

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบรถพลิกกลับนำทางแบบอัตโนมัติและการออกแบบระบบควบคุมที่นำมาใช้ในการขับเคลื่อนของรถพลิกกลับนำทางแบบอัตโนมัติ ซึ่งประกอบไปด้วย

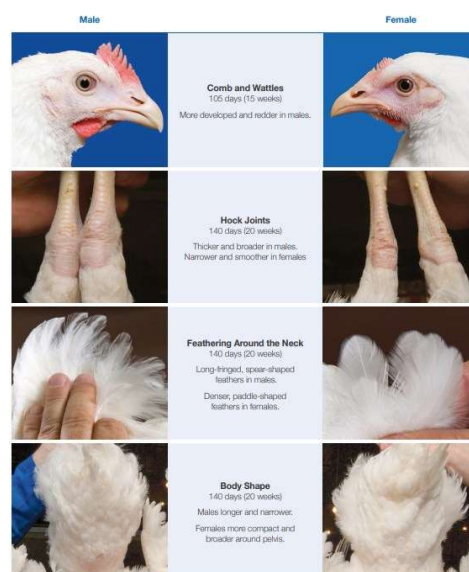
1. ระดับแอมโมเนียภายในโรงเลี้ยง การลดแอมโมเนียในโรงเลี้ยง และผลกระทบของแอมโมเนีย
2. การออกแบบและคำนวณของรถพลิกกลับนำทางแบบอัตโนมัติ
3. การคำนวณพลังของทั้งหมดของรถซึ่งจะนำมาขนาดของแบตเตอรี่
4. ระบบขับเคลื่อนและการเลี้ยง
5. ระบบควบคุม
6. ประเภทแผนที่ต่าง ๆ
7. การสื่อสารไร้สายผ่าน WI-FI

#### 2.1 ความเป็นมาโดยรวมของไก่เนื้อเชิงพาณิชย์

อุตสาหกรรมการเลี้ยงไก่เนื้อในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ทั้งในด้านจำนวนฟาร์มและปริมาณการส่งออกเนื้อไก่ อันเป็นผลจากความต้องการโปรตีนที่เพิ่มขึ้นทั้งในตลาดภายในประเทศและต่างประเทศ ปัจจัยสำคัญที่เอื้อให้อุตสาหกรรมดังกล่าวเติบโตอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ การพัฒนาสายพันธุ์ไก่เนื้อเชิงพาณิชย์ โดยบริษัทผู้ปรับปรุงพันธุ์กรรมขนาดใหญ่ได้ดำเนินงานวิจัยและคัดเลือกสายพันธุ์อย่างเข้มงวด ส่งผลให้ได้สายพันธุ์ที่สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพในการใช้อาหาร และให้เนื้อส่วนต่าง ๆ ในสัดส่วนที่ตลาดต้องการ

สำหรับประเทศไทย สายพันธุ์ไก่เนื้อที่ได้รับความนิยมเป็นหลัก ได้แก่ Ross, Cobb, Arbor Acres, Hubbard และ Avian ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นการนำเข้าหรือพัฒนาต่อจากบริษัทต้นสังกัดในต่างประเทศ ทั้งนี้ สายพันธุ์ Ross และ Cobb เป็นที่พบได้บ่อยในฟาร์มขนาดใหญ่ เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและมีอัตราแลกเนื้อ (FCR) ต่ำ สายพันธุ์ Arbor Acres ซึ่งอยู่ในกลุ่มเดียวกับ Ross มีข้อดีในด้านความแข็งแรงและการปรับตัวได้ดีต่อสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ขณะที่ Hubbard ซึ่งพัฒนาจากประเทศฝรั่งเศส มีสายพันธุ์ย่อยหลายรูปแบบ ให้ผู้เลี้ยงสามารถเลือกใช้ได้ตามความ

เหมาะสมของระบบฟาร์มและสภาพอากาศ ในขณะที่ Avian เป็นอีกหนึ่งสายพันธุ์ที่ให้ความสำคัญกับการเติบโตเร็วและการผลิตเนื้อในปริมาณที่สม่ำเสมอ การตัดสินใจเลือกสายพันธุ์ของเกