

อภิปรายงานการ



สำนักหอสมุด



หุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ฟัซซีลอจิก  
TRANSPORT ROBOT VELOCITY CONTROLLED  
BY FUZZY LOGIC CONTROLLER

นายรัชชัย	ทับทิมหิณ	รหัส 56362812
นายบุญญฤทธิ์	คำเลิศ	รหัส 56362881
นายศักดิ์สรณ์	น้ามณี	รหัส 56363208

2 CD

CD-STL 59

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยมหิดล
วันลงทะเบียน 24 ส.ค. 2561
เลขทะเบียน 17220674 ✓
เลขเรียกหนังสือ 45

ส 394 ๓  
2561


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล  
ปีการศึกษา 2559




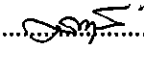
## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ      ทุนย่นต้นขนส่งแบบควบคุมความเร็ว โดยใช้ฟิชชีลจิก  
ผู้ดำเนินโครงการ      นายรัชชัย      ทับทิมหิน      รหัส 56362812  
   นายบุญฤทธิ์      คำเลิศ      รหัส 56362881  
   นายศักดิ์สรณ์      ฉ่ำมณี      รหัส 56363208  
ที่ปรึกษาโครงการ      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มูทิตา สงฆ์จันทร์  
สาขาวิชา      วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา      วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา      2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มูทิตา สงฆ์จันทร์)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย)

  
.....กรรมการ  
(ดร.สราวดี วัฒนวงศ์พิทักษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	หุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้พีชชีลอจิก
ผู้ดำเนินโครงการ	นายรัชชัย ทับทิมหิน รหัส 56362812
	นายบุญญฤทธิ์ คำเลิศ รหัส 56362881
	นายศักรินทร์ ถ้ามณี รหัส 56363208
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา สงฆ์จันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2559

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีชชี โดยเลือกการอนุมานแบบแมมคานี เพื่อให้ความเร็วของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่บนรางมีค่าคงที่ตามที่กำหนดเมื่อโหลดของหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 กิโลกรัมถึง 5 กิโลกรัม และหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนระดับความเร็วได้เมื่อมีการเปลี่ยนแถบสีของราง โดยกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์ที่แตกต่างกันในแต่ละแถบสี และใช้เซนเซอร์สีตรวจจับสีของรางเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามที่กำหนดไว้ในแถบสีนั้นๆ โดยค่าอินพุตของพีชชีจะเป็นค่าน้ำหนักโหลดปัจจุบันของหุ่นยนต์และค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดของหุ่นยนต์ที่วัดค่ามาจากโหลดเซลล์ชนิดเสตรนเกจ ค่าเอาต์พุตของพีชชีจะเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์และค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละน้ำหนักโหลด ซึ่งมีเซนเซอร์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อหาค่าความเร็วของหุ่นยนต์แล้วแสดงผลบนจอแอลซีดีและมีหลอดไฟแอลอีดีแสดงสถานะไฟติดเมื่อหุ่นยนต์มีความเร็วคงที่ตามที่กำหนด จากผลการทดลองเห็นได้ว่า การใช้ตัวควบคุมแบบพีชชีสามารถควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนดได้ เมื่อโหลดของหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลง และหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนระดับความเร็วตามที่กำหนดได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแถบสีของราง

**Project title** Transport Robot Velocity Controlled by Fuzzy Logic Controller  
**Name** Mr.Tawatchai Tubthimhin ID. 56362812  
Mr.Bunyarit Khamlerd ID. 56362881  
Mr.Saksorn Chammanee ID. 56363208  
**Project adviser** Asst. Prof. Mutita Songjun, Ph.D.  
**Major** Electrical Engineering  
**Department** Electrical and Computer Engineering  
**Academic year** 2016

---

### Abstract

This project presents the velocity control of robot by using fuzzy logic controller. The mamdani inference method is chosen in the fuzzy design. The velocity of the robot will be constant when the load of robot changes from 1 kilogram to 5 kilograms. The robot can also change the velocity when color of the rail is changed. The color light sensor is use to detect the color of the rail while the robot is moving to the desired velocity in the color zone. The inputs of fuzzy controller are the change of weight and the current weight measured by load cell. The output of fuzzy controller are the change of speed and the constant speed regulator parameter. The velocity of robot is measured by encoder and also display on LCD screen. The LED is used to indicate the velocity of the robot when it reaches the desired point. The results show that the robot with the fuzzy controller is able to move constantly at the desired velocity when the load is changed. Moreover, it can also change the velocity correctly when color of the rail change.



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดามารดาซึ่งมีส่วนช่วยในด้านกำลังใจ และมีส่วนช่วยในด้านกำลังใจทำให้สามารถฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มูทิดา สงฆ์จันทร์ สำหรับที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีซีลอจิก รวมถึงข้อมูลและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีซีลอจิก ซึ่งได้นำมาประกอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย สำหรับคำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการ รวมถึงข้อมูลและทฤษฎีต่างๆ เพื่อให้ได้ปริญญานิพนธ์ที่สมบูรณ์ ซึ่งได้นำมาประกอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สรารุณี วัฒนวงศ์พิทักษ์ สำหรับคำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการ รวมถึงข้อมูลและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีซีลอจิก ซึ่งได้นำมาประกอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวถึงทุกท่าน ที่ต่างมีส่วนร่วมในการชี้แนะ ให้ข้อมูล และให้ความรู้เกี่ยวกับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงและตรงตามวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยต้องการมา ณ ที่นี้ด้วย

ธวัชชัย ทับทิมหิน

บุญญฤทธิ คำเลิศ

ศักดิ์ศรณ์ น้ามณี

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการงาน.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน.....	1
1.3 ขอบเขตของ โครงการงาน.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ตัวรับรู้และทรานสดิวเซอร์.....	4
2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	10
2.3 โหลดเซลล์ (load cell).....	11
2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	15
2.5 ตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic).....	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการงาน.....	36
3.1 ขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุม ฟัซซีลอจิก.....	36
3.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก.....	38
3.3 ออกแบบวงจรของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุม ฟัซซีลอจิก.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ออกแบบตัวควบคุมแบบพีซี .....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	59
4.1 การทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ .....	59
4.2 การทดลองความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง .....	61
4.3 การทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ ที่แถบสีต่างๆ.....	71
4.4 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที ในรางบริเวณแถบสีแดง เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง ....	74
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ .....	81
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน .....	81
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา.....	82
5.3 การนำไปพัฒนาและต่อยอด .....	82
เอกสารอ้างอิง .....	83
ภาคผนวก ก รายละเอียดข้อมูลของ AVR ATMEGA2560 .....	84
ภาคผนวก ข รายละเอียดของ L298N .....	94
ภาคผนวก ค รายละเอียดข้อมูลของ TCS3200-TCS3210 .....	98
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ .....	113

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	2
3.1 ตัวแปรและค่าเชิงเส้น .....	45
4.1 ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ในแต่ละน้ำหนักโหลด .....	60
4.2 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 1 กิโลกรัม.....	64
4.3 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 1 กิโลกรัม.....	64
4.4 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 1 กิโลกรัม.....	65
4.5 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 กิโลกรัม.....	65
4.6 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 กิโลกรัม.....	66
4.7 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 กิโลกรัม.....	66
4.8 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 3 กิโลกรัม.....	67
4.9 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 3 กิโลกรัม.....	67
4.10 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 3 กิโลกรัม.....	68
4.11 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 4 กิโลกรัม.....	68
4.12 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 4 กิโลกรัม.....	69
4.13 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 4 กิโลกรัม.....	69



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อนุพันธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนเทียบกับสัญญาณอินพุต.....	6
2.2 คุณลักษณะของความไวของตัวรับรู้.....	6
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตที่ใกล้เคียงกับเส้นตรง .....	7
2.4 ขีดจำกัดที่ตัวรับรู้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ .....	7
2.5 เขตตาย – อินพุตเปลี่ยนแปลงแต่เอาต์พุตไม่เปลี่ยนแปลง.....	8
2.6 ตัวอย่างอุปกรณ์ไหลเซลล์.....	11
2.7 ลักษณะของสเตรนเกจ .....	12
2.8 แสดงภาพพื้นที่หน้าตัดและความยาวของขดลวด .....	13
2.9 แสดงการใช้งานสเตรนเกจ.....	14
2.10 การต่อสเตรนเกจเข้ากับวงจรวิทสโตนบริดจ์ .....	14
2.11 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง .....	15
2.12 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟส.....	16
2.13 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวแปลงผันกำลังกระแสตรง .....	16
2.14 วงจรมอเตอร์แบบขนานที่มีสเตเตอร์อยู่ในวงจร .....	17
2.15 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม .....	19
2.16 กราฟคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม ....	19
2.17 กราฟคุณสมบัติของการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง โดยการเปลี่ยนค่าแรงดัน .....	20
2.18 ความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าคิวตี้ไซเคิลของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่.....	21
2.19 วงจรควบคุมมอเตอร์แบบการปรับความกว้างของพัลส์ที่ใช้กลับทิศการหมุนได้.....	22
2.20 การควบคุมโดยตรง.....	24
2.21 การควบคุมแบบไปข้างหน้า.....	24
2.22 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว.....	25
2.23 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีซี.....	26
2.24 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่ $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ลบ” เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.62 .....	29
2.25 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่ $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$ ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.35 และระดับความเป็นสมาชิกของ “บวก” เท่ากับ 0.64 .....	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 การอนุमानพีชชีแบบแมมคานี.....	33
2.27 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด.....	34
2.28 ผลการรวมกฎของค่าความผิดพลาดเท่ากับ $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการเปลี่ยนแปลง ค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$ .....	34
2.29 การทำดีพีชชีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	35
3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ ตัวควบคุมพีชชีลอจิก.....	37
3.2 แบบโครงสร้างหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิก.....	38
3.3 โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว.....	39
3.4 ขนาดของรางที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	40
3.5 รางที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	40
3.6 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560.....	41
3.7 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์.....	41
3.8 แผงวงจรตัวรับรู้ TCS230.....	42
3.9 วงจรตัวรับรู้ TCS230.....	42
3.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	43
3.11 แผงวงจรขับมอเตอร์ L298N.....	43
3.12 วงจรขับมอเตอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ L298N.....	44
3.13 รูปแบบการอนุमानอินพุตและเอาต์พุตของพีชชี.....	46
3.14 พีชชีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโหลด.....	46
3.15 พีชชีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าน้ำหนักโหลด.....	47
3.16 พีชชีเซตสำหรับปริมาณเอาต์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์.....	47
3.17 พีชชีเซตสำหรับปริมาณเอาต์พุตค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละ น้ำหนักโหลด.....	48
3.18 มุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์.....	49
3.19 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโหลด 1 กิโลกรัม.....	50
3.20 การอนุमानพีชชีแบบแมมคานี.....	51
3.21 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 การทำดีพีซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์	51
3.23 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าน้ำหนักโหลดที่ 1 กิโลกรัม	52
3.24 การอนุมานพีซีแบบแมมดानी	52
3.25 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด	52
3.26 การทำดีพีซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ ในแต่ละน้ำหนักโหลด	53
3.27 ค่าของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในกรณีที่ 1	53
3.28 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโหลดที่ลดลง 2.5 กิโลกรัม	54
3.29 การอนุมานพีซีแบบแมมดानी	54
3.30 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด	55
3.31 การทำดีพีซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์	55
3.32 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าน้ำหนักโหลดที่ 2.5 กิโลกรัม	55
3.33 การอนุมานพีซีแบบแมมดानी	56
3.34 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด	56
3.35 การทำดีพีซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ ในแต่ละน้ำหนักโหลด	57
3.36 ค่าของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในกรณีที่ 2	57
3.37 การเรียกใช้ไลบรารีของพีซีในโปรแกรมอาคูนไ	58
4.1 การสังเกตค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์	60
4.2 ใส่ น้ำหนัก โหลด ให้กับหุ่นยนต์	61
4.3 สังเกตว่าหุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้จริงหรือไม่	62
4.4 ทำการเปลี่ยนน้ำหนักโหลดพร้อมกับเริ่มจับเวลา	63
4.5 หยุดจับเวลาเมื่อหุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าที่กำหนด	63
4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อน้ำหนัก โหลดมีการเปลี่ยนแปลง	71
4.7 ร่างสำหรับการทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ ที่แถบสีต่างๆ	72
4.8 การทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์ที่วางบริเวณแถบสีแดง	72



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 การทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์ที่รางบริเวณแถบสีน้ำเงิน ....	73
4.10 กราฟแสดงระยะเวลาในการเพิ่มและลดความเร็วของหุ่นยนต์ที่ความแตกต่างระหว่างค่าความเร็วในแต่ละแถบสีต่างๆ.....	74
4.11 ทำการเปลี่ยนน้ำหนักโหลดพร้อมกับเริ่มจับเวลา.....	75
4.12 หยุดจับเวลาเมื่อหุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.42 เมตรต่อวินาที.....	75
4.13 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.42 เมตรต่อวินาที เมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหนักโหลดที่ค่าต่างๆ.....	79



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันเมื่อพิจารณาในแง่ของการทำงานภายในโรงงานอุตสาหกรรม มักจะเกี่ยวข้อง อยู่ตลอดเวลากับการเคลื่อนที่ การเคลื่อนย้ายวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตทั้ง 3 องค์ประกอบ คือ ปัจจัยนำเข้า (Input), กระบวนการแปลงสภาพ (Conversion Process) และผลผลิต (Output) โดยการเคลื่อนย้ายดังกล่าวเรียกกันว่าการขนถ่ายวัสดุที่จะลำเลียงไปยังส่วนต่างๆ ทว่าทั้ง กระบวนการผลิตตั้งแต่การนำวัตถุดิบมาถึง โรงงาน ผ่านกระบวนการผลิต จนได้เป็นผลิตภัณฑ์ หากขาดการขนถ่ายวัสดุแล้วการผลิตจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย ดังนั้นการวิเคราะห์การขนถ่าย วัสดุก็คือ ทำอย่างไรให้เป็นไปอย่างสะดวก รวดเร็ว และปลอดภัย ฉะนั้นการขนถ่ายวัสดุจึงเป็น เรื่องของกระบวนการผลิตขององค์กรที่ต้องให้ความสำคัญและดำเนินการอย่างจริงจัง ระบบขนส่ง ภายในโรงงานอุตสาหกรรมแบบระบบรถส่งของอัตโนมัติจึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา นี้เพื่อต้องการให้การขนส่งมีประสิทธิภาพ มีการควบคุมระบบให้เกิดความเสถียรภาพ ทำให้เกิดความ สะดวกและรวดเร็ว ลดระยะเวลาในการขนส่ง อีกทั้งยังเป็นการป้องกันการชำรุดเสียหายของ อุปกรณ์หรือสินค้าระหว่างที่ถูกลำเลียง ปัจจัยเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วและประสิทธิภาพของระบบ การขนส่งและความเร็วของระบบขนส่งมีผลมาจากน้ำหนักของสินค้าโดยตรง เมื่อสินค้าน้ำหนัก มากขึ้น ความเร็วในการขนส่งก็จะช้าลง ทำให้เวลาในการขนส่งเกิดความคลาดเคลื่อน ถ้าหากระบบ มีความเร็วมากเกินไปก็อาจจะทำให้อุปกรณ์หรือสินค้าเกิดการชำรุดเสียหายได้ ในปัจจุบัน เทคโนโลยีด้านการควบคุมสามารถเข้ามาช่วยในการควบคุมความเร็วและเพิ่มประสิทธิภาพในการ ขนส่งสินค้าให้ดีขึ้นได้

ดังนั้นจึงจัดทำโครงการการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้พีซีลอจิกเมื่อ โหลด มีการเปลี่ยนแปลง และจะสามารถควบคุมระดับความเร็วเมื่อถึงจุดที่ตั้งไว้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อสร้างหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมระดับความเร็วได้โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีลอจิก เมื่อ โหลดของหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลง และสามารถลดระดับความเร็วลงได้เมื่อถึงจุดที่ต้องการ



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำผลงานไปใช้พัฒนาและประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งภายในโรงงานอุตสาหกรรมระบบสายพานลำเลียง ระบบควบคุมที่ต้องการให้ความเร็วคงที่ และมีความปลอดภัย ในระหว่างที่มีการรับ-ส่งของ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการขนส่ง

## 1.6 งบประมาณ

1) แบตเตอรี่	490 บาท
2) โหลดเซลล์	500 บาท
3) แผงวงจรต่างๆ	1,690 บาท
4) มอเตอร์ 12 โวลต์ และล้อ	1,370 บาท
5) จอแสดงผล	250 บาท
6) วัสดุอุปกรณ์โครงสร้างอื่นๆ	800 บาท
7) เอกสาร	<u>1,000</u> บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (หกพันหนึ่งร้อยบาทถ้วน)	<u>6,100</u> บาท
หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะรวบรวมหลักการการทำงานและทฤษฎีขององค์ประกอบที่มีความจำเป็นต่อการทำงานของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้พีซีลอจิก ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบนั้น จะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันของโครงสร้างของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้พีซีลอจิก ทั้งระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์ และระบบควบคุมความเร็ว

#### 2.1 ตัวรับรู้และทรานสดิวเซอร์

ตัวรับรู้ คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพ และแปรผันการเปลี่ยนแปลงปริมาณนั้นเป็นปริมาณที่สามารถวัดได้หรือบันทึกได้

ทรานสดิวเซอร์ คืออุปกรณ์ที่ถ่ายโอนพลังงานจากระบบหนึ่ง ไปยังอีกระบบหนึ่ง ในรูปแบบเดิมหรือแตกต่างจากเดิม โดยปกติจะเปลี่ยนอยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้า

ตัวรับรู้เป็นคำที่ใช้สำหรับตัวอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรับรู้การเปลี่ยนแปลง แต่ทรานสดิวเซอร์ใช้กับตัวรับรู้และวงจรที่เกี่ยวข้องทั้งสองตัวนี้จะทำงานร่วมกัน โดยมีชื่อเรียกสั้นๆว่าตัวรับรู้

##### 2.1.1 ประเภทของตัวรับรู้

ตัวรับรู้มีการจัดประเภทอยู่หลายแบบตั้งแต่แบบง่าย ๆ ไปจนถึงซับซ้อนขึ้นอยู่กับเกณฑ์การพิจารณา เช่น สมบัติทั้งหมดของตัวรับรู้ใช้วัดอะไร (สิ่งที่มากระตุ้นตัวรับรู้) มีลักษณะจำเพาะอะไรบ้าง ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่ตอบสนองกลไกที่ใช้ในการแปลงผันคืออะไร ตัวรับรู้ทำจากวัสดุชนิดไหน ใช้ทำงานแบบไหน ซึ่งมีตัวอย่างการจัดประเภทของตัวรับรู้ดังนี้

1) ตัวรับรู้ที่แบ่งโดยวัสดุที่ใช้ทำ เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ตัวนำสารกึ่งตัวนำ ฉนวน ของเหลว และอื่นๆ

2) ตัวรับรู้ที่แบ่งโดยวิธีการตรวจวัด เช่น วิธีการทางชีววิทยา วิธีการทางเคมี ไฟฟ้า แม่เหล็ก หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความร้อน อุณหภูมิ การกระจัดทางกล หรือคลื่นกล กัมมันตภาพรังสี การแผ่รังสี และอื่นๆ

3) ตัวรับรู้ที่แบ่งโดยปรากฏการณ์การแปลงผัน

3.1) ปรากฏการณ์ทางกายภาพ เช่น เทอร์โมอิเล็กทริก โฟโตอิเล็กทริก ไฟฟ้าแม่เหล็ก เทอร์โมแมกเนติก และอื่นๆ

3.2) ปราบกฎการณ์ทางเคมี เช่น การเปลี่ยนรูปทางเคมี การเปลี่ยนรูปทางกายภาพ กระบวนการเคมีไฟฟ้า และอื่นๆ

4) ตัวรับรู้ที่แบ่งตามการใช้งาน เช่น ตัวรับรู้สำหรับงานทางด้าน เกษตรกรรม วิศวกรรม โครงสร้าง พลังงาน ทางการแพทย์ การทหาร อุตสาหกรรม เครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์ ยานยนต์ สิ่งแวดล้อม อุตุนิยมวิทยา การสื่อสาร โทรคมนาคม และอื่นๆ

### 2.1.2 คุณลักษณะของตัวรับรู้

การเลือกตัวรับรู้สำหรับเครื่องมือวัดหรือระบบควบคุมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ราคา การเอาไปใช้ประโยชน์ และองค์ประกอบทางสิ่งแวดล้อม เมื่อเลือกตัวรับรู้สิ่งที่สำคัญก็คือคุณลักษณะของตัวรับรู้ต้องสอดคล้องรับกับคุณภาพของเอาต์พุตที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น มีตัวรับรู้สำหรับอุณหภูมิมากมายแต่มีบางชนิดเท่านั้นที่เหมาะสมสำหรับใช้วัดอุณหภูมิของอากาศ ในเรือนเพาะชำ บางชนิดไม่สามารถวัดอุณหภูมิในช่วงนั้นได้ บางชนิดแพงเกินไป หรือต้องการไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงาน

ความเข้าใจพื้นฐานในคุณลักษณะของตัวรับรู้ เป็นสิ่งสำคัญที่เราต้องมีเพื่อที่จะสามารถเลือกใช้ตัวรับรู้ได้อย่างเหมาะสม คุณลักษณะของตัวรับรู้ได้แก่

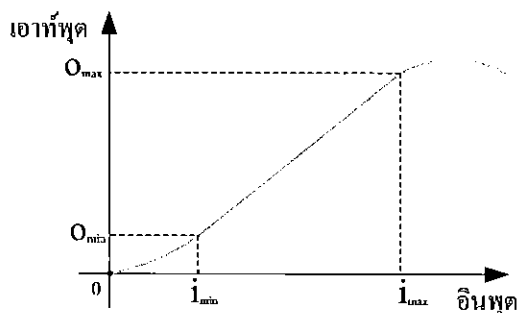
1) ความถูกต้อง (accuracy) โดยปกตินิยามเป็นความผิดพลาดที่มากที่สุดที่คาดว่า จะเกิดขึ้นระหว่างค่าที่อ่านได้กับค่าทางทฤษฎี บางครั้งค่านี้จะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล เช่น เทอร์โมมิเตอร์อาจรับประกันความถูกต้องอยู่ภายใน 5 เปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกลเอาต์พุต (FSO, Full scale output)

2) ความไว (sensitivity) นิยามในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต และเอาต์พุต โดยทั่วไปแล้วความไวเป็นอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต เมื่ออินพุตเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยความไวอาจแสดงในรูปของอนุพันธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนเทียบกับสัญญาณอินพุตดังสมการที่ (2.2) และแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 2.1

$$\text{ความไว} = \frac{O_{\max} - O_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} = \frac{\Delta O}{\Delta I} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ (2.1) เมื่อ  $\Delta I \rightarrow 0$  จะได้ว่า

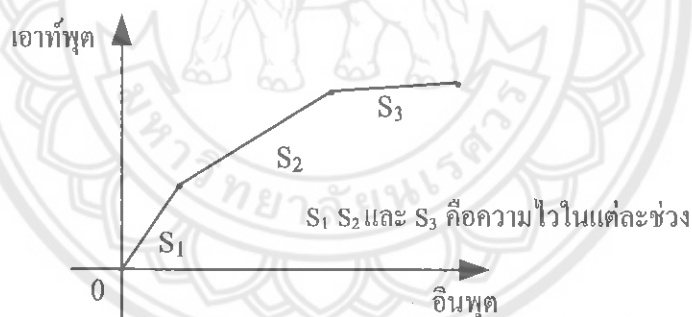
$$\text{ความไว} = \frac{\partial O}{\partial I} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 อนุพันธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนเทียบกับสัญญาณอินพุต

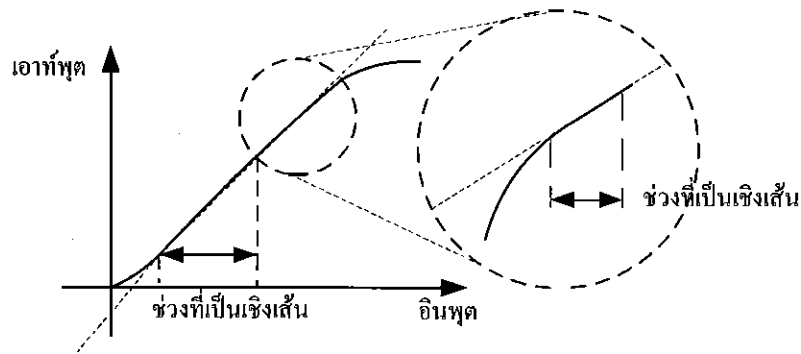
หน่วยของความไวแสดงโดยนิยามตามสมการ (2.2) ซึ่งเปลี่ยนไปตามธรรมชาติของตัวรับรู้ที่ใช้วัดและปริมาณที่ถูกวัด ตัวอย่างเช่น วัดระยะทางเป็นมิลลิเมตรด้วยตัวรับรู้ที่ให้เอาต์พุตออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า (V) ในกรณีนี้หน่วยของความไวจะเป็น โวลต์ต่อมิลลิเมตร (V/mm)

ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกวัดและเอาต์พุตเป็นเชิงเส้นแล้วความไวที่ใช้แสดงตลอดช่วงจะมีค่าเดียว แต่ถ้าความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่เป็นเชิงเส้น คุณลักษณะของความไวของตัวรับรู้จะเปลี่ยนไปหลายค่าและความไวจะถูกกำหนดออกเป็นหลายช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



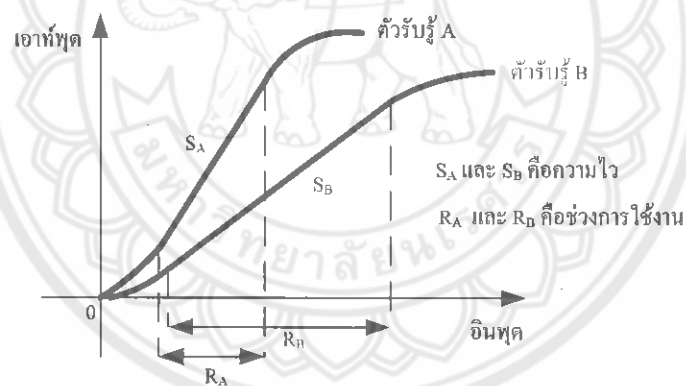
รูปที่ 2.2 คุณลักษณะของความไวของตัวรับรู้

3) ความเป็นเชิงเส้น (linearity) ความเป็นเชิงเส้นของตัวรับรู้ดูจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตที่ใกล้เคียงกับเส้นตรง ซึ่งอาจเป็นเส้นตรงในช่วงอินพุตแคบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยปกติการใช้งานตัวรับรู้จะใช้งานในช่วงที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตที่ใกล้เคียงกับเส้นตรง

4) ช่วงการใช้งาน (range) ช่วงการใช้งานของตัวรับรู้ กำหนดว่าเป็นขีดจำกัดซึ่งตัวรับรู้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วงการทำงานของตัวรับรู้โดยปกติถูกกำหนดด้วยค่าอินพุตต่ำสุดและสูงสุดซึ่งสามารถวัดได้ ช่วงการใช้งานจะแปรผกผันกับความไวดังแสดงในรูปที่ 2.4 กล่าวคือ ถ้าช่วงการใช้งานแคบความไวจะสูง ถ้าช่วงการใช้งานกว้างความไวจะต่ำ สิ่งที่สำคัญคือต้องไม่ทำการวัดนอกช่วงที่กำหนด เพราะจะทำให้เครื่องมือล้มเหลวในการทำงานหรืออุปกรณ์อาจเสียหายได้ หรืออาจเสี่ยงต่อสุขภาพหรือความปลอดภัย



รูปที่ 2.4 ขีดจำกัดที่ตัวรับรู้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5) ความละเอียด (resolution) ความละเอียดของตัวรับรู้จะสัมพันธ์กับอินพุตที่น้อยที่สุดหรือการเปลี่ยนแปลงอินพุตที่น้อยที่สุดที่มันสามารถตรวจจับได้ โดยปกติจะแสดงในทอมของการเพิ่มขึ้นที่น้อยที่สุดของอินพุตซึ่งสามารถวัดหรือรับรู้ได้ ยิ่งความละเอียดของการแสดงผลสูงขึ้นความสามารถในการวัดหรือรับรู้ก็จะมีขนาดเล็กลง ตัวอย่างเช่น ตัวแสดงผลเป็นเลขทศนิยม 4 ตำแหน่ง 0.0001 หน่วยมีความละเอียดมากกว่าการแสดงผลการวัดด้วยทศนิยม 3 ตำแหน่ง 0.001



6) การตอบสนอง (response) การตอบสนองของตัวรับรู้ คือเวลาที่มันใช้เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตสุดท้ายสำหรับอินพุตที่กำหนดให้ ซึ่งอาจจะแสดงในเทอมของวินาที หรือเศษส่วนของวินาที และบางครั้งก็เป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล เช่น ข้อกำหนดกล่าวว่าตัวรับรู้ใช้เวลา 3 วินาทีเพื่อให้เอาต์พุตถึง 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล ควรพึงระวังอย่าสับสนกับคำว่าความไว

7) การตอบสนองต่อความถี่ อินพุตที่ให้กับตัวรับรู้อาจมีค่าคงตัวหรือเปลี่ยนแปลงขึ้นลง จำนวนวัฏจักรของการเปลี่ยนแปลงค่าขึ้นลงในหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่าความถี่ ตัวรับรู้แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความถี่ธรรมชาติของตัวรับรู้ ตัวรับรู้ที่มีความถี่ธรรมชาติสูงสามารถประยุกต์ใช้งานได้ทั้งการระสาด และการระพลวัด โดยทั่วไปตัวรับรู้ควรมีความถี่ธรรมชาติสูงกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตอย่างน้อย 2 เท่า ต้องไม่ใช่ตัวรับรู้วัดสัญญาณอินพุตที่มีความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของตัวรับรู้ เพราะจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ ค่าที่ได้จะมีความผิดพลาดมากและอาจทำให้ตัวรับรู้เสียหายได้

8) เขตตาย (dead zone) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุดของปริมาณที่ถูกวัด โดยที่เอาต์พุตไม่เปลี่ยนหรือช่วงของอินพุตที่ไม่มีเอาต์พุตตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 เขตตายจะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงเสียดทานสถิตหรือฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 2.5 เขตตาย – อินพุตเปลี่ยนแปลงแต่เอาต์พุตไม่เปลี่ยนแปลง

9) ความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability or reproducibility) หรือความแม่นยำ (precision) ความสามารถในการทำซ้ำคือจำนวนครั้งของการวัดได้ค่าเดิมภายใต้เงื่อนไขที่จำกัด เป็นการวัดความสามารถของตัวรับรู้ เพื่อให้การแสดงผลค่าหรือการตอบสนองเหมือนเดิมหรือเท่าเดิม สำหรับการวัดซ้ำๆ ที่ค่าเดิมของปริมาณเดิมที่ถูกวัด ความสามารถในการทำซ้ำอาจจะให้ค่าเป็นเปอร์เซ็นต์สูงสุดของการอ่านหรือภายใต้สภาวะจำกัดของแต่ละการอ่าน

10) ความเสถียร (stability) ความเสถียรเป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตจากตัวรับรู้ภายใต้เงื่อนไขการป้อนอินพุตด้วยค่าคงตัวเป็นระยะเวลาต่างๆ

11) ความเชื่อมั่น (reliability) คือความสามารถของตัวรับรู้ที่จะสามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดสำหรับคาบเวลาที่กำหนดหรือจำนวนครั้งของการทำงานที่กำหนดขณะที่ยังคงอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของตัวรับรู้

12) อายุการใช้งาน (operating life) ประโยชน์ของอายุการใช้งานของตัวรับรู้คือเป็นเครื่องแสดงว่าระยะเวลาการใช้งานของตัวรับรู้ที่คาดว่าจะสามารถทำงานได้ภายใต้ข้อกำหนดอายุการใช้งานจะแสดงในรูปของเวลาหรือจำนวนครั้งของการทำงานหรือจำนวนวัฏจักรที่ตัวรับรู้ควรจะทนทานอยู่ได้

13) ความไวคู่ (dual sensitivity) ตามปกติแล้วตัวรับรู้จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการวัดปริมาณอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เช่น วัดความดัน หรือวัดแรง อย่างไรก็ตามตัวรับรู้อาจมีความไวต่อปริมาณอื่นด้วย เช่น อุณหภูมิหรือความเร่ง ถ้านำตัวรับรู้ไปวัดปริมาณบางอย่างในกระบวนการที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เช่น ความดันก็สามารถเกิดความผิดพลาดขึ้นได้จากความไวคู่คือตัวรับรู้วัดปริมาณสองปริมาณในเวลาเดียวกัน

### 2.1.3 การเลือกตัวรับรู้

การเลือกใช้ตัวรับรู้มีขั้นตอนที่ต้องพิจารณาดังนี้

1) ต้องการวัดอะไร วัดปริมาณหรือตัวแปรที่ต้องการรู้ค่า ช่วงของค่าที่วัด ความไว และความถูกต้อง

2) รูปแบบของเอาต์พุตที่ต้องการคืออะไร ตัวปรับแต่งสัญญาณที่ต้องการคืออะไร

3) ระบุตัวรับรู้ที่เป็นไปได้โดยพิจารณาช่วงของการวัด ความไว การตอบสนอง ความเชื่อมั่น ความสามารถในการบำรุงรักษา อายุการใช้งาน กำลังที่ต้องการ หาได้ง่าย ความทนทาน ราคา ความเหมาะสมผล

4) ขนาดของตัวรับรู้ ตัวรับรู้อิ่งเล็กได้ยิ่งดี เพราะจะช่วยส่งเสริมการตอบสนองพลวัต นอกจากนั้นยังรบกวนระบบหรือดึงพลังงานออกมาจากระบบน้อยกว่าตัวรับรู้ที่มีขนาดใหญ่

## 2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู, หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน

โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

### 1) หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู

2) หน่วยความจำแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือหน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลักเปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ คือข้อมูลที่ถูกรวบรวมไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูลใช้เป็นเหมือนกระดานตกในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยงข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรมในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรมซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอมซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

3) ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหรือพอร์ต มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุตและพอร์ตเอาต์พุต ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

4) ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส คือเส้นทางที่แลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่างซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล, บัสแอดเดรส และบัสควบคุม

5) วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นมีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีด้วยกันหลายประเภทดังนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC, MCS51, AVR, MSP, ARM7, ARM9 ฯลฯ และภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ได้แก่ ภาษา C, Assembly, Basic และ Pascal ภาษาดังกล่าวที่กล่าวในเบื้องต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์บางตระกูลจะใช้ได้ครบทุกภาษา แต่บางตระกูลจะใช้ได้บางภาษาขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตซอฟต์แวร์

### 2.3 โหลดเซลล์ (load cell)

โหลดเซลล์ เป็นระบบเซนเซอร์ที่แปลงค่าน้ำหนักทางกลของสิ่งของ (กรัม, กิโลกรัม) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้า (แรงดัน, V) ซึ่งประกอบด้วยสเตรนเกจเป็นส่วนตัวจับ ซึ่งจะคอยเปลี่ยนค่าความเครียดทางกลอันเนื่องมาจากน้ำหนักของวัตถุเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อนำค่าความต้านทานที่ได้จากสเตรนเกจมาต่อเข้ากับวงจรวิทส โตนบรีดจ์ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง (DC Voltage) ก็จะสามารถหาค่าเอาท์พุทของน้ำหนักวัตถุที่เป็นเปลี่ยนแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ไปต่อกับตัวแสดงผลเจ็ดส่วนเพื่อแสดงผลค่าน้ำหนักออกมาเป็นตัวเลขได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (mechanical properties of parts) โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ ฯลฯ ตัวอย่างอุปกรณ์โหลดเซลล์จะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งโหลดเซลล์แต่ละชนิดจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป



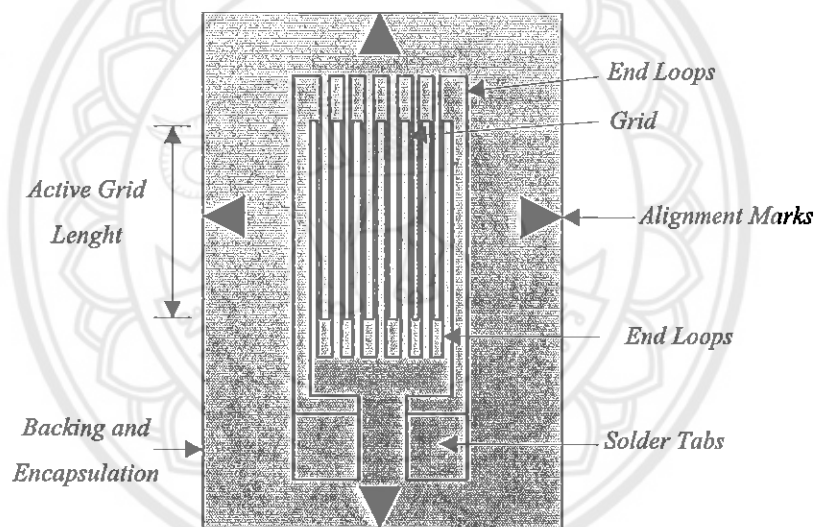
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างอุปกรณ์โหลดเซลล์

โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (strain gauge load cell) หลักการของโหลดเซลล์ประเภทนี้ก็คือเมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียด (Strain) จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ปกติแล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว (วงจรวิทส โตนบรีดจ์) ในการวัด โดยเกจตัวต้านทานทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวของมันไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึงส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ต่อโวลต์ หมายความว่าถ้าจ่ายแรงดัน 10 โวลต์ให้กับโหลดเซลล์ที่มีสเปก 2 มิลลิโวลต์ต่อโวลต์ที่โหลดสูงสุด สมมุติว่าน้ำหนักเป็น 2,000 กิโลกรัมดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำต่อโหลดเซลล์ที่โหลดสูงสุดสัญญาณที่จะได้ก็จะได้เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ ซึ่งก็พอจะแจ่มกระจ่างๆ ได้ดังนี้

0 กิโลกรัมเท่ากับ 0 มิลลิโวลต์  
 1000 กิโลกรัมเท่ากับ 10 มิลลิโวลต์  
 2000 กิโลกรัมเท่ากับ 20 มิลลิโวลต์

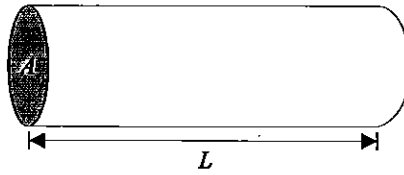
### 2.3.1 สเตรนเกจ (strain gauge)

สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์แบบพาสซีฟซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดึงที่ภาษาทางกลศาสตร์เรียกว่าความเครียด กระทำบนตัวอุปกรณ์ให้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า สเตรนเกจนับเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางทั้งในเรื่องของการชั่งน้ำหนัก การวัดความดันหรือการวัดความเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุที่เกิดจากแรงกระทำต่างๆ โดยที่อุปกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะดังในรูปที่ 2.7 และในโครงการนี้จะเลือกใช้โพลีคาร์บอเนตชนิดสเตรนเกจที่สามารถรับน้ำหนักโหลดได้สูงสุด 5 กิโลกรัม



รูปที่ 2.7 ลักษณะของสเตรนเกจ

จากรูปที่ 2.7 ตัวสเตรนเกจจะประกอบด้วยส่วนของลวดตัวนำซึ่งถูกตัดไปตัดมาวางตัวอยู่บนแผ่นรองรับและที่ปลายแต่ละข้างจะมีจุดเชื่อมต่อดวงจรทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะติดตั้งสเตรนเกจบนส่วนประกอบหรือส่วนของโครงสร้างที่ได้รับแรงกระทำ เช่น ดอม่่อสะพานหรือส่วนโครงสร้างทางโยธาต่างๆ แรงที่กระทำต่อโครงสร้างจะส่งผลต่อสเตรนเกจ ซึ่งอาจจะดึงให้ตัวนำมีความยาวมากขึ้น ในขณะที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทั้งนี้พิสูจน์ได้โดยสมการที่ (2.3)



รูปที่ 2.8 แสดงภาพพื้นที่หน้าตัดและความยาวของขดลวด

$$R = \frac{\rho L}{A} \text{ หน่วยโอห์ม } (\Omega) \quad (2.3)$$

โดยที่

$R$  คือ ค่าความต้านทานของเส้นลวด

$\rho$  คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานของลวดตัวนำ

$L$  คือ ความยาวของเส้นลวด

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของลวดตัวนำเมื่อได้รับแรงกระทำแล้ว จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นสองประการคือ ความยาวของลวดตัวนำเปลี่ยนไปจากเดิม และความต้านทานของลวดตัวนำก็เปลี่ยนไปจากเดิม เพราะฉะนั้นถ้านำค่าทั้งสองชนิดนี้ไปทำการเทียบสัดส่วนกันก็จะได้ค่าตัวประกอบชนิดหนึ่งซึ่งมีชื่อเรียกว่าค่าตัวประกอบเกจ (Gage factor) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.4)

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} \quad (2.4)$$

โดยที่

$K$  คือ ค่าตัวประกอบเกจ

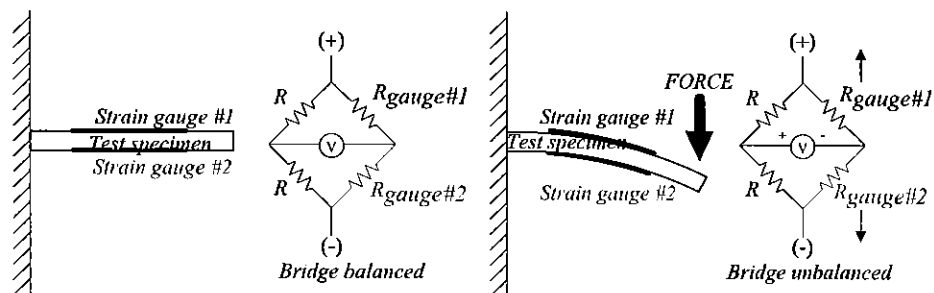
$\Delta R$  คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดตัวนำหลังจากถูกแรงกระทำ

$R$  คือ ค่าความต้านทานของลวดตัวนำเริ่มแรกก่อนถูกแรงกระทำ

$\Delta L$  คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดตัวนำหลังจากถูกแรงกระทำ

$L$  คือ ค่าความยาวของลวดตัวนำก่อนถูกแรงกระทำ

จากสมการที่ (2.4) พบว่าเมื่อเส้นลวดมีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นผลให้เส้นลวดหดตัวหรือยืดออกก็จะมีผลต่อค่าความต้านทานของลวดตัวนำ ตัวอย่างการใช้งานสเตรนเกจจะแสดงดังรูปที่ 2.9



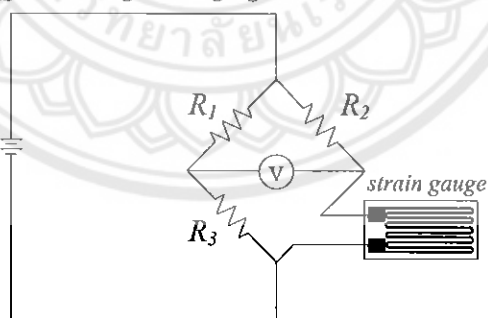
รูปที่ 2.9 แสดงการใช้งานสเตรนเกจ

### 2.3.2 วงจรวิทสโตนบริดจ์

วงจรภายในของเครื่องวัดชนิดนี้ประกอบด้วย

- 1) ตัวต้านทานที่ต่อขนานกันสองสาขา แต่ละสาขาประกอบด้วยตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมกัน
- 2) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะต่อขนานกับตัวต้านทานของวงจรทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวต้านทานในวงจร
- 3) โวลต์มิเตอร์โดยการต่อกับขั้วสายที่ขนานกัน ทำหน้าที่แปลงค่าจากค่าความต้านทาน (โอห์ม) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรจะต่อเข้ากับค่าความต้านทานที่ได้จากสเตรนเกจในลักษณะดังรูปที่ 2.10

Quarter-bridge strain gauge circuit



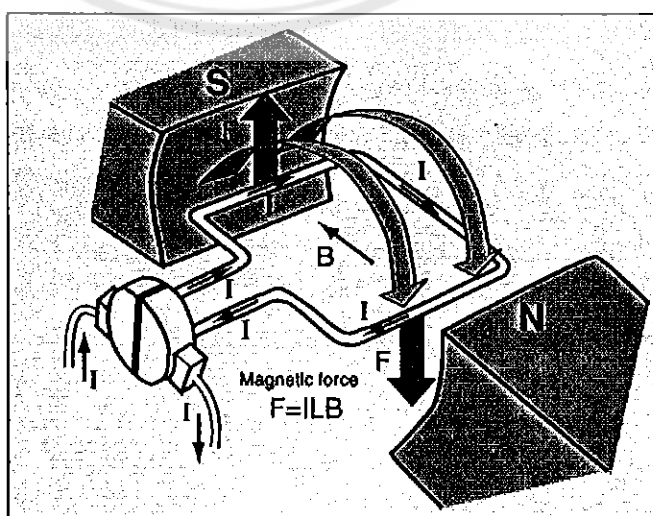
รูปที่ 2.10 การต่อสเตรนเกจเข้ากับวงจรวิทสโตนบริดจ์

## 2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้าคือเครื่องกลไฟฟ้า (electromechanical energy) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (electric energy) เป็นพลังงานกล (mechanical energy) ในรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบหมุน มอเตอร์ไฟฟ้ามีโครงสร้างเบื้องต้นที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ประกอบด้วยขดลวดที่พันรอบแกนโลหะที่วางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก ซึ่งโครงสร้างคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าจะอาศัยสนามแม่เหล็ก 2 ชุดที่เกิดขึ้นได้แก่ สนามแม่เหล็กถาวรและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดตัวนำ โดยเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดที่อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กจะทำให้ขดลวดหมุนไปรอบแกน และเมื่อสลับขั้วไฟฟ้าการหมุนของขดลวดจะหมุนกลับทิศทางเดิม

### 2.4.1 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรง (DC motor) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงกระทำกับขดลวดตัวนำนั้นจึงเกิดการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าจ่ายผ่านแปรงถ่านไปคอมมิวเตเตอร์และขดลวดตัวนำอาร์เมเจอร์ ทำให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ทางด้านขวามือเป็นขั้วเหนือ (N) และด้านซ้ายมือเป็นขั้วใต้ (S) เหมือนกับขั้วแม่เหล็กถาวรที่วางอยู่ใกล้ ๆ กันทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กผลักกันกัน อาร์เมเจอร์หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา พร้อมกับคอมมิวเตเตอร์หมุนตามไปด้วย แปรงถ่านสัมผัสกับส่วนของคอมมิวเตเตอร์เปลี่ยนไปอยู่อีกปลายหนึ่งของขดลวด แต่มีผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่อาร์เมเจอร์เหมือนกับขั้วแม่เหล็กถาวรที่อยู่ใกล้ ๆ อีกครั้ง ทำให้อาร์เมเจอร์ยังคงถูกผลักให้หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาตลอดเวลา ส่งผลให้เกิดการหมุนของอาร์เมเจอร์ ซึ่งหมายถึงเครื่องจักรกลกำลังทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า

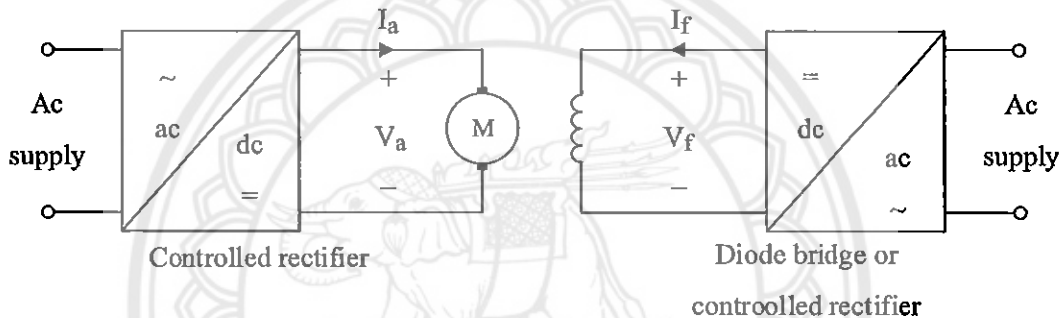


รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

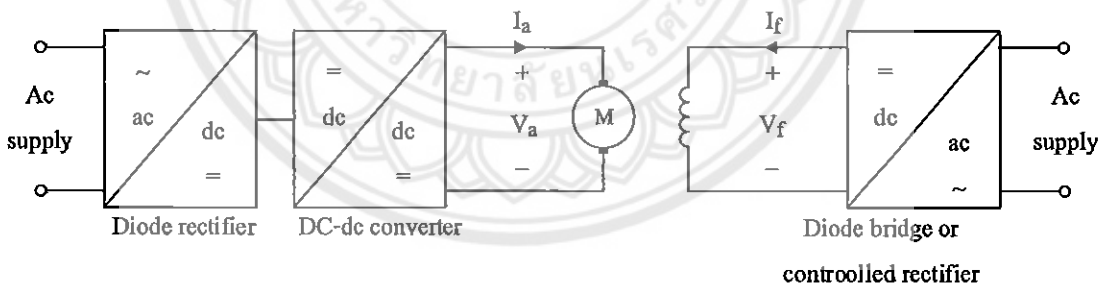


2.4.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงจากตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟสสร้างแรงดันด้านออกกระแสตรงที่ปรับค่าได้จากแรงดันไฟกระแสสลับที่มีค่าคงที่ ในขณะที่ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสร้างแรงดันไฟกระแสตรงที่ปรับค่าได้จากแรงดันกระแสตรงที่มีค่าคงที่ ด้วยคุณสมบัติในการสร้างแรงดันไฟกระแสตรงที่ปรับค่าได้อย่างต่อเนื่อง ตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟสและตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงจึงก่อให้เกิดวิวัฒนาการทางด้านอุปกรณ์ควบคุมและการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปรับความเร็วรอบได้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ที่มีระดับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ไม่กี่แอมป์จนถึงหลายเมกะวัตต์ ตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟสนิยมใช้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงดังรูปที่ 2.12 อีกหนึ่งทางเลือกคือการใช้ตัวเรียงกระแสแบบไดโอดร่วมกับตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟส



รูปที่ 2.13 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวแปลงผันกำลังกระแสตรง

สมการที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้แก่

$$E_g = K \cdot I_f \cdot \omega \tag{2.5}$$

$$V_a = R_a \cdot I_a + E_g = R_a I_a + K \cdot I_f \cdot \omega \tag{2.6}$$

$$T_d = K \cdot I_f \cdot I_a = B\omega + T_L \tag{2.7}$$

กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์สร้างขึ้นคำนวณได้จาก

$$P_d = T_d \omega \tag{2.8}$$

จากสมการที่ (2.6) เราสามารถเขียนสมการความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$\omega = \frac{V_a - R_a I_a}{K \cdot I_f} \quad (2.9)$$

โดยที่

$E_g$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนกลับ (Back emf) มีหน่วย V

$V_a$  คือแรงดันตกคร่อมอาร์เมเจอร์ มีหน่วย V

$K$  คือค่าคงที่ของมอเตอร์ มีหน่วย V/A·rad/s

$I_f$  คือกระแสสนาม (Field current) มีหน่วย A

$I_a$  คือกระแสอาร์เมเจอร์ (Armature current) มีหน่วย A

$\omega$  คือความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ มีหน่วย rad/s

$R_a$  คือความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ มีหน่วย  $\Omega$

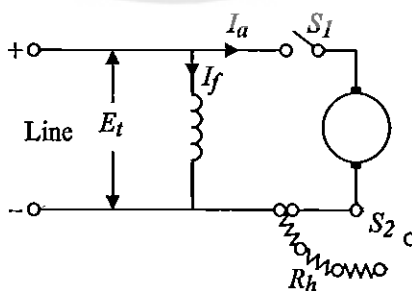
$T_d$  คือแรงบิด (Developed torque) มีหน่วย N·m

$T_L$  คือแรงบิดโหลด (Load torque) มีหน่วย N·m

$B$  คือค่าคงที่แรงเสียดทาน มีหน่วย N·m/rad/s

### 2.4.3 คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

กำลังงานที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายจะเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติเพื่อให้เหมาะกับโหลดทางกล จากรูป 2.14 ซึ่งแสดงถึงมอเตอร์แบบขนาน (Shunt motor) สมมติให้สวิตช์  $S_1$  อยู่ในตำแหน่งวงจรปิด และมอเตอร์กำลังหมุนด้วยความเร็วคงที่ขณะขับโหลดทางกลอย่างเช่นเครื่องกลึง ในโรงงาน แรงดัน  $E_t$  ที่จ่ายให้มอเตอร์จะถูกรักษาให้คงที่โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ ดังนั้นกระแส  $I_f$  จะคงที่รวมถึงฟลักซ์แม่เหล็กที่มันกำเนิดขึ้นมาก็คงที่ด้วย



รูปที่ 2.14 วงจรมอเตอร์แบบขนานที่มีสเตเตอร์อยู่ในวงจร

ถ้าโหลดทางกลของมอเตอร์เพิ่มขึ้น แรงบิดที่ขับโหลดที่เกิดจากกระแสอาร์เมเจอร์จะไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงบิดจากโหลดที่เพิ่มขึ้นมากขึ้น ทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง ขณะที่ความเร็ว

ลดลงจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนกลับ ( $E_b$ ) ลดลงด้วยเช่นกัน ทำให้กระแสจำนวนมากไหลเข้าขดลวดอาร์มเจอร์ยังส่งผลให้แรงบิดในการขับโหลดเพิ่มมากขึ้นตามสมการ  $T = K_t \phi I_a$  ดังนั้นแรงบิดขับโหลดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่มอเตอร์หมุนช้าลง และในที่สุดมอเตอร์จะหยุดหมุนช้าลงในทันทีที่แรงบิดขับโหลดไปมีค่าเท่ากับแรงบิดของโหลดรวมกับแรงเสียดทานที่สูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์

ถ้าโหลดทางกลของมอเตอร์ลดลง แรงบิดขับโหลดที่เกิดจากกระแสอาร์มเจอร์จะมีค่ามากขึ้นเพียงพอที่จะเอาชนะแรงบิดของโหลด ทำให้มอเตอร์เกิดความเร่ง หมุนเร็วขึ้น ขณะที่ความเร็วเพิ่มมากขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนกลับ ( $E_b$ ) เพิ่มมากขึ้นด้วย และทำให้กระแสอาร์มเจอร์  $I_a$  ลดลง ส่งผลให้มอเตอร์หยุดเพิ่มความเร็วกว่าและจะหมุนด้วยความเร็วคงที่รวมทั้งมีกระแสอาร์มเจอร์คงที่เมื่อแรงบิดขับโหลดตกลงเท่ากับค่าของแรงบิดของโหลด ค่ากำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายจึงเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติเพื่อให้พอดีกับโหลดของมอเตอร์ ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนกลับ ( $E_b$ ) ของมอเตอร์สามารถปรับกระแสได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อจะเริ่มเดินเครื่องจำเป็นต้องมีสเตรเตอร์(เป็นความต้านทานที่เปลี่ยนค่าไว้)สเตรเตอร์จะทำหน้าที่จำกัดกระแสตอนสเตรเตอร์ไม่ให้ไหลเข้ามอเตอร์มากเกินไป และจำกัดแรงบิดเริ่มหมุนไม่ให้สูงเกินไป ให้อยู่ในสถานะที่พอเหมาะไม่ทำให้เกิดการกระชากซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายกับระบบเกียร์ หรือสายพานได้ทั้งนี้เราจะพิจารณา

$$E_t = E_b + I_a R_a$$

และ

$$I_a = \frac{E_t - E_b}{R_a} \quad (2.10)$$

ในสมการที่ (2.10) ค่า  $R_a$  ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะน้อยมาก เช่น 0.12 หรือ 0.5 โอห์ม ในเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ปานกลางขณะที่เริ่มเดินเครื่อง มอเตอร์ยังไม่หมุน  $E_b = 0$  ( $N = 0$ ) จากสมการ (2.10) จะได้

$$I_a = \frac{E_t}{R_a}$$

ในกรณีนี้  $I_a$  จะมีค่ามาก เช่นถ้า  $E_t = 220$  โวลต์ และ  $R_a = 0.1$  โอห์ม

$$\text{จะได้ } I_a \text{ ตอนเริ่มเดิน} = \frac{220}{0.1} = 2,200 \text{ แอมป์}$$

ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก ค่าแรงบิดเริ่มหมุนที่สูงมากจะทำให้เกิดการกระชาก และทำให้อุปกรณ์ป้องกันเช่น ฟิวส์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรได้ ถ้าหากไม่มีการแก้ไขจะทำให้โหลดที่ต่ออยู่รวมทั้งคอมมิวเตเตอร์เกิดความเสียหายได้ เราจึงจำเป็นต้องหาความต้านทาน  $R_s$  มาต่อ

อนุกรมกับวงจรอาร์มเจอร์ ดังรูป 2.14 เป็นผลทำให้วงจรอาร์มเจอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 3.0 เท่าของกระแสมอเตอร์ที่ความต้านทานที่นำมาค่อนี้เรียกว่าสเตเตอร์ซึ่งจะสามารถปลดค่าที่ขึงได้เป็นลำดับจนกระทั่งค่า  $R_s$  เป็นศูนย์ มอเตอร์จึงทำงานตามปกติได้ ซึ่งจะทำให้ได้กระแสขณะเริ่มเดินเป็น

$$I_{start} = \frac{E_t}{R_a + R_s}$$

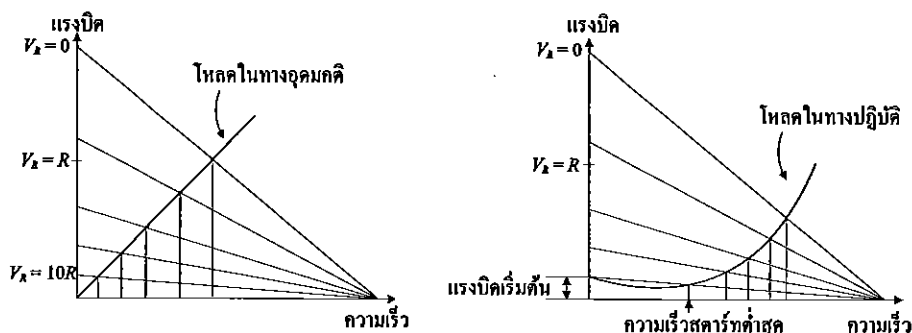
โดย  $R_s$  คือค่าความต้านทานขณะเริ่มหมุนดังรูปที่ 2.14

#### 2.4.4 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1) การควบคุมแบบปรับค่าได้ เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดของการควบคุมมอเตอร์คือใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้อนุกรมกับมอเตอร์ โดยกำหนดให้ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ การบังคับแบบนี้ไม่มีประสิทธิภาพ เพราะกำลังไฟสูญเสียไปในตัวความต้านทาน มักนิยมใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กๆ ซึ่งการบังคับแบบนี้จะให้คุณสมบัติการสตาร์ทที่ดี (ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ) แต่จะให้ความเร็วที่สูงมากเมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะที่มีโหลดน้อยๆ ดังนั้นการบังคับแบบนี้มีประโยชน์เฉพาะสถานะที่แรงต้านคงที่ เช่น การบังคับความเร็วของเครื่องจักรเย็บผ้า เป็นต้น จะสามารถเขียนวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรมได้ดังรูปที่ 2.15 และค่าที่ได้จากวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรมจะแสดงกราฟได้ดังรูปที่ 2.16

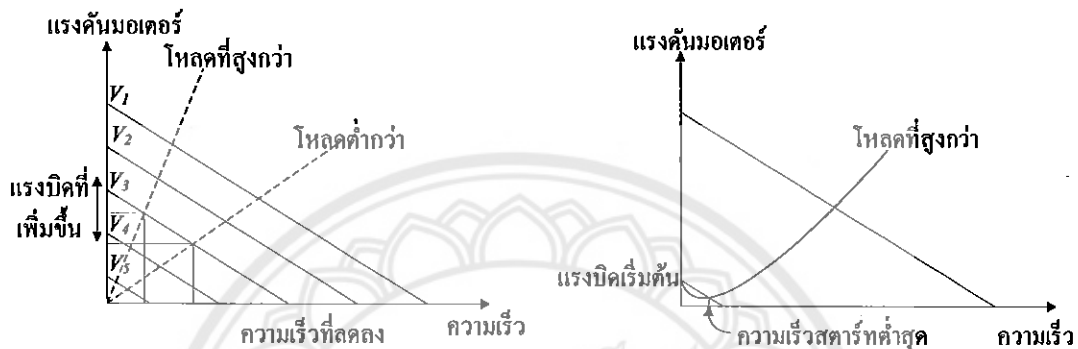


รูปที่ 2.15 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม



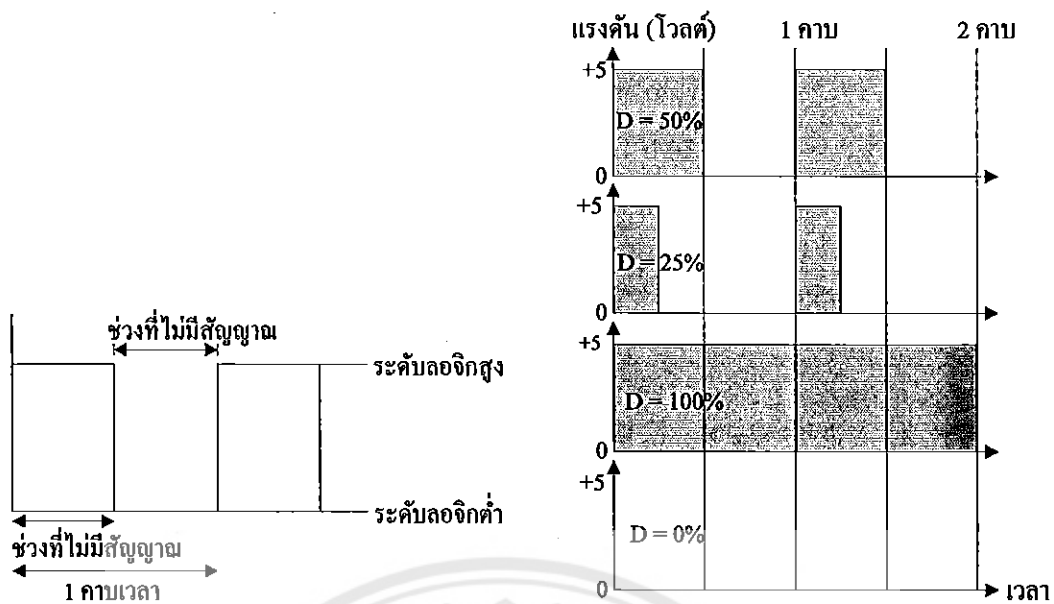
รูปที่ 2.16 กราฟคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม

2) การควบคุมด้วยวิธีเปลี่ยนค่าแรงดัน วิธีการนี้ดีกว่าวิธีการแรกแต่จะซับซ้อนกว่าที่ต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อัตราขยายแบบกำลังสูงและมอเตอร์จะถูกป้อนด้วยแรงดันที่เปลี่ยนแปลงค่าได้จากแหล่งจ่ายที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ข้อดีของการควบคุมวิธีนี้คือถ้าความเร็วลดลงจากผลของแรงบิดแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาระดับความเร็ว ส่วนข้อเสียจากการควบคุมวิธีนี้คือเมื่อมอเตอร์มีความเร็วต่ำแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีค่าต่ำเช่นกัน จะแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟคุณสมบัติของการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงโดยการเปลี่ยนค่าแรงดัน

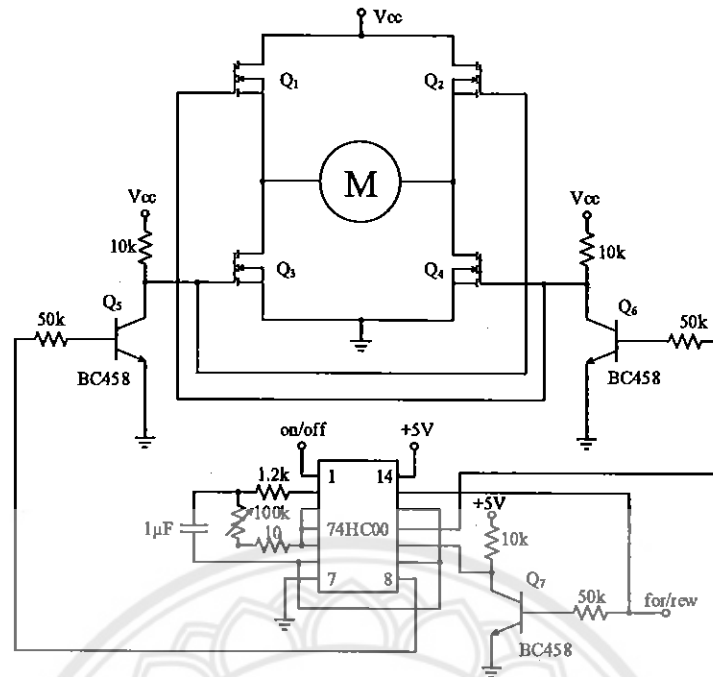
3) การควบคุมแบบการปรับความกว้างของพัลส์ (PWM : pulse width modulation) ก็คือการมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ การปรับความกว้างของพัลส์จะเป็นการปรับเปลี่ยนที่สัดส่วนและความกว้างของสัญญาณพัลส์ โดยความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่าของดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) นั่นเองซึ่งค่าของดิวตี้ไซเคิลคือช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูง โดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ก็หมายถึงใน 1 รูปสัญญาณพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ครึ่งหนึ่งและสถานะลอจิกต่ำอยู่ครึ่งหนึ่งและในทำนองเดียวกัน ถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่ามาก หมายความว่าความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีความกว้างมากขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 หากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ซึ่งก็หมายความว่าไม่มีสถานะลอจิกต่ำเลย



รูปที่ 2.18 ความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าคิวตี้ไซเคิลของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่

#### 2.4.5 วงจรขับมอเตอร์

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือการทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนสามารถทำได้โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วสูงสุดภายใต้สภาวะที่มอเตอร์รับภาระอยู่ในขณะนั้น ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางก็ทำได้โดยการกลับขั้วของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในกรณีที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มหรือลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งการควบคุมแบบการปรับความกว้างของพัลส์เป็นวิธีที่นิยมมากในการเพิ่มหรือลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจะเปลี่ยนไปตามความกว้างของพัลส์ ตัวอย่างวงจรควบคุมมอเตอร์แบบการปรับความกว้างของพัลส์ที่ใช้กลับทิศการหมุนได้แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรควบคุมมอเตอร์แบบการปรับความกว้างของพัลส์ที่ใช้กลับทิศทางหมุนได้

วงจรควบคุมมอเตอร์ที่แสดงด้านบนนี้สามารถควบคุมทั้งความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ วงจรนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำหน้าที่ขับมอเตอร์ และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุม

ส่วนที่ทำหน้าที่ขับมอเตอร์ประกอบด้วยมอสเฟต (Q1 – Q4) และทรานซิสเตอร์ (Q5 – Q6) มอสเฟต (Q1 – Q4) ถูกต่อแบบบริดจ์เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านมอเตอร์สามารถกลับทิศทางได้ เมื่อ Q1 และ Q4 นำกระแสไฟฟ้าจะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางหนึ่งและมอเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้ามถ้า Q2 และ Q3 นำกระแสไฟฟ้า ทรานซิสเตอร์ (Q5 – Q6) จะทำหน้าที่ขับมอสเฟต โดยทรานซิสเตอร์ Q5 ขับมอสเฟต Q2 กับ Q3 ในขณะที่มอสเฟต Q1 กับ Q4 จะถูกขับด้วยทรานซิสเตอร์ Q6 ข้อห้ามของวงจรบริดจ์คืออย่าให้ Q1 กับ Q3 หรือ Q2 กับ Q4 นำกระแสพร้อมกันเพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรและมอสเฟตอาจจะเสียหายได้

ดังนั้นในการออกแบบส่วนควบคุมจึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรป้องกันการลัดวงจรของมอสเฟตด้วย วงจรส่วนควบคุมนั้นมี IC 74HC00 เป็นส่วนประกอบสำคัญ ทรานซิสเตอร์ Q5 จะต่อเป็นวงจรขยายแบบกลับเฟสเพื่อคอยกลับสัญญาณควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจะเป็นการป้องกันไม่ให้ออสเฟต (Q1 – Q4) นำกระแสพร้อมกันด้วย IC 74HC00 ตัวต้านทานปรับค่าได้และตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ผลิตพัลส์ โดยที่ความถี่และความกว้างของพัลส์จะขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทานปรับค่าได้และค่าของตัวเก็บประจุ

ดังนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับค่าของตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ จากวงจรรูปที่ 2.19 นี้ การควบคุมให้มอเตอร์หมุนหรือหยุดหมุนทำได้โดยการให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขา 1 ของ IC 74HC00 ถ้าขา 1 ของ IC 74HC00 ได้รับระดับแรงดันเป็น 0 โวลต์ มอเตอร์จะหยุดหมุนและมอเตอร์จะหมุนเมื่อขา 1 ของ IC 74HC00 ได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ +5 โวลต์

สำหรับการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์นั้นทำได้โดยการให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขา 13 ของ IC 74HC00 ถ้าขา 13 ของ IC 74HC00 ได้รับระดับแรงดันเป็น +5 โวลต์ มอเตอร์จะหมุนในทิศทางหนึ่งและมอเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้ามถ้าขา 13 ของ IC 74HC00 ได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 0 โวลต์

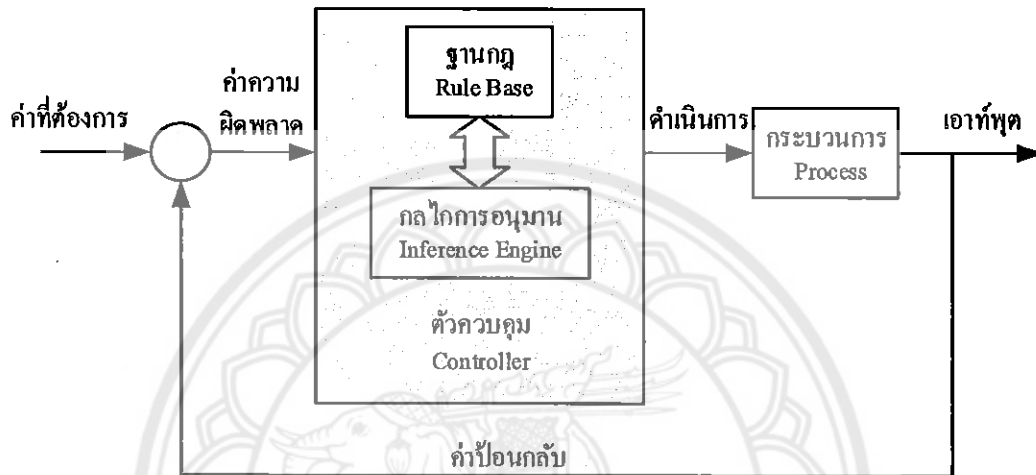
จุดอ่อนของวงจรควบคุมมอเตอร์นี้คือความเร็วรอบของมอเตอร์จะไม่คงที่ถ้าโหลดที่ให้กับมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยใช้หลักการควบคุมมอเตอร์แบบวงรอบปิด (close loop control system)

## 2.5 ตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic)

ตัวควบคุมแบบฟัซซีได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่นเครื่องซักผ้า กล้องวิดีโอ หม้อหุงข้าว ตู้เย็น รวมไปถึงกระบวนการในอุตสาหกรรมแบบต่างๆ ตัวควบคุมแบบฟัซซีใช้หลักของฟัซซีลอจิกในการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ โดยที่ตัวของฟัซซีลอจิกเองสามารถคำนวณด้วยคำพูดแทนตัวเลข เช่น “มากขึ้นนิด” หรือ “ลดลงหน่อย” ไม่ใช่ “มากขึ้น 10” หรือ “ลดลง 5.2” เป็นต้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถควบคุมด้วยประโยคแทนที่จะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ เช่น “อินพุตกำลังลดลงให้ปรับเอาท์พุตให้มากขึ้นหน่อย” ไม่ใช่ “อินพุตมีค่าเท่ากับ 2 ให้ปรับเอาท์พุตเท่ากับ 7” จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีมีลักษณะของการใช้ฐานกฎ (rule base) ที่มาจากการควบคุมด้วยคนจริงๆ ได้ ตัวควบคุมแบบนี้จึงมีประโยชน์มากในการประยุกต์ใช้กับงานเชิงปฏิบัติการจริงด้วยผู้เชี่ยวชาญ กลยุทธ์ในการควบคุมจะอยู่ในรูปแบบภาษาธรรมชาติ เหมือนที่ผู้ควบคุมใช้พูดสั่งงาน กฎต่างๆ ที่ใช้จึงต้องถูกคัดแยกออกจากส่วนที่เป็นสมการคณิตศาสตร์ ตัวควบคุมแบบฟัซซีมีรูปแบบการใช้งานหลายรูปแบบดังนี้

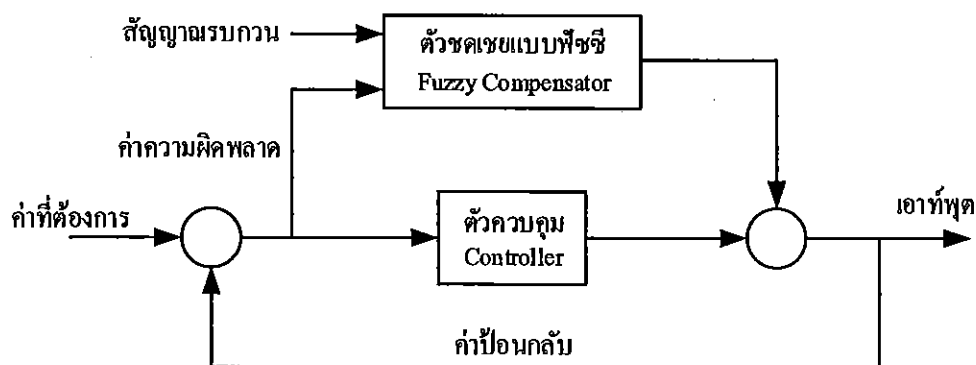


1) การควบคุมโดยตรง (direct control) ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่เป็นการควบคุมโดยตรงนี้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีจะอยู่ในส่วนหน้าก่อนที่จะเอาต์พุตจะถูกป้อนกลับ เอาต์พุตที่ได้จากกระบวนการจะถูกเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ตั้งไว้ ถ้ามีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น นั่นคือเอาต์พุตไม่ตรงหรือไม่สอดคล้องกับค่าอินพุตที่ต้องการ ตัวควบคุมจะดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งตามกฎวิธีที่กำหนดหรือที่ได้ออกแบบไว้ในตัวควบคุม ตัวควบคุมแบบฟัซซีในรูปนี้ถูกใช้แทนตัวควบคุมแบบ PID แบบดั้งเดิม



รูปที่ 2.20 การควบคุมโดยตรง

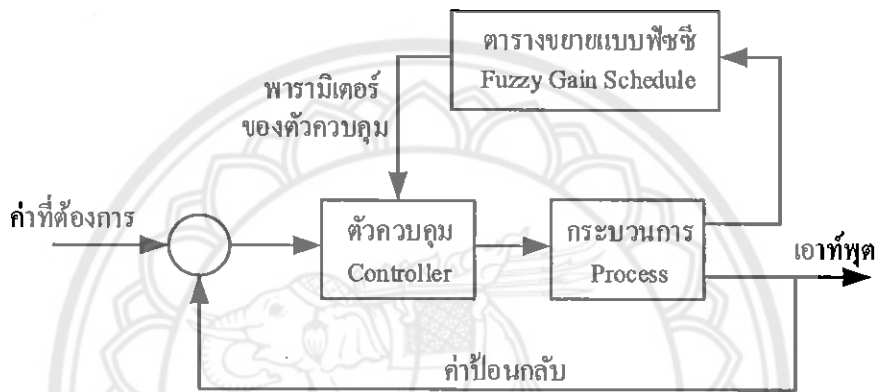
2) การควบคุมแบบไปข้างหน้า (feedforward control) การนำเอาฟัซซีลอจิกมาเป็นตัวชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในการควบคุมแบบไปข้างหน้า สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.21 ตัวชดเชยแบบฟัซซีใช้สัญญาณรบกวนเป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าจะทำการชดเชยให้กับตัวควบคุมขนาดไหน ตัวควบคุมในระบบอาจจะเป็นตัวควบคุม PID แบบเชิงเส้น ในขณะที่ตัวชดเชยแบบฟัซซีจะทำการชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.21 การควบคุมแบบไปข้างหน้า



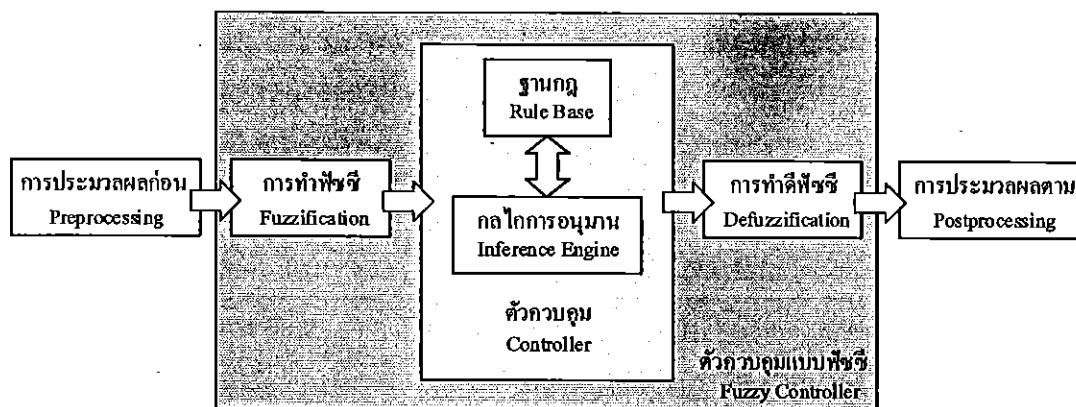
3) การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว (parameter adaptive control) ในกรณีทีระบบไม่เป็นเชิงเส้นมีจุดทำงานเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นที่ตั้งไว้ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมสามารถถูกปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับจุดทำงานใหม่ได้ด้วยการจัดการตารางการขยายแบบฟัซซี (fuzzy gain scheduling) ตัวควบคุมที่มีการจัดการตารางการขยายแบบฟัซซีจะประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ซึ่งมีค่าของพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากจุดทำงานเดิม อินพุตที่วัดจากตัวตรวจจับจะถูกใช้เป็นตัวแปรการจัดการตาราง (scheduling variable) ที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเดิม การปรับค่าดังกล่าวจะอยู่ในรูปของตารางค้นหา (look-up table) รูปที่ 2.22 แสดงแผนผังทั่วไปของการควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวแบบฟัซซี



รูปที่ 2.22 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว

### 2.5.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมเชิงเส้นซึ่งมีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นจะต้องทำการคำนวณเหมือนกับวิธีราก-โพลัส (root locus) วิธีผลตอบสนองความถี่ (frequency response) หรือวิธีวางตำแหน่งโพล (pole placement) กฎที่ใช้ในตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถไม่เป็นเชิงเส้นได้ รูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซี องค์ประกอบในการประมวลผลก่อนและหลังเป็นการปรับสภาพอินพุตและเอาต์พุตที่จะใช้กับตัวควบคุมแบบฟัซซีให้มีความเหมาะสม ซึ่งรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.23 โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี่

1) การประมวลผลก่อน (preprocessing) เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการเตรียมอินพุตจากโลกจริงให้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับตัวควบคุมในโลกของฟัซซี่ โดยปกติแล้วอินพุตของระบบจะเป็นค่าเชิงตัวเลขที่วัดหรือออกมาจากเครื่องมือวัดต่างๆ และไม่ได้มีค่าในรูปภาษา จึงจำเป็นจะต้องมีการประมวลผลก่อนเพื่อปรับค่าอินพุตเหล่านี้ให้มีความเหมาะสม ตัวอย่างของการประมวลผลก่อน เช่น แปลงค่าจากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานในย่านเฉพาะที่ต้องการ กรองหรือกำจัดสัญญาณรบกวน ค้นหาหาค่าอนุพันธ์หรือปริพันธ์

ขั้นตอนการประมวลผลก่อนมีผลต่อประสิทธิภาพหรือการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซี่โดยตรง ค่าสัญญาณดิจิทัลที่ละเอียดจะทำให้ตัวควบคุมทำงานได้อย่างราบเรียบกว่าค่าที่หยาบ การปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานอาจส่งผลกระทบต่อข้อกำหนดตัวแปรในระบบฟัซซี่ได้

2) การทำฟัซซี่ (fuzzification) ค่าอินพุตที่ได้จากการประมวลผลก่อนจะถูกแปลงให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันสมาชิกต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบ แล้วทำการรวมผลลัพธ์ของอินพุตนั้นตามเงื่อนไขที่ถูกรวบรวมไว้

3) ฐานกฎ (rule base) กฎในระบบฟัซซี่ถือเป็นหัวใจในการดำเนินการควบคุม กฎดังกล่าวสามารถมาจากเงื่อนไขที่หลากหลาย รวมไปถึงสามารถให้ผลลัพธ์ที่มากกว่าหนึ่งผลลัพธ์ได้ ตัวควบคุมที่มีอินพุตและเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งจะเรียกว่า MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) ในขณะที่ตัวควบคุมที่มีเพียงหนึ่งอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตจะเรียกว่า SISO (Single-Input Single-Output) ซึ่งโดยปกติแล้วระบบที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตจะทำการควบคุมสัญญาณค่าความผิดพลาดเพียงอย่างเดียว แนวคิดของการใช้ฐานกฎในฟัซซี่ลอจิกทำให้ระบบที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของมนุษย์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง

4) กลไกการอนุมาน (inference engine) กฎต่างๆที่กำหนดไว้จะถูกอนุมานเป็นผลลัพธ์ในการตัดสินใจของระบบ เมื่อระบบตัดสินใจได้แล้ว การดำเนินการที่สอดคล้องกับการตัดสินใจนั้นก็จะดำเนินต่อไป ยกตัวอย่างเช่น ระบบตรวจจับได้ว่าอุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ที่ 1 กำลัง “ร้อนขึ้น” อย่าง “รวดเร็ว” ระบบจะทำการพิจารณาค่าอินพุตพร้อมกับตรวจสอบกับกฎการทำงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวแล้วทำการอนุมานหรือตัดสินใจว่าจะทำการเปิดเครื่องทำความเย็น “แรงที่สุด” เป็นต้น ผลลัพธ์การตัดสินใจที่ได้ยังคงอยู่ในเทอมของค่าเชิงภาษาที่ซึ่งจะถูกแปลงเป็นค่าที่ใช้งานจริงด้วยขั้นตอนต่อไป

5) การทำให้ฟัซซี (defuzzification) ผลลัพธ์เชิงภาษาที่ได้จากกลไกการอนุมานจะอยู่ในรูป เช่น เปิดเครื่องทำความเย็น “แรงที่สุด” หรือลดเครื่องทำความร้อน “ลงพอประมาณ” ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับการทำงานจริงของระบบ เช่น เปิดเครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

6) การประมวลผลตาม (postprocessing) เอาท์พุตที่ได้จากระบบอาจจะต้องถูกปรับให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการทำให้เป็นบรรทัดฐานในย่านที่ใช้งานจริง เช่น แปลงค่า 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์เป็นแรงดันขนาด -5 ถึง +5 โวลต์ สำหรับควบคุมให้เครื่องทำความเย็นเปิดปิดตามปริมาณที่ต้องการ

### 2.5.2 กฎของฟัซซี (Fuzzy rule)

กฎของฟัซซีเป็นวิธีการนำเอาความรู้ของมนุษย์มาใส่ในระบบฟัซซีลอจิก กฎของฟัซซีคือกลุ่มของประโยคเงื่อนไข ถ้า-แล้ว (IF - THEN) ในรูปแบบต่อไปนี้

IF	x is A
THEN	y is B
หรือ	ถ้า x เท่ากับ A
	แล้ว y เท่ากับ B

โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นตัวแปรภาษาและ  $A$  กับ  $B$  เป็นค่าเชิงภาษา โดยปกติแล้วกฎของฟัซซีจะครอบคลุมค่าของตัวแปรที่อยู่ในส่วนเงื่อนไข IF ยกตัวอย่างเช่น ระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าของตัวแปรอุณหภูมิที่เป็นไปได้คือ “เย็น” “กำลังดี” และ “ร้อน” ดังนั้นเงื่อนไขของฟัซซีที่ครอบคลุมค่าดังกล่าวจะเป็น

กฎ 1 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ เย็น

แล้ว เฮอร์ฟุต เป็น ให้ความร้อน

กฎ 2 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ ร้อน

แล้ว เฮอร์ฟุต เป็น ให้ความเย็น

กฎ 3 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ กำลังดี

แล้ว เฮอร์ฟุต เป็น ไม่เปลี่ยนแปลง

กฎของฟัซซีประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือส่วน “ถ้า” (IF) และส่วน “แล้ว” (THEN) ในทฤษฎีเดิม เมื่อค่าเงื่อนไขใน “ถ้า” เป็นจริง ส่วน “แล้ว” จะถูกประเมิน แต่ในทฤษฎีฟัซซี ค่าเงื่อนไขใน “ถ้า” จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน “แล้ว” จะถูกประเมินค่าด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้นๆ และค่าเงื่อนไขในส่วนของ “ถ้า” กับในส่วนของ “แล้ว” สามารถมีได้หลายค่า ดังรูปแบบต่อไปนี้

ถ้า  $x$  เท่ากับ  $A$  และ  $y$  เท่ากับ  $B$  หรือ  $z$  เท่ากับ  $C$

แล้ว  $p$  เท่ากับ  $D$  และ  $q$  เท่ากับ  $E$

ทุกเงื่อนไขใน “ถ้า” จะถูกประเมินพร้อมๆกันและรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต เช่น แอนด์ (AND) หรือ ออร์ (OR) โดยปกติแล้วจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไป โดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้นเนื่องจากจะทำให้เพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบกฎของฟัซซี เพราะบางกฎอาจไม่สามารถมีโอกาสเกิดได้ จะสังเกตว่าจำนวนเงื่อนไขจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรภายในระบบ

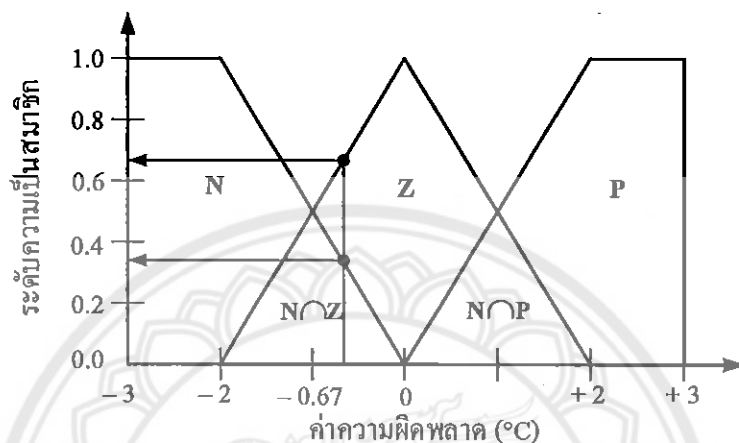
### 2.5.3 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (Mamdani-style inference)

การอนุมานฟัซซีสามารถนิยามว่าเป็นการส่งค่า (mapping) จากค่าอินพุตของระบบไปยัง เฮอร์ฟุต โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีมีอยู่ 2 วิธีที่นิยมใช้คือ แบบแมมดานี (Mamdani) และแบบซุกิโน (Sugeno) โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการออกแบบดังจะแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

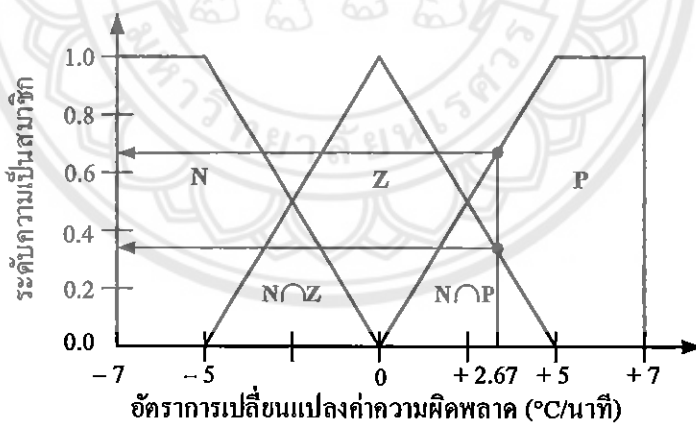
การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานีประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือการทำให้ฟัซซี การประเมินกฎของฟัซซี การรวมกฎและการทำดีฟัซซี

1) การทำให้ฟัซซี (fuzzification) คือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องหาค่าระดับความเป็น

สมาชิกของเซตของตัวแปรอินพุต ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ระบบจะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข จากนั้นค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่าต่างๆ จะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก การทำฟัซซีของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟัซซีด้วยเนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่งๆ จะมีผลต่อกฎของฟัซซีบางข้อเท่านั้น พิจารณาการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตจากรูปที่ 2.24 และรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่  $-0.67^{\circ}\text{C}$  จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ลบ” เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.62



รูปที่ 2.25 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่  $+2.67^{\circ}\text{C/นาที}$  ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.35 และระดับความเป็นสมาชิกของ “บวก” เท่ากับ 0.64

จากค่าความผิดพลาดที่  $-0.67^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ทั้งในเซต N (เซต “ลบ”) และเซต Z (เซต “ศูนย์”) หมายความว่าสำหรับฟังก์ชันสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่กำหนดคือค่า  $-0.67^{\circ}\text{C}$  มีทั้งความเป็นลบและความเป็นศูนย์โดยที่มีระดับความเป็นสมาชิกของเซต N เท่ากับ 0.36 และมีระดับความเป็นสมาชิกของเซต Z เท่ากับ 0.62 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดเป็นสมาชิกของทั้ง

ความเป็นลบและความเป็นศูนย์แต่มีระดับความเป็นศูนย์มากกว่าความเป็นลบ เช่นเดียวกับอัตรา  
การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่  $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$  ซึ่งจากฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนด ค่านี้มีทั้ง  
ความเป็นศูนย์และความเป็นบวกคือเป็นค่าที่อยู่ทั้งในเซต Z และเซต P ด้วยค่าระดับความเป็น  
สมาชิกเท่ากับ 0.35 และ 0.64 ตามลำดับ ซึ่งค่าระดับความเป็นสมาชิกบ่งบอกว่าอัตราการ  
เปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด  $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$  มีความเป็นบวกมากกว่าความเป็นศูนย์ สรุปค่า  
ระดับความเป็นสมาชิกของทั้งสองอินพุตในรูปฟังก์ชันสมาชิกได้ดังนี้

$$\mu(\text{ค่าความผิดพลาด} = N)(-0.67) = 0.36$$

$$\mu(\text{ค่าความผิดพลาด} = Z)(-0.67) = 0.62$$

$$\mu(\text{ค่าความผิดพลาด} = P)(-0.67) = 0.00$$

$$\mu(\text{ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด} = N)(2.67) = 0.00$$

$$\mu(\text{ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด} = Z)(2.67) = 0.35$$

$$\mu(\text{ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด} = P)(2.67) = 0.64$$

2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) หลังจากคำนวณหาค่าระดับความ  
เป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้โดยใช้กฎ  
ของฟัซซี การประเมินค่ากฎจะเป็นส่วนของ “ถ้า” โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่า  
ถ้าเงื่อนไขจากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องถูกกระทำในส่วนของ “แล้ว” ซึ่งอาจจะมียกกฎในเงื่อนไข  
ดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อมๆ กันได้เนื่องจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่งเช่นที่กล่าวมาแล้วคือ  
ค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูก  
ประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซต เช่น แอนด์และออร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลข  
ที่สามารถนำไปประเมินค่าในส่วน “แล้ว” ที่ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความ  
เป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป พิจารณาตัวกระทำการออร์จากทฤษฎีเซตจะได้ว่า

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.11)$$

ตัวกระทำออร์สามารถนิยามได้หลายอย่าง เช่น ตัวกระทำออร์ในกล่องเครื่องมือฟัซซี  
ลอจิกในแมทแลป (MATLAB Fuzzy Logic Toolbox) จะมีทั้งการใช้ฟังก์ชัน max และฟังก์ชันทาง  
สถิติที่เรียกว่า probor หรือผลรวมเชิงพีชคณิต (algebraic sum) ดังนี้

$$\begin{aligned} \mu_{A \cup B}(x) &= \text{probor}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \\ &= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x) \end{aligned} \quad (2.12)$$

เช่นเดียวกับตัวกระทำแอนด์ ในกล่องเครื่องมือฟัซซีลอจิกในแมทแลปมีทั้งการ  
ใช้ฟังก์ชัน min และฟังก์ชันผลคูณ prod ดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.13)$$

หรือ

$$\begin{aligned}\mu_{A \cap B}(x) &= \text{prod} [\mu_A(x), \mu_B(x)] \\ &= \mu_A(x) \times \mu_B(x)\end{aligned}\quad (2.14)$$

ในบางกรณีการใช้ฟังก์ชันของตัวกระทำของเซตที่แตกต่างกันอาจจะให้ผลเชิงตัวเลขที่แตกต่างกันได้ หลังจากประเมินค่าของแต่ละเงื่อนไขและรวมเงื่อนไขในกรณีที่มีมากกว่าหนึ่งเงื่อนไขในส่วนของ “ถ้า” แล้ว ผลที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลว่ากฎข้อใดที่ต้องถูกพิจารณาในส่วน “แล้ว” ต่อไป พิจารณาตัวอย่างระบบควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีกฎของฟิชชีทั้งหมด 9 ข้อ เงื่อนไขของอินพุตตัวที่หนึ่งได้แก่ ค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $-0.67^\circ\text{C}$  ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ N และ Z ที่ไม่เท่ากับศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวมีค่ามากกว่าศูนย์และอยู่ในส่วน “ถ้า” ของกฎข้อที่ 1 2 4 5 7 และ 8 ในขณะที่เงื่อนไขของอินพุตตัวที่สองได้แก่อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $+2.67^\circ\text{C/นาท}$  ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ Z และ P ที่ไม่เท่ากับศูนย์และอยู่ในส่วนของ “ถ้า” ของกฎข้อที่ 4 5 6 7 8 และ 9 เมื่อทำการแอนด์โดยใช้ฟังก์ชัน  $\min$  กับเงื่อนไขทั้งสองแล้วจะได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองที่มีค่าไม่เป็นศูนย์คือเงื่อนไขในข้อ 4 5 7 และ 8 กฎของฟิชชีทั้ง 9 ข้อเขียนได้ดังนี้

1) IF (ค่าผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = N) THEN  
เอาท์พุต = C

IF (0.36 AND 0.00) = 0.00 THEN เอาท์พุต = C

2) IF (ค่าผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = N) THEN  
เอาท์พุต = H

IF (0.62 AND 0.00) = 0.00 THEN เอาท์พุต = H

3) IF (ค่าผิดพลาด = P) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = N) THEN  
เอาท์พุต = H

IF (0.00 AND 0.00) = 0.00 THEN เอาท์พุต = H

4) IF (ค่าผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN  
เอาท์พุต = C

IF (0.36 AND 0.35) = 0.35 THEN เอาท์พุต = C

5) IF (ค่าผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN  
เอาท์พุต = NC

IF (0.62 AND 0.35) = 0.35 THEN เอาท์พุต = NC



6) IF (ค่าผิดพลาด = P) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN  
เอาต์พุต = H

IF (0.00 AND 0.35) = 0.00 THEN เอาต์พุต = H

7) IF (ค่าผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN  
เอาต์พุต = C

IF (0.36 AND 0.64) = 0.36 THEN เอาต์พุต = C

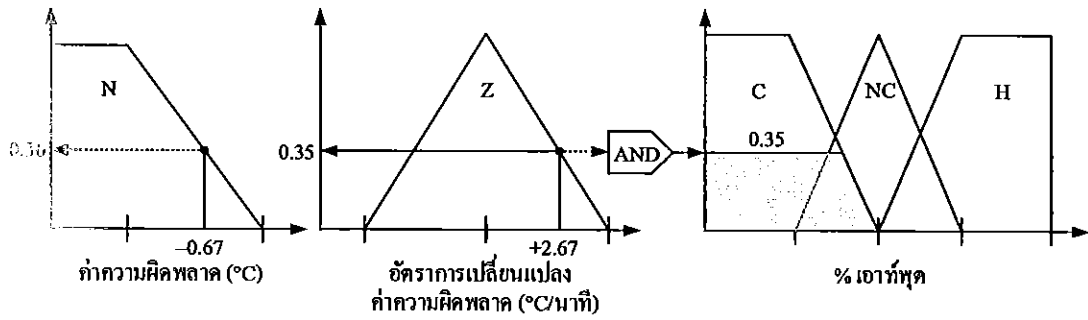
8) IF (ค่าผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN  
เอาต์พุต = C

IF (0.62 AND 0.64) = 0.62 THEN เอาต์พุต = C

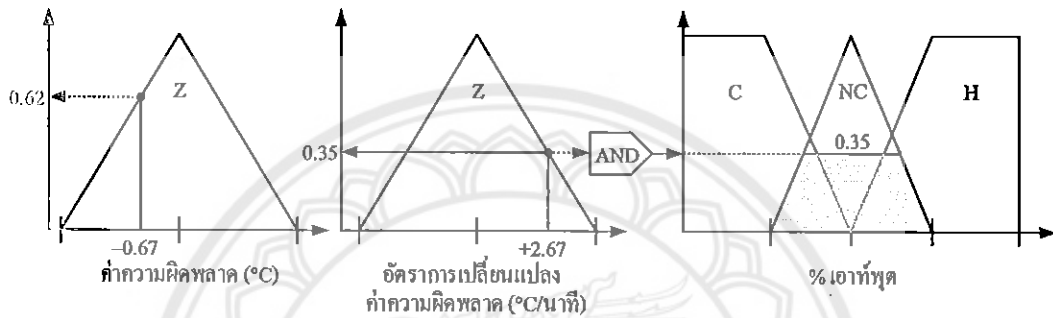
9) IF (ค่าผิดพลาด = P) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN  
เอาต์พุต = H

IF (0.00 AND 0.64) = 0.00 THEN เอาต์พุต = H

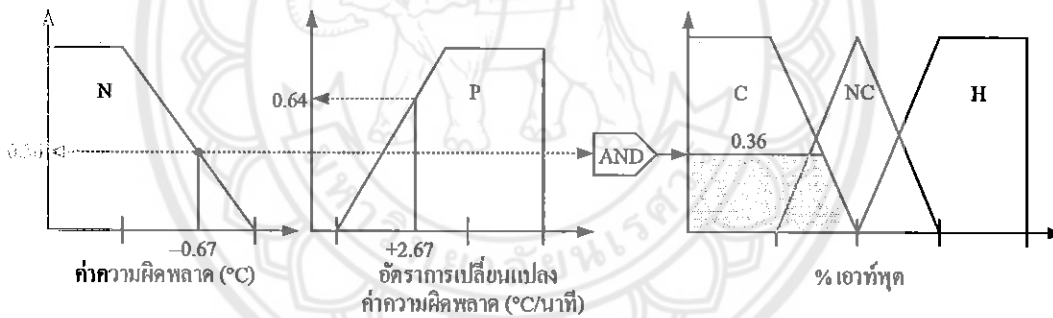
จากค่าผิดพลาดเท่ากับ  $-0.67^{\circ}\text{C}$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $+2.67^{\circ}\text{C/นาท}$ ี มีผลให้ส่วนของ “แล้ว” ซึ่งก็คือตัวแปรเอาต์พุตของกฎข้อ 4 5 7 และ 8 จะถูกประเมินค่าในขั้นตอนต่อไป ค่าระดับความเป็นสมาชิกจากเงื่อนไขอินพุตในส่วนของ “ถ้า” จะเป็น 1 เนื่องจากตัวแปรเอาต์พุตจะมีรูปร่างของระดับความเป็นสมาชิกอย่างไร โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 2.26



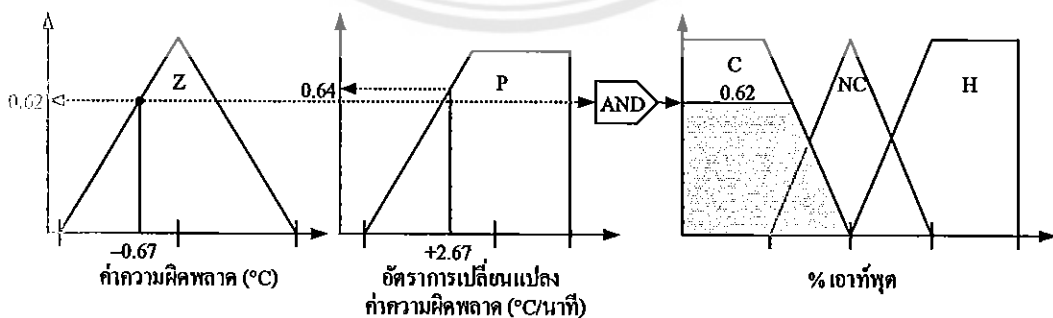
กฎ 4) IF (ค่าความผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN เออร์ทัต = C



กฎ 5) IF (ค่าความผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN เออร์ทัต = NC



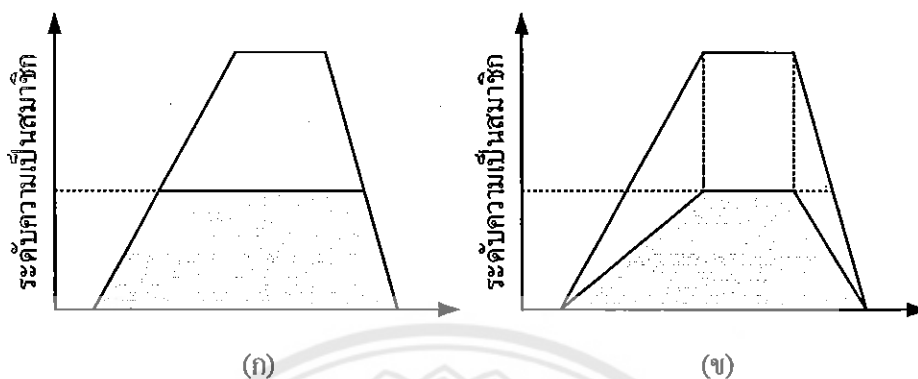
กฎ 7) IF (ค่าความผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN เออร์ทัต = C



กฎ 8) IF (ค่าความผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN เออร์ทัต = C

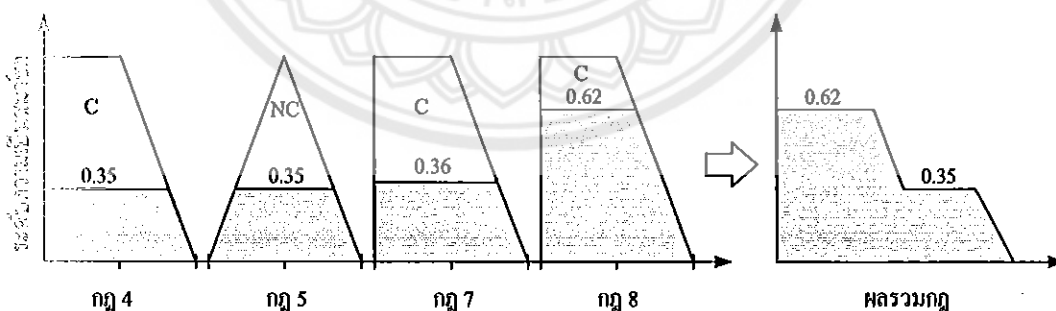
รูปที่ 2.26 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

ถึงแม้ว่าวิธีการตัดยอดเอาที่พุดจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลบางส่วน แต่เป็นวิธีที่เร็วและง่ายสำหรับการคำนวณรวมไปถึงการนำไปใช้ประมวลผลในขั้นตอนต่อไป รูปที่ 2.27 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตัดยอดและวิธีการปรับขนาด



รูปที่ 2.27 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด

3) การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (โดยวิธีการตัดยอดหรือการปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาที่พุด โดยการรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน รูปที่ 2.28 แสดงการรวมกฎจากระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $-0.67^{\circ}\text{C}$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $+2.67^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  โดยในขั้นถัดไปจะนำผลการรวมกฎนี้ไปแปลงเป็นค่าตัวเลขเดี่ยวเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผล



รูปที่ 2.28 ผลการรวมกฎของค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $-0.67^{\circ}\text{C}$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $+2.67^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$

4) การทำดีฟัซซี (defuzzification) จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ ค่าต่างๆ ในระบบเป็นค่าฟัซซี ไม่ว่าจะเป็นอินพุต กฎต่างๆ หรือเอาที่พุด แต่ค่าของเอาที่พุดจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้จริงเช่นค่าสัญญาณแรงดัน ค่าสัญญาณควบคุม เป็นต้น ซึ่งค่าเหล่านี้

ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซีได้เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายของเอาต์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (crisp value) การทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าของการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน

วิธีการทำดีฟัซซีมีหลายแบบ วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ค่าจุดศูนย์กลางถ่วงของฟัซซีเซต A ในช่วง [a, b] สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

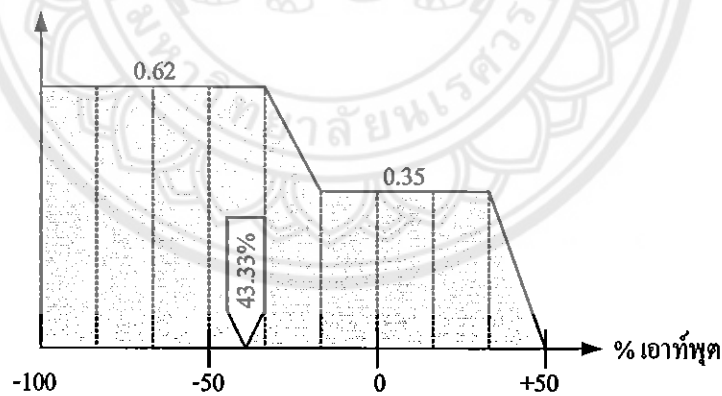
$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (2.15)$$

ในทางปฏิบัติการคำนวณค่าจุดศูนย์กลางถ่วงสามารถหาได้จากข้อมูลการชักตัวอย่างดังนี้

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x) x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \quad (2.16)$$

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 2.28 ค่าจุดศูนย์กลางถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$COG = \frac{[(-100 - 83.33 - 66.67 - 50 - 33.33) \times 0.62] + [(-16.67 + 0 + 16.67 + 33.33) \times 0.35]}{0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.35 + 0.35 + 0.35 + 0.35} = -43.33$$



รูปที่ 2.29 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วงของระบบควบคุมอุณหภูมิ

ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซีเท่ากับ -43.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าระบบต้องเปิดเครื่องทำความเย็นที่ระดับ 43.33 เปอร์เซ็นต์ การทำดีฟัซซีของระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถเห็นผลแสดงได้ดังในรูปที่ 2.29

## บทที่ 3

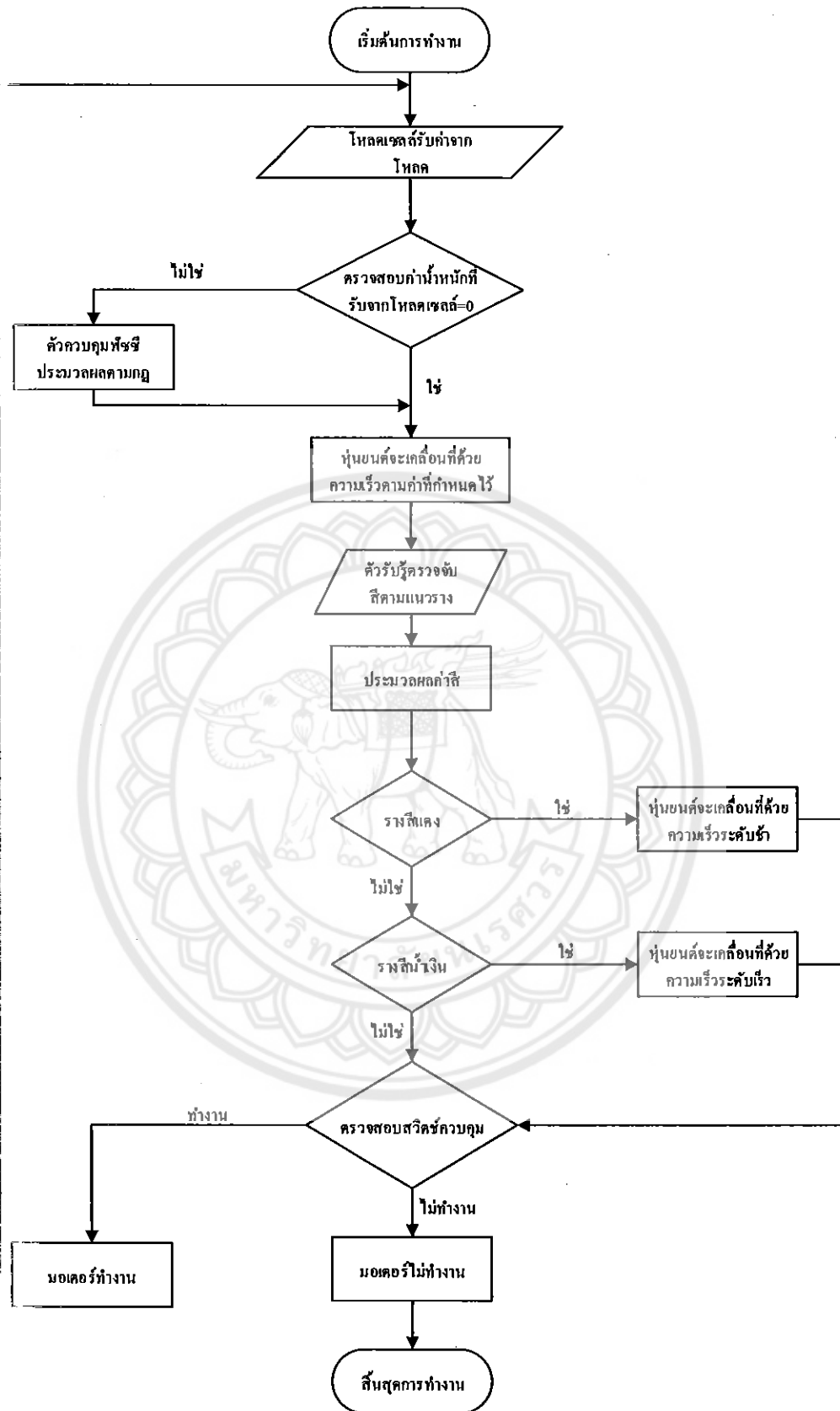
### วิธีดำเนินโครงการ

ในบทนี้จะรวบรวมการทำงานของวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรตัวรับรู้ วงจรขับมอเตอร์ และการทำงานของวงจร โดยรวมทั้งหมด

หลังจากศึกษาหลักการทํางานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 สามารถนำหลักการต่างๆ จากบทที่ 2 นำมาประยุกต์เพื่อสร้างหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีขั้นตอนและการดำเนินงานดังต่อไปนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการทํางานของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ระบบการทํางานของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกถือเป็นหัวใจหลักในการควบคุมการทํางานของหุ่นยนต์ให้สามารถทํางานได้ตามเงื่อนไขประสงค์ที่ตั้งไว้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งภายในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบควบคุมที่ต้องการให้มีความเร็วคงที่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการขนส่ง ดังนั้น หุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจึงได้มีการเรียงลำดับขั้นตอนในการทํางานของระบบควบคุมหุ่นยนต์ไว้ดังรูปที่ 3.1



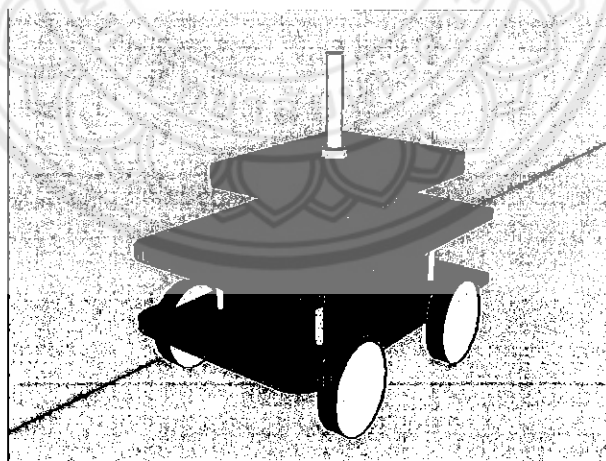
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็ว  
โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

จากรูปที่ 3.1 เมื่อเริ่มต้นการทำงานหุ่นยนต์จะรับค่าอินพุตเป็นน้ำหนักของโหลด จากนั้นนำค่าน้ำหนักอินพุตไปเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักเริ่มต้นที่ตั้งไว้ในระบบ ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ที่ระดับความเร็วปกติ แต่ถ้าน้ำหนักอินพุตไม่เท่ากับศูนย์ตัวควบคุมพีชชีจะทำการประมวลผลแล้วทำการเพิ่มหรือลดค่าความเร่งของหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วระดับปกติ จากนั้นตัวรับรู้ทำการตรวจจับค่าสีแล้วนำมาทำการประมวลผลค่าสี ถ้าสีอินพุตเป็นสีแดงหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วระดับช้า ถ้าสีอินพุตเป็นสีน้ำเงินหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วระดับเร็ว จากนั้นระบบจะทำการตรวจสอบสวิทช์ ถ้าสวิทช์อยู่ในสถานะทำงานมอเตอร์ของหุ่นยนต์จะทำงานแล้วหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยระดับความเร็วตามเงื่อนไขก่อนหน้าและทำการตรวจสอบน้ำหนักและประมวลผลค่าความเร็วต่อไปเรื่อยๆ ถ้าสวิทช์อยู่ในสถานะหยุดทำงานมอเตอร์ของหุ่นยนต์จะไม่ทำงานหุ่นยนต์จะไม่เคลื่อนที่ และทำให้ระบบสิ้นสุดการทำงาน

### 3.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิก

#### 3.2.1 ออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิก

ออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิก จะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ด้านล่างจะวางวงจรควบคุมและแบตเตอรี่ ส่วนที่ 2 ด้านบนใช้วาง โหลดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็ว โดยใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิก

### 3.2.2 โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็วเมื่อสร้างเสร็จ

ตัวโครงสร้างหุ่นยนต์ทำจากอะคริลิก โดยนำชิ้นส่วนอะคริลิกแต่ละชิ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน จากนั้นนำแผงวงจรควบคุมมาติดตั้งที่บริเวณชั้นล่าง ส่วนตัวโพลดเซลล์, แท่นใส่น้ำหนัก, แอลซีดีและจอแอลซีดีจะถูกติดตั้งที่ชั้นบน ส่วนตัวรับรู้อ่านค่าสีจะถูกติดตั้งบริเวณใต้ห้องของหุ่นยนต์ ส่วนตัวเข้ารหัสหรือเอ็นโค้ดเดอร์จะถูกติดตั้งบริเวณล้อของหุ่นยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



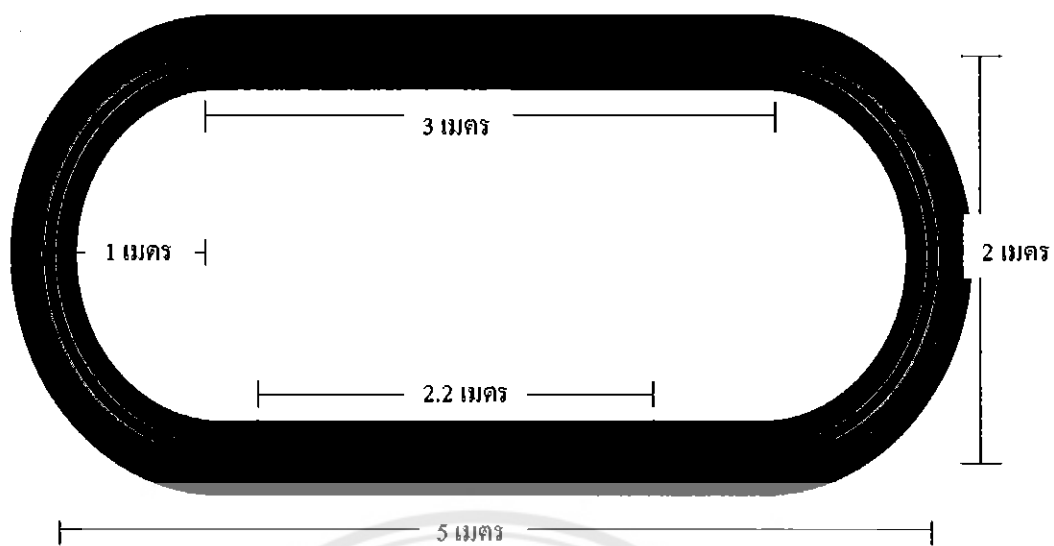
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว

- 1) ตัวโพลดเซลล์ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักและแท่นใส่น้ำหนัก
- 2) ชั้นวางวงจรควบคุมและแบตเตอรี่
- 3) ตัวรับรู้อ่านค่าสี
- 4) ตัวเข้ารหัสหรือเอ็นโค้ดเดอร์วัดความเร็วของหุ่นยนต์
- 5) จอแอลซีดีแสดงค่าน้ำหนักของโพลดและค่าความเร็วของหุ่นยนต์
- 6) ไดโอดเปล่งแสง

### 3.2.3 รางที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ออกแบบให้รางที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มีลักษณะเป็นวงปิด มีขนาดความยาว 5 เมตร ความกว้าง 2 เมตร และกำหนดแถบสีของรางเป็นสองแถบสีได้แก่ แถบสีแดงความยาว 2.2 เมตรและแถบสีน้ำเงินความยาว 3 เมตรดังแสดงในรูปที่ 3.4





รูปที่ 3.4 ขนาดของรางที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



รูปที่ 3.5 รางที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

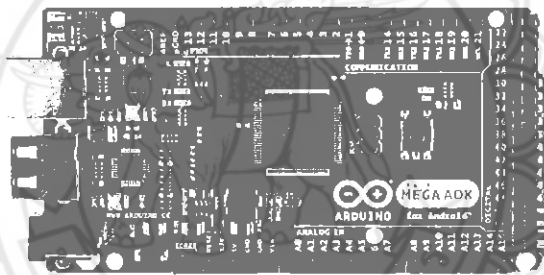
### 3.3 ออกแบบวงจรของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมพีซีลจิก

ส่วนประกอบที่เป็นวงจรของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วมีดังนี้

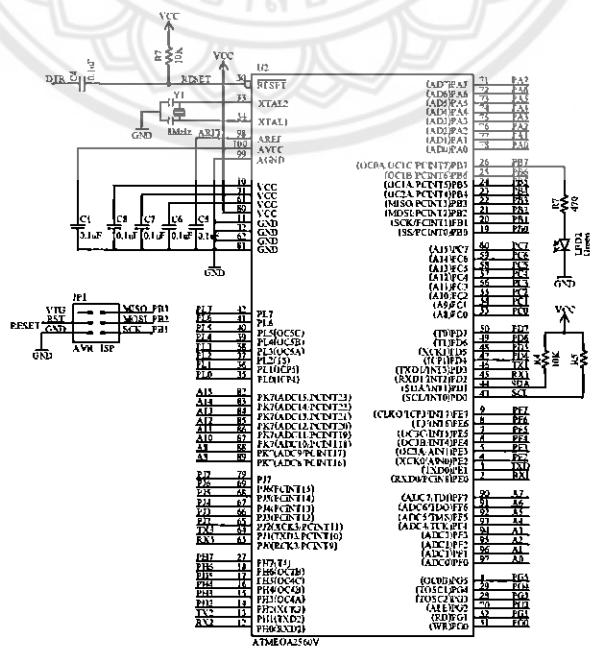
- 1) วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์
- 2) วงจรตัวรับรู้
- 3) มอเตอร์และวงจรขับมอเตอร์

### 3.3.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในโครงงานนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เนื่องจากเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาประยุกต์ในการใช้งานได้อย่างสะดวก ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่นำมาใช้คือไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560 ดังรูปที่ 3.6 เนื่องจากเป็นแพลตฟอร์มของอินพุต/เอาต์พุตขั้นพื้นฐานที่พอเพียงกับการใช้งานและการเรียนรู้โดยวงจรมีชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมพอร์ต อินพุต/เอาต์พุต ไม่ว่าจะเป็นพอร์ตดิจิทัล พอร์ตอนาล็อกพีดีบีเบิลยูเอ็มและพอร์ตอนุกรม ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับสัญญาณจากภายนอก และส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ตัวแผงวงจรออกแบบจากไมโครคอมพิวเตอร์ชิพเดี่ยว และมีโปรแกรมพัฒนาสำหรับเขียนโปรแกรมให้สามารถรับสัญญาณจากสวิทช์หรือตัวรับรู้และควบคุมหลอดไฟ มอเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่นๆ และสามารถทำงานได้อิสระหรือทำงานติดต่อกับโปรแกรมที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้



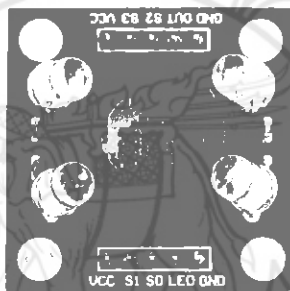
รูปที่ 3.6 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560



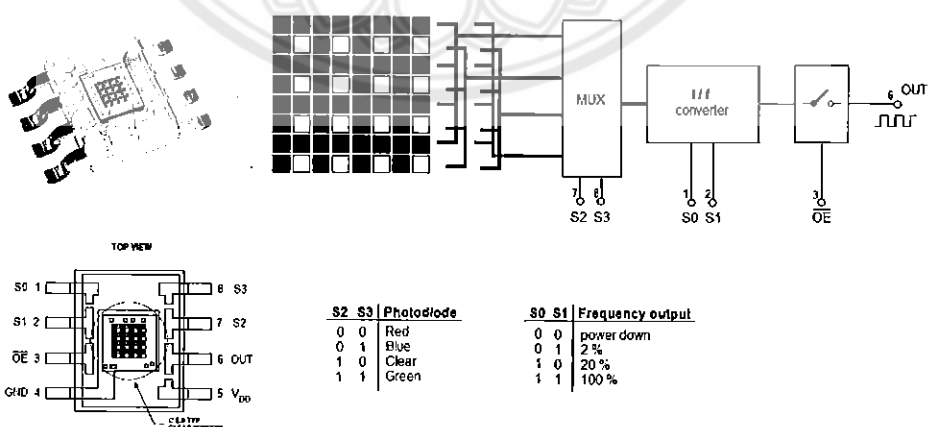
รูปที่ 3.7 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.3.2 วงจรตัวรับรู้

ตัวรับรู้ที่นำมาใช้ตรวจวัดค่าระดับความสว่างของสีคือแผงวงจรตัวรับรู้ TCS230 ดังรูปที่ 3.8 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถจะเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของสีที่มาตกกระทบตัวมัน ให้ออกมาเป็นสัญญาณความถี่เอาท์พุทสี่เหลี่ยม (Square wave) โดยมีค่าความถี่ไซเคิลเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความถี่เอาท์พุทดังกล่าวจะมีผลความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความสว่างของสีที่ มาตกกระทบกับตัวรับรู้ โดยโครงสร้างของ TCS230 จะประกอบไปด้วยโฟโต้ไดโอดขนาด 8x8 ตัว ซึ่งมีการจัดเรียงกันแบบอาร์เรย์โดยโฟโต้ไดโอดเหล่านี้จะแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกันคือ โฟโต้ ไดโอดที่มีฟิลเตอร์สีแดง, เขียว, น้ำเงิน และแบบไม่มีฟิลเตอร์ (Clear) ดังรูปที่ 3.9 จำนวนชุดละ 16 ตัว ซึ่งแต่ละกลุ่มก็จะตอบสนองต่อความสว่างของสีแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของฟิลเตอร์ นั้นๆ



รูปที่ 3.8 แผงวงจรตัวรับรู้ TCS230



รูปที่ 3.9 วงจรตัวรับรู้ TCS230

### 3.3.3 มอเตอร์และวงจรขับมอเตอร์

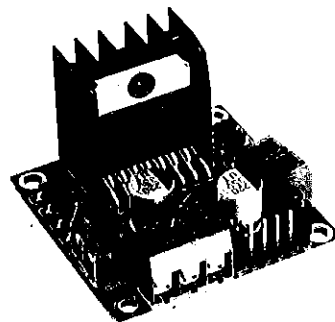
มอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 3.10 และมีคุณสมบัติดังนี้

- แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์
- ขนาดของแกนเพลลา 6 มิลลิเมตร
- ความเร็วรอบเท่ากับ 200 รอบต่อนาที
- รับน้ำหนักได้ไม่เกิน 10 กิโลกรัม
- ขนาดมอเตอร์ 2.5 x 3 เซนติเมตร
- ขนาดกำลังไฟฟ้า 7 วัตต์

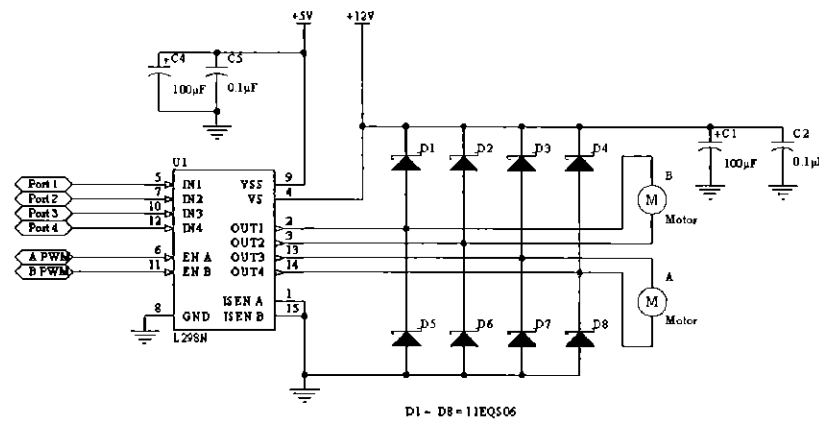


รูปที่ 3.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรขับมอเตอร์ที่ใช้เป็นไอซีเบอร์ L298N ดังรูปที่ 3.11 เป็นตัวขับเคลื่อนหลักสามารถใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีแรงบิดสูงในตัวใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งจะขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ 2 ตัวพร้อมกัน สามารถควบคุมการหมุนกลับทิศทางได้แบบอิสระ รองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้กว้าง 7-35 โวลต์มีกระแสสูงสุดได้ 2 แอมป์ต่อข้างและกำลังสูงสุดที่สามารถใช้ได้ 20 วัตต์ซึ่งมีวงจรการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.12 ดังนี้



รูปที่ 3.11 แผงวงจรขับมอเตอร์ L298N



รูปที่ 3.12 วงจรขับมอเตอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ L298N

### 3.4 ออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีซี

โครงสร้างการทำงานของระบบควบคุมนี้ถูกออกแบบด้วยโปรแกรมเมทแลปเพื่อจำลองการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ โดยมีการรับค่าอินพุตจากค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโหลดและค่าโหนดน้ำหนักจากโหลดเซลล์ แล้วทำการประมวลผลออกเป็นค่าเอาต์พุตในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จึงทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีซีได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

- 1) การกำหนดอินพุตและเอาต์พุตของระบบ
- 2) การสร้างฐานกฎพีซีซี
- 3) การประมวลผลฐานกฎพีซีซี

#### 3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมพีซีซี

- 1) การกำหนดอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

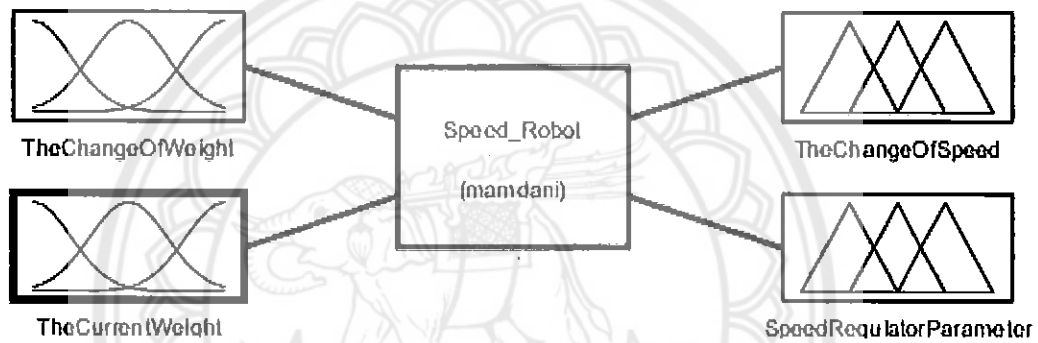
การกำหนดค่าอินพุตได้นำค่าการเปลี่ยนแปลงของโหนดน้ำหนักกับค่าโหนดน้ำหนักมากำหนดเป็นพีซีซีเซต จะได้อินพุต 2 ตัวและจะได้เอาต์พุต 2 ตัวเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์กับค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละ โหนดน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และมีตัวแปรและค่าเชิงภาษาดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและค่าเชิงเส้น

