร้างชิ้นงานต้นแบบได้โดยตรง การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในลักษณะนี้ จะมีข้อดีคือ สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันมีซอฟต์แวร์โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภท CAD ให้วิศวกรผู้ออกแบบเลือกใช้เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น AutoCAD, Aries, CadKey, I – Deas / Unigraphics และ ProEngineering เป็นต้น นอกจากนั้นวิศวกรผู้ออกแบบยังอาจจะจำเป็นต้องใช้เครื่องมือการคำนวณทางวิศวกรรมอย่างอื่นในการอกแบบ อาทิเช่น โปรแกรมประเภท FEA (Finite Element Analysis) เช่น Algore, ANSIS และ MSC / NASTRAN ในการวิเคราะห์ค่าความเค้น ค่าความเบี่ยงเบน การสั่นสะเทือน หรือโปรแกรมประเภท CED (Computational Fluid Dynamics) เช่น CFD++, FIDAP และ Fluent ในการวิเคราะห์การไหลของของไหล หรือโปรแกรมจำลองแรงทางพลศาสตร์ และการเคลื่อนไหวทางกล เช่น ADAMS, DADS และ Working Model เป็นต้น

2.2 เพลา และลิ่ม

เพลาเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของเครื่องจักรกลทุกชนิด เครื่องจักรกลเกือบจะทุกประเภทมีส่วนหนึ่งที่ใช้ถ่ายทอดการหมุน หรือทั้งการหมุนและกำลัง โดยอาศัยชิ้นส่วนที่สำคัญคือ เพลา

2.2.1 ชนิดของเพลา

เพลาถ่ายทอดกำลังอาจจะแบ่งตามชนิดของโหลด (Load) ได้ดังนี้

2.2.1.1 <u>เพลาถ่ายทอดกำลัง (Transmission Shafts)</u>

ชนิดนี้ใช้รับเฉพาะการบิดอย่างเดียว หรืออาจจะรับทั้งการบิดและการดัดผสมกัน กำลังจะถ่ายทอดผ่านเพลาโดยอาศัยแผ่นประกับต่อเพลา (Coupling) เฟือง, มู่เล่และสายพาน หรือ จานโซ่และโซ่ ฯลฯ

2.2.1.2 <u>เพลาสั้น (Spindle)</u>

ในการใช้งานทั่วไปใช้รับเฉพาะการบิดเพียงอย่างเดียว มักจะมีขนาดค่อนข้างสั้น เช่นที่เพลาประธาน (Main shaft) ของเครื่องจักรกลต่าง ๆ เพลาพวกนี้ต้องการรูปร่าง และขนาดที่ถูกต้องจริง ๆ แม้ในขณะที่ใช้งาน

2.2.1.3 <u>เพลาคาน (Axles)</u>

เพลาชนิดนี้ใช้ต่ออยู่ระหว่างล้อของรถยนต์ รถบรรทุก รถพ่วง ฯลฯ (บางครั้งเรียกว่าคาน) โดยปกติแล้วเพลาแบบนี้ไม่ได้ออกแบบไว้ให้หมุน แต่จะให้รับการดัดเพียงอย่างเดียว นอกจากในกรณีที่ถูกออกแบบให้ใช้เป็นเพลาขับเท่านั้น นอกจากจะแบ่งเพลาตามชนิดของโหลดแล้ว อาจจะแบ่งออกตามชนิดของรูปร่างได้อีก คือเพลาตรง เพลาข้อเหวี่ยงที่ใช้เป็นเพลาประธานของเครื่องยนต์ลูกสูบ เพลาอ่อน (Flexible shafts) ที่ใช้ถ่ายทอดกำลังน้อย ๆ และในทิศทางใด ๆ เป็นต้น

2.2.2 จุดสำคัญในการออกแบบเพลา

ในการออกแบบเพลามีจุดที่ควรพิจารณาดังนี้

2.2.2.1 <u>ความแข็งแรงเพลา</u>

ดังได้กล่าวมาบ้างแล้วว่าเพลาที่ถ่ายทอดกำลังจะต้องรับการบิดและการดัดหรือทั้งสองอย่าง แต่มีเพลาบางแบบที่อาจจะรับการดึงหรือการอัดด้วย เช่น เพลาของกังหันน้ำแบบล้อ (Water wheel) หรือ เพลาขับของเรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังจะต้องพิจารณาเรื่องการล้อ การกระแทก หรืออิทธิพลของการรวมจุดความเค้น(Stress concentration) เนื่องมาจากการเปลี่ยนขนาดเพื่อทำบ่า หรือเมื่อมีการเซาะร่องลิ่ม

ดังนั้น เพลาที่จะออกแบบต้องแข็งแรงพอที่จะรับโหลดดังกล่าวทั้งหมดได้

2.2.2.2 ความแข็งแกร่งของเพลา

นอกจากจะต้องแข็งแรงพอแล้วในขณะที่ใช้งานเพลาอาจจะโก่งหรือบิดเบี้ยวมาก อันอาจจะทำให้ผลิตผลที่ผลิตโดยเครื่องจักรนั้น ๆ ผิดพลาดไป หรือทำให้การขบกันของฟันเฟืองไม่สนิท ทำให้เกิดเสียงดังและสั่นสะเทือน ด้วยเหตุนี้ ในการออกแบบเพลาจึงต้องนำเอาความแข็งแกร่งเข้ามาพิจารณาร่วมกับความแข็งแรงด้วย แต่ทั้งนี้ก็ต้องพิจารณาประกอบด้วยว่าเพลานั้น ๆ ออกแบบขึ้นเพื่อใช้กับงานหรือเครื่องจักรกลชนิดใดด้วย

2.2.2.3 ความเร็ววิกฤต

ถ้าความเร็วของเพลาถูกเพิ่มขึ้นมาก ๆ จะพบว่าที่ความเร็วหนึ่ง เพลามีความสั่นสะเทือนมากขึ้นอย่างผิดปกติในทันทีทันใด ความเร็วที่เกิดการสั่นสะเทือนมากนี้เรียกว่า "ความเร็ววิกฤต" อาการเช่นนี้มักจะเกิดกับกังหันที่หมุนด้วยความเร็วสูง เครื่องยนต์สันดาปภายใน มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น หากเราทิ้งไว้ที่ความเร็วนี้เป็นเวลานานเพลาอาจเสียหาย ดังนั้น สำหรับชิ้นส่วนที่หมุนด้วยความเร็วสูงจึงต้องระมัดระวังให้ความเร็วใช้งานต่ำกว่าความเร็ววิกฤตเสมอ

2.2.2.4 การกัดกร่อน

เพลาของเครื่องจักรกลบางชนิด เช่นเพลาขับของเรือ เพลาของปั๊มที่สัมผัสกับของเหลวที่มีการกัดกร่อนหรือเพลาของเครื่องจักรที่มีช่วงที่หยุดใช้เป็นเวลานาน จะต้องเลือกทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติต่อต้านกับการกัดกร่อนได้ดี (รวมทั้งพลาสติกด้วย) การเลือกวัสดุที่ถูกต้องและเหมาะสมจะช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักร และลดเวลาที่ต้องหยุดซ่อมแซมก่อนถึงเวลาอันสมควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 เหล็กคาร์บอนที่ผ่านกรรมวิธีดึงเย็นและแต่งผิวให้เรียบสำหรับทำเพลา

มาตรฐานและชนิด	สัญลักษณ์	กรรมวิธีชุบแข็ง	ความเค้นดึง [1] (กก./ มม^2)	หมายเหตุ
เหล็กคาร์บอน (JIS.G.4501)	S 30 C	อบอ่อนนอกเตา	48 หรือมากกว่า	
	S 35 C	"	52 หรือมากกว่า	
	S 40 C	"	55 หรือมากกว่า	
	S 45 C	"	58 หรือมากกว่า	
	S 50 C	"	62 หรือมากกว่า	
	S 55 C	"	66 หรือมากกว่า	
เหล็กคาร์บอนดึงเย็นแต่งผิวเรียบ	S 35 C - D	-	53 หรือมากกว่า	ดึงเย็นแต่งผิวให้เรียบด้วยการเจียรนัยหรือวิธีอื่นหรือผสมกัน
	S 45 C - D	-	60 หรือมากกว่า	
	S 55 C - D	-	72 หรือมากกว่า	

2.2.2.5 <u>วัสดุที่ใช้ทำเพลา</u>

เพลาของเครื่องจักรกลส่วนมากมักทำโดยกรรมวิธีดึงเย็น (Cold drawn) แล้วแต่งผิวให้เรียบ โดยนำแท่งเหล็กเหนียว (เรียกว่า S-C material) ที่ได้มาจากเหล็กเหนียวแท่งฆ่าออกซิเจน (killed ingot) ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ตามเปอร์เซ็นต์ที่กำหนด เช่น JIS.G 3123 หรือในตารางที่ 2.1 แต่วัสดุที่ได้ตามวิธีการดังกล่าวไม่ตรงอย่างแท้จริง และจะมีความเค้นหลงเหลืออยู่ในวัสดุ (residual stress) เมื่อนำมาเซาะร่องลิ่มก็จะทำให้เพลาคดเนื่องมาจากความไม่สมดุลของแรงเค้นที่หลงเหลือนี้ แต่ในขณะเดียวกันการดึงเย็นก็จะทำให้ผิวของเพลาแข็งพลอยทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไปด้วย

2.3 ตลับลูกปืนชนิดต่างๆ

ประโยชน์ของตลับลูกปืน คือ จะให้ความฝืดหมุนต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับความฝืดเลื่อนไถลทำให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานต่ำ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (สมยศ จันเกษม, ศาสตร์ตราจารย์ คิโยคัตสึ ซึงจัง, 2523) จะเห็นว่าลูกปืนกลม หรือทรงกระบอกที่ได้สร้างมาอย่างถูกต้อง ทั้งรูปร่างขนาด และความเรียบ ถูกสอดไว้ระหว่างรางนอกและรางใน หรืออยู่ระหว่างรางที่หมุนและรางที่อยู่นิ่ง ๆ โดยการหมุนรางใดรางหนึ่ง ลูกปืนกลมหรือทรงกระบอก จะกลิ้งอยู่ในรางที่จัดไว้ และทำให้ความฝืดระหว่างรางและลูกปืนลดลงอย่างมากแต่เนื่องจากพื้นผิวที่สัมผัสกันน้อยมาก ดังนั้น โหลดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงมีค่าสูงด้วยเหตุนี้ วัสดุที่ใช้ทำจึงควรจะต้องมีความแข็งแรง และมีความแข็งสูงด้วย

ตลับลูกปืนก็คล้าย ๆ กับกาบเพลา คือจัดออกเป็นแบบต่าง ๆ หลายแบบ เช่นตลับลูกปืนในแนวรัศมีซึ่งใช้รับโหลดทางแนวรัศมีเป็นส่วนใหญ่ โดยมีโหลดในแนวแกนได้บ้างเล็กน้อย และตลับลูกปืนที่รับโหลดดันรุนในแนวขนานกับแนวแกนของเพลา

แต่เมื่อพิจารณาจากรูปร่างของลูกปืน ตลับลูกปืนอาจจะแบ่งออกได้เป็น ลูกปืนกลม และลูกปืนทรงกระบอก นอกจากนี้ อาจจะแบ่งต่อออกไปได้อีก โดยพิจารณาจากจำนวนแถวและโครงสร้างภายในของตลับลูกปืนที่รางนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือรางในสามารถถอดแยกออกจากกันได้ เรียกว่า แบบถอดแยกได้ ส่วนแบบที่แยกออกจากกันไม่ได้ เรียกว่าแบบถอดแยกไม่ได้

ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมร่องลึกแถวเดียว

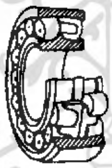
ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมแมกนีโต

ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมแถวเดียวสัมผัสมุม

ตลับลูกปืนแบบลูกปืนลูกปืนกลมปรับตัวได้แถวคู่

ตลับลูกปืนแบบลูกปืนทรงกระบอกแถวเดียว

ตลับลูกปืนแบบลูกปืนรูปกรวยแถวเดียว

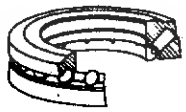


ตลับลูกปืนแบบลูกปืนทรงกระบอกกลม

ตลับลูกปืนแบบลูกปืนเข็ม

ตลับลูกปืนแบบลูก ปืนกลมกันรุนแถวเดียว

ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมกันรุนสัมผัสมุมแถวคู่



ตลับลูกปืนแบบลูกปืนทรงกระบอกกลมกันรุนแถวเดียว

รูปที่ 2.2 ตลับลูกปืนชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาตามที่ใช้ ตลับลูกปืนอาจแบ่งออกได้เป็น ตลับลูกปืนสำหรับใช้กับรถยนต์ตลับลูกปืนสำหรับเครื่องจักรกลต่าง ๆ และตลับลูกปืนสำหรับเครื่องวัด ตลับลูกปืนธรรมดาทั่ว ๆ ไป มีการกำหนดขนาดและมิติต่าง ๆ ไว้ในมาตรฐาน ของ ISO (International Organization for Standardization) ยกเว้นตลับลูกปืนที่ใช้กับรถยนต์ซึ่งมีมิติ และขนาดพิเศษ ขึ้นอยู่กับงานที่จะใช้โดยเฉพาะ

2.3.1 ความสามารถในการใช้งานของตลับลูกปืน

2.3.1.1 <u>ความสามารถในการรับโหลดในแนวรัศมี</u>

ตลับลูกปืน รัศมีที่มีมุมสัมผัสระหว่างลูกปืนและรางมาก สามารถรับโหลดในแนวแกนได้บ้างเช่นกัน

สำหรับแบบรางลึก และแบบลูกปืนทรงกระบอกเรียวที่มีมุมสัมผัสมาก สามารถรับโหลดในแนวแกน (โหลดคันรุน) ได้บ้าง ส่วนแบบที่ปรับตัวเองได้นั้น ลูกปืนกลม หรือทรงกระบอกกลม สามารถจะจัดตำแหน่งของตัวเองตามการโก่งของเพลา แต่แบบนี้ สามารถรับโหลดในแนวแกนได้น้อยกว่าแบบที่กล่าวมาแล้ว

ส่วนตลับลูกปืนแบบลูกปืนทรงกระบอก โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ใช้เพื่อรับแต่โหลดในแนวรัศมีอย่างเดียว อย่างไรก็ดี บางแบบก็ได้มีการออกแบบขึ้นมาพิเศษเพื่อให้รับโหลดในแนวแกนได้ด้วย

2.3.1.2 <u>ความสามารถในด้านความเร็ว</u>

ขีดจำกัดทางด้านความเร็วของตลับลูกปืน คือตัวเลขที่ได้จากผลคูณระหว่างความโตของเพลา (d) (มม.) กับความเร็ว n (รอบ/นาที) แต่ทั้งนี้ ยังขึ้นอยู่กับการให้การหล่อลื่น และชนิดของตลับลูกปืนด้วย ตารางที่ 2.2 ได้ให้ค่านี้ไว้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกตลับลูกปืนไปใช้งาน แต่ส่วนมากแล้วตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมที่มีรางลึกหรือสัมผัสมุม และแบบลูกปืนทรงกระบอก เหมาะที่จะใช้กับงานที่มีความเร็วสูง ๆ ตลับลูกปืนแบบ ลูกปืนทรงกระบอกเรียว กับพวกที่ปรับตัวเองได้เหมาะกับงานที่มีความเร็วปานกลางส่วนตลับลูกปืนกันรุนนั้นจะใช้กับงานที่มีความเร็วต่ำๆ เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดของค่า *d-n*

ชนิดของตลับลูกปืน	หล่อลื่นด้วยจารบี	หล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่น
ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมรางลึก	200,000	350,000
ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมสัมผัสมุม $a \leq 22°$	200000	350,000
ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมสัมผัสมุม $a > 22°$	150,000	300,000
ตลับลูกปืนแบบลูกปืนทรงกระบอก	200,000	350,000
ตลับลูกปืนแบบลูกปืนทรงกระบอกเรียว	120,000	200,000
ตลับลูกปืนแบบปรับตัวเองได้	100,000	150,000
ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมรับโลดในแนวแกน	60,000	90,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ให้ไว้ในตารางเป็นขีดจำกัดของการใช้งานที่ต่อเนื่อง และภายใต้การทำงานแบบธรรมดา สำหรับตลับลูกปืนที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในต่ำกว่า 10 (มม.) หรือมากกว่า 200 (มม.) ค่า $d \times n$ จะต้องต่ำกว่าค่าที่ให้ไว้ในตาราง ในกรณีที่ใช้จารบีหล่อลื่น ค่าขีดจำกัดนี้หมายถึงอายุของจารบีที่ 1000 (ชม.) ถ้าตลับลูกปืนจุ่มอยู่ในอ่างน้ำมันหล่อลื่น อายุการใช้งานจะประมาณ 2-2.5 เท่าของค่าที่ให้ไว้ในตาราง แต่ถ้าใช้ปั๊มน้ำมันหล่อลื่นช่วยอายุการใช้งานจะประมาณ 3-5 เท่าของค่าที่ให้ไว้ในตาราง

2.3.1.3 ความสามารถในด้านความฝืด

ตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลม หรือทรงกระบอกกลม มีค่าความฝืดต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับรองลื่นแบบอื่นๆ ยิ่งเมื่อใช้รองลื่นกับพวกเครื่องมือวัดต่าง ๆ ด้วยแล้ว ความสามารถในด้านความฝืดจะเป็นแฟคเตอร์สำคัญที่ต้องพิจารณาในขณะออกแบบ

2.3.1.4 ความสามารถในทางการสั่นสะเทือน และการส่งเสียงดัง

องค์ประกอบสำคัญที่เกี่ยวกับเรื่องนี้คือความกลมของลูกปืน ความโค้งมนของราง ความหยาบของผิวลูกปืนและราง สภาพของตัวแยกลูกปืน และความบริสุทธิ์ของน้ำมันหล่อลื่น ฯลฯ ตัวประกอบอื่น ๆ ที่รองลงมาได้แก่ความถูกต้องในการประกอบ และความละเอียดในการผลิต ต้นเหตุของการสั่นสะเทือนและส่งเสียงดัง มีหลายอย่างประกอบกัน จนถึงปัจจุบัน ยังไม่มีผู้ใดสามารถเอาชนะได้โดยเด็ดขาดจริง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทของตลับลูกปืน และคุณสมบัติต่าง ๆ ของแต่ละประเภท

ประเภท: โหลด	ประเภท: ลูกปืน	ประเภท: แถว	ประเภท: ชนิด	คุณสมบัติ: โหลดในแนวรัศมี	คุณสมบัติ: โหลดในแนวแกน	คุณสมบัติ: ความเร็วหมุน	คุณสมบัติ: ความต้านทานต่อการกระแทก	คุณสมบัติ: ความฝืด	ความปราณีต **
แนวรัศมี	ลูกปืนกลม	แถวเดี่ยว	รางลึก	ปานกลาง	ปานกลาง	สูงมาก	ต่ำ	ต่ำ	สูง
			ปรับตัวเองได้	น้อยมาก	น้อยมาก	สูง	ต่ำมาก	ต่ำมาก	
		สองแถว	ปรับตัวเองได้	น้อย	น้อยมาก	สูง	ต่ำมาก	ต่ำ	ปานกลาง
			รางลึก	ปานกลาง	น้อย	ปานกลาง	ต่ำ		
	ลูกกลิ้ง ทรงกระบอก	แถวเดี่ยว	แบบ N. NU*	มาก	ไม่ได้	สูง	สูง	ต่ำ	สูง
		แถวคู่	แบบ NN		ไม่ได้	สูง	สูง	ปานกลาง	สูง
	ลูกกลิ้ง ทรงกลม	แถวคู่	ปรับตัวเองได้	มากเป็นพิเศษ	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง
ผสม	ลูกปืนกลม	แถวเดี่ยว	สัมผัสมุม	ปานกลาง	ค่อนข้างมาก	สูงมาก	ต่ำ	ต่ำ	สูง
			แมกนีโต	น้อย	น้อย	สูง			
		แถวคู่	สัมผัสมุม	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง			ปานกลาง
	ลูกกลิ้งทรงกรวย	แถวเดี่ยว		มาก	มาก	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ	สูง
		แถวคู่*		มากเป็นพิเศษ					ปานกลาง
แนวแกน	ลูกปืนกลม	แถวเดี่ยว,แถวคู่		ไม่ได้	ค่อนข้างมาก	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	สูง
	ลูกกลิ้ง ทรงกระบอก	แถวเดี่ยว,แถวคู่,สามแถว*			มากเป็นพิเศษ	ต่ำมาก	สูง	สูง	ปานกลาง
	ลูกกลิ้ง ทรงกรวย	แถวเดี่ยว*				ค่อนข้างต่ำ			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* ต้องสั่งทำเป็นพิเศษ

**ความประณีตที่ระบุในตารางเป็นความประณีตสูงสุดที่ใช้อยู่

ตารางที่ 2.3 ได้แสดงความสามารถ และลักษณะเฉพาะตัวของตลับลูกปืนไว้อย่างกว้าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณา

2.3.2 วัสดุทำตลับลูกปืน

รางและลูกปืนส่วนมากแล้วทำด้วยเหล็กที่มีคาร์บอนสูงผสมกับโครเมียมจากนั้น ใช้กระบวนการทางความร้อนช่วยเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน และทำให้ทนต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังได้มีการค้นคว้า ปรับปรุงวัสดุที่ใช้ทำตลับลูกปืนที่ได้มากจากการหลอมเหล็กในสุญญากาศ แต่วิธีนี้ยังไม่เหมาะสมกับการผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก อย่างที่มีทำกันในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากราคาแพง ส่วนมากแล้ว การหลอมชนิดนี้มักจะใช้เพื่อการผลิตเหล็กบริสุทธิ์เสียมากกว่า

ยังมีการผลิตลูกปืนด้วยเหล็กที่ได้รับการหลอมเป็นพิเศษอีกแบบหนึ่ง คือการหลอมเหล็กให้ละลายในอากาศธรรมดา แล้วนำไปไว้ในที่ ๆ มีความดันต่ำ ๆ (เกือบสุญญากาศ) ทำให้ก๊าซที่ผสมอยู่ในเหล็กลอยหนีออกมาเหล็กที่ได้จากกรรมวิธีนี้ จะมีความแข็งแรงกว่าแบบที่ได้มาจากการหลอมธรรมดาสำหรับตลับลูกปืนที่ออกแบบให้รับการกระแทกโดยตรง มักจะทำด้วยเหล็กผสมที่มีคาร์บอนต่ำ และได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนจนมีโครงสร้างเป็นซีเมนต์ไทท์ สำหรับตลับลูกปืนที่ต้องการให้ทนทานต่อการกระแทก และต้านทานต่อการกัดกร่อนด้วย จะทำด้วยเหล็กความเร็วสูง (High speed steel) หรือพวกที่เป็นเหล็กมาเทนไซท์ (marten site) ที่อยู่ในตระกูลเหล็กสเตนเลส

สำหรับพวกตัวแยก ซึ่งจะเลื่อนไถลสัมผัสกับลูกปืนตลอดเวลา จะต้องต้านทานต่อการสึกหรอและจะต้องไม่เสียได้โดยง่าย ถ้าเป็นตลับลูกปืนเล็ก ๆ มักจะทำมาจากเหล็กแผ่นเล็ก ๆ (Band steel) ที่มีคาร์บอนต่ำ หรือพวกเหล็กแผ่นผิวเรียบโดยการอัดขึ้นรูป แต่สำหรับการใช้งานพิเศษ มักจะทำมาจากพวกแผ่นทองเหลือง หรือแผ่นเหล็กสเตนเลส ส่วนตลับลูกปืนขนาดใหญ่ มักจะใช้เหล็กที่มีคาร์บอนต่ำ หรือทองเหลืองที่มีความแข็งแรงดึงสูง ๆ นอกจากนี้ ยังมีตลับลูกปืนที่ทำขึ้นเพื่อใช้กับงานที่มีความเร็วสูง ๆ ซึ่งทำด้วยพลาสติกอีกด้วย

สำหรับหมุดที่ใช้ย้ำให้ตัวแยกติดกัน ส่วนมากมักทำด้วยเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีคุณภาพดี

2.3.3 ขนาดระบุของตลับลูกปืน

เนื่องจากขนาดของตลับลูกปืนได้มีการกำหนดไว้เป็นมาตรฐานสากล ดังนั้นในทางปฏิบัติ ขนาดของตลับลูกปืนจึงจะต้องเลือกมาจากหนังสือคู่มือ (Catalog) ของตลับลูกปืนที่บริษัทผู้ผลิตได้ทำขึ้น

มิติที่สำคัญของตลับลูกปืนได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู (เพลา) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ความกว้าง และมุมต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้ว มักจะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเป็นบรรทัดฐานและพิจารณาร่วมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และความหนาที่ต่าง ๆ กันออกไป

ขนาดระบุของตลับลูกปืนประกอบไปด้วยตัวเลขหลัก และสัญลักษณ์ประกอบ ตัวเลขหลักที่ใช้กันคือสัญลักษณ์ของชนิด สัญลักษณ์ของขนาด (สัญลักษณ์ของความกว้าง เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก) หมายเลขขนาดของรูสัญลักษณ์และมุมสัมผัส ส่วนสัญลักษณ์ประกอบได้แก่พวกสัญลักษณ์ของตัวแยก ของกันรั่วและสัญลักษณ์ของการกันรั่ว รูปร่างของราง การประกอบ ช่องว่าง และสัญลักษณ์ของชั้นต่าง ๆ แต่ตามปกติแล้วสัญลักษณ์เหล่านี้มักจะไม่พูดถึงกัน นอกจากจะได้มีการระบุไว้เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ตัวเลขใช้แทนชนิดของตลับลูกปืน เช่น หมายเลข 6 ใช้แทนตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมรางลึกแถวเดียว ส่วนตลับลูกปืนแบบลูกปืนทรงกระบอก แทนได้ด้วยตัวหนังสือ เช่น N, NF และ NU ซึ่งหมายถึงชนิดของปลอก (collar)

สัญลักษณ์ของขนาดใช้แทนความกว้าง ถ้าหากตลับลูกปืนเป็นชนิดที่รับโหลดในแนวรัศมีแต่ถ้าเป็นตลับลูกปืนรับโหลดดันรุน (โหลดในแนวแกน) จะหมายถึงความสูง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของตลับ สำหรับตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมที่รับโหลดเฉพาะในแนวรัศมี จะไม่มีสัญลักษณ์แสดงความกว้างระบุไว้ แต่เส้นผ่านศูนย์กลางจะเพิ่มเป็นลำดับดังนี้ 7, 8, 9, 0, 1, 2, 3 และ 4 สัญลักษณ์ 0, 2 และ 3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด และสัญลักษณ์ 0, 1, 2 และ 3 สำหรับความกว้างก็ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเช่นกัน สัญลักษณ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0 และ 1 แสดงประเภทของตลับลูกปืน ว่าเป็นประเภทที่รับโหลดได้น้อยมาก, 2 เป็นประเภทรับโหลดน้อย, 3 เป็นประเภทรับโหลดปานกลางและ 4 เป็นประเภทรับโหลดหนัก

ขนาดระบุของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูจะใช้แทนด้วยตัวเลข 2 หลัก ถ้าตลับลูกปืนมีขนาดของรูตั้งแต่ 20 - 500 (มม.) ขนาดของรูจะได้มาโดยการคูณตัวเลข 2 หลักนั้น ด้วย 5 แต่ถ้าขนาดของรูมีขนาดตั้งแต่ 20 (มม.) ลงมา ก็จะต้องพิจารณาตามมาตรฐานที่ได้ให้ไว้ เช่น ถ้าขนาดของรูหลายเลข 00 ก็หมายถึงรูขนาด10 (มม.) 01 หมายถึง 12 (มม.), 02 หมายถึง 15 (มม.) และ 03 หมายถึง 17 (มม.) สำหรับขนาดของรูที่เล็กกว่า 10 (มม.) ลงมา ตัวเลขขนาดของรูก็คือขนาดของรูนั่นเอง

ลองพิจารณาตัวอย่างต่อไปนี้

1. 6312 ZZ C 3 P 6

6 หมายถึงตลับลูกปืนแบบลูกปืนกลมรางลึกแถวเดียว

3 หมายถึงสัญลักษณ์ย่อของ 03, ตัวเลข 3 แสดงถึงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 130 (มม.) เมื่อขนาดของรูเท่ากับ 60 (มม.)

12 หมายถึงรูขนาด 12 x 5 = 60 (มม.)

ZZ แสดงว่ามีอุปกรณ์กันรั่ว 2 ชิ้น

C3 แทนช่องว่างในแนวรัศมี (clearance)

P6 ความประณีตชั้น 6

2. 22220 K C3

2 หมายถึงตลับลูกปืนแบบปรับตัวเองได้

22 หมายถึงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 180 (มม.) ที่มีความกว้าง 46 (มม.) และมีรูขนาด 100 (มม.)

20 หมายถึงรูขนาด 20 x 5 = 100 (มม.)

