

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเนื้อหา

น้ำเป็นสิ่งที่สำคัญในหลาย ๆ ด้าน ทั้งทางด้านการใช้ชีวิตประจำวันและด้านการประกอบอาชีพ โดยเฉพาะประเทศไทยนั้นเป็นประเทศที่มีอาชีพหลักคือการเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นสินค้าหลักทั้งการบริโภคในประเทศและการส่งออกไปยังต่างประเทศ ซึ่งการเกษตรกรรมส่วนมากจะต้องพึ่งพาการรดน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดี แต่เนื่องจากในปัจจุบันนั้นสภาพการณ์ของน้ำมีปริมาณไม่เพียงพอ การใช้น้ำให้พอเหมาะแก่การใช้ในด้านต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นเพื่อเป็นการรักษาปริมาณน้ำที่มีอยู่ให้เพียงพอและพอใช้ตลอดไป ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ ๆ เพื่อให้มีการใช้น้ำที่เหมาะสมและคุ้มค่าให้มากที่สุดจึงเป็นสิ่งที่ควรแก่การศึกษา

ระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติโดยใช้ค่าความชื้นดินเป็นตัวควบคุม นั้นเป็นการศึกษาถึงวิธีการการใช้น้ำที่เหมาะสมในการรดน้ำให้แก่ต้นไม้หรือใช้ในการรดน้ำให้แก่พืชผลทางการเกษตรโดยใช้ความชื้นในดินเป็นตัวแปรในการควบคุมระบบการรดน้ำให้เป็นแบบอัตโนมัติ ระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัตินี้จะช่วยแบ่งเบาภาระในการดูแลการรดน้ำให้แก่ต้นไม้หรือ พืชผลทางการเกษตร อีกทั้งยังสามารถใช้ปริมาณน้ำได้เหมาะสมกับต้นไม้หรือพืชผลทางการเกษตรตามสภาพของดินอีกด้วย

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาระบบการรดน้ำต้นไม้แบบอัตโนมัติโดยใช้ความชื้นในดินเป็นตัวแปรในการควบคุมการทำงานของระบบให้มีการทำงานแบบอัตโนมัติ

#### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

สร้างระบบการรดน้ำต้นไม้แบบอัตโนมัติโดยใช้ความชื้นในดินเป็นข้อมูลในการควบคุมการทำงาน การทดสอบการทำงานจะทำการจำลองค่าสถานะความชื้นของดินที่จะเป็นข้อมูลในการควบคุมระบบ เพื่อให้มีการสั่งการให้ระบบทำงานเปิดการรดน้ำหรือสั่งให้ระบบหยุดการรดน้ำ ระบบการทำงานจะใช้การควบคุมมอเตอร์ของปั้มน้ำในการรดน้ำโดยใช้หัวสปริงเกอร์เป็นอุปกรณ์ในการจ่ายน้ำสำหรับรดน้ำ และสำหรับการวัดค่าความชื้นดินจะใช้เซนเซอร์วัดความชื้นในดินโดยตั้งค่าความชื้นดินในการสั่งให้ทำงานอยู่ที่ประมาณ 15 % - 25 % และตั้งค่าในการสั่งให้หยุดทำงานอยู่ที่ประมาณ 50 % - 80 %

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบบการควบคุมแบบต่างๆ ทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบการควบคุม รวมถึงศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆในระบบควบคุม เช่น เซนเซอร์วัดความชื้นดิน แผงระบบการควบคุม ปั๊มน้ำ หรือหัวรดน้ำสปริงเกอร์ เป็นต้น

1.4.2 ออกแบบระบบรดน้ำต้นไม้แบบอัตโนมัติโดยใช้ค่าความชื้นในดินเป็นข้อมูลในการควบคุมสั่งการทำงาน ระบบการทำงานจะแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ

1.4.2.1 ส่วนระบบควบคุมการทำงาน คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมจอแสดงค่าการทำงาน

1.4.2.2 ส่วนระบบการทำงานรดน้ำ ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการรดน้ำต้นไม้ เช่น ปั๊มน้ำ หรือ หัวสปริงเกอร์ เป็นต้น

1.4.2.3 ส่วนระบบเซนเซอร์ คือ ตัวเซนเซอร์วัดความชื้นดิน

1.4.3 ทำการทดสอบเซนเซอร์วัดค่าความชื้นของดิน โดยทำการทดสอบค่าความชื้นของดินในสภาพต่างๆ แล้วนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์เพื่อหาความชื้นของดินที่เหมาะสมในการตั้งค่าทำงานของระบบ

1.4.4 ออกแบบแผนการทดสอบระบบโดยจะแบ่งโซนในการวัดค่าความชื้นเป็น 3 โซน ระบบจะทำงานเมื่อมีค่าความชื้นต่ำกว่าหรือเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ให้ระบบทำงาน และระบบจะหยุดทำงานเมื่อมีค่าความชื้นเท่ากับหรือสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ให้ระบบหยุดทำงาน

1.4.5 สร้างระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยทำการสร้างส่วนหลักของการทำงานทั้ง 3 ส่วน คือ ส่วนระบบควบคุมการทำงาน ส่วนระบบการทำงานรดน้ำและส่วนระบบเซนเซอร์ จากนั้นจึงทำการรวมทุกส่วนการทำงานเข้าด้วยกันให้เป็นระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ

1.4.6 นำระบบที่ได้สร้างนั้นไปทดสอบตามแผนการทดสอบที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมทั้งเก็บผลการทดสอบรวมถึงการปรับค่าความชื้นให้เหมาะสมเพื่อดูถึงค่าการใช้ปริมาณน้ำ

1.4.7 สรุปผลการทำงานของระบบพร้อมจัดทำเอกสารเพื่อเผยแพร่ผลที่ได้



## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 พัฒนาระบบการรดน้ำต้นไม้ให้ทำงานแบบอัตโนมัติ แบ่งเบาภาระในเรื่องการดูแลการรดน้ำแก่ต้นไม้หรือพืชผลการเกษตร

1.6.2 พัฒนาระบบการรดน้ำต้นไม้ให้ใช้น้ำได้อย่างเหมาะสมตามความชื้นของดิน ทำให้เกิดการใช้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่เกินความจำเป็น

1.6.3 สร้างจิตสำนึกการอนุรักษ์น้ำให้กับสังคม

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ระบบควบคุม

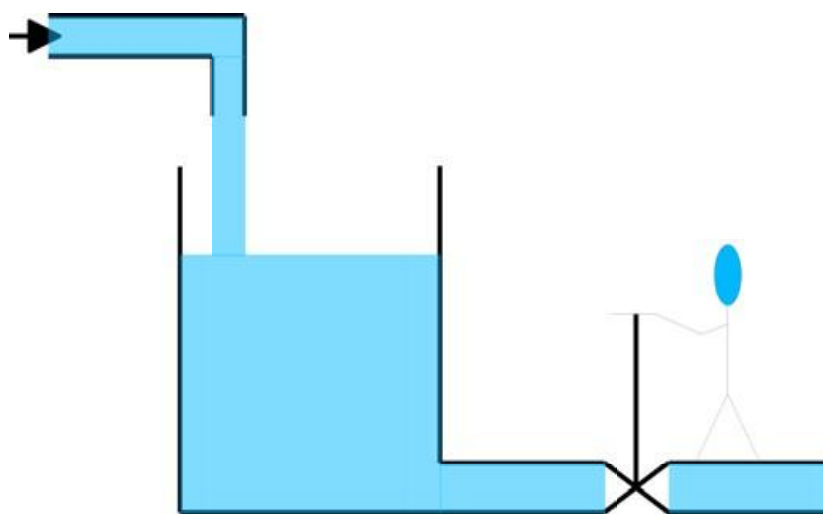
ระบบควบคุม (Control) เป็นสาขาหนึ่งของคณิตศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ในที่นี้ การควบคุม หมายถึง การควบคุมระบบพลศาสตร์ ให้มีค่าเอาต์พุต ที่ต้องการ โดยการป้อนค่าอินพุตที่เหมาะสมให้กับ ระบบ ตัวอย่างที่เห็นได้ทั่วไป เช่น ระบบควบคุมอุณหภูมิห้องของเครื่องปรับอากาศ หรือ แม้แต่ลูกลอยในโถ ส้วมที่เปิดน้ำปิดน้ำโดยอัตโนมัติเมื่อน้ำหมดและน้ำเต็ม

การควบคุมการขับเคลื่อนยานพาหนะ เช่น รถยนต์ ก็ถือเป็นการควบคุมชนิดหนึ่ง โดยผู้ขับขี่เป็นผู้ ควบคุมทิศทางและความเร็ว ซึ่งระบบควบคุมประเภทที่ต้องมีคนเข้ามาเกี่ยวข้องนี้ถือว่าเป็น ระบบควบคุมไม่ อัตโนมัติ (Manual Control) แต่ทฤษฎีระบบควบคุมจะครอบคลุมเฉพาะการวิเคราะห์และออกแบบ ระบบ ควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control) เท่านั้น เช่น ระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Cruise Control) ระบบ ควบคุมยังอาจแบ่งออกได้เป็นระบบควบคุมวงเปิด (Open-Loop Control) คือ ระบบ ควบคุมที่ไม่ได้ใช้ สัญญาณจากเอาต์พุต มาบ่งชี้ถึงลักษณะการควบคุม ส่วนระบบควบคุมวงปิด (Closed-Loop Control) หรือ ระบบป้อนกลับ (Feedback Control) นั้นจะใช้ค่าที่วัดจากเอาต์พุต มาคำนวณค่าการควบคุม นอกจากนี้ยังอาจ แบ่งได้ตามคุณลักษณะของระบบ เช่น เป็นเชิงเส้น (Linear) ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) แปรเปลี่ยนตาม เวลา (Time-Varying) ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-Invariant) และเวลาต่อเนื่อง (Continuous Time) เวลาไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Time)



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมการปล่อยจรวดและยานอวกาศ

ระบบควบคุมเป็นกระบวนการที่ใช้ในการควบคุมเอาต์พุตของกระบวนการที่ต้องการควบคุม ตัวอย่างเช่น เครื่องปรับอากาศจะมีกระบวนการที่ใช้ปรับความเย็นของเครื่องปรับอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิของห้องคงที่ในช่วงที่ผู้ใช้ต้องการ ง่าย ๆ ของการควบคุมโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2 ระบบต้องการที่จะควบคุมระดับน้ำในถังให้คงที่ โดยกำหนดว่าระบบไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เข้าถังได้ แต่สามารถควบคุมอัตราการไหลออกของน้ำได้ ดังนั้นเมื่อต้องการควบคุมระดับน้ำในถังจะสามารถทำได้โดยการปรับอัตราการไหลออกของน้ำให้สัมพันธ์กับระดับน้ำในถัง คือเมื่อระดับน้ำในถังสูงกว่าจุดที่ต้องการ ระบบต้องเปิดให้น้ำไหลออกมากขึ้น และเมื่อระดับน้ำต่ำกว่าที่ต้องการ ระบบต้องเปิดให้น้ำไหลออกน้อยลง จะเห็นว่าระบบนี้เป็นระบบที่ซึ่งคนควบคุมนั้นคือคนเปรียบเสมือนเป็นตัวควบคุม (Controller) และวิธีการ ควบคุมคือการเปิดวาล์วให้น้ำไหลออกมากหรือน้อย



รูปที่ 2.2 การควบคุมระดับน้ำในถังให้คงที่

ในระบบควบคุมระบบแทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามี ลูกศรเข้าและออก โดยลูกศรเข้าหมายถึง สัญญาณอินพุต (input) หรือเป้าหมาย (objectives) ลูกศรออกหมายถึงเอาต์พุต (output) หรือผล ลัพธ์ (results) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ชนิดของระบบควบคุมสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.1 Static or Dynamic Systems ระบบคงตัวคือระบบที่สัญญาณออกที่เวลา  $t_1$  ขึ้นกับสัญญาณ เข้าที่เวลา  $t_1$  เท่านั้น และไม่ขึ้นกับสัญญาณเข้าในอดีตหรือในภายหน้าอาจเรียกว่าเป็น ระบบไม่มีความจำ (zero-memory) เช่น วงจรตัวต้านทาน (resistive network) ถ้าสัญญาณออกขึ้นกับสัญญาณเข้าในอดีตจะเรียกว่าระบบพลวัต และมีความจำ (memory) ระบบที่ประกอบด้วยส่วนประกอบซึ่งสามารถเก็บพลังงานได้ เรียกว่า ระบบพลวัต

2.1.2 Continuous-Time or Discrete-time Systems ระบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous-Time system) อธิบายได้ด้วย สมการเชิงอนุพันธ์ คือสัญญาณเข้า และสัญญาณออก มีค่าทุกเวลา ไม่ใช่แค่ เฉพาะที่ ช่วงเวลาบางช่วง เนื่องจากเวลาเป็นสิ่งที่ต่อเนื่องกัน ส่วนใหญ่ ระบบกายภาพเป็นระบบเวลาต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามเหตุการณ์ที่สนใจ อาจเกิดในแต่ละช่วงของเวลา ถ้าสัญญาณเข้า และสัญญาณออกไม่เปลี่ยนแปลงใน ระหว่างช่วงเวลาอาจวิเคราะห์ระบบเป็นระบบเวลาดีสครีต (Discrete time system) และมีแบบจำลองของระบบเป็นสมการผลต่างสืบเนื่อง (difference equation)

2.1.3 Linear or Non-Linear Systems ระบบเชิงเส้นอธิบายได้ด้วย สมการเชิงอนุพันธ์ของสัญญาณ เข้าและสัญญาณออกมีกำลังหนึ่งเท่านั้นและที่สำคัญที่สุดคือ ระบบเป็นไปตามทฤษฎีของการทับซ้อน (Superposition theorem) นั่นคือถ้า  $y_1(t)$  เป็นสัญญาณออก เนื่องจากสัญญาณเข้า  $r_1(t)$   $y_2(t)$  เป็นสัญญาณออก เนื่องจากสัญญาณเข้า  $r_2(t)$  สัญญาณออกที่เกิดจากสัญญาณ  $r_1(t)$  และ  $r_2(t)$  รวมกันมีค่าเท่ากับสัญญาณออก เนื่องจาก สัญญาณเข้า  $r_1(t)+r_2(t)$  เนื่องจากภาวะไม่เชิงเส้นอาจเกิดขึ้นได้หลายวิธี และไม่สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว นอกจากนั้น ทฤษฎีของการทับซ้อน จะใช้ กับ ระบบไม่เชิงเส้นไม่ได้ ภาวะไม่เชิงเส้นอาจทำให้เกิดผลหลายอย่างกับระบบ รวมถึงการแกว่งแบบกระตุ้นตัวเอง (self-excited oscillation) แต่บางครั้งภาวะไม่เชิงเส้นถูกนำมาใช้ในระบบควบคุม เช่น การควบคุมแบบเปิด-ปิด (ONOFF control) ระบบจะเป็นเชิงเส้นถ้าส่วนประกอบในระบบไม่เปลี่ยนลักษณะสมบัติไปตามขนาดของสัญญาณเข้า อย่างไรก็ตามความเป็นเชิงเส้นเป็นการประมาณเท่านั้น เนื่องจากส่วนประกอบจะเปลี่ยนลักษณะถ้า สัญญาณเข้าใหญ่มาก ดังนั้นเมื่อพูดถึงระบบเชิงเส้นหมายถึงที่ขนาดปกติของสัญญาณ

2.1.4 Lumped or Distributed Parameters ระบบแบบพารามิเตอร์เป็นกลุ่มก้อน (Lumped Parameters) อธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์ธรรมดาเงื่อนไขข้อนี้เป็นจริงถ้าขนาดของระบบเล็กเมื่อเทียบกับ ความยาวคลื่น (wave length) ของความถี่ที่สำคัญต่อระบบ ระบบแบบพารามิเตอร์กระจาย (Distributed Parameters) แสดงโดยสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีเวลา และพิกัดอวกาศ (space coordinates) เป็นตัวแปรอิสระ ตัวแปรที่สำคัญของระบบกระจายไปทั่วอวกาศ และขึ้นกับเวลาและพิกัดอวกาศ (space coordinates) ในระบบใหญ่ ๆ แบบจำลองของระบบอาจประกอบด้วย พารามิเตอร์กลุ่มก้อนและพารามิเตอร์กระจาย ในเวลาเดียวกัน เช่น ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system) ระบบโทรศัพท์ (Telephone system) ระบบสื่อสาร

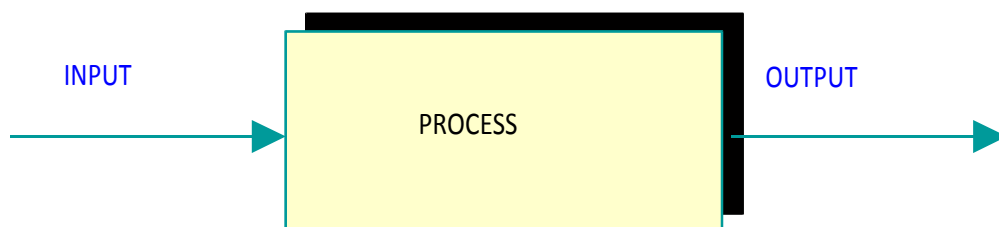
(Communication system) ซึ่งเครื่องมือที่สถานีเป็นแบบพารามิเตอร์กลุ่มก้อน แต่การติดต่อระหว่างสถานีเป็นแบบพารามิเตอร์กระจาย การวิเคราะห์ระบบสามารถแยกทำเป็นคนละระบบได้

2.1.5 Time-Varying or Time-invariant Systems ระบบที่มีรูปแบบซึ่งเขียนได้ด้วยสมการอนุพันธ์และมีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงตัวไม่แปรตามเวลา (time invariant) ระบบแบบคงที่ เกิดขึ้นเมื่อส่วนประกอบของระบบ และรูปแบบการต่อส่วนประกอบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นระบบที่ไม่ขึ้นกับสิ่งแวดล้อมอาจพิจารณาว่าเป็นแบบคงที่ได้ ส่วนระบบที่มีพารามิเตอร์ของสมการอนุพันธ์แปรตามเวลา เรียกว่า ระบบแปรตามเวลาตัวอย่างของระบบที่แปรตามเวลาได้แก่ ระบบควบคุมของเครื่องบินซึ่งพารามิเตอร์มีค่าแตกต่างกันมากที่ระดับน้ำทะเลและที่ความสูง 40,000 ฟุต

2.1.6 Deterministic or Stochastic Systems ระบบดีเทอร์มินิสติกคือ ระบบที่พารามิเตอร์และ สัญญาณเข้ามีค่าแน่นอน(ไม่สุ่ม) ส่วนระบบสโตคาสติกคือระบบที่มีลักษณะของ ความสุ่ม (randomness) ในพารามิเตอร์หรือสัญญาณเข้า

ระบบควบคุม (Control system) มีโครงสร้าง 2 รูปแบบคือ

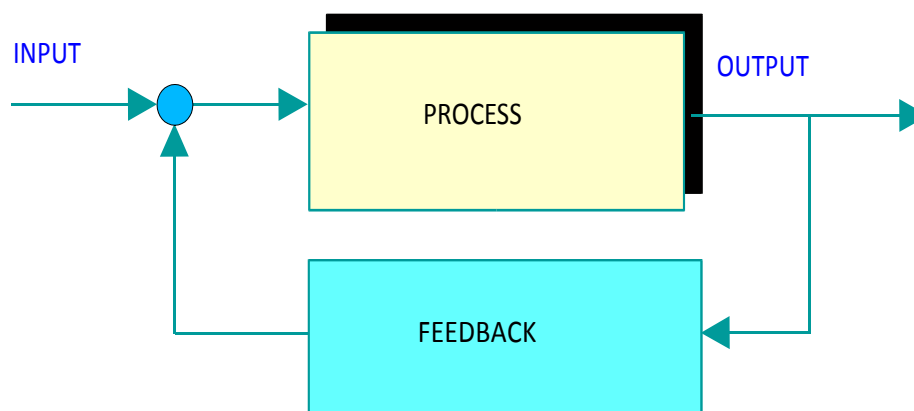
1)ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop control system) เป็นระบบควบคุมที่ไม่มีนำเอาต์พุตการ ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับอินพุตจึงง่ายต่อการสร้างและประหยัด แต่ ค่าเอ ้าต์พุตจะไม่มีผลต่อการควบคุม ขบวนการของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพระบบเปิด

2) ระบบควบคุมแบบปิด (Close loop control system) เป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ (Feedback) โดยนำเอาเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะถือเป็น ความผิดพลาด เพื่อเอาสัญญาณนี้ป้อนเข้าระบบแล้วตัวควบคุมจะนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบดังแสดงในรูปที่ 2.4





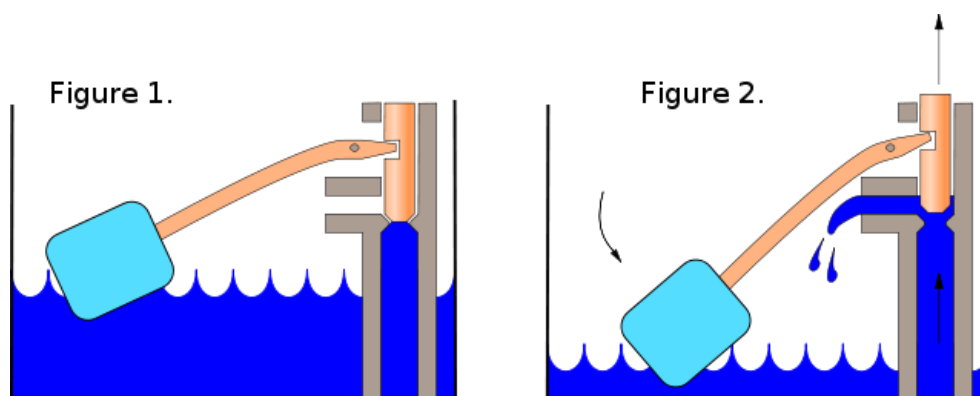
รูปที่ 2.4 แผนภาพระบบปิด

การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมีจุดมุ่งหมาย เพื่อให้กระบวนการที่เราต้องการควบคุมมีคุณลักษณะที่ต้องการ 3 อย่างต่อไปนี้ตรงตามข้อกำหนดคือ

- Transient Response เป็นการตอบสนองของเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอินพุต โดยเป็น ช่วงสภาวะของการเปลี่ยนแปลงก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่
- Steady-State Response เป็นสภาวะหลังจาก Transient response เป็นสภาพที่ผลการตอบสนองได้ตามคำสั่งหรือตามความต้องการ สำหรับระบบที่เสถียรเท่านั้น
- Stability ระบบที่เสถียรคือระบบที่ให้เอาต์พุตที่มีค่าจำกัดเมื่อ ป้อนอินพุตที่มีค่าจำกัดให้กับระบบ

## 2.2 ประวัติศาสตร์และการพัฒนาของทฤษฎีระบบควบคุม

ระบบควบคุมในยุคโบราณ การใช้ระบบควบคุมวงปิด นั้นมีมาแต่โบราณกาล ตัวอย่างเช่น นาฬิกาน้ำของกรีก ซึ่งมีการใช้ลูกลอยในการควบคุมระดับน้ำในถัง อุปกรณ์ที่ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้น ของการใช้ระบบควบคุมป้อนกลับในวงการอุตสาหกรรม ก็คือ ลูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Governor หรือเรียก Fly-Ball Governor) ในการควบคุมความเร็วในการหมุน เครื่องจักรไอน้ำที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย เจมส์ วัตต์ ในปี ค.ศ. 1788



รูปที่ 2.5 ลูกลอย(ballcock) รูปแบบหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำในถังเก็บน้ำ

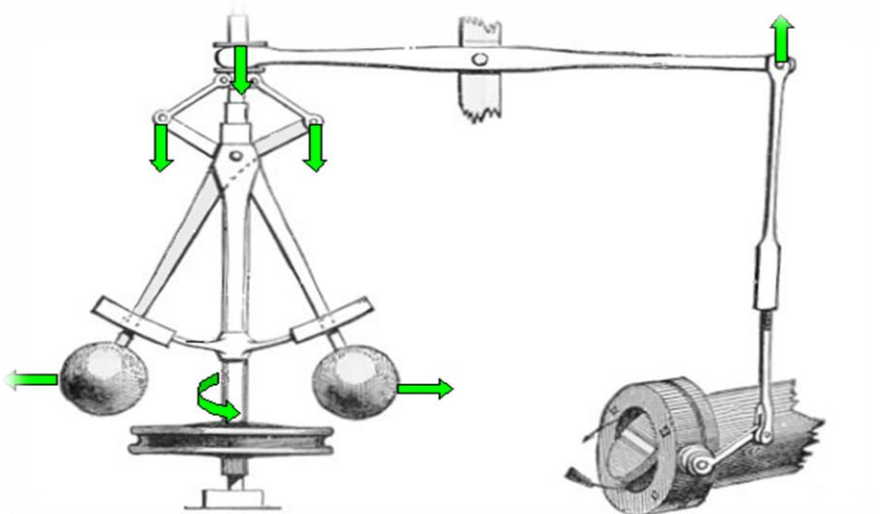
### 2.2.1 จุดกำเนิดของทฤษฎีระบบควบคุม

ในยุคก่อนหน้านี้ การออกแบบระบบควบคุมต่าง ๆ นั้น เป็นไปในลักษณะลองผิดลองถูก ไม่ได้มีการใช้คณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ ออกแบบแต่อย่างใด จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1840 นักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษ จอร์จ แอร์ ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ควบคุมทิศทางของกล้องดูดาว โดยอุปกรณ์นี้จะหมุนกล้องดูดาว เพื่อชดเชยกับการหมุนของโลกโดยอัตโนมัติ ในระหว่างการออกแบบ แอร์ได้สังเกตถึงความไม่เสถียร (Instability) ของระบบป้อนกลับ จึงใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบนี้เป็นหัวใจสำคัญของทฤษฎีระบบควบคุม

### 2.2.2 ทฤษฎีเสถียรภาพ

ในปี ค.ศ. 1868 เจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ เป็นบุคคลแรก ที่ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพของ ลูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของ เจมส์ วัตต์ โดยใช้แบบจำลองสมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้น ทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นของแมกซ์เวลล์นี้ พิจารณาเสถียรภาพของระบบจากรากของสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation)

ของระบบ ต่อมาในปี ค.ศ. 1892 เลียปูนอฟ ได้ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้น และสร้างทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ (Lyapunov Stability) แต่ทฤษฎีของเลียปูนอฟนี้เป็นทฤษฎีที่สำคัญที่ไม่ได้รับความสนใจ จนกระทั่งหลายสิบปีต่อมา



รูปที่ 2.6 ลูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

แสดงหลักการทำงานของลูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เมื่อเครื่องจักรหมุนเร็วเกินกว่าค่าที่ต้องการลูกตุ้มจะเบนออกจากแกนกลางส่งผลให้ล้นควบคุมไอน้ำปล่อยไอน้ำน้อยลง ในทางกลับกันถ้าเครื่องยนต์หมุนช้าเกินไป ลูกตุ้มจะหุบเข้าหาแกนกลางส่งผลให้ล้นควบคุมไอน้ำปล่อยไอน้ำเข้าสู่เครื่องจักรมากขึ้น

### 2.2.3 ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม

ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical Control) หมายถึง ระบบควบคุมที่ออกแบบและวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ (หรือโดเมนการแปลงฟูรีเย ) และโดเมนการแปลงลาปลาซ โดยใช้แบบจำลองในรูปของ ฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer Function) โดยไม่ได้ใช้ข้อมูลรายละเอียดของไดนามิกส์ภายในของระบบ (Internal System Dynamic)

พัฒนาการของทฤษฎีระบบควบคุมในช่วงนี้นั้น ส่วนใหญ่พัฒนาขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้งานในทางทหารและทางระบบสื่อสาร อันเนื่องมาจากสงครามโลกครั้งที่สอง และ การขยายตัวของโครงข่ายสื่อสารโทรศัพท์

#### 2.2.4 พัฒนาการเพื่อใช้งานในระบบโครงข่ายโทรศัพท์

ในช่วงยุคที่มีการขยายตัวของระบบสื่อสารโทรศัพท์นั้น ระบบสื่อสารทางไกลมีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณด้วยหลอดสุญญากาศ ในปี ค.ศ. 1927 แนวความคิดและประโยชน์ของระบบป้อนกลับแบบลบ ได้ถูกนำเสนอในรูปของ อุปกรณ์ขยายสัญญาณป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback Amplifier) โดย เอช. เอส. แบล็ก แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพของ ระบบขยายสัญญาณตามทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ โดยใช้วิธีของ เราท์-ฮิวริทซ์ (Routh-Hurwitz) นั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากความซับซ้อนของระบบ วิศวกรสื่อสารของ Bell Telephone Laboratories จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ โดยในปี ค.ศ. 1932 แฮร์รี ไนควิสต์นำเสนอ เกณฑ์เสถียรภาพของไนควิสต์ (Nyquist Stability Criterion) ซึ่งใช้วิธีการพล็อตกราฟเชิงขั้ว ของผลตอบสนองความถี่ตลอดดวงรอบ (Loop Frequency Response) ของระบบ ต่อมาในปี ค.ศ. 1940 เฮนดริค โบดี ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยขอบเขตอัตราขยาย (Gain Margin) และขอบเขตมุม (Phase Margin) จากกราฟระหว่างขนาดและมุม (Phase) ของผลตอบสนองความถี่ เรียกว่า โบดีพล็อต (Bode Plot)

#### 2.2.5 พัฒนาการเพื่อการใช้งานทางด้านการทหาร

ปัญหาหลายปัญหาในทางทหาร เช่น ปัญหาการนำร่องการเดินเรืออัตโนมัติ ปัญหาการเล็งเป้าโดยอัตโนมัติ นั้นเป็นแรงผลักดันสำคัญให้เกิดการพัฒนาทางทฤษฎีระบบควบคุมที่สำคัญหลายอย่าง ในปี ค.ศ. 1922 มินอร์สกี (N.Minorsky) ได้กำหนดและวิเคราะห์กฎของระบบควบคุมพีไอดี หรือ สัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative) ซึ่งยังเป็นที่ยอมรับใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพื่อใช้ในการนำร่องการเดินเรือ ปัญหาที่สำคัญในช่วงนั้นคือ การเล็งเป้าของปืนจากเรือหรือเครื่องบิน ซึ่งในปี ค.ศ. 1934 ฮาเซน (H.L.Hzen) ได้บัญญัติคำสำหรับประเภทปัญหาการควบคุมกลไกนี้ว่า กลไกเซอร์โว (Servomechanisms) การวิเคราะห์และออกแบบนั้นก็ใช้วิธีการบนโดเมนความถี่ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1948 อีแวนส์ (W. R. Evans) ซึ่งทำงานกับปัญหาทางด้านการนำร่องและควบคุมเส้นทางบิน ซึ่งส่วนใหญ่ยังเป็นระบบที่ไม่เสถียร ได้ประสบกับปัญหาการวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนของความถี่ จึงได้หันกลับไปศึกษาถึงรากของสมการคุณลักษณะ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์บนโดเมนการแปลงลาปลาซ และได้พัฒนาวิธี ทางเดินราก (Root Locus) ในการออกแบบระบบ

#### 2.2.6 ระบบควบคุมสมัยใหม่

ระบบควบคุมสมัยใหม่ (Modern Control) หมายถึง ระบบควบคุมที่ไม่ได้ใช้เทคนิคในการออกแบบแบบดั้งเดิม คือ จากรากของสมการคุณลักษณะ และอยู่บนโดเมนความถี่ แต่เป็นการออกแบบ โดยมีพื้นฐานจากแบบจำลองสมการอนุพันธ์ของไดนามิกส์ของระบบ และเป็นการออกแบบอยู่บนโดเมนเวลา

แรงผลักดันของพัฒนาการจากระบบควบคุมแบบดั้งเดิม มาสู่ระบบควบคุมสมัยใหม่ มีอยู่หลัก ๆ สองประการคือ

ข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบดั้งเดิมต้องงานด้านอวกาศยาน จากความสำเร็จในการส่งดาวเทียมสปุตนิก 1 ของสหภาพโซเวียตในปี ค.ศ. 1957 นั้นกระตุ้นให้เกิดความตื่นตัวของการประยุกต์ใช้งานทางด้านอวกาศยาน ความสำเร็จของโซเวียตนั้นเนื่องมาจากพัฒนาการทางด้านทฤษฎีระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่ได้รับความสนใจมากนักจากประเทศตะวันตก เนื่องจากความล้มเหลวในการใช้เทคนิคต่าง ๆ ของระบบควบคุมแบบดั้งเดิม กับงานด้านอวกาศยาน ซึ่งระบบส่วนใหญ่เป็นระบบหลายตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Multivariable System) จึงมีการหันกลับมาพิจารณาการวิเคราะห์จากปัญหาดั้งเดิม ในรูปของแบบจำลองสมการอนุพันธ์ของระบบ

### 2.2.7 การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์กับงานระบบควบคุม

#### ระบบควบคุมดิจิทัล

พัฒนาการของคอมพิวเตอร์ มีส่วนสำคัญในการพัฒนาทฤษฎีต่างๆ ของระบบควบคุม เนื่องจากทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์ควบคุมที่สามารถทำงานซับซ้อนได้ รวมทั้งการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณในการออกแบบกฎของการควบคุม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบควบคุมแบบต่างๆ ขึ้นอย่างมากมาย

ด้วยเหตุดังกล่าว จึงมีการพัฒนาทฤษฎีระบบควบคุม จากหลายแง่มุม

จากความพยายามในการใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นดิจิทัล เพื่อการควบคุมระบบซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบอนาล็อก จึงส่งผลให้มีการพัฒนาทางทฤษฎีระบบควบคุมดิจิทัล (Digital Control) โดยในปี ค.ศ. 1952 จอห์น รากซซินี (J.R. Ragazzini) , แฟรงคลิน (G Franklin) และ ซาเดห์ (L.A. Zadeh ผู้คิดค้นฟัซซีลอจิก) ที่มหาวิทยาลัยโคลัมเบีย ได้พัฒนาทฤษฎีระบบแบบชักข้อมูล (Sampled Data Systems) การใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมนั้น ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1959 ที่โรงกลั่นน้ำมันพอร์ต อาเธอร์ (Port Arthur) ในรัฐเท็กซัส

นอกจากนั้นแล้วแนวความคิดของการควบคุมที่ซับซ้อนขึ้นโดยมีการรวม ข้อกำหนดความต้องการทางด้านประสิทธิภาพ (Performance) ในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งเรียกว่า ระบบควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal Control) รากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมแบบเหมาะสมที่สุดนี้มีมายาวนานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1696 จากหลักของความเหมาะสมที่สุด (Principle of Optimality)

ในปัญหา บราคิสโตโครน (Brachistochrone Curve) และแคลคูลัสของการแปรผัน (Calculus of Variations) ในปี ค.ศ. 1957 ริชาร์ด เบลแมน ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ กำหนดการพลวัตของเขาในการแก้ปัญหา ระบบควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ต่อมาในปี ค.ศ. 1958 พอนเทรียกิน (L.S. Pontryagin) ได้

พัฒนา หลักการมากที่สุด (Maximum Principle หรือบางครั้งก็เรียก Minimum Principle) สำหรับแก้ปัญหาในรูปของแคลคูลัสของการแปรผัน แบบเวลาต่อเนื่อง

การสังเกตถึงผลกระทบของ สัญญาณรบกวน ต่อประสิทธิภาพของระบบควบคุมนั้นมีมาตั้งแต่ในช่วงระบบควบคุมยุคดั้งเดิม เช่นในช่วง สงครามโลกครั้งที่สอง ในการพัฒนาระบบควบคุมสำหรับเรดาร์ติดเครื่องบิน เพื่อควบคุมการยิง ที่ห้องทดลองเรดิเอชัน (Radiation Lab) ที่ เอ็มไอที, ฮอลล์ (A.C. Hall) ได้ประสบปัญหาในการออกแบบ เขาได้สังเกตถึงผลกระทบจากการออกแบบที่ไม่ได้คำนึงถึงสัญญาณรบกวนต่อประสิทธิภาพของระบบ ถึงแม้ว่าจะมีการคำนึงถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวน แต่ก็ไม่ได้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณรบกวนในการวิเคราะห์แต่อย่างใด จนกระทั่ง นอร์เบิร์ต วินเนอร์ ได้จำลองสัญญาณรบกวน โดยใช้แบบจำลองกระบวนการสโตแคสติก หรือ แบบจำลองทางสถิติ แบบเวลาต่อเนื่อง ในการพัฒนาระบบเล็งเป้าและควบคุมการยิงปืนต่อต้านอากาศยาน โดยใช้ข้อมูลจากเรดาร์ ซึ่งงานของเขาได้ถูกเก็บเป็นความลับ จนถึงปี ค.ศ. 1949 ในช่วงเดียวกันในปี ค.ศ. 1941 คอลโมโกรอฟ ก็ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับระบบเวลาไม่ต่อเนื่องขึ้น ระบบควบคุมที่ใช้แบบจำลองสโตแคสติกนี้ในการวิเคราะห์ จะเรียกว่า ระบบควบคุมสโตแคสติก (Stochastic control)

การวิเคราะห์และควบคุมระบบบนโดเมนเวลา โดยใช้แบบจำลอง ตัวแปรสถานะ หรือ แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space) นั้นเป็นหัวใจของทฤษฎีระบบควบคุมสมัยใหม่ รูดอล์ฟ อีมิว คาลมาน และ Bellman นั้นถือได้ว่าเป็นบุคคลที่มีส่วนสำคัญในการพัฒนาทฤษฎีระบบควบคุมโดยใช้แบบจำลองตัวแปรสถานะนี้ โดยที่ในปี ค.ศ. 1960 คาลมานได้นำทฤษฎีเสถียรภาพของ เลียปูนอฟ มาใช้ในการออกแบบระบบ ซึ่งเป็นผลให้ผลงานของ เลียปูนอฟ กลับมาได้รับความสนใจ นอกจากนี้แนวทางใหม่นี้ยังสามารถตอบคำถามเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของตัวระบบได้ ได้แก่ สภาพควบคุมได้ (Controllability) สภาพสังเกตได้ (Observability) ผลสัมฤทธิ์เล็กสุดเฉพาะกลุ่ม (Minimal Realization) และยังนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมแบบใหม่ เช่น การวางขั้ว (Pole Placement) ตัวควบคุมอิงตัวสังเกต (Observer-Based Controller) และตัวควบคุมกำลังสองเชิงเส้นเหมาะสมที่สุด (Optimal Linear Quadratic Regulator) คาลมานได้พัฒนาวิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด จากแบบจำลองปริภูมิสถานะ ในรูปของปัญหา ระบบเชิงเส้นคงค่าแบบเหมาะสมที่สุดตามสมการกำลังสอง หรือ LQR (Linear Quadratic Regulator) ในปีเดียวกันนี้ คาลมานได้นำเสนอผลงานของเขาในการประยุกต์ใช้แบบจำลองตัวแปรสถานะนี้เข้ากับแนวความคิดทางด้านสโตแคสติกของวินเนอร์ และคิดค้นสิ่งที่เรารู้จักกันในชื่อ ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) ขึ้นมา โดยการใช้งานจริงครั้งแรกของตัวกรองคาลมาน นั้นได้ถูกประยุกต์เป็นส่วนหนึ่งของระบบนำร่องใน โครงการอพอลโล ตั้งแต่ นั้นมาตัวกรองคาลมาน ก็ได้ถูกประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

ในปัจจุบันแนวทางการวิเคราะห์และควบคุมระบบบนโดเมนเวลา โดยใช้แบบจำลองตัวแปรสถานะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานวิศวกรรมห้วงอากาศอวกาศ (Aerospace Engineering) การควบคุมกระบวนการ (Process Control) และเศรษฐมิติ (Econometrics)



รูปที่ 2.7 เซกเวย์ (Segway)

รูปที่ 2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเพนดูลัมผกผันสามารถประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมการทรงตัวของพาหนะอย่าง เซกเวย์ (Segway) ได้



รูปที่ 2.8 หัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์

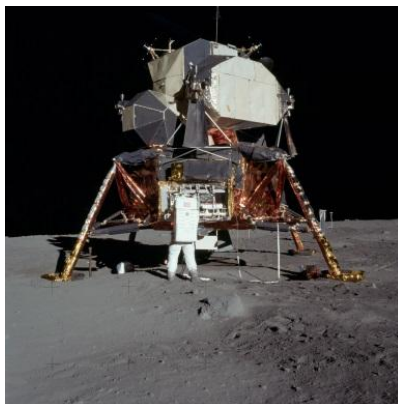
รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ที่ต้องการความแม่นยำและความละเอียดสูงอย่างหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ จำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ ทนทานต่อการรบกวนต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี อาทิเช่น การสั่นสะเทือน, ผลกระทบจากกระแสไฟฟ้าในระบบเกิน เป็นต้น



รูปที่ 2.9 อาซิโม

รูปที่ 2.9 ทฤษฎีระบบควบคุมมีส่วนสำคัญอย่างมากในการพัฒนาระบบการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ที่มีความซับซ้อนสูงอย่างอาซิโม

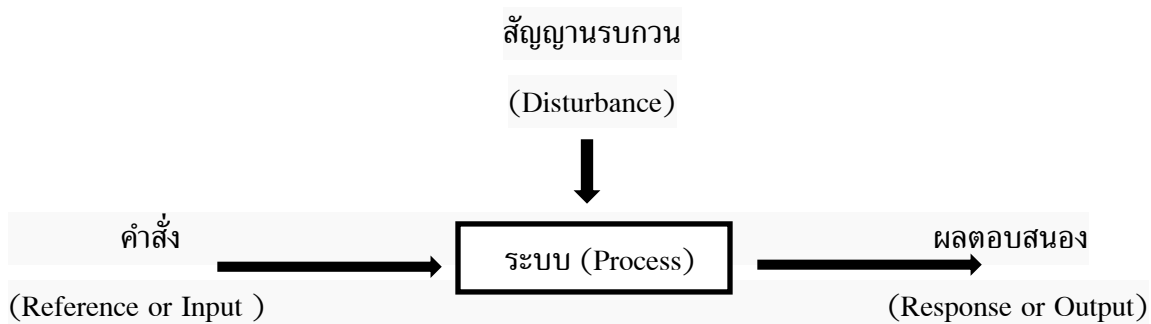




รูปที่ 2.10 อพอลโล่ 11

รูปที่ 2.10 ตัวกรองคาสมานนำร่อง ลูนาร์โมดูลของ อพอลโล่ 11 สู่พื้นผิวดวงจันทร์

### 2.3 ความหมายและคำนิยามของระบบควบคุม



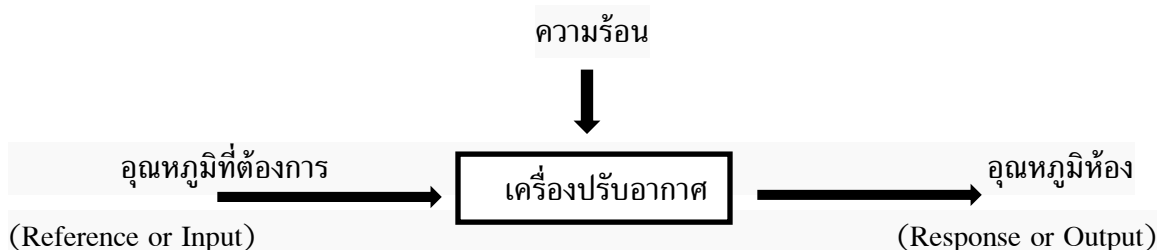
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของระบบควบคุม

ระบบ (System) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ได้รวบรวมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกัน

ควบคุม (Control) หมายถึง การบังคับสั่งการ

ระบบควบคุม (Control System) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ได้รวบรวมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อใช้บังคับหรือสั่งการ เพื่อให้สิ่งใดสิ่งหนึ่งเป็นไปตามความต้องการ

ตัวอย่างเช่น การควบคุมอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศ



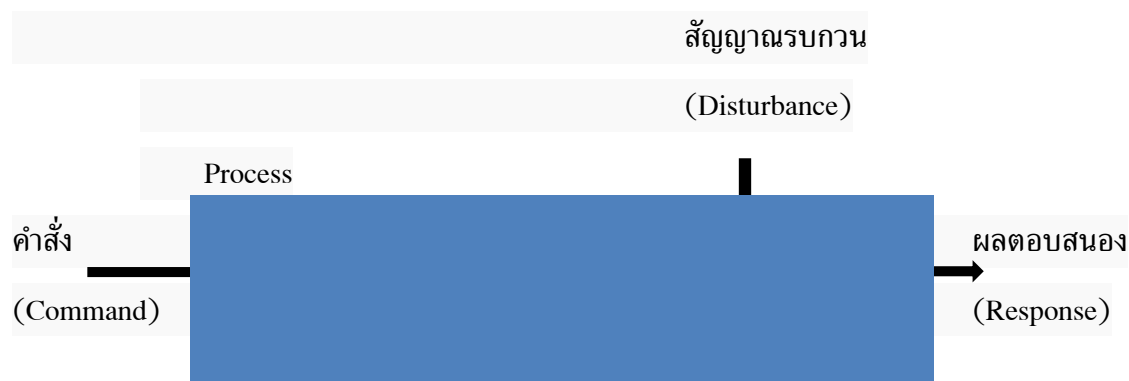
รูปที่ 2.12 การควบคุมอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศ

หลักการของระบบคือ การทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ คือ การนำเอาความร้อนจากที่ต้องการทำความเย็น (ในห้อง) ถ่ายเทไปสู่ที่ที่ไม่ต้องการทำความเย็น (นอกอาคาร) โดยผ่านตัวกลางคือ สารทำความเย็นที่อยู่ในระบบปรับอากาศ

## 2.4 รูปแบบของการควบคุม

### 2.4.1 ระบบควบคุมแบบวงจรเปิด (Open Loop Control)

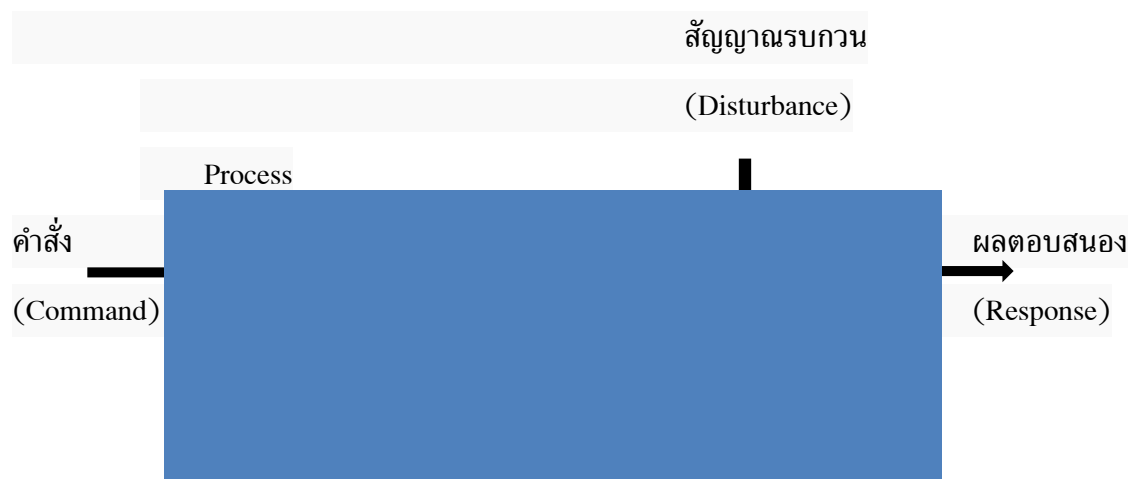
ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมวงจรเปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.13 ในการควบคุมแบบวงจรเปิด ตัวควบคุม (Controller) จะส่งสัญญาณป้อน (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (Plant) ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิง (Command or Referent) ที่รับมา โดยที่ตัวควบคุมจะอนุมานว่าเมื่อสิ่งที่ต้องการควบคุมได้รับสัญญาณป้อนแล้วนั้น ก็จะผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Response) ให้ได้ตามที่คาดหวังไว้โดยที่ไม่ต้องทำการตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตจริง ว่าเป็นไปตามคำสั่งหรือไม่



รูปที่ 2.13 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด

ตัวอย่างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบเปิด ได้แก่ ตู้อบไมโครเวฟ ที่มีลักษณะการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า โดยที่ไม่มีการตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกมาในรูปของสัญญาณไมโครเวฟนั้นว่าเป็นเท่าใดกันแน่ หรือออกมาได้เท่ากับที่ปรับตั้งไว้หรือไม่ ลักษณะการทำงานจึงเป็นวงรอบเปิด

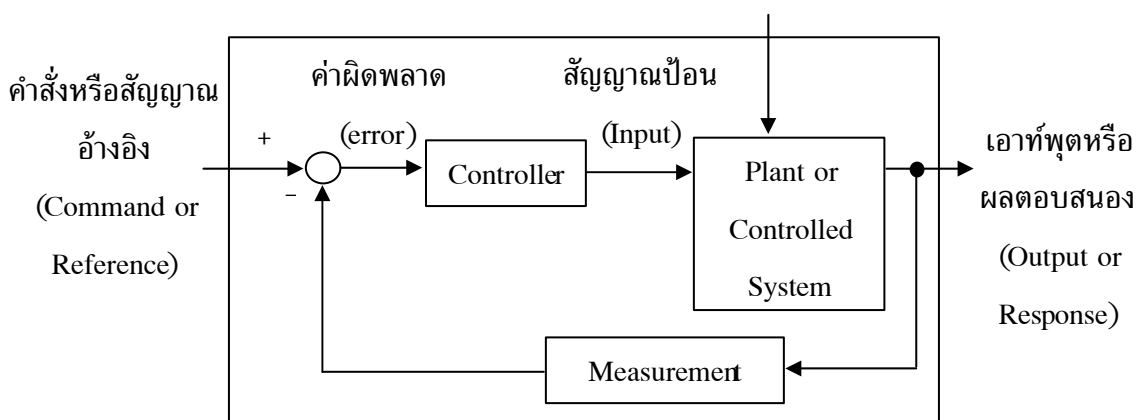
#### 2.4.2 ระบบควบคุมแบบวงจรรปิด (Closed Loop Control)



รูปที่ 2.14 ระบบควบคุมแบบวงจรรปิด

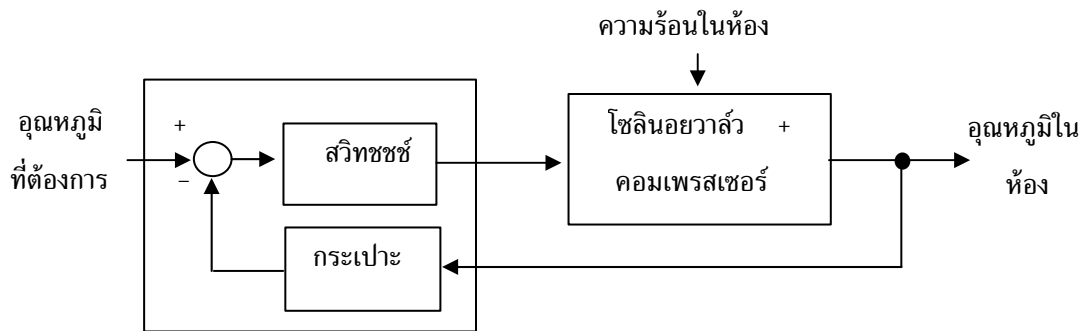
ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.14 ในการควบคุมแบบวงรอบปิด ตัวควบคุม (Controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent or Command) กับสัญญาณเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ (Measurement or Sensor) แล้วนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (System Under Controller or Plant) เพื่อที่จะให้ผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนองให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ (Command or Reference)