ชื่อตัวแปร	ความหมาย	ค่าตัวแปร	ความหมาย
1. The Change Of Weight	ค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโหลด	Positive Very Small (PVS) Positive Small (PS) Positive Medium (PM) Positive Large (PL) Positive Very Large (PVL) Negative Very Small (NVS) Negative Small (NS) Negative Medium (NM) Negative Large (NL) Negative Very Large (NVL)	น้ำหนักเพิ่มขึ้นน้อยมาก น้ำหนักเพิ่มขึ้นน้อย น้ำหนักเพิ่มขึ้นปานกลาง น้ำหนักเพิ่มขึ้นมาก น้ำหนักเพิ่มขึ้นมากๆ น้ำหนักลดลงน้อยมาก น้ำหนักลดลงน้อย น้ำหนักลดลงปานกลาง น้ำหนักลดลงมาก น้ำหนักลดลงมากๆ
2. The Current Weight	ค่าน้ำหนักโหลด	Weight 0 Weight 1 Weight 2 Weight 3 Weight 4 Weight 5	น้ำหนักน้อยมาก น้ำหนักน้อย น้ำหนักปานกลาง น้ำหนักมาก น้ำหนักมากๆ น้ำหนักสูงสุด
3. The Change Of Speed	ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์	Positive Very Small (PVS) Positive Small (PS) Positive Medium (PM) Positive Large (PL) Positive Very Large (PVL) Negative Very Small (NVS) Negative Small (NS) Negative Medium (NM) Negative Large (NL) Negative Very Large (NVL)	ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อยมาก ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อย ความเร็วเพิ่มขึ้นปานกลาง ความเร็วเพิ่มขึ้นมาก ความเร็วเพิ่มขึ้นมากๆ ความเร็วลดลงน้อยมาก ความเร็วลดลงน้อย ความเร็วลดลงปานกลาง ความเร็วลดลงมาก ความเร็วลดลงมากๆ

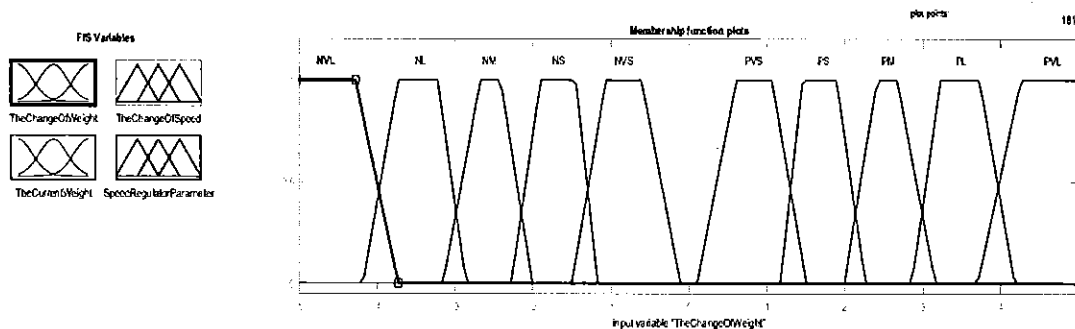
ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ตัวแปรและค่าเชิงเส้น

ชื่อตัวแปร	ความหมาย	ค่าตัวแปร	ความหมาย
4. Speed Regulator Parameter	ค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละน้ำหนักโหลด	P0	ที่ระดับน้ำหนักน้อยมาก
		P1	ที่ระดับน้ำหนักน้อย
		P2	ที่ระดับน้ำหนักปานกลาง
		P3	ที่ระดับน้ำหนักมาก
		P4	ที่ระดับน้ำหนักมากๆ
		P5	ที่ระดับน้ำหนักสูงสุด



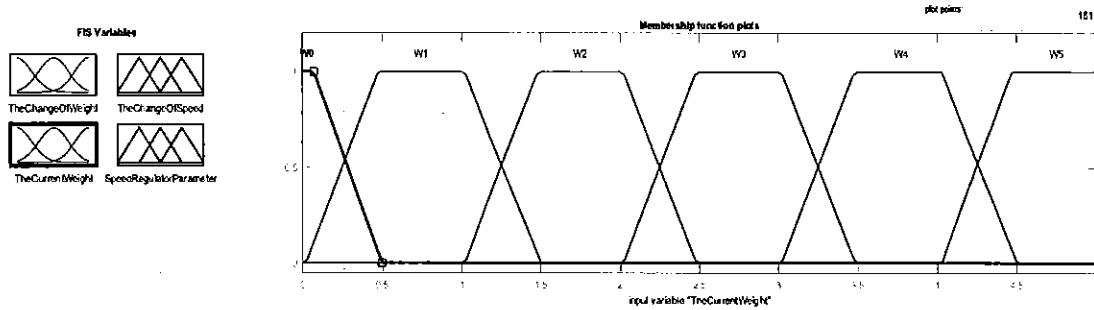
รูปที่ 3.13 รูปแบบการอนุมานอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี่

อินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ โหลดซึ่งแบ่งฟัซซี่เซตออกเป็น Negative Very Small (NVS), Negative Small (NS), Negative Medium (NM), Negative Large (NL), Negative Very Large (NVL) และ Positive Very Small (PVS), Positive Small (PS), Positive Medium (PM), Positive Large (PL) , Positive Very Large (PVL) มีขอบเขตของการเปลี่ยนแปลง โหลดน้ำหนักตั้งแต่ 0 กิโลกรัมถึง 5 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ดังนี้



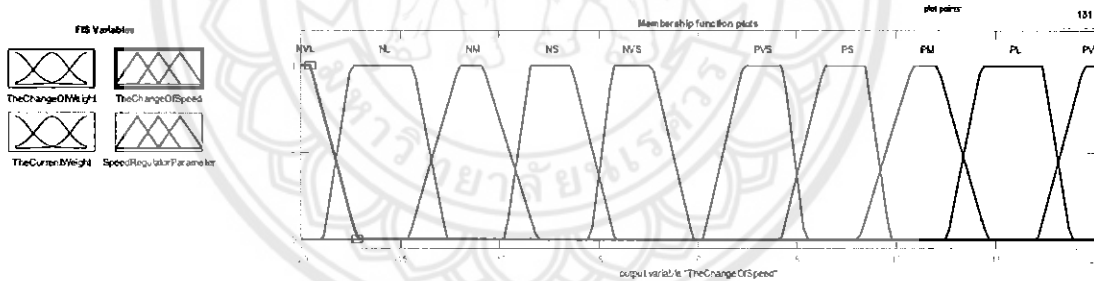
รูปที่ 3.14 ฟัซซี่เซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ โหลด

อินพุตค่าน้ำหนักโหลดซึ่งแบ่งฟัซซีเซตออกเป็น W0, W1, W2, W3, W4 และ W5 มีขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ดังนี้



รูปที่ 3.15 ฟัซซีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าน้ำหนักโหลด

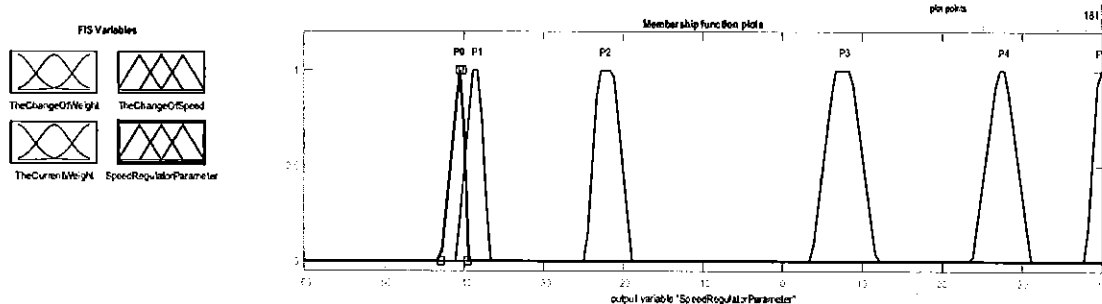
เอาต์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ซึ่งแบ่งฟัซซีเซตออกเป็น Negative Very Small (NVS), Negative Small (NS), Negative Medium (NM), Negative Large (NL), Negative Very Large (NVL) และ Positive Very Small (PVS), Positive Small (PS), Positive Medium (PM), Positive Large (PL), Positive Very Large (PVL) มีขอบเขตของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ตั้งแต่ -20 ถึง 20 ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ดังนี้



รูปที่ 3.16 ฟัซซีเซตสำหรับปริมาณเอาต์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์

เอาต์พุตค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละน้ำหนักโหลดซึ่งแบ่งฟัซซีเซตออกเป็น P0, P1, P2, P3, P4 และ P5 มีขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนตั้งแต่ -60 ถึง 40 ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ดังนี้





รูปที่ 3.17 ฟัซซีเซตสำหรับปริมาณเอาต์พุตค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ ในแต่ละน้ำหนักโหลด

2) การสร้างฐานกฎฟัซซี

เมื่อทราบปริมาณอินพุตแล้วต้องมีกฎฟัซซีเพื่อที่จะสามารถเชื่อมโยงจากปริมาณอินพุต ไปยังปริมาณเอาต์พุตได้ซึ่งเขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ได้ดังนี้

“IF x is A THEN y is B”

“ถ้า x เท่ากับ A แล้ว y เท่ากับ B”

กฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์เมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลงมีดังนี้

1. ถ้า (The change of weight คือ Negative Very Small) แล้ว (The change of speed คือ Negative Very Small)
2. ถ้า (The change of weight คือ Negatives Small) แล้ว (The change of speed คือ Negative Small)
3. ถ้า (The change of weight คือ Negative Medium) แล้ว (The change of speed คือ Negative Medium)
4. ถ้า (The change of weight คือ Negative Large) แล้ว (The change of speed คือ Negative Large)
5. ถ้า (The change of weight คือ Negative Very Large) แล้ว (The change of speed คือ Negative Very Large)
6. ถ้า (The change of weight คือ Positive Very Small) แล้ว (The change of speed คือ Positive Very Small)
7. ถ้า (The change of weight คือ Positive Small) แล้ว (The change of speed คือ Positive Small)

8. ถ้าว (The change of weight คือ Positive Medium) แล้ว (The change of speed คือ Positive Medium)

9. ถ้าว (The change of weight คือ Positive Large) แล้ว (The change of speed คือ Positive Large)

10. ถ้าว (The change of weight คือ Positive Very Large) แล้ว (The change of speed คือ Positive Very Large)

กฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ในแต่ละโหนดน้ำหนักมีดังนี้

11. ถ้าว (The current weight คือ Weight0) แล้ว (Constant speed regulator parameter คือ P0)

12. ถ้าว (The current weight คือ Weight1) แล้ว (Constant speed regulator parameter คือ P1)

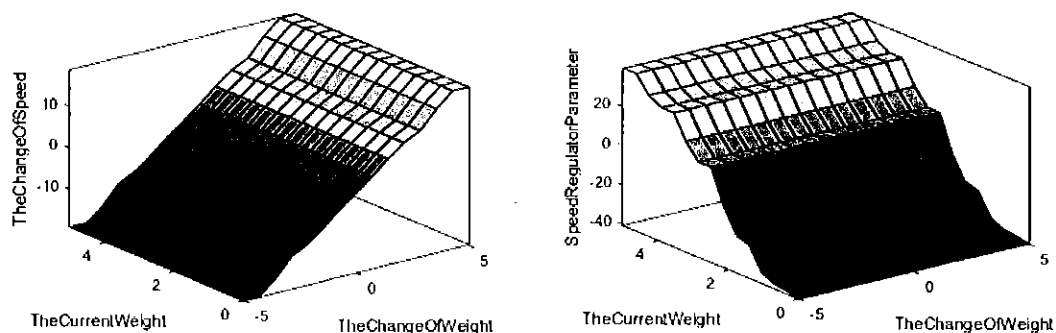
13. ถ้าว (The current weight คือ Weight2) แล้ว (Constant speed regulator parameter คือ P2)

14. ถ้าว (The current weight คือ Weight3) แล้ว (Constant speed regulator parameter คือ P3)

15. ถ้าว (The current weight คือ Weight4) แล้ว (Constant speed regulator parameter คือ P4)

16. ถ้าว (The current weight คือ Weight5) แล้ว (Constant speed regulator parameter คือ P5)

จากกฎการควบคุมที่สร้างมาข้างต้นสามารถเรียกดูมุมมองพื้นผิวของกฎจากกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ดังนี้



รูปที่ 3.18 มุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์

### 3) การประมวลผลฐานกฎฟัซซี

การวิเคราะห์การคำนวณกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์เมื่อไหลดมีการเปลี่ยนแปลง และกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ในแต่ละไหลคน้ำหนักสามารถคำนวณด้วยมือได้ด้วยการใช้วิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ค่า COG ของฟัซซีเซต  $A$  ในช่วง  $[a, b]$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x)x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (3.1)$$

#### ตัวอย่างการวิเคราะห์

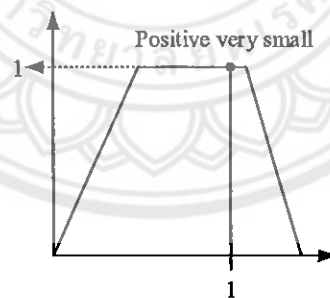
กรณีที่ 1 มีการใส่น้ำหนักไหลดของรถหนัก 1 กิโลกรัมจากเดิมที่รถไม่มีน้ำหนักเลย

จะได้ว่า- อินพุตการเปลี่ยนแปลงของไหลดมีค่าเท่ากับ 1 กิโลกรัม

- อินพุตค่าน้ำหนักไหลดของรถมีค่าเท่ากับ 1 กิโลกรัม

1) การคำนวณสำหรับอินพุตการเปลี่ยนแปลงของไหลดมีค่าเท่ากับ 1 กิโลกรัม

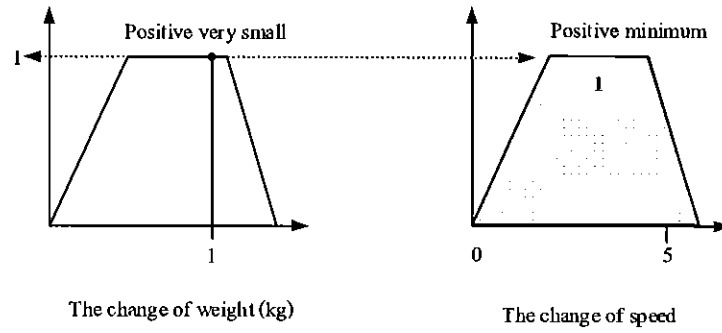
1.1) การทำฟัซซี (fuzzification) ที่อินพุตคือการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไหลด 1 กิโลกรัม จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของการเพิ่มน้ำหนักขนาดเล็กมากเท่ากับ 1 ดังรูป 3.19



The change of weight (kg)

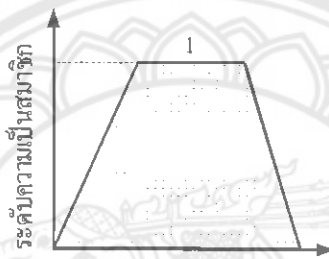
รูปที่ 3.19 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไหลด 1 กิโลกรัม

1.2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) และฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.21



กฎ (6) If (The change of weight is Positive very small) then (The change of speed is Positive minimum)

รูปที่ 3.20 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

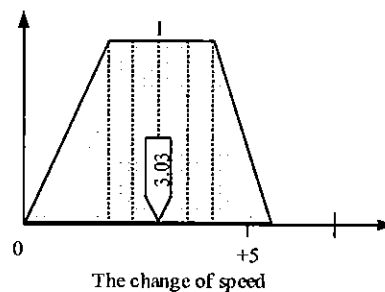


การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

รูปที่ 3.21 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

1.3) การทำดีฟัซซี (defuzzification) โดยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ดังสมการที่ 3.1 โดยพิจารณาเอาท์พุทของระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 3.21 ค่าจุดศูนย์กลางถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

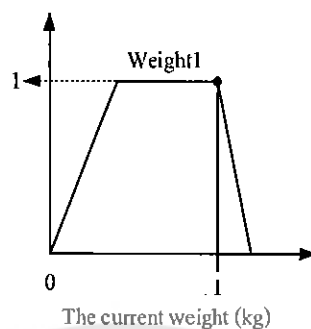
$$COG1 = \frac{(2.25 + 2.55 + 3.15 + 3.45 + 3.75) \times 1}{1 + 1 + 1 + 1 + 1} = 3.03$$



รูปที่ 3.22 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วงของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์

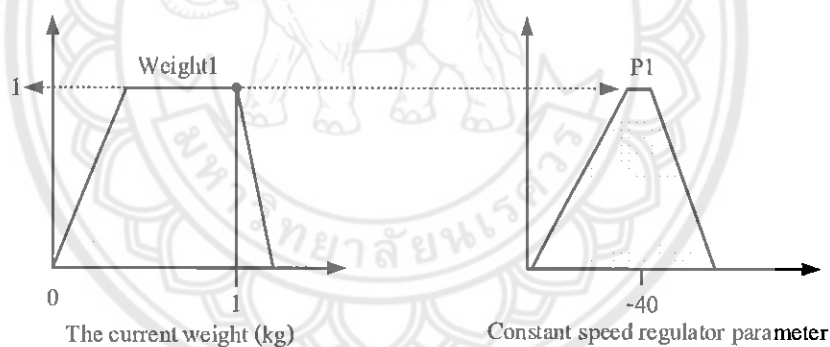
2) การคำนวณสำหรับอินพุตคือ โหลดน้ำหนักของรถเท่ากับ 1 กิโลกรัม

2.1) การทำฟัซซี (fuzzification) ที่อินพุตคือน้ำหนักของรถเท่ากับ 1 กิโลกรัม จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของน้ำหนักโหลดที่ 1 กิโลกรัมเท่ากับ 1 ดังรูปที่ 3.23



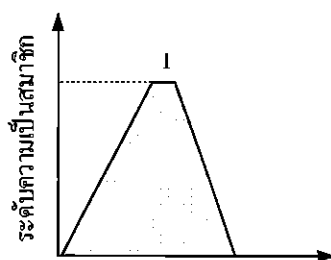
รูปที่ 3.23 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าน้ำหนักโหลดที่ 1 กิโลกรัม

2.2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) และฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.25



กฎ (11) If (The current weight is Weight1 ) then (The Constant speed regulator parameter is P1)

รูปที่ 3.24 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

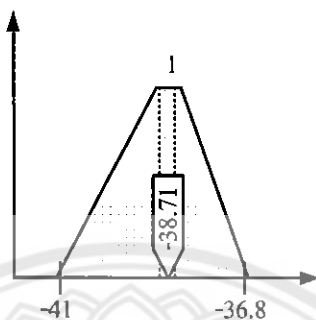


การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

รูปที่ 3.25 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

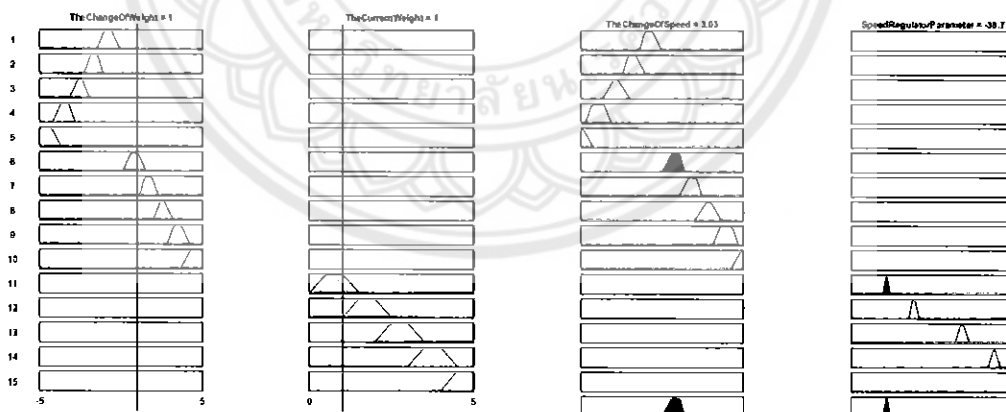
2.3) การทำดีฟัซซี่ (defuzzification) โดยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ดังสมการที่ 3.1 โดยพิจารณาเอาท์พุทของระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 3.25 ค่าจุดศูนย์ถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$COG2 = \frac{[(-38.91)+(-38.51)] \times 1}{1+1} = -38.71$$



รูปที่ 3.26 การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละน้ำหนักโหลด

ดังนั้นในกรณีที่ 1 นี้จะได้ค่าที่นำไปปรับความกว้างของพัลส์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ได้เท่ากับ  $COG1 + COG2 = -35.72$  ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณสมการ COG ทั้งสอง มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากโปรแกรมแมทแล็บ ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ค่าของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในกรณีที่ 1

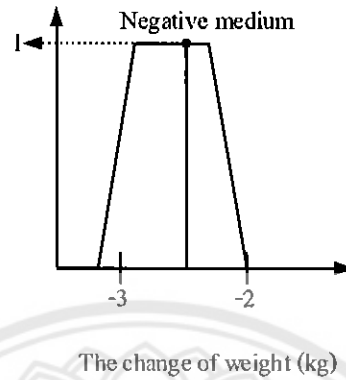
กรณีที่ 2 มีการเอาน้ำหนักโหลดของรถออกหนัก 2.5 กิโลกรัมจากเดิมที่รถมีน้ำหนัก 5 กิโลกรัม

จะได้ว่า - อินพุตการเปลี่ยนแปลงของโหลดมีค่าลดลงเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม

- อินพุตค่าโหลคน้ำหนักของรถมีค่าเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม

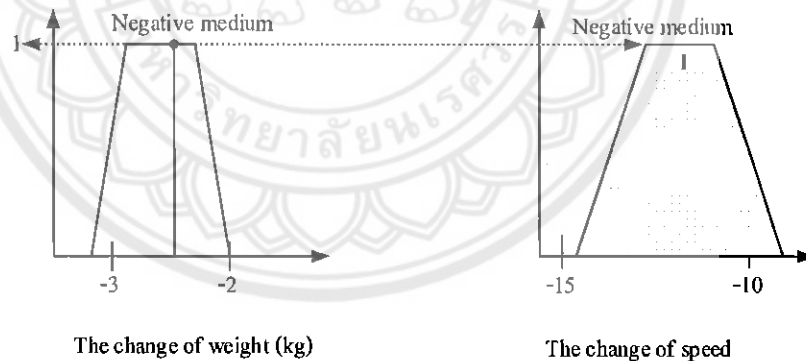
1) การคำนวณสำหรับอินพุตการเปลี่ยนแปลงของโหลดมีค่าลดลงเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม

1.1) การทำฟัซซี (fuzzification) ที่อินพุตคือมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโหลดลดลง 2.5 กิโลกรัมจะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของการลดน้ำหนักขนาดเล็กปานกลางเท่ากับ 1 ดังรูปที่ 3.28



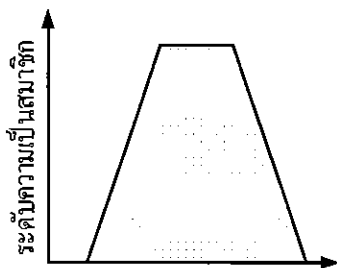
รูปที่ 3.28 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโหลดที่ลดลง 2.5 กิโลกรัม

1.2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) และฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.30



กฎ 3) If (The change of weight is Negative medium ) then (The change of speed is Negative medium)

รูปที่ 3.29 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

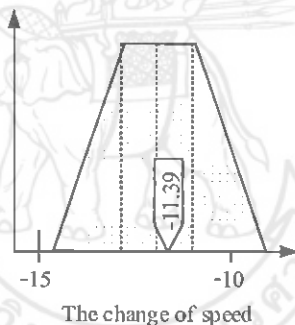


การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

รูปที่ 3.30 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

1.3) การทำดีฟัซซี (defuzzification) โดยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ดังสมการที่ 3.1 โดยพิจารณาเอาที่พูดของระบบควบคุมอุณหภูมิ ในรูปที่ 3.30 ค่าจุดศูนย์กลางถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

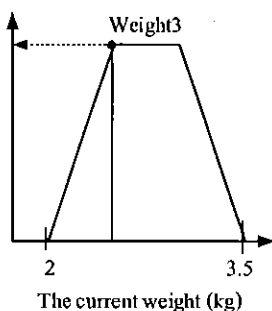
$$COG = \frac{[(-10.925)+(-11.125)+(-12.125)] \times 1}{1+1+1} = -11.39$$



รูปที่ 3.31 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วงของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์

2) การคำนวณสำหรับอินพุตน้ำหนักโหลดของรถมีค่าเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม

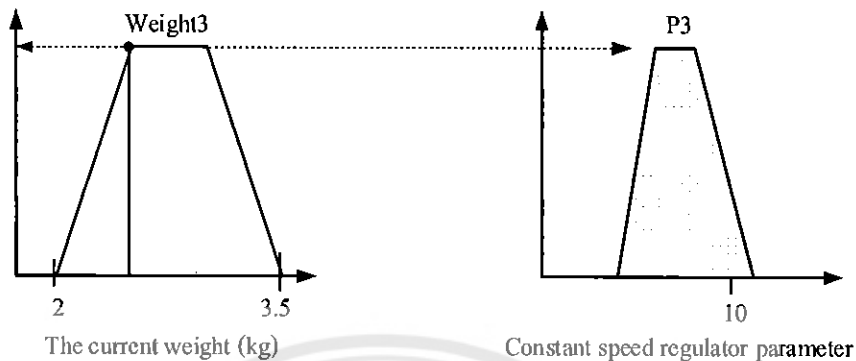
2.1) การทำฟัซซี (fuzzification) ที่อินพุตคือน้ำหนักโหลดของรถเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของน้ำหนักโหลดที่ 3 กิโลกรัมเท่ากับ 1 ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 ระดับความเป็นสมาชิกของน้ำหนักโหลดที่ 2.5 กิโลกรัม

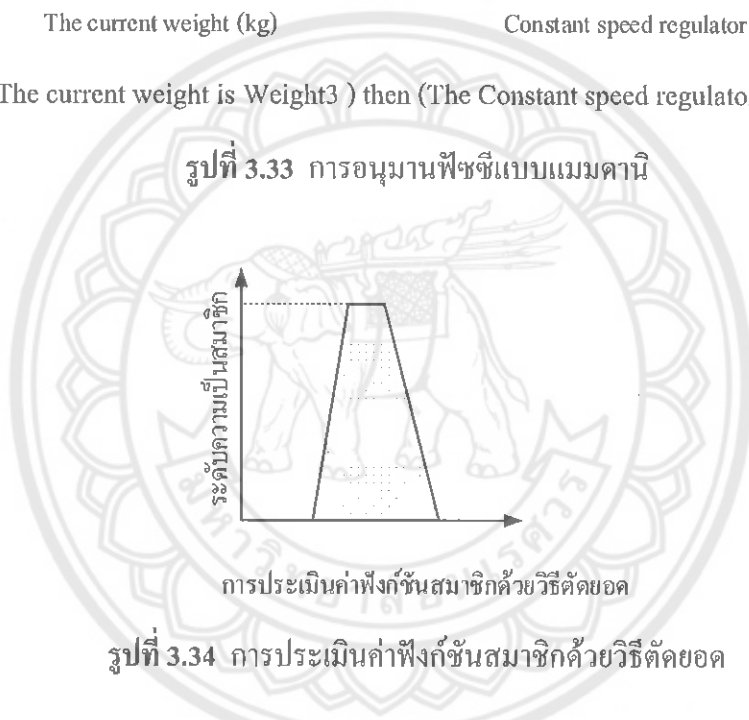


2.2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) และฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.34



กฎ (13) If (The current weight is Weight3 ) then (The Constant speed regulator parameter is P3)

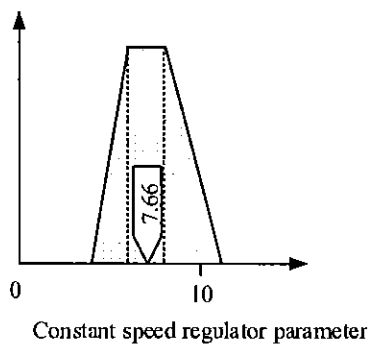
รูปที่ 3.33 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี



รูปที่ 3.34 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

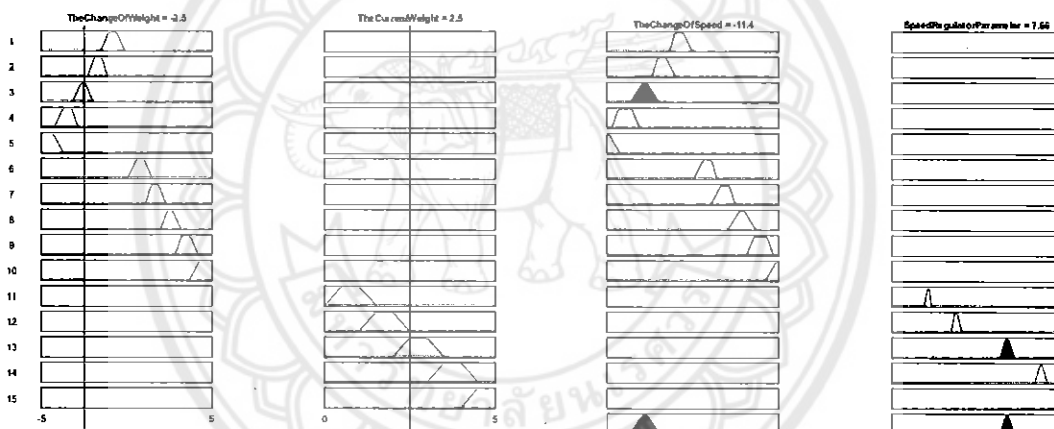
2.3) การทำดีฟัซซี (defuzzification) โดยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ดังสมการที่ 3.1 โดยพิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมอุณหภูมิ ในรูปที่ 3.34 ค่าจุดศูนย์กลางถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$COG2 = \frac{(6.65+8.67) \times 1}{1+1} = 7.66$$



รูปที่ 3.35 การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางของค่าของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ ในแต่ละน้ำหนักโหลด

ดังนั้นในกรณีที่ 2 นี้จะได้ค่าที่นำไปปรับความกว้างของฟิลล์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ ได้เท่ากับ  $COG 1 + COG 2 = -3.73$  ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณสมการ COG ทั้งสองมีค่าเท่ากับ ค่าที่ได้จากโปรแกรมแมทแลป ดังแสดงในรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 ค่าของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในกรณีที่ 2

การนำตัวควบคุมฟัซซี่ไปใช้งานจริง โดยการเรียกใช้ไลบรารีของฟัซซี่ใน โปรแกรม อาดูโนดังแสดงในรูปที่ 3.37 ดังนี้

test3v5sent1 | Arduino 1.8.2 Hourly Build 2017/01/25 04:33

File Edit Sketch Tools Help

```
test3v5sent1 $
//fuzzyyy//
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzySet.h>

Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();

FuzzySet* small = new FuzzySet(0.154, 0.29, 0.877, 1.14);
FuzzySet* medium = new FuzzySet(0.9087, 1.11, 1.8, 2.07);
FuzzySet* large = new FuzzySet(1.75, 2.1, 2.71, 3.083);
```

การเรียกใช้ไลบรารีของฟัซซี่

รูปที่ 3.37 การเรียกใช้ไลบรารีของฟัซซี่ในโปรแกรมอาตุนโน



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การทดลองการทำงานของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกแบ่งออกเป็น 4 การทดลองดังนี้

- 1) การทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์
- 2) การทดลองความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง
- 3) การทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ในแถบสีต่างๆ
- 4) การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที ในรางบริเวณแถบสีแดง เมื่อนำน้ำหนักโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

#### 4.1 การทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์

การทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก ที่น้ำหนักโหลดในช่วง 0-5 กิโลกรัม โดยโหลดมีการเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 กิโลกรัมมีการทดลองดังขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) เปิดสวิตซ์ให้หุ่นยนต์เริ่มทำงาน โดยไม่มีการใส่น้ำหนักโหลดใดๆ ให้กับหุ่นยนต์ แล้วให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่งไปจนกว่าความเร็วของหุ่นยนต์จะคงที่ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1
- 2) บันทึกค่าความเร็วที่ได้
- 3) เพิ่มน้ำหนักโหลดให้กับหุ่นยนต์ครั้งละ 1 กิโลกรัม แล้วทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 จนค่าน้ำหนักโหลดของหุ่นยนต์มีค่าเท่ากับ 5 กิโลกรัม
- 4) ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง แล้วนำค่าความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ของแต่ละน้ำหนักโหลดมาหาค่าเฉลี่ย แล้วบันทึกค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้ลงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การสังเกตค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์

ตารางที่ 4.1 ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ในแต่ละน้ำหนักโหลด

น้ำหนักโหลด (กิโลกรัม)	ความเร็วสูงสุด (เมตร/วินาที)
0	0.78
1	0.76
2	0.70
3	0.68
4	0.62
5	0.60

จากผลการทดลองจะได้ว่าค่าความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถทำได้สำหรับน้ำหนักโหลดแต่ละค่ามีความแตกต่างกัน โดยความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่สามารถนำมาใช้ในการกำหนดความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์มีค่าไม่เกิน 0.6 เมตรต่อวินาที สำหรับน้ำหนักโหลดในช่วง 0-5 กิโลกรัม

## 4.2 การทดลองความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การที่โหลดเปลี่ยนแปลงทำให้หุ่นยนต์มีความเร็วในการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปจึงทำการทดลองความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยแบ่งการทดลองเป็นดังนี้

- 1) การทดลองเพื่อตรวจสอบว่าหุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้จริงหรือไม่
- 2) การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

### 4.2.1 การทดลองเพื่อตรวจสอบว่าหุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้จริงหรือไม่

การทดลองนี้เป็นการสังเกตว่าหุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้จริงหรือไม่ โดยกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์ให้อยู่ในช่วง 0.30 – 0.70 เมตรต่อวินาที โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) กำหนดค่าความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์
- 2) เปิดสวิทช์ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น ไปจนกว่าความเร็วของหุ่นยนต์จะคงที่ตามที่เรากำหนดไว้
- 3) ทำการใส่น้ำหนักโหลดในช่วง 1-5 กิโลกรัม ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.2
- 4) สังเกตว่าหุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้หรือไม่จากจอแอลซีดีดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ใส่น้ำหนักโหลดให้กับหุ่นยนต์



รูปที่ 4.3 สังเกตว่าหุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้จริงหรือไม่

ผลการทดลองพบว่าหุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้จริง ที่ความเร็วในช่วง 0.40-0.60 เมตรต่อวินาที เนื่องจากความเร็วต่ำกว่า 0.40 เมตรต่อวินาที ที่น้ำหนัก โหลด 4 และ 5 กิโลกรัมค่าการประมวลผลพีซีไม่สามารถใช้งานได้ และที่ความเร็วมากกว่า 0.60 เมตรต่อวินาที หุ่นยนต์จะไม่เคลื่อนที่ เพราะ ที่น้ำหนัก โหลด 5 กิโลกรัม หุ่นยนต์สามารถทำ ความเร็วได้เพียง 0.60 เมตรต่อวินาที

#### 4.2.2 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาเวลาที่หุ่นยนต์ใช้ในการกลับมาให้ความเร็วเท่าเดิม โดยกำหนดให้หุ่นยนต์มีความเร็วคงที่เป็น 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที และมีขั้นตอน การทดลองดังนี้

1) เปิดสวิตซ์ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น ไปจนกว่าความเร็วของหุ่นยนต์จะคงที่ ตามที่เรากำหนดไว้

2) ทำการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โหลดดังนี้

ก. เปลี่ยนแปลงโหลดครั้งละ 1 กิโลกรัม

ข. เปลี่ยนแปลงโหลดครั้งละ 2 กิโลกรัม

ค. เปลี่ยนแปลงโหลดครั้งละ 3 กิโลกรัม

ง. เปลี่ยนแปลงโหลดครั้งละ 4 กิโลกรัม

จ. เปลี่ยนแปลงโหลดครั้งละ 5 กิโลกรัม

พร้อมกับเริ่มจับเวลาทันทีดังตัวอย่างในรูปที่ 4.4

3) เมื่อหุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่เรากำหนดไว้ให้หยุดจับเวลา โดยสังเกตค่าความเร็วจากจอแอลซีดีและไดโอดเปล่งแสงแสดงสถานะเป็นสีแดง ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.5 แล้วบันทึกค่าเวลาลงในตาราง



รูปที่ 4.4 ทำการเปลี่ยนน้ำหนักรโหลดพร้อมกับเริ่มจับเวลา



รูปที่ 4.5 หยุดจับเวลาเมื่อหุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าที่กำหนด



ก. เปลี่ยนแปลงโหลด 1 กิโลกรัม

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที

โหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 1 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
		0	1	1.09	1.11	1.17	1.12
1	2	1.30	1.25	1.18	1.23	1.19	1.23
2	3	1.20	1.13	1.17	1.24	1.21	1.19
3	4	1.21	1.25	1.29	1.27	1.28	1.26
4	5	1.35	1.36	1.28	1.27	1.29	1.31

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที

เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 1 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
		0	1	1.11	1.16	1.19	1.18
1	2	1.23	1.19	1.23	1.18	1.17	1.20
2	3	1.25	1.31	1.29	1.24	1.26	1.27
3	4	1.21	1.22	1.17	1.19	1.16	1.19
4	5	1.30	1.35	1.32	1.37	1.31	1.33

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที

เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 1 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	1	1.23	1.22	1.17	1.18	1.25	1.21
1	2	1.28	1.30	1.27	1.32	1.28	1.29
2	3	1.22	1.20	1.18	1.16	1.19	1.19
3	4	1.34	1.33	1.28	1.31	1.29	1.31
4	5	1.35	1.38	1.39	1.34	1.39	1.37

ข. เปลี่ยนแปลงโหลด 2 กิโลกรัม

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที

เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	2	1.61	1.58	1.55	1.57	1.54	1.57
1	3	1.44	1.49	1.49	1.52	1.46	1.48
2	4	1.56	1.51	1.50	1.54	1.49	1.52
3	5	1.62	1.58	1.59	1.61	1.65	1.61

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	2	1.62	1.58	1.60	1.61	1.54	1.59
1	3	1.51	1.44	1.43	1.46	1.51	1.47
2	4	1.55	1.51	1.49	1.53	1.52	1.52
3	5	1.62	1.65	1.61	1.60	1.67	1.63

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.7 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	2	1.54	1.58	1.55	1.56	1.62	1.57
1	3	1.44	1.42	1.41	1.42	1.46	1.43
2	4	1.66	1.62	1.61	1.65	1.61	1.63
3	5	1.53	1.50	1.48	1.52	1.52	1.51

ค. เปลี่ยนแปลงโหลด 3 กิโลกรัม

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.8 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 3 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
		0	3	2.21	2.28	2.32	2.30
1	4	2.22	2.18	2.19	2.21	2.15	2.19
2	5	2.36	2.33	2.32	2.36	2.38	2.35

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.9 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 3 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
		0	3	2.24	2.20	2.19	2.25
1	4	2.35	2.32	2.31	2.34	2.33	2.33
2	5	2.36	2.39	2.34	2.39	2.42	2.38

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 3 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	3	2.19	2.21	2.20	2.26	2.24	2.22
1	4	2.38	2.33	2.36	2.31	2.32	2.34
2	5	2.29	2.26	2.30	2.24	2.31	2.28

ง. เปลี่ยนแปลงโหลด 4 กิโลกรัม

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.11 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 4 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	4	2.68	2.72	2.71	2.68	2.66	2.69
1	5	2.75	2.71	2.72	2.77	2.75	2.74

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.12 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที

เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 4 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	4	2.68	2.70	2.65	2.69	2.63	2.67
1	5	2.77	2.79	2.80	2.74	2.80	2.78

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.13 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที

เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 4 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	4	2.63	2.66	2.67	2.66	2.63	2.65
1	5	2.74	2.70	2.72	2.75	2.69	2.72

จ. เปลี่ยนแปลงโหลด 5 กิโลกรัม

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.14 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที

เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 5 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	5	3.09	3.16	3.13	3.15	3.17	3.14

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.15 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 5 กิโลกรัม

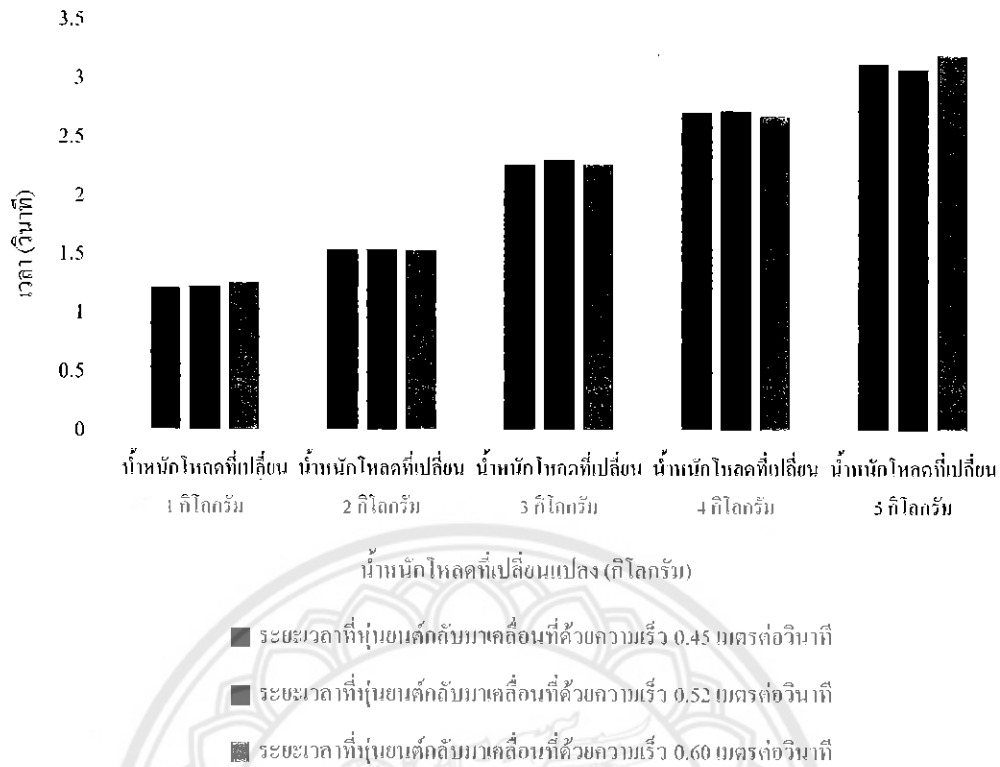
น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.52 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	5	3.08	3.11	3.09	3.07	3.10	3.09

การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.16 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 5 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.60 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	5	3.16	3.19	3.23	3.23	3.24	3.21

การเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.45, 0.52 และ  
0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อน้ำหนักโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อน้ำหนักโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โหลดที่ระดับเดียวกัน จะมีค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ตั้งไว้ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการเปลี่ยนน้ำหนักโหลดที่ระดับเดียวกัน ส่งผลต่อความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปของหุ่นยนต์เท่ากัน และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดที่ระดับสูงขึ้นจะมีค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ตั้งไว้นานขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนน้ำหนักโหลดที่ระดับสูงขึ้น ส่งผลต่อความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปของหุ่นยนต์มากขึ้น ทำให้หุ่นยนต์ต้องใช้เวลามากขึ้นในการเร่งความเร็วมอเตอร์เพื่อให้หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ตั้งไว้

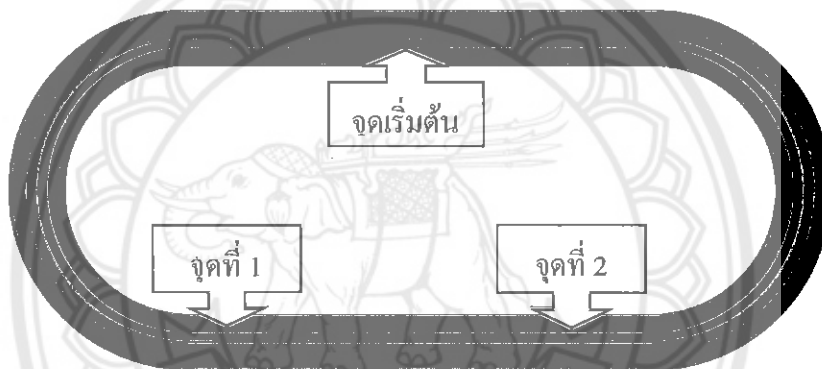
#### 4.3 การทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ที่แถบสีต่างๆ

การทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์โดยทำการแบ่งแถบสีของรางเป็นสองสีคือ สีแดงและสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 4.7 โดยค่าความเร็วในแถบสีแดงต้องมีค่าน้อยกว่าความเร็วในแถบสีน้ำเงินเสมอเพื่อให้สามารถเปลี่ยนน้ำหนักโหลดได้สะดวก มีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

- 1) กำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์ในแต่ละแถบสีในตารางรูปที่ 4.7



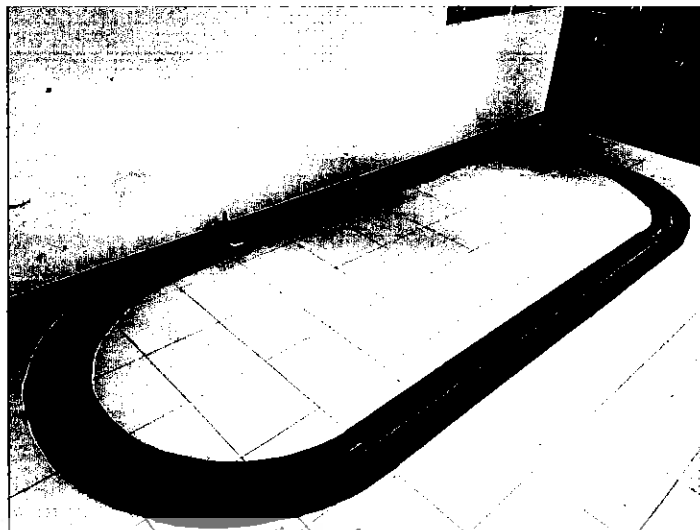
- 2) เปิดสวิทซ์ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น
- 3) เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่แถบสีแดงของรางในจุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.8 แล้วเริ่มจับเวลาจนหุ่นยนต์เคลื่อนด้วยความเร็วค่าที่ตั้งไว้ในแถบสีแดงจึงหยุดจับเวลา บันทึกเป็นค่าเวลาในการลดความเร็วของหุ่นยนต์
- 4) เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่แถบสีน้ำเงินของรางในจุดที่ 2 ดังรูปที่ 4.9 แล้วเริ่มจับเวลาจนหุ่นยนต์เคลื่อนด้วยความเร็วค่าที่ตั้งไว้ในแถบสีน้ำเงินจึงหยุดจับเวลา บันทึกเป็นค่าเวลาในการเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์
- 5) ทำการทดลองทั้งหมด 7 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ได้ในแต่ละแถบสีจากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 4.7 รางสำหรับการทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ที่แถบสีต่างๆ



รูปที่ 4.8 การทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์ที่รางบริเวณแถบสีแดง



รูปที่ 4.9 การทดลองหาความสามารถในการเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์  
ที่รางบริเวณแถบสีน้ำเงิน

#### 4.3.1 การทดลองที่ 1

กำหนดความเร็วในแถบสีน้ำเงินเป็น 0.69 เมตรต่อวินาที และความเร็วแถบสีแดงเป็น 0.47 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลการทดลองหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้เมื่อมีการเปลี่ยนแถบสีของราง มีระยะเวลาในการลดความเร็วเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 0.76 วินาที และมีระยะเวลาในการเพิ่มความเร็วเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 0.67 วินาที

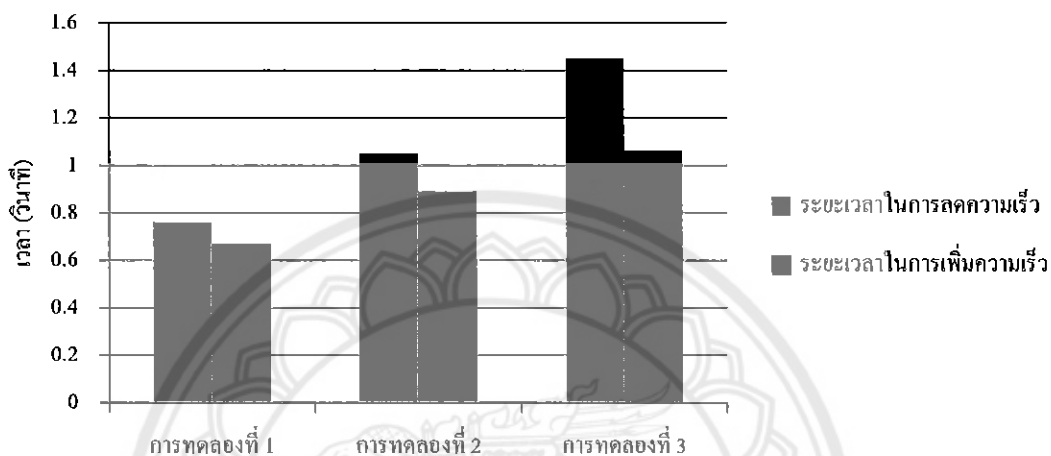
#### 4.3.2 การทดลองที่ 2

กำหนดความเร็วในแถบสีน้ำเงินเป็น 0.60 เมตรต่อวินาที และความเร็วแถบสีแดงเป็น 0.32 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลการทดลองหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้เมื่อมีการเปลี่ยนแถบสีของราง มีระยะเวลาในการลดความเร็วเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 1.05 วินาที และมีระยะเวลาในการเพิ่มความเร็วเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 0.89 วินาที

#### 4.3.3 การทดลองที่ 3

กำหนดความเร็วในแถบสีน้ำเงินเป็น 0.77 เมตรต่อวินาที และความเร็วแถบสีแดงเป็น 0.25 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลการทดลองหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้เมื่อมีการเปลี่ยนแถบสีของราง มีระยะเวลาในการลดความเร็วเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 1.55 วินาที และมีระยะเวลาในการเพิ่มความเร็วเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 1.06 วินาที

การเปรียบเทียบระยะเวลาในการเพิ่มและลดความเร็วของหุ่นยนต์เมื่อกำหนดความเร็วของแถบสีทั้งสองดังรูปที่ 4.10 หุ่นยนต์จะใช้เวลาในการเพิ่มความเร็วน้อยกว่าการลดความเร็ว เพราะในการเพิ่มความเร็วหุ่นยนต์สามารถสร้างแรงบิดได้ทันทีด้วยการดึงกระแสจากบอร์ดควบคุมมอเตอร์ แต่ในการลดความเร็ว ต้องรอให้มอเตอร์หมุนด้วยความเฉื่อยจนความเร็วลดลงถึงค่าที่ต้องการจึงใช้เวลานานกว่า



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงระยะเวลาในการเพิ่มและลดความเร็วของหุ่นยนต์ที่ความแตกต่างระหว่างค่าความเร็วในแต่ละแถบสีค่าต่างๆ

#### 4.4 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที ในรางบริเวณแถบสีแดง เมื่อไหลคน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง

การทดลองความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์ที่ความเร็ว 0.42 เมตรต่อวินาทีเมื่อไหลคน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อสังเกตว่าหุ่นยนต์ใช้เวลาในการกลับมาให้ความเร็วเท่าเดิมมีค่าเท่าใด โดยทำการทดลอง 5 ครั้ง ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1) กดเปิดสวิตช์เพื่อให้หุ่นยนต์เริ่มทำงานโดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในรางบริเวณแถบสีแดงยาว 3 เมตรจากจุดหยุดนิ่งไปจนกว่าความเร็วของหุ่นยนต์จะคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที

2) เปลี่ยนน้ำหนักไหลคน้ำหนักดังต่อไปนี้

ก. เปลี่ยนแปลงไหลคน้ำหนักครั้งละ 1 กิโลกรัม

ข. เปลี่ยนแปลงไหลคน้ำหนักครั้งละ 2 กิโลกรัม

ค. เปลี่ยนแปลงไหลคน้ำหนักครั้งละ 3 กิโลกรัม

ง. เปลี่ยนแปลงไหลคน้ำหนักครั้งละ 4 กิโลกรัม

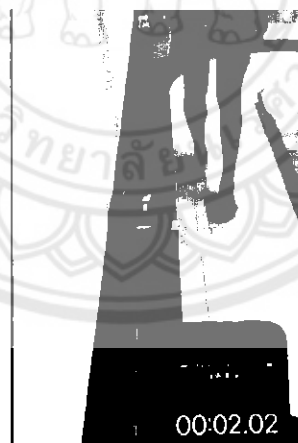
จ. เปลี่ยนแปลงโหลดครั้งละ 5 กิโลกรัม

จากนั้นเริ่มทำการจับเวลาดังตัวอย่างในรูปที่ 4.11

3) เมื่อหุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาทีให้หยุดจับเวลา โดยสังเกตค่าความเร็วจากจอแอลซีดีและไดโอดเปล่งแสงแสดงสถานะเป็นสีเขียว ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.12 แล้วบันทึกค่า



รูปที่ 4.11 ทำการเปลี่ยนน้ำหนักโหลดพร้อมกับเริ่มจับเวลา



รูปที่ 4.12 หยุดจับเวลาเมื่อหุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.42 เมตรต่อวินาที

ก. เมื่อเปลี่ยนโหลดครั้งละ 1 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.17 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักโหลดครั้งละ 1 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	1	1.24	1.18	1.09	1.21	1.27	1.19
1	2	1.13	1.21	1.28	1.17	1.31	1.22
3	4	1.29	1.39	1.26	1.35	1.25	1.31

ตารางที่ 4.18 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการลดน้ำหนักโหลดครั้งละ 1 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
4	3	1.26	1.17	1.12	1.22	1.32	1.22
2	1	1.09	1.25	1.16	1.12	1.23	1.17
1	0	1.07	1.11	1.04	1.16	1.09	1.09

ข. เมื่อเปลี่ยนโหลดครั้งละ 2 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.19 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักโหลดครั้งละ 2 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	2	1.35	1.42	1.57	1.48	1.39	1.45
0.5	2.5	1.46	1.70	1.49	1.57	1.64	1.57
3	5	1.73	1.59	1.69	1.79	1.64	1.69

ตารางที่ 4.20 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการลดน้ำหนักโหลดครั้งละ 2 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
5	3	1.33	1.50	1.42	1.65	1.71	1.52
2.5	0.5	1.33	1.52	1.57	1.60	1.41	1.48
2	0	1.48	1.39	1.27	1.50	1.31	1.39

ก. เมื่อเปลี่ยนโหลดครั้งละ 3 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.21 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักโหลดครั้งละ 3 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	3	2.15	2.23	2.31	2.19	2.39	2.25
1	4	2.45	2.15	2.28	2.36	2.19	2.29
2	5	2.31	2.40	2.45	2.36	2.23	2.35

ตารางที่ 4.22 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการลดน้ำหนักโหลดครั้งละ 3 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
5	2	2.19	2.41	2.24	2.32	2.28	2.27
4	1	2.18	2.30	2.25	2.20	2.16	2.21
3	0	2.08	2.18	2.27	2.22	2.12	2.17

ง. เมื่อเปลี่ยนโหลดครั้งละ 4 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.23 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักโหลดครั้งละ 4 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	4	2.64	2.56	2.43	2.42	2.62	2.54
0.5	4.5	2.75	2.66	2.69	2.57	2.70	2.67
1	5	2.63	2.70	2.67	2.74	2.80	2.70

ตารางที่ 4.24 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการลดน้ำหนักโหลดครั้งละ 4 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
5	1	2.60	2.70	2.53	2.45	2.56	2.56
4.5	0.5	2.50	2.45	2.61	2.39	2.55	2.49
4	0	2.57	2.40	2.35	2.45	2.50	2.45

จ. เมื่อเปลี่ยนโหลดครั้งละ 5 กิโลกรัม

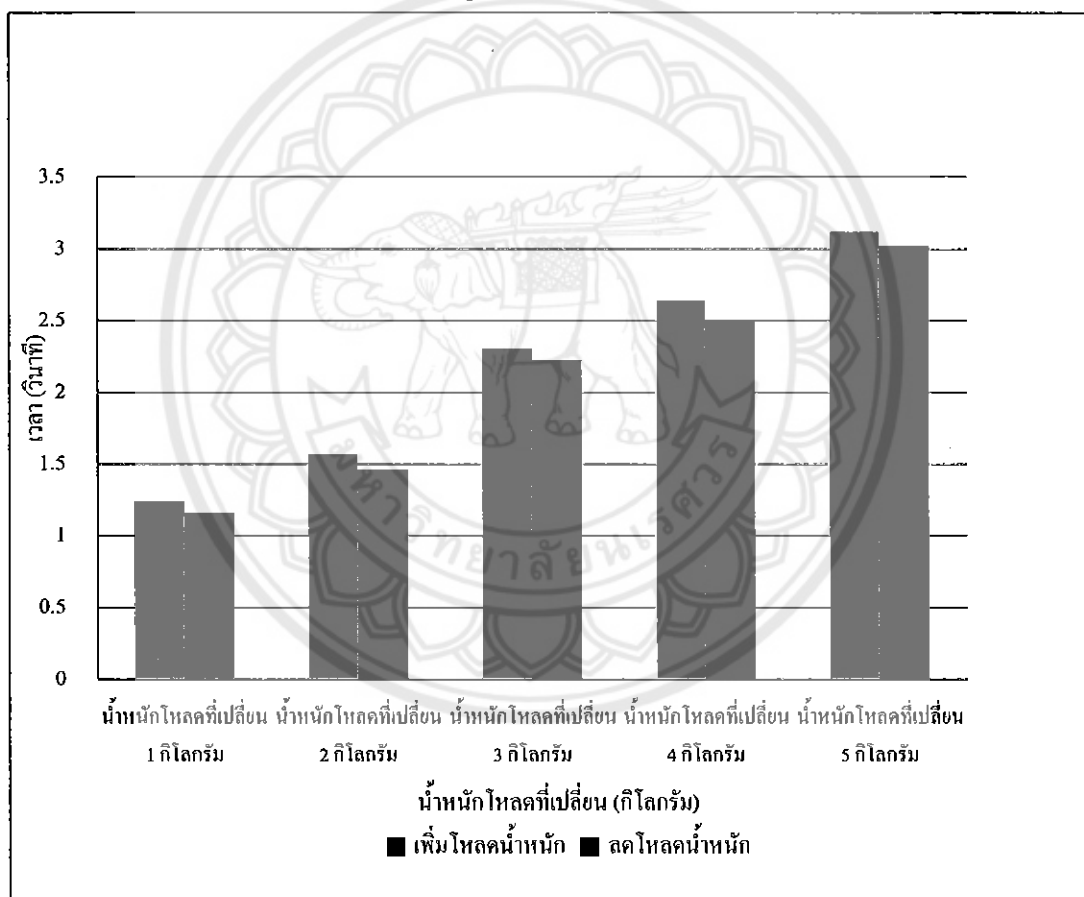
ตารางที่ 4.25 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักโหลดครั้งละ 5 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
0	5	3.18	2.98	3.13	3.24	3.07	3.12

ตารางที่ 4.26 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อมีการลดน้ำหนักโหลดครั้งละ 5 กิโลกรัม

น้ำหนักโหลด เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักโหลด รวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาที (วินาที)					
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย
5	0	2.95	3.04	3.15	2.89	3.09	3.02

การเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.42 เมตรต่อวินาที  
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  
0.42 เมตรต่อวินาที เมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหนักโหลดที่ค่าต่างๆ



การเปลี่ยนน้ำหนักโหลดของหุ่นยนต์ครั้งละ 1 กิโลกรัม หุ่นยนต์จะสามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.42 เมตรต่อวินาทีได้เร็วที่สุด เนื่องจากค่าความเร็วของหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลงน้อย หุ่นยนต์จึงใช้เวลาไม่มากในการเพิ่มความเร็วให้ถึงค่าที่กำหนดไว้ แต่การเปลี่ยนน้ำหนักโหลดของหุ่นยนต์ที่มากกว่า 1 กิโลกรัมต่อครั้ง ค่าความเร็วที่เปลี่ยนไปของหุ่นยนต์ในการเปลี่ยนโหลดแต่ละครั้งจะมากขึ้น หุ่นยนต์จึงต้องใช้เวลามากขึ้นในการเร่งความเร็วมอเตอร์เพื่อให้หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ตั้งไว้



## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงการ สามารถสรุปผลการทำงานของหุ่นยนต์และชี้แจงปัญหาระหว่างการดำเนินงาน รวมทั้งเสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหา และให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไปได้ ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในโครงการนี้ได้ทำการสร้างหุ่นยนต์ขนส่งแบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกซึ่งสามารถควบคุมความเร็วให้คงที่ได้เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง และสามารถลดระดับความเร็วลงได้เมื่อถึงจุดที่ต้องการ เพื่อเปลี่ยนน้ำหนักโหลดของหุ่นยนต์ โดยสามารถสรุปการทำงานของหุ่นยนต์ได้ดังนี้

1) หุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนความเร็วตามที่กำหนดไว้ในแถบสีน้ำเงินหรือแถบสีแดงได้ และหุ่นยนต์สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้ เมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหนักโหลดตั้งแต่ 1 กิโลกรัมถึง 5 กิโลกรัม ทั้งนี้หุ่นยนต์สามารถกำหนดค่าความเร็วคงที่ได้ในช่วง 0.40-0.60 เมตรต่อวินาที เพราะถ้ากำหนดค่าความเร็วต่ำกว่า 0.40 เมตรต่อวินาที เมื่อหุ่นยนต์มีน้ำหนักโหลดรวมมากกว่า 4 กิโลกรัม หุ่นยนต์จะไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิมได้ เพราะค่าการประมวลผลฟัซซีไม่สามารถใช้งานได้ และถ้ากำหนดค่าความเร็วให้มากกว่า 0.60 เมตรต่อวินาที หุ่นยนต์จะไม่เคลื่อนที่ เพราะที่น้ำหนักโหลด 5 กิโลกรัม หุ่นยนต์สามารถทำความเร็วได้เพียง 0.60 เมตรต่อวินาที

2) เมื่อกำหนดค่าความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์เท่ากับ 0.42 เมตรต่อวินาทีแล้ว โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 กิโลกรัมถึง 5 กิโลกรัมพบว่าหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วให้กลับมาเท่าเดิมได้อย่างรวดเร็ว โดยหุ่นยนต์มีระยะเวลาต่ำสุดในการเปลี่ยนความเร็วให้กลับมาเท่าเดิมคือ 1.16 วินาทีและหุ่นยนต์มีระยะเวลาสูงสุดในการเปลี่ยนความเร็วให้กลับมาเท่าเดิมคือ 3.12 วินาที ซึ่งระยะเวลาที่หุ่นยนต์ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วให้กลับมาคงที่ค่าเดิมเมื่อน้ำหนักโหลดเปลี่ยนแปลงจะมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนน้ำหนักโหลดของหุ่นยนต์ในแต่ละครั้ง ยกตัวอย่าง เช่น การเปลี่ยนน้ำหนักโหลดครั้งละ 1 กิโลกรัมค่าความเร็วของหุ่นยนต์เปลี่ยนแปลงน้อยมาก หุ่นยนต์จึงใช้เวลาน้อยที่สุดในการเปลี่ยนความเร็วให้ถึงค่าที่กำหนดไว้ แต่การเปลี่ยนน้ำหนักโหลดของหุ่นยนต์ที่มากกว่า 1 กิโลกรัมต่อครั้งค่าความเร็วที่เปลี่ยนไปของหุ่นยนต์ในการเปลี่ยนโหลดแต่ละครั้งจะมากขึ้น หุ่นยนต์จึงต้องใช้เวลามากขึ้นในการเร่งความเร็วมอเตอร์เพื่อให้หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิม

## 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา

1) การใช้งานร่วมกันระหว่างตัวรับรู้กับตัวเข้ารหัส เนื่องจากการใช้รีเลย์ของระบบให้มีค่าน้อยเพื่อต้องการให้หุ่นยนต์ตอบสนองต่อสีได้ไวจะทำให้ตัวเข้ารหัสทำงานไวตามไปด้วยจึงทำให้ค่าความเร็วที่แสดงบนจอแอลซีดีมีการเปลี่ยนแปลงอยู่บ่อยๆ

แนวทางการแก้ปัญหา ศึกษาการใช้งานตัวรับรู้สีกับตัวเข้ารหัสที่เหมาะสมมากกว่านี้ เนื่องจากตัวรับรู้สีมีผลต่อการตรวจจับสีและความแม่นยำของตัวเข้ารหัส

2) ขนาดและระยะของราง รางที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กทำให้มีระยะทางในการทดลองน้อยลง ส่งผลให้ค่าความเร็วที่แสดงบนจอแอลซีดีมีการเปลี่ยนแปลงอยู่บ่อยๆซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างหุ่นยนต์กับรางทำให้อ่านค่าความเร็วที่แสดงบนหน้าจอลแอลซีดีได้ยากและอาจจะทำให้อ่านค่าได้ไม่ถูกต้อง

แนวทางการแก้ปัญหา ทำการเพิ่มแถบสีให้มีระยะทางที่ยาวขึ้น รวมทั้งปรับปรุงหุ่นยนต์และรางให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานร่วมกัน เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างหุ่นยนต์กับราง

## 5.3 การนำไปพัฒนาและต่อยอด

1) สามารถนำหุ่นยนต์ไปพัฒนาโครงสร้างให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับโหลดที่มีน้ำหนักมากขึ้น โดยเลือกใช้โหลดเซลล์ที่มีพิกัดน้ำหนักที่เหมาะสมกับโหลดที่ต้องการ และเลือกใช้มอเตอร์ที่มีความเร็วรอบและแรงบิดที่เหมาะสมกับงาน

2) สามารถรองรับโหลดน้ำหนักได้หลากหลายรูปแบบ เช่น สามารถรองรับโหลดที่เป็นของเหลวหรือของแข็งที่มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก เป็นต้น

3) สามารถนำหุ่นยนต์ไปปรับใช้กับรางรูปแบบอื่นๆได้ เช่น สามารถวิ่งบนรางที่มีความชันสูงๆได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] **Arduino-mega2560**, <http://www.arduino.org>, สืบค้นเมื่อ 19 กันยายน 2559
- [2] **Load Cell และ HX711 Amplifier Module**, <https://goo.gl/vUapjm>, สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2559
- [3] **Arduino TCS230 Color Recognition Sensor module**, <https://goo.gl/jI6U0c>, สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2559
- [4] **L298N Dual H-Bridge Motor Controller**, <https://goo.gl/dcK8oK>, สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2559
- [5] **Encoder**, <https://goo.gl/uXoMdX>, สืบค้นเมื่อ 19 กันยายน 2559
- [6] **eFFL (Fuzzy)**, <https://goo.gl/j73EHr>, สืบค้นเมื่อ 17 ธันวาคม 2559





ภาคผนวก ก

รายละเอียดข้อมูลของ AVR ATMEGA2560

มหาวิทยาลัยนเรศวร



## Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V

8-bit Atmel Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash

### SUMMARY

#### Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 135 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 16 MIPS Throughput at 16MHz
  - On-Chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
  - 64K/128K/256K Bytes of In-System Self-Programmable Flash
  - 4Kbytes EEPROM
  - 8Kbytes Internal SRAM
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data retention: 20 years at 85°C/ 100 years at 25°C
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
    - In-System Programming by On-chip Boot Program
    - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
    - Endurance: Up to 64Kbytes Optional External Memory Space
- Atmel® QTouch® library support
  - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
  - QTouch and QTouch acquisition
  - Up to 512 sense channels
- JTAG (IEEE® std. 1149.1 compliant) Interface
  - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
  - Extensive On-chip Debug Support
  - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits Through the JTAG Interface
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
  - Four 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Four 8-bit PWM Channels
  - Six/Twelve PWM Channels with Programmable Resolution from 2 to 16 Bits (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
  - Output Compare Modules
  - 8/16-channel, 10-bit ADC (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
  - Two/Four Programmable Serial USART (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Byte Oriented 2-wire Serial Interface
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
  - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 54/68 Programmable I/O Lines (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
  - 64-pad QFNMLF, 64-Pad TQFP (ATmega1281/2561)
  - 100-lead TQFP, 100-lead CBGA (ATmega640/1280/2560)
  - RoHS/fully Green
- Temperature Range:
  - -40°C to 85°C Industrial
- Ultra-Low Power Consumption
  - Active Mode: 1MHz, 1.8V: 600µA
  - Power-down Mode: 0.1µA at 1.8V
- Speed Grade:
  - ATmega640V/ATmega1280V/ATmega1281V:
    - 0 - 1MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
  - ATmega2560V/ATmega2561V:
    - 0 - 2MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
  - ATmega640/ATmega1280/ATmega1281:
    - 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V, 0 - 16MHz @ 4.6V - 5.5V
  - ATmega2560/ATmega2561:
    - 0 - 16MHz @ 4.6V - 5.5V

# 1. Pin Configurations

Figure 1-1. TQFP-pinout ATmega640/1280/2560

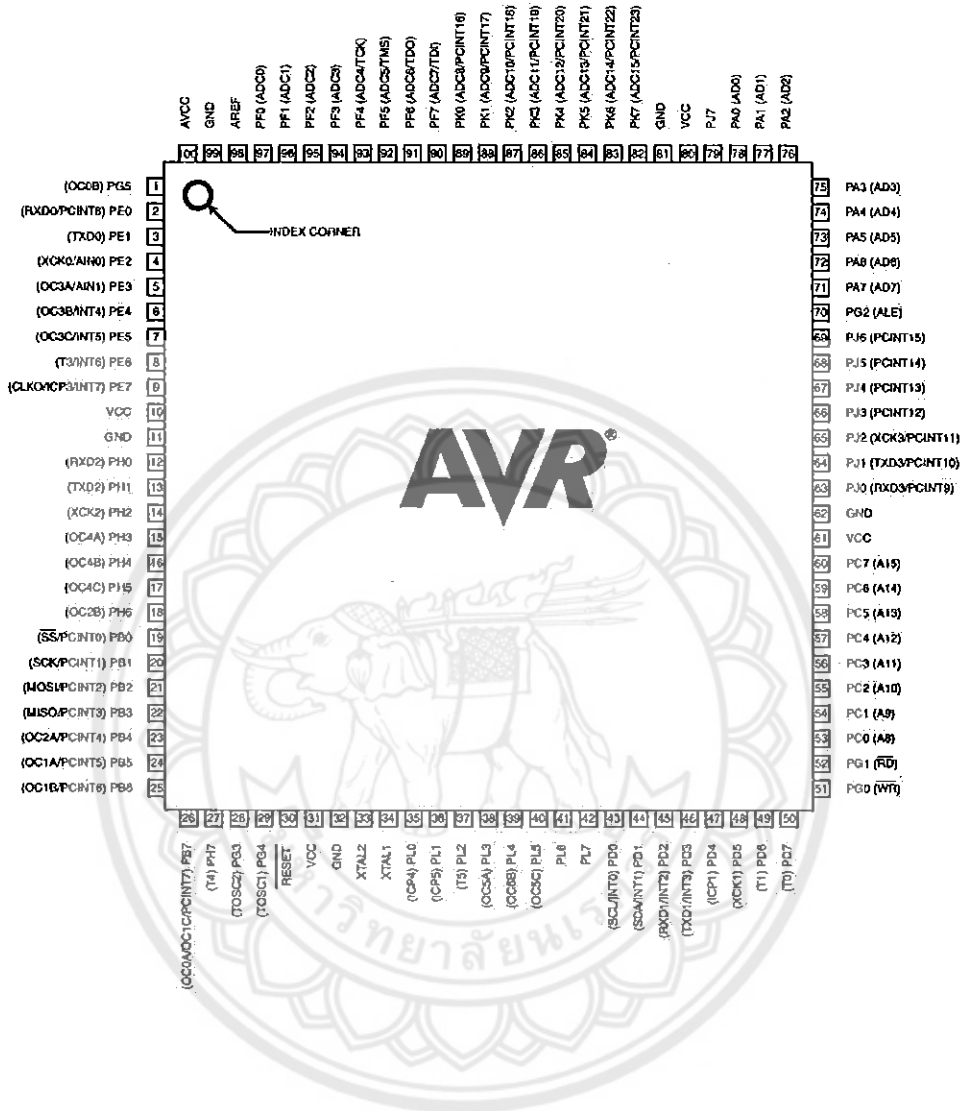


Figure 1-2. CBGA-pinout ATmega640/1280/2560

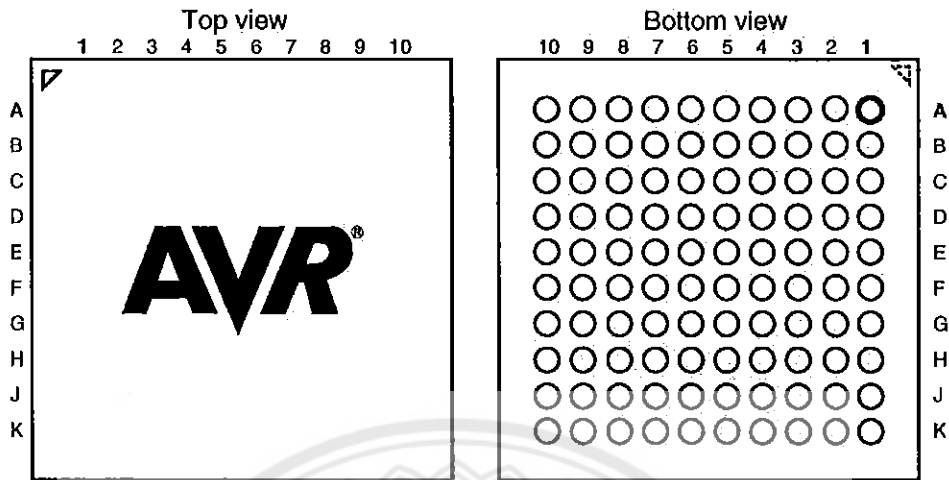


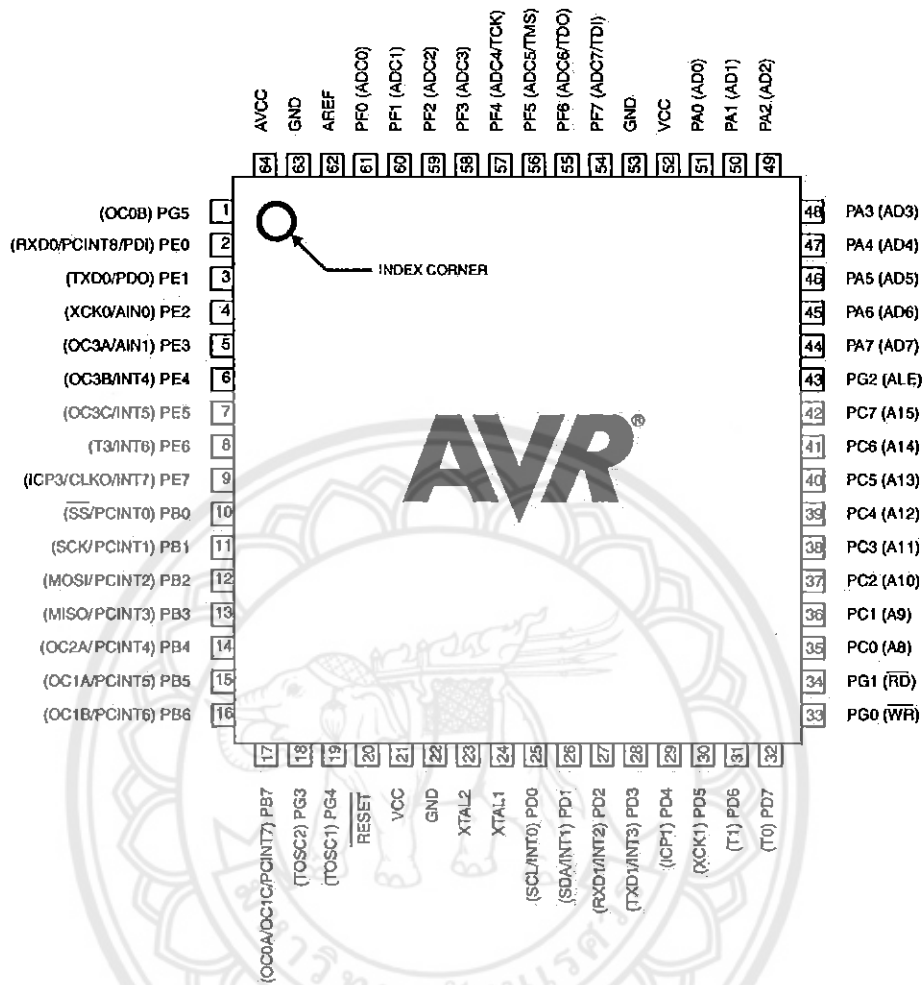
Table 1-1. CBGA-pinout ATmega640/1280/2560

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	GND	AREF	PF0	PF2	PF5	PK0	PK3	PK6	GND	VCC
B	AVCC	PG5	PF1	PF3	PF6	PK1	PK4	PK7	PA0	PA2
C	PE2	PE0	PE1	PF4	PF7	PK2	PK5	PJ7	PA1	PA3
D	PE3	PE4	PE5	PE6	PH2	PA4	PA5	PA6	PA7	PG2
E	PE7	PH0	PH1	PH3	PH5	PJ6	PJ5	PJ4	PJ3	PJ2
F	VCC	PH4	PH6	PB0	PL4	PD1	PJ1	PJ0	PC7	GND
G	GND	PB1	PB2	PB5	PL2	PD0	PD5	PC5	PC6	VCC
H	PB3	PB4	RESET	PL1	PL3	PL7	PD4	PC4	PC3	PC2
J	PH7	PG3	PB6	PL0	XTAL2	PL6	PD3	PC1	PC0	PG1
K	PB7	PG4	VCC	GND	XTAL1	PL5	PD2	PD6	PD7	PG0

Note: The functions for each pin is the same as for the 100 pin packages shown in Figure 1-1 on page 2.



Figure 1-3. Pinout ATmega1281/2561



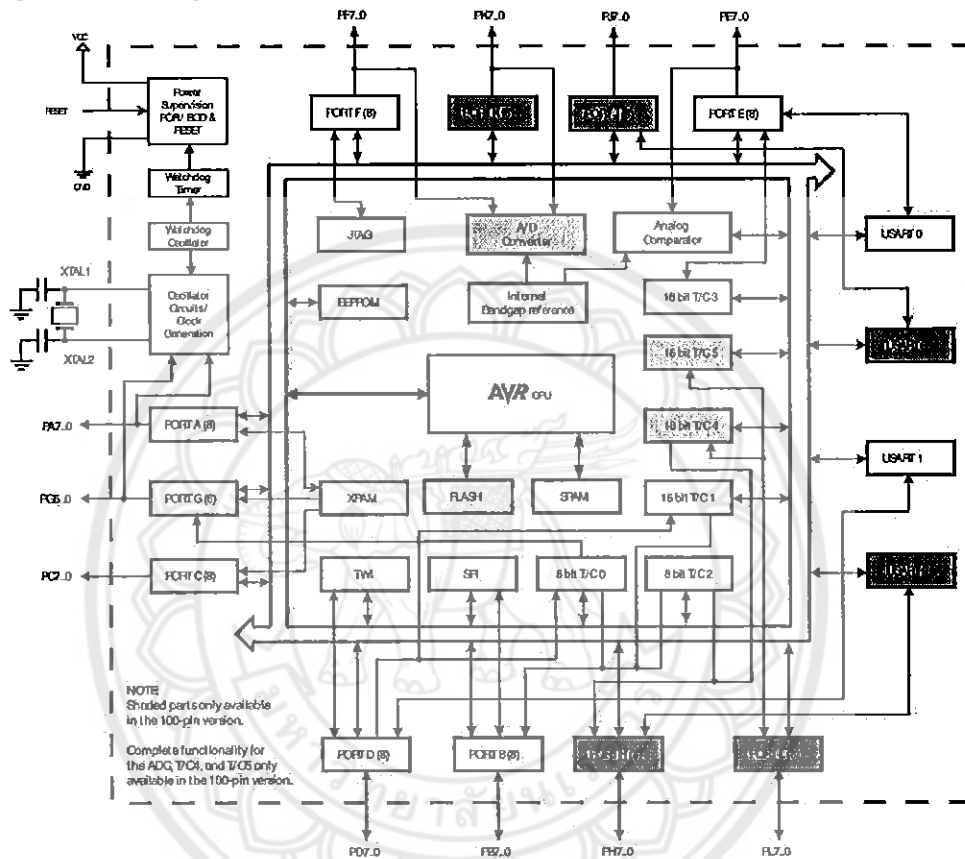
Note: The large center pad underneath the QFN/MLF package is made of metal and internally connected to GND. It should be soldered or glued to the board to ensure good mechanical stability. If the center pad is left unconnected, the package might loosen from the board.

## 2. Overview

The ATmega640/1280/1281/2560/2561 is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega640/1280/1281/2560/2561 achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

### 2.1 Block Diagram

Figure 2-1. Block Diagram



The Atmel® AVR® core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The ATmega640/1280/1281/2560/2561 provides the following features: 64K/128K/256K bytes of In-System Programmable Flash with Read-While-Write capabilities, 4Kbytes EEPROM, 8Kbytes SRAM, 54/86 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, Real Time Counter (RTC), six flexible Timer/Counters with compare modes and PWM, four USARTs, a byte oriented 2-wire Serial Interface, a 16-channel, 10-bit ADC with optional differential input stage with programmable gain, programmable Watchdog Timer with Internal Oscillator, an SPI serial port, IEEE® std. 1149.1 compliant JTAG test interface, also used for accessing the On-chip Debug system and programming and six software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the SRAM, Timer/Counters, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or Hardware Reset. In Power-save mode, the asynchronous timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except Asynchronous Timer and ADC, to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the Crystal/Resonator Oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low power consumption. In Extended Standby mode, both the main Oscillator and the Asynchronous Timer continue to run.

Atmel offers the QTouch® library for embedding capacitive touch buttons, sliders and wheels functionality into AVR microcontrollers. The patented charge-transfer signal acquisition offers robust sensing and includes fully debounced reporting of touch keys and includes Adjacent Key Suppression® (AKS®) technology for unambiguous detection of key events. The easy-to-use QTouch Suite toolchain allows you to explore, develop and debug your own touch applications.

The device is manufactured using the Atmel high-density nonvolatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed in-system through an SPI serial interface, by a conventional non-volatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The boot program can use any interface to download the application program in the application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega640/1280/1281/2560/2561 is a powerful microcontroller that provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

The ATmega640/1280/1281/2560/2561 AVR is supported with a full suite of program and system development tools including: C compilers, macro assemblers, program debugger/simulators, in-circuit emulators, and evaluation kits.

## 2.2 Comparison Between ATmega1281/2561 and ATmega640/1280/2560

Each device in the ATmega640/1280/1281/2560/2561 family differs only in memory size and number of pins. Table 2-1 summarizes the different configurations for the six devices.

Table 2-1. Configuration Summary

Device	Flash	EEPROM	RAM	General Purpose I/O pins	16 bit resolution PWM channels	Serial USARTs	ADC Channels
ATmega640	64KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1280	128KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1281	128KB	4KB	8KB	54	6	2	8
ATmega2560	256KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega2561	256KB	4KB	8KB	54	6	2	8

## 2.3 Pin Descriptions

### 2.3.1 VCC

Digital supply voltage.

### 2.3.2 GND

Ground.

### 2.3.3 Port A (PA7..PA0)

Port A is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port A output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As Inputs, Port A pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port A pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port A also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 75.

### 2.3.4 Port B (PB7..PB0)

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As Inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port B has better driving capabilities than the other ports.

Port B also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 76.

### 2.3.5 Port C (PC7..PC0)

Port C is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port C output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As Inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port C also serves the functions of special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 79.

### 2.3.6 Port D (PD7..PD0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port D also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 80.

### 2.3.7 Port E (PE7..PE0)

Port E is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port E output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port E pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port E pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port E also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 82.

### 2.3.8 Port F (PF7..PF0)

Port F serves as analog inputs to the A/D Converter.

Port F also serves as an 8-bit bi-directional I/O port, if the A/D Converter is not used. Port pins can provide internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port F output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port F pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port F pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running. If the JTAG interface is enabled, the pull-up resistors on pins PF7(TDI), PF5(TMS), and PF4(TCK) will be activated even if a reset occurs.

Port F also serves the functions of the JTAG interface.

### 2.3.9 Port G (PG5..PG0)

Port G is a 6-bit I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port G output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port G pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port G pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port G also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 86.

### 2.3.10 Port H (PH7..PH0)

Port H is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port H output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port H pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port H pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port H also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on page 88.

### 2.3.11 Port J (PJ7..PJ0)

Port J is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port J output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port J pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port J pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running. Port J also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on page 90.

**2.3.12 Port K (PK7..PK0)**

Port K serves as analog inputs to the A/D Converter.

Port K is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port K output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port K pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port K pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port K also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on page 92.

**2.3.13 Port L (PL7..PL0)**

Port L is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port L output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port L pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port L pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port L also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on page 94.

**2.3.14 RESET**

Reset input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in "System and Reset Characteristics" on page 360. Shorter pulses are not guaranteed to generate a reset.

**2.3.15 XTAL1**

Input to the Inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

**2.3.16 XTAL2**

Output from the inverting Oscillator amplifier.

**2.3.17 AVCC**

AVCC is the supply voltage pin for Port F and the A/D Converter. It should be externally connected to  $V_{CC}$ , even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to  $V_{CC}$  through a low-pass filter.

**2.3.18 AREF**

This is the analog reference pin for the A/D Converter.

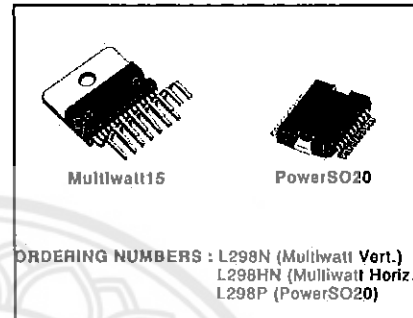



**L298**
**DUAL FULL-BRIDGE DRIVER**

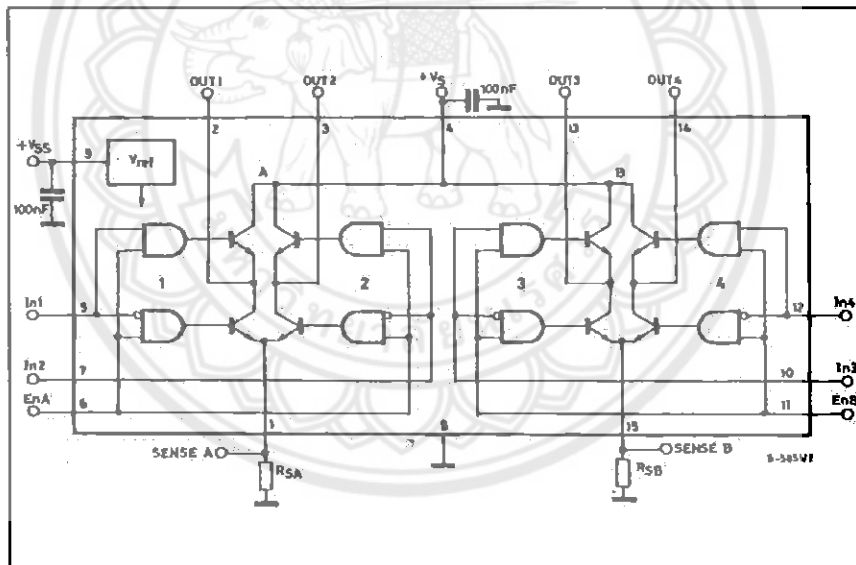
- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

**DESCRIPTION**

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

**BLOCK DIAGRAM**


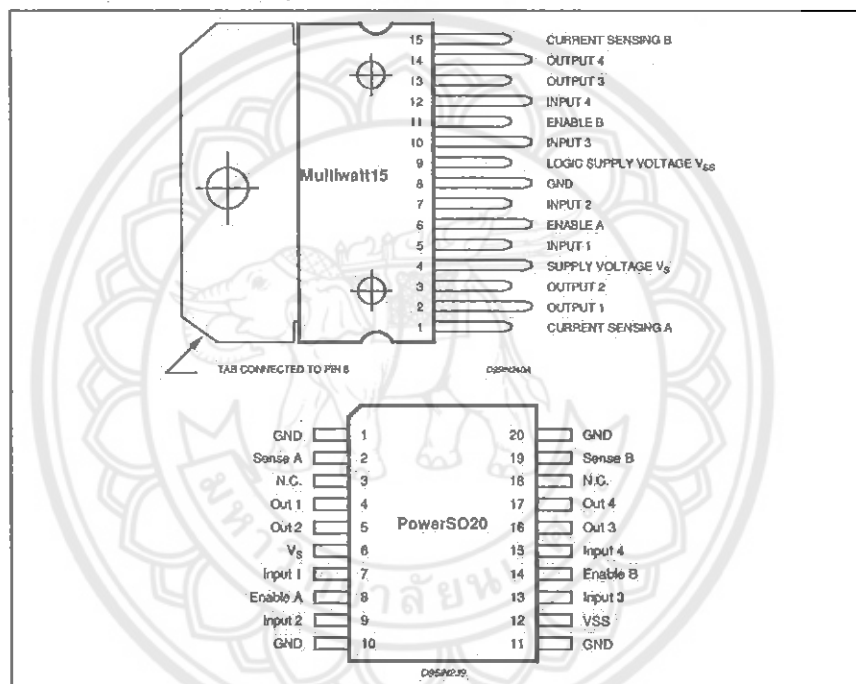


L298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_S$	Power Supply	50	V
$V_{SS}$	Logic Supply Voltage	7	V
$V_{IH}, V_{EN}$	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
$I_O$	Peak Output Current (each Channel) - Non Repetitive (I = 100µs) - Repetitive (80% on -20% off; $t_{ON} = 10ms$ ) - DC Operation	3 2.5 2	A A A
$V_{sense}$	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
$P_{tot}$	Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^{\circ}C$ )	25	W
$T_{op}$	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^{\circ}C$
$T_{stg}, T_J$	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^{\circ}C$

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter	PowerSO20	Multilwatt15	Unit
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-case	Max. -	3	$^{\circ}C/W$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max. 13 (*)	35	$^{\circ}C/W$

(\*) Mounted on aluminum substrate



L298

## PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V <sub>S</sub>	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	V <sub>SS</sub>	Supply Voltage for the Logic Blocks. A100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
-	3;18	N.C.	Not Connected

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V<sub>S</sub> = 42V; V<sub>SS</sub> = 5V; T<sub>J</sub> = 25°C; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V <sub>S</sub>	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	V <sub>EH</sub> ±2.5		46	V
V <sub>SS</sub>	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I <sub>S</sub>	Quiescent Supply Current (pin 4)	V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0	V <sub>I</sub> = L V <sub>I</sub> = H	13 50	22 70	mA mA
I <sub>SS</sub>	Quiescent Current from V <sub>SS</sub> (pin 9)	V <sub>en</sub> = L; I <sub>L</sub> = 0	V <sub>I</sub> = X		4	mA
		V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0	V <sub>I</sub> = L V <sub>I</sub> = H	24 7	38 12	mA mA
		V <sub>en</sub> = L	V <sub>I</sub> = X		6	mA
V <sub>IL</sub>	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V <sub>IH</sub>	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>L</sub>	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>I</sub> = L			-10	μA
I <sub>IH</sub>	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>I</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>en</sub> = L	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
V <sub>en</sub> = H	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>en</sub> = L	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V <sub>en</sub> = L			-10	μA
I <sub>en</sub> = H	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V <sub>en</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>CEsat (p)</sub>	Source Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A I <sub>L</sub> = 2A	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
V <sub>CEsat (n)</sub>	Sink Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
V <sub>CEsat</sub>	Total Drop	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	1.80		3.2 4.9	V V
V <sub>CEsat</sub>	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V





ภาคผนวก ค

รายละเอียดข้อมูลของ TCS3200-TCS3210



**TCS3200, TCS3210  
PROGRAMMABLE  
COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
TAOS000 - JULY 2000

- High-Resolution Conversion of Light Intensity to Frequency
- Programmable Color and Full-Scale Output Frequency
- Communicates Directly With a Microcontroller
- Single-Supply Operation (2.7 V to 5.5 V)
- Power Down Feature
- Nonlinearity Error Typically 0.2% at 60 kHz
- Stable 200 ppm/°C Temperature Coefficient
- Low-Profile Lead (Pb) Free and RoHS Compliant Surface-Mount Package

### Description

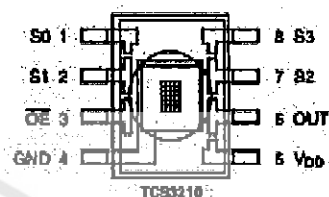
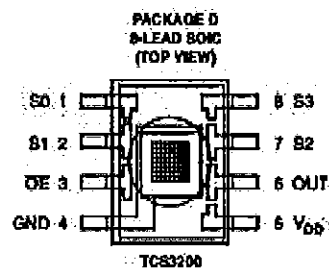
The TCS3200 and TCS3210 programmable color light-to-frequency converters that combine configurable silicon photodiodes and a current-to-frequency converter on a single monolithic CMOS integrated circuit. The output is a square wave (50% duty cycle) with frequency directly proportional to light intensity (irradiance).

The full-scale output frequency can be scaled by one of three preset values via two control input pins. Digital inputs and digital output allow direct interface to a microcontroller or other logic circuitry. Output enable (OE) places the output in the high-impedance state for multiple-unit sharing of a microcontroller input line.

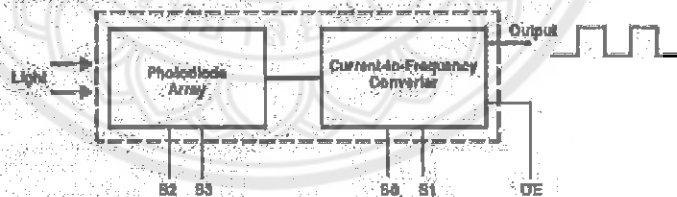
In the TCS3200, the light-to-frequency converter reads an 8 x 8 array of photodiodes. Sixteen photodiodes have blue filters, 16 photodiodes have green filters, 16 photodiodes have red filters, and 16 photodiodes are clear with no filters.

In the TCS3210, the light-to-frequency converter reads a 4 x 6 array of photodiodes. Six photodiodes have blue filters, 8 photodiodes have green filters, 8 photodiodes have red filters, and 8 photodiodes are clear with no filters.

The four types (colors) of photodiodes are interdigitated to minimize the effect of non-uniformity of incident irradiance. All photodiodes of the same color are connected in parallel. Pins S2 and S3 are used to select which group of photodiodes (red, green, blue, clear) are active. Photodiodes are 110  $\mu\text{m}$  x 110  $\mu\text{m}$  in size and are on 134- $\mu\text{m}$  centers.



### Functional Block Diagram



The LUMINOLOGY® Company

Copyright © 2000, TAOS Inc.

Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc.