K หมายถึงส่วนลาด 1/12 ที่ผิวของรู โดยมีความประณีตชั้น 0

C3 แทนช่องว่างในแนวรัศมี

2.3.4 ความสามารถในการรับโหลดของตลับลูกปืน

ความสามารถในการรับโหลดของตลับลูกปืน แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือความสามารถในการรับโหลดจลน์ (Dynamic capacity) และความสามารถในการรับโหลดศักย์ (Static capacity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสมมุติให้ตลับลูกปืนจำนวนหนึ่งรับโหลดศักย์ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น ให้ตลับลูกปืนที่ออกแบบให้รับโหลดในแนวรัศมี รับโหลดในแนวรัศมีจริง ๆ โดยไม่มีโหลดในแนวอื่นปนแม้แต่น้อย และให้รางนอกยึดตรึงกับที่และให้รางในหมุน หรือให้ตลับ ลูกปืนที่รับโหลดจลน์คันรุน โดยมีข้อแม้ว่า มีแต่โหลดในแนวแกนเท่านั้น ที่กระทำอยู่และให้รางหนึ่งยึดตรึงกับที่ ส่วนที่อีกรางที่เหลือหมุนไป เมื่อให้ตลับลูกปืนจำนวนนี้หมุนไป 1,000,000 รอบ(ด้วยความเร็ว 33.3 รอบ/นาที และใช้เวลา 500 ชม.) หลังจากครบ 1 ล้านรอบแล้ว ถ้า 90 (%) ของตลับลูกปืนทั้งหมด ไม่ได้แสดงว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องมากจากการล้าตัวจากการหมุน ไม่ว่าจะที่รางนอก รางในหรือที่ตัวลูกปืน โหลดตัวที่ตลับลูกปืนนั้นรับอยู่เรียกว่าเป็นความสามารถในการรับโหลดจลน์ (จำเพาะ) ของตลับลูกปืนขนาดนั้น ๆ และอายุของตลับลูกปืนที่ 1 ล้านรอบ เรียกว่า เป็นอายุใช้งานของตลับลูกปืน

ถ้าให้ตลับลูกปืนรับโหลดศักย์ (ไม่หมุน) หรือในกรณีที่ตัวลูกปืนอยู่ในตำแหน่งคงที่เมื่อเทียบกับรางที่กำลังหมุนโหลดที่ทำให้ตัวลูกปืนและรางเกิดการเปลี่ยนแปรถาวร (Permanent deformation) ไปเท่ากับ 0.0001 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกปืน ถือว่าเป็นความสามารถในการรับโหลดศักย์ ของตลับลูกปืนนั้น ๆ

โหลดทั้งสองชนิดที่ได้กล่าวมานี้ เป็นตัวประกอบตัวแรกในการนำเลือกตลับลูกปืน

ในตอนแรก สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาความสามารถในการรับโหลดจลน์สำหรับตลับลูกปืนของบริษัทต่าง ๆ ยังไม่เหมือนกันเสียทีเดียว ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากความจริงที่ว่า ถึงแม้ว่ารายละเอียดในการออกแบบของตลับลูกปืนจะเหมือนกันทุกประการก็ตาม แต่ความสามารถในการรับโหลดจลน์ C ของแต่ละบริษัท บางครั้งก็ไม่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้ ในปี 1959 ISO จึงได้เสนอสมการทฤษฎีของ Lundberg & Palmgrems (JIS B 1518) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า C ขึ้น โดยที่ต้องการให้ค่า C ของแต่ละบริษัทที่ผลิตตลับลูกปืนขนาดเดียวกัน และชนิดเดียวกัน เท่ากัน ดังนี้

สำหรับลูกปืนกลมที่มีขนาดไม่เกิน 25.4 (มม.)

$$C = f_c\,(i \cos a)^{0.7}(Z)^{2/3}\,(D_a)^{1.8} \qquad \text{สมการ 2.1}$$

สำหรับลูกปืนกลมที่โตกว่า 25.4 (มม.)

$$C = f_c\,(i \cos a)^{0.7}(Z)^{2/3} \times 3.647(D_a)^{1.4} \qquad \text{สมการ 2.2}$$

ถ้าลูกปืนเป็นแบบทรงกระบอก

$$C = f_c\,(il_a \cos a)^{7/9}(Z)^{3/4}\,(D_a)^{29/27} \qquad \text{สมการ 2.3}$$

โดยให้
C	=	ความสามารถในการรับโหลดจลน์
i	=	จำนวนแถวของลูกปืนในตลับลูกปืน
a	=	มุมสัมผัส
Z	=	จำนวนลูกปืนต่อแถว
D_a	=	ขนาดของลูกปืน
f_c	=	เป็นแฟคเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับแบบ, ชั้นความประณีต และวัสดุที่ใช้ทำตลับลูกปืน
l_a	=	ความยาวของลูกปืนทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

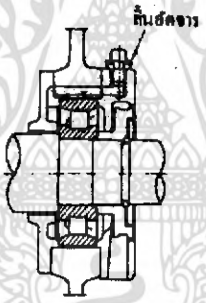
2.3.5 การหล่อลื่นตลับลูกปืน

จุดประสงค์หลักของการหล่อลื่นตลับลูกปืน คือป้องกันการสึกหรอ หรือความเสียดทานระหว่าง ลูกปืนกับรางและส่วนประกอบอื่น ๆ เพื่อการระบายความร้อน และเพื่อป้องกันมิให้สิ่งสกปรกจากภายนอกเข้าไปกัดกร่อนส่วนเคลื่อนไหวต่าง ๆ

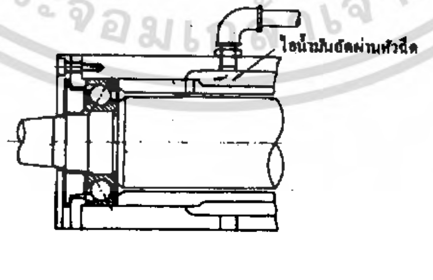
วิธีการหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่มี สองวิธี คือ การหล่อลื่นด้วยน้ำมันเครื่อง และการหล่อลื่นโดยใช้จารบี การใช้จารบีเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการกันรั่วต่าง ๆ ทำได้ค่อนข้างง่ายและจารบีที่มีคุณภาพดีปานกลาง ก็สามารถให้อายุการใช้งานที่ยาวนานได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 (สมยศ จันเกษม, ศาสตร์ตราจารย์ คิไยคัตสึ ซึงจัง, 2523)

การบรรจุจารบีเข้ากับตลับลูกปืน โดยทั่วไปแล้วมักจะใส่จนเต็มช่องภายในของตลับลูกปืน ส่วนที่ว่างที่เหลือก็จะพยายามใส่จารบีเข้าไป ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ถ้ามีที่ว่างมาก ๆ และตลับลูกปืนทำงานที่ค่า $d \times n$ ใกล้เคียงกับขีดจำกัดที่ระบุไว้ มักจะอัดจารบีลงไปประมาณ 40 (%) ของที่ว่างทั้งหมดที่มี ถ้าใช้งานที่ค่า $d \times n$ น้อย ๆ อาจจะอัดจารบีลงไปประมาณ 60 (%) ถ้าใช้งานที่ค่า $d \times n$ ต่ำกว่า 5000 ลงมา มักจะนิยมใส่จารบีไว้ค่อนข้างมากกว่าปกติ

การใช้จารบีหล่อลื่นนั้น เมื่อใช้ไปนาน ๆ อาจจะต้องเปลี่ยนจารบีใหม่ โดยอาจจะใช้สมการต่อไปนี้ ประมาณอายุการใช้งานของจารบีได้อย่างคร่าว ๆ



รูปที่ 2.3 ลิ้นอัดจารบี



รูปที่ 2.4 การหล่อลื่นโดยการใช้หัวฉีด ฉีดไอน้ำมันเข้ามายังผิวที่ต้องการหล่อลื่น

$$\frac{\text{ขีดจำกัดของค่า } d \times n}{\text{ค่า } d \times n \text{ จริง ๆ ที่ใช้}} \times 100 \text{ (ชม.)} \qquad \text{สมการ 2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
62849

แต่ถ้าตลับลูกปืนเป็นแบบที่มีเครื่องป้องกันฝุ่นผงอย่างแน่นหนาพอควร อายุของจารบีที่ใช้ อาจจะมีค่าประมาณ 3 เท่า ของอายุที่คำนวณได้จากสมการ 2.4 ก็ได้

สำหรับตลับ ลูกปืนที่ใช้กับงานที่ความเร็วสูง หรือมีอุณหภูมิสูง ๆ นั้น มักจะนิยมใช้น้ำมันหล่อลื่นมากกว่าวิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งก็คือ การใช้อ่างน้ำมัน วิธีนี้ เพลามักจะวางอยู่ในแนวระดับและระดับน้ำมันหล่อลื่นจะต้องอยู่สูงอย่างน้อยที่สุดที่จุดกึ่งกลางของลูกปืนตัวล่างสุด แต่วิธีนี้จำเป็นจะต้องรักษาอุณหภูมิของน้ำมันไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง ดังนั้น จึงต้องมีการระบายความร้อนออกจากน้ำมัน โดยการผ่านไปตามท่อระบายความร้อนต่างหากอีก

แต่ถ้าเพลาอยู่ในแนวดิ่ง และหมุนด้วยความเร็วต่ำกว่าขีดจำกัด ระดับน้ำมันควรจะอยู่ประมาณ จุดที่ตลับลูกปืน 30-50 (%) จมอยู่ในน้ำมันตลอดเวลา

ถ้าเป็นงานที่ทำงานด้วยความเร็วสูง แต่รับโหลดน้อย ๆ เช่น ในกรณีของเครื่องเจียรนัยการหล่อลื่นด้วยละอองหรือหยดน้ำมันก็เป็นการเพียงพอแล้ว วิธีการเช่นนี้ ทำได้โดยการหยดน้ำมันลงไปในตัวลูกปืนหรือระหว่างชิ้นส่วนเคลื่อนไหว เพื่อทำให้เกิดละอองน้ำมันขึ้นในเสื้อรองรับตลับลูกปืน สำหรับใช้ในการหล่อลื่นต่อไป

สำหรับงานที่มีความเร็วตั้งแต่ปานกลางไปจนสูง วิธีการหล่อลื่นทำโดยการฉีดไอน้ำมันหล่อลื่นเข้าไป วิธีการนี้ทำโดยการทำน้ำมันให้แตกเป็นฝอย แล้วใช้อากาศที่มีความดันสูง อัดไอน้ำมันนี้ออกไปยังพื้นผิวที่ต้องการหล่อลื่นโดยตรงดังรูปที่ 2.4

สุดท้ายสำหรับงานที่มีค่า $d \times n$ สูง และรับโหลดหนักเป็นพิเศษ เช่นของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ การหล่อลื่นใช้แบบนี้ปั๊มน้ำมันเข้ามาช่วย โดยจะต้องพิจารณาขนาดของหัวฉีดน้ำมัน และปริมาณที่จะใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของตลับลูกปืน อาทิเช่น ค่า $d \times n$ และสภาพการใช้งาน และถ้าให้น้ำมันหล่อลื่นเข้าไปมาก ๆ ต้องระวังมิให้มีน้ำมันค้างอยู่มากเกินไป โดยจะต้องออกแบบให้มีการระบายที่สะดวก

2.4 สายพานและโซ่

การถ่ายทอดกำลังจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่ง มีอยู่บ่อยครั้งที่เผชิญปัญหาที่ว่าเพลาทั้งสองที่ต้องการจะต่อเข้าด้วยกัน มีระยะห่างจากกันมาก ทำให้ไม่สามารถจะถ่ายทอดกำลังกันโดยตรงโดยอาศัยเฟืองได้

ในกรณีเช่นนี้ การถ่ายทอดกำลังหรือการหมุน จะต้องกระทำผ่านอุปกรณ์ถ่ายทอดกำลังที่ยืดหยุ่นได้ เช่น สายพาน หรือโซ่ โดยการพันอุปกรณ์ดังกล่าวกับมู่เล่ หรือเฟืองโซ่ (Sprockets) ที่อยู่บนเพลาทั้งสองนั้น

การใช้อุปกรณ์ถ่ายทอดกำลังทางกลแบบยืดหยุ่นได้ ขับซึ่งกันและกัน อาจจะแบ่งออกได้เป็นการขับโดยสายพาน การขับโดยโซ่ และการขับโดยเชือก ซึ่งในจำนวนนี้ การขับโดยเชือกมักจะใช้ในกรณีพิเศษ เท่านั้น ส่วนการขับโดยสายพาน ยังแบ่งย่อยออกได้อีก 3 กลุ่ม คือกลุ่มแรก ใช้สายพานแบบสายพานแบน (Flat belt) แบบนี้สายพานจะพันอยู่บนมู่เล่ทรงกระบอก แลกะถ่ายทอดแรงบิดระหว่างเพลา ภายใต้ข้อแม้ที่ว่าระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลาทั้งสองต้องไม่เกิน 10 (เมตร) และอัตราส่วนของความเร็ว (speed ratio) อยู่ในช่วง 1/6 ถึง 1/1

กลุ่มที่สอง ใช้สายพานที่มีพื้นที่หน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู พันอยู่ในร่องของมู่เล่ และถ่ายทอดแรงบิดระหว่างเพลาที่ห่างกันไม่เกิน 5 (เมตร) และอัตราส่วนความเร็วอยู่ในช่วง 1/7 ถึง 1/1

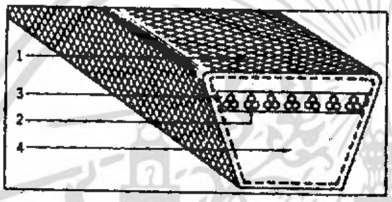
กลุ่มสุดท้าย สายพานที่มีฟันเหมือนฟันเฟืองจะถูกขับโดยเฟืองโซ่ แบบนี้ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลาทั้งสองอาจจะสูงถึง 2 (เมตร) และอัตราส่วนความเร็วอยู่ในช่วง 1/6 ถึง 1/1 นอกจากนี้ สายพานแบบนี้ยังมีข้อดีอีกข้อหนึ่งคือ ให้การถ่ายทอดการหมุนที่แม่นยำกว่าแบบอื่น ๆ ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

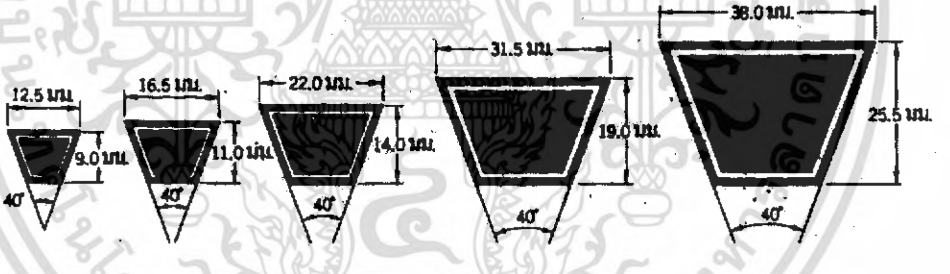
อย่างไรก็ตาม การขับโดยใช้สายพานส่วนใหญ่มักจะนิยมใช้สายพาน - V ทั้งนี้เพราะสายพาน - V นั้นหาง่ายและมีราคาถูก โดยทั่ว ๆ ไป ความเร็วของสายพานที่ออกแบบไว้ อยู่ในช่วง 10 ถึง 20 (เมตร/วินาที) แต่อาจจะใช้ได้สูงเต็มที่ถึง 25 (เมตร/วินาที) และถ่ายทอดกำลังได้สูงสุดประมาณ 500 (กิโลวัตต์) แต่เนื่องจากมีการเลื่อนไถลระหว่างมู่เล่และสายพาน ดังนั้นสายพาน - V จึงไม่สามารถให้อัตราส่วนความเร็วที่แม่นยำจริงๆ ได้ แต่ในปัจจุบัน มีการใช้สายพานฟัน (timing belt) ที่สามารถให้อัตราส่วนความเร็วที่แม่นยำพอ ๆ กับเฟืองกันอย่างแพร่หลาย เช่นในจักรเย็บผ้าทางอุตสาหกรรมเครื่องคำนวณ เครื่องลอกแบบ พิมพ์ดีดไฟฟ้า ฯลฯ

2.4.1 การขับโดยสายพาน - V

สายพาน – V ทำมาจากยางและพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างภายในของสายพาน – V ที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไป ที่บริเวณส่วนแกน (core) ของสายพานจะมีวัสดุจำพวกเททรอน (tetron)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสายพาน – V



รูปที่ 2.6 สัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของสายพาน – V

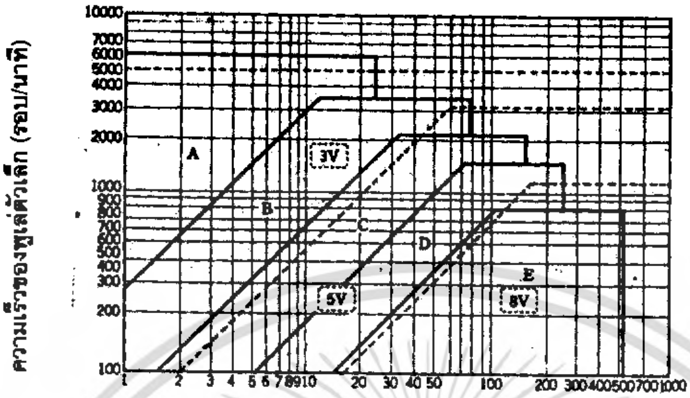
หรือคล้าย ๆ กันนี้ใส่ไว้เพื่อช่วยให้สายพานรับแรงดึงได้สูง ๆ สายพาน – V จะม้วนอยู่ในร่องของมู่เล่ และในขณะที่สายพานโค้งไปตามร่องมู่เล่นั้น ความกว้างของสายพานจะเพิ่มขึ้น ทำให้แรงของความเสียดทานระหว่างสายพานและมู่เล่เพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากผลของลิ่มผลก็คือทำให้มีการถ่ายทอดกำลังได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงดึงน้อย ๆ และรูปที่ 2.6 ก็แสดงสัดส่วนต่าง ๆ ของขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายพาน – V ที่ใช้กันมากที่สุด

ในการเลือกขนาดของสายพาน – V ให้เหมาะสมกับสภาพของการใช้งาน เช่น จากขนาดของกำลังที่ออกแบบประกอบกับความเร็วของเพลาขับได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 จากรูปกำลังที่ออกแบบจะได้มาจากการคำนวณโดยคูณกำลังที่ต้องการถ่ายทอดด้วยแฟคเตอร์แก้ไขที่ได้จากตารางที่ 2.4

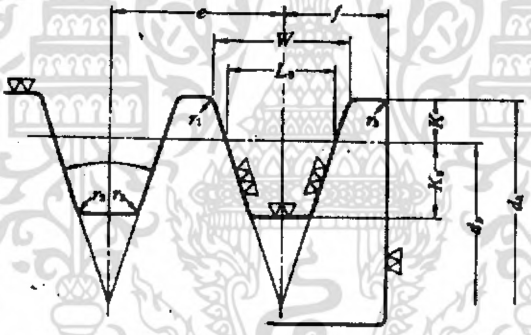
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุของมู่เล่สายพาน – V ใช้แทนด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p (มม.) ของมู่เล่ในรูปที่ 2.8 ซึ่งในตารางที่ 2.4 ก็คือค่า L_o นั่นเอง การใช้สายพาน – V ขับจะทำได้ก็แต่เฉพาะเมื่อมีเพลาสองเพลาวางขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้สายพานขับจะทำให้ได้การถ่ายทอดที่เงียบกว่า เมื่อเปรียบเทียบการขับด้วยเฟืองหรือโซ่ ส่วนกำลังที่ถ่ายทอดนั้นอาจจะเพิ่มได้โดยการใช้สายพานหลาย ๆ เส้นวางขนานกันเส้นต่อเส้น



รูปที่ 2.7 แผนผังการเลือกสายพาน –V



รูปที่ 2.8 รูปร่างของร่องสายพาน – V ในมู่เล่สายพาน

2.4.2 การขับด้วยสายพานฟัน

การใช้สายพานที่อาศัยความฝืดระหว่างส่วนที่พันรอบมู่เล่ขับเคลื่อน มีข้อดีคือราคาถูก สร้างได้ง่าย และเปลี่ยนแปลงอัตราทดได้สะดวก ทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในวงอุตสาหกรรมแขนงต่าง ๆ เช่นใช้กับเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมรถยนต์ เครื่องจักรกลทางเกษตร เครื่องมือเครื่องใช้ในทางการแพทย์ เครื่องจักรกลทางธุรกิจ และเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ

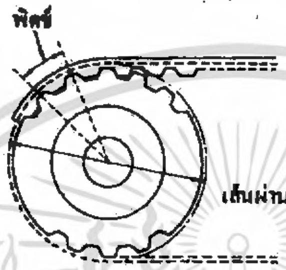
แต่การใช้สายพานขับก็มีจุดบกพร่องบางจุดเมื่อเราเปรียบเทียบกับการใช้เฟืองหรือโซ่ขับนั่นคือ การลื่นไถลระหว่างสายพาน และมู่เล่ ด้วยเหตุนี้ การถ่ายทอดด้วยวิธีนี้จึงไม่สามารถให้อัตราทดที่เที่ยงตรงและแม่นยำอย่างจริง ๆ ได้

ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการคิดค้นสายพานขึ้นใหม่เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวให้หมดไปและเรียกสายพานแบบใหม่นี้ว่า “สายพานฟัน” ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (สมยศ จันเกษม, ศาสตร์ตราจารย์ คิโยคัตสึ ซึงจัง, 2523) ส่วนในตารางที่ 2.4 ได้กำหนดชนิด ขนาด และ ประเภทของงานที่เหมาะสมกับสายพานแต่ละแบบเอาไว้ รูปที่ 2.10 (สมยศ จันเกษม,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศาสตร์ตราจารย์ คิโยคัตสึ ซึงจัง, 2523) แสดงแผนภูมิการเลือกชนิดของสายพานที่เหมาะสม โดยพิจารณาในแง่ของกำลังที่จะใช้ และความเร็วของเพลาขับเป็นสำคัญ

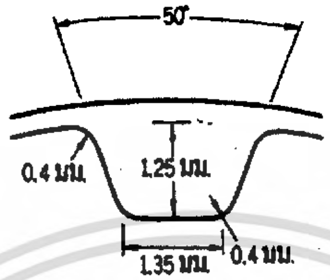
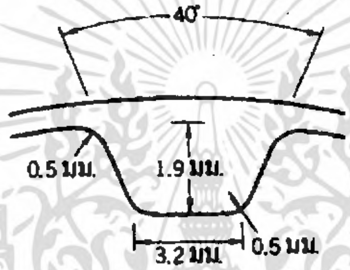
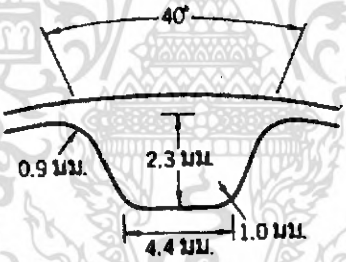
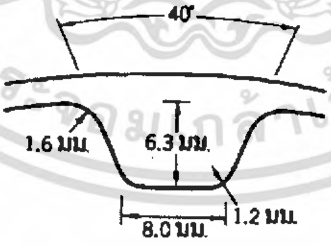
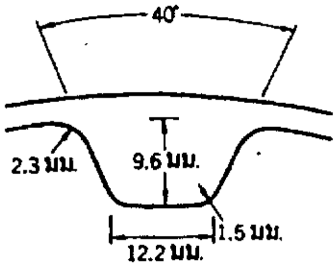
สายพานฟันทำจากยางจำพวกนีโอเพรน หรือพวกโพลียูรีเทน โดยการนำสารจำพวกนี้มาหล่อในแบบ และใช้ใยแก้วหรือเส้นลวดเป็นโครงรับแรงดึง จากนั้นจึงสร้างฟันที่มีความถูกต้องแม่นยำไว้ด้านในของสายพาน ฟันที่สร้างไว้นี้จะไปขบกันฟันที่สร้างอย่างประณีต บนล้อที่ต้องการให้ขับ เนื่องจากการถ่ายทอดเป็นลักษณะการขับด้วยเฟือง หรือโซ่ ดังนั้นการใช้สายพานแบบนี้จึงทำให้ได้อัตราทดที่แม่นยำถูกต้องเช่นกัน



รูปที่ 2.9 สายพานฟัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แบบขนาด และลักษณะการใช้สายพาน

หน้าตัด	พิตช์ (มม.)	ขนาด	ส่วนมากใช้กับ
XL	5.08		- เครื่องจักรกลทางธุรกิจ - จักรเย็บผ้า - เครื่องมือต่างๆ - เครื่องคำนวณอัตโนมัติ
L	9.525		- เครื่องทอผ้า - เครื่องมือกลขนาดเล็กใช้กับ - งานขนาดเบา
H	12.70		- เครื่องมือกลในโรงงานปั๊ม - เครื่องทอผ้า
XH	22.225		- ใบพัด - เครื่องจักรในโรงงานกระดาษ - เครื่องทอผ้า - เครื่องจักรกลใช้ในงานก่อสร้าง
XXH	31.75		- เครื่องจักรกลใช้กับงานหนัก - เครื่องจักรกลที่ใช้แรงบิดสูงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 หมายเลขระบุ จำนวนฟัน และความยาวมาตรฐานของสายพานฟัน

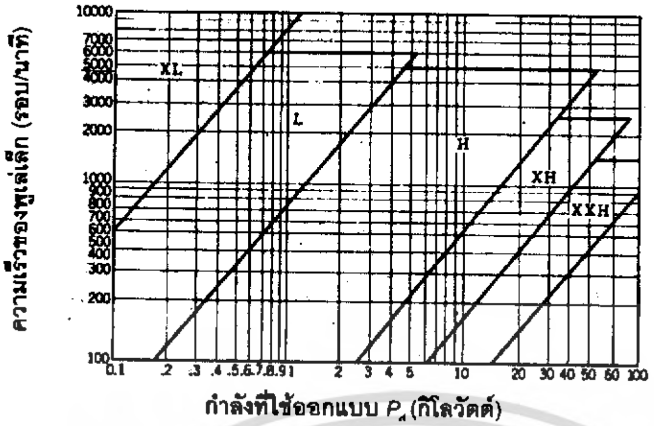
(หน้าตัด L)

	หมายเลขระบุ	ความกว้าง (นิ้ว)	ความกว้าง (มม.)
ความกว้างมาตรฐานของสายพาน	050	0.50	12.7
	075	0.75	19.0
	100	1.00	25.4
	150	1.50	38.1
	หมายเลขระบุ	**จำนวนฟัน**	**ความยาวเมื่อวัดที่พิตช์ (มม.)**
ความยาวมาตรฐานของสายพาน	124 L	33	314.32
	150 L	40	381.00
	165 L	44	408.10
	173 L	46	438.15
	187 L	50	476.25
	210 L	56	533.40
	225 L	60	571.50
	240 L	64	609.60
	255 L	68	647.70
	270 L	72	685.80
	285 L	76	723.90
	300 L	80	762.00
	322 L	86	819.15
	337 L	90	857.25
	345 L	92	876.30
	367 L	98	933.45
	375 L	100	952.50
	390 L	104	990.00
	420 L	112	1066.80
	427 L	114	1084.58
	450 L	120	1143.00
	480 L	128	1219.20
	510 L	136	1295.40
	540 L	144	1371.60
	600 L	160	1524.10
	630 L	168	1600.20

(หน้าตัด H)

	หมายเลขระบุ	ความกว้าง (นิ้ว)	ความกว้าง (มม.)
ความกว้างมาตรฐานของสายพาน	075	0.75	19.0
	100	1.00	25.4
	150	1.50	38.1
	200	2.00	50.8
	300	3.00	76.2
	หมายเลขระบุ	**จำนวนฟัน**	**ความยาวเมื่อวัดที่พิตช์ (มม.)**
ความยาวมาตรฐานของสายพาน	240 H	48	609.60
	270 H	54	685.80
	300 H	60	762.00
	310 H	62	787.40
	315 H	63	800.10
	320 H	64	812.80
	330 H	66	838.20
	350 H	70	889.00
	360 H	72	914.40
	375 H	75	952.50
	390 H	78	990.60
	410 H	82	1041.40
	420 H	84	1066.80
	430 H	86	1192.20
	450 H	90	1143.00
	465 H	93	1181.10
	480 H	96	1219.20
	490 H	98	1244.60
	510 H	102	1295.40
	540 H	108	1371.60
	560 H	112	1422.40
	570 H	114	1447.80
	600 H	120	1524.00
	630 H	126	1600.20
	650 H	130	1651.00
	660 H	132	1676.40
	680 H	136	1727.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนภูมิการเลือกสายพานฟัน

สำหรับการถ่ายทอดโหลดหนัก ๆ หรือการทำงานภายใต้สภาวะอากาศที่ร้อน เช่นอุณหภูมิอาจจะสูงถึง 120 ° เซนติเกรด สภาพที่เป็นกรด ด่างหรือเปียกชื้น สายพานที่ทำจากพวกยาง จะเหมาะสมมากที่สุด

ส่วนพวกโพลียูรีเทน เหมาะกับงานที่ถ่ายทอดโหลดน้อย ๆ หรือในสภาพการใช้งานที่มีน้ำมันบ้าง ปกติแล้วพวกนี้มักใช้ใยแก้วเป็นแกนรับแรงดึง ยกเว้น ในกรณีที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษจึงจะใช้เส้นลวดเป็นแกนแทน

ความเร็วสูงสุดของสายพานฟันจะมีค่าประมาณ 35 (เมตร/วินาที) ซึ่งเร็วกว่าสายพาน – V และสามารถถ่ายทอดกำลังได้สูงถึง 60 (กิโลวัตต์) สายพานฟันสร้างออกมาเป็นสองชนิดคือ ชนิดที่แบ่งระยะซึ่งเรียกว่าแบบ Module type ในบทนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของแบบ Circular pitch อีกที

การขับด้วยสายพานฟันมีแรงที่สำคัญ 3 แรงที่ต้องคำนึงเช่นเดียวกันกับการใช้สายพาน – V แรงเหล่านี้ได้แก่ แรงดึงที่เป็นประโยชน์ F_e (กก.) แรงหนีศูนย์กลาง F_c (กก.) และแรงดึงต้น F_o (กก.)

แต่ที่แตกต่างจากสายพาน – V ได้แก่แรงดึงทางด้านหย่อน F_2 (กก.) ของสายพานฟันโดยประมาณจะมีค่าเท่ากับ F_c (กก.) ของทางด้านมู่เล่ตัวขับ

แรงดึงทางด้านตึง F_1(กก.) คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$F_1 = F_e + F_2 \approx F_e + F_c$$ สมการ 2.5

ถ้าสมมุติให้ P (กิโลวัตต์) เป็นกำลังที่ต้องการถ่ายทอด, v (เมตร/วินาที) เป็นความเร็วของสายพาน, w (กก./เมตร) เป็นน้ำหนักของสายพานต่อหนึ่งหน่วยความยาว และ C เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดของสายพาน แล้ว F_e และ F_c จะถูกกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$F_e = \frac{102P}{v}$$ สมการ 2.6

$$F_c = \frac{w}{9.8} v^2$$ สมการ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความตึงสูงสุดของสายพานคือ F_t

ในการคำนวณหากำลังที่จะใช้ออกแบบ P_d ของสายพานฟัน จำเป็นจะต้องพิจารณาแฟคเตอร์แก้ไข f_c เข้าไปด้วย (และในสภาพการณ์พิเศษ จำเป็นจะต้องเพิ่มแฟคเตอร์แก้ไขพิเศษ fB_c เข้าไปอีก)

$$P_d = f_c P \quad \text{หรือ} \quad P_d = (f_c + f_c')P \qquad \text{สมการ 2.8}$$

สมการดังกล่าวข้างบนก็เช่นเดียวกับการเลือกสายพาน –V ทุกประการ โดยที่แฟคเตอร์ f_c จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของ P หรือสภาพการใช้งานเอง และแฟคเตอร์ f_c ก็แสดงได้แล้วในตารางที่ 2.6 ส่วน fB_c นั้นแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 แฟคเตอร์แก้ไขที่ต้องเพิ่มเติมสำหรับกรณีการขับแบบเพิ่มความเร็วและภายใต้สภาพการทำงานที่ผิดปกติ

อัตราส่วนความเร็ว	fB_c	สภาพการทำงาน	fB_c
1 - 1.25	0	ทำงานเกิน 10 ชม./วัน	0.1
1.25 – 1.75	0.1	ทำงานเกิน 20 ชม./วัน	0.2
1.75 – 2.5	0.2	สำหรับสายพานขับลอย (Idler)	0.2
2.5 – 3.5	0.3	ใช้งานเป็นระยะหรือใช้เป็นบางฤดูกาล	0.2
3.5 ขึ้นไป	0.4	(ใช้งานน้อยกว่า 500 ชม./ปี)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ความสามารถในการถ่ายทอดกำลังต่อความกว้างหนึ่งนิ้ว (25.4 มม.) ของสายพานฟัน

(หน้าตัด L)

ความเร็วของพูเล่ตัวเล็ก (รอบ/นาที)	จำนวนฟัน					
	20	22	24	26	28	30
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพูเล่					
	60.64	66.70	72.77	78.83	84.89	90.96
200	0.15	0.17	0.18	0.20	0.21	0.23
400	0.31	0.34	0.37	0.40	0.43	0.46
600	0.46	0.51	0.55	0.60	0.64	0.69
800	0.61	0.68	0.73	0.80	0.85	0.91
1000	0.76	0.84	0.91	0.99	1.06	1.14
1200	0.91	1.00	1.10	1.18	1.27	1.36
1400	1.06	1.17	1.27	1.38	1.48	1.58
1600	1.21	1.31	1.45	1.56	1.68	1.79

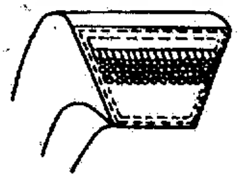
(หน้าตัด H)

ความเร็วของพูเล่ตัวเล็ก (รอบ/นาที)	จำนวนฟัน					
	20	22	24	26	28	30
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพูเล่					
	80.85	88.94	97.02	105.11	113.19	121.28
200	0.52	0.57	0.62	0.67	0.73	0.78
400	1.04	1.14	1.25	1.35	1.46	1.56
600	1.56	1.71	1.86	2.02	2.17	2.33
800	2.07	2.27	2.48	2.68	2.88	3.10
1000	2.58	2.84	3.10	3.35	3.60	3.85
1200	3.10	3.40	3.70	4.00	4.32	4.61
1400	3.60	3.95	4.30	4.66	5.02	5.36
1600	4.11	4.51	4.90	5.31	5.70	6.10

สายพานที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดเป็นส่วนหนึ่งของสายพานที่ใช้กันอยู่เท่านั้น ในทางใช้งานจริง ๆ แล้วยังมีสายพานอีกมากแบบที่มิได้กล่าวถึง ซึ่งบางส่วนก็ได้รวบรวมแสดงทั้งแบบและที่ใช้ไว้ดังนี้

รูปที่ 2.11 สายพาน - V

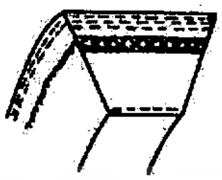
สายพาน – V มาตรฐานแบบโครงชั้นเดียวและหลายชั้น นิยมใช้กันมากในท้องตลาดและราคาถูก สำหรับใช้กับเครื่องจักรกลโรงงานอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป สามารถใช้ได้ในที่ ๆ ร้อนถึง 60° เซนติเกรด



รูปที่ 2.12 สายพาน –V แบบพิเศษ

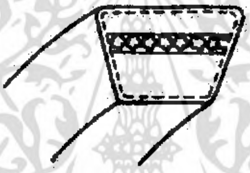
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายพาน –V แบบพิเศษ (แบบโครงชั้นเดียวและหลายชั้น) มีความต้านทานต่อความร้อน น้ำมัน และไฟฟ้าสถิต มีความแข็งแรงสูง ใช้สำหรับงานหนัก ๆ และเพื่อต้องการจะลดจำนวนของสายพานลง สามารถใช้ได้ในที่ ๆ ร้อนถึง 90° เซนติเกรด



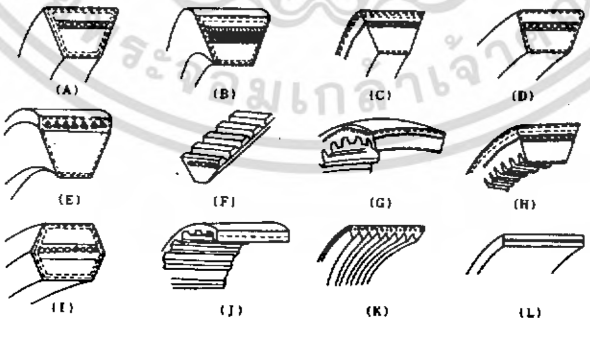
รูปที่ 2.13 สายพาน –V ขอบต่ำ

สายพาน – V ขอบต่ำมีความต้านทานต่อการโค้งและทนทานต่อการขับที่ความเร็วสูง ๆ ใช้กับรถยนต์และพูเล่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ สามารถในที่ ๆ ร้อนถึง 90° เซนติเกรด



รูปที่ 2.14 สายพาน – V แบบใช้กับงานเบาๆ (แบบL)

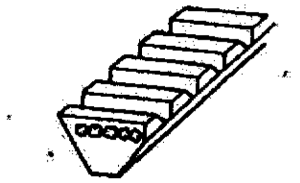
สายพาน –V แบบใช้กับงานเบา ๆ (แบบL) มีความต้านทานต่อการโค้งและทนทานต่อการขับที่ความเร็วสูง ๆ ใช้สำหรับพวกเครื่องจักรกลทางการเกษตร สามารถใช้ได้ในที่มีความร้อนถึง 60°เซนติเกรด (สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 ° เซนติเกรด ให้ใช้สายพาน – V แบบพิเศษ)



รูปที่ 2.15 สายพาน – V แคบ

สายพาน – V แคบมีความสามารถในการถ่ายทอดกำลังได้มากใช้กับเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วๆ ไปสามารถใช้งานได้ในที่ ๆ ร้อนถึง90° เซนติเกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

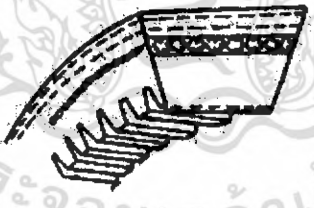


รูปที่ 2.16 สายพาน –V มุมกว้าง

สายพาน – V มุมกว้างสำหรับการถ่ายทอดที่ความเร็วสูง และการถ่ายทอดกำลังมาก ๆ โดยใช้พูเล่แคบ ๆ ใช้กับพวกรถยนต์ สามารถใช้งานได้ที่ ๆ ร้อนถึง 80° เซนติเกรด

รูปที่ 2.17 สายพาน – V ใช้กับงานที่ความเร็วเปลี่ยนไป ๆ มา ๆ

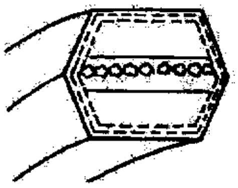
สายพาน – V ใช้กับงานที่ความเร็วเปลี่ยนไป ๆ มา ๆ มีความต้านทานต่อการโค้ง และความดันด้านข้าง ใช้สำหรับการทดความเร็วให้ต่ำลง และการทำหลาย ๆ ความเร็ว สามารถใช้งานได้ในที่ ๆ ร้อนถึง 90° เซนติเกรด



รูปที่ 2.18 สายพานท้องฟันขอบต่ำ

สายพานท้องฟันขอบต่ำมีความต้านทานต่อการโค้ง และทนทานต่อการขับที่ความเร็วสูง ๆ ใช้สำหรับเครื่องยนต์รถยนต์ขนาดใหญ่สามารถใช้งานได้ในที่ ๆ ร้อนถึง 90° เซนติเกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 สายพานหกเหลี่ยม

สายพานหกเหลี่ยมใช้สำหรับขับเพลาที่ซับซ้อน ใช้สำหรับอุตสาหกรรม และเครื่องจักรกลทางเกษตรสามารถใช้งานได้ในที่ ๆ ร้อนถึง 60° เซนติเกรด

รูปที่ 2.20 สายพานฟัน

สายพานฟันไม่มีการเลื่อนไถล สามารถให้การขับที่ความเร็วคงที่เสมอ ใช้สำหรับเครื่องคำนวณอัตโนมัติ เครื่องมือกล รถยนต์ ฯลฯ สามารถใช้ได้ในที่ ๆ ร้อนถึง 80° เซนติเกรด

รูปที่ 2.21 สายพานร่องรวม

สายพานร่องรวมให้การหมุนที่พอประมาณได้ว่ามีความเร็วเชิงมุมคงที่ ใช้สำหรับเครื่องมือกล และอื่น ๆ สามารถใช้งานได้ในที่ ๆ ร้อนถึง 80° เซนติเกรด

รูปที่ 2.22 สายพานที่ทำจากส่วนผสมของหนังและไนล่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายพานที่ทำจากส่วนผสมของหนังและไนล่อนใช้สำหรับการถ่ายทอดที่ความเร็วสูง ๆ และมีระยะระหว่างจุดศูนย์กลางการถ่ายทอดคงที่ ใช้สำหรับเครื่องทำกระดาษ เครื่องทอผ้า และอื่น ๆ สามารถใช้ได้ในที่ ๆ ร้อนถึง 80° เซนติเกรด

2.5 เฟือง

เมื่อมีล้อสองล้อสัมผัสกันและถูกกดให้ติดกัน สมมุติว่าที่ล้อแต่ละอันมีเพลายึดอยู่ ถ้าหมุนเพลาตัวใดตัวหนึ่ง จะพบว่าเพลาของอีกตัวหนึ่งก็จะหมุนตามไปด้วย เนื่องจากความฝืดของการสัมผัสเชิงเส้น (Line contact) ของล้อทั้งสอง เครื่องมือที่ใช้ถ่ายทอดกำลัง และหรือการหมุนระหว่างเพลาทั้งสองนี้เรียกว่า ล้อความฝืด (Friction wheel) แต่การถ่ายทอดแบบนี้ ใช้ได้แต่การถ่ายทอดกำลังน้อย ๆ หรือการหมุนที่ไม่สู้จะสม่ำเสมอนัก

เพื่อให้ได้การถ่ายทอดการหมุนที่แม่นยำขึ้น และสามารถถ่ายทอดกำลังสูง ๆ ระหว่างเพลาทั้งสองได้ จึงได้มีการวางฟันไว้บนเส้นรอบวงของล้อทั้งสอง โดยให้ฟันแต่ละซี่ห่างกันด้วยระยะที่เท่า ๆ กันแล้วเรียกล้อที่มีฟันนี้เสียใหม่ว่า “เฟือง”

จากลักษณะการทำงานที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าสายพานหรือโซ่ก็อาจจะทำงานได้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การใช้เฟืองจะช่วยให้ทำงานได้รัดกุมมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสายพานและโซ่นอกจากนี้ ยังสามารถถ่ายทอดได้ที่ความเร็วสูง ๆ โดยมีการกะจังหวะได้อย่างแม่นยำ แม้เมื่อกำลังถ่ายทอดแรงม้าสูง ๆ ด้วย แต่เมื่อมองอีกด้านหนึ่ง การใช้เฟืองต้องการความเอาใจใส่ดูแลอย่างใกล้ชิดมากกว่าแบบอื่น เช่นการหล่อลื่น การป้องกันฝุ่นผง และการประกอบเข้ากับเพลา แต่เนื่องจากความสามารถที่ดีเหนือการถ่ายทอดแบบอื่น ๆ จึงมีการใช้เฟืองกับงานที่สำคัญต่าง ๆ มานานติดต่อกันกว่า 200 ปีแล้ว โดยใช้ตั้งแต่เฟืองตัวเล็กที่มีความละเอียดสูง ๆ ดังเช่นที่ใช้ในเครื่องมือวัดต่าง ๆ ไปจนถึงเฟืองขนาดใหญ่ เช่น เฟืองทดของเครื่องยนต์กังหันที่ใช้ในเรือเป็นต้น

สำหรับเฟืองดอกจอก จะเน้นหนักแต่ดอกจอกฟันตรงฟันเกลียวสัน เทปเปอร์ (Gleason taperteeth) และสำหรับเฟืองตัวหนอน จะกล่าวถึงแต่เฉพาะการออกแบบเฟืองตัวหนอนทรงกระบอก (Cylindrical worm gears) ซึ่งเป็นเฟืองหลักอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันอยู่ จากทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้ว

2.5.1 การจำแนกประเภทของเฟือง

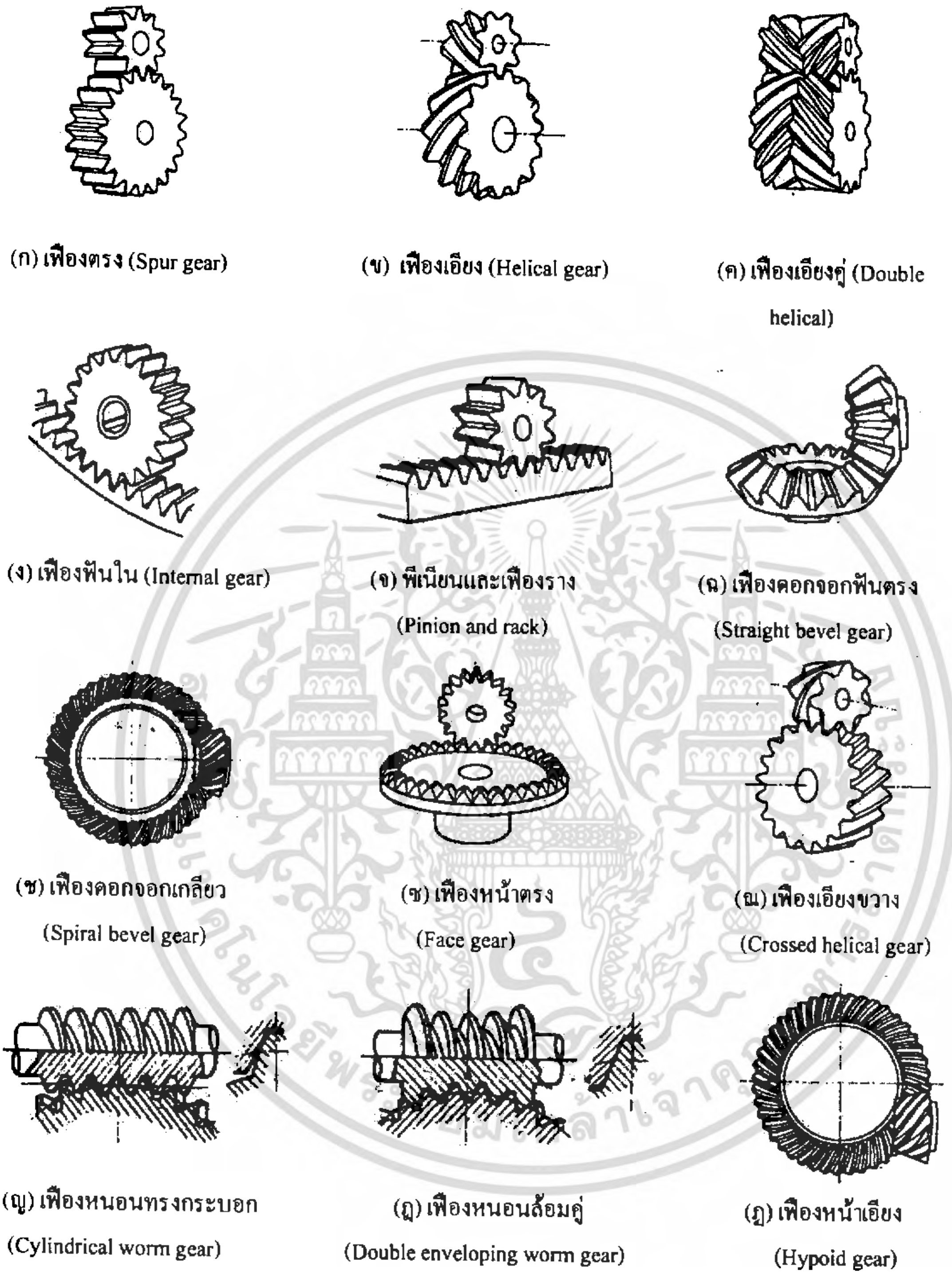
ตารางที่ 2.8 ได้แสดงการจำแนกประเภทของเฟือง โดยยึดเอาตำแหน่งของเพลาทั้งสอง ทิศทางการหมุน และรูปร่างของฟันและหลัก เฟืองแบบต่าง ๆ ดังที่ปรากฏในตารางที่ 2.8 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 (สมยศ จันเกษม, ศาสตราจารย์ คิโยคัตสึ ซึงจัง, 2523)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 เฟืองประเภทต่างๆ

ตำแหน่งของเพลา	เฟือง	หมายเหตุ
เฟืองอยู่บนเพลาที่ขนานกัน (parallel shaft gears)	เฟืองตรง (ก) เฟืองเอียง (ข) เฟืองเอียงคู่ (ค)	(การจำแนกประเภทแบ่งตามรูปร่างของฟัน)
	เฟืองฟันนอก เฟืองฟันในและพิเนียน (ง) เฟืองรางและพิเนียน (จ)	หมุนสวนทางกัน หมุนทางเดียวกัน หมุนและเคลื่อนที่ในแนวเส้น
เฟืองที่อยู่บนเพลาที่บรรจบกัน (intersection shaft gears)	เฟืองดอกจอกตรง (ฉ) เฟืองดอกจอกเกลียว (ช) เฟืองดอกจอกซีโรล (Zerol) เฟืองดอกจอกเอียง เฟืองดอกจอกเอียงคู่	(การจำแนกประเภทแบ่งตามรูปร่างของฟัน)
	เฟืองหน้าเพลาบรรจบ (ซ)	(เฟืองที่ใช้กับเพลา แบบพิเศษ)
เฟืองที่มีเพลาข้ามกัน (crossed axis gears)	เฟืองเอียงขวาง (ฌ) เฟืองเอียงและรางฟัน	สัมผัสเป็นจุดหมุนและเคลื่อนที่ในแนวเส้น
	เฟืองหนอนทรางกระบอก (ญ) เฟืองหนอนล้อมคู่ (ฎ) เฟืองหนอนข้าง	
	เฟืองหน้าเอียง (ฏ) เฟืองหน้าเพลาข้ามกัน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 เฟืองชนิดต่าง ๆ

เฟืองบนเพลาที่ขนานกัน คือเฟืองที่มีฟันวางอยู่บนพื้นผิวทรงกระบอกด้วยระยะที่เท่าๆ กัน (เรียกว่าผิวพิตช์ เส้นสัมผัสเรียกว่าเส้นกำเนิด (Generating line) และพื้นผิวทั้งสองจะสัมผัสแบบกลิ้งซึ่งกันและกัน โดยปราศจากการลื่นไถล) เฟืองตรง (ก) เป็นเฟืองที่ธรรมดาที่สุดโดยที่ฟันของเฟืองจะถูกตัดให้ขนานกับผิวของเพลาถ้าเป็นเฟืองเอียง ฟันทุกตัวที่ถูกตัดบนทรงกระบอกพิตช์จะเอียงเป็นก้นหอย แต่เนื่องจากจำนวนคู่ของฟันที่สัมผัสกันอยู่ (ซึ่งเรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนสัมผัส) ของเฟืองชนิดนี้ มีมากกว่าแบบเฟืองตรง ดังนั้น การขบกันจึงทำได้อย่างราบเรียบ และทำให้เหมาะกับการถ่ายทอดที่โหลด และความเร็วสูง ๆ อย่างไรก็ตาม เฟืองแบบนี้ต้องการรองลื่นกันรุน และห้องเฟืองที่แข็งแกร่ง เนื่องจากแรงดันรุนที่ส่งมาจากเฟืองและผ่านต่อมายังเพลาแต่ถ้าเป็นเฟืองเอียงฟันคู่ (ค) แบบที่มีฟันเอียงไปเป็นมุมกัน แรงดันรุนสามารถทำให้หักล้างกันเองได้ อัตราทดความเร็วในแนวเส้นรอบวงเฟือง และกำลังที่ถ่ายทอดจะกระทำได้มาก แต่มีข้อเสียคือสร้างได้ยาก เฟืองฟันใน (ง) มีประโยชน์ในการลดขนาดของเฟืองลง และให้อัตราทดสูง เนื่องจากมีเฟืองพีเนียนวางไว้ภายในนั่นเอง เฟืองรางและพีเนียน (จ) เหมาะจะใช้กับงานที่ต้องการเปลี่ยนจากการหมุนไปเป็นการเคลื่อนที่ในแนวเส้น

เฟืองดอกจอก เป็นเฟืองที่มีผิวหน้าเป็นรูปทรงกรวยตรง พื้นผิวของกรวยที่มีจุดยอดร่วมกัน เรียกว่าพื้นผิวพิตช์ เฟืองดอกจอกตรง (ฉ) เป็นแบบที่ใช้กันมากที่สุด แต่จะมีเสียงดังมากในขณะทำงาน ทั้งนี้ เนื่องจากมีอัตราส่วนสัมผัสน้อย และยังความลำบากในการใส่รองลื่นรับที่ปลายทั้งสอง ของเพลาที่ประกอบกันกับเฟืองอีก ยังมีเฟืองดอกจอกเกลียว (ช) อีกแบบหนึ่งซึ่งจะให้อัตราส่วนสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถถ่ายทอดโลดมาก ๆ และที่รอบสูงๆ ได้ มุมที่เพลาทั้งสองของเฟืองที่กระทำกันปกติแล้วเท่ากับ 90 °

เฟืองที่ใช้กับเพลาข้ามได้แก่พวกเฟืองเอียงขวาง (ฌ), เฟืองหนอน (ญ), (ฎ) และเฟืองหน้าเอียง (ฏ) ฯลฯ เฟือง หนอนใช้ถ่ายทอดการหมุนของเพลาข้าม ที่ข้ามตั้งฉากกันด้วยอัตราทดที่สูงเฟืองหนอนทรงกระบอกเป็นแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ถ้าต้องการให้ถ่ายทอดโหลดสูง ๆ ต้องเลือกใช้เฟือง หนอนล้อมคู่ (ฎ) ซึ่งให้อัตราส่วนสัมผัสมากกว่า เฟืองหน้าเอียง (ฏ) เป็นชนิดที่ใช้กับเฟืองท้ายของรถยนต์ การกัดฟันเฟืองจะกัดเป็นเส้นโค้งจากเส้นตรงร่วมทำให้ฟันเฟืองในขณะที่ขบกัน เป็นลักษณะของการกลิ้งไถลไป

เฟืองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นประเภทที่ให้อัตราส่วนของความเร็วเชิงมุมระหว่างเพลาทั้งสองคงที่อยู่เสมอแต่ยังมีเฟืองอีกบางชนิดที่อัตราส่วนความเร็วเชิงมุมเปลี่ยนแปรไปมา เฟืองพวกนี้ได้แก่เฟืองเยื้องศูนย์ เฟืองที่ไม่กลม ฯลฯ และเฟืองรูปไข่ เช่นที่ใช้ในเครื่องมือวัดการไหลหรือใช้กับรถยนต์

ยังมีเฟืองบางชนิดที่ใช้ถ่ายทอดการเคลื่อนที่แบบหยุดเป็นระยะ ๆ เรียกว่าเฟืองอินเตอร์มิเตนท์ เกียร์ (Intermittent gear) และเฟืองเจนีวา (Geneva gear) ที่ใช้กับเครื่องป้อนฟิล์มเข้าเครื่องฉาย

มีการตั้งข้อสมมุติว่าเฟืองเป็นชิ้นส่วนที่แข็งแกร่งมาก ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงเวลานาน ๆ ถึงแม้ว่าที่จริงแล้วมันจะเปลี่ยนรูปไปบ้างเมื่อได้รับโหลด แต่ในทางทฤษฎี เราจะถือว่ามันแข็งแกร่งมากจนกระทั่งไม่มีเปลี่ยนรูปไป แต่ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเรื่องการขับแบบฮาโมนิค (Harmonic drive) ซึ่งรวมเอาผลของการเปลี่ยนรูปของฟันเฟือง เนื่องมากจากการยืดหด โดยไม่ถึงกับเสียรูปร่างเข้ามาพิจารณาด้วย

2.5.2 การเรียกชื่อส่วนต่าง ๆ ของเฟือง และขนาดของเฟือง

ชื่อของส่วนต่าง ๆ ของเฟืองแสดงไว้ในรูป 6.2 การแสดงขนาดของเฟืองทำได้โดยการบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมพิตช์ โดยวาดภาพวงกลมซึ่งกลิ้งไปโดยไม่มีการเลื่อนไถล และขนาดของฟันถูกกำหนดโดยพิตช์ในแนวเส้นรอบวง ซึ่งก็คือระยะห่างระหว่างฟันคู่ใดคู่หนึ่งบนเส้นรอบวงพิตช์

ให้ d (มม.) แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมพิตช์ และ z แทนจำนวนฟันของเฟืองแล้วพิตช์ในแนวเส้นรอบวง t (มม.) คือ

$$t = \frac{\pi d}{z}$$ สมการ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (6.1) จะสังเกตเห็นว่าฟันของเฟืองที่มีพิตช์ในแนวเส้นรอบวงน้อยจะมีขนาดเล็ก และฟันของเฟืองที่มีพิตช์ในแนวเส้นรอบวงมากจะมีขนาดโต อย่างไรก็ตาม วิธีการกำหนดขนาดของเฟืองแบบนี้ไม่ค่อยสะดวกนัก เนื่องจากพิตช์ในแนวเส้นรอบวงจะต้องการด้วยตัวเลขที่ไม่ค่อยลงตัวคือ π

ดังนั้น โดยการกำหนดให้

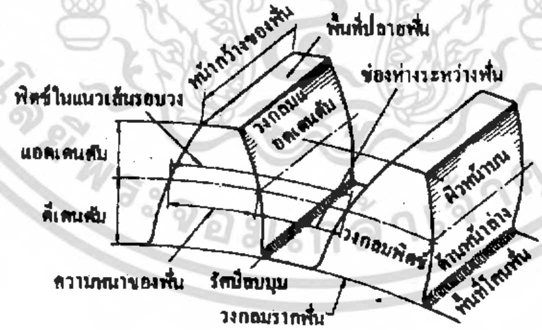
$$m = \frac{d}{z} \qquad \text{สมการ 2.10}$$

และเรียก m นี้ว่า “โมดูล” (Module) โดย m อาจจะมีค่าเป็นจำนวนเต็มหรือทศนิยม เช่น 0.5 , 0.25 ฯลฯ โดยวิธีนี้ขนาดของฟันก็จะดูได้จากสมการ 2.10 โดยตรง โดยเฟืองที่มีโมดูล มากจะมีขนาดฟันใหญ่และเฟืองที่มีโมดูลน้อยจะมีขนาดของฟันเล็ก และหากต้องการจะทราบค่าของพิตช์ในแนวเส้นรอบวง ก็เพียงแต่คูณค่าโมดูล ด้วย π เท่านั้น

อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการกำหนดขนาดของเฟือง ก็คือใช้จำนวนฟันต่อความยาวหนึ่งนิ้วของเส้นรอบวงพิตช์ในกรณีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมพิตช์จะแทนด้วย d (นิ้ว) และถ้า DP เป็นจำนวนฟันต่อความยาวหนึ่งนิ้วของเส้นรอบวงพิตช์ (Diameteral pitch) จะได้

$$DP = \frac{z}{d} \qquad \text{สมการ 2.11}$$

จากสมการ 2.11 ถ้า DP มีค่ามาก ฟันจะมีขนาดเล็ก แต่ถ้า DP มีค่าน้อย ฟันจะมีขนาดใหญ่ และระบบนี้นิยมใช้กันมากในแถบอเมริกา และยุโรป



รูปที่ 2.24 การเรียกชื่อส่วนต่างๆ ของเฟือง

ความสัมพันธ์ระหว่าง m และ DP อาจแสดงได้ดังนี้

$$m = \frac{25.4}{DP} \qquad \text{สมการ 2.12}$$

สมการ2.12 เป็นสมการที่ใช้เปลี่ยนสูตรของเฟืองจากหน่วยที่เป็นนิ้ว ให้เป็นหน่วยของโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของเฟืองฟันนอก ความสูงของฟันจากวงกลมพิตช์ เรียกว่า แอดเดนดั้ม และส่วนมากจะใช้พูดเป็น m (มม.) หรือ 1/DP (นิ้ว) ส่วนความลึกจากวงกลมพิตช์ลงมา เรียกว่า ดีเดนดั้มซึ่งใช้สัญลักษณ์ $m + c_k$ (มม.) (1/DP) + c_k (นิ้ว) โดยที่ให้ c_k เป็นระยะเว้นบน (Top clearance) ซึ่งก็คือช่องว่างระหว่างวงกลมแอดเดนดั้มและวงกลมรากฟันของเฟืองที่ขบกันอยู่ ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ ยังมีเส้นแสดงความหนาของฟันและช่องว่างระหว่างฟัน ซึ่งส่วนมากมีค่าเท่ากับ $\pi m/2$ (มม.)หรือ $\pi/2$ DP (นิ้ว) จุดตัดระหว่างเส้นรอบนอกของฟัน (Tooth profile) และวงกลมพิตช์ เรียกว่า จุดพิตช์ เส้นรอบนอกของฟัน ปกติแล้วจะเป็นเส้นโค้งอินเวอลูทซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป มุมระหว่างเส้นสัมผัสของเส้นรอบนอกของฟันที่จุดพิตช์ และเส้นสัมผัสของวงกลมพิตช์ที่จุดเดียวกัน เรียกว่า มุมความดัน (Pressure angle)

เฟืองที่มีมุมความดันเท่ากัน และมีสัดส่วนต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวข้างบนนั้น เรียกว่าเฟืองมาตรฐาน และสามารถจะขบกันได้ทุกตัวโดยไม่จำกัดเรื่องจำนวนฟันของแต่ละตัวจะต้องเท่ากัน ทำให้บางครั้งเรียกเฟืองแบบนี้ว่าเป็นเฟืองที่สามารถถอดสับเปลี่ยนกันไปมาได้

ไม่มีเหตุผลที่ตายตัวลงไปว่า สัดส่วนต่าง ๆ ของแต่ละส่วน หรือมุมความดันของเฟืองจะต้องเท่ากับค่าที่ระบุไว้ข้างบน พีเนียนซึ่งมีแอดเดนดัมยาวและดีเดนดัมสั้น หรือเฟืองซึ่งมีอัตราส่วนกลับกับที่ให้ไว้ข้างบน ก็มีการใช้กันอยู่บ้าง มีน้อยครั้งมากที่ใช้พีเนียนที่มีแต่แอดเดนดัมเพียงอย่างเดียว และเฟืองซึ่งมีเฉพาะดีเดนดัมเพียงอย่างเดียว

2.5.3 เฟืองดอกจอก

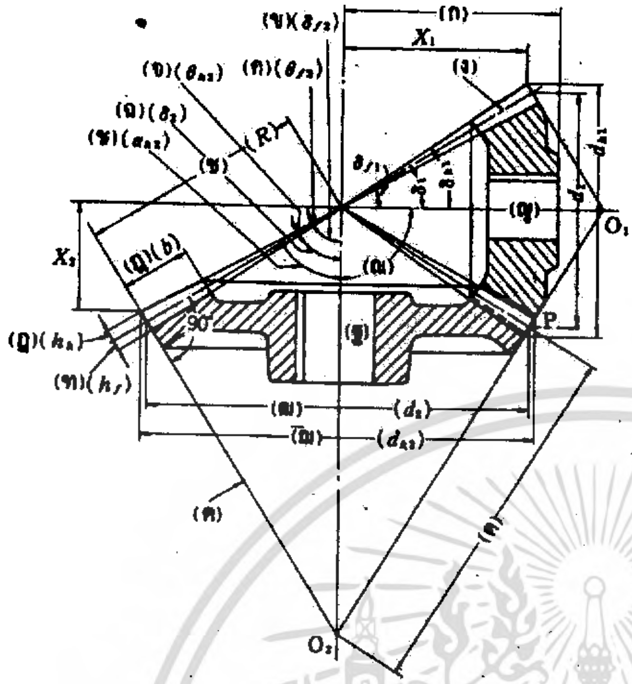
สำหรับงานที่ต้องการถ่ายทอดกำลังหรือการหมุนระหว่างเพลาต่อเพลาที่ขนานกันนั้น การถ่ายทอดจะกระทำได้โดยอาศัยเฟืองตรงที่มีฟันกว้างขนานไปกับเพลาแบบธรรมดานี่เอง

อย่างไรก็ตาม หากต้องการที่จะถ่ายทอดกำลังระหว่างเพลาที่ขนานกัน โดยที่ให้ถ่ายทอดกำลังสูง และที่ความเร็วสูง ๆ โดยให้เกิดเสียงดังน้อย ๆ ด้วยแล้ว เฟืองตรงอาจจะกระทำไม่ได้ในกรณีเช่นนี้ การใช้เฟืองเอียงหรือเฟืองเอียงคู่ จะทำได้ดีกว่า