ระบบควบคุมแบบวงรอบปิดอาจจะเรียกได้อีก อย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ตามรูปที่ 2.15 ระบบนี้เป็นระบบควบคุมที่พยายามรักษาเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ โดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ แล้วนำค่าความแตกต่างไปใช้ในการควบคุมสัญญาณป้อนให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม



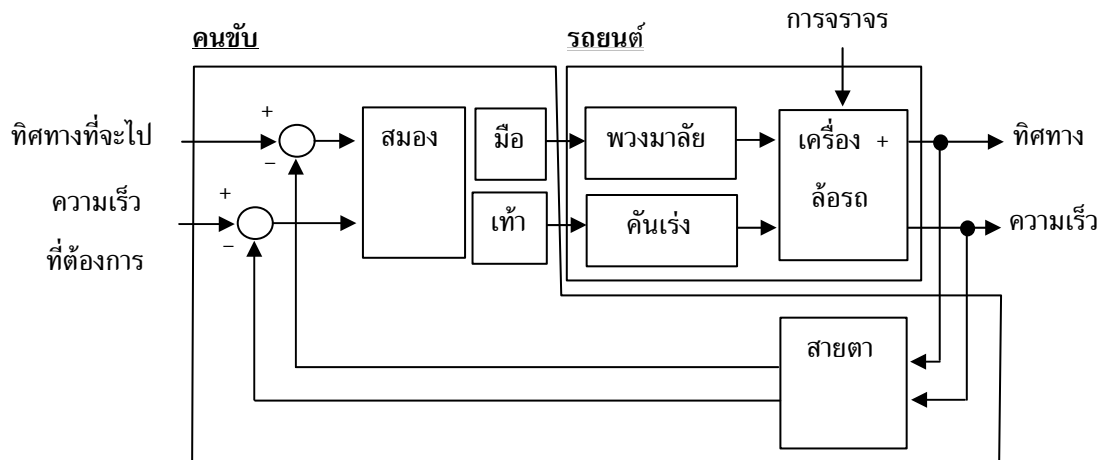
รูปที่ 2.15 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ตัวอย่างของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบปิดได้แก่ เตารีด ตู้เย็น หรือเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น เตารีดมีสวิตช์เป็นไบเมทัลที่โค้งตัวเมื่ออุณหภูมิรอบ ๆ ตัวมันสูงขึ้น และใช้การโค้งตัวนี้เป็นสวิตช์ตัดต่อการทำงานของฮีตเตอร์ การทำงานจึงเป็นวงรอบปิด ส่วนตู้เย็น หรือเครื่องปรับอากาศก็เช่นกัน มีเทอร์โมสตัทเป็นตัววัดอุณหภูมิภายในตู้และตัวเทอร์โมสตัทเองก็เป็นสวิตช์ควบคุมการตัดต่อคอมเพรสเซอร์ให้ทำงาน เมื่อคอมเพรสเซอร์ทำงานก็ทำให้เกิดความเย็น เป็นไปตามที่เทอร์โมสตัทตั้งค่าไว้ลักษณะการทำงานนี้เป็นไปตามรูปที่ 2.16



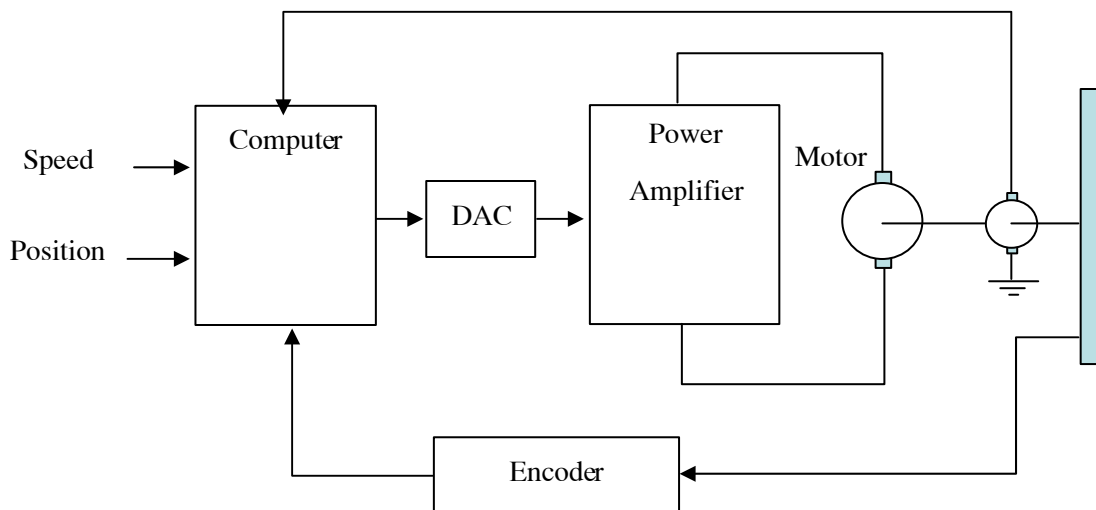
รูปที่ 2.16 ระบบอุณหภูมิของตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศ

พิจารณาระบบควบคุมกับการขับรถยนต์ ในรูปที่ 2.17 สามารถมองการขับรถยนต์นี้ได้ 2 ลักษณะคือ การควบคุมแบบวงรอบเปิด และการควบคุมแบบวงรอบปิด ถ้ามองเฉพาะตัวรถยนต์ ลักษณะการควบคุมความเร็วและทิศทางของรถยนต์จะเป็นแบบวงรอบเปิด เพราะตัวรถยนต์เองไม่มีการตรวจจับและบังคับความเร็วและทิศทางด้วยตัวของมันเองได้ มีเฉพาะตัวสั่งการคือพวงมาลัยในการปรับเปลี่ยนทิศทางและคันเร่งสำหรับเร่งความเร็วเท่านั้น ลักษณะการทำงานของรถยนต์จึงมองได้ว่าเป็นการควบคุมแบบวงรอบเปิด แต่ถ้าหากพิจารณาเมื่อมีคนขับเข้ามาด้วยแล้ว คนขับสามารถที่มองเห็นด้านหน้าของรถและสัมผัสได้ถึงความเร็วและตัวคนขับเองก็เป็นผู้บังคับและสั่งการ โดยใช้ เป้าหมายในการเดินทางและความเร็วที่ต้องการขับ เมื่อรวมสิ่งต่างๆ เหล่านี้เข้าไปด้วยจึงสามารถมอง ได้ว่าการขับรถยนต์โดยพิจารณาคนขับเข้าไปในวงรอบการควบคุมด้วยแล้ว ระบบนี้จึงเป็นระบบ ควบคุมแบบวงรอบปิด



รูปที่ 2.17 การขั้รณนด้

ลักษณะการทำงานของดีซีเซอร์โวมอเตอร์ตามรูปที่ 2.18 มีลักษณะที่ชัดเจนว่าเป็นการ ควบคุมแบบ วงรอบปิด สั้เกดได้จากการที่มีการตรวจจ้บและควบคุมทั้งตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ด้วยการควบคุม แรงดันที่จ้ายเข้าที่ขั้วของมอเตอร์



รูปที่ 2.18 การควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์

## 2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้ในระบบควบคุมมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกันเช่น ฟังก์ชันถ่ายโอน(Transfer Function) สมการสเตท(State variables) เป็นต้น ในขั้นนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนเท่านั้น

### 2.5.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematical Modeling)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) ที่ใช้ในระบบควบคุมพื้นฐาน ของระบบใด ๆ สามารถหาได้จาก

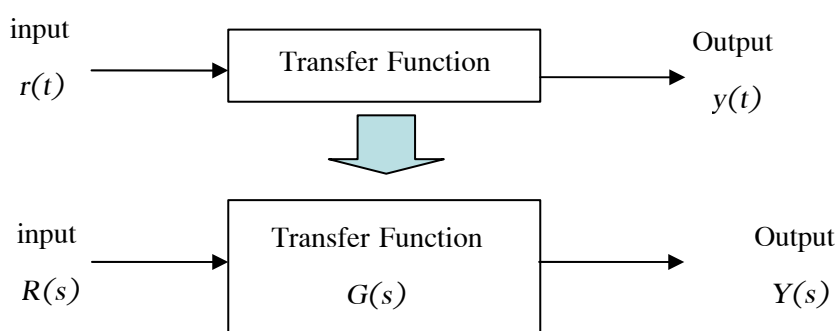
1) สมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของตัวแปรใด ๆ แล้วแปลงให้ อยู่ในรูปฟังก์ชันเอส(s-domain) ด้วยวิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace's Transform) ซึ่งในเบื้องต้นอาจจะสร้างขึ้นมา

จากสมการความสัมพันธ์ที่มีหลายตัวแปร แล้วทำให้เหลือเพียงแค่สมการความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรอินพุตกับเอาต์พุตของระบบเท่านั้น สุดท้ายจึงจัดให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน

2) ทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยอินพุตอย่างใดอย่างหนึ่ง บันทึกผลตอบสนองที่ได้ แล้วนำไปหาสมการความสัมพันธ์ด้วยวิธีการของการแสดงตัวระบบ (System Identification) ที่พบเจอบ่อยๆ ก็คือการทดสอบระบบด้วยผลตอบสนองเชิงความถี่ แล้วนำข้อมูลที่ได้ ไปสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนโดยตรง ซึ่งจะได้กล่าวถึงในภายหลังในเรื่องของแผนภาพโบด

## 2.5.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)

ฟังก์ชันถ่ายโอนสร้างขึ้นมาจาก สมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ แปลงสมการเหล่านั้นให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอสดีด้วยการแปลงลาปลาซ (Laplace's Transform) ด้วยค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ จัดสมการความสัมพันธ์ให้เหลือเพียงแค่ตัวแปรสองตัวคือตัวแปรอินพุตกับเอาต์พุตของระบบ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจึงหมายถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต โดยจะจำกัดการพิจารณาเฉพาะกับระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเท่านั้น ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ฟังก์ชันถ่ายโอน

## 2.6 บล็อกไดอะแกรม

การแทนระบบควบคุมด้วยบล็อกไดอะแกรม เป็นรูปแบบที่รวมเอาส่วนประกอบต่างๆ ของระบบที่มีการเชื่อมต่อพารามิเตอร์กันภายใน ซึ่งการเชื่อมต่อพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะมีลักษณะ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยหลายๆตัว ส่งผ่านค่าพารามิเตอร์ให้แก่ กันและกันภายในระบบเอง รวมถึงมี การส่งสัญญาณเข้าไปในระบบและออกจากระบบด้วยเช่นกัน การแทนระบบแบบนี้จะทำให้ เห็น ภาพรวมของ ระบบทั้งระบบ รวมทั้ง การเชื่อมต่อของสัญญาณต่าง ๆ ภายในระบบ และยังสามารดูย่อย รวมส่วนต่างๆ ให้กระชับเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุมได้อีกด้วย ส่วนประกอบหลักๆ ของ บล็อกไดอะแกรมมีด้วยกัน 3 อย่างคือ

### 1) ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function)

2) จุดรวมสัญญาณ (summing)

3) จุดตรวจวัดสัญญาณ (branching or sensing)

บล็อกไดอะแกรมจะเชื่อม ต่อกันด้วยลูกศรซึ่งจะใช้ สำหรับกำกับ ทิศทางการไหล ของข้อมูลหรือสัญญาณภายในระบบ รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะทั่วไปของ บล็อกไดอะแกรมของระบบ ควบคุมแบบปิด ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ

1) ตัวปรับเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณอินพุต ) (sA )

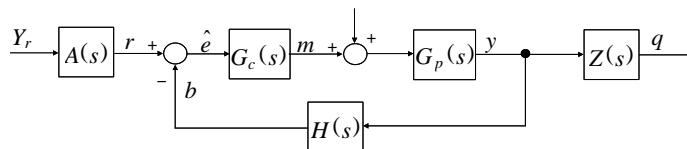
2) ตัวควบคุม ) (sG c)

3) สิ่งที่ต้องการควบคุม ) (sG p)

4) ตัวตรวจจับ ) (sH )

5) ตัวปรับเปลี่ยน สัญญาณเอาต์พุต ) (sZ)

ทุกฟังก์ชันถ่ายโอนเชื่อมต่อกันด้วยลูกศรที่กำกับทิศทางการไหลของ สัญญาณ รวมไปถึงมีการรวมสัญญาณและตรวจจับสัญญาณ ในระบบควบคุมในทางปฏิบัติ ตัว ปรับเปลี่ยนสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตอาจจะไม่มีใช้งานก็ได้ ระบบทั่วไปจึงมีฟังก์ชันถ่ายโอน หลักๆเพียงแค่สามส่วน สัญญาณอินพุตของระบบมี 2 สัญญาณคือ สัญญาณอ้างอิงของระบบ  $r$  และ สัญญาณรบกวนของระบบ  $w$  สัญญาณเอาต์พุตมีสัญญาณเดียวคือ  $q$  การทำงานของระบบควบคุม ตามบล็อกไดอะแกรมนี้ ก็คือการทำงานของระบบควบคุมแบบปิดที่ได้ศึกษามาแล้วก่อนหน้านี้ เพียงแต่จะเห็นบล็อกต่างๆเป็นสมการทางคณิตศาสตร์และสามารถนำไปใช้ในการคำนวณต่างๆได้ อย่างชัดเจนต่อไป

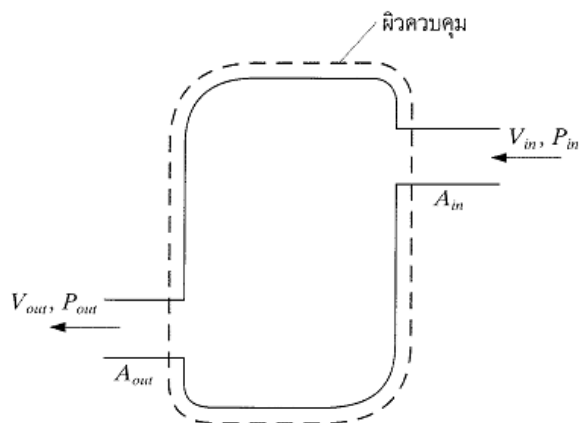


รูปที่ 2.20 ลักษณะทั่วไปของบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปิด

## 2.7 กฎฟิสิกส์

การวิเคราะห์การไหลของของไหล เป็นการใช้กฎพื้นฐานทางฟิสิกส์ในการสร้างสมการควบคุมต่างๆ เพียงแต่ได้ปรับเปลี่ยนกฎพื้นฐานเล็กน้อยเพื่อให้สอดคล้องกับธรรมชาติของของไหล กฎพื้นฐานที่สำคัญสำหรับระบบการไหล (The Basic Laws for Flow System)





รูปที่ 2.21 การไหลเข้าออกปริมาตรควบคุมอย่างง่าย

### 2.7.1 กฎอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass)

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับอัตราสุทธิของการไหลเข้าปริมาตรของมวล

### 2.7.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น (Conservation of Linear Momentum)

อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในปริมาตรควบคุมย่อมเท่ากับแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมบวกกับอัตราสุทธิของการไหลเข้าปริมาตรควบคุมของโมเมนตัม

### 2.7.3 กฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of Angular Momentum)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับแรงบิดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมบวกกับอัตราสุทธิของการไหลเข้าของโมเมนตัมเชิงมุมที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมซึ่งมาพร้อมกับการไหลตัวของมวลที่ผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม

### 2.7.4 กฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุมในปริมาตรควบคุม ย่อมเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนและงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าปริมาตรควบคุมบวกกับอัตราสุทธิของการไหลเข้าของพลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมซึ่งมาพร้อมกับการไหลตัวของมวลที่ผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม

## 2.8 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

สามารถกระทำได้หลายวิธีดังนี้

### 2.8.1 การสร้างสมการเบอร์นูลลีโดยการบัญญัติ

พลังงานกลมี สามรูปแบบคือ

2.8.1.1 พลังงานที่อยู่ในรูปของความดัน (Pressure)

2.8.1.2 พลังงานที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ (Kinetic Energy)

2.8.1.3 พลังงานในรูปของแรงโน้มถ่วงหรืออีกนัยหนึ่งพลังงานศักย์ (Potential Energy)

ผลรวมของพลังงานกลทั้งสามรูปแบบนี้จะมีค่าคงตัวตลอดกระบวนการ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = C \quad (2-1)$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{\rho v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (2-2)$$

## 2.8.2 การสร้างสมการเบอร์นูลีโดยการอินทิเกรตสมการโมเมนตัมเชิงเส้น

พิจารณาสมการขวามือเป็นงานอันเนื่องมาจากแรงที่กระทำเป็นระยะทาง  $ds$  (ได้รับการอินทิเกรตตลอดแนว) และเป็นแรงเนื่องมาจากแรงดันและแรงโน้มถ่วง (โดยไม่มีแรงเสียดทานเพราะไม่คิดความฝืด) งานที่ได้จึงเปลี่ยนรูปและสะสมอยู่ในรูปของพลังงานศักย์อันเนื่องมาจากแรงดันและแรงโน้มถ่วงตามลำดับ (เพราะได้สมมติว่าไม่มีความฝืด) ส่วนทางด้านซ้ายมือ หากย้ายอนุพันธ์ของเวลาไปหารอนุพันธ์ของระยะทางก็จะได้ความเร็ว จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$\int \frac{d(M\vec{V})}{dt} \cdot d\vec{S} = \int (d(M\vec{V})) \cdot \vec{V} \quad (2-3)$$

ซึ่งเมื่อมวล  $M$  มีค่าคงตัวก็สามารถดึงออกจากเครื่องหมายอินทิเกรตแล้วอินทิเกรตได้ค่าออกเป็น  $\frac{MV^2}{2}$  ซึ่ง คือ พลังงานจลน์ เมื่อรวมทั้งสามพจน์เข้าด้วยกันก็จะได้สมการเบอร์นูลีและสามารถจะตีความได้ในทำนองเดียวกันกับวิธีแรก เป็นที่น่าสนใจว่าวิธีนี้แม้จะมีควมยุ่งยากในเชิงคณิตศาสตร์และมีความยุ่งยากในการตีความ แต่กลับเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดทางกลศาสตร์ของไหลที่แพร่หลายกันอยู่

### 2.8.3 การสร้างสมการเบอร์นูลีโดยการลดรูปจากสมการพลังงาน

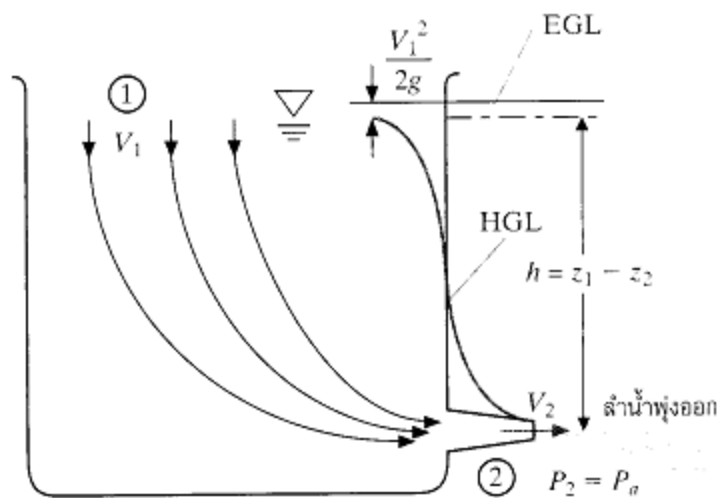
การสร้างแบบที่สามเป็นการลดรูปสมการอนุรักษ์พลังงานแบบเต็มรูปแบบลงมา ซึ่งสมการพลังงานเต็มรูปแบบสามารถเขียนได้ดังนี้

$$q - w_s - w_{fr} = \left( u + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gh \right)_{out} - \left( u + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gh \right)_{in} \quad (2-4)$$

หากเป็นระบบที่อุณหภูมิคงที่ (ดังนั้น  $u_1 = u_2$ ) และไม่มีการทำงาน ( $w_s = 0$ ) ไม่มีแรงเสียดทาน ( $w_{fr} = 0$ ) ดังนั้น

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (2-5)$$

การหาความเร็วของน้ำที่ปลายท่อ ( $V_2$ ) เป็นฟังก์ชันของความสูงถึงน้ำ  $h$  สมมุติการไหลเป็นแบบคงตัว และปราศจากแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.22 การหาความเร็วของน้ำที่จุด ( $V_2$ )

สมการของเบอร์นูลี :

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 + g z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2 + g z_2 \quad (2-6)$$

แต่หน้าตัด 1 และ 2 มีความดันเท่ากับบรรยากาศเพราะเปิดออกสู่บรรยากาศ จึงหักล้างกันหมดไป ที่เหลือคือ

$$V_2^2 - V_1^2 = 2g(z_1 - z_2) \quad (2-7)$$

ซึ่งหากตั้งสมมุติฐานว่าถังมีขนาดใหญ่กว่าท่อบานก็อาจตัด  $V_1$ ทิ้งไปได้และจะสามารถหาค่า  $V_2$  ได้ทันที แต่หากไม่ต้องการใช้สมมุติฐานนั้นก็จำเป็นต้องหาอีกสมการหนึ่งมา “ปิด” ระบบตัวแปร สมการนั้นคือสมการอนุรักษ์มวลนั่นเอง

สมการอนุรักษ์มวล :

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2-8)$$

โดยใช้สมการอนุรักษ์มวลในสมการเบอร์นูลี ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$V_2^2 = \frac{2gh}{1 - A_2^2/A_1^2} \quad (2-9)$$

พื้นที่หน้าตัดของปลายท่อจะมีค่าน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของถังเก็บมาก ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดดังกล่าว จึงมีค่าน้อยกว่า 1 มาก จึงสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น

$$V^2 \approx (2gh)^{1/2} \quad (2-10)$$

## 2.9 กลศาสตร์ของของไหล

ของไหลสถิต คือ ของไหลที่อยู่นิ่งหรือไม่ไหล สมการพื้นฐานของของไหลสถิตได้มาจากการทำสมดุลของแรงที่กระทำต่อของไหลอยู่นิ่งบนพื้นฐานของกฎข้อสองของนิวตัน โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) ความดันเกจ (Gauge pressure) และความดันบรรยากาศ (Atmospheric

pressure) โดยที่ความดันเกจ คือ ความดันของของไหลที่วัดเทียบกับความดันบรรยากาศ ความดันสมบูรณ์ คือ ความดันของของไหลที่วัดเมื่อเทียบกับความดันสุญญากาศ เขียนได้

$$P(\text{abs}) = P(\text{gauge}) + P(\text{atm}) \quad (2-11)$$

ความดันสมบูรณ์และความดันเกจที่เหนือความดันบรรยากาศมีเครื่องหมายบวก ความดันสุญญากาศเป็นความดันต่ำสุดและความดันเกจที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศมีเครื่องหมายเป็นลบ หน่วยของความดันเกจเป็น Pa(gauge) หรือ psig ส่วนความดันสมบูรณ์ Pa(abs) psia

ความดันบรรยากาศที่แท้จริงแปรเปลี่ยนกับสถานที่และภูมิอากาศ โดยที่ความดันบรรยากาศใกล้ผิวโลกมีค่าประมาณ 92 kPa (abs) ถึง 105 kPa (abs) หรือจาก 13.8 psia ถึง 15.3 psia ความดันบรรยากาศมาตรฐานที่ระดับน้ำทะเลเท่ากับ 101.3 kPa (abs) หรือ 14.69 psia ในการคำนวณจะใช้ค่าความดันบรรยากาศเท่ากับ 101 kPa (abs) หรือ 14.7 psia (บุญชร และคณะ : 2554)

### 2.9.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของของไหลที่เกี่ยวข้องกับปั๊ม

2.9.1.1 ความหนาแน่น (Density,  $\rho$ ) คืออัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่  $4^{\circ}\text{C}$  )

2.9.1.2 น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight,  $\gamma$ ) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรค่าน้ำหนักจำเพาะขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดของโลกและความหนาแน่น

$$\gamma = \rho g \quad (2-12)$$

เมื่อ	$\gamma$	คือ น้ำหนักจำเพาะ
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของเหลว เทียบกับน้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )
	$g$	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 ( $\text{m/s}^2$ )

2.9.1.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) ของวัตถุต่อน้ำหนักจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) ของน้ำที่อุณหภูมิมาตรฐาน โดยปกติใช้  $4^{\circ}\text{C}$  หรือ  $39.2^{\circ}\text{F}$  ซึ่งความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1.0

2.9.1.4 ความหนืด (Viscosity,  $\mu$ ) คือคุณสมบัติของไหลที่เนื่องมาจากการเกาะกันระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Cohesive) แล้วก่อให้เกิดความต้านทานต่อการไหลขึ้น คุณสมบัตินี้จะมีผลหรือเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการไหลเท่านั้น ความข้นเหนียวของของไหลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.9.1.5 ความดันไอ (Vapor pressure) คือความดันที่เกิดจากโมเลกุลในรูปไออิ่มตัว (Saturated vapor) เหนือผิวหน้าของของเหลวที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ เมื่อความดันไอของของเหลวเท่ากับ ความกดดันของบรรยากาศหรือความกดดันที่อยู่รอบ ๆ ของเหลวนั้นก็เดือด คุณสมบัติของของเหลวข้อนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของปั๊มทางด้านดูด (Suction Side) โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าของเหลวที่ต้องการสูบมีอุณหภูมิสูงหรือเป็นของเหลวที่ระเหยได้ง่าย ทั้งนี้เพราะถ้าความดันของของเหลวในปั๊มส่วนนี้ลดลงจนถึงความดันไอแล้วจะทำให้ของเหลวเดือดกลายเป็นไอ และจะเป็นผลให้อัตราการสูบของปั๊มลดลงหรือไม่มีของเหลวไหลมาเข้าปั๊มเลย ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้ความดันภายในเรือนปั๊ม (Casing) สูงกว่าความดันไอของของเหลวอยู่ตลอดเวลา

## 2.9.2 ความดันของของเหลว

การศึกษาการทำงานของปั๊มจำเป็นต้องเข้าใจสิ่งต่อไปนี้

2.9.2.1 ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Pressure) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของบรรยากาศต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนโลก ความดันหนึ่งบรรยากาศเท่ากับ  $10.324 \text{ kN/m}^2$  หรือ  $14.7 \text{ psi}$  ความดันที่ปรากฏบนเกจวัดความดัน คือ ความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศ

2.9.2.2 ความดันศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute zero pressure) คือความดันของบรรยากาศที่มีค่าศูนย์อย่างแท้จริงหรือไม่มี ความดันเลยซึ่งเกิดขึ้นได้โดยการดูดอากาศออกหมดจนเป็นสุญญากาศที่แท้จริง

2.9.2.3 ความดันสมบูรณ์ (Absolute pressure,  $P_{abs}$ ) คือค่าความดันใด ๆ ที่วัดจากความดันพื้นฐาน

## 2.9.3 เสดของของเหลว

2.9.3.1 เสดความดัน (Pressure Head,  $H$ ) คือค่าความดันของของเหลวที่บอกเป็นแท่งความสูง ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน  $P$  และเสดความดัน  $H$  คือ

$$H = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\rho g} \quad (2-13)$$

เมื่อ	$H$	คือ เสดความดัน (m)
	$P$	คือ ความดัน ( $\text{kN/m}^2$ )
	$\gamma$	คือน้ำหนักจำเพาะ ( $\text{N/m}^3$ )

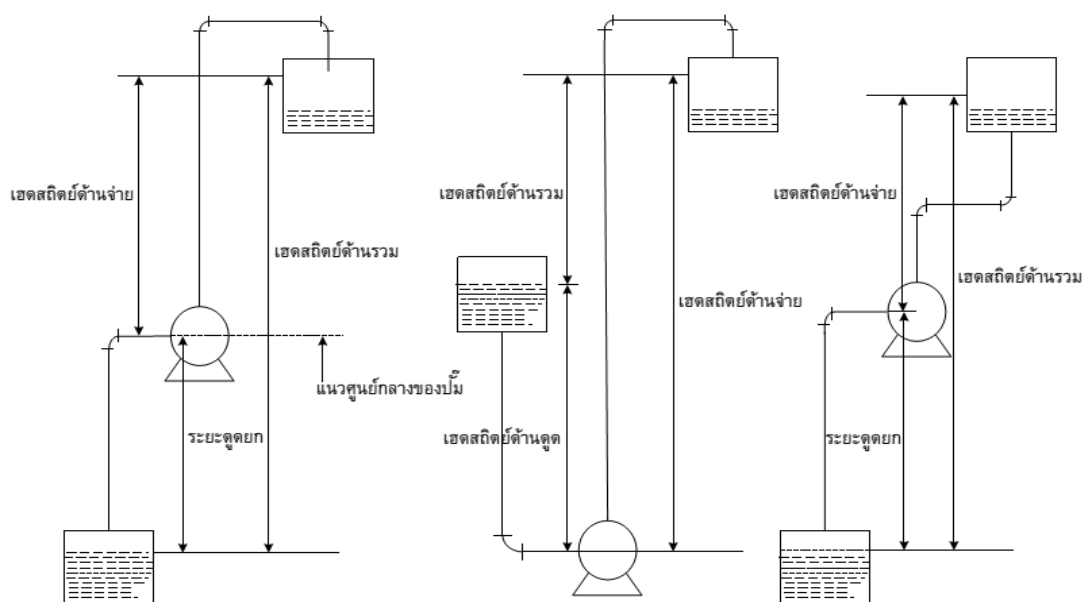
$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว เทียบกับน้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )  
 คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก มีค่าเท่ากับ  
 $g$   $9.81(\text{m/s}^2)$

2.9.3.2 เฮดความเร็ว (Velocity Head,  $H_V$ ) คือ ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใด ๆ มีพลังงานจลน์อยู่ พลังงานส่วนนี้เมื่อบอกในรูปของเฮด คือ

$$H_V = \frac{V^2}{2g} \quad (2-14)$$

เมื่อ  $H_V$  คือ เฮดความเร็ว(m)  
 $V$  คือ ความเร็วของการไหล(m/s)  
 $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก มีค่าเท่ากับ  $9.8(\text{m/s}^2)$

2.9.3.2 เฮดสถิต (Static Head) คือ ความสูงของระดับของเหลวเมื่อเทียบกับปั๊มความสูงด้านจ่าย เรียกว่า เฮดสถิตด้านจ่าย (Static Discharge Head) และด้านดูดเรียกว่าเฮดสถิตด้านดูด (Static Suction Head) ทั้งสองด้านรวมกันเรียกว่า เฮดสถิตรวม (Total Static Head)







g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด  $f$  ขึ้นอยู่กับทั้งคุณสมบัติของท่อและลักษณะการไหลว่าเป็นแบบใดกรณีเป็น  
ผนังท่อเรียบ (Hydraulically Smooth) หาได้จากสูตรของ Hazen-Williams

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left( \frac{R_c \sqrt{f}}{2.51} \right) \quad (2-16)$$

หรือได้จาก

$$\frac{1.325}{\left[ \ln \left( \frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (2-17)$$

การคำนวณอัตราการไหลและการเสียheadในท่อโดยใช้สูตรของ Darcy-Weisbach ร่วมกับ Moody Diagram เป็นวิธีที่ดีและมีความเชื่อถือสูง แต่ค่าความขรุขระของผนังท่อที่แท้จริงหายาก และยังเปลี่ยนไปตามอายุใช้งาน ดังนั้น Hazen-Williams จึงได้คิดสูตร ที่เป็นเอมไพริคอล มีชาร์ที่สามารถนำมาใช้งานได้สะดวก ไม่ยุ่งยากเหมือนสูตรแรกและให้ค่าถูกต้องพอสมควร  
สูตรของ Hazen-Williams ใช้กับของเหลวที่เป็นน้ำเท่านั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ

$$V = 0.010 C R^{0.63} S^{0.54} \quad (2-18)$$

และ

$$Q = 3.587 \times 10^{-6} C D^{2.63} S^{0.54} \quad (2-19)$$

เมื่อ  $V$  คือ ความเร็วของการไหลในท่อ เป็นเมตร/นาที่

$C$  คือ สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของท่อ

- R คือ Hydraulic Radius เป็น มม.
- S การเสียเฮดเนื่องจากความฝืดต่อหนึ่งหน่วยความยาวของท่อ  $= \frac{h_f}{L}$
- Q อัตราการไหลผ่านท่อ เป็นลิตรต่อวินาที
- D ขนาดของท่อ เป็น มิลลิเมตร

2.9.3.4 เฮดรวมของปั๊ม (Total Dynamic Head) หรือ Total Discharge Head (TDH) คือ พลังงานทั้งหมดที่บอกในรูปของเฮดที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวเพื่อให้ของเหลวนั้นไหลผ่านระบบท่อด้วย อัตราที่กำหนด หรือ

$$H_{TDH} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + H_r \quad (2-20)$$

- เมื่อ  $H_{TDH}$  คือ เฮดรวม (m)
- Z คือ ความสูงของระดับของเหลว (m/s)
- 1 คือ จุดทางเข้าของปั๊ม
- 2 คือ จุดทางออกของปั๊ม

ในกรณี  $H_r$  น้อยมากไม่นำมาคิดและในกรณีที่  $Z_2$  และ  $Z_1$  เท่ากัน

$$H_{TDH} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \quad (2-21)$$

#### 2.9.4 กำลังงานและประสิทธิภาพของปั๊ม

กำลังงานหมายถึงอัตราการทำงานในหนึ่งหน่วยเวลา หน่วยของกำลังงาน คือแรงม้า หนึ่งแรงม้ามีค่าเท่ากับ 745.7 วัตต์ (745.7 N-m/s) หรือ 550 ฟุต-ปอนด์ต่อวินาที

กำลังงานที่ใช้คำนวณปั๊มมีอยู่สองอย่าง คือ

2.9.4.1 แรงม้าทฤษฎี (Theoretical Horsepower) หรือ Water Horsepower, Whp เป็นแรงม้าที่ปั๊มต้องเพิ่มให้แก่ของเหลว เพื่อให้ของเหลวไหลผ่านระบบด้วยอัตราที่กำหนด ค่า Whp คำนวณได้จากสูตร

$$\text{Whp} = \gamma \cdot Q \cdot \frac{\text{TDH}}{550} \quad (2-22)$$

เมื่อ	Whp	แรงม้าทางทฤษฎี (Water Horsepower)
	$\gamma$	น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) ของของเหลว เป็น ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต
	Q	อัตราการสูบของปั๊ม เป็น ลบ.ฟุต ต่อวินาที
	TDH	เฮดรวมของปั๊ม (Total Dynamic Head) เป็นฟุต

กรณีที่ของเหลวเป็นน้ำและอัตราการสูบน้ำมีหน่วยเป็นอเมริกันแกลลอนต่อนาที (gpm) และ TDH มีหน่วยเป็นฟุต แรงม้าทางทฤษฎีจะคำนวณได้โดยสูตร

$$\text{Whp} = \text{gpm} \cdot \frac{\text{TDH}}{3,960} \quad (2-23)$$

สำหรับระบบเมตริกซึ่งอัตราการสูบน้ำมีหน่วยเป็น ลบ.เมตร ต่อชั่วโมง และ TDH มีหน่วยเป็นเมตร

$$\text{Whp} = Q \cdot \frac{\text{TDH}}{273} \quad (2-24)$$

2.9.4.1 แรงม้าของต้นกำลัง (Brake Horsepower, Bhp.) เป็นกำลังงานที่มอเตอร์ หรือ เครื่องยนต์ต้นกำลังขับเคลื่อนปั๊ม

$$\text{Bhp} = \frac{\text{Whp}}{\text{ประสิทธิภาพของปั๊ม}} \quad (2-25)$$

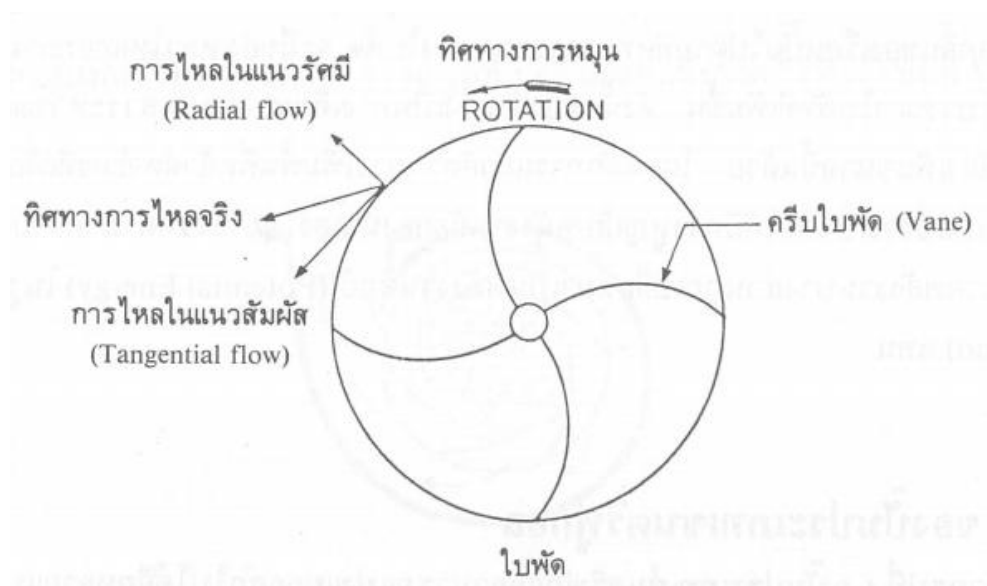
กรณีที่ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ พลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการเป็นกิโลวัตต์ (kW) คำนวณได้จาก

$$\text{kW} = 0.746 \frac{\text{Bhp}}{\text{ประสิทธิภาพของมอเตอร์}} \quad (2-26)$$

$$\text{ประสิทธิภาพรวม} = \text{ประสิทธิภาพของปั๊ม} \times \text{ประสิทธิภาพของมอเตอร์} \quad (2-27)$$

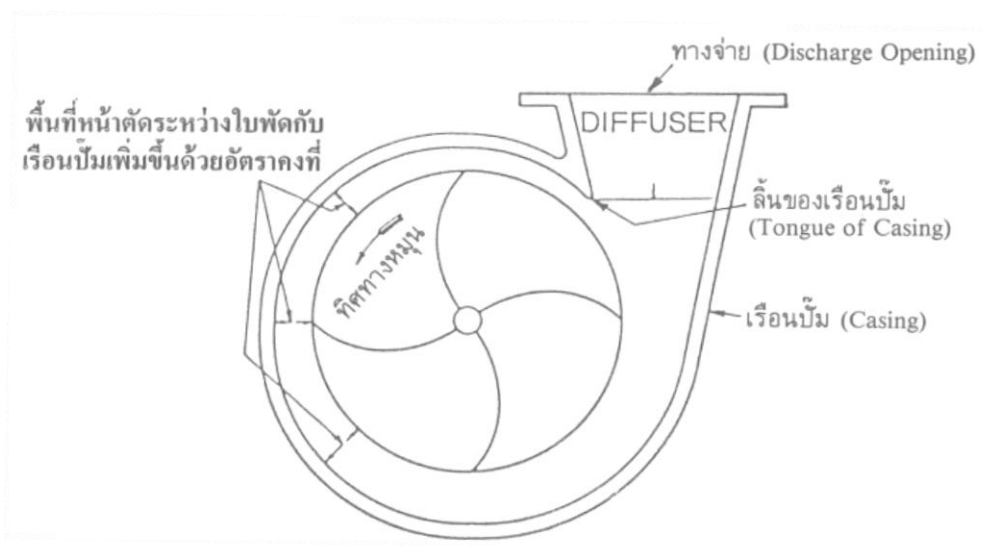
## 2.10 การทำงานของปั๊มแบบเซนตริฟูกอล

ปั๊มแบบเซนตริฟูกอล ทำงานโดยอาศัยการหมุนของใบพัดหรืออิมเพลเลอร์ (Impeller) ที่ได้รับการถ่ายทอดกำลังจากเครื่องยนต์ต้นกำลังหรือมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อใบพัดหมุนพลังงานจากเครื่องยนต์จะถูกถ่ายเทโดยการผลัดดันของครีบบใบพัด (Vane) ต่อของเหลวที่อยู่รอบ ๆ ทำให้เกิดการไหลในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวง (Tangential flow) เมื่อมีการไหลในลักษณะดังกล่าว จะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เป็นผลให้มีการไหลจากจุดศูนย์กลางของใบพัดออกไปสู่แนวเส้นรอบวงทุกทิศทาง (Radial flow) ของเหลวที่ถูกใบพัดผลัดดันออก จะมีทิศทางการไหลที่เป็นผลรวมของแนวทั้งสอง ซึ่งเมื่อของเหลวถูกหมุนให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ความกดดันของของเหลวจะมีความมากขึ้นเมื่ออยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของใบพัด เมื่อความเร็วของใบพัดซึ่งหมุนอยู่ในสถานะปิดมากพอ ความกดดันที่จุดศูนย์กลางจะต่ำกว่าความกดดันของบรรยากาศ ซึ่งปั๊มแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจึงมีทางของเหลวไหลเข้าหรือทางดูด (Suction Opening) อยู่ที่ศูนย์กลางใบพัด ของเหลวที่ถูกดูดเข้าทางศูนย์กลาง เมื่อถูกผลัดดันออกด้วยแรงผลัดดันของครีบบใบพัด และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ก็จะไหลออกมาตลอดแนวเส้นรอบวง ใบพัดที่อยู่ในเรือนปั๊ม (Casing) ทำหน้าที่รวบรวมและผันของเหลวไปสู่ทางจ่าย (Discharge Opening) ของระบบเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.24 ทิศทางการไหลของเหลวออกจากใบพัด (Impeller) ของปั๊มแบบเซนตริฟูกอล

การรวบรวมของเหลวที่ถูกผลักดันออกมา เริ่มต้นที่จุดหนึ่งบนเส้นรอบวงของใบพัด ซึ่งจุดหนึ่งที่ผนังภายในของเรือนปั๊มเข้ามาชิดกับขอบของใบพัดมาก จุดดังกล่าวนี้เรียกว่าลิ้นของเรือนปั๊ม (Tongue of the casing) จากลิ้นของเรือนปั๊มไปตามทิศทางการหมุนของใบพัด จะมีของเหลวไหลออกมามากขึ้นตามความยาวของเส้นรอบวงของใบพัดที่เพิ่มขึ้น ช่องว่างซึ่งเป็นทางเดินของเหลวระหว่างผนังของเรือนปั๊มกับใบพัดก็จะเพิ่มขนาดขึ้น อัตราการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดที่คงที่มีผลให้ความเร็วของการไหลสม่ำเสมอ เป็นผลให้มีการสูญเสียพลังงานลดน้อยลง ความเร็วของการไหลจะลดลงเนื่องจากพลังงานบางส่วนถูกเปลี่ยนมาเป็นพลังงานศักย์ (Potential Energy) ในรูปของ ความดัน (Pressure head) แทน

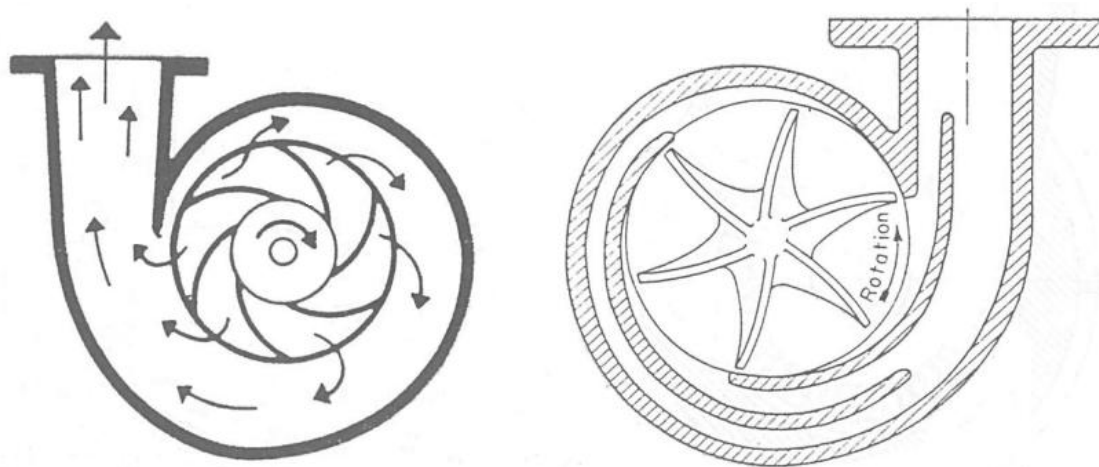


รูปที่ 2.25 ลักษณะทั่วไปของเรือนปั๊ม (Casing) แบบเซนตริฟูกอล

#### 2.10.1 ปั๊มเซนตริฟูกอลแบบต่างๆ

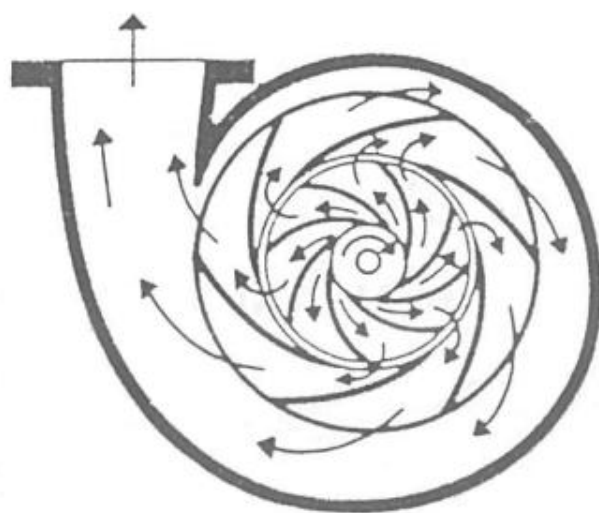
ปั๊มเซนตริฟูกอลสามารถแบ่งแยกออกได้หลายแบบ คือ

2.10.1.1 แบบหอยโข่ง เป็นแบบที่ของเหลวไหลเข้าสู่ศูนย์กลางของใบพัดมีทิศทางขนานกับแกนของเพลลา แล้วไหลออกทำมุม 90 องศากับทิศทางที่ไหลเข้า ช่องทางเดินของของเหลวจากลิ้นเรือนปั๊มมีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นรอบวงในทิศทางการหมุนของใบพัด



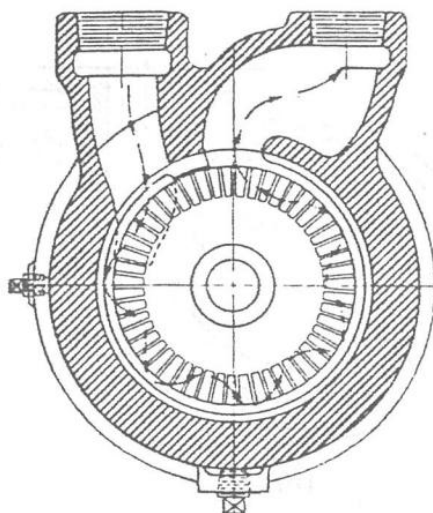
รูปที่ 2.26 ปั๊มเซนตริฟูกอลแบบหอยโข่ง (Volute)

แบบมีครีบน้ำ ใบพัดและรูปร่างภายนอกของเรือนปั๊ม (Casing) เหมือนแบบแรกทุกประการ แตกต่างเพียงภายในจะมีครีบน้ำ (Guide Vanes) เพิ่มขึ้นมา ครีบน้ำจะช่วยให้ของเหลวที่ถูกผลักดันออกมา ค่อย ๆ เบนทิศทางไปสู่ช่องทางเดินซึ่งเป็นส่วนโค้งได้ดีขึ้น ทำให้การสูญเสียพลังงานน้อยลง เป็นผลให้การ เปลี่ยนพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) เป็นพลังงานศักย์ในรูปของความดัน (Pressure Head) มีประสิทธิภาพ ดีขึ้น



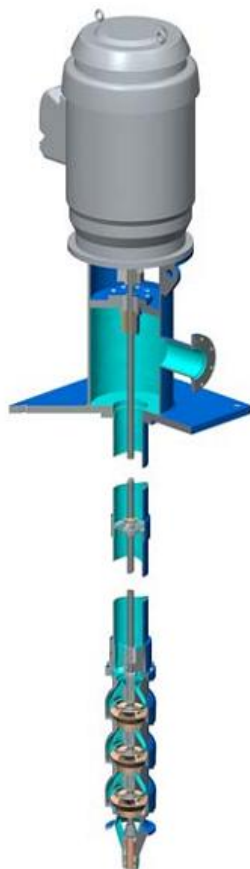
รูปที่ 2.27 ปั๊มเซนตริฟูกอลแบบมีครีบน้ำ (Diffuser Type)

2.10.1.2 แบบเทอร์ไบน์ หรือ Vortex, Periphery หรือ Regenerative Turbine ใบพัดเป็นแผ่นแบนกลมมีความหนา ครีบของใบพัดเกิดจากการเจาะร่องบนขอบของแผ่นใบพัด เกิดเป็นแผ่นครีบแคบและสั้นในแนวรัศมี (Radial Direction) ของเหลวที่ไหลเข้าจากทางดูดสู่ช่องว่างระหว่างครีบ จะถูกเหวี่ยงออกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง แต่ผนังของเรือนปั๊มปิดกั้นอยู่ ของเหลวจะวิ่งย้อนกลับเข้าสู่ช่องว่างระหว่างใบพัดและถูกเหวี่ยงออกไปอีก ขบวนการดังกล่าวจะเกิดซ้ำกันจนถึงช่องทางจ่าย (Discharge Opening) พลังงานที่ของเหลวได้รับขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งที่ของเหลววิ่งเข้าสู่ช่องว่างระหว่างครีบใบพัดและถูกเหวี่ยงออก ถ้าจำนวนครั้งมาก พลังงานศักย์ของของเหลวก็จะมากตามขึ้นไป



รูปที่ 2.28 ปั๊มเซนตริฟูกอลแบบเทอร์ไบน์ (Regenerative Turbine)

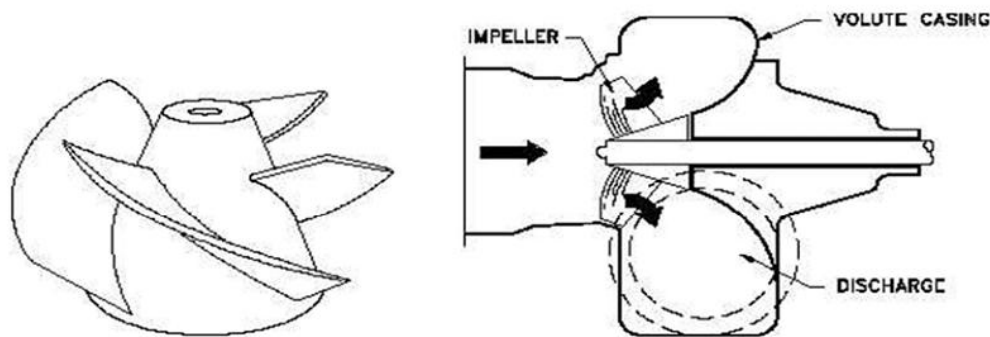
2.10.1.3 แบบ Vertical Turbine เป็นปั๊มที่ผลิตขึ้นเพื่อสูบน้ำจากบ่อบาดาล หรือเรียกว่าปั๊มน้ำบาดาล (Deep Well หรือ Deep Well Turbine Pump) ใบพัดของปั๊มเป็นแบบ Radial Flow หรือ Mixed Flow ส่วนประกอบทั้งหมดของปั๊มประกอบกันเป็นท่อนทรงกระบอก เพื่อบรรจุลงในท่อบ่อน้ำ



รูปที่ 2.29 ปั๊มเซนตริฟูกอลแบบ Vertical Turbine

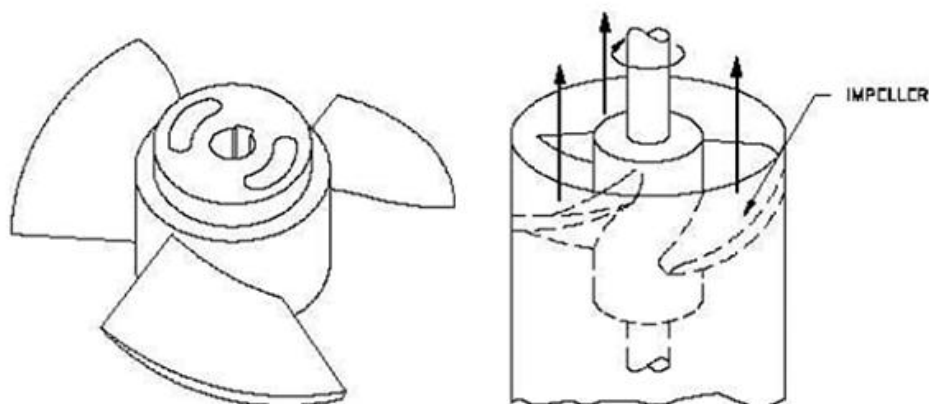
2.10.1.4 แบบ Mixed Flow เป็นชื่อที่เรียกตามลักษณะของใบพัด หรือทิศทางการไหลของของเหลวออกจากใบพัด ปั๊มหรือใบพัดแบบนี้จะเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยอาศัยทั้งแรงเหวี่ยงหนีจุดศูนย์กลางและแรงผลักดันของแผ่นใบพัดในแนวขนานกับแกนของเพลา ของเหลวที่ไหลออกจะทำมุม 45 ถึง 80 องศา กับแกนของเพลา ปั๊มแบบนี้ให้เฮด (Head) น้อยกว่าแบบ Radial Flow แต่จะให้อัตราการสูบสูงกว่า ใบพัดแบบ Mixed Flow ใช้กันมากในแบบ Vertical Turbine





รูปที่ 2.30 ปั๊มเซนตริฟูกอลแบบ Mixed Flow

2.10.1.5 แบบ Axial Flow ของเหลวที่ไหลเข้าและออกจากใบพัดมีทิศทางการไหลเพียงอย่างเดียว ไม่มีแรงเหวี่ยงหนีจุดศูนย์กลาง

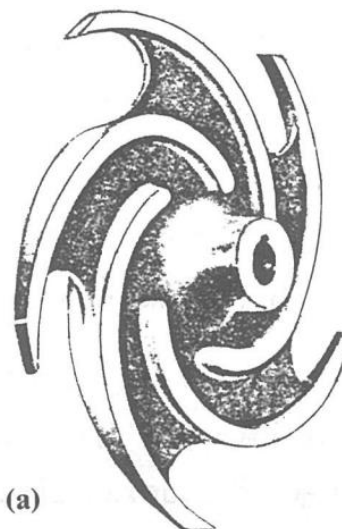


รูปที่ 2.31 แบบปั๊มเซนตริฟูกอลแบบ Axial Flow

## 2.10.2 ลักษณะใบพัดของปั๊มแบบเซนตริฟูกอล

ใบพัดของปั๊มแบบเซนตริฟูกอล มีมากมายหลายชนิด จำแนกพิจารณาได้จากลักษณะของแผ่นใบพัด งานประกบ (Shroud) ลักษณะการไหลของของเหลวเข้าและออกจากใบพัด หรือวัตถุประสงค์ใช้งาน ซึ่งได้แยกประเภทตามหลักการข้างต้น ดังนี้

2.10.2.1 ใบพัดเปิด (Open Impeller) ครีบบางของใบพัด จะยึดติดอยู่กับจานประกบ (Shroud) ใบพัดที่จะมีแผ่นครีบบางส่วนยื่นออกมาจากจาน คือรัศมีของจานจะเล็กกว่ารัศมีของใบพัด



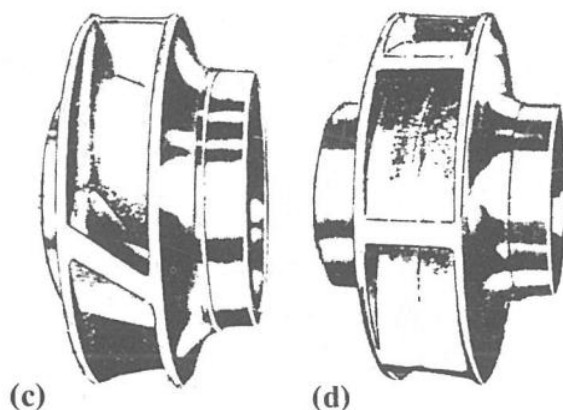
รูปที่ 2.32 ใบพัดเปิด (Open Impeller)

2.10.2.2 ใบพัดกึ่งเปิด (Semi-open Impeller) เป็นแบบรัศมีของจานประกบเท่ากับรัศมีของใบพัด ใบพัดประเภทนี้มีจานประกบเพียงด้านเดียว อีกด้านหนึ่งของใบพัดจะไม่มีฝาปิด



รูปที่ 2.33 ใบพัดกึ่งเปิด (Semi-open Impeller)

2.10.2.3 ใบพัดปิด (Closed Impeller) เป็นแบบที่ใบพัดปิดอยู่ด้วยจานประกบ 2 แผ่น (รูปที่ 2.34 c) มีทางให้ของเหลวไหลเข้าหรือทางดูดเพียงด้านเดียว เรียกว่าเป็นแบบพัดปิด ดูดด้านเดียว (Closed, single suction impeller) สำหรับ (รูปที่ 2.34 d) มีทางดูด 2 ด้านเรียกว่าเป็นแบบใบพัดปิด ดูดสองด้าน (Closed, double suction impeller)



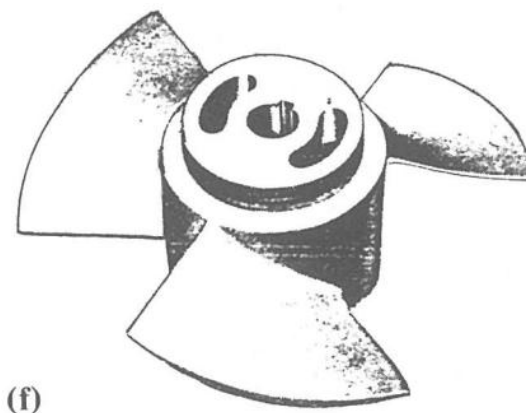
รูปที่ 2.34 ใบพัดปิด (Closed Impeller)

2.10.2.4 ใบ Paper-stock Impeller (รูปที่ 2.35 e) เป็นใบพัดที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษให้ใช้กับของเหลวที่มีความข้นเหลว (Consistency) สูง เดิมทีเดียวใบพัดแบบนี้ออกแบบไว้ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ต่อมานำมาใช้กับของเหลวอื่นด้วยแต่ก็ยังเรียกชื่อเดิมอยู่



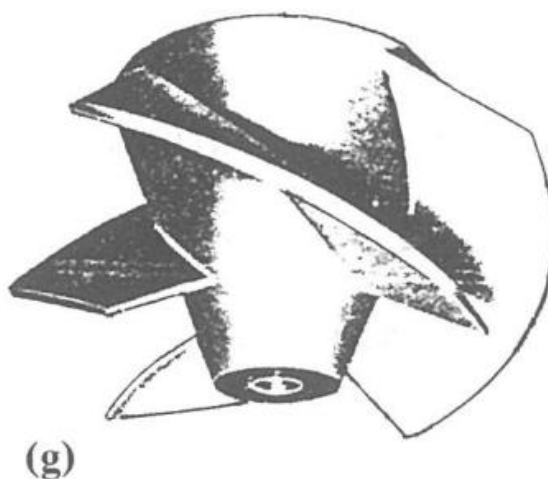
รูปที่ 2.35 ใบ Paper-stock Impeller

2.10.2.5 ใบ Propeller เป็นใบพัดที่เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยการผลักดันในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการไหลเข้ามาสู่ใบพัดเพียงอย่างเดียว ไม่มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง บั้มที่มีใบพัดประเภทนี้เรียกว่า Axial Flow Pump.



รูปที่ 2.36 ใบ Propeller

2.10.2.6 ใบ Mixed Flow เป็นแบบที่ของเหลวไหลเข้ามาสู่ใบพัดแนวขนานกับแกนของเพล แต่ตอนไหลออกจะทำมุม 45 ถึง 80 องศา กับทิศทางเดิม กล่าวคือ การขับเคลื่อนของเหลวมีทั้งแรงขับเคลื่อนในทิศทางเดียวกันกับการไหลเข้ามาสู่ใบพัดและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง



รูปที่ 2.37 ใบ Mixed Flow

2.10.2.7 ใบ Radial Flow เป็นใบพัดแบบที่ของเหลวถูกขับเคลื่อนออกไปโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพียงอย่างเดียว ทิศทางการไหลออกทำมุมฉากกับการไหลเข้า

## 2.11 การไหลในเส้นท่อดัด

ปั๊มเป็นเครื่องมือกลที่มีท่อเป็นอุปกรณ์ใช้ส่งผ่านของเหลวจากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่ง การไหลของของเหลวในท่อ ส่วนมากเป็นการไหลแบบเต็มท่อกว่าการไหลแบบไม่เต็มท่อ การคำนวณและออกแบบจะแตกต่างกันออกไป รูปแบบการไหลในเส้นท่อสามารถจำแนกและแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

2.11.1 การไหลคงที่ (Unsteady flow) คือ การไหลในท่อด้วยอัตราการไหลและความเร็วคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น การไหลในท่อออกจากอ่างเก็บน้ำที่มีระดับน้ำคงที่ หรือ การไหลในท่อประปาที่มีความดันที่จุดต่อจากจุดหลัก(Main pipe) คงที่เป็นต้น

2.11.2 การไหลไม่คงที่ (Unsteady flow) คือ การไหลในท่อที่มีอัตราการไหลและความเร็วเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น การไหลในท่อออกจากอ่างเก็บน้ำหรือถังน้ำที่มีระดับน้ำเปลี่ยนแปลงตามเวลา การไหลในท่อเมื่อเริ่มเปิดเครื่องสูบน้ำและการปิด เปิด ประตุน้ำเป็นต้นการแบ่งชนิดของการไหลในท่อตามพฤติกรรมของการไหล แบ่งได้จากการสังเกตเส้นแนวทางการไหล ในปี 1883 Osborne Reynolds วิศวกรชาวฝรั่งเศส ได้แบ่งชนิดของการไหลจากการสังเกตเส้นสีที่แสดงถึงแนวทางการไหลได้ 3 ชนิด คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

Osborne Renolds ได้ศึกษาตรวจวัดจากการทดลองปล่อยสีผ่านท่อใสที่มองเห็นเส้นสีชัดเจนซึ่งเมื่อกำหนดให้ท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $D$  แล้ววัดอัตราการไหลที่ปลายท่อได้  $Q$  จะหาความเร็วเฉลี่ย  $V$  ได้จากสมการการไหลต่อเนื่อง

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2-28)$$

เมื่อ  $V$  คือ ค่าความเร็วเฉลี่ย

$Q$  คือ อัตราการไหลที่ปลายท่อ

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล ( $\frac{\pi D^2}{4}$ )

ในขณะเดียวกันเมื่อรู้ความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity,  $V$ ) ของของไหล สามารถกำหนดอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) ของการไหลในท่อได้จากจำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number) ซึ่งเป็นเลขดัชนีที่บ่งบอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล

$$\text{Reynolds number } Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2-29)$$

หรือ

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (2-30)$$

เมื่อ	$R_e$	จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )
	$\mu$	คือ ความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity) หรือ ความหนืดสมบูรณ์
	$V$	คือ ความเร็วการไหล
	$D$	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ

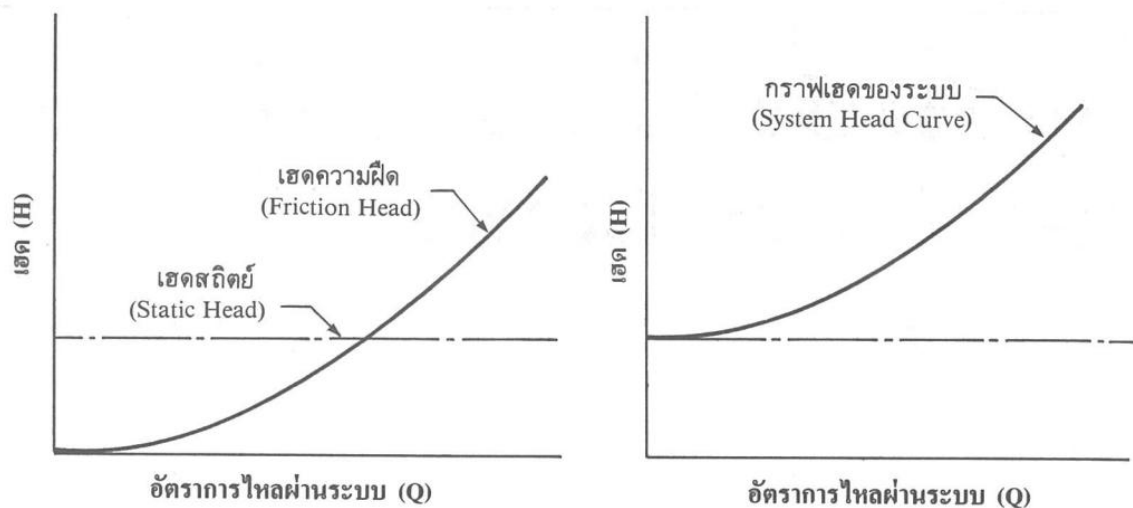
## 2.12 กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve)

กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve) คือกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านระบบกับเฮดรวม (TDH) หรือ พลังงานที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวเพื่อก่อให้เกิดการไหลนั้นพลังงานที่ปั๊มจะต้องให้ซึ่งบอกเป็นความสูงของแท่งของเหลว หรือเฮด มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานสองอย่างด้วยกันคือ

ความต่างระดับของของเหลวที่ปลายของท่อดูดและท่อจ่าย หรือ เฮดสถิต (Static Head) และ พลังงานที่สูญเสียไปในการไหลผ่านระบบเนื่องมาจากความฝืดในเส้นท่อ (Friction Head Loss) รวมกับการสูญเสียในอุปกรณ์ของระบบท่อ และการสูญเสียอื่น ๆ (Minor Head Losses) เช่น การสูญเสียที่ปากทางเข้าและทางออก การสูญเสียที่ช่วงต่อที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อ เป็นต้น การสูญเสียพลังงานส่วนนี้รวมเรียกว่า เฮดความฝืด

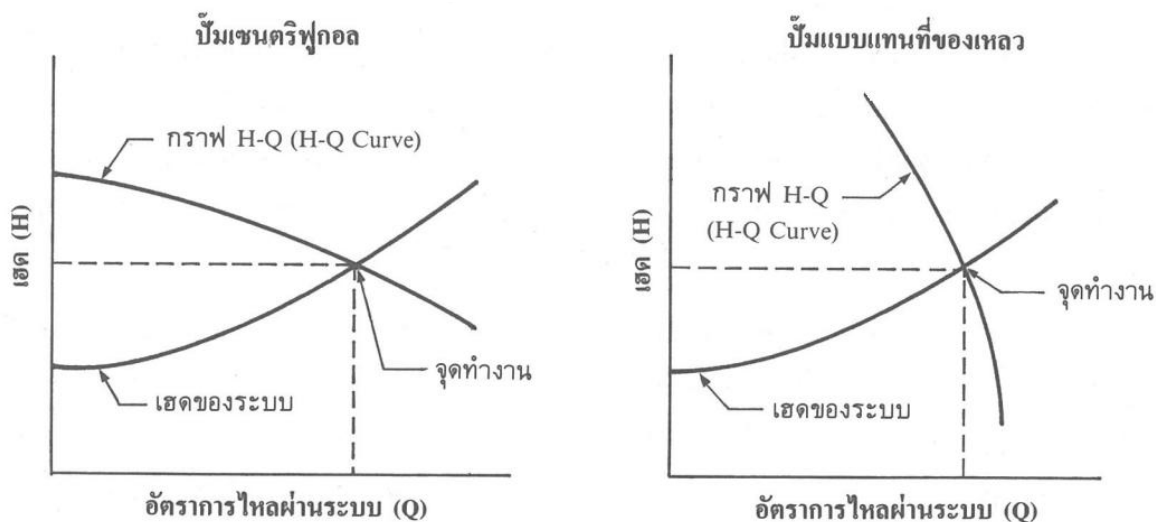
การเขียนกราฟเฮดของระบบจะแยกเขียนพลังงานที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลว ในกรณีที่ความต่างระดับของของเหลวมีค่าคงที่ กราฟของพลังงานส่วนนี้ก็จะเส้นราบขนานไปกับแกน  $X$  ซึ่งแทนอัตราการไหล สำหรับการสูญเสียพลังงานหรือเฮดในการไหลผ่านระบบเนื่องจากความฝืดนั้นจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสอง

ของอัตราการไหล กราฟจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา เมื่อเขียนแยกกัน จะได้ กราฟเฮดสถิต (Static Head Curve) และกราฟเฮดความฝืด (Friction Head Curve หรือ Dynamic Head Curve ) เมื่อรวมกราฟทั้งสองเข้าด้วยกันก็จะได้เป็น กราฟเฮดของระบบ(System Head Curve)



รูปที่ 2.38 กราฟเฮดของระบบ

กราฟเฮดของระบบที่มีช่วงอัตราไหลครอบคลุมทุกสภาวะการทำงานจะช่วยให้สามารถเลือกปั๊มได้อย่างเหมาะสม เมื่อนำกราฟไปเขียนบนสเกลเดียวกันกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบกับเฮดหรือกราฟ H-Q ของปั๊ม จุดที่กราฟ H-Q ตัดกับกราฟเฮดของระบบ จะเป็นจุดที่ปั๊มทำงาน กราฟ H-Q ของปั๊ม จะมีเส้นแสดงประสิทธิภาพที่อัตราการสูบขนาดต่างๆไว้กราฟ กราฟเฮดของระบบจึงเป็นตัวช่วย ให้สามารถเลือกปั๊ม และการทำงานของปั๊มให้มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับสูงตลอดช่วงการทำงานที่ต้องการ



รูปที่ 2.39 การหาอัตราการสูบและเฮดที่ปั๊มจะทำงานโดยใช้กราฟเฮดของระบบและกราฟ H-Q

กรณีการทำงานของปั๊มมีการเปลี่ยนแปลง ระดับของของเหลวทางท่อดูดหรือท่อจ่าย หรือ มีการปรับขนาดช่องเปิดของประตูน้ำทางท่อจ่ายเพื่อให้อัตราการไหลพอเหมาะกับความต้องการ กราฟเฮดของระบบจะช่วยให้ทราบรายละเอียดถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงนั้นต่อการทำงานของปั๊ม

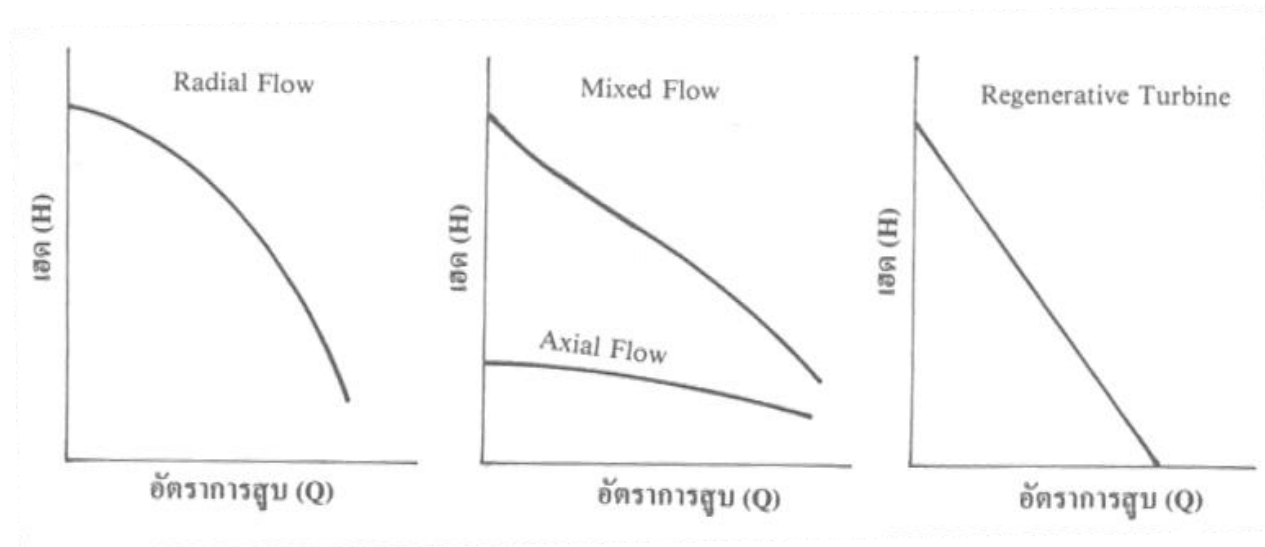
กราฟเฮดของระบบที่ถูกต้องเป็นสิ่งจำเป็น ถ้าต้องการทราบตำแหน่งที่ถูกต้องที่ปั๊มจะทำงานบนกราฟ H-Q เพราะว่าจุดดังกล่าวเท่านั้นที่จะสามารถเลือกปั๊มที่เหมาะสมที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับงานที่ต้องการ

### 2.13 คุณสมบัติของปั๊มเซนตริฟูกอล

ปั๊มเซนตริฟูกอล เป็นปั๊มที่นิยมใช้กันมากที่สุด สามารถใช้กับงานได้เกือบทุกประเภท มีอัตราการสูบของเหลวสูง คุณสมบัติที่สำคัญของปั๊มมีดังนี้

กราฟ H-Q Curve (Head Capacity Curve) คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบกับเฮดที่ปั๊มสามารถทำงานได้ ตั้งแต่อัตราการสูบเป็นศูนย์จนถึงอัตราการสูบสูงสุดของปั๊ม





รูปที่ 2.40 กราฟ H-Q ของปั๊มเซนตริฟูกอลแบบต่าง ๆ

ลักษณะกราฟ H-Q ขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของใบพัด เช่นความกว้างของช่องเปิดระหว่างฝาประกบทิศทางการไหลของของเหลวที่ถูกเหวี่ยงออกจากใบพัด ความโค้งและจำนวนครีบบของใบพัด ในรูป ก เป็นลักษณะการทำงานของปั๊มซึ่งมีใบพัดผลักดันของเหลวออกมาในทิศทางตั้งฉากกับแกนของเพลลา (Radial Flow) รูป ข มีทั้งแบบที่เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยอาศัยแรงผลักดันของใบพัดขนานกับแกนของเพลลาเพียงอย่างเดียว (Axial Flow) และแบบที่ทิศทางการไหลออกของของเหลวทำมุม 45 ถึง 80 องศากับแกนของเพลลา (Mixed Flow) รูป ค เป็นลักษณะการทำงานของปั๊มแบบ Regenerative Turbine

กราฟในรูปที่ 2.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบกับเฮดเมื่ออัตราการหมุนของใบพัดคงที่ซึ่งได้มาจากการทดลองให้ปั๊มทำงานจริงในห้องทดลอง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่า กราฟเหล่านี้จะแสดงลักษณะการทำงานตั้งแต่อัตราการสูบเป็นศูนย์จนถึงอัตราการสูบสูงสุดสำหรับปั๊มนั้น แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าปั๊มดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้ตลอดเวลาช่วงที่แสดงในกราฟนั้น ทั้งนี้เพราะที่อัตราการสูบต่าง ๆ เหล่านี้ปั๊มทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด หรือ ใกล้เคียงกับจุดดังกล่าวมากที่สุด จุดดังกล่าวเป็นจุดที่ผู้ผลิตออกแบบให้ปั๊มทำงาน (Design Operation Point) ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มจะลดลงเมื่อให้ทำงานที่จุดซึ่งอยู่ห่างจากจุดดังกล่าวออกไป

### 2.13.1 กราฟ H-Q กรณีปั๊มสองเครื่องทำงานร่วมกัน

เมื่อความต้องการใช้งานของปั๊มในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ กัน เช่น อัตราการสูบหรือเฮดมีความแตกต่างกันมาก บางครั้งการใช้ปั๊มขนาดเล็กสองเครื่องหรือมากกว่าทำงานร่วมกันจะสะดวกและประหยัดกว่า ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อความต้องการใช้งานลดลง เราอาจจะเลือกเดินเครื่องเพียงบางตัวที่ ให้ประสิทธิภาพสูงในช่วงการทำงานนั้น และใช้เวลาที่หยุดทำงานของปั๊มที่เหลือนั้นทำการซ่อมหรือบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพดีอยู่เสมอ