1001 Klein Road • Suite 300 • Plano, TX 75074 • (972) 673-0769

www.taosinc.com

1

**TCS3200, TCS3210**  
**PROGRAMMABLE**  
**COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
 TAOS000 - JULY 2002

**Terminal Functions**

TERMINAL NAME	NO.	IO	DESCRIPTION
GND	4		Power supply ground. All voltages are referenced to GND.
OE	3	I	Enable for $f_o$ (active low).
OUT	6	O	Output frequency ( $f_o$ ).
S0, S1	1, 2	I	Output frequency scaling selection inputs.
S2, S3	7, 8	I	Photodiode type selection inputs.
V <sub>DD</sub>	5		Supply voltage

**Table 1. Selectable Options**

S0	S1	OUTPUT FREQUENCY SCALING ( $f_o$ )	S2	S3	PHOTODIODE TYPE
L	L	Power down	L	L	Red
L	H	2%	L	H	Blue
H	L	20%	H	L	Clear (no filter)
H	H	100%	H	H	Green

**Available Options**

DEVICE	T <sub>A</sub>	PACKAGE - LEADS	PACKAGE DESIGNATOR	ORDERING NUMBER
TCS3200	-40°C to 85°C	SOIC-8	D	TCS3200D
TCS3210	-40°C to 85°C	SOIC-8	D	TCS3210D



**TCS3200, TCS3210**  
**PROGRAMMABLE**  
**COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
TAOS000 - JULY 2008

**Absolute Maximum Ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)<sup>†</sup>**

Supply voltage, $V_{DD}$ (see Note 1)	8 V
Input voltage range, all inputs, $V_I$	-0.3 V to $V_{DD} + 0.3$ V
Operating free-air temperature range, $T_A$ (see Note 2)	-40°C to 85°C
Storage temperature range (see Note 2)	-40°C to 85°C
Solder conditions: In accordance with JEDEC J-STD-020A, maximum temperature (see Note 3)	260°C

<sup>†</sup> Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTE: 1. All voltage values are with respect to GND.  
 2. Long-term storage or operation above 70°C could cause package yellowing that will lower the sensitivity to wavelengths < 500nm.  
 3. The device may be hand soldered provided that heat is applied only to the solder pad and no contact is made between the tip of the solder iron and the device lead. The maximum time heat should be applied to the device is 5 seconds.

**Recommended Operating Conditions**

	MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage, $V_{DD}$	2.7	5	5.5	V
High-level input voltage, $V_{IH}$	$V_{DD} = 2.7$ V to 5.5 V		$V_{DD}$	V
Low-level input voltage, $V_{IL}$	$V_{DD} = 2.7$ V to 5.5 V		0.8	V
Operating free-air temperature range, $T_A$	-40		70	°C

**Electrical Characteristics at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{DD} = 5$  V (unless otherwise noted)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{OH}$ High-level output voltage	$I_{OH} = -2$ mA	4	4.5		V
$V_{OL}$ Low-level output voltage	$I_{OL} = 2$ mA	0.25	0.40		V
$I_{IH}$ High-level input current				5	$\mu\text{A}$
$I_{IL}$ Low-level input current				5	$\mu\text{A}$
$I_{DD}$ Supply current	Power-on mode		1.4	2	mA
	Power-down mode			0.1	$\mu\text{A}$
Full-scale frequency (See Note 4)	$B0 = H, B1 = H$	500	800		kHz
	$B0 = H, B1 = L$	100	120		kHz
	$B0 = L, B1 = H$	10	12		kHz
Temperature coefficient of responsivity	$\lambda \leq 700$ nm, $-25^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$		$\pm 500$		ppm/°C
$\%_{Sens}$ Supply voltage sensitivity	$V_{DD} = 5$ V $\pm 10\%$		$\pm 0.5$		%/V

NOTE 4: Full-scale frequency is the maximum operating frequency of the device without saturation.



**TCS3200, TCS3210**  
**PROGRAMMABLE**  
**COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**

TCS3200 – JULY 2009

Operating Characteristics at  $V_{DD} = 5\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $S0 = H$ ,  $S1 = H$  (unless otherwise noted)  
 (See Notes 5, 6, 7, and 8). Values for TCS3200 (TCS3210) are below.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	CLEAR PHOTODIODE B2 = H, B3 = L			BLUE PHOTODIODE B2 = L, B3 = H			GREEN PHOTODIODE B2 = H, B3 = H			RED PHOTODIODE B2 = L, B3 = L			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$I_O$ Output frequency (Note 9)	$E_{in} = 47.2\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\lambda_p = 470\ \text{nm}$	12.5 (4.7)	15.6 (5.85)	18.7 (7)	81%	84%	22%	43%	0%	8%	kHz			
	$E_{in} = 40.4\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\lambda_p = 524\ \text{nm}$	12.5 (4.7)	15.6 (5.85)	18.7 (7)	8%	28%	57%	80%	9%	27%				
	$E_{in} = 34.8\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\lambda_p = 640\ \text{nm}$	13.1 (4.9)	18.4 (8.15)	19.7 (7.4)	5%	21%	0%	12%	34%	105%				
$R_{in}$ Irradiance responsivity (Note 10)	$\lambda_p = 470\ \text{nm}$	331 (124)			81%	84%	22%	43%	0%	8%	Hz/ ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )			
	$\lambda_p = 524\ \text{nm}$	388 (145)			8%	28%	57%	80%	9%	27%				
	$\lambda_p = 640\ \text{nm}$	474 (178)			5%	21%	0%	12%	34%	105%				
Saturation Irradiance (Note 11)	$\lambda_p = 470\ \text{nm}$	1813 (4832)			—	—	—	—	—	—	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$			
	$\lambda_p = 524\ \text{nm}$	1554 (4138)			—	—	—	—	—	—				
	$\lambda_p = 640\ \text{nm}$	1268 (3371)			—	—	—	—	—	—				
$I_D$ Dark frequency	$E_{in} = 0$	2 10			2 10			2 10			2 10			Hz
Nonlinearity (Note 12)	$I_O = 0$ to 5 kHz	$\pm 0.1$			$\pm 0.1$			$\pm 0.1$			$\pm 0.1$			% F.S.
	$I_O = 0$ to 50 kHz	$\pm 0.2$			$\pm 0.2$			$\pm 0.2$			$\pm 0.2$			
	$I_O = 0$ to 500 kHz	$\pm 0.5$			$\pm 0.5$			$\pm 0.5$			$\pm 0.5$			
Recovery from power down		100			100			100			100			$\mu\text{s}$
Response time to output enable (OE)		100			100			100			100			ns

- NOTE: 5. Optical measurements are made using small-angle incident radiation from a light-emitting diode (LED) optical source.  
 6. The 470 nm input irradiance is supplied by an InGaN light-emitting diode with the following characteristics: peak wavelength  $\lambda_p = 470\ \text{nm}$ , spectral halfwidth  $\Delta\lambda_{1/2} = 35\ \text{nm}$ , and luminous efficacy = 75 lm/W.  
 7. The 524 nm input irradiance is supplied by an InGaN light-emitting diode with the following characteristics: peak wavelength  $\lambda_p = 524\ \text{nm}$ , spectral halfwidth  $\Delta\lambda_{1/2} = 47\ \text{nm}$ , and luminous efficacy = 520 lm/W.  
 8. The 640 nm input irradiance is supplied by a AlInGaP light-emitting diode with the following characteristics: peak wavelength  $\lambda_p = 640\ \text{nm}$ , spectral halfwidth  $\Delta\lambda_{1/2} = 17\ \text{nm}$ , and luminous efficacy = 155 lm/W.  
 9. Output frequency Blue, Green, Red percentage represents the ratio of the respective color to the Clear channel absolute value.  
 10. Irradiance responsivity  $R_{in}$  is characterized over the range from zero to 5 kHz.  
 11. Saturation Irradiance = (full-scale frequency)/(irradiance responsivity) for the Clear reference channel.  
 12. Nonlinearity is defined as the deviation of  $I_O$  from a straight line between zero and full scale, expressed as a percent of full scale.

TCS3200, TCS3210  
 PROGRAMMABLE  
 COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER  
 TCS3200 - JULY 2009

TYPICAL CHARACTERISTICS

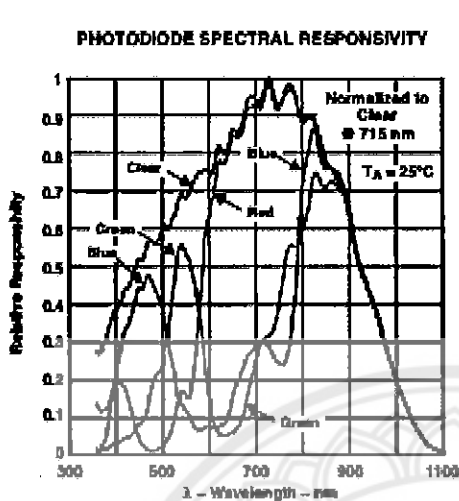


Figure 1

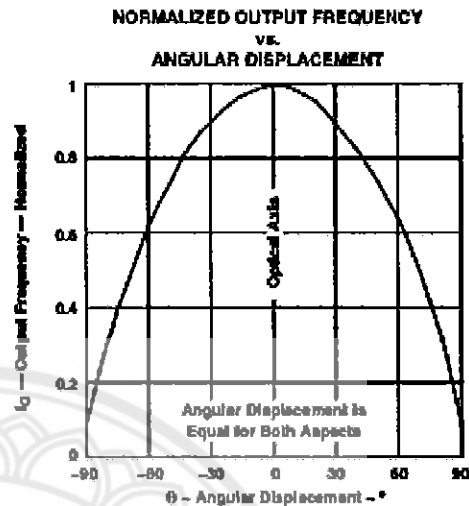


Figure 2

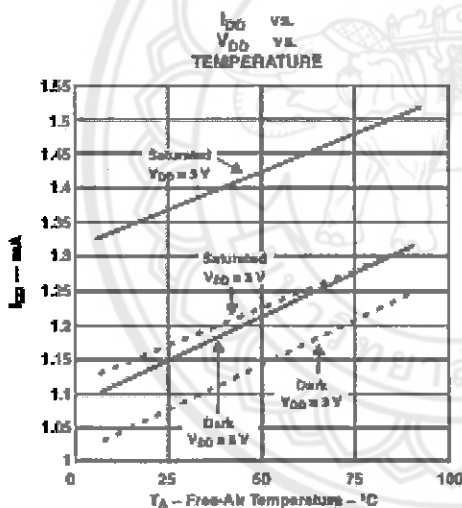


Figure 3

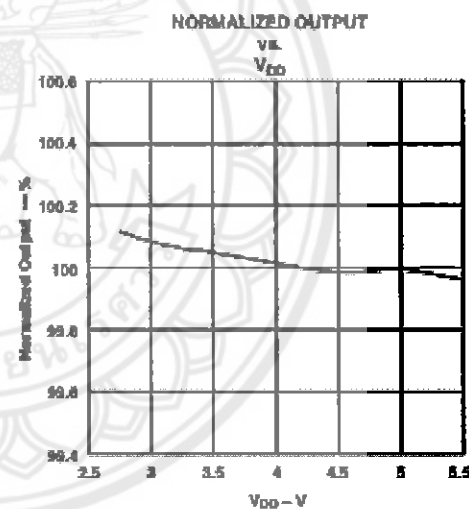


Figure 4



**TCS3200, TCS321D**  
**PROGRAMMABLE**  
**COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
TAOS000 - JULY 2002

**TYPICAL CHARACTERISTICS**

**PHOTODIODE RESPONSIVITY TEMPERATURE COEFFICIENT**  
**vs.**  
**WAVELENGTH OF INCIDENT LIGHT**

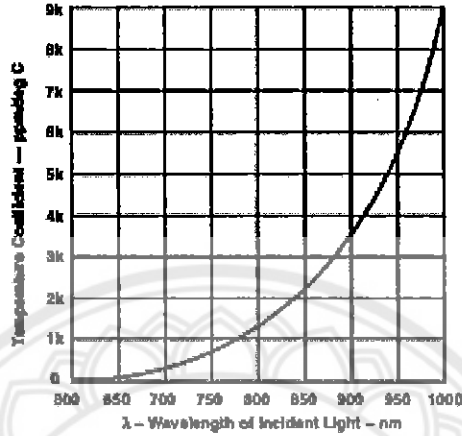


Figure 5

**TCS3200, TCS3210**  
**PROGRAMMABLE**  
**COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
TA008000 - JULY 2003

**APPLICATION INFORMATION**

**Power supply considerations**

Power supply lines must be decoupled by a 0.01- $\mu$ F to 0.1- $\mu$ F capacitor with short leads mounted close to the device package.

**Input interface**

A low-impedance electrical connection between the device OE pin and the device GND pin is required for improved noise immunity. All input pins must be either driven by a logic signal or connected to VDD or GND — they should not be left unconnected (floating).

**Output interface**

The output of the device is designed to drive a standard TTL or CMOS logic input over short distances. If lines greater than 12 inches are used on the output, a buffer or line driver is recommended.

A high state on Output Enable (OE) places the output in a high-impedance state for multiple-unit sharing of a microcontroller input line.

**Power down**

Powering down the sensor using S0/S1 (L/L) will cause the output to be held in a high-impedance state. This is similar to the behavior of the output enable pin, however powering down the sensor saves significantly more power than disabling the sensor with the output enable pin.

**Photodiode type (color) selection**

The type of photodiode (blue, green, red, or clear) used by the device is controlled by two logic inputs, S2 and S3 (see Table 1).

**Output frequency scaling**

Output-frequency scaling is controlled by two logic inputs, S0 and S1. The internal light-to-frequency converter generates a fixed-pulsewidth pulse train. Scaling is accomplished by internally connecting the pulse-train output of the converter to a series of frequency dividers. Divided outputs are 50%-duty cycle square waves with relative frequency values of 100%, 20%, and 2%. Because division of the output frequency is accomplished by counting pulses of the principal internal frequency, the final output period represents an average of the multiple periods of the principle frequency.

The output-scaling counter registers are cleared upon the next pulse of the principal frequency after any transition of the S0, S1, S2, S3, and OE lines. The output goes high upon the next subsequent pulse of the principal frequency, beginning a new valid period. This minimizes the time delay between a change on the input lines and the resulting new output period. The response time to an input programming change or to an irradiance step change is one period of new frequency plus 1  $\mu$ s. The scaled output changes both the full-scale frequency and the dark frequency by the selected scale factor.

The frequency-scaling function allows the output range to be optimized for a variety of measurement techniques. The scaled-down outputs may be used where only a slower frequency counter is available, such as low-cost microcontroller, or where period measurement techniques are used.



**TCS3200, TCS3210**  
**PROGRAMMABLE**  
**COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
 TA05000 – JULY 2009

**APPLICATION INFORMATION**

**Measuring the frequency**

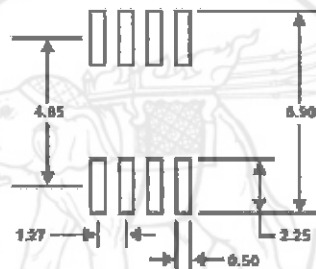
The choice of interface and measurement technique depends on the desired resolution and data acquisition rate. For maximum data-acquisition rate, period-measurement techniques are used.

Output data can be collected at a rate of twice the output frequency or one data point every microsecond for full-scale output. Period measurement requires the use of a fast reference clock with available resolution directly related to reference clock rate. Output scaling can be used to increase the resolution for a given clock rate or to maximize resolution as the light input changes. Period measurement is used to measure rapidly varying light levels or to make a very fast measurement of a constant light source.

Maximum resolution and accuracy may be obtained using frequency-measurement, pulse-accumulation, or integration techniques. Frequency measurements provide the added benefit of averaging out random- or high-frequency variations (jitter) resulting from noise in the light signal. Resolution is limited mainly by available counter registers and allowable measurement time. Frequency measurement is well suited for slowly varying or constant light levels and for reading average light levels over short periods of time. Integration (the accumulation of pulses over a very long period of time) can be used to measure exposure, the amount of light present in an area over a given time period.

**PCB Pad Layout**

Suggested PCB pad layout guidelines for the D package are shown in Figure 6.



- NOTE:** A. All linear dimensions are in millimeters.  
 B. This drawing is subject to change without notice.

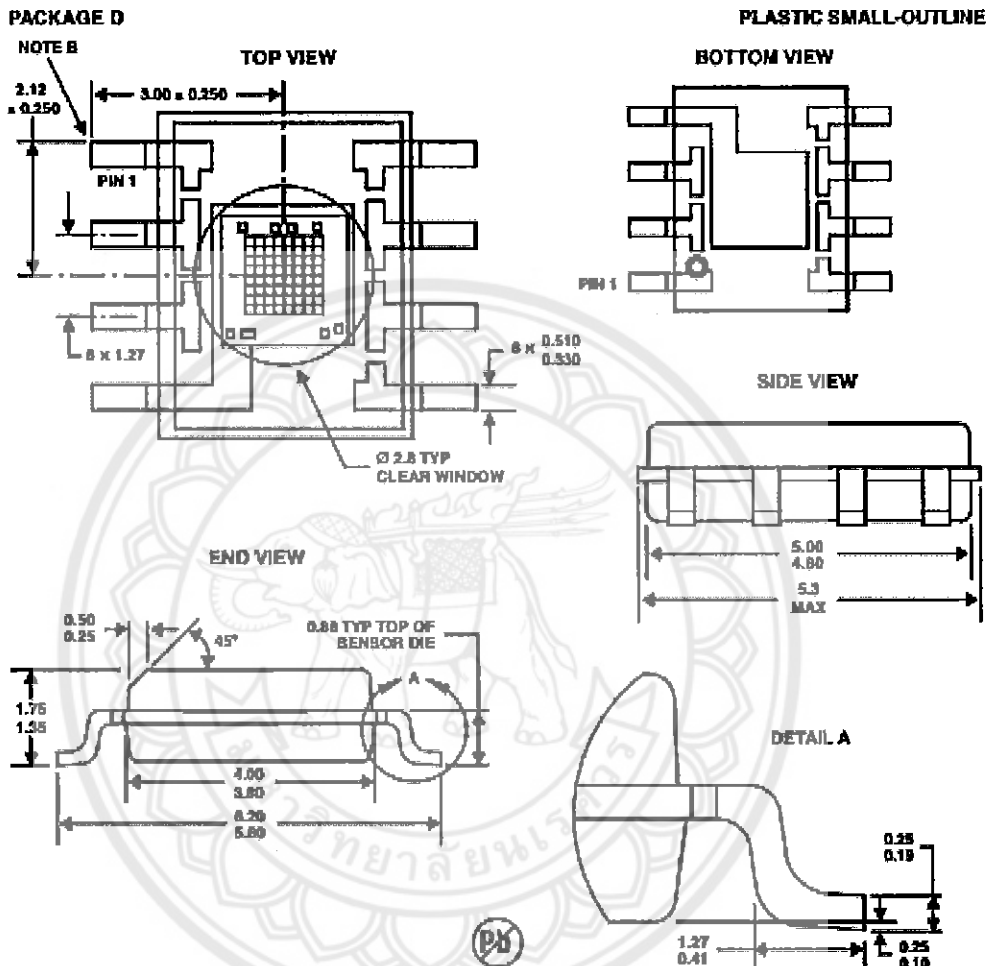
Figure 6. Suggested D Package PCB Layout



**TCS3200, TCS3210  
PROGRAMMABLE  
COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
TAO2009 - JULY 2009

**MECHANICAL INFORMATION**

This SOIC package consists of an integrated circuit mounted on a lead frame and encapsulated with an electrically nonconductive clear plastic compound. The TCS3200 has an 8 × 8 array of photodiodes with a total size of 1 mm by 1 mm. The photodiodes are 110 μm × 110 μm in size and are positioned on 134 μm centers.



- NOTES:** A. All linear dimensions are in millimeters.  
 B. The center of the 1-mm by 1-mm photo-active area is referenced to the upper left corner lip of the lead frame (Pin 1).  
 C. Package is molded with an electrically nonconductive clear plastic compound having an index of refraction of 1.55.  
 D. This drawing is subject to change without notice.

**Figure 7. Package D — TCS3200 Plastic Small Outline IC Packaging Configuration**

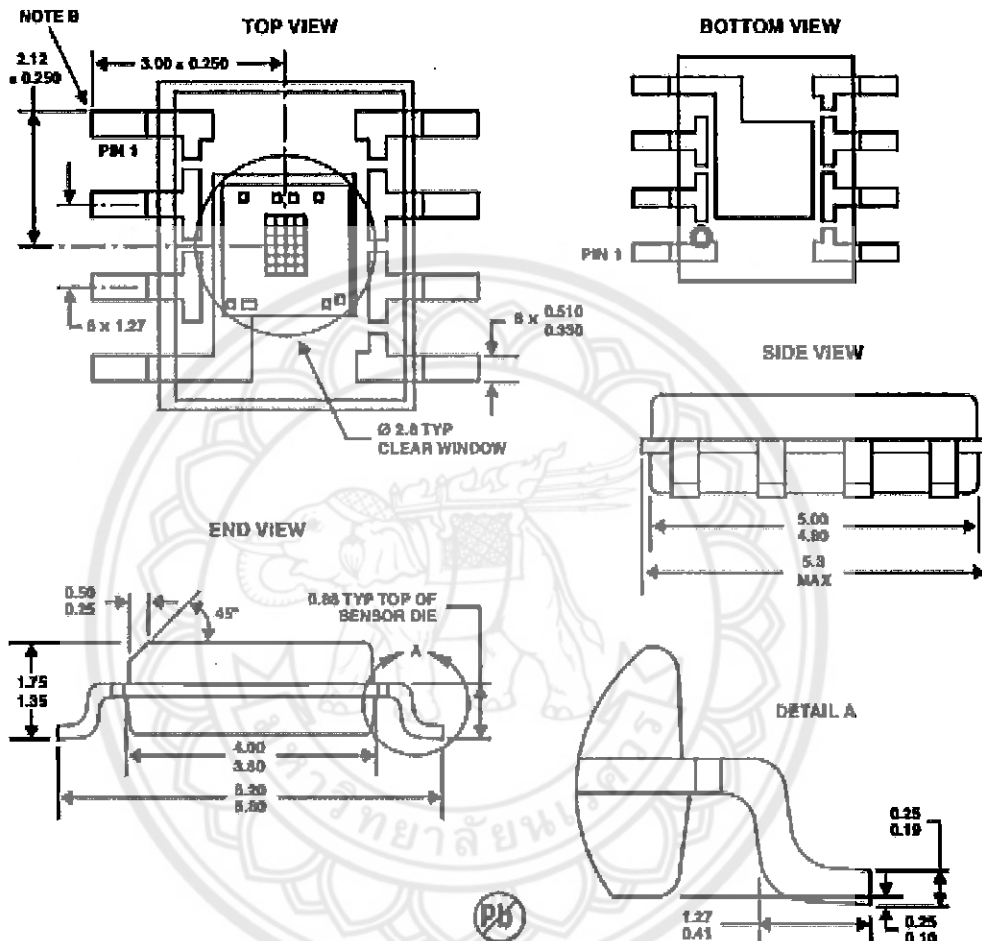
**TCS3200, TCS3210**  
**PROGRAMMABLE**  
**COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
 TA05000 - JULY 2002

**MECHANICAL INFORMATION**

This SOIC package consists of an integrated circuit mounted on a lead frame and encapsulated with an electrically nonconductive clear plastic compound. The TCS3210 has a 4 × 6 array of photodiodes with a total size of 0.54 mm by 0.8 mm. The photodiodes are 110 μm × 110 μm in size and are positioned on 134 μm centers.

**PACKAGE D**

**PLASTIC SMALL-OUTLINE**



- NOTES:** A. All linear dimensions are in millimeters.  
 B. The center of the 0.54-mm by 0.8-mm photo-active area is referenced to the upper left corner tip of the lead frame (Pin 1).  
 C. Package is molded with an electrically nonconductive clear plastic compound having an index of refraction of 1.55.  
 D. This drawing is subject to change without notice.

**Figure 8. Package D — TCS3210 Plastic Small Outline IC Packaging Configuration**

Copyright © 2008, TAOS Inc.

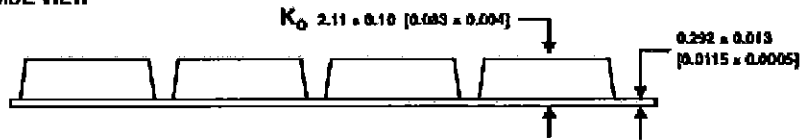


The LUMINOLOGY® Company

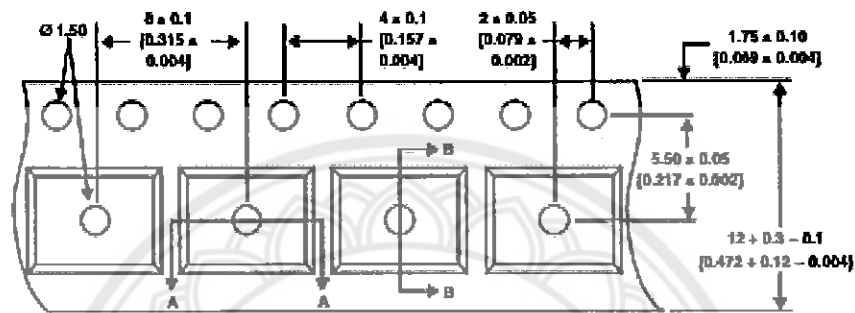
TCS3200, TCS3210  
**PROGRAMMABLE  
 COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
TAC00000 - JULY 2009

**MECHANICAL INFORMATION**

**SIDE VIEW**



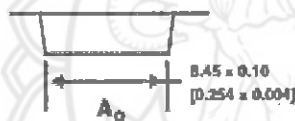
**TOP VIEW**



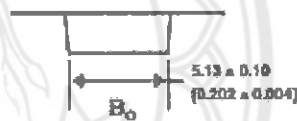
**END VIEW**



**DETAIL A**



**DETAIL B**



- NOTES: A. All linear dimensions are in millimeters [inches].  
 B. The dimensions on this drawing are for illustrative purposes only. Dimensions of an actual carrier may vary slightly.  
 C. Symbols on drawing  $A_0$ ,  $B_0$ , and  $K_0$  are defined in ANSI EIA Standard 481-B 2001.  
 D. Each reel is 178 millimeters in diameter and contains 1000 parts.  
 E. TAOS packaging tape and reel conform to the requirements of EIA Standard 481-B.  
 F. This drawing is subject to change without notice.

**Figure 9. Package D Carrier Tape**



**TCS3200, TCS3210  
PROGRAMMABLE  
COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
TA05000 - JULY 2002

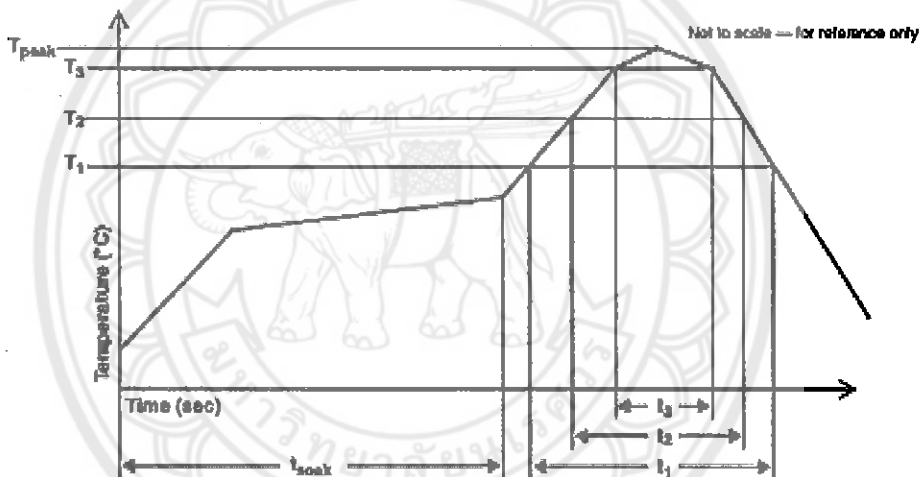
**MANUFACTURING INFORMATION**

The Plastic Small Outline IC package (D) has been tested and has demonstrated an ability to be reflow soldered to a PCB substrate.

The solder reflow profile describes the expected maximum heat exposure of components during the solder reflow process of product on a PCB. Temperature is measured on top of component. The component should be limited to a maximum of three passes through this solder reflow profile.

**Table 2. TCS3200, TCS3210 Solder Reflow Profile**

PARAMETER	REFERENCE	TCS32x0
Average temperature gradient in preheating		2.5°C/sec
Soak time	$t_{soak}$	2 to 3 minutes
Time above 217°C	$t_1$	Max 60 sec
Time above 230°C	$t_2$	Max 50 sec
Time above $T_{peak} - 10^\circ\text{C}$	$t_3$	Max 10 sec
Peak temperature in reflow	$T_{peak}$	260°C (-0°C/+5°C)
Temperature gradient in cooling		Max -5°C/sec



**Figure 10. TCS3200, TCS3210 Solder Reflow Profile Graph**



**TCS3200, TCS3210  
PROGRAMMABLE  
COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
TAOS020 - JULY 2008

### Moisture Sensitivity

Optical characteristics of the device can be adversely affected during the soldering process by the release and vaporization of moisture that has been previously absorbed into the package molding compound. To prevent these adverse conditions, all devices shipped in carrier tape have been pre-baked and shipped in a sealed moisture-barrier bag. No further action is necessary if these devices are processed through solder reflow within 24 hours of the seal being broken on the moisture-barrier bag.

However, for all devices shipped in tubes or if the seal on the moisture barrier bag has been broken for 24 hours or longer, it is recommended that the following procedures be used to ensure the package molding compound contains the smallest amount of absorbed moisture possible.

#### *For devices shipped in tubes:*

1. Remove devices from tubes
2. Bake devices for 4 hours, at 80°C
3. After cooling, load devices back into tubes
4. Perform solder reflow within 24 hours after bake

Bake only a quantity of devices that can be processed through solder reflow in 24 hours. Devices can be re-baked for 4 hours, at 80°C for a cumulative total of 12 hours (3 bakes for 4 hours at 80°C).

#### *For devices shipped in carrier tape:*

1. Bake devices for 4 hours, at 80°C in the tape
2. Perform solder reflow within 24 hours after bake

Bake only a quantity of devices that can be processed through solder reflow in 24 hours. Devices can be re-baked for 4 hours in tape, at 80°C for a cumulative total of 12 hours (3 bakes for 4 hours at 80°C).





**TCS3200, TCS3210**  
**PROGRAMMABLE**  
**COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER**  
 TAOS026 - JULY 2002

**PRODUCTION DATA** — Information in this document is current at publication date. Products conform to specifications in accordance with the terms of Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc. standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**LEAD-FREE (Pb-FREE) and GREEN STATEMENT**

**Pb-Free (RoHS)** TAOS' terms *Lead-Free* or *Pb-Free* mean semiconductor products that are compatible with the current RoHS requirements for all 6 substances, including the requirement that lead not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, TAOS Pb-Free products are suitable for use in specified lead-free processes.

**Green (RoHS & no Sb/Br)** TAOS defines *Green* to mean Pb-Free (RoHS compatible), and free of Bromine (Br) and Antimony (Sb) based flame retardants (Br or Sb do not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials).

**Important Information and Disclaimer** The information provided in this statement represents TAOS' knowledge and belief as of the date that it is provided. TAOS bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TAOS has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TAOS and TAOS suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

**NOTICE**

Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc. (TAOS) reserves the right to make changes to the products contained in this document to improve performance or for any other purpose, or to discontinue them without notice. Customers are advised to contact TAOS to obtain the latest product information before placing orders or designing TAOS products into systems.

TAOS assumes no responsibility for the use of any products or circuits described in this document or customer product design, conveys no license, either expressed or implied, under any patent or other right, and makes no representation that the circuits are free of patent infringement. TAOS further makes no claim as to the suitability of its products for any particular purpose, nor does TAOS assume any liability arising out of the use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages.

**TEXAS ADVANCED OPTOELECTRONIC SOLUTIONS, INC. PRODUCTS ARE NOT DESIGNED OR INTENDED FOR USE IN CRITICAL APPLICATIONS IN WHICH THE FAILURE OR MALFUNCTION OF THE TAOS PRODUCT MAY RESULT IN PERSONAL INJURY OR DEATH. USE OF TAOS PRODUCTS IN LIFE SUPPORT SYSTEMS IS EXPRESSLY UNAUTHORIZED AND ANY SUCH USE BY A CUSTOMER IS COMPLETELY AT THE CUSTOMER'S RISK.**

LUMINOLOGY, TAOS, the TAOS logo, and Texas Advanced Optoelectronic Solutions are registered trademarks of Texas Advanced Optoelectronic Solutions Incorporated.



## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายรัชชัย ทับทิมหิน

ภูมิลำเนา 4/2 ม.6 ต.นครป่าหมาก อ.บางกระทุ่ม จ.พิษณุโลก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียน  
สระหลวงพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี  
ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email tawatchait56@email.nu.ac.th



ชื่อ นายบุญญฤทธิ์ คำเลิศ

ภูมิลำเนา 108 ม.3 ต.ท่ามะเฟือง อ.พิชัย จ.อุตรดิตถ์

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียน  
พิษณุโลกพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี  
ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email bunyaritk56@email.nu.ac.th



ชื่อ นายศักดิ์สรณ์ นามดี

ภูมิลำเนา 62 ม.1 ต.หมอกจำแป่ อ.เมือง จ.แม่ฮ่องสอน

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียน  
ห้องสอนศึกษา
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี  
ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email saksornc56@email.nu.ac.th