2.5.4 รูปร่างของดอกจอก

ให้นึกถึงภาพของรูปกรวย 2 รูปที่กลิ้งสัมผัสกันระหว่างเพลา 2 เพลาที่บรรจบกันอยู่กรวยทั้งสองนี้เรียกว่า "กรวยพิตช์" มุมของกรวยจะเปลี่ยนแปรไปตามความเร็วของเพลาแต่ละตัว เฟืองที่ผิวกรวยมีฟันธรรมดาอยู่บนผิวที่กำหนดให้ (Datum surface) และเฟืองทั้งสองสามารถหมุนไปด้วยกันอย่างแม่นยำ เรียกว่าเฟืองดอกจอกหากฟันของเฟืองถูกตัดให้ขนานกับเส้นแผ่ทั่ว ๆ ไป (General line) ของกรวยแล้ว เราจะเรียกว่าเฟืองดอกจอกฟันตรง ในรูปที่ 2.25 (สมยศ จันเกษม, ศาสตร์ตราจารย์ คิโยคัตสึ ซึงจัง, 2523) ได้แสดงการเรียกชื่อของแต่ละส่วนของเฟืองดอกจอกไว้อย่างละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

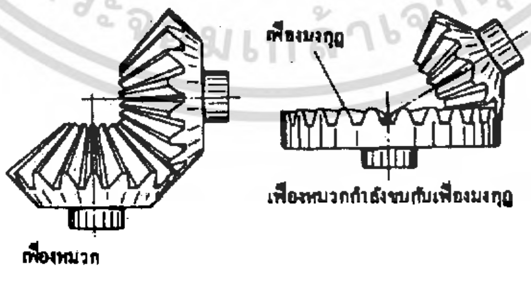


(ก) ระยะของด้านหลัง
(ข) มุมดีเดนดัมของกรวย
(ค) มุมดีเดนดัม
(ง) กรวยพิตช์
(จ) มุมแอดเดนดัม
(ฉ) มุมกรวยพิตช์
(ช) มุมกรวยพิตช์
(ซ) ระยะกรวย
(ฌ) มุมของเพลา
(ญ) เพลา
(ฎ) ความกว้างหน้าฟัน
(ฏ) แอดเดนดัม
(ฐ) เพลา
(ฑ) ดีเดนดัม
(ฒ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิตช์
(ณ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมแอดเดนดัม
(ด) กรวยหลัง
(ต) ระยะของกรวยหลัง

รูปที่ 2.25 การเรียกชื่อแต่ละส่วนของเฟืองดอกจอก

ตามปกติแล้ว มุมระหว่างเพลาที่ตัดกันมักจะเป็นมุมฉาก หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งเฟืองแบบนี้ใช้สำหรับถ่ายทอดการหมุน หรือกำลังระหว่างเพลา 2 ตัวที่บรรจบเป็นมุมฉาก

ยังมีเฟืองดอกจอกบางชนิดซึ่งเห็นชนิดพิเศษ ที่มีมุมกรวยพิตช์ (Pitch cone angle) เท่ากับ 45° เฟืองชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า "เฟืองหมวก" แต่ถ้ามุมกรวยพิตช์เท่ากับ 90° จะเรียกว่า "เฟืองมงกุฎ" (Crown gear) เฟืองทั้งสองแบบนี้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.26

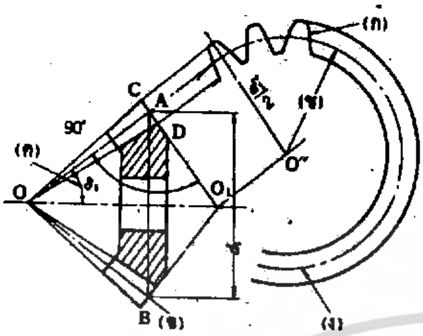


รูปที่ 2.26 เฟืองดอกจอกพิเศษ

จากรูปที่ 2.26 ให้พิจารณากรวยที่มีเพลาตัวเดียวกันกับกรวยของเฟืองดอกจอก เส้นแผ่ทั่ว ๆ ไป OP, O_2P ของเฟืองทั้งสองตัดตั้งฉากกับเส้นแผ่ทั่ว ๆ ไปของกรวยพิตช์ที่ขอบนอก กรวยเหล่านี้เรียกว่า "กรวยหลัง" (Back cone) (รูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2.27) และรูปร่างของฟันเฟืองที่ลอกลงบนกรวยที่สร้างขึ้น อาจจะถือได้ว่าเป็นรูปร่างของฟันของขอบนอกโดยประมาณของเฟืองดอกจอก



(ก) รูปร่างของเฟือง ตรงเทียบเท่า

(ข) รัศมีกรวยหลัง

(ค) มุมกรวยพิตช์

(ง) วงกลมพิตช์ของเฟือง ตรงเทียบเท่า

(จ) เฟือง ตรงเทียบเท่า

รูปที่ 2.27 กรวยหลังและเฟือง ตรงเทียบเท่า

เพื่อเป็นการเน้นให้ชัดลงไปจะได้ว่า เฟืองดอกจอกที่ฟันเฟืองถูกตัดด้วยมีดตรงลงบนผิวทรงกลมที่มีศูนย์กลางอยู่ที่ O และมีรัศมี OP จะได้รูปร่างของฟันเป็นเส้นโค้งที่เรียกว่า เส้นโค้งออคตอยด์ (Octoid profile) รูปร่างของฟันแบบนี้จะแตกต่างไปจากรูปร่างของโค้งอินเวอลูทของทรงกลม ในจินตนาการที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความผิดพลาดของมุมของเพลา ดังนั้น เฟืองดอกจอกธรรมดาจึงไม่สามารถให้อัตราส่วนความเร็วที่คงที่อย่างแท้จริง แต่ในทางปฏิบัติ เราจะถือว่าอัตราส่วนนี้มีค่าคงที่

รูปร่างของกรวยหลังที่สร้างขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นรูปแผ่เหมือนพัด (Fan shape) ที่ต่างจากเฟืองตรงก็ตรงที่รูปร่างเป็นวงกลมเท่านั้น แต่ในการพิจารณาจะคิดว่ามีเฟืองที่เป็นวงกลมสมบูรณ์กำลังขบกันอยู่ และเรียกเฟืองกลมสมบูรณ์ตัวนี้ว่า "เฟืองตรงเหมือน" (Virtual spur gear)

การประมาณของ Tredgold

ความสัมพันธ์ต่อไปนี้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนฟันของเฟืองดอกจอก z และจำนวนฟันเฟืองตรงเหมือน z_v เมื่อให้ R (ระยะกรวย) เป็นความยาวของเส้นแผ่ทั่ว ๆ ไปของกรวยพิตช์, d_1, d_2 (มม.) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมพิตช์ที่ขอบนอก และ m เป็นโมดุล

$$d_1 = 2R\sin\delta = zm$$

$$d_1^{\prime} = 2R\tan\delta = z_v m$$

$$\frac{\sin\delta}{\tan\delta} = \frac{z}{z_v}$$

$$z_v = \frac{z}{\cos\delta}$$

อัตราทด i ของเฟืองดอกจอกก็เช่นเดียวกับกรณีของเฟืองตรง แสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{OP\sin\delta_2}{OP\sin\delta_1} = \frac{R\sin\delta_2}{R\sin\delta_1}$$ สมการ 2.13

ให้มุมของเพลา $\Sigma = \delta_1 + \delta_2$

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{\sin\delta_2}{\sin(\Sigma - \delta_1)} = \frac{\tan\delta_2}{\sin\Sigma - \cos\Sigma\tan\delta_2}$$ สมการ 2.14

$$\therefore \tan\delta_2 = \frac{\sin\Sigma}{\frac{z_1}{z_2} + \cos\Sigma}$$ สมการ 2.15

ทำนองเดียวกัน

$$\therefore \tan\delta_2 = \frac{\sin\Sigma}{\frac{z_2}{z_1} + \cos\Sigma}$$ สมการ 2.16

ในกรณีที่ $\Sigma = 90°$

$$\tan\delta_1 = \frac{z_1}{z_2} = \frac{l}{i}, \tan\delta_2 = \frac{z_2}{z_1} = i\,.$$ สมการ 2.17

2.5.5 สัดส่วนของเฟืองดอกจอก

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิตช์

$$\left.\begin{aligned} d_1 &= mz_1 \\ d_2 &= mz_2 \end{aligned}\right\}$$ สมการ 2.18

ระยะของกรวย

$$R = \frac{d_1}{2\sin\delta_1} = \frac{d_2}{2\sin\delta_2}$$ สมการ 2.19

เฟืองบางชนิดความสูงของฟันจะค่อย ๆ สั้นลงตามลำดับจากขอบนอกถึงขอบใน แต่บางชนิดความสูงของฟันจะเท่ากันหมด เฟืองแบบแรกนี้เรียกว่า "ฟันเรียว" (Tapered teeth) และชนิดหลังเรียกว่า "ฟันสูงสม่ำเสมอ" (Uniform height teeth) ในทางใช้งานแบบฟันเรียวได้รับความนิยมมากกว่าแบบฟันสูงสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีการออกแบบฟันเรียว แอดเดนดัมของพีเนียนจะออกแบบไว้ให้สูงกว่าของเฟืองดังนั้น จึงต้องมีการแต่งแอดเดนดัมด้วยสัมประสิทธิ์การขยายแอดเดนดัม ดังต่อไปนี้

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= 0.46\left[1-\left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2\right] \\ x_2 &= -x_1 \end{aligned}\right\}$$ สมการ 2.20

ดังนั้นถ้า $c_k \geq 0.188m$ เป็นระยะเว้นบนแล้ว ในกรณีของพีเนียนจะได้

แอดเดนดัม $h_{k1} = (1+x_1)m$
ดีเดนดัม $h_{f1} = (1-x_1)m + c_k$ สมการ 2.21

และความลึกทั้งหมดของฟัน คือ

$$H = 2m + c_k$$

มุมแอดเดนดัมของพีเนียน $\theta_{k1} = \tan^{-1}(h_{k1}/R)$
มุมดีเดนดัมของพีเนียน $\theta_{f1} = \tan^{-1}(h_{f1}/R)$ สมการ 2.22

มุมแอดเดนดัมของเฟือง $\theta_{k2} = \tan^{-1}(h_{k2}/R)$
มุมดีเดนดัมของเฟือง $\theta_{f2} = \tan^{-1}(h_{f2}/R)$ สมการ 2.23

ดังนั้น มุมกรวยแอดเดนดัม คือ

$$\delta_{k1} = \delta_1 + \theta_{k1}, \delta_{k2} = \delta_2 + \theta_{k2}$$ สมการ 2.24

ทำนองเดียวกันมุมที่โคนกรวย (Root cone angle) คือ

$$\delta_{f1} = \delta_1 - \theta_{f1}, \delta_{f2} = \delta_2 - \theta_{f2}$$ สมการ 2.25

เมื่อมองในแง่ของการผลิตแล้ว เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมแอดเดนดัมแต่ละตัวเป็นสิ่งจำเป็นมาก และจะเขียนได้เป็น

$$\left.\begin{aligned} d_{k1} &= d_1 + 2h_{k1}\cos\delta_1 \\ d_{k2} &= d_2 + 2h_{k2}\cos\delta_2 \end{aligned}\right\}$$ สมการ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะจากจุดยอดของกรวยพิตช์ถึงปลายนอกสุด คือ

$$\left.\begin{aligned} X_1 &= \frac{d_2}{2} - h_{k1}\sin\delta_1 \\ X_2 &= \frac{d_1}{2} - h_{k2}\sin\delta_2 \end{aligned}\right\} \quad \text{สมการ 2.27}$$

สมมุติให้ α_0 เป็นมุมกดดัน และระยะหลวมมีค่า = 0 แล้ว ความหนาของฟันในแนวเส้นรอบวงคือ

$$\left.\begin{aligned} s_1 &= (0.5\pi + 2x_1\tan\alpha_o)m \\ s_2 &= (0.5\pi + 2x_1\tan\alpha_o)m \\ s_1 + s_2 &= \pi m \end{aligned}\right\} \quad \text{สมการ 2.28}$$

เลือกให้ความกว้างของหน้าฟัน b อยู่ในช่วงประมาณ 1/3 เท่าของระยะกรวยหรือให้น้อยกว่า 10 เท่าของโมดุลขอบนอก ในทางปฏิบัติจริง ๆ นั้น น้อยมากที่จะให้มีรองลื่นรับทั้งหัวและท้ายของเฟืองดอกจอกทั้งสองตัวโดยปกติแล้ว ไม่ที่พิเนียนก็เฟืองจะมีรองลื่นรับอยู่เพียงปลายเดียวเท่านั้น หรือไม่ก็เฟืองทั้งสองตัวมีรองลื่นรับอยู่ปลายเดียวทั้งคู่ ดังนั้น โหลดบนฟันเฟืองจึงไม่กระจายสม่ำเสมอจริง ๆ ทั้งนี้ เนื่องจากการโก่งของเพลาหรือของฟันเฟืองเอง นอกจากนี้ ฟันส่วนในจะมีขนาดเล็กเกินไป ถ้าความกว้างของหน้าฟันมากเกินไป ดังนั้นจึงนิยมเลือกให้หน้าฟันแคบที่สุดเท่าที่จะทำได้

ในการคำนวณจะเริ่มต้นด้วยการคำนวณเรื่องการคัดก่อน โหลดการตัดที่ยอมให้ต่อความกว้างของหน้าฟัน F_b' (กก./มม.) สำหรับฟันขนาดเฉลี่ยทั่ว ๆ ไป จะแสดงได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} F_{b1}' &= \frac{\sigma_{a1} m K_v J_1}{K_o K_s K_m} \\ F_{b2}' &= \frac{\sigma_{a2} m K_v J_2}{K_o K_s K_m} \end{aligned}\right\} \quad \text{สมการ 2.29}$$

σ_{a1} และ σ_{a2} (กก./มม.^{2}) คือความเค้นคัดที่ยอมให้ ดังแสดงในตาราง 2.9, K_v เป็นแฟคเตอร์จลน์ ซึ่งก็เปรียบได้กับแฟคเตอร์จลน์ของเฟืองตรงเช่นกัน ค่า K_v ได้กำหนดให้ไว้ในรูปที่ 2.28

J_1 และ J_2 เป็นแฟคเตอร์ทางเรขาคณิต และกำหนดไว้ให้ในรูปที่ 2.29 ส่วน K_o เป็นแฟคเตอร์การใช้เกินกำลัง ดังแสดงในตารางที่ 2.10

K_s เป็นแฟคเตอร์ของขนาดที่อาจหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

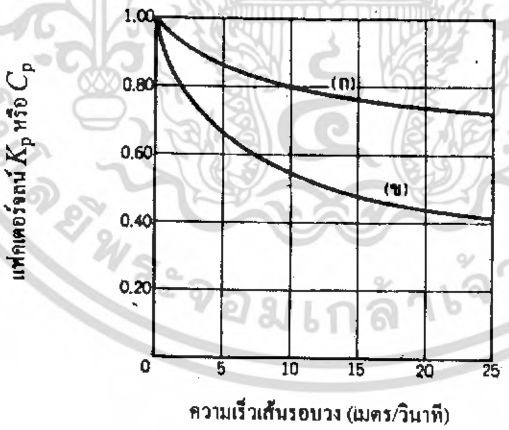
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $m \geq 1.5, K_s = \frac{\sqrt[4]{m}}{2.24}$

และถ้า $m < 1.5, K_s = 0.5$

ตารางที่ 2.9 ความเค้นดัด และความเค้นสัมผัสที่ยอมให้ของเฟืองดอกจอก

วัสดุ	กระบวนการทางความร้อน	ความแข็งต่ำสุดที่ผิว		ความเค้นดัดที่ยอมให้ (กก.มม.^{2})	ความเค้นสัมผัสที่ยอมให้ (กก.มม.^{2})
		H_B	R_C		
เหล็กเหนียว	การชุบผิวให้เป็นคาร์ไบด์	625	60	22.7	189
	การชุบผิวให้เป็นคาร์ไบด์	575	55	22.7	151
	การชุบเข็งด้วยไฟฟ้าความถี่สูง	500	50	10.2	144
	ชุบแข็งและอบคืนตัว	440		18.9	102
	ชุบแข็งและอบคืนตัว	300		14.4	92
	ชุบแข็งและอบคืนตัว	180		10.2	
เหล็กหล่อ	หล่อ	200		5.3	49
	หล่อ	175		3.1	38
	หล่อ	-		2.0	23



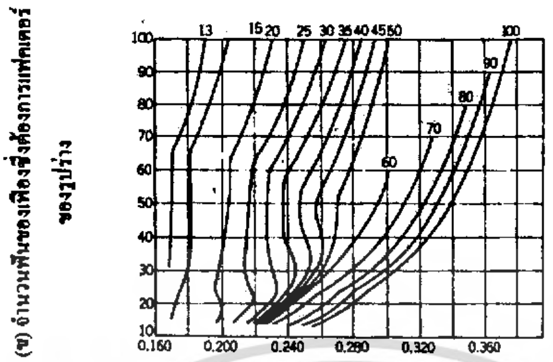
(ก) เฟืองดอกจอกฟันตรงมีความประณีตสูง และ

(ข) เฟืองดอกจอกฟันตรงมีความประณีตต่ำ

รูปที่ 2.28 แฟคเตอร์จลน์ของเฟืองดอกจอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) จำนวนฟันของเฟืองที่กำลังขบกัน



(ค) สัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของความแข็งแรงคัด

รูปที่ 2.29 เฟืองดอกจอกฟันตรงมีมุมกดคัน20° เพลาทำมุม 90°

ตารางที่ 2.10 แฟคเตอร์ การใช้เกินกำลัง K_o, C_o

การกระแทกทางด้านขับ	การกระแทกทางด้านถูกขับ		
	ไม่มีการกระแทก	กระแทกปานกลาง	กระแทกมาก
ไม่มีการกระแทก	1.00	1.25	1.75
กระแทกปานกลาง	1.25	1.50	2.00
กระแทกหนัก	1.50	1.75	2.25

K_m เป็นแฟคเตอร์การกระจายโหลด ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของการยึดเฟืองว่าเป็นแบบมีรองลื่นรับทั้งสองด้าน หรือมีรับเพียงด้านเดียว ค่า K_m ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.11

ในทำนองเดียวกัน การคำนวณหาโหลดที่ผิวหน้า F'_H (กก./มม.) สำหรับขนาดของฟันโดยเฉลี่ย คือ

$$F'_H = \sigma^2 \frac{d_1}{C_p^2} \frac{C_v I}{C_o C_m C_f} \qquad \text{สมการ 2.30}$$

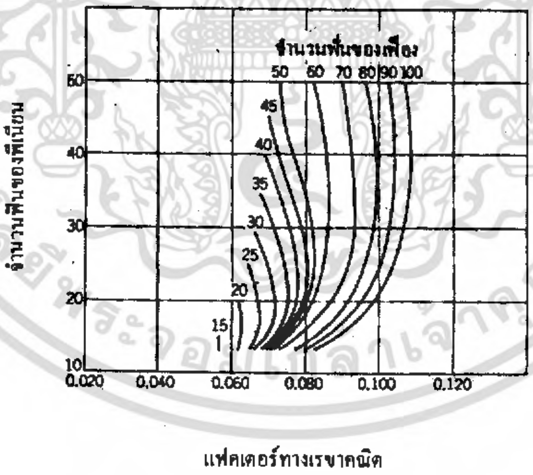
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 แฟคเตอร์การกระจายของโหลด K_m, C_m

	ทั้งพีเนียนและเฟืองมีรองลื่นรับทั้งสองด้าน	พีเนียนหรือเฟืองตัวใดตัวหนึ่งมีรองลื่นรับปลายเดียว	ทั้งพีเนียนและเฟืองมีรองลื่นรับปลายเดียว
เฟืองทดทั่ว ๆ ไป	1.00 – 1.10	1.10 – 1.25	1.25 – 1.40
รถยนต์	1.00 – 1.10	1.10 – 1.25	-
เครื่องบิน	1.00 – 1.25	1.10 – 1.40	1.25 – 1.50

ตารางที่ 2.12 สัมประสิทธิ์ยืดหยุ่น

	วัสดุทำเฟือง	เหล็กเหนียว	เหล็กหล่อ
วัสดุทำพีเนียน	E (กก./มม.^{2})	2.27×10^{-4}	1.44×10^{-4}
เหล็กเหนียว	2.27×10^{-4}	74.2	64.9
เหล็กหล่อ	1.44×10^{-4}	64.9	59.6



รูปที่ 2.30 เฟืองดอกจอกฟันตรงที่มุกกดดัน 20° และเพลาที่ทำมุมกัน 90°

σ_c (กก./มม.^{2}) คือค่าความเค้นสัมผัสที่ยอมให้ (ตารางที่ 2.9) ในทางปฏิบัติต้องมีการเปรียบเทียบความเค้นของพีเนียนและเฟืองคู่ ตัวไหนมีค่าน้อยกว่า ก็ให้เลือกตัวนั้นมาใช้งาน

C_p (กก./มม.) คือสัมประสิทธิ์ยืดหยุ่นของวัสดุ ค่า C_p สำหรับเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อ แสดงไว้ในตารางที่ 2.12 C_v คือแฟคเตอร์จลน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 C_o คือแฟคเตอร์ของโหลดเกินกำลัง (ตารางที่ 2.10) C_m คือแฟคเตอร์การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายของโหลด (ตารางที่ 2.11) และ C_f คือแฟคเตอร์สภาพของผิว ซึ่งตามปรกติให้เท่ากับ 1 ท้ายสุด I คือแฟคเตอร์ทางเรขาคณิตของฟันเฟือง ดังแสดงในรูปที่

ในการคำนวนจะหาค่า F'_{b1}, F'_{b2}, และ F'_{H} ได้ แต่จะเลือกใช้ค่าน้อยที่สุดคือ F'_{min} ส่วนกาหาค่าความกว้างของหน้าฟันเฟือง ได้จากการหารแรงในแนวสัมผัสที่จำเป็น F_t(กก.) = 102 P/v ด้วย F'_{min} (กก./มม.) จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าหากใช้วิธีการลองเลือกความกว้างของหน้าฟันเฟืองขึ้นมา และหารความกว้างนี้ด้วยโมดุลและ v (เมตร/วินาที) ถ้าค่าที่ได้ต่ำกว่า 1/3 ของระยะกรวย หรือน้อยกว่า 10 เท่าของโมดุลขอบนอกแล้วก็หมายความว่า นั่นคือความกว้างที่ต้องการ

2.6 หุ่นยนต์

2.6.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์และควบคุมหุ่นยนต์ (Fundamental of Robotic Analysis and Control)

หุ่นยนต์ (Robot) คืออุปกรณ์ทางกลที่ควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ โดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับ End – effector ของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ตามโปรแกรมในพื้นที่การทำงาน (Workspace) เพื่อทำการเคลื่อนย้ายวัตถุ

การแบ่งแยกประเภทหุ่นยนต์ (Robot Classification)

1. เทคโนโลยีการขับเคลื่อน (Drive Technologies)

พิจารณาจากต้นกำลังที่ใช้ขับข้อต่อของหุ่นยนต์ ที่นิยมมี 2 แบบ คือ การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก แขนกลส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นแบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ (DC Servo Motor) ดีซีสเต็บปิ้งมอเตอร์ (DC Stepping Motor) ในการเคลื่อนย้ายวัตถุที่ต้องการความเร็วสูง มักนิยมใช้แบบขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก

2. รูปทรงของขอบเขตการทำงาน (Work Envelope Geometries)

ขอบเขตการทำงานสุทธิ (Gross Work Envelope) หมายถึงขอบเขตในปริภูมิ สามมิติที่ข้อมือของแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปตำแหน่งนั้นได้ เราจะเรียกแกนของ 3 ข้อต่อแรกของแขนกลว่าแกนหลัก (Major axe) ซึ่งใช้ในการพิจารณาตำแหน่งของข้อมือ ส่วนแกนของข้อต่อที่เหลือเรียกว่า แกนรอง (Minor axe) ใช้กำหนดลักษณะการวางตัวหรือหมุน (Orientation) ของ tool ดังนั้นรูปทรงของขอบเขตการทำงานจึงพิจารณาได้จาก ลำดับชนิดของข้อต่อที่ใช้ใน 3 แกนแรก ข้อต่อมีหลายแบบแต่ที่เป็นพื้นฐานและนิยมใช้มี 2 แบบ

ตารางที่ 2.13 ชนิดของข้อต่อหุ่นยนต์

ชนิด	เครื่องหมาย	สัญลักษณ์	การเคลื่อนที่
ข้อต่อหมุน (Revolute) ข้อต่อเลื่อน (Prismatic)	R P		แบบหมุนรอบแกน เชิงเส้นตามแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมตัวของข้อต่อหมุน (R) และข้อต่อเลื่อน (P) ใน 3 แกนหลัก ก่อให้เกิดรูปทรงการเคลื่อนที่หลายรูปแบบ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.14 ซึ่งแสดงเฉพาะรูปแบบที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนกล ข้อต่อหมุน (R) จะวิเคราะห์ยากกว่าแบบข้อต่อเลื่อน (P) ดังนั้นยิ่งมีข้อต่อหมุนมาก แขนกลก็จะยิ่งซับซ้อนมากขึ้น

ตารางที่ 2.14 ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ (Robot work envelopes) ที่ขึ้นอยู่กับแกนหลัก

Robot	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Total revolute
Cartesian	P	P	P	0
Cylindrical	R	P	P	1
Spherical	R	R	P	2
SCARA	R	R	P	2
Articulated	R	R	R	3

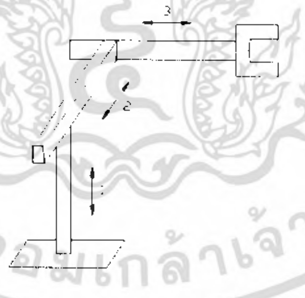
P = prismatic, R = revolute

2.6.2 ชนิดของหุ่นยนต์

แบ่งตามลักษณะขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ (Robot work envelopes) ได้เป็น 5 ชนิด

2.6.2.1 <u>หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian – coordinate robot) หรือหุ่นยนต์พิกัดฉาก (Rectangular – coordinate robot)</u>

สัญลักษณ์ PPP ดังรูปที่ 2.31 โดยข้อมือจะเลื่อน ขึ้น-ลง, เข้า-ออก และเดินหน้า-หลัง ทำให้พื้นที่การทำงานมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมุมฉาก

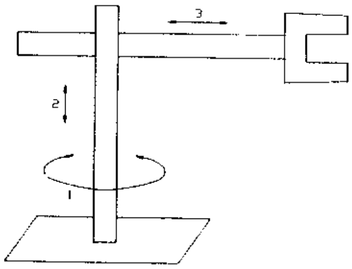


รูปที่ 2.31หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน

2.6.2.2 <u>หุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอก (Cylindrical – coordinate robot)</u>

สัญลักษณ์ RPP แสดงดังรูปที่ 2.32 สามารถเคลื่อนที่ขึ้นข้างบนได้ตามแกนตั้งที่เป็นแกนหลัก สามารถเคลื่อนที่เข้า ออกตามแนวรัศมี และแขนหมุนรอบแกนตั้งฉากกับฐานได้ พื้นที่การทำงานจึงเป็นแบบทรงกระบอก

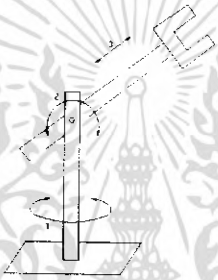
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 หุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอก

2.6.2.3 หุ่นยนต์พิกัดทรงกลม (Spherical – coordinate robot)

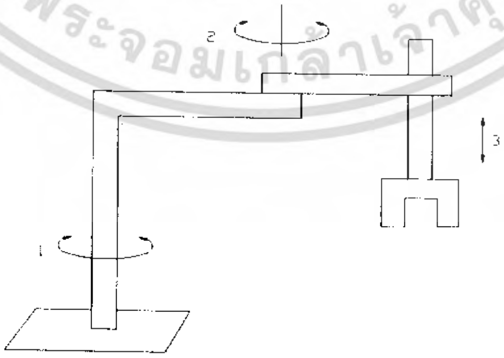
สัญลักษณ์ PPP แสดงดังรูปที่ 2.33 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนจะสามารถยกขึ้นลงได้ในแนวดิ่ง โดยยกทำมุมกับฐานแขนสามารถหมุนได้รอบแกนแนวตั้งของฐาน พื้นที่การทำงานเป็นแบบทรงกลม



รูปที่ 2.33 หุ่นยนต์พิกัดทรงกลม

2.6.2.4 หุ่นยนต์ สคารา (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

ดังรูปที่ 2.34 มีลักษณะคล้ายหุ่นยนต์พิกัดทรงกลม มีลักษณะ RRP แต่แกนทั้ง 3 จะอยู่แนวตั้ง โดยข้อที่ 2 ทำให้แขนหมุนรอบแกนตั้งในแนวนอนเหมือนการหมุนของข้อแรก ภาพดังขวางในแนวนอนของพื้นที่การทำงานค่อนข้างซับซ้อนขึ้นอยู่กับข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของสองแกนแรก

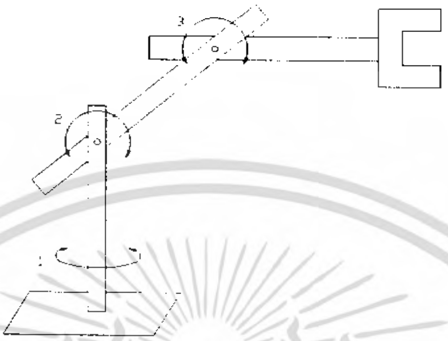


รูปที่ 2.34 หุ่นยนต์ SCARA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.5 หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน (Articulate – coordinate robot)

หรือเรียก Revolute robot สัญลักษณ์ RRR ทั้ง 3 ข้อเป็นแบบข้อต่อหมุน หุ่นยนต์แบบนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับแขนของมนุษย์มากที่สุด มีข้อหมุนต่าง ๆ เหมือนกัน ดังนั้นพื้นที่การทำงานจึงสามารถที่จะทำงานได้ในทุกตำแหน่งในระยะความยาวของแขน



รูปที่ 2.35 หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน

ข้อดี – ข้อเสีย ของหุ่นยนต์แต่ละชนิดนี้แตกต่างกันออกไป เพราะลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน แต่ถ้ามองในแง่ของการทำงานที่เป็นแบบซ้ำ ๆ ที่เดิมตลอด หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน จะสามารถทำงานได้ดีกว่า คือสามารถเคลื่อนที่ไปหาเป้าหมายโดยมีความผิดพลาดน้อยที่สุด แต่ถ้ามองในแง่การเข้าถึงวัตถุ ชนิดพิกัดทรงกลมและข้อต่อหมุนจะสามารถเข้าถึงวัตถุได้มากกว่า

2.6.3 ลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์ (Robot Specification)

นอกจากเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการแบ่งประเภทของหุ่นยนต์ดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีลักษณะบางอย่างที่ช่วยผู้ใช้ในการเลือกหุ่นยนต์ที่ต้องการ ลักษณะต่าง ๆ เหล่านี้แสดงดังตารางที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

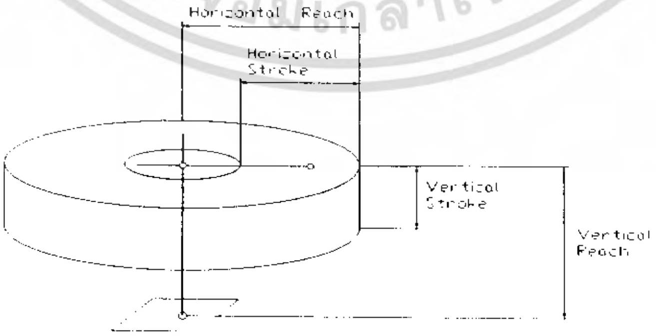
ตารางที่ 2.15 คุณลักษณะของหุ่นยนต์

คุณลักษณะ (Characteristics)	หน่วย (Unit)
จำนวนแกน	-
ความสามารถในการยกน้ำหนัก	Kg
ความเร็วสูงสุด, เวลาครบรอบ	Mm/ sec
ระยะเอื้อมถึงและสโตรก	Mm
การหมุนของเครื่องมือ	Deg
การซ้ำตำแหน่งเดิม	Mm
ความละเอียดและความแม่นยำ	Mm
สภาวะแวดล้อมการทำงาน	-

ระยะที่เอื้อมถึงและสโตรก (Reach and Stroke) เป็นการวัดขนาดของพื้นที่ทำงาน (Work Envelop) อย่างคร่าวๆ ระยะที่เอื้อมถึงในแนวนอน (Horizontal Reach) คือระยะทางตามแนวรัศมีที่มากที่สุดที่ข้อมือสามารถไปถึงโดยวัดจากแกนแนวตั้งที่ทำให้หุ่นยนต์หมุน สโตรกแนวนอน (Horizontal Stroke) คือระยะทางตามแนวรัศมีทั้งหมดที่ข้อมือสามารถไปได้ ดังนั้นระยะที่เอื้อมถึงแนวนอน ลบด้วยสโตรกแนวนอน คือ ระยะตามแนวรัศมีที่น้อยที่สุดที่ข้อมือสามารถไปถึงได้โดยวัดจากแกนฐานซึ่งมีค่าเป็นบวกเสมอ จึงได้ว่า

$$\text{Stroke} \leq \text{Reach}$$

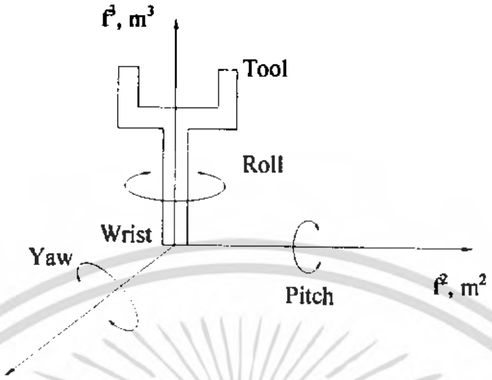
ตัวอย่างเช่น ระยะที่เอื้อมถึงในแนวนอน (Horizontal Reach) ของหุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอกก็คือรัศมีของทรงกระบอกอันนอกของพื้นที่การทำงาน ในขณะที่สโตรกแนวนอน (Horizontal Stroke) คือผลต่างระหว่างรัศมีของทรงกระบอกอันในและอันนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ระยะที่เอื้อมถึงและสโตรกของหุ่นยนต์ทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนของ Tool (Tool orientation) ในขณะที่ 3 แกนหลักใช้ในการพิจารณารูปทรงของพื้นที่การทำงาน แกนที่เหลือจึงใช้ในการพิจารณาการหมุนของ tool ถ้ามีแกนอิสระ 3 แกนก็ทำให้ tool หมุนได้อย่างไม่จำกัดในแขอบเขต 3 มิติ การระบุลักษณะการหมุนของ Tool จะใช้ระบบ yaw – pitch –roll (YPR) ดังรูปที่ 2.37



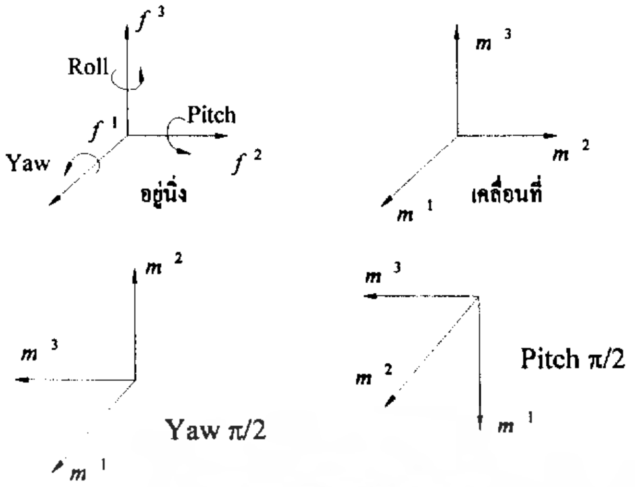
รูปที่ 2.37 yaw – pitch – roll ของ tool

ในการระบุการหมุน จะติดโครงพิกัด Tool M ={m^1, m^2, m^3 } ไว้ที่ tool และโครงนี้จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับ tool ดังแสดงในรูปที่ 2.38 แกน m^3 ขนานอยู่ในแนวเดียวกับแกนของ tool และชี้ออกจากข้อมือ แกน m^3 ขนานกับทิศทางที่ปลายนิ้วของ Tool เลื่อนปิด- เปิด ส่วนแกน m^1 เป็นไปตามกฎมือขวาของโครงพิกัด M

การเคลื่อนที่แบบ yaw – pitch –roll จะกระทำตามลำดับกับแกนที่อยู่นิ่ง เมื่อเริ่มต้นโครงพิกัดเคลื่อนที่ของ Tool M จะทับอยู่กับโครงพิกัดอยู่นิ่งของข้อมือ F = {f^1, f^2, f^3} ซึ่งติดอยู่ที่ส่วนปลายของปลายแขน (Forearm) yaw คือการหมุน tool รอบแกนข้อมือ f^1, pitch คือการหมุน Tool รอบแกนข้อมือ f^2, roll คือการหมุน Tool รอบแกนข้อมือ f^3 ในแต่ละกรณีมุมบวกเกิดจากการหมุนทวนเข็มนาฬิกาโดยมองจากปลายแกนเข้าหาจุดกำเนิด

ลำดับของการหมุน yaw, pitch, row มีความสำคัญมาก เพราะมีผลต่อลักษณะการวางตัวสุดท้ายของ Tool ตัวอย่างเช่น หมุน yaw ไป 90° ตามด้วย pitch 90° จะมีลักษณะการวางตัวสุดท้ายต่างกับการหมุน pitch 90° ไป แล้วตามด้วย yaw 90° เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมุน Yaw ตามด้วย Pitch

หมุน Pitch ตามด้วย Yaw

รูปที่ 2.38 ลำดับการหมุนแกน

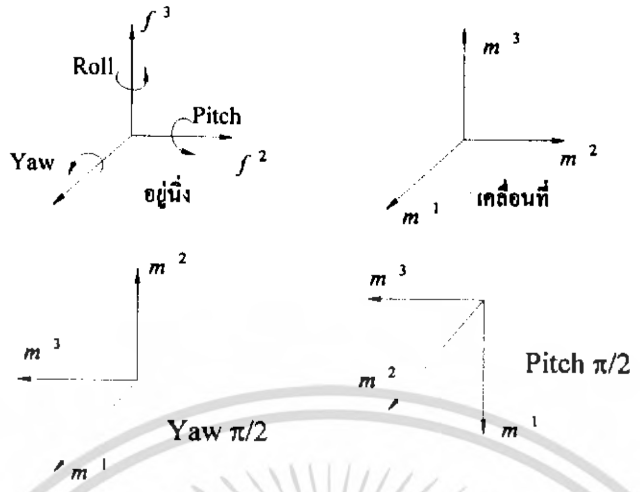
การกำหนด YPR ตามลำดับการหมุนแสดงดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 การเคลื่อนที่แบบ yaw, pitch และ row

ขั้นตอน	การอธิบาย	แกน
1	Yaw	F^1
2	Pitch	F^2
3	Roll	F^3

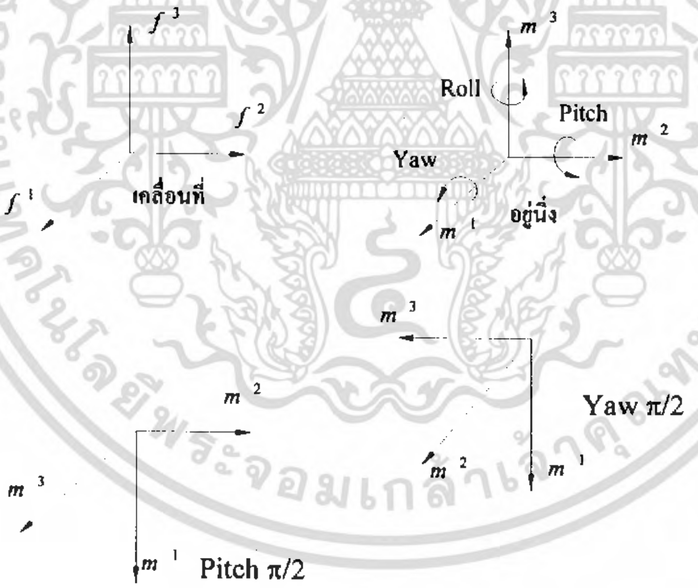
อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ระบุการหมุนคือ ระบุลำดับการหมุนย้อนลำดับกับ YPR และคิดเทียบกับโครงพิกัดเคลื่อนที่ของ tool M แทนที่โครงพิกัดอยู่นิ่งของข้อมือ F ดังรูปที่ 2.39 โดยเริ่มแรก roll คือการหมุนรอบแกน m^3, pitch คือการหมุนรอบแกน m^2, yaw คือการหมุนรอบแกน m^1 การคิดลักษณะนี้เรียกว่า เป็นระบบ RPY จะให้ผลลัพธ์เหมือนกับแบบ YPR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมุน Yaw ตามด้วย Pitch

รูปที่ 2.39 ระบบ YPR



หมุน Pitch ตามด้วย Yaw

รูปที่ 2.40 ระบบ RPY

2.6.4 ความแม่นยำของการเคลื่อนที่

ความสำคัญประการหนึ่งของการสร้างหุ่นยนต์คือความแม่นยำในการทำงาน ซึ่งความแม่นยำนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4.1 ความละเอียดการเคลื่อนที่ (Spatial Resolution)

คือช่วงการเคลื่อนที่ที่มีระยะทางสั้นที่สุดที่หุ่นยนต์แต่ละตัวสามารถที่จะทำได้ ซึ่งการแบ่งความละเอียด (Spatial Resolution) นี้ขึ้นอยู่องค์ประกอบสำคัญ 2 ประการ คือ

1 ระบบการควบคุม (Control System)

ระบบการควบคุมนี้จะรวมถึงการวัดสัญญาณป้อนกลับของหุ่นยนต์ด้วย

2 ความคลาดเคลื่อนเชิงกล (Mechanical inaccuracy)

ความคลาดเคลื่อนเชิงกลของหุ่นยนต์แต่ละตัวขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อหมุน (Joint) และข้อต่อ (link) และระบบต้นกำลังของหุ่นยนต์ตัวนั้นด้วย

2.6.4.2 ความแม่นยำเที่ยงตรง (Accuracy)

คือตัวที่แสดงความสามารถของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่เข้าใกล้จุดเป้าหมายตามที่เราสั่งความแม่นยำเที่ยงตรง (Accuracy) สามารถที่จะกำหนดให้อยู่ในเทอมของ Spatial Resolution ได้ทั้งนี้เพราะว่าการเคลื่อนที่ให้เข้าใกล้จุดเป้าหมาย ก็ต้องขึ้นกับช่วงของการเคลื่อนที่ว่ามีความละเอียดมากน้อยเพียงใด ในการทำงานเราต้องวางชิ้นงานที่เราต้องการให้หุ่นยนต์ทำงานอยู่ระหว่างกลางของตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ทั้งนี้เพราะว่าความคลาดเคลื่อนเชิงกล มีผลต่อความแม่นยำของหุ่นยนต์ ความแม่นยำของหุ่นยนต์กำหนดให้เท่ากับครึ่งหนึ่งของระยะการเคลื่อนที่ที่สั้นที่สุดของหุ่นยนต์ที่สามารถทำได้ โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่อไปนี้

1. พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ ถ้าแขนทำงานในพื้นที่การทำงานจะมีความแม่นยำมากกว่าเมื่อแขนออกนอกพื้นที่การทำงาน

2. วงรอบการทำงาน ถ้าวงรอบการทำงานเป็นวงรอบที่แน่นอนความแม่นยำจะมีมากขึ้น

3. น้ำหนักที่ได้รับ ถ้าหุ่นยนต์ทำงานโดยการรับน้ำหนักมาก ๆ ความแม่นยำจะลดลง

2.6.4.3 ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

คือ ความสามารถของหุ่นยนต์ในการกลับการทำงานซ้ำที่เดิม หลาย ๆ ครั้งได้ เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น Backlash ในเฟืองและความยืดหยุ่น (Flexibility) ของส่วนต่าง ๆ ซึ่งมักทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำซ้ำ ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

2.6.5 จุดปลายแขน

จุดปลายแขน (End – Effector) หรือ "มือ" ของหุ่นยนต์นี้เป็นอุปกรณ์ที่หุ่นยนต์ใช้ทำงานจริง (ส่วนแขนนั้นใช้เพื่อเลื่อนตำแหน่ง "มือ" นี้ให้ไปอยู่ในจุดที่ต้องการเท่านั้น) งานที่ส่วนนี้ทำก็อาทิเช่น การจับชิ้นส่วน การบัดกรีตามจุด การพ่นสี ฯลฯ ดังนั้นลักษณะของส่วนนี้จึงต่างกันออกไป สุดแท้แต่จินตนาการของผู้ออกแบบ ซึ่งต้องออกแบบให้เหมาะกับงาน แต่ถ้าจะมีการแบ่งกันเป็นชนิดแล้ว จุดปลายแขน (End - Effector) นี้จะออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ แบบมือจับ (Gripper) แบบมือที่เป็นอุปกรณ์ (Tool as End - Effector)

2.6.5.1 มือจับ (Gripper)

มือจับ (Gripper) นี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้จับชิ้นส่วนหรือเครื่องมือ โดยการออกแบบมีได้หลายลักษณะทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบมือคีบ (อาศัยแรงเสียดทานในการจับ) ใช้งานได้กับวัสดุทุกประเภท แต่หากเป็นวัสดุบอบบางอาจต้องมีอุปกรณ์อื่นช่วยเสริม

2. แบบถ้วยสุญญากาศ (Suction Cup) อาศัยคุณสมบัติการทำให้เกิดสภาพสุญญากาศ เป็นตัวดึงชิ้นงานใช้ได้กับวัตถุผิวเรียบเท่านั้น

3. แบบตะขอ (Hook) สำหรับเกี่ยวยกของ เช่น ของที่อยู่บนสายพาน ฯลฯ

4. แบบตัก (Scoop) สำหรับการลำเลียงของที่เป็นของเหลวหรือฝุ่นผง

2.6.5.2 <u>มือที่เป็นอุปกรณ์ (Tool as End Effector)</u>

เนื่องจาก Gripper มีข้อจำกัด ใช้ได้เฉพาะกับงานหยิบจับวัสดุเท่านั้น แต่การใช้งานของหุ่นยนต์มีขอบเขตกว้างขวาง จึงได้มีการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานติดเข้าในส่วนปลายหรือส่วนมือนี้เพื่อใช้ในการทำงานโดยอาจจะเป็นอุปกรณ์ที่ติดตายหรือถอดเปลี่ยนได้ ก็แล้วแต่การออกแบบตัวอย่างของมือที่เป็นอุปกรณ์นี้มีมากมาย อาทิเช่น

- ติดอุปกรณ์เชื่อมเฉพาะจุด (Spot Welding Gun)
- ติดอุปกรณ์พ่นสี (Spray Paint Gun)
- ติดอุปกรณ์สว่าน (Drilling Spindle)

ฯลฯ

2.6.6 กลศาสตร์ของหุ่นยนต์ และสมการของแขนกล

แขนกลมีลักษณะเป็นวัตถุเกร็ง (Rigid body) เป็น link หลาย ๆ อันนำมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดยใช้ข้อต่อปลายข้างหนึ่งของ link ริมสุดจะติดแน่นกับฐานส่วนปลายของ link อีกอันที่อยู่คนละด้านจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ปลายข้างที่เคลื่อนที่นี้จะต่อเข้ากับเครื่องมือ (Tool or End - effecter) ตามปกติข้อต่อ 2 ชนิดที่ใช้เชื่อมต่อ link คือข้อต่อหมุน (Revolute joint) และข้อต่อเลื่อน (Prismatic joint)

จุดประสงค์คือ การควบคุมทั้งตำแหน่งและการหมุนของเครื่องมือในระนาบ 3 มิติ เพื่อที่โปรแกรมให้เครื่องมือเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ และใช้ในการเคลื่อนย้ายวัตถุในพื้นที่ทำงาน โดยโปรแกรมการเคลื่อนที่ของเครื่องมือนี้ จำเป็นจะต้องคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ข้อต่อกับตำแหน่งและการหมุนของอุปกรณ์ ซึ่งเรียกว่า ปัญหา Direct Kinematics โดยนิยามดังนี้

ปัญหา Direct Kinematics คือการกำหนดเวคเตอร์ของตัวแปรข้อต่อ (Joint Variables) ของแขนกลโดยแยกตามลักษณะข้อต่อเป็น

- ข้อต่อหมุน ตัวแปรได้แก่ ค่าองศาการหมุนรอบแกนข้อต่อ
- ข้อต่อเลื่อน ตัวแปรได้แก่ ระยะการเลื่อนที่ไปตามแนวแกนข้อต่อแล้วทำการคำนวณหาตำแหน่ง (Position) และการหมุน (Orientation) ของเครื่องมือเทียบกับโครงพิกัดที่ติดอยู่กับฐานของแขนกล

2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.7.1 หลักการทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ คือ เครื่องจักรที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เพื่อนำพลังงานที่ได้ไปขับเคลื่อนสิ่งต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ซึ่งการเรียกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพราะว่าใช้ไฟฟ้ากระแสตรงนั่นเอง โดยพลังงานกลที่ได้นี้อาศัยหลักการดังนี้คือ เมื่อมีกระแสไหลในตัวนำซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก ย่อมทำให้เกิดแรงขึ้นในทิศทางที่แน่นอน ได้กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง โดยขนาดของแรงที่เกิดขึ้นหาได้จาก สมการ

$$F = B*I*L \qquad \text{สมการ 2.31}$$

โดย

F = แรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำ (นิวตัน)

B = ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (เวเบอร์/ตารางเมตร)

I = กระแสที่ไหลผ่านตัวนำ (แอมป์)

L = ความยาวของตัวนำ (เมตร)

แรงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและกระแสที่ไหลผ่านในตัวนำเมื่อขดอาเมเจอร์ของสนามแม่เหล็กหลักหมุน จะทำให้เกิดตัวนำที่อยู่ในขดลวดอาร์มาเจอร์ ตัดเส้นแรงแม่เหล็กที่มาจากสนามแม่เหล็กหลัก ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นบนตัวนำภายในอาร์มาเจอร์ซึ่งเป็นตามกฎการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางสวนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่ใส่เข้าไปให้กับมอเตอร์ จึงเรียกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนกับ E_b (Back emf)

การหากระแสที่ไหลในขดอาเมเจอร์ I_a หาได้จากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.41 จะได้ว่า

$$I_a = (V-E_b) / R \qquad \text{สมการ 2.32}$$

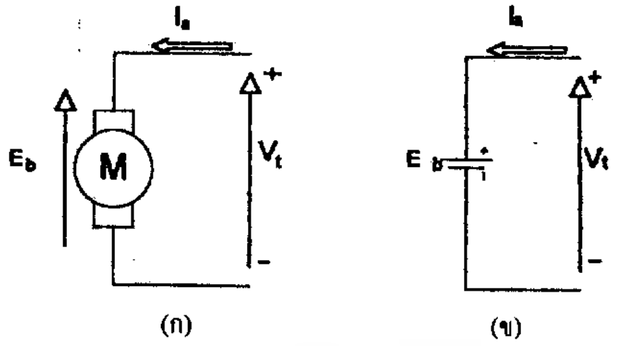
โดย V คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

$$T*2\pi S = E_b * I_b \qquad \text{สมการ 2.33}$$

โดย S = ความเร็วรอบของมอเตอร์ (รอบ/วินาที)

T = แรงบิดที่เกิดขึ้นใจขดอาร์มาเจอร์ (นิวตัน)

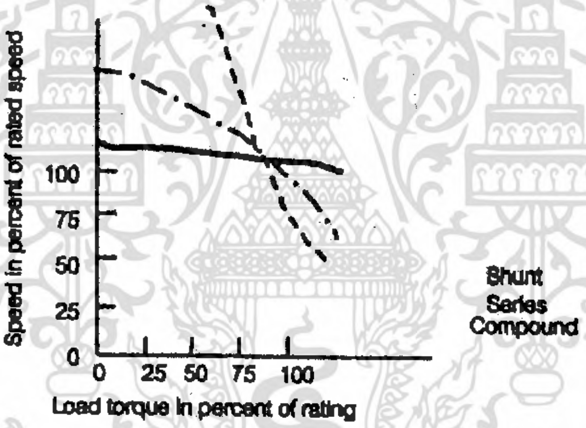
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.41 (ก)วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
(ข) วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ที่เขียนแทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าสวนกลับได้ด้วยแบตเตอร์รี่ E_b

2.7.2 คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพิจารณาได้จากกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานจะมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง โดยขณะที่ความเร็วลดลง แรงบิดจะเพิ่มขึ้น เหมาะกับงานที่ต้องการ สปีดเร็กกูเรชัน (Speed regulation) ดี ๆ

จากกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม จะพบว่า เราสามารถเพิ่มกระแสอาเมเจอร์ซึ่งจะส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นความเร็วจะต้องตกลงจนถึงจุดสมดุล ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายจากคุณสมบัตินี้ทำให้ เส้นกราฟของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ดังรูปมีความชันสูง ตามมาตรฐานแล้ว มอเตอร์ชนิดนี้จะถูกออกแบบให้ทำงานที่จุดหักมุมของคุณลักษณะความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization characteristic) ที่แรงบิดที่พิกัด ฉะนั้นเมื่อแรงบิดโอเวอร์โหลดมาก ๆ จะทำให้แกนเหล็กอิ่มตัวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอนุกรมเหมาะสมกับการนำไปใช้งานที่ต้องการ แรงบิดขณะสตาร์ทสูง ๆ และมีแรงบิดที่โอเวอร์โหลดมาก ๆ โดยความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงบิดลดลง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ขับโหลดที่ต้องออกตัวบ่อย ๆ และแรงบิดโอเวอร์โหลดบ่อย ๆ

จากกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (Compound) ซึ่งความเร็วขณะไม่มีโหลด (No-load) จะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กช้อน (Shunt field) และความเร็วที่ตกลงมาจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กอนุกรม (Series field) ดังนั้นมอเตอร์ชนิดนี้จึงนำมาประยุกต์ใช้งานที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม โดยความเร็วขณะไม่มีโหลด จะถูกจำกัดไว้ในค่าที่ปลอดภัย โดยสนามแม่เหล็กช้อน (Shunt field) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานซึ่งโหลดมีค่าเปลี่ยนแปลงมาก ๆ

2.7.3 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นทรานสดิวเซอร์ (Transducer) แรงบิด ซึ่งมีการออกแบบให้มีลักษณะพิเศษ คือ แรงบิดของเพลามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ (Armature Current) แรงบิดของเพลาของมอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างฟิลด์ (Field) ที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\phi I \qquad \text{สมการ 2.34}$$

เมื่อ T คือ แรงบิดของเพลา มีหน่วย เป็น นิวตัน – เมตร (N-m)

ϕ คือเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Vabor)

I คือกระแส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampare)

K คือค่าคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลาจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิด โวลท์เต็จ (Voltage) ตกคร่อมตัวมันเองโวลท์เต็จนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลาของมอเตอร์และต้านการไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างโวลท์เต็จย้อนกลับนี้และความเร็วของเพลามอเตอร์ คือ

$$E = K\phi\omega \qquad \text{สมการ 2.35}$$

เมื่อ E คือ โวลท์เต็จย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็น โวลท์ (Volt)

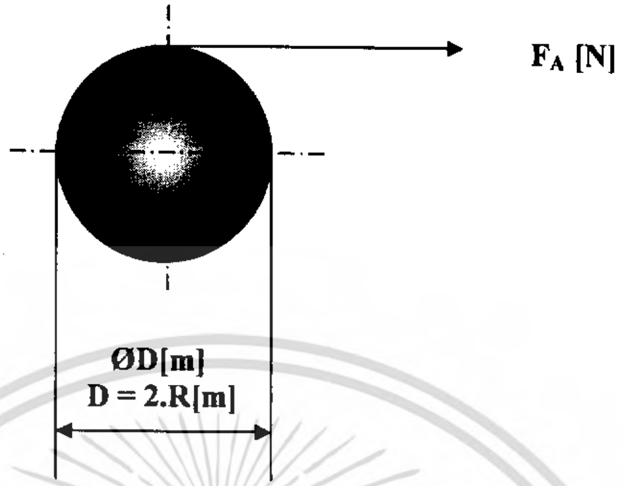
ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์

ω คือ ความเร็วของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียน / วินาที (radian / sec)

K คือ ค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 กำลังหมุนขับของมอเตอร์(P)



รูปที่ 2.43 แสดงแรงที่กระทำต่อแกนเพลาของมอเตอร์

$$P = F * V \quad \text{สมการ 2.36}$$

$$= F * [\P * D * (\frac{n}{60})]$$

$$= F * [\P * 2 * R * (\frac{n}{60})]$$

$$= F * R * 2 * \P * (\frac{n}{60})$$

$$= T * 0.1047 * n$$

$$= 0.1047nT \longrightarrow (Nm/s) \longrightarrow (Watt) \quad \text{สมการ 2.37}$$

2.7.5 การแยกประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประการขึ้นอยู่กับพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างของอาร์เมเจอร์ การแบ่งประเภทตามลักษณะการจ่ายสนามแม่เหล็กแยกออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับเส้นแรงแม่เหล็กได้
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่

ถ้าเราจะพิจารณาแยกประเภทตามลักษณะการออกแบบโครงสร้างอาร์เมเจอร์ สามารถแยกออกได้เป็น 3 แบบ คือ (ไมตรี วรวุฒิจรรยากุล, 2539) .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์เป็นแกนเหล็ก

2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์ที่มีขดลวดพันอยู่บนพื้นผิว

3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์เป็นขดลวดหมุน

นอกจากนี้ยังมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดพิเศษอีกแบบหนึ่งคือ แบบไม่มีแปรงถ่านซึ่งมีหลักการทางเทคโนโลยีเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดมีแปรงถ่านยกเว้น การคอมมิวเตชั่น (Commutation) กระทำโดยเทคนิคทางอิเล็กทรอนิคส์แทนที่จะกระทำโดยวิธีการทางเชิงกล

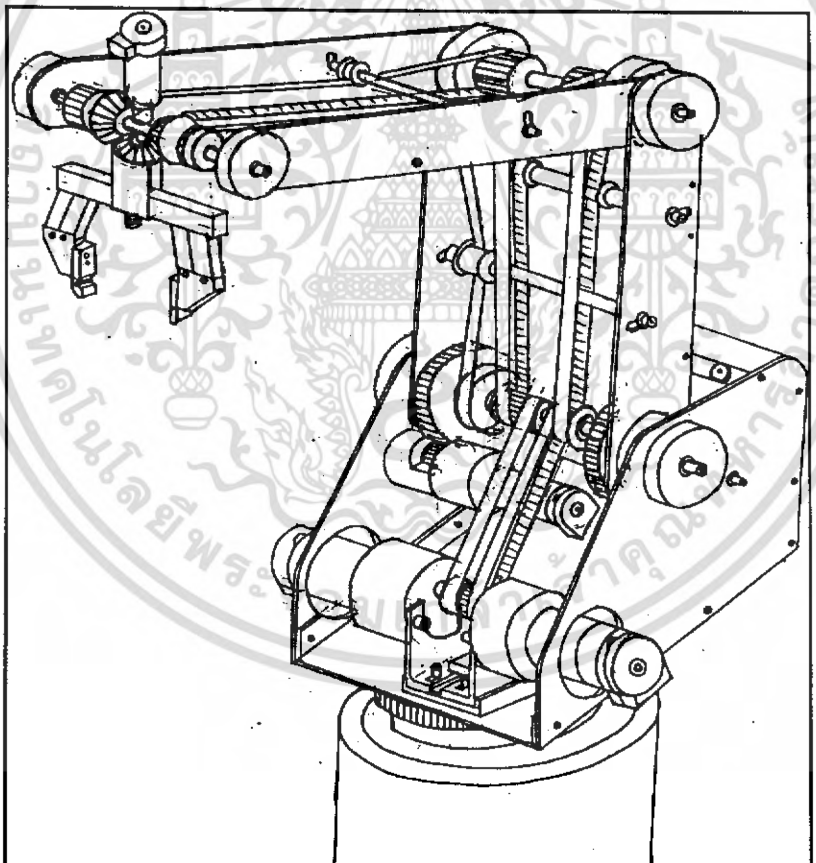
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ด้านโครงสร้าง

3.1.1 สเกตภาพหุ่นยนต์ 5 แกนด้วยมือ

จากการศึกษารูปแบบของโครงหุ่นยนต์ชนิดต่าง ๆ พบว่าแบบข้อต่อหมุนมีลักษณะใกล้เคียงกับแขนของมนุษย์มากที่สุด มีข้อหมุนต่าง ๆ เหมือนกัน จึงสามารถที่จะทำงานได้ในทุกตำแหน่งในระยะความยาวของแขน ดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงเริ่มจากการศึกษารูปแบบของโครงหุ่นยนต์ชนิดนี้ และทำการสเกตออกมาดังรูปที่ 3.1