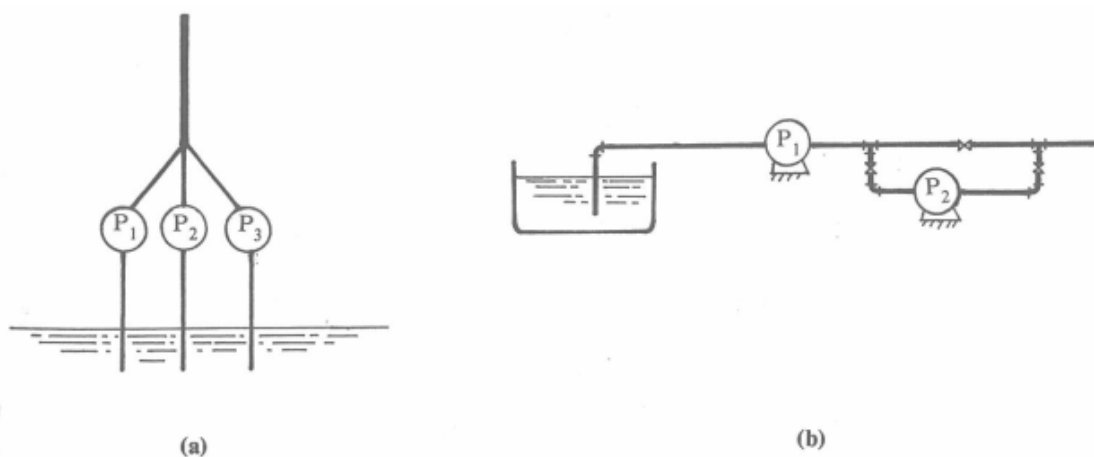
ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้ปั๊มเครื่องใหญ่เพียงเครื่องเดียว เมื่อความต้องการลดลงก็อาจต้องลดความเร็วหรือลดช่องเปิดประตูน้ำลง ในกรณีนี้ปั๊มก็จะทำงานอยู่ในช่วงที่ให้ประสิทธิภาพต่ำ และถ้าจำเป็นต้องทำการซ่อมหรือบำรุงรักษา ก็จะต้องหยุดปฏิบัติงานทั้งหมด

เนื่องจากลักษณะการทำงานของปั๊มซึ่งดูจากกราฟ  $H-Q$  มีให้เฉพาะเมื่อปั๊มทำงานเพียงเครื่องเดียว เมื่อมีปั๊มสองตัวหรือมากกว่าทำงานร่วมกันก็จำเป็นต้องหากราฟ  $H-Q$  ของระบบผสมใหม่โดยอาศัยข้อมูลจากกราฟ  $H-Q$  ของปั๊มแต่ละเครื่องที่นำมาใช้ร่วมกันนั้น นอกจากนั้นยังจำเป็นต้องทราบกราฟเฮดของระบบ (System Head Curve) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับหาอัตราการสูบและเฮด เมื่อปั๊มทุกเครื่องทำงานพร้อม ๆ กันอีกด้วย

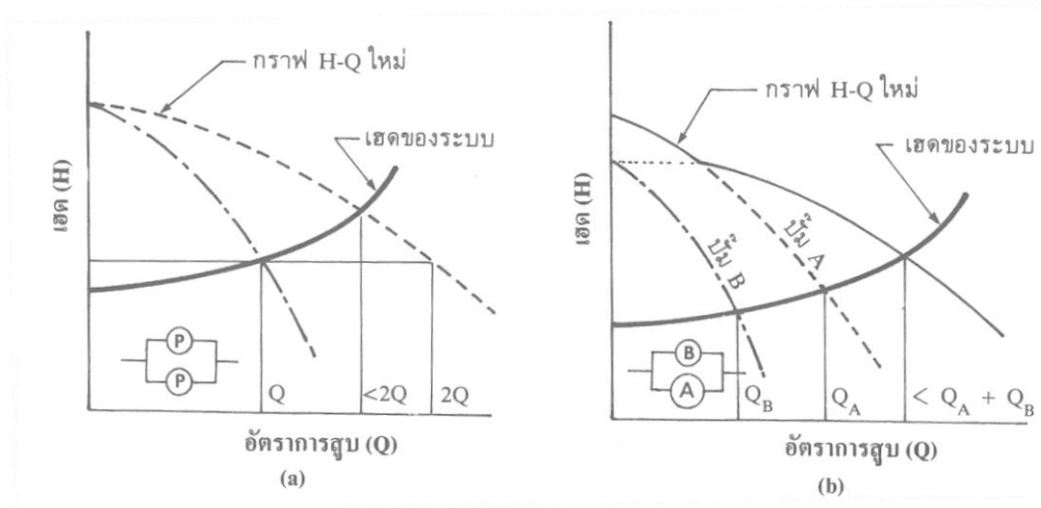
การให้ปั๊มทำงานร่วมกันมี อยู่สองแบบคล้าย ๆ กับการต่อความต้านทานไฟฟ้า คือทำงานร่วมกันแบบขนานและแบบอนุกรม แบบแรกใช้เมื่อต้องการเพิ่มอัตราการไหลโดยไม่ต้องเพิ่มเฮด ส่วนแบบหลังใช้เมื่อต้องการเพิ่มเฮดอย่างเดียว ลักษณะการติดตั้งเพื่อให้กราฟทำงานร่วมกัน

### 2.13.2 ปั๊มทำงานร่วมกันแบบขนาน

ปั๊มทำงานร่วมกันแบบขนาน ในกรณีที่ปั๊มทำงานร่วมกันแบบขนาน กราฟ  $H-Q$  ของระบบอาจหาได้โดยการรวมอัตราการสูบที่ค่าเฮดอย่างเดียวกันของแต่ละปั๊มเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.41 ในรูปเป็นการทำงานร่วมกันของปั๊มเพียง 2 เครื่องเพื่อให้สะดวกต่อการอธิบาย การพิจารณาสำหรับกรณีที่มีปั๊มมากกว่านี้ก็ยังคงใช้กฎเกณฑ์เดียวกัน



รูปที่ 2.41 การติดตั้งปั๊มเพื่อให้ทำงานร่วมกันแบบขนานและอนุกรม



รูปที่ 2.42 กราฟ H-Q ของปั๊มสองเครื่องทำงานร่วมกันแบบอนุกรมและขนาน

ปั๊มนำมาทำงานร่วมกันแบบขนานเป็นปั๊มขนาดเดียวกันที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ (ภาพที่ a) กล่าวคือ มีกราฟ H-Q เส้นเดียวกัน ดังนั้น อัตราการสูบของระบบผสมจะเพิ่มเป็นสองเท่าในกรณีที่เฮดเท่าเดิม แต่ความเป็นจริงแล้วอัตราการสูบจะไม่เป็นสองเท่า ทั้งนี้เพราะว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการสูญเสียพลังงานในระบบท่อ ก็จะเพิ่มตามขึ้นด้วยจนกระทั่งเฮดสูงกว่าเมื่อปั๊มทำงานเพียงเครื่องเดียว อัตราการสูบก็จะลดน้อยลงกว่าสองเท่าและอาจหาได้จากจุดตัดของกราฟ H-Q ใหม่ของระบบผสมกับกราฟเฮดของระบบ (System Head Curve)

ในกรณีที่ปั๊มทั้งสองมีขนาดแตกต่างกัน ปั๊มที่มีเฮดที่อัตราการสูบเป็นสศูนย์หรือ Shutt-off Head น้อยกว่าจะไม่สามารถให้การไหลได้จนกว่าเฮดของปั๊มเครื่องใหญ่ลดลงต่ำกว่า Shutt-off Head ของปั๊มเครื่องเล็ก เมื่อเฮดลดลงต่ำกว่านี้ อัตราการไหลของระบบผสมก็จะเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลจากปั๊มแต่ละเครื่องที่เฮดค่าเดียวกัน (ภาพที่ b) การหาอัตราการไหลที่ได้จากระบบผสมก็ต้องหาจากจุดตัดของกราฟเฮดของระบบกับกราฟ H-Q เมื่อปั๊มทำงานร่วมกัน เช่นเดียวกัน

ในการนำปั๊มมาทำงานร่วมกันแบบขนานนี้ควรเลือกใช้ปั๊มที่มีกราฟ H-Q ค่อนข้างชัน ทั้งนี้เพราะว่าถ้าใช้ปั๊มที่มีกราฟแบนแล้วจะได้กราฟ H-Q ใหม่ (Combined H-Q Curve) ที่บางส่วนเกือบอยู่ในแนวราบซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้อัตราการสูบแปรปรวนมาก (Unstable) โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ากราฟเฮดของระบบ (System Head Curve) แบนด้วย

การหาประสิทธิภาพของระบบผสมที่ทำงานร่วมกันแบบขนาน(Eff)

$$Eff = \frac{\gamma (Q_A + Q_B) \cdot H}{\beta (Bhp \text{ at } Q_A + Bhp \text{ at } Q_B)} \quad (2-31)$$

เมื่อ	Eff	คือ ประสิทธิภาพของระบบผสมที่ทำงานร่วมกันแบบขนาน
	$Q_A, Q_B$	คือ อัตราการสูบของปั๊ม A และ B ที่ค่าเสด H ค่าเดียวกัน
	Bhp	คือ ค่าแรงม้าที่ต้องการ (Brake Horsepower)
	$\gamma$	คือ น้ำหนักจำเพาะของของเหลว
	$\beta$	คือ ตัวแปลงหน่วยกำลังงานให้เป็นแรงม้า

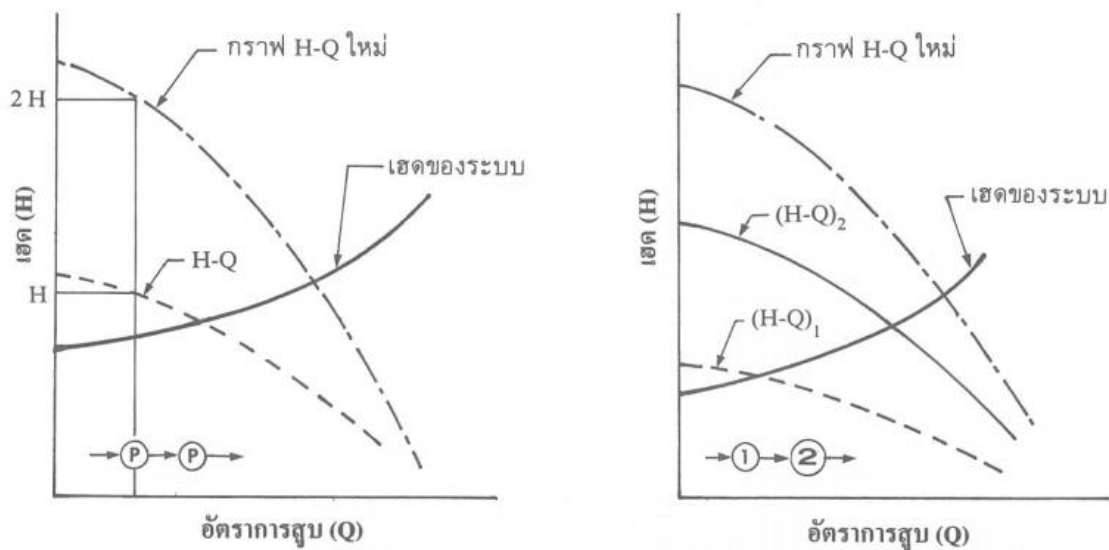
ข้อสังเกตเมื่อปั๊มสองเครื่องเป็นปั๊มชนิดเดียวกัน มีกราฟ H-Q เหมือนกันและประสิทธิภาพเท่ากัน ประสิทธิภาพของระบบผสมจะไม่แตกต่างจากประสิทธิภาพของปั๊มแต่ละเครื่อง

### 2.13.3 ปั๊มทำงานร่วมกันแบบอนุกรม

การนำปั๊มมาทำงานร่วมกันนี้จะเป็นผลให้สามารถเพิ่มเสดได้ตามต้องการ หลักการข้อนี้นำมาใช้กับปั๊มน้ำบาดาลแบบ Deep Well Turbine ซึ่งต้องการเสดมาก หรือในกรณีที่ปั๊มทุกเครื่องมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกอย่าง ประสิทธิภาพของระบบผสมจะไม่ต่างไป จากประสิทธิภาพของปั๊มเครื่องใดเครื่องหนึ่ง แต่ถ้าปั๊มนั้นแตกต่างกัน ประสิทธิภาพของระบบผสม (Eff) อาจหาได้จาก

$$Eff = \frac{\gamma \cdot Q (H_A + H_B)}{\beta (Bhp \text{ at } H_A + Bhp \text{ at } H_B)} \quad (2-32)$$

เมื่อ	Eff	คือ ประสิทธิภาพของระบบผสมที่ทำงานร่วมกันแบบขนาน
	Q	คือ อัตราการไหลผ่านปั๊ม $H_A$ และ $H_B$
	Bhp	คือ ค่าแรงม้าที่ต้องการ
	$\gamma$	คือ น้ำหนักจำเพาะของของเหลว
	$\beta$	คือ ตัวแปลงหน่วยกำลังงานให้เป็นแรงม้า



รูปที่ 2.43 กราฟ H-Q ของปั๊มสองเครื่องทำงานร่วมกันแบบอนุกรม

#### 2.13.4 ความเร็วจำเพาะ (Specific Speed)

ในปั๊มเซนตริฟูกอล ของเหลวที่ไหลเข้าสู่ศูนย์กลางของใบพัดจะถูกเพิ่มพลังงานโดยแรงกระทำของครีปใบพัดและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อัตราการเพิ่มพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของใบพัดและอัตราการหมุน ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงของใบพัดที่ผู้ออกแบบ กำหนดขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานก็มี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ช่องเปิดระหว่างฝาประกับหรือความหนาของใบพัด ทิศทางการไหลออกจากใบพัด จำนวนและความโค้งของครีปใบพัด ฯลฯ เป็นต้น ใบพัดที่มีรัศมีโตและช่องเปิดระหว่างฝาประกับแคบจะให้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวมากกว่าใบพัดที่มีรัศมีเล็กและช่องเปิดกว้าง ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการเฮดสูงแต่อัตราการสูบไม่มากนัก เป็นต้น ใบพัดที่ส่งของเหลวออกในแนวขนานกับเพลลา (Axial Flow) จะให้อัตราการสูบสูงแต่เฮดต่ำ

การที่จะเลือกใช้ปั๊มที่มีใบพัดลักษณะไหนนั้น พิจารณาได้จาก ความเร็วจำเพาะ (Specific Speed) ซึ่งคำนวณโดย

$$N_s = \frac{\text{rpm} \sqrt{\text{gpm}}}{H^{0.75}} \quad (2-33)$$

เมื่อ  $N_s$  ความเร็วจำเพาะมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที  
rpm อัตราการหมุนของใบพัดเป็นรอบต่อนาที

gpm อัตราการสูบของปั๊มเป็นแกลลอนต่อนาที

H เฮดรวมหรือ Total Head (TDH) ที่ต้องการให้ปั๊มทำงานเป็นฟุต

ในกรณีที่ปั๊มมีหลายชั้น (Stage) ค่า H จะเป็น TDH ต่อหนึ่งชั้น สำหรับการคำนวณในระบบ SI สมการสำหรับความเร็วจำเพาะ คือ

$$N_s = \frac{1.633 \text{ rpm } \sqrt{\text{lps}}}{H_m^{0.75}} \quad (2-34)$$

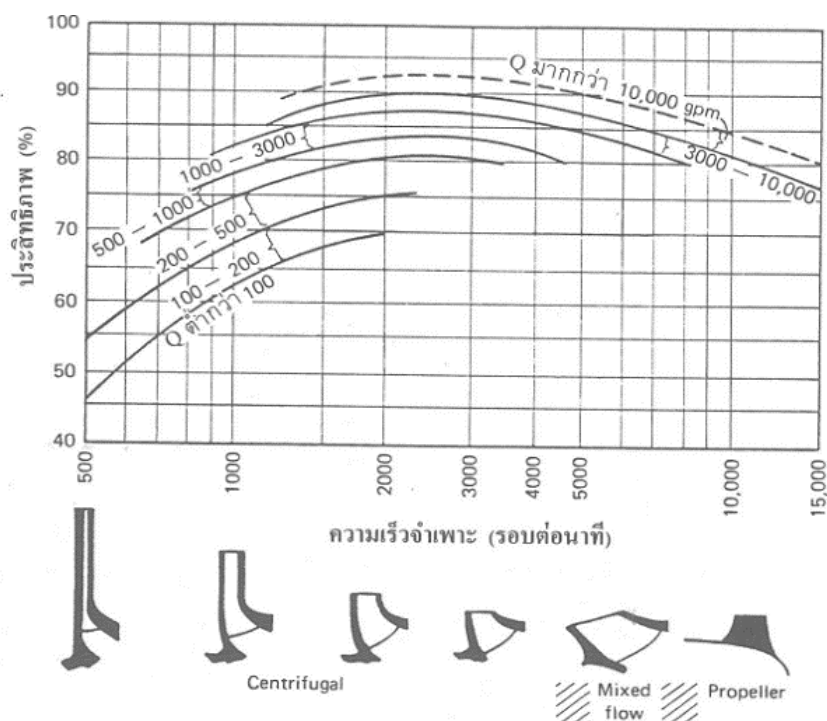
เมื่อ  $N_s$  ความเร็วจำเพาะมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที

rpm อัตราการหมุนของใบพัดเป็นรอบต่อนาที

lps อัตราการสูบของปั๊มเป็นลิตรต่อนาที

H เฮดรวมหรือ Total Head (TDH) ที่ต้องการให้ปั๊มทำงานเป็นเมตร

โดยแท้จริงแล้วความเร็วจำเพาะไม่ได้เป็นความเร็วในความหมายที่ใช้กันทั่วไป แต่เป็นตัวเลขที่ใช้บ่งลักษณะการออกแบบของใบพัดมากกว่า เช่น ปั๊มซึ่งมีความเร็วจำเพาะระหว่าง 500 ถึง 3,000 จะมีทิศทางการไหลออกตั้งฉากกับเพลลา (Radial Flow) จาก 3,000 ถึง 8,000 ทิศทางการไหลออกจะทำมุมระหว่าง 45 ถึง 80 องศา กับเพลลา (Mixed Flow) และปั๊มที่มีความเร็วจำเพาะจากประมาณ 8,000 ถึง 15,000 จะมีทิศทางการไหลออกขนานกับเพลลา (Axial Flow) เป็นต้น ขณะที่ความเร็วจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นรัศมีของใบพัดจะเล็กลงและทิศทางการไหลออกจะเปลี่ยนจากในแนวตั้งฉากกับเพลลามาสเป็นขนานกับเพลลา ใบพัดสองขนาดที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนกัน แต่เพิ่มหรือลดขนาดในสัดส่วนเดียวกันทุกด้านจะมีความเร็วจำเพาะเท่ากัน



รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วจำเพาะ รูปร่างของใบพัด

## 2.14 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของของเหลว (Rota meter)

อัตราการไหล (Volume flowrate,  $Q$ ) คือปริมาตรของของไหลซึ่งไหลผ่านท่อหรือช่องการไหลใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา หรืออีกนัยหนึ่งคือของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉาก ( $A$ ) ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ( $V$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$Q = VA \quad (2-35)$$

อัตราการมวลไหล (Mass flowrate) คือมวลของของไหลซึ่งไหลผ่านท่อหรือช่องการไหลใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา

$$\dot{m} = \rho Q = \rho VA \quad (2-36)$$

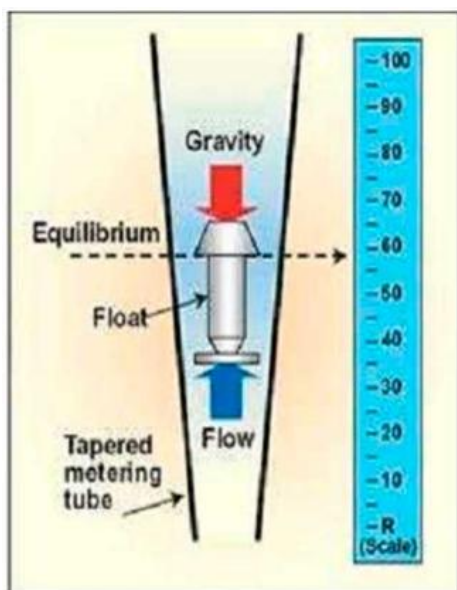


รูปที่ 2.45 มาตรวัดแบบโรตา (Rota Meter)

โครงสร้างเป็นท่อใสในแนวดิ่ง ภายในจะมีลูกลอยที่หนักกว่าของไหล เมื่อของไหลเข้าทางด้านล่าง ความเร็ว ของมันจะพองให้ลูกลอยลอยอยู่ได้ บนท่อจะมีมาตรส่วนบอกค่าเป็นหน่วยความสูง สามารถนำมาเทียบ เป็นอัตราการไหล โดยใช้ Calibrate Chart ที่กำหนด

มาตรวัดแบบโรตาประกอบด้วยท่อกลมเรียว (Tapered Tube) มีลูกลอยทรงกระบอกกลมปลาย ด้านล่างแหลมเป็นรูปกรวยอยู่ภายในท่อกลมเรียว ขณะใช้งานจะวางอยู่ในแนวดิ่ง ปลายด้านเล็กจะอยู่ ด้านล่างเป็นทางเข้าของของไหล เมื่อของไหลไหลขึ้นในแนวดิ่งจะดันให้ลูกลอยถูกยกสูงขึ้นจนสมดุล ของไหล จะไหลผ่านพื้นที่ว่าง รูปวงแหวนระหว่างลูกลอย ทับท่อเรียว ตำแหน่งความสูงของลูกลอยขึ้นอยู่กับอัตราการ ไหล เมื่อลูกลอยสมดุล น้ำหนักของลูกลอยจะเท่ากับแรงฉุด (Drag Force) ของของไหล กระทำต่อลูกลอย





รูปที่ 2.46 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

สามารถใช้ค่าความสัมพันธ์ของแรงเหล่านี้มาหาคำนวณหาอัตราการไหลในขณะนั้นได้ตามสมการ

$$Q = C_d A_\epsilon \left( \frac{2W_{\text{Net}}}{A_{\text{Float}} \rho_{\text{Fluid}}} \right)^{1/2} \quad (2-37)$$

เมื่อ	$W_{\text{Net}}$	คือ น้ำหนักสุทธิของลูกลอย
	$A_a$	คือ $A_{\text{Tube}} - A_{\text{Float}}$
	$A_{\text{Tube}}$	คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อโรตา ณ ตำแหน่งที่ลูกลอยอยู่ในสถานะสมดุล
	$A_{\text{Float}}$	คือ พื้นที่หน้าตัดของลูกลอย

หรือ

เมื่อ	$A_a$	คือ พื้นที่วงแหวนของการไหลผ่าน
	$\rho_{\text{Fluid}}$	คือ ความหนาแน่นของของไหลที่ต้องการวัด
	$C_d$	คือ สัมประสิทธิ์ของการไหลผ่านมาตรวัดโรตา, ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

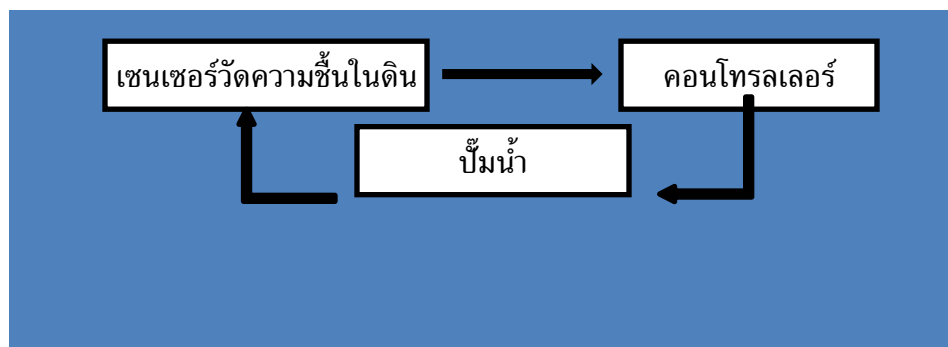
มาตรวัดชนิดนี้ได้ทำการติดตั้งสเกลบอกขนาดอัตราการไหลไว้ที่บริเวณข้างหลอดของเครื่องมือวัด ทำให้สะดวกต่อการอ่านค่าอัตราการไหล อย่างไรก็ตาม มาตรวัดแบบโรตารีจะให้ค่าความคลาดเคลื่อน มากในช่วงที่มีการไหลน้อย ๆ และไม่เหมาะกับของไหลที่มีค่าความหนืดสูงมาก

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน

#### 3.1 ระบบรดน้ำอัตโนมัติ

ขั้นตอนการทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติมีดังต่อไปนี้

Process



อธิบายการทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติ

1. เซนเซอร์วัดความชื้นในดินส่งสัญญาณ อินพุต (In put) ไปยังคอนโทรลเลอร์
2. คอนโทรลเลอร์รับสัญญาณ แล้วประมวลผลตามที่ตั้งค่าเอาไว้
3. เมื่อความชื้นในดินอยู่ที่ 50% ปั๊มน้ำเริ่มทำงาน และ ความชื้นในดินเพิ่มขึ้นเป็น 100 % เซนเซอร์ปั๊มน้ำจะหยุดทำงาน ลักษณะการทำงานจะวนเป็น Loop ไปเรื่อยๆ

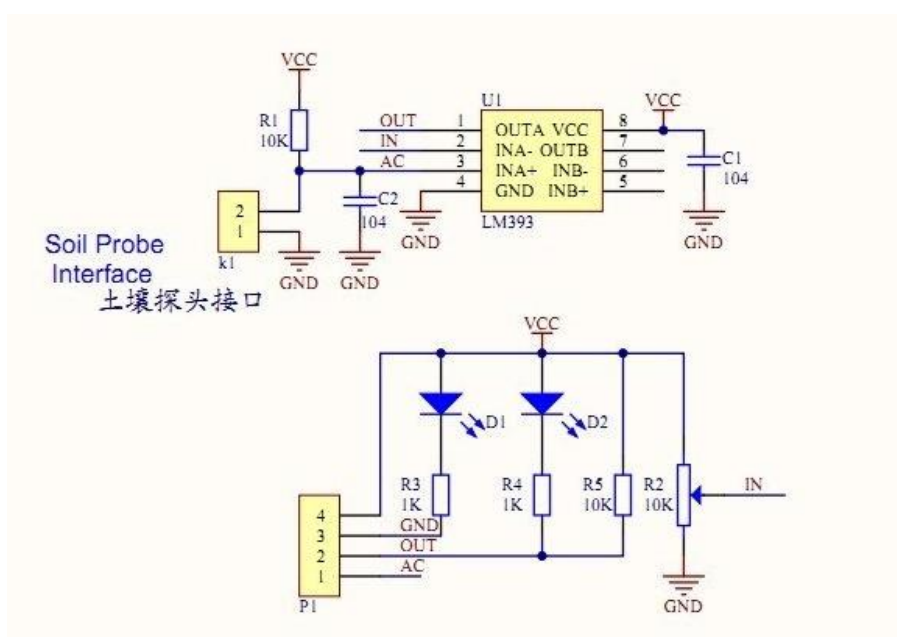
#### 3.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor) ใช้วัดความชื้นในดิน หรือใช้เป็นเซ็นเซอร์น้ำ สามารถต่อใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้อานาล็อกอินพุตอ่านค่าความชื้น หรือเลือกใช้สัญญาณดิจิตอลที่ส่งมาจากโมดูล สามารถปรับความไวได้ด้วยการปรับ Trimpot

## หลักการทำงาน

การใช้งาน จะต้องเสียบแผ่น PCB สำหรับวัดลงดิน เพื่อให้วงจรแบ่งแรงดันทำงานได้ครบวงจร จากนั้นจึงใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ LM393 เพื่อวัดแรงดันเปรียบเทียบกัน ระหว่างแรงดันต้น ที่วัดได้จากความชื้นในดิน กับแรงดันที่วัดได้จากวงจรแบ่งแรงดันปรับค่าโดยใช้ Trimpot หากแรงดันที่วัดได้จากความชื้นของดิน มีมากกว่า ก็จะทำให้วงจรปล่อยลอจิก 1 ไปที่ขา D0 แต่หากความชื้นในดินมีน้อย ลอจิก 0 จะถูกปล่อยไปที่ขา D0

ขา A0 เป็นขาที่ต่อโดยตรงกับวงจรที่ใช้วัดความชื้นในดิน ซึ่งให้ค่าแรงดันออกมาตั้งแต่ 0 - 5V (ในทางอุดมคติ) โดยหากความชื้นในดินมีมาก แรงดันที่ปล่อยออกไปก็จะน้อยตามไปด้วย ในลักษณะของการแปรผกผันกลับ



รูปที่ 3.2 หลักการทำงาน เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor)

## การนำไปใช้งาน

หากนำไปใช้งานด้านการวัดความชื้นแบบละเอียด แนะนำให้ใช้งานขา A0 ต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อวัดค่าแรงดันที่ได้ ซึ่งจะได้ออกมาใช้เปรียบเทียบกับค่าความชื้นได้ หากมีความชื้นน้อย แรงดันจะใกล้ 5V มาก หากความชื้นมาก แรงดันก็จะลดต่ำลง

หากต้องการนำไปใช้ในโปรเจกต์ที่ไม่ต้องใช้วัดละเอียด เช่น โปรเจกต์น้ำต้นไม้ ใช้ควบคุมปั้มน้ำให้น้ำต้นไม้อัตโนมัติ สามารถนำขา DO ต่อเข้ากับทรานซิสเตอร์กำลังเพื่อสั่งให้ปั้มน้ำ หรือโซลินอยล์ทำงาน เพื่อให้มีน้ำไหลมารดต้นไม้ได้เลย เมื่อความชื้นในดินมี มากพอ จะปล่อยลอจิก 0 แล้วทรานซิสเตอร์จะหยุดน้ำกระแส ทำให้ปั้มน้ำหยุดปล่อยน้ำ



รูปที่ 3.3 เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor)

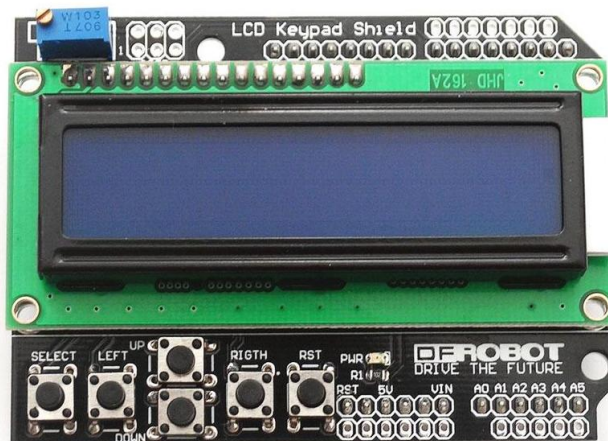
**3.2.2 Controller Arduino Uno R3** บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Open-source บนแพลตฟอร์ม Arduino ของแท้จากผู้ผลิต arduino.cc ประเทศอิตาลี ออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ใช้ชิพ ATmega328P รั้นที่ความถี่ 16 MHz หน่วยความจำแฟลช 32 KB แรม 2 KB บอร์ดใช้ไฟเลี้ยง 7 ถึง 12 V มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานและขาสัญญาณอยู่ที่ 5 V (TTL) มี Digital Input / Output 14 ขา (เป็น PWM ได้ 6 ขา) มี Analog Input 6 ขา Serial UART 1 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ Arduino IDE และโปรแกรมผ่านพอร์ต USB เหมาะสำหรับผู้ที่สนใจเริ่มต้นเรียนรู้การพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์หรือแม้แต่ผู้ที่ไม่เคยเรียนรู้ด้านอิเล็กทรอนิกส์มาก่อนก็สามารถนำมาสร้าง ต้นแบบที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ได้



รูปที่ 3.4 คอนโทรลเลอร์ (Controller Arduino Uno R3)

Controller Arduino Uno R3 บอร์ดนี้ทำหน้าที่ประมวลผลและสั่งอุปกรณ์ทำงานตามที่ผู้ออกแบบได้ออกแบบระบบไว้

**3.2.3 Liquid Crystal Display (LCD)** เป็นจอแสดงผลรูปแบบหนึ่งที่ยิมนำมาใช้งานกับระบบสมองกลฝังตัวอย่างแพร่หลาย จอ LCD มีทั้งแบบแสดงผลเป็นตัวอักษรเรียกว่า Character LCD ซึ่งมีการกำหนดตัวอักษรหรืออักขระที่สามารถแสดงผลไว้ได้อยู่แล้ว และแบบที่สามารถแสดงผลเป็นรูปภาพหรือสัญลักษณ์ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งานเรียกว่า Graphic LCD นอกจากนี้บางชนิดเป็นจอที่มีการผลิตขึ้นมาใช้เฉพาะงาน ทำให้มีรูปแบบและรูปร่างเฉพาะเจาะจงในการแสดงผล เช่น นาฬิกาดิจิตอล เครื่องคิดเลข หรือ หน้าปัดวิทยุ เป็นต้น



### รูปที่ 3.5 จอแสดงผลการทำงาน (LCD)

#### 3.2.4 ปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump)

เครื่องสูบน้ำ (ปั๊มน้ำ) สำหรับการเกษตรนิยมใช้แบบปั๊มหอยโข่ง ซึ่งอาจขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ตามความเหมาะสม เช่น ปั๊มน้ำขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 2HP(แรงม้า ) จะให้น้ำเฉลี่ย 25,000-30,000 ลิตร/ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 ปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump)

3.2.5 แมกเนติกคอนแทกเตอร์ (Magnetic Contactor) หรือแมกเนติกสวิตช์ (Magnetic Switch) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจรไฟฟ้า ในการเปิดปิดของหน้าสัมผัสนั้นอาศัยจะอำนาจแม่เหล็กสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรควบคุมต่างๆ เช่น วงจรควบคุมมอเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 3.7 แมกเนติกคอนแทกเตอร์ (Magnetic Contactor)

3.2.6 สายไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งโดยกระแสไฟฟ้าจะเป็นตัวนำพลังงานไฟฟ้าผ่านไปตามสายไฟจนถึงเครื่องใช้ไฟฟ้า สายไฟทำด้วยสารที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ เรียกว่าตัวนำไฟฟ้า และตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำสายไฟเป็นโลหะที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ดี ลวดตัวนำแต่ละชนิดยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ต่างกัน ตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้มากเรียกว่ามีความนำไฟฟ้ามากหรือมีความต้านทานไฟฟ้าน้อย ลวดตัวนำจะมีความต้านทานไฟฟ้าอยู่ด้วย โดยลวดตัวนำที่มีความต้านทานไฟฟ้ามากจะยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้น้อย



รูปที่ 3.8 สายไฟ



### 3.2.7 หัวรดน้ำ สปริงเกอร์รดน้ำ

ชนิดของหัวสปริงเกอร์ มีหลายชนิด

3.2.7.1 หัวแบบมินิสปริงเกอร์ MiniSprinkler

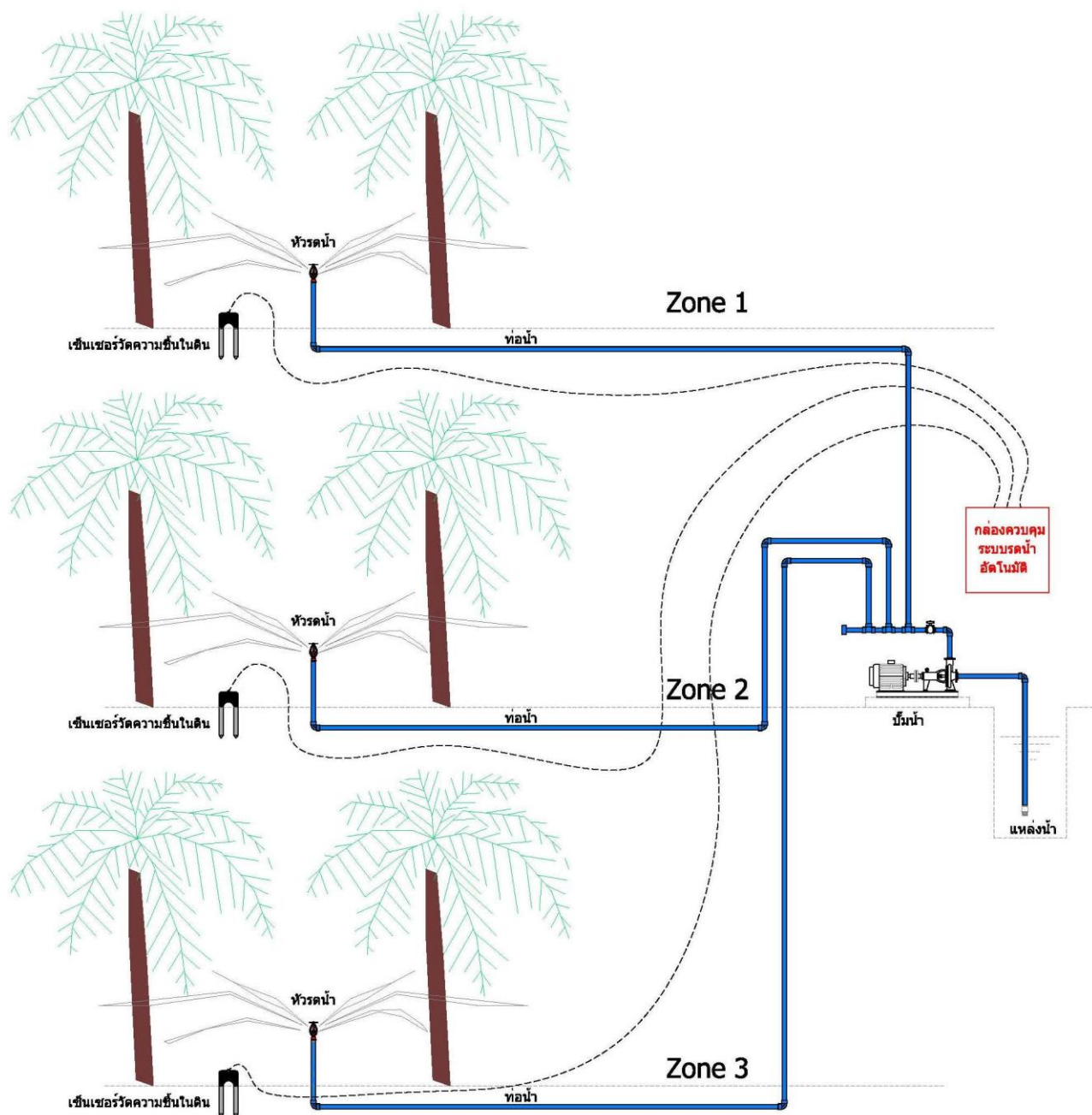
3.2.7.2 หัวแบบสเปรย์

3.2.7.3 หัวแบบโรเตอร์ Rotor



รูปที่ 3.9 หัวรดน้ำ (สปริงเกอร์ SUPER ROTER)

### 3.2.8 ผังระบบการทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติ



รูปที่ 3.10 ภาพลักษณะการทำงานจริง

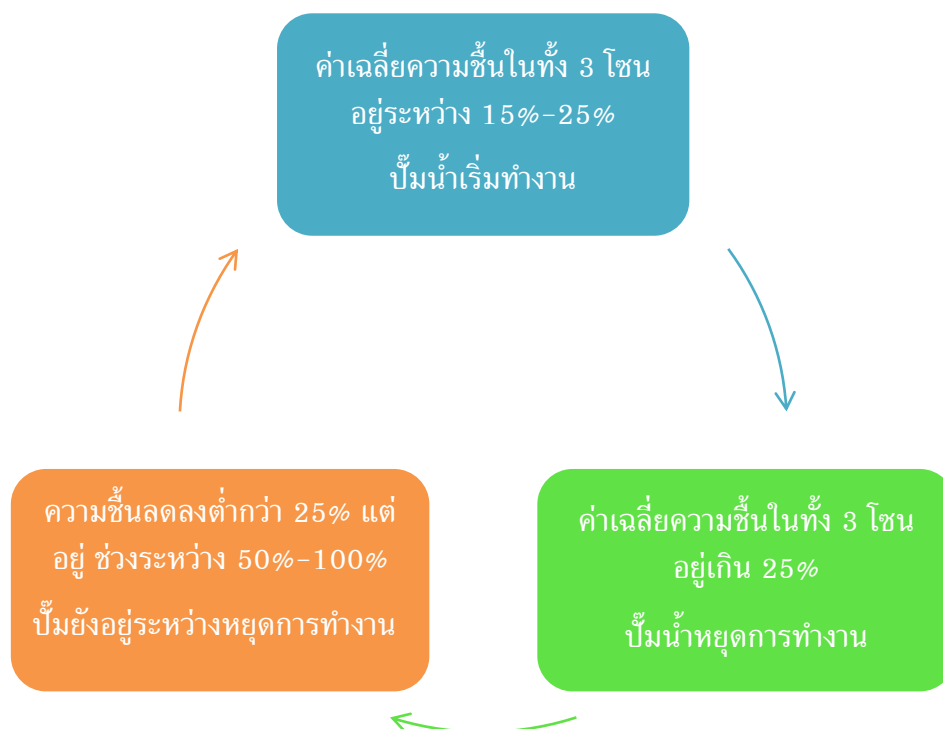
### 3.3 การเก็บข้อมูลและบันทึกผล

จากการดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของโครงการ คณะผู้จัดทำได้ทำการรวบรวมเก็บข้อมูลทั้งหมด ดังนี้

3.3.1 ปัมน์น้ำจะเริ่มทำงานเมื่อเซนเซอร์วัดความชื้นในดินทั้ง 3 โซน จับค่าความชื้นในดินอยู่ในค่าเฉลี่ยระหว่าง 15%-25% ตามค่าที่ตั้งไว้ข้างต้น

3.3.2 ปัมน์น้ำจะหยุดทำงานเมื่อหัวกระจายน้ำ (หัวสปริงเกอร์) ทั้ง 3 โซน เริ่มทำงานแล้วทำให้ความชื้นในดินทั้ง 3 โซน มีค่าเฉลี่ยเกิน 25% ระบบจะสั่งให้ปัมน์น้ำหยุดทำงาน

3.3.3 การทำงานของระบบจะวนเป็น LOOP



รูปที่ 3.11 LOOP การทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติ

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

#### 4.1 ทดสอบเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

##### 4.1.1 ตารางผลการทดสอบเซนเซอร์วัดความชื้น

ในการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความชื้นในดินจะเป็นการทดสอบว่าเซนเซอร์สามารถทำงานได้ตามค่าความชื้นที่ได้ตั้งไว้หรือไม่ รวมถึงทดสอบระยะเวลาในการทำงานแต่ละครั้งด้วย โดยในการทดสอบจะแบ่งประเภทดินที่ใช้ทดสอบเป็น 3 ประเภท คือ ดินร่วน ดินร่วนปนทราย ดินเหนียว โดยใช้วิธีนำดินทั้ง 3 ชนิดใส่กระถางแล้วรดน้ำให้ดินเปียก จากนั้นนำเซนเซอร์ไปไว้ในดินแล้วทำการสังเกตและบันทึกเวลาในการทำงาน ตารางเก็บค่าผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 – 4.3

ตารางที่ 4.1 ค่าของผลการทดสอบประเภทดินร่วน

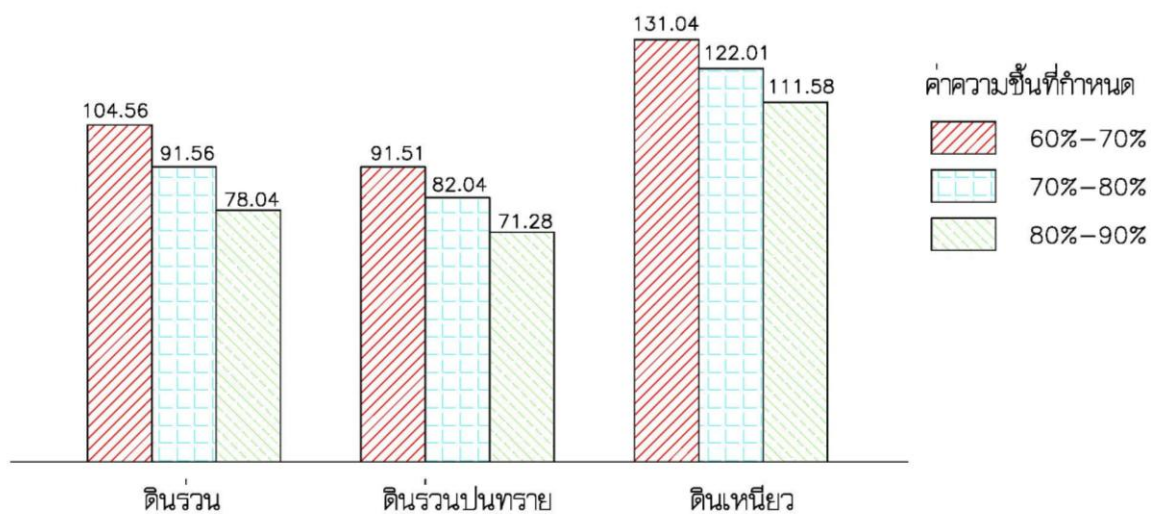
ค่าความชื้นที่กำหนด	ครั้งที่	ระยะเวลาเซนเซอร์ทำงาน
60%–70%	1	105 ชม. 50 นาที
	2	104 ชม. 15 นาที
	3	107 ชม. 05 นาที
	4	104 ชม. 35 นาที
	5	105 ชม. 10 นาที
	เฉลี่ย	104 ชม. 56 นาที
70%–80%	1	91 ชม. 35 นาที
	2	96 ชม. 25 นาที
	3	81 ชม. 10 นาที
	4	95 ชม. 25 นาที
	5	92 ชม. 10 นาที
	เฉลี่ย	91 ชม. 56 นาที
80%–90%	1	80 ชม. 24 นาที
	2	78 ชม. 50 นาที
	3	75 ชม. 40 นาที
	4	78 ชม. 20 นาที
	5	78 ชม. 25 นาที
	เฉลี่ย	78 ชม. 04 นาที

ตารางที่ 4.2 ค่าของผลการทดสอบประเภทดินร่วนปนทราย

ค่าความชื้นที่กำหนด	ครั้งที่	ระยะเวลาเซนเซอร์ทำงาน
60%–70%	1	92 ชม. 25 นาที
	2	87 ชม. 14 นาที
	3	95 ชม. 15 นาที
	4	87 ชม. 24 นาที
	5	93 ชม. 15 นาที
	เฉลี่ย	91 ชม. 51 นาที
70%–80%	1	85 ชม. 10 นาที
	2	81 ชม. 48 นาที
	3	79 ชม. 54 นาที
	4	81 ชม. 30 นาที
	5	80 ชม. 50 นาที
	เฉลี่ย	82 ชม. 04 นาที
80%–90%	1	73 ชม. 18 นาที
	2	69 ชม. 43 นาที
	3	71 ชม. 25 นาที
	4	70 ชม. 35 นาที
	5	71 ชม. 05 นาที
	เฉลี่ย	71 ชม. 28 นาที

ตารางที่ 4.3 ค่าของผลการทดสอบประเภทดินเหนียว

ค่าความชื้นที่กำหนด	ครั้งที่	ระยะเวลาเซนเซอร์ทำงาน
60%–70%	1	123 ซม. 25 นาที
	2	137 ซม. 31 นาที
	3	132 ซม. 57 นาที
	4	132 ซม. 25 นาที
	5	131 ซม. 50 นาที
	เฉลี่ย	131 ซม. 04 นาที
70%–80%	1	121 ซม. 45 นาที
	2	125 ซม. 50 นาที
	3	119 ซม. 10 นาที
	4	122 ซม. 40 นาที
	5	120 ซม. 15 นาที
	เฉลี่ย	122 ซม. 01 นาที
80%–90%	1	114 ซม. 38 นาที
	2	109 ซม. 15 นาที
	3	111 ซม. 22 นาที
	4	110 ซม. 15 นาที
	5	111 ซม. 50 นาที
	เฉลี่ย	111 ซม. 58 นาที



รูปที่ 4.1 กราฟแผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยระยะเวลาการทำงานของเซนเซอร์ (ชั่วโมง)



รูปที่ 4.2 กระถางทดสอบความชื้นของดินร่วน

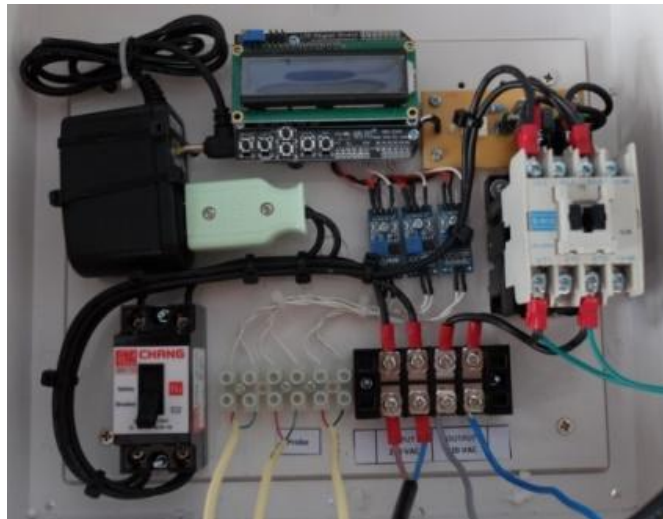


รูปที่ 4.3 กระถางทดสอบความชื้นของดินร่วนปนทราย



รูปที่ 4.4 กระถางทดสอบความชื้นของดินเหนียว





รูปที่ 4.5 กล่องควบคุมในการทดลองความชื้นของดินในกระถาง



รูปที่ 4.6 จอแสดงผลค่าความชื้นเวลาการทำงาน

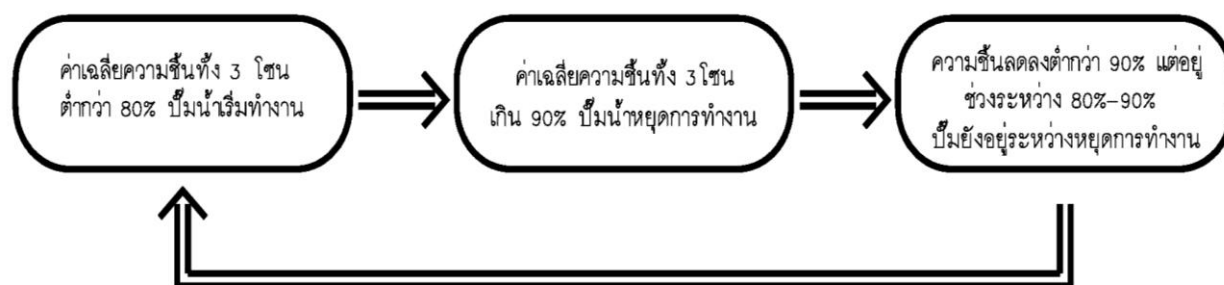
#### 4.1.2 สรุปผลการทดลองเซนเซอร์

การทดสอบเซนเซอร์ แบ่งดินเป็น 3 ประเภท คือ ดินร่วน ดินร่วนปนทราย และ ดินเหนียว และได้กำหนดค่าความชื้นเป็น 3 ช่วงคือ 60%–70% , 70%–80% , 80%–90% ทำการทดลอง ON-OFF ของระบบ 5 ครั้งต่อ 1 ค่าความชื้น แต่ละช่วงความชื้นได้ผล ON-OFF ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้

- 1) เวลาในการทำงานของแต่ละความชื้นดิน
  - ระบบทำงานเร็วอันดับ 1 คือค่าความชื้น 80%–90%
  - ระบบทำงานเร็วอันดับ 2 คือค่าความชื้น 70%–80%
  - ระบบทำงานเร็วอันดับ 3 คือค่าความชื้น 60%–70%
- 2) เวลาในการทำงานของดินแต่ละประเภท
  - ดินที่ระบบทำงานเร็วอันดับ 1 คือ ดินร่วนปนทราย
  - ดินที่ระบบทำงานเร็วอันดับ 2 คือ ดินร่วน
  - ดินที่ระบบทำงานเร็วอันดับ 3 คือ ดินเหนียว

#### 4.2 ทดสอบการทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติกับสถานที่จริง

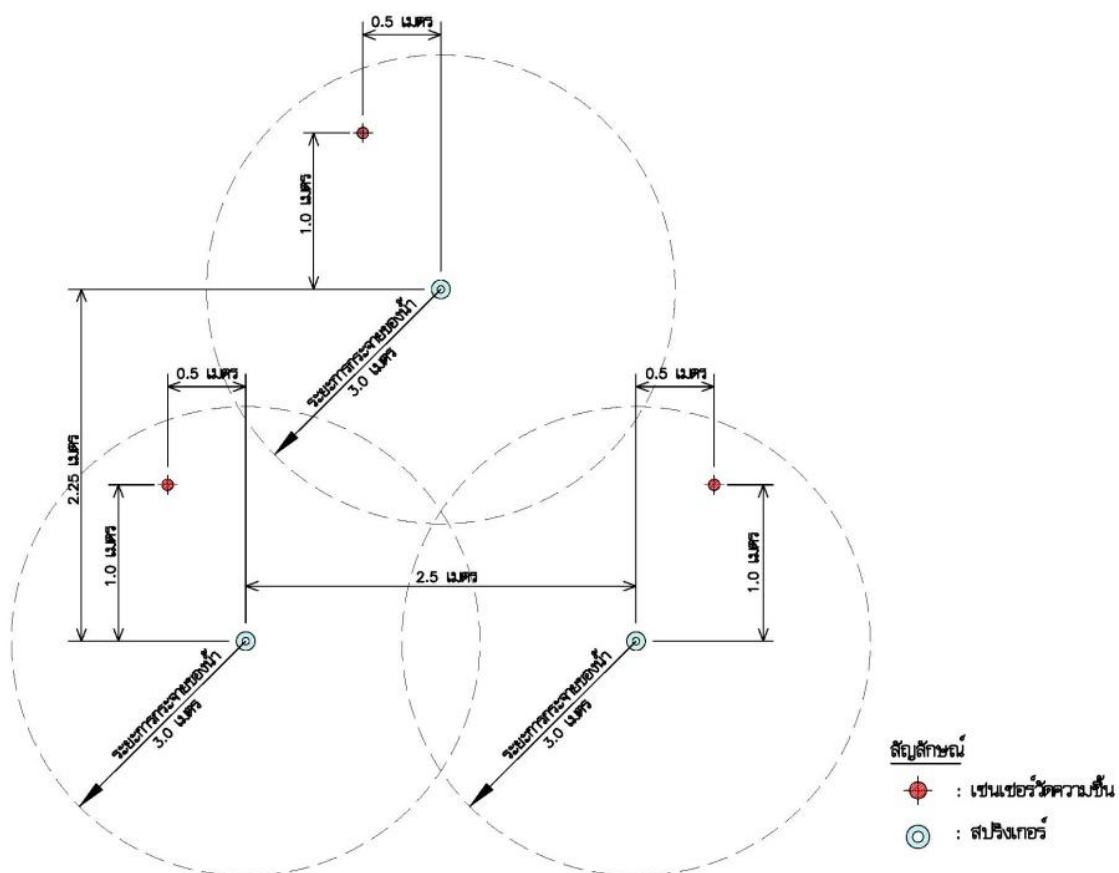
พื้นที่ที่ใช้ทำการทดลองการทำงานของระบบจริง เป็นพื้นที่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย(จังหวัด บุรีรัมย์ )เพราะมีอุณหภูมิอากาศค่อนข้างร้อนจึงเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการทำการทดลองระบบรดน้ำอัตโนมัติซึ่งค่าความชื้นที่เลือกใช้คือ 60%–70%, 70%–80% และ 80%–90% และเลือกใช้ปั๊มหอยโข่ง อัตราการจ่ายน้ำ 110 ลิตรต่อนาที ขนาดมอเตอร์ 0.75 kw แรงดันไฟฟ้าขนาด 220 V



รูปที่ 4.7 LOOP การทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติที่ติดตั้งในสถานที่จริง

ตารางที่ 4.4 ผลการทำงานของระบบกับการติดตั้งในสถานที่จริง(จังหวัดบุรีรัมย์)

ค่าความชื้นที่ กำหนด	ครั้งที่	ระยะเวลาเซนเซอร์ ทำงาน	ระยะเวลา ON-OFF
60%–70%	1	95 ชม. 10 นาที	40 นาที
	2	92 ชม. 25 นาที	40 นาที
	3	92 ชม. 10 นาที	50 นาที
	4	94 ชม. 35 นาที	40 นาที
	5	93 ชม. 30 นาที	40 นาที
	เฉลี่ย	93 ชม. 42 นาที	42 นาที
70%–80%	1	85 ชม. 35 นาที	45 นาที
	2	82 ชม. 10 นาที	50 นาที
	3	81 ชม. 10 นาที	45 นาที
	4	82 ชม. 45 นาที	45 นาที
	5	84 ชม. 15 นาที	40 นาที
	เฉลี่ย	83 ชม. 03 นาที	45 นาที
80%–90%	1	80 ชม. 30 นาที	40 นาที
	2	76 ชม. 35 นาที	50 นาที
	3	65 ชม. 40 นาที	45 นาที
	4	75 ชม. 45 นาที	50 นาที
	5	73 ชม. 40 นาที	45 นาที
	เฉลี่ย	74 ชม. 18 นาที	46 นาที



รูปที่ 4.8 ระยะการวางตำแหน่งสปริงเกอร์และเซนเซอร์วัดความชื้นติดตั้งที่ จังหวัดบุรีรัมย์



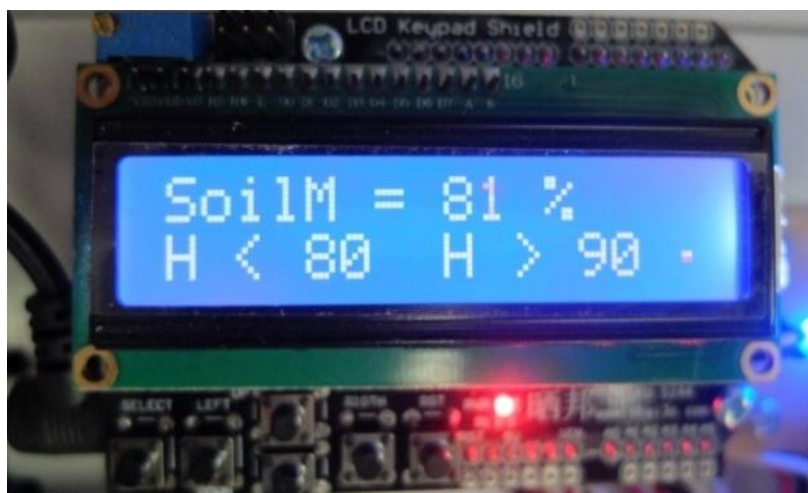
รูปที่ 4.9 กล่อง Control ติดตั้งสถานที่จริง



รูปที่ 4.10 เซนเซอร์วัดความชื้นของดิน ติดตั้งสถานที่จริง



รูปที่ 4.11 การทำงานของสริงเกอร์เมื่อระบบทำงาน



รูปที่ 4.12 จอแสดงผลค่าความชื้น ติดตั้งสถานที่จริง





รูปที่ 4.13 การติดตั้งปั้มระบบจ่ายน้ำ



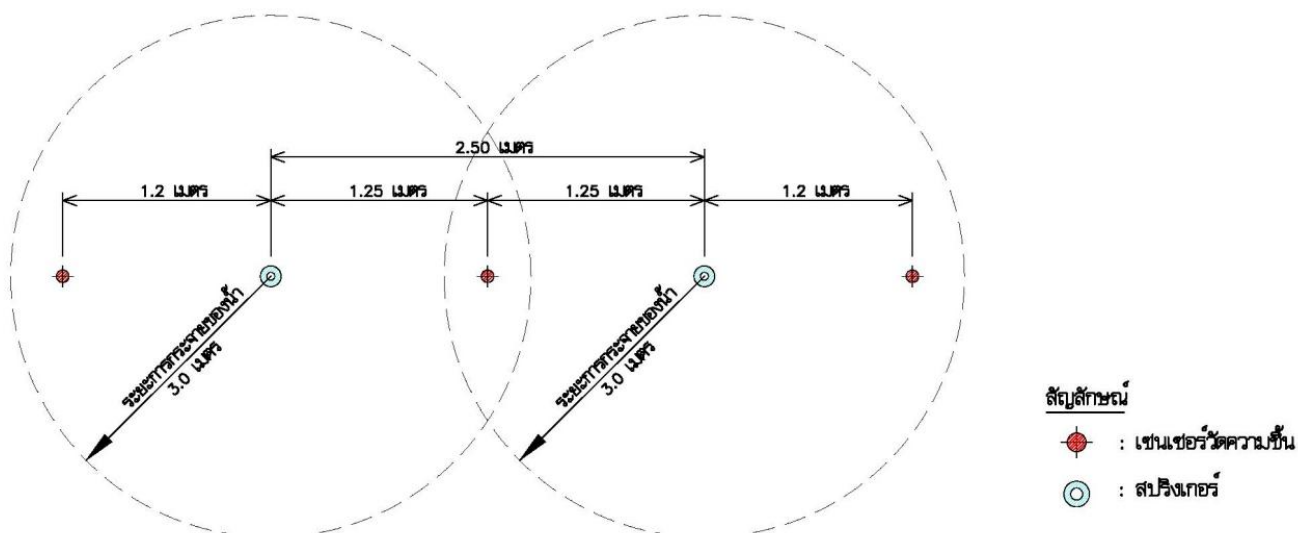
รูปที่ 4.14 ปั้มหอยโข่งและชุดอุปกรณ์จ่ายน้ำในระบบ

#### 4.3 ทดสอบการทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติที่สถาบันรัชต์ภาคย์

ค่าความชื้นที่เลือกใช้คือ 80%–90% และปั๊มที่เลือกใช้เป็นปั๊มไดโว่ อัตราการจ่ายน้ำ 80 ลิตรต่อนาที ขนาดมอเตอร์ 0.50 kw แรงดันไฟฟ้าขนาด 220 V

ตารางที่ 4.5 ผลการทำงานของระบบกับการติดตั้งที่สถาบันรัชต์ภาคย์

ค่าความชื้นที่กำหนด	ครั้งที่	ระยะเวลาเซนเซอร์ทำงาน	ระยะเวลา ON-OFF
80%–90%	1	73 ชม. 30 นาที	40 นาที
	2	72 ชม. 35 นาที	50 นาที
	3	71 ชม. 40 นาที	45 นาที
	4	72 ชม. 25 นาที	40 นาที
	5	73 ชม. 40 นาที	45 นาที
	เฉลี่ย	72 ชม. 54 นาที	44 นาที

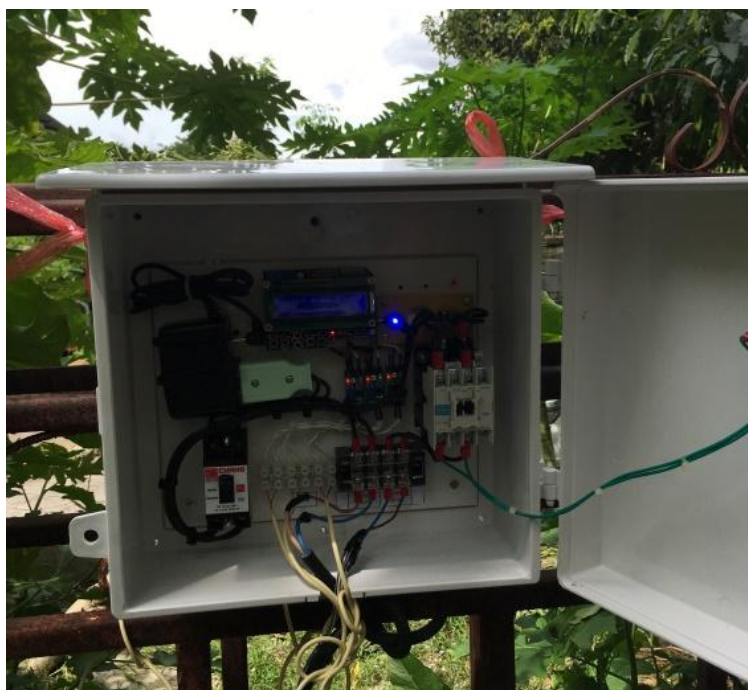


รูปที่ 4.15 ระยะการวางตำแหน่งสปริงเกอร์และเซนเซอร์วัดความชื้นติดตั้งที่ สถาบันรัชต์ภาคย์





รูปที่ 4.16 การติดตั้งปั๊มไโดโวที่สถาบันรัชต์ภาคย์



รูปที่ 4.17 กล้อง Control ติดตั้งที่สถาบันรัชต์ภาคย์



รูปที่ 4.18 ติดตั้งระบบสริงเกอร์ติดตั้งที่สถาบันรัชต์ภาคย์



รูปที่ 4.19 ระบบสริงเกอร์ที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.20 เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน ติดตั้งที่สถาบันรัชต์ภาคย์





รูปที่ 4.21 ค่าความชื้นในดินแสดงผลเมื่อปุ่มทำงาน ติดตั้งที่สถาบันรัชต์ภาคย์



รูปที่ 4.22 ค่าความชื้นในดินแสดงผลเมื่อปุ่มหยุดทำงาน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากข้อมูลการทดลองของงานวิจัย ระบบรดน้ำอัตโนมัติ และทำการติดตั้งให้ระบบทำงานจริงที่จังหวัดบุรีรัมย์และที่สถาบันรัชต์ภาคย์ ข้อมูลการทดลองได้นำดินทั้ง 3 ประเภท คือ ดินร่วน ดินร่วนปนทราย ดินเหนียว มาทำการเก็บข้อมูลโดยใช้ค่าความชื้น 3 ค่าตามที่กำหนดข้างต้นมาทำการทดลองค่าละ 5 ครั้ง ได้ผลแต่ละช่วงความชื้นที่ ON-OFF ที่แตกต่างกัน คือ

ระบบทำงานเร็วอันดับ 1 คือค่าความชื้น 80%-90%

ระบบทำงานเร็วอันดับ 2 คือค่าความชื้น 70%-80%

ระบบทำงานเร็วอันดับ 3 คือค่าความชื้น 60%-70%

ดินที่ระบบทำงานเร็วอันดับ 1 คือ ดินร่วนปนทราย

ดินที่ระบบทำงานเร็วอันดับ 2 คือ ดินร่วน

ดินที่ระบบทำงานเร็วอันดับ 3 คือ ดินเหนียว

สรุปผลได้ตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบเซนเซอร์

ค่าความชื้นที่ กำหนด	ชนิดดินที่ทดสอบ		
	ดินร่วน	ดินร่วนปนทราย	ดินเหนียว
60%-70%	104 ชม. 56 นาที	91 ชม. 51 นาที	131 ชม. 04 นาที
70%-80%	91 ชม. 56 นาที	82 ชม. 04 นาที	122 ชม. 01 นาที
80%-90%	78 ชม. 04 นาที	71 ชม. 28 นาที	111 ชม. 58 นาที

สำหรับการติดตั้งให้ระบบทำงานจริงที่จังหวัดบุรีรัมย์โดยใช้ค่า ON-OFF ความชื้นเดียวกัน 3 ระดับ คือ 60%-70%, 70%-80% และ 80%-90% ดินเป็นประเภทดินร่วน ได้ผลสรุปตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทำงานของระบบกับการติดตั้งในสถานที่จริง(จังหวัดบุรีรัมย์)

ค่าความชื้นที่ กำหนด	ค่าเฉลี่ยระยะเวลา เซนเซอร์ทำงาน	ระยะเวลา ON-OFF
60%-70%	93 ชม. 42 นาที	42 นาที
70%-80%	83 ชม. 03 นาที	45 นาที
80%-90%	74 ชม. 18 นาที	46 นาที

จากผลการทำงานของระบบในสถานที่จริงสามารถสรุปได้เช่นเดียวกับการทำงานของเซนเซอร์ นั่นคือ ค่าระยะเวลาที่เซนเซอร์ ทำงานที่ความชื้น 80%-90% มีระยะเวลาการทำงานเฉลี่ยเร็วสุดที่ 74 ชม. 18 นาที รองลงมาคือที่ค่าความชื้น 70%-80% มีระยะเวลาการทำงานเฉลี่ยที่ 83 ชม. 03 นาที และที่ค่าความชื้น 60%-70% มีระยะเวลาการทำงานเฉลี่ยช้าสุดที่ 93 ชม. 42 นาที

ส่วนค่าระยะเวลาการ ON-OFF นั้นทั้งค่าความชื้น 3 ระดับ มีผลระยะเวลาไม่ต่างกันมากนัก

ส่วนผลการทำงานของระบบที่ติดตั้งในสถาบันรัชต์ภาคย์โดยใช้ค่า ON-OFF ความชื้นเดียวคือ 80%-90% ดินเป็นประเภท ดินร่วน การทำงานของระบบใช้เวลาใกล้เคียงกับที่จังหวัดบุรีรัมย์ นั่นคือ ระยะเวลาเซนเซอร์ทำงานที่ 72 ชม. 54 นาที และ ON-OFF อยู่ที่ 44 นาที

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 สภาพภูมิอากาศเป็นปัจจัยหลักในการทำงานของระบบ ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีความแปรปรวนมาก

5.2.2 การวางตำแหน่งของเซนเซอร์หากวางระยะไม่เหมาะสมก็จะส่งผลต่อการทำงานของระบบ

5.2.3 ประเภทของดินแต่ละพื้นที่ไม่เหมือนกันส่งผลทำให้ระยะเวลาการทำงานของระบบแตกต่างกัน

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

ระบบรดน้ำอัตโนมัติจากการทดสอบเหมาะสำหรับพืชผลทางการเกษตรประเภท ไม้ผล หรือไม้ยืนต้น เพราะไม้ผลหรือไม้ยืนต้นไม่จำเป็นต้องให้น้ำทุกวัน

### บรรณานุกรม

1. วิบูลย์บุญยชโรกุล. 2529. ปั๊มและระบบสูบน้ำ. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ชาญ ถนัดงาน. 2523. กลศาสตร์ของไหล. 23 บัณฑิตเอก, กรุงเทพฯ
3. บรรจง วรธนะพงษ์. 2525. คู่มือเครื่องสูบน้ำพลังน้ำและกังหันน้ำสูบน้ำ. กรมชลประทาน , กรุงเทพฯ
4. <https://th.wikipedia.org/wiki/ทฤษฎีระบบควบคุม>
5. <http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic>
6. [http://www.kit4diy.com/product\\_info.php?products\\_id=208](http://www.kit4diy.com/product_info.php?products_id=208)
7. <http://www.elec4thai.com/product/>

### ภาคผนวก ก

ภาพการทดสอบการทำงานของระบบที่จังหวัดบุรีรัมย์





รูปที่ ก.1 การติดตั้งปั๊มหอยโข่งและชุดอุปกรณ์จ่ายน้ำในระบบ



รูปที่ ก.2 ปั๊มหอยโข่งและชุดอุปกรณ์จ่ายน้ำในระบบ



รูปที่ ก.3 การติดตั้งกล่อง Control ของระบบ



รูปที่ ก.4 กล่อง Control

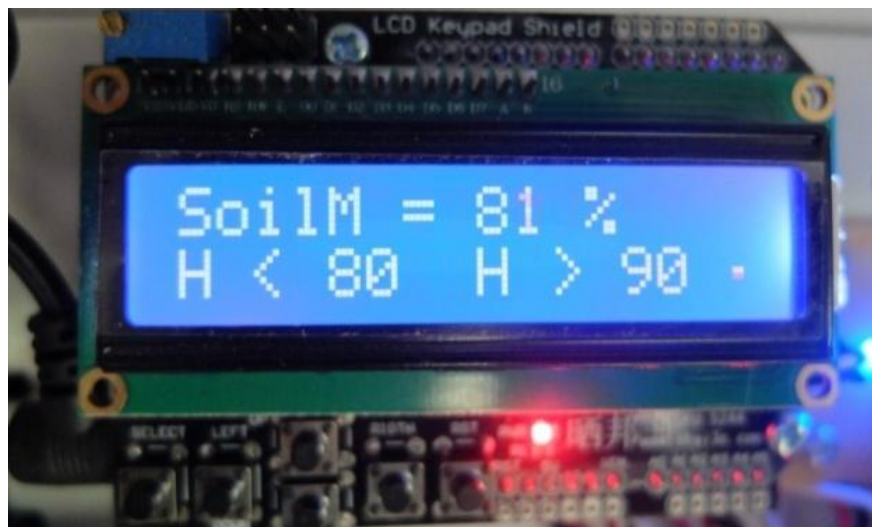


รูปที่ ก.5 เซนเซอร์วัดความชื้นของดิน



รูปที่ ก.6 การทำงานของสริงเกอร์เมื่อระบบทำงาน





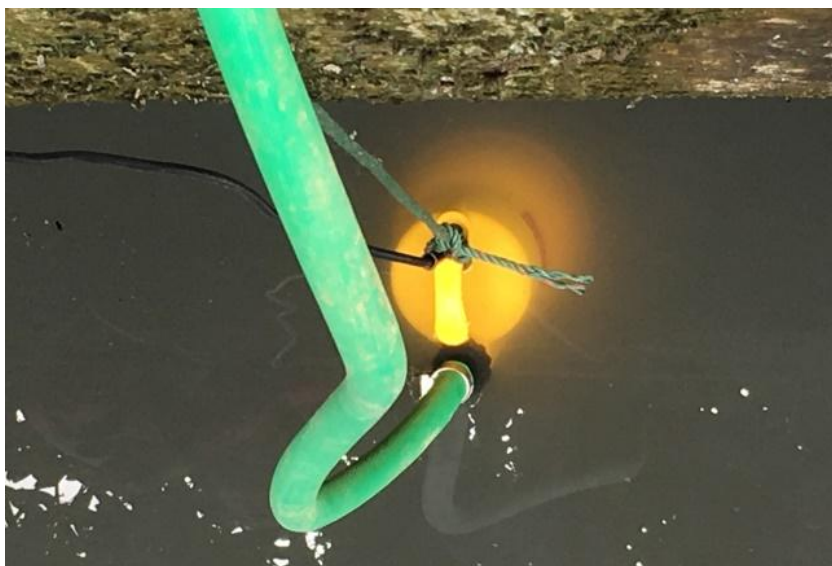
รูปที่ ก.7 จอแสดงผลค่าความชื้น

### ภาคผนวก ข

ภาพการทดสอบการทำงานของระบบที่สถาบันรัชต์ภาคย์



รูปที่ ข.1 ปั๊มไดโว่ขนาด 0.5 kw



รูปที่ ข.2 การติดตั้งปั๊มไดโว่



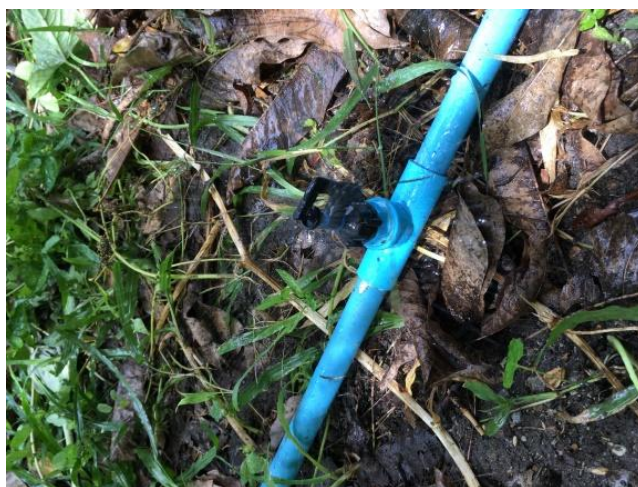
รูปที่ ข.3 การติดตั้งกล่อง Control สถาบันรัชต์ภาคย์



รูปที่ ข.4 กล่อง Control สถาบันรัชต์ภาคย์



รูปที่ ข.5 ติดตั้งระบบสริงเกอร์



รูปที่ ข.6 สริงเกอร์ติดตั้งเสร็จเรียบร้อย





รูปที่ ข.7 เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน



รูปที่ ข.8 ค่าความชื้นในดินแสดงผลเมื่อปุ่มทำงาน



รูปที่ ข.9 สปริงเกอร์ทำงานเมื่อระบบเริ่มทำงาน



รูปที่ ข.10 ค่าความชื้นในดินแสดงผลเมื่อปั๊มหยุด