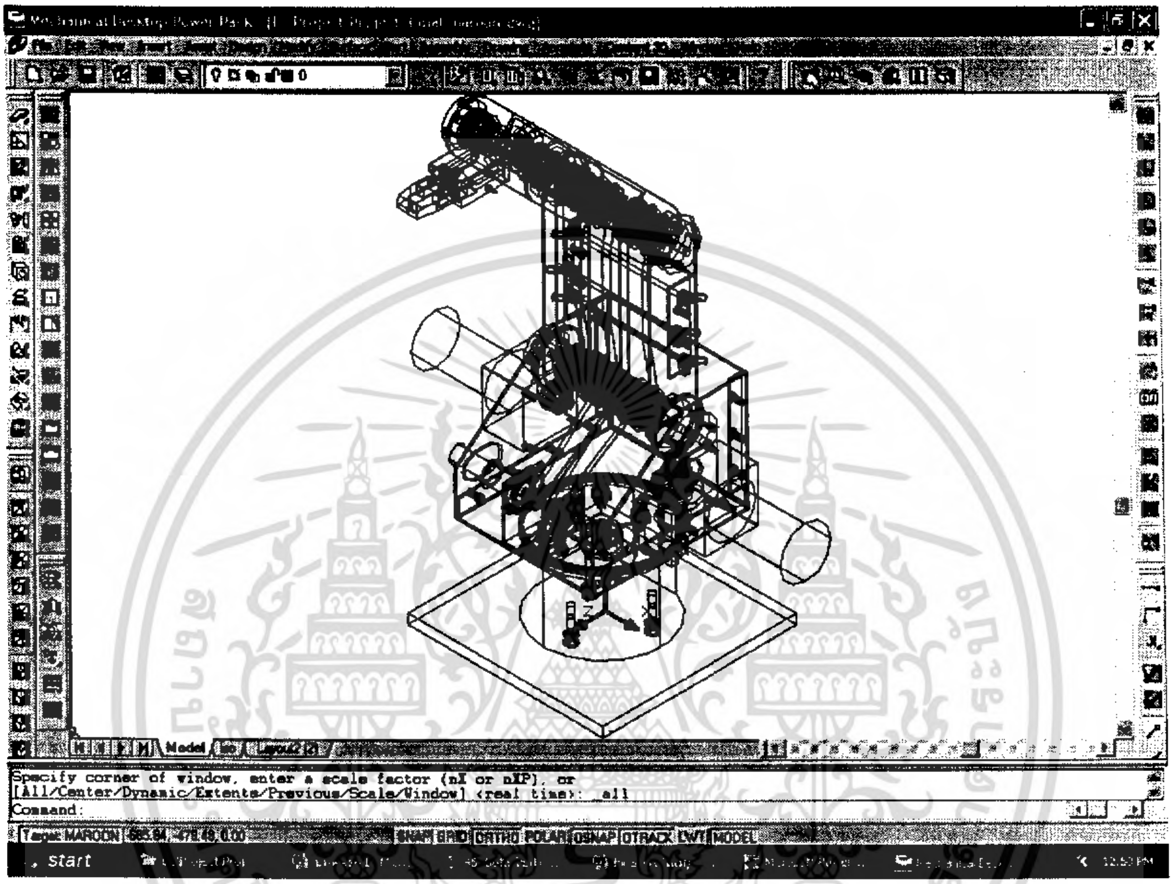


รูปที่ 3.1 แสดงภาพสเกตโครงหุ่นยนต์ด้วยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ออกแบบโครงหุ่นยนต์ 5 แกนด้วยโปรแกรม Mechanical Desktop 6

หลังจากสเกตภาพโครงหุ่นยนต์ด้วยมือ จากนั้นได้ทำการออกแบบโครงหุ่นยนต์ โดยใช้โปรแกรม Mechanical Desktop 6 จนได้รูปแบบของโครงหุ่นยนต์ขั้นสุดท้ายดังรูปที่ 3.2 เพื่อการจัดสร้างโครงหุ่นยนต์ต่อไป

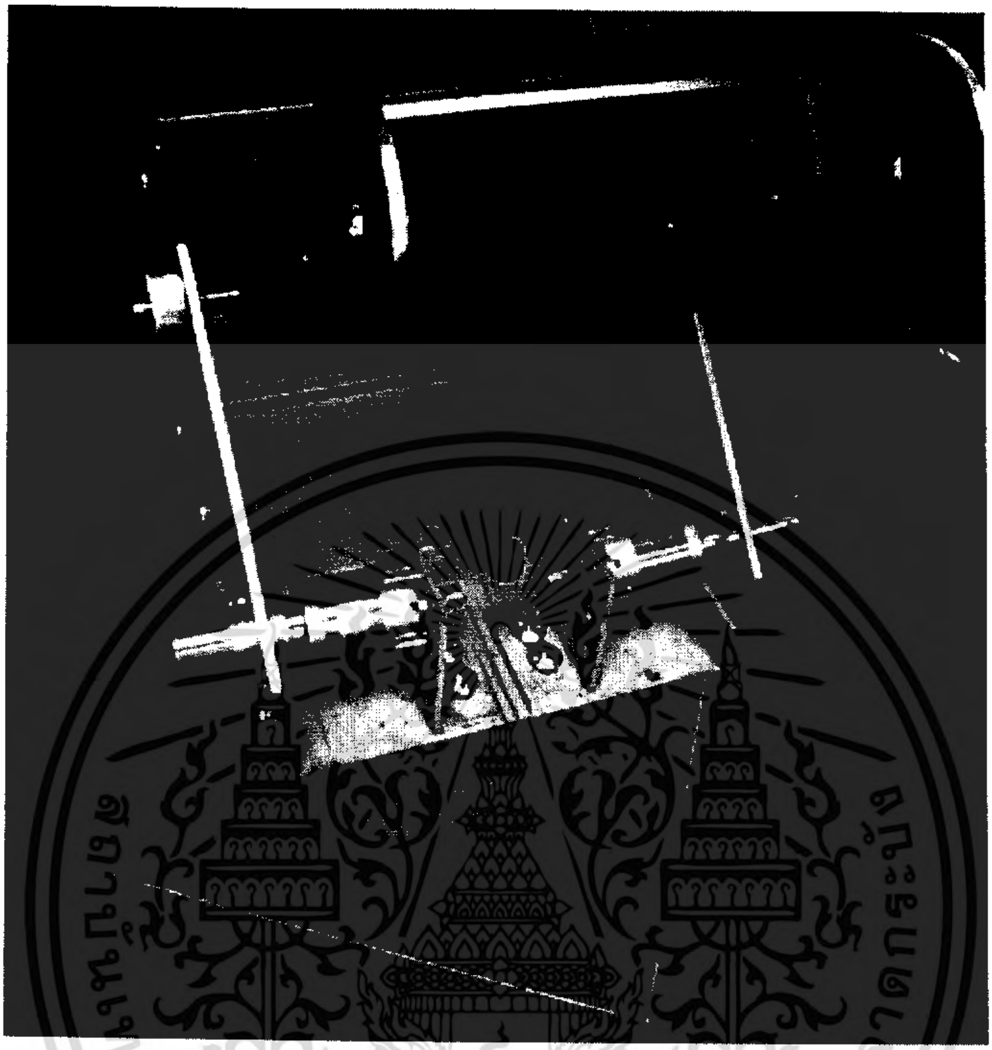


รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบโครงหุ่นยนต์ 5 แกนด้วยโปรแกรม Mechanical Desktop 6

3.1.3 ดำเนินการจัดสร้างโครงหุ่นยนต์

เริ่มจากการสร้างหุ่นยนต์ในส่วนที่เป็นฐานขึ้นมา ต่อไปยังข้อต่อและ ท่อนแขนต่าง ๆ จนเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นทำการประกอบวงจรไฟฟ้าแบบกระแสสลับจ่ายให้กับมอเตอร์ และติดตั้งวาล์วลมในขั้นสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

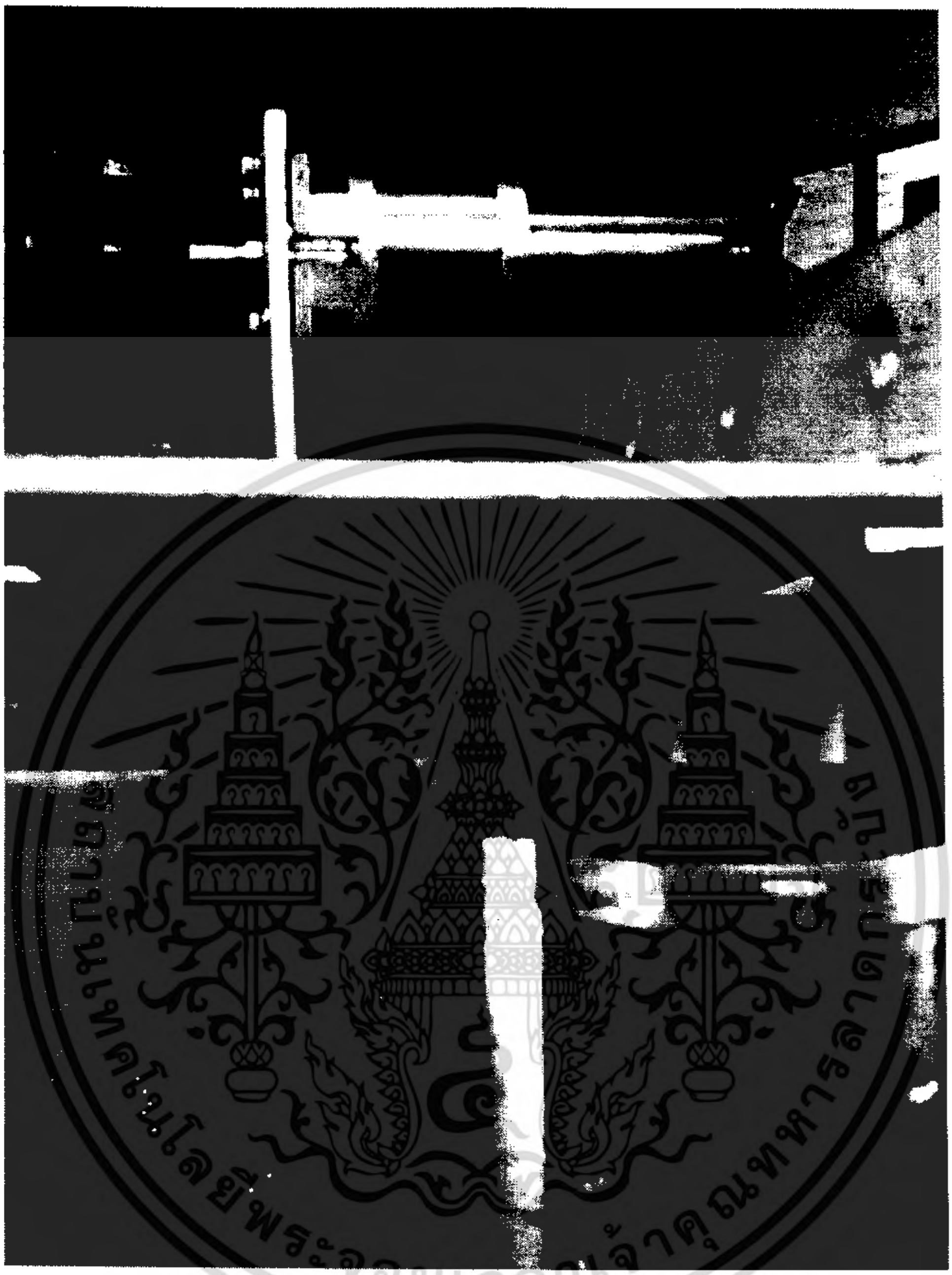


รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์แบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์แบบที่ 3

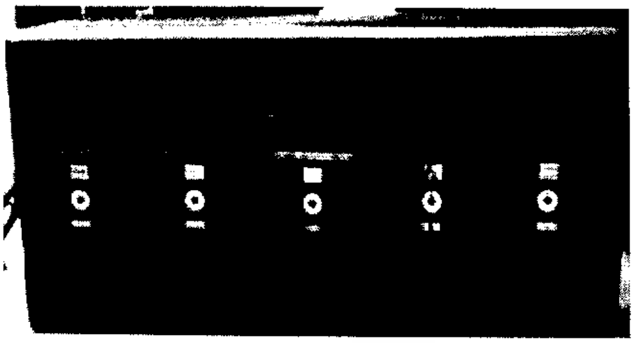
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์แบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโครงหุ่นยนต์แบบที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงชุดควบคุมด้วยมือที่ใช้ควบคุมโครงหุ่นยนต์

3.2 ด้านมอเตอร์

3.2.1 คำนวณหาแรง และน้ำหนักที่ปลายแขนของมอเตอร์

จากสมการ 2.37

$$P = 0.1047nT \quad \text{(Watt)}$$

แทนค่ากำลังวัตต์ และค่าจำนวนรอบของมอเตอร์

$$36 = 0.1047 * (10) * T$$

จะได้

$$T = 34.38 \text{ Nm.}$$

จากทอร์ค (T)

$$T = F * r$$

แทนค่า

$$34.38 = F * 0.4 \text{ m.}$$

(0.4 m. มาจากค่าความยาวแขนของหุ่นยนต์ที่ตั้งฉากกับมอเตอร์ตัวขับแกนที่ 3 ขึ้นไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$F = 85.96 \text{ N.}$$

จาก

$$F = m * g$$

แทนค่า

$$85.96 = m * 9.81(\frac{m}{s^2})$$

$$m = 8.76 \text{ กิโลกรัม.}$$

ดังนั้นจะได้มวลรวม(m) ของท่อนแขนเท่ากับ 8.76 กิโลกรัม.

3.2.2 คำนวณหาค่ามวลของท่อนแขน

โดยการกำหนดให้แขน(แกน 3, 4) เป็นท่อนสี่เหลี่ยมกลวงสองท่อนดังนี้

หาค่าปริมาตร (V)

$$V = \{[(200*164*80) - (194*158*74)] + [(200*152*74) - (200*146*68)]\}$$

$$= [355752 + 264000]$$

$$= 619752 * mm^3 \left(\frac{1}{10^3}\right)\frac{cm^3}{mm^3}$$

$$= 619.76\ cm^3$$

เนื่องจากท่อนแขนเป็นอลูมิเนียม มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.7 $\frac{g}{cm^3}$

ดังนั้นคำนวณหามวล (m) ของท่อนแขนจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = 619.76\ cm^3 * 2.7\ \frac{g}{cm^3}$$

$$= 1673.35\ g$$

$$= 1.67\ kg$$

เมื่อรวมน้ำหนักของท่อนแขน กับน้ำหนักประกอบอื่น เช่น เฟือง สายพาน เพลา ลูกปืน และส่วนของกริปเปอร์ ก็จะมีน้ำหนักรวมทั้งหมดประมาณ 3 กิโลกรัม

ดังนั้น จากน้ำหนักที่มอเตอร์สามารถยกขึ้นได้ เท่ากับ 8.76 กิโลกรัม ก็จะเหลือมวลที่ปลายอีกเท่ากับ 5.76 กิโลกรัม

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

จากการคำนวณน้ำหนักที่ปลายแขนหุ่นยนต์ที่สามารถยกขึ้นได้มีค่าเท่ากับ 5.76 กิโลกรัม ได้ทำการทดลองโดยการให้หุ่นยนต์ยกน้ำหนักขึ้น 1 กิโลกรัม และเพิ่มน้ำหนักขึ้นครั้งละ 1 กิโลกรัม ดังตารางที่ 1 แสดงค่าน้ำหนักที่หุ่นยนต์สามารถยกขึ้นได้ และยกขึ้นไม่ได้

ตารางที่ 3.1 การทดลองยกน้ำหนักของหุ่นยนต์

น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ยกได้	ยกไม่ได้
1	●	
2	●	
3	●	
4		●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทำงาน

4.1 ผลการทำงานด้านโครงสร้างหุ่นยนต์

จากการจัดสร้างโครงหุ่นยนต์ จนสำเร็จดังรูปแบบที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม Mechanical Desktop 6 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง ภายในรัศมีแขนโดยสะดวกโดยการควบคุมด้วยชุดควบคุมด้วยมือ

รูปที่ 4.1 แสดงโครงหุ่นยนต์ที่เสร็จสมบูรณ์แบบที่ 1

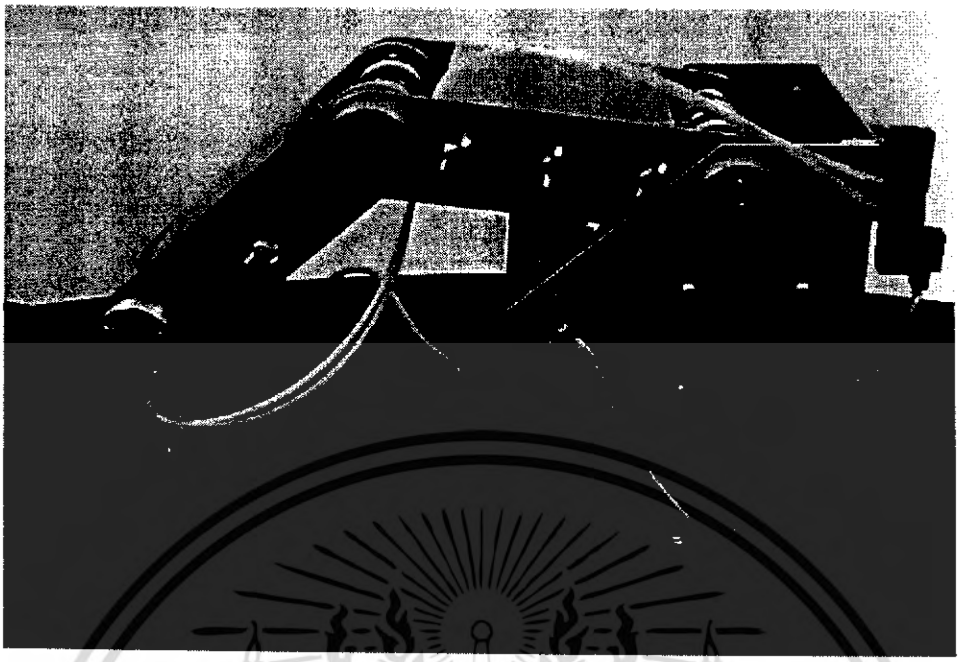
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แสดงโครงหุ่นยนต์ที่เสร็จสมบูรณ์แบบที่ 2

4.2 ผลการทดสอบหุ่นยนต์

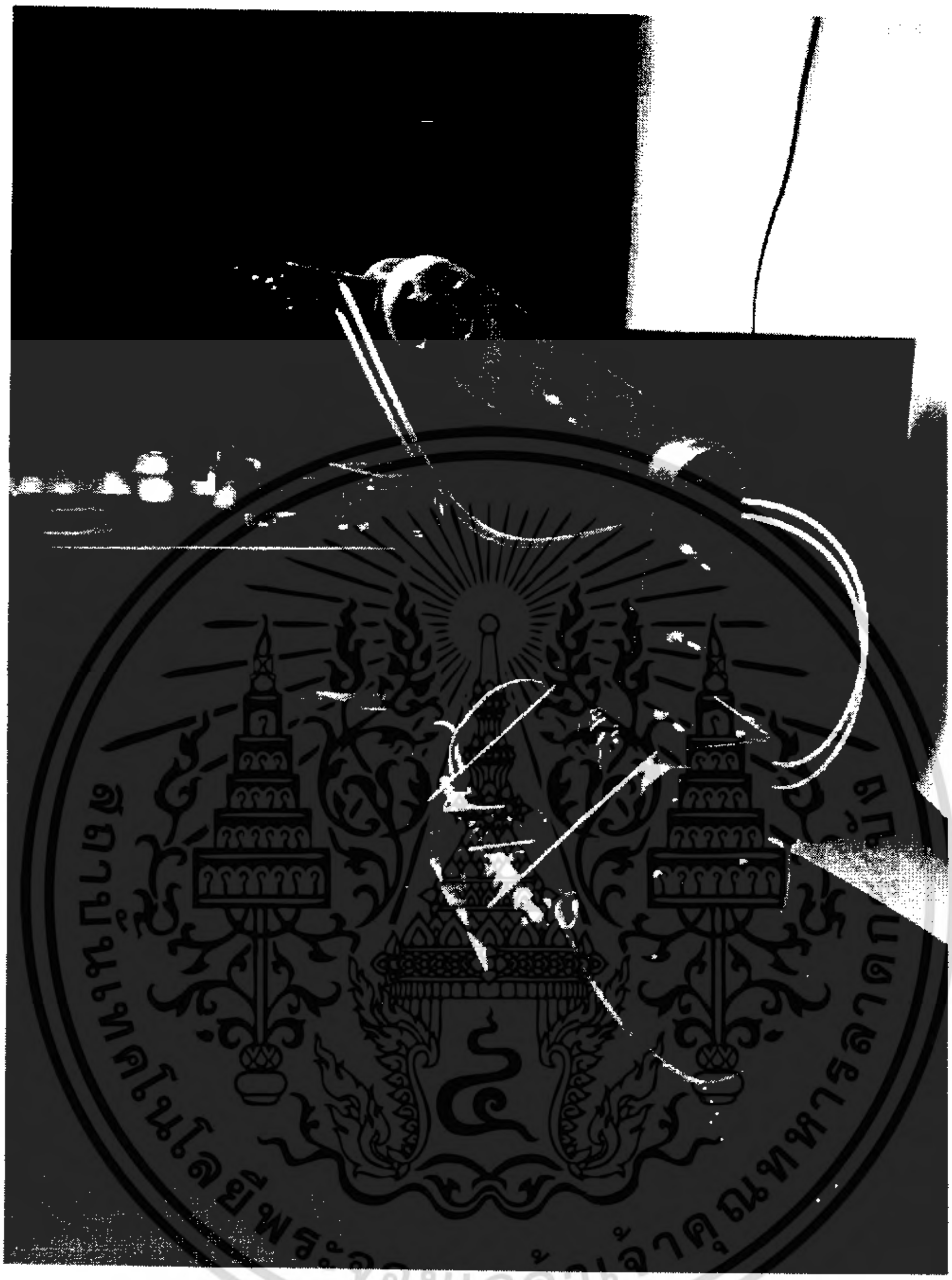
จากการทดลองยกน้ำหนักตามที่ได้กำหนดขอบเขตเอาไว้คือหุ่นยนต์สามารถยกน้ำหนักที่ปลายแขนได้ 5 กิโลกรัม การทดลองสรุปผลว่าหุ่นยนต์สมารถยกน้ำหนักได้ 3 กิโลกรัม หลังจากน้ำหนักดังกล่าว หุ่นยนต์ไม่สามารถยกขึ้นได้ เนื่องจากจะเกิดอาการกระตุก และเคลื่อนไถลของสายพาน (Slip) ที่สายพานของแกนที่ 4 ผู้จัดทำโครงการจึงต้องหยุดการทดลองไว้ที่น้ำหนักดังกล่าวเนื่องจากอาจเกิดความเสียหายกับตัวหุ่นยนต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงการทดลองจับชิ้นงานของหุ่นยนต์แบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการทดลองจับชิ้นงานของหุ่นยนต์แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผล

จากการจัดสร้างโครงหุ่นยนต์ หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ภายในขอบเขตรัศมีแขนได้โดยสะดวกทุกทิศทาง สามารถยกน้ำหนักที่ปลายแขนได้ 3 กิโลกรัม โดยการควบคุมโดยตรงจากชุดควบคุมด้วยมือ

5.2 เหตุผลสนับสนุนการทดลอง

สายพานที่ใช้เป็นสายพานที่ผ่านการใช้งานมาแล้วทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานไม่สมบูรณ์เต็ม 100 เปอร์เซ็นต์ และไม่สามารถปรับสายพานให้ตึงมากกว่านี้ได้เพราะสายพานมีความเปราะมาก เมื่อใส่แรงดึงมากกว่านี้ สายพานอาจขาดได้ ดังนั้นหุ่นยนต์จึงไม่สามารถยกน้ำหนักดังที่ได้กำหนดเอาไว้ในขอบเขตได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

การลดอาการกระตุก และเคลื่อนไถลของสายพาน (Slip) ที่สายพาน ควรเปลี่ยนจากการใช้สายพานมาเป็นการใช้โซ่แทน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการใช้โซ่จะแก้ปัญหาการกระตุก และเคลื่อนไถลของสายพาน (Slip) ได้แต่จะทำให้เกิดเสียงดัง และเกิดความสกปรกจากการใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ตัวโซ่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

-รศ.แม้น อมรสิทธิ์, ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา, 2546. วัสดุวิศวกรรม: สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

-ไมตรี วรวุฒิจรรยากุล, 2539. ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า เล่ม 3. พิมพ์ครั้งที่ 2: ศูนย์การพิมพ์พลชัย.

-สุระเชษฐ กรุ่งวัฒนพงศ์, 2521. กลศาสตร์ของแข็ง: บริษัท ซิเอ็ดยูเคชั่น จำกัด. กรุงเทพ.

-น.อ.ภานุฤทธิ์ ยุกตะทัต, 2547. การออกแบบเครื่องจักรกล Mechanical Engineering Design SI Unit: บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

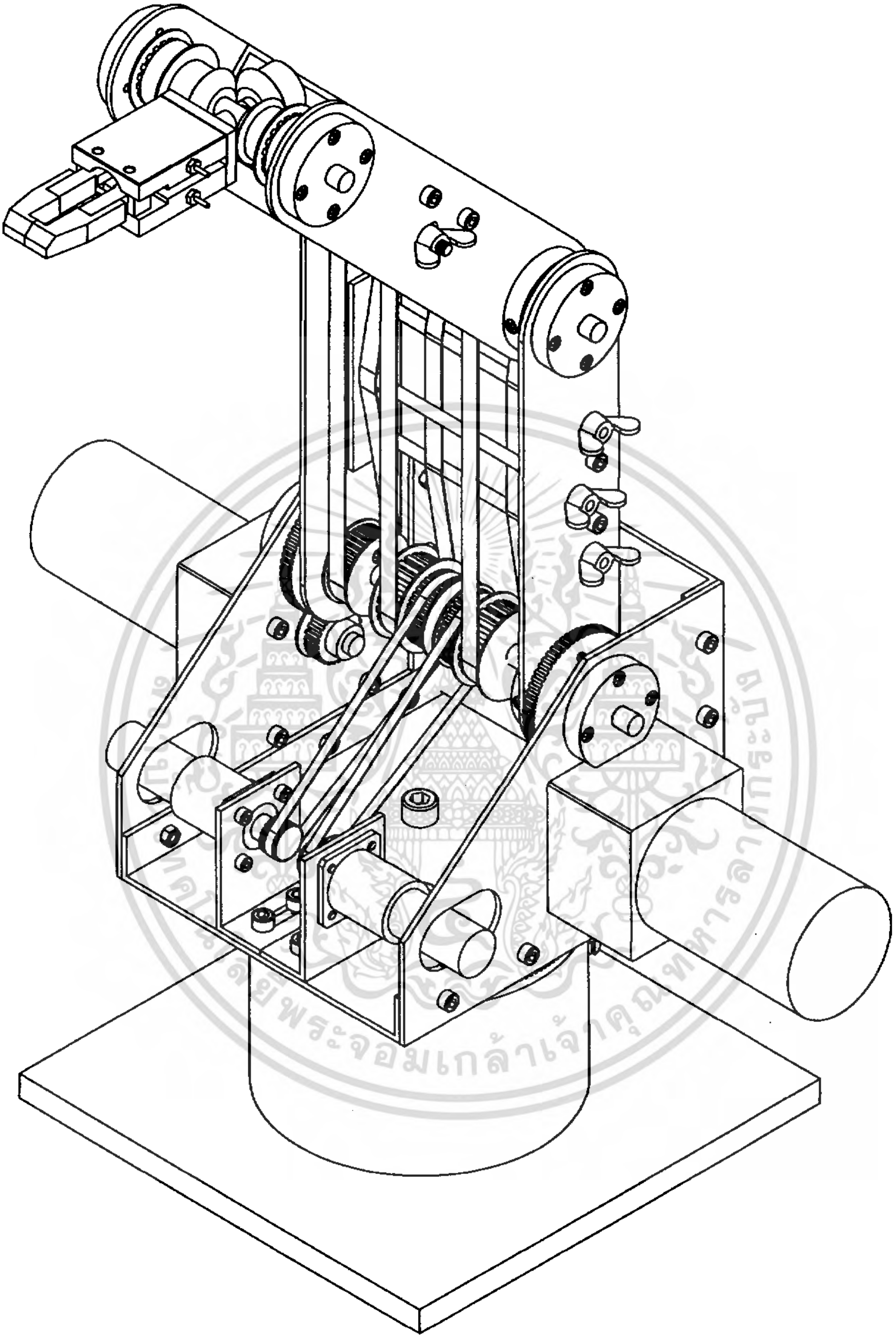
-สมยศ จันเกษม, ศาสตร์ตราจารย์ คิโยคัตสึ ซึงจัง, 2523. การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล: จัดพิมพ์โดย สมาคมส่งเสริม ความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ.

-รศ.บรรเลง ศรนิล, ผศ.ประเสริฐ ก๊วยสมบูรณ์, 2524. ตารางงานโลหะ: ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

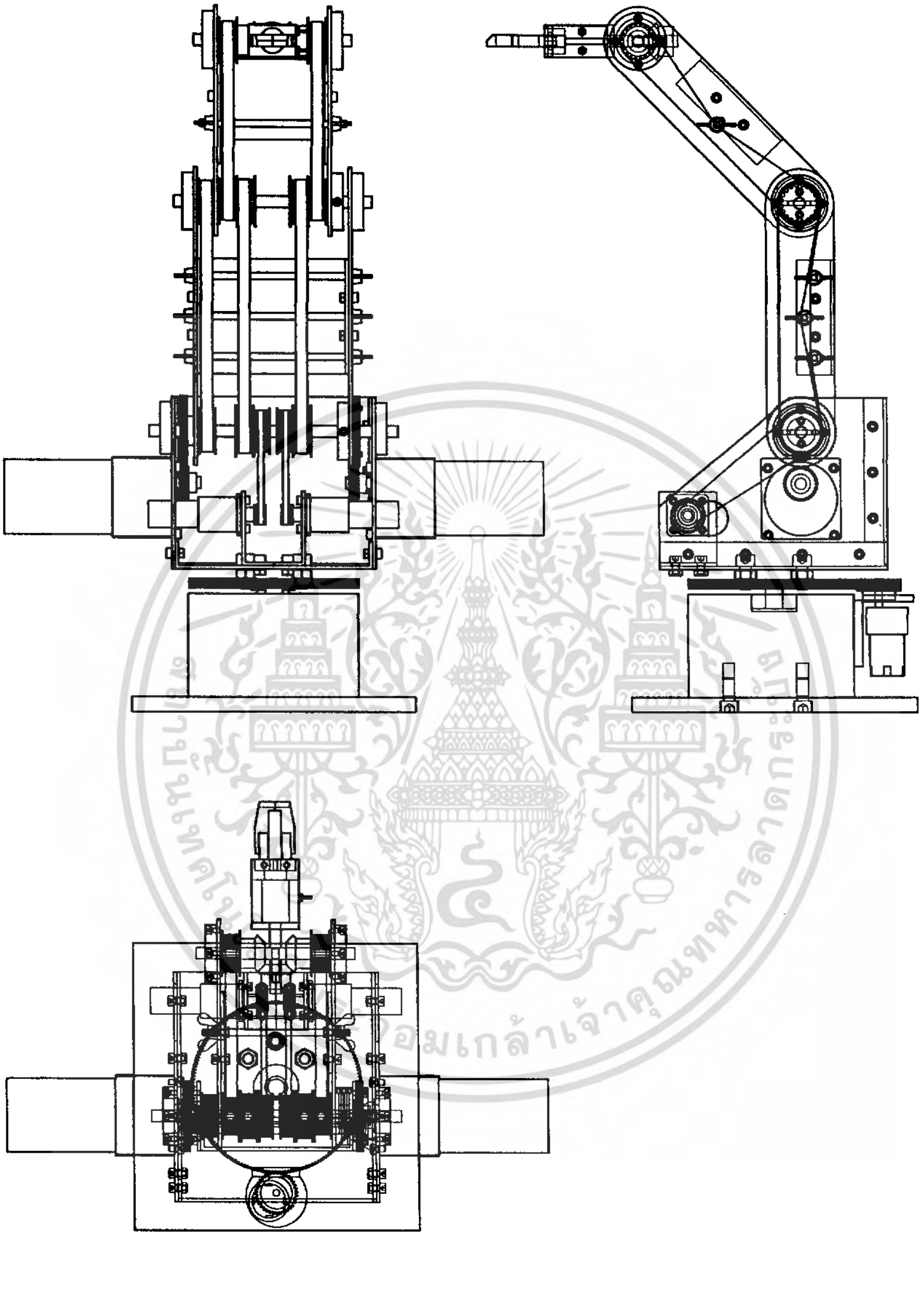
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

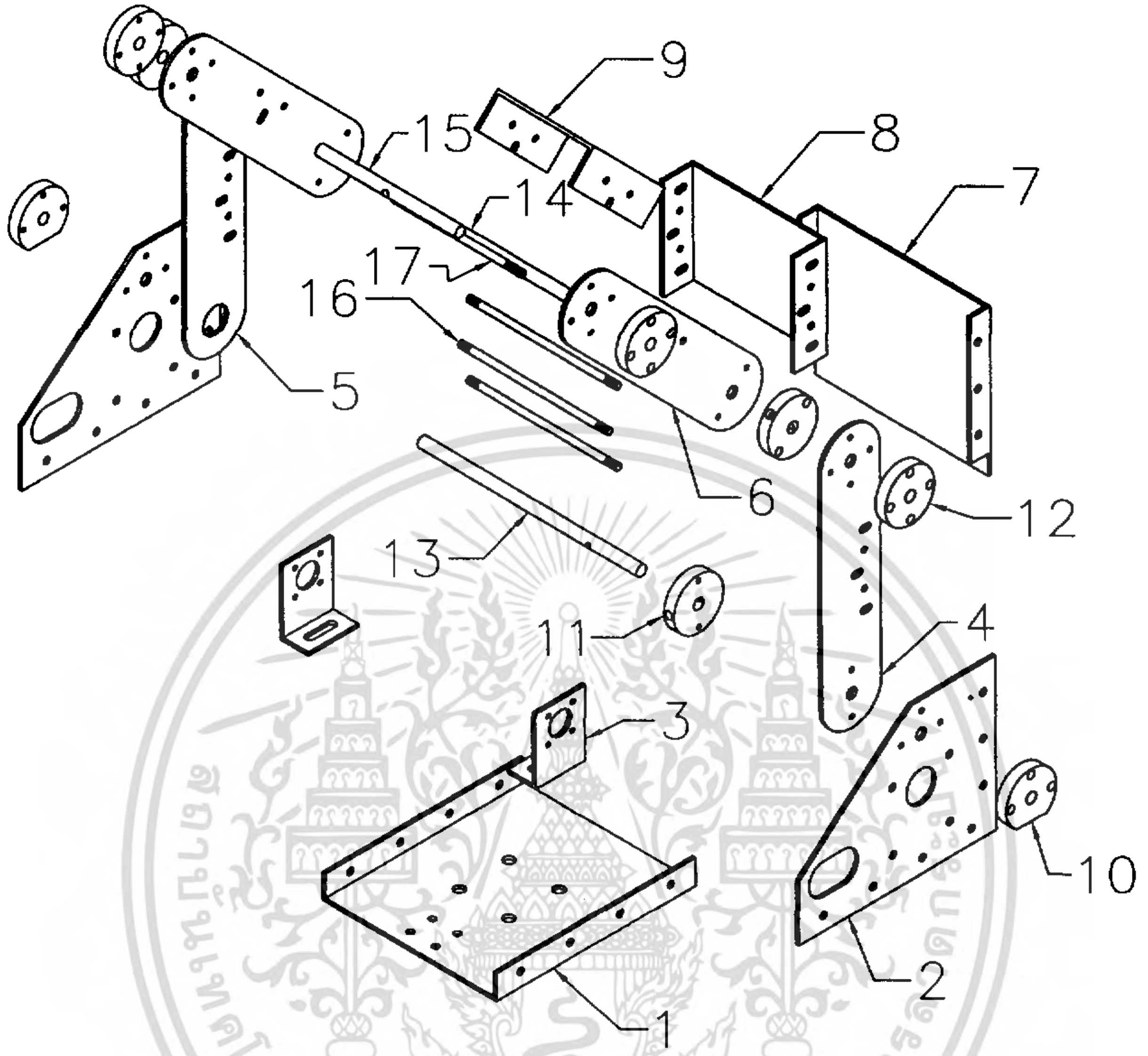
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2.5
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 1/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	

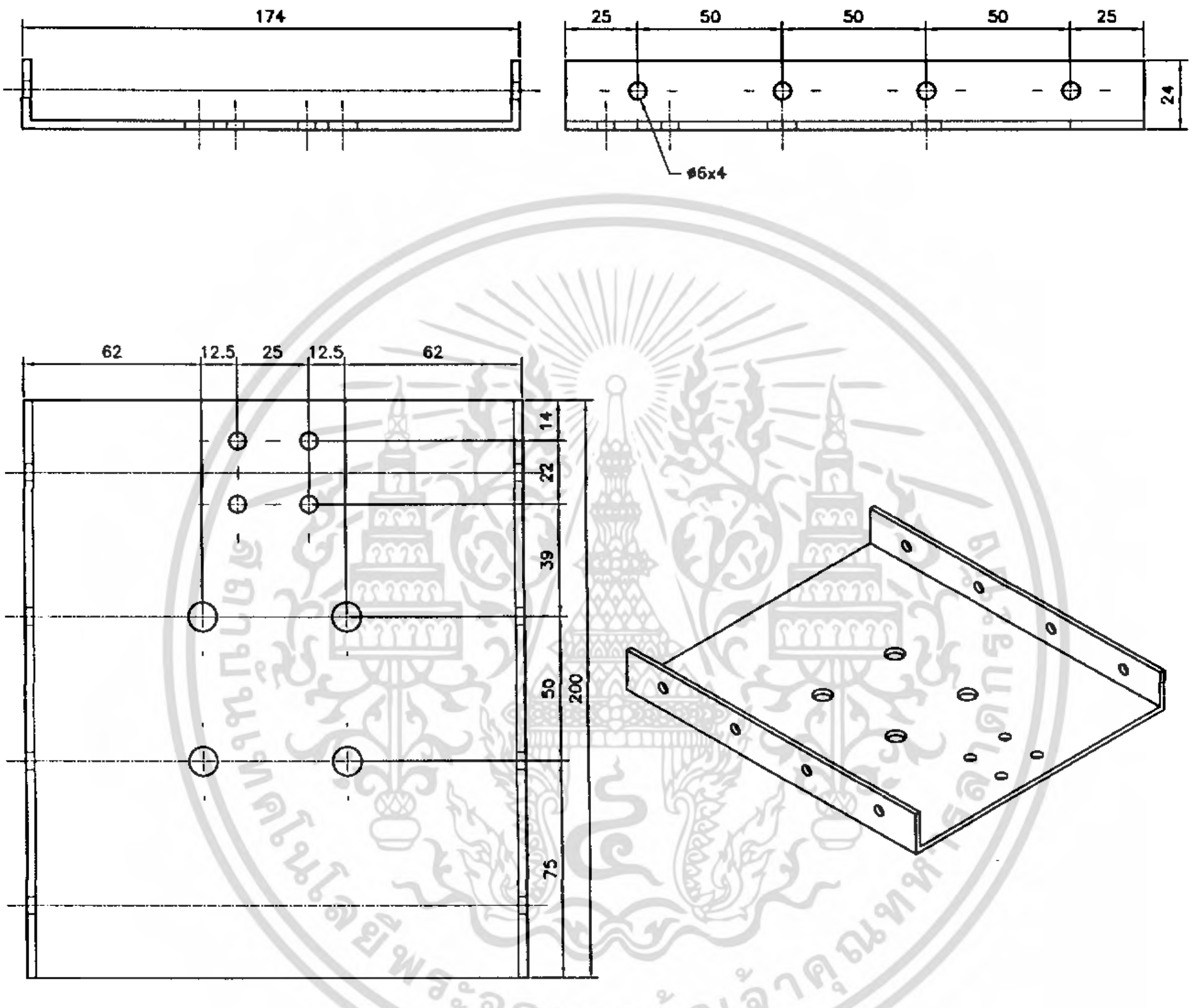


King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:5
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 2/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanukul	19/9/2005	



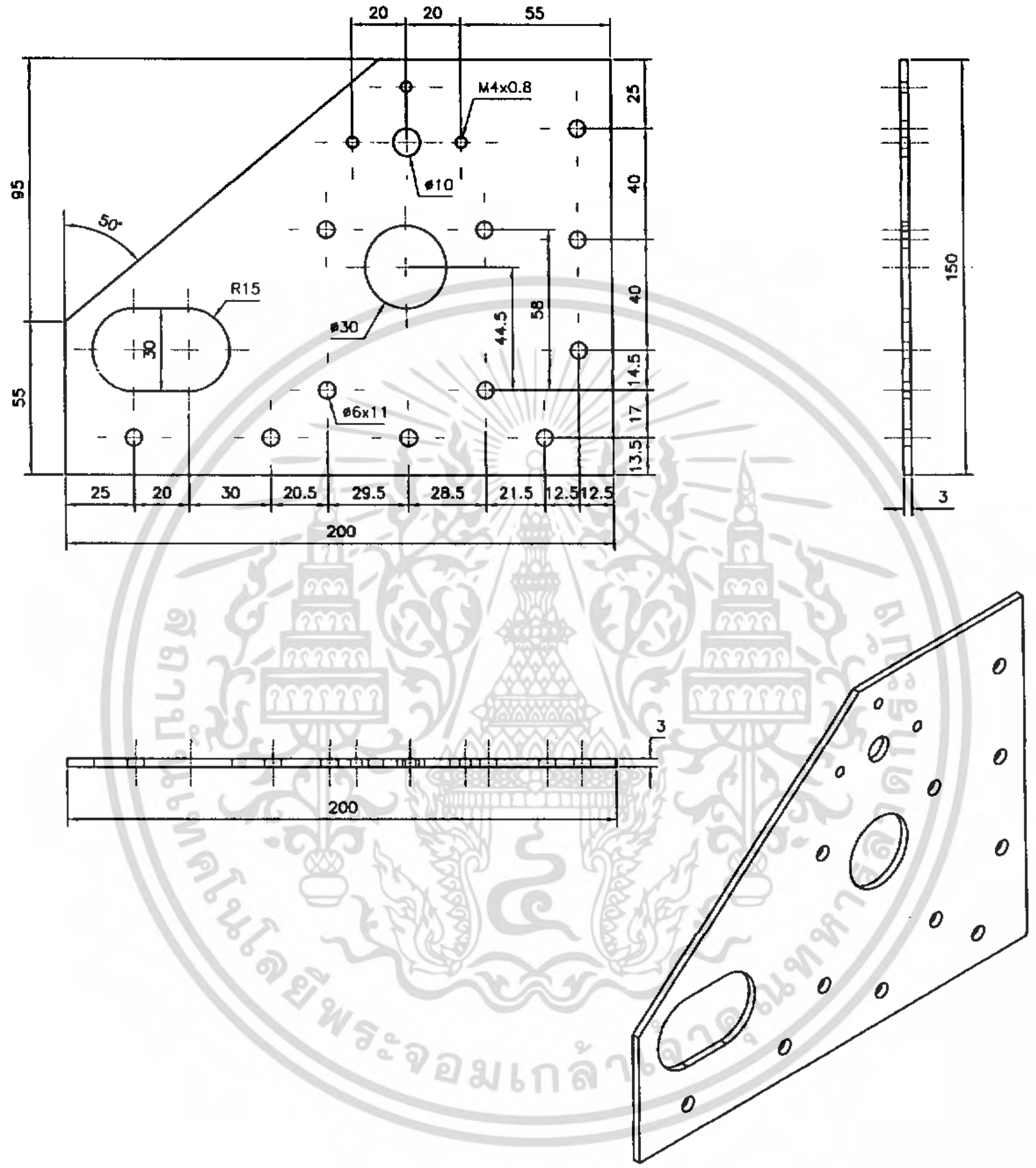
No	Part name	Material	Weight	Item
17	Part no.17	Stainless_Steel	0.03 kg.	1
16	Part no.16	Stainless_Steel	0.03 kg.	3
15	Part no.15	Stainless_Steel	0.09 kg.	1
14	Part no.14	Stainless_Steel	0.11 kg.	1
13	Part no.13	Stainless_Steel	0.14 kg.	1
12	Part no.12	Aluminum	0.05 kg.	4
11	Part no.11	Aluminum	0.05 kg.	2
10	Part no.10	Aluminum	0.05 kg.	2
9	Part no.09	Aluminum	0.13 kg.	1
8	Part no.08	Aluminum	0.15 kg.	1
7	Part no.07	Aluminum	0.24 kg.	1
6	Part no.06	Aluminum	0.12 kg.	2
5	Part no.05	Aluminum	0.11 kg.	1
4	Part no.04	Aluminum	0.12 kg.	1
3	Part no.03	Aluminum	0.03 kg.	2
2	Part no.02	Aluminum	0.18 kg.	2
1	Part no.01	Aluminum	0.35 kg.	1

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	1:5
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	3/20

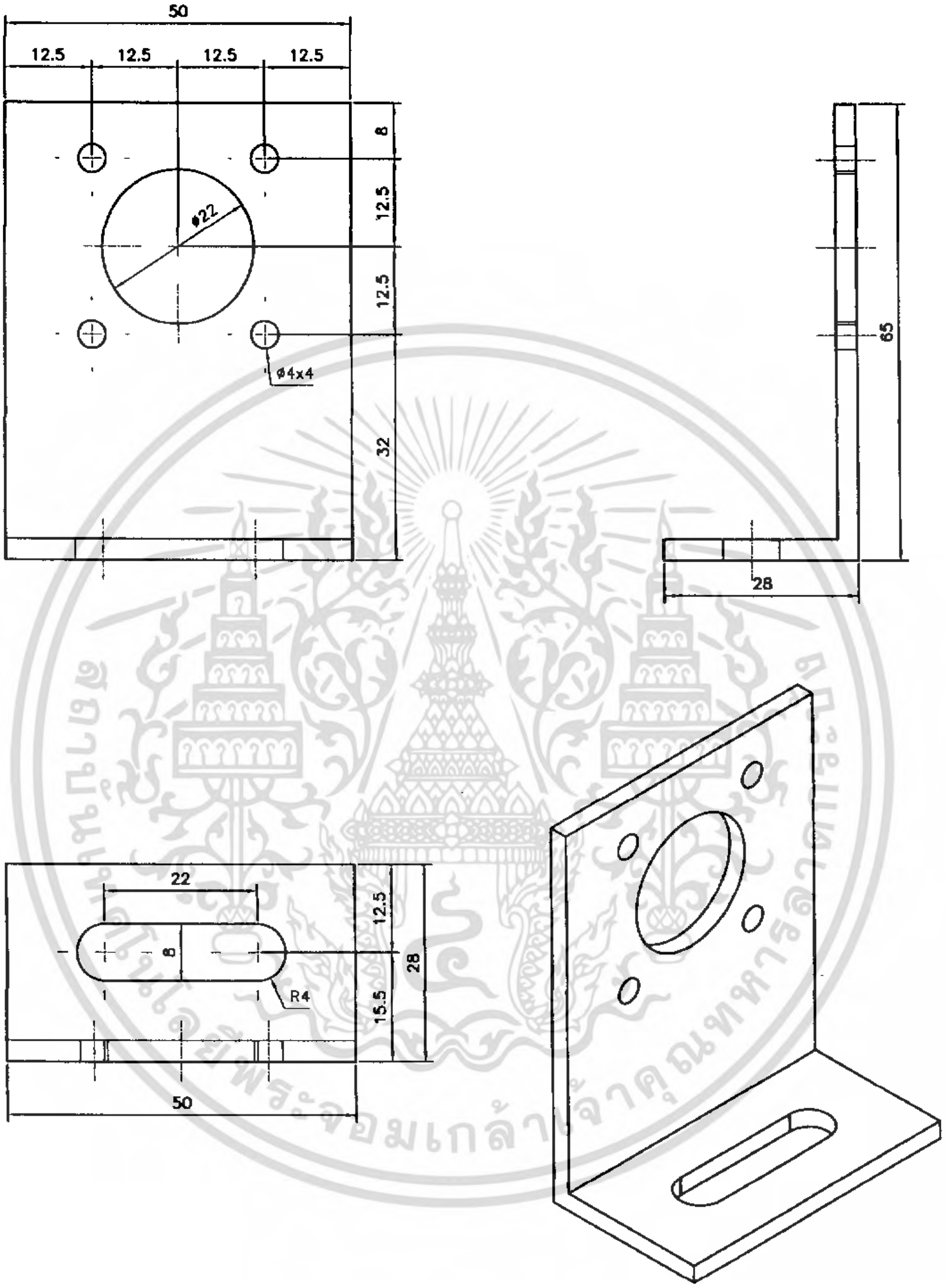


1	Part no.01	Aluminum	0.35 kg.	1
No	Part name	Material	Weight	Item

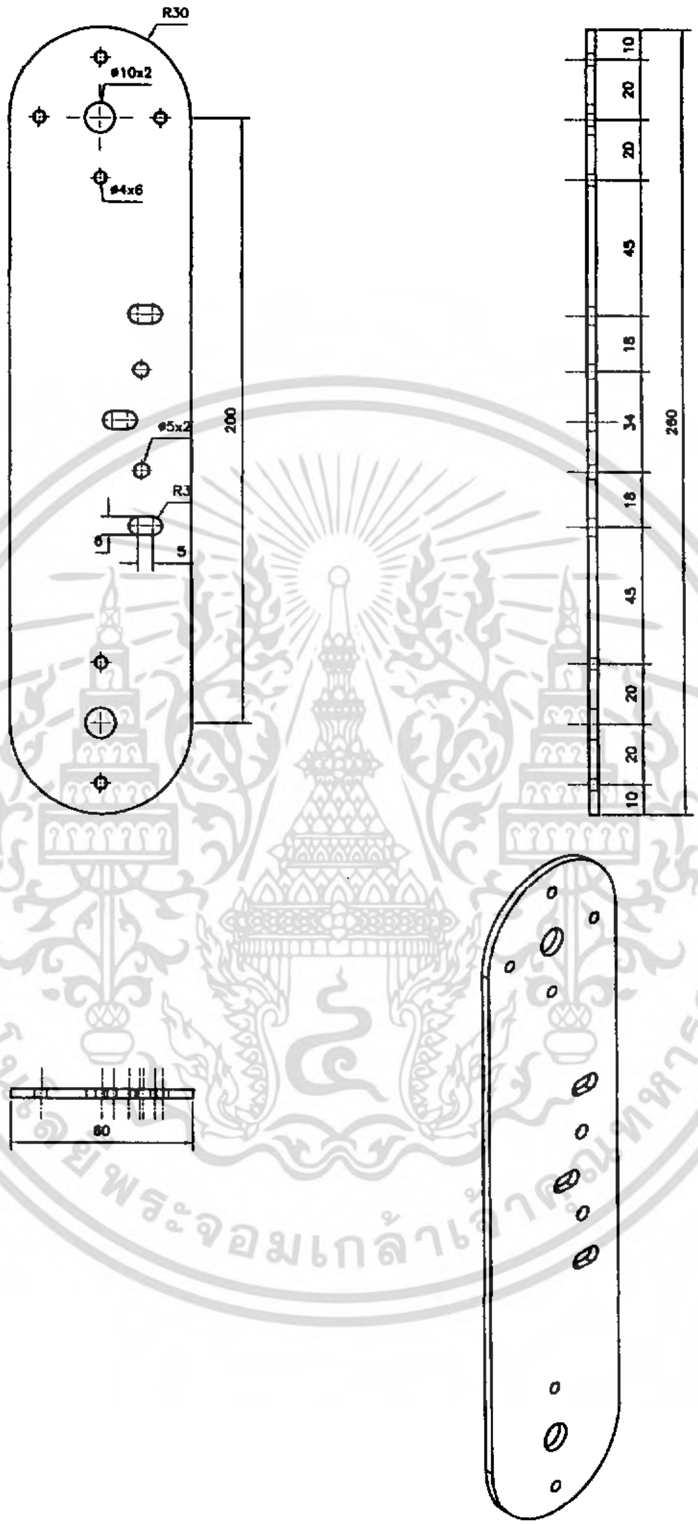
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2.5
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 4/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	



2	Part no.02		Aluminum	0.18 kg.	2
No	Part name		Material	Weight	Item
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005		Scale 1:2.5
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005		
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005		Sheets 5/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005		

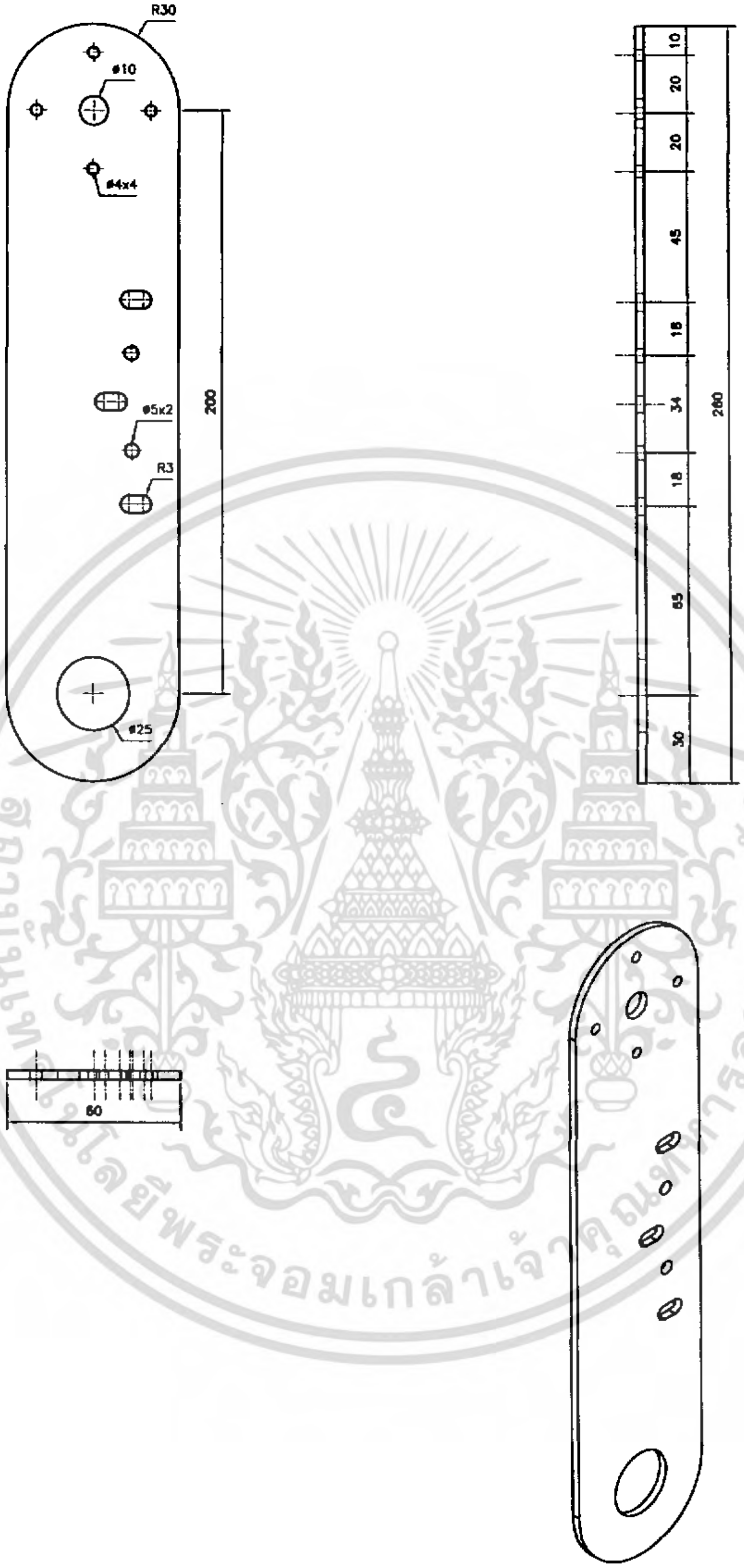


3	Part no.03		Aluminum	0.03 kg.	2
No	Part name		Material	Weight	Item
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong		14/9/2005	Scale 1:1
	Design	Sugdidach Traisuwun		14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok		14/9/2005	Sheets 6/20
	Approve	Pholchai Chotipriyanakul		19/9/2005	



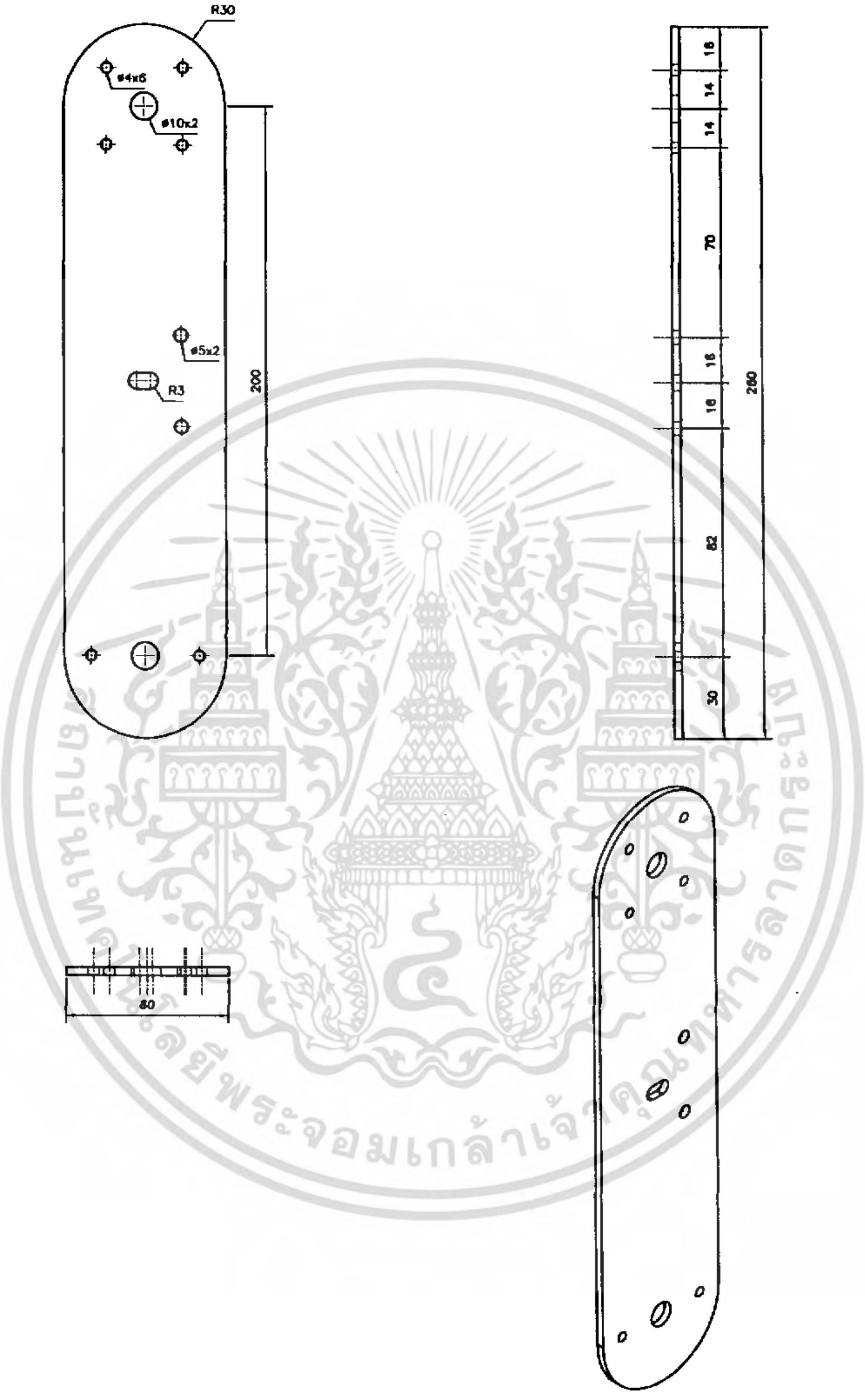
4	Part no.04	Aluminum	0.12 kg.	1
No	Part name	Material	Weight	Item

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabong	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	1:2.5
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	7/20



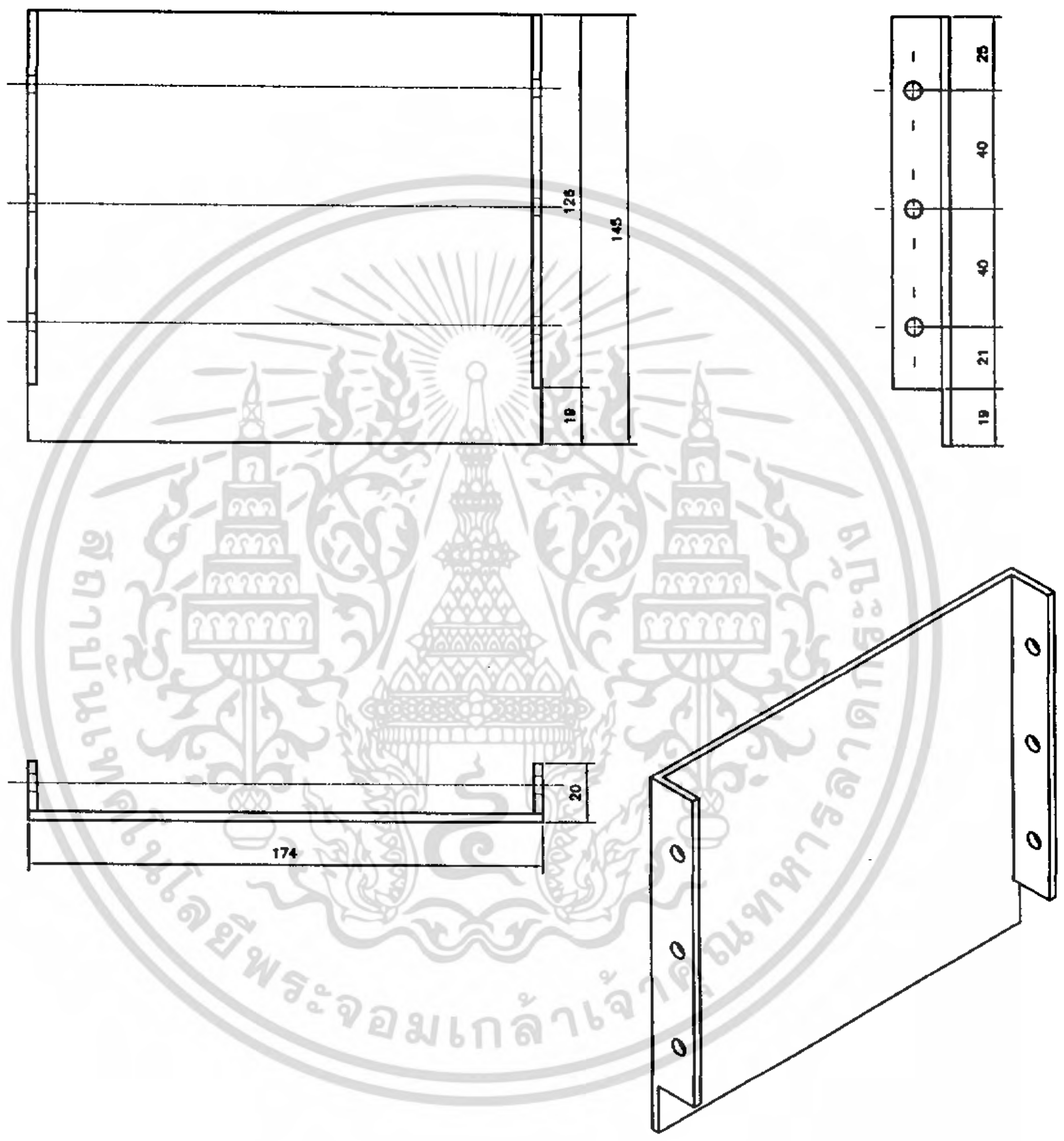
5	Part no.05	Aluminum	0.11 kg.	1
No	Part name	Material	Weight	Item

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2.5
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 8/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	



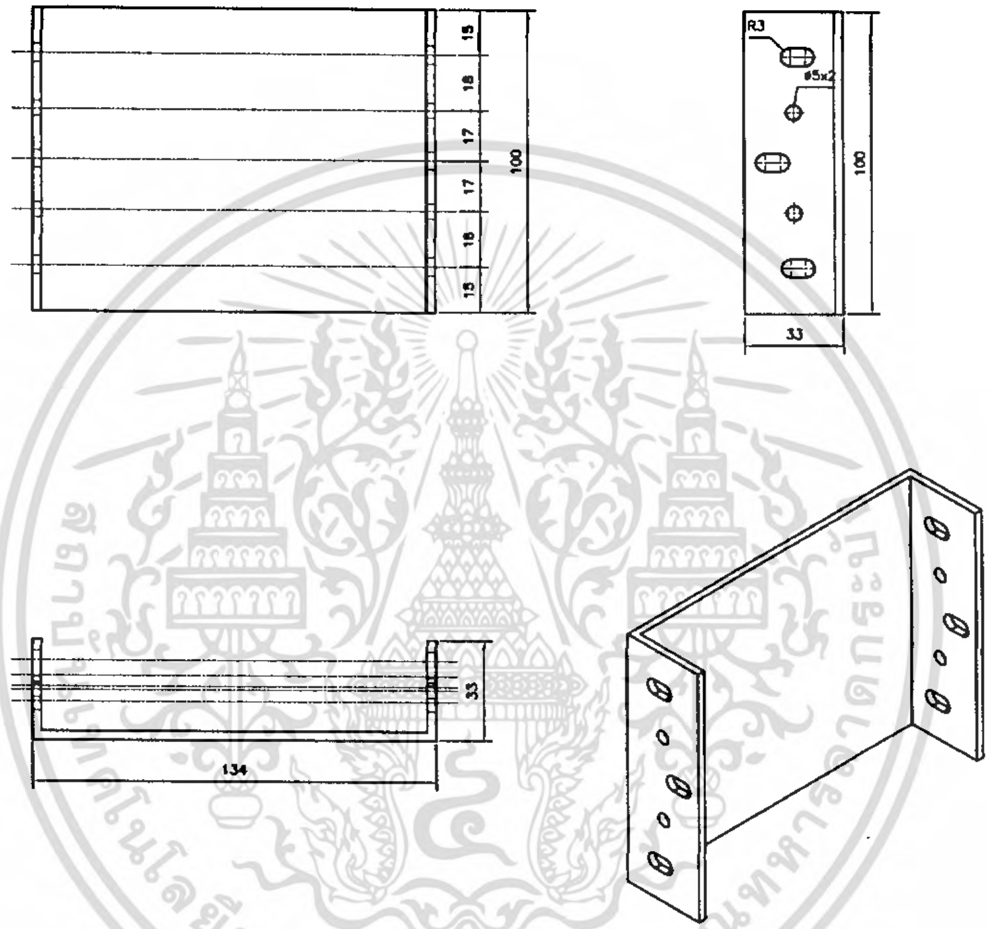
6	Part no.06	Aluminum	0.12 kg.	2
No	Part name	Material	Weight	Item

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2.5
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 9/20
	Approve	Pholchai Chotipryanakul	19/9/2005	

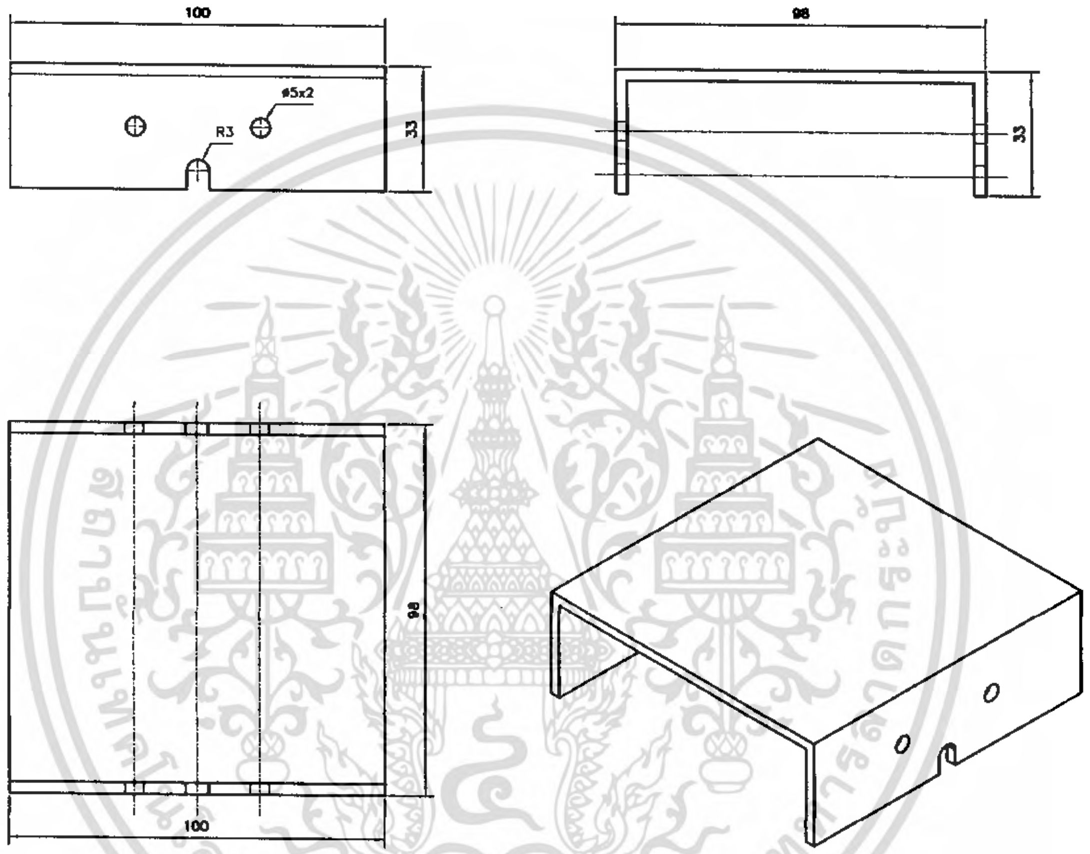


7	Part no.07	Aluminum	0.24 kg.	1
No	Part name	Material	Weight	Item

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2.5
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 10/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	

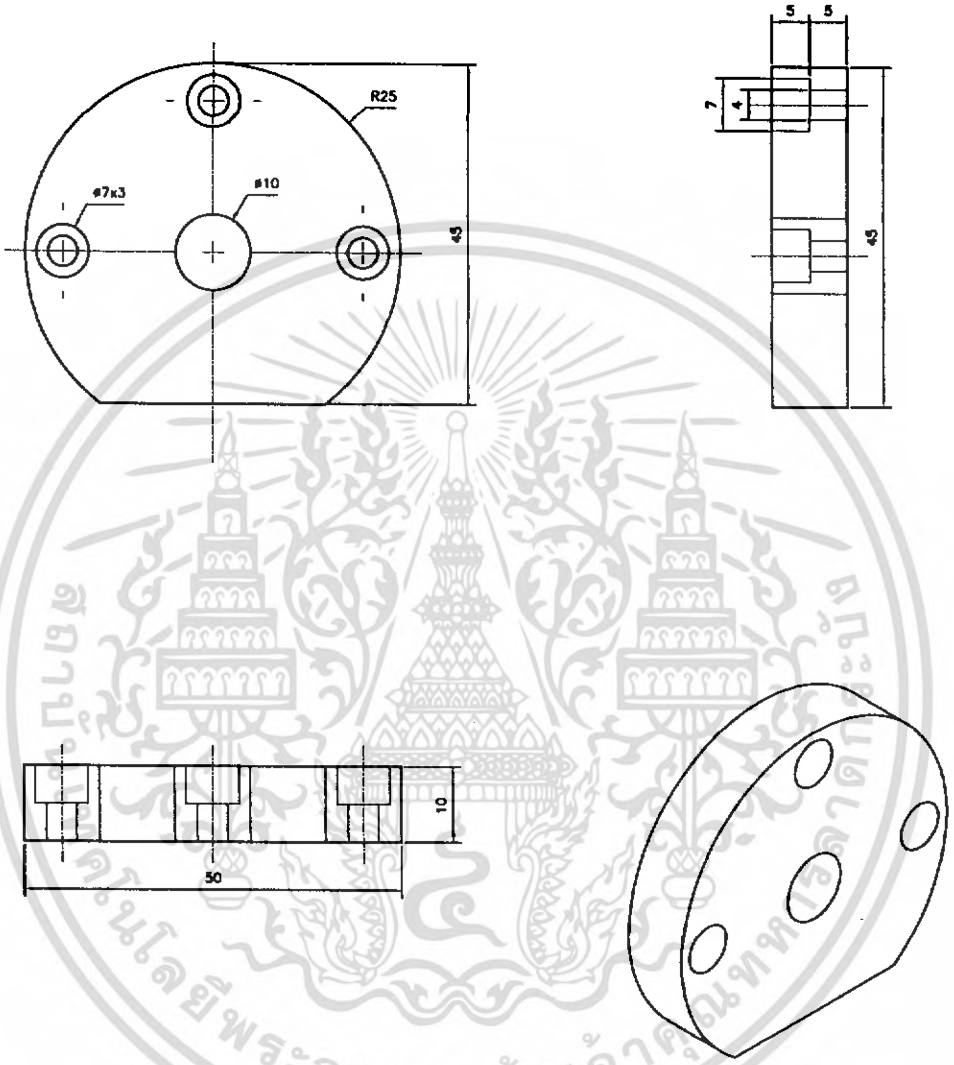


8	Part no.08	Aluminum		0.15 kg.	1
No	Part name	Material		Weight	Item
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2.5	
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005		
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 11/20	
	Approve	Pholchai Chotipryanakul	19/9/2005		



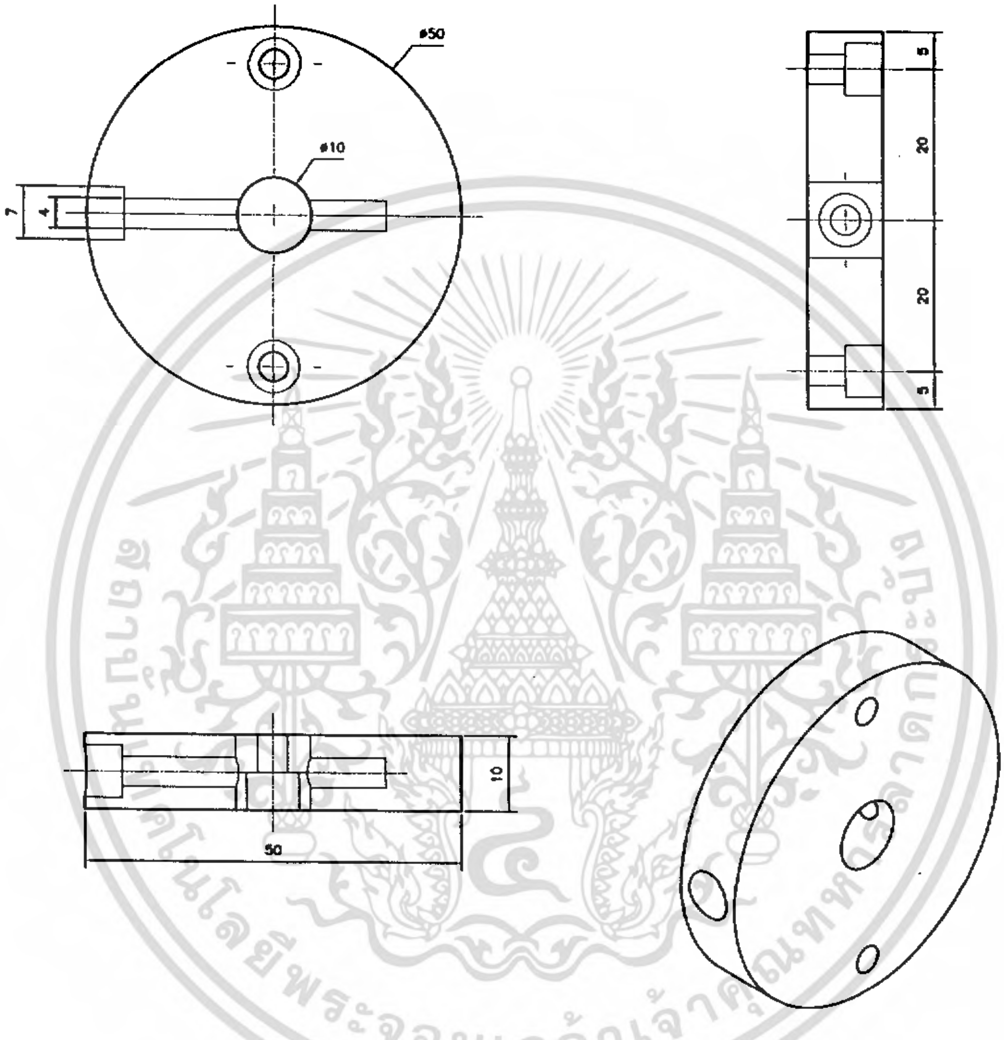
9	Part no.09	Aluminum	0.13 kg.	1
No	Part name	Material	Weight	Item

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 12/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	



10	Part no.10	Aluminum	0.05 kg.	2
No	Part name	Material	Weight	Item

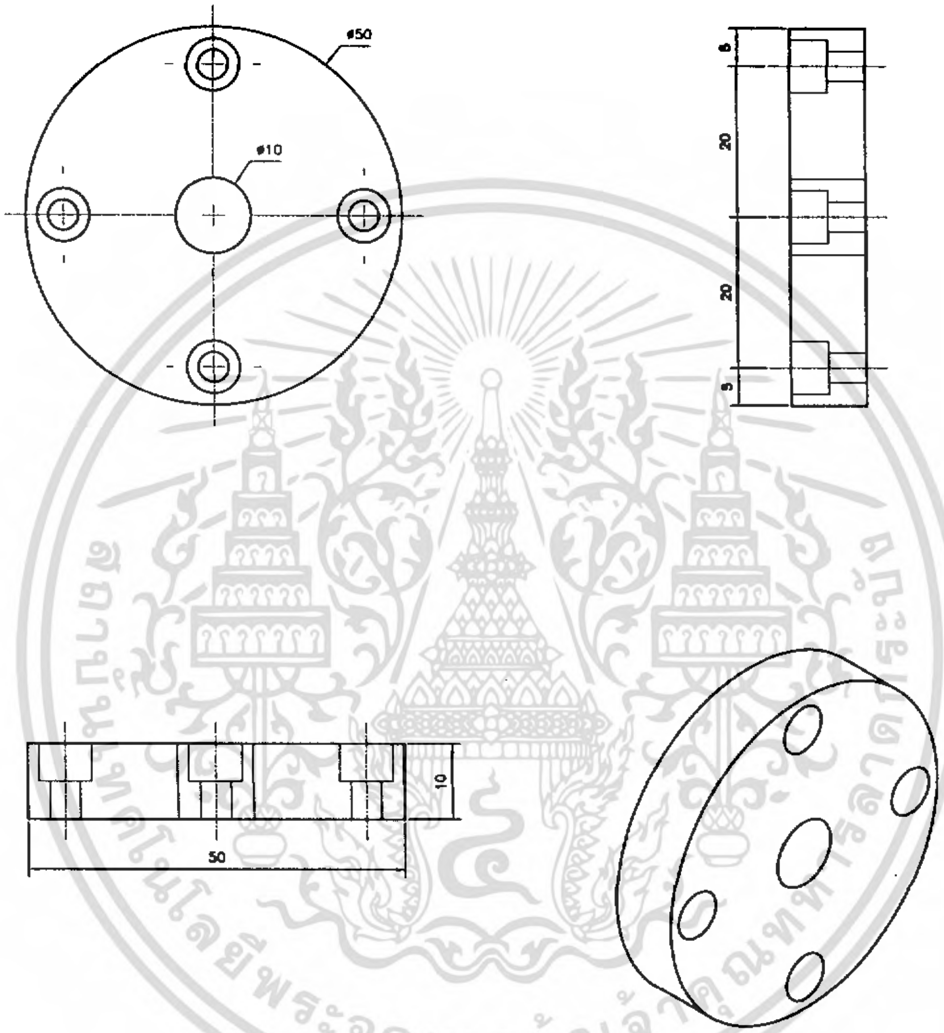
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:1
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 13/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	



11	Part no.11	Aluminum	0.05 kg.	2
No	Part name	Material	Weight	Item

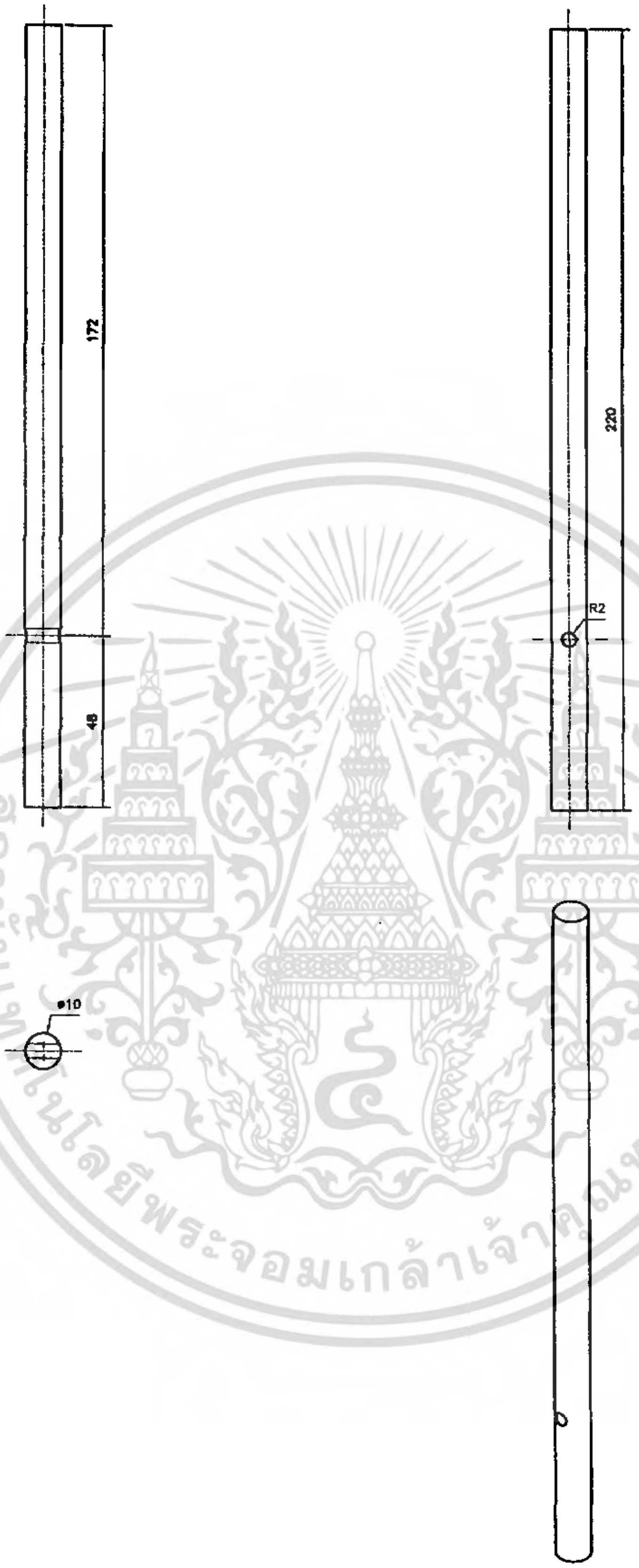
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	1:1
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	14/20

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม

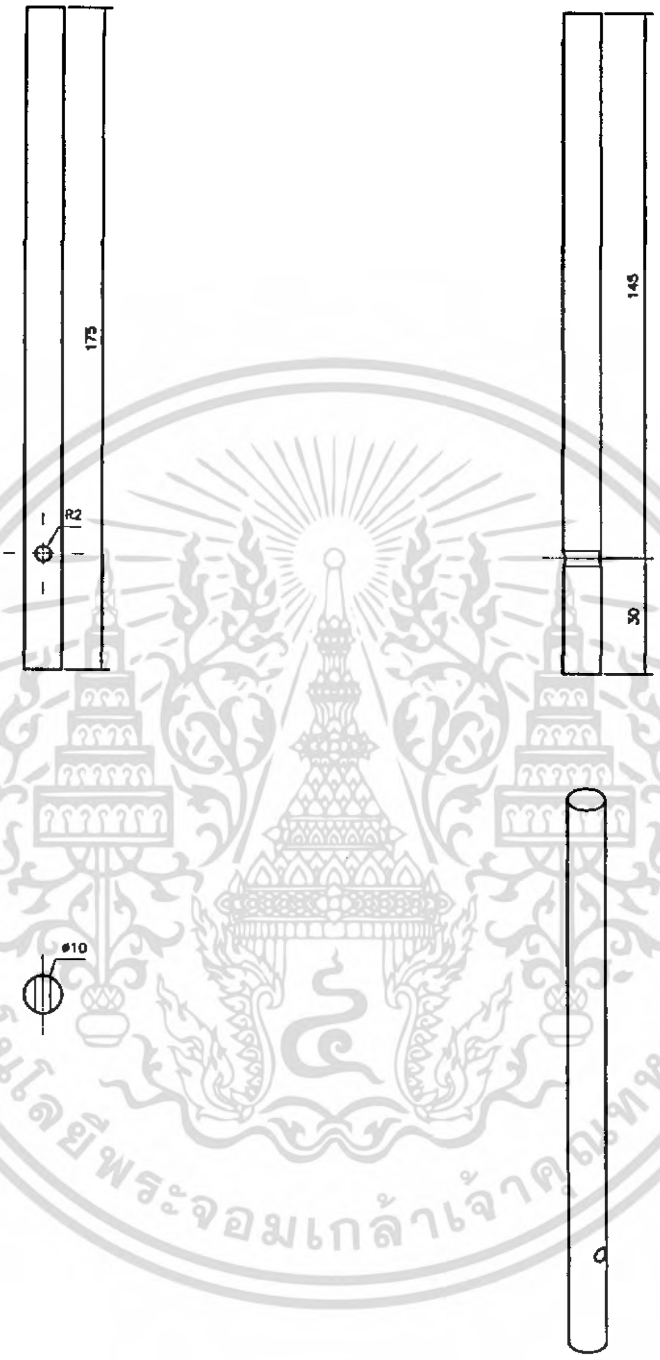


12	Part no.12	Aluminum	0.05 kg.	4
No	Part name	Material	Weight	Item

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:1
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 15/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	

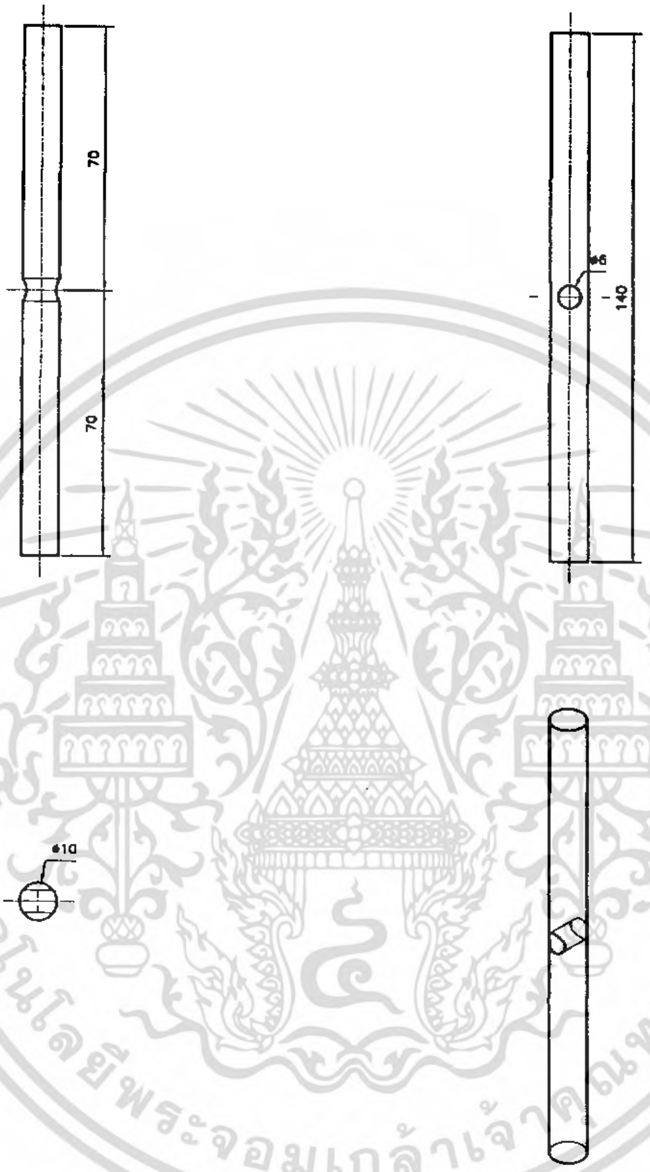


13	Part no.13	Stainless_Steel		0.14 kg.	1
No	Part name	Material		Weight	Item
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrobang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005		Scale 1:2
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005		
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005		Sheets 16/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005		

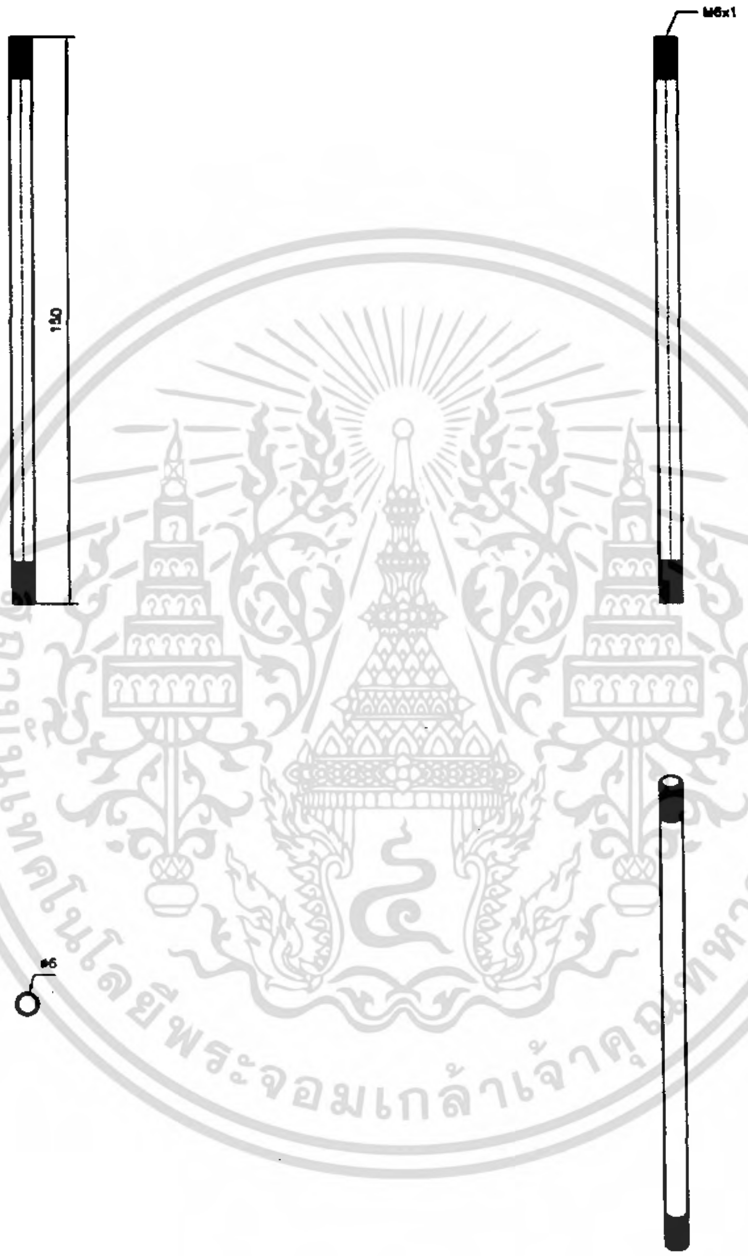


No	Part name	Material	Weight	Item
14	Part no.14	Stainless_Steel	0.11 kg.	1

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 17/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	

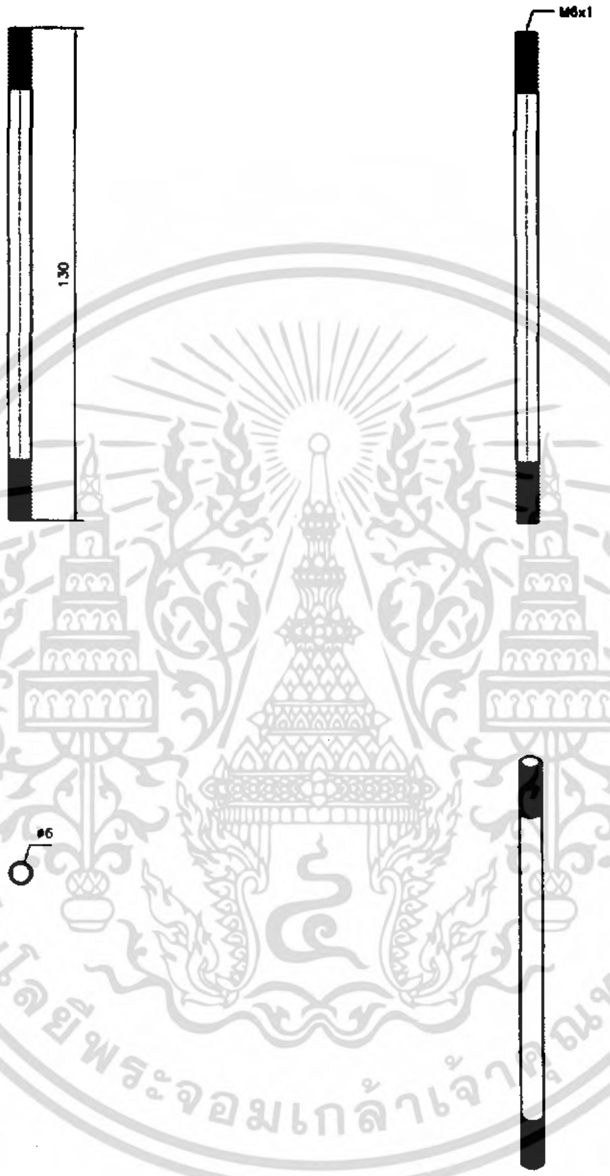


15	Part no.15	Stainless_Steel		0.09 kg.	1
No	Part name	Material		Weight	Item
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong		14/9/2005	Scale 1:2
	Design	Sugdidach Traisuwun		14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok		14/9/2005	Sheets 18/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul		19/9/2005	



16	Part no.16	Stainless_Steel	0.03 kg.	3
No	Part name	Material	Weight	Item

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005	
	Design	Anusak Chulok	14/9/2005	Sheets 19/20
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005	



17	Part no.17		Stainless_Steel	0.03 kg.	1
No	Part name		Material	Weight	Item
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Nuttavin Grammahawong	14/9/2005	Scale 1:2	
	Design	Sugdidach Traisuwun	14/9/2005		
	Design	Anusak Shulok	14/9/2005	Sheets 20/20	
	Approve	Pholchai Chotiprayanakul	19/9/2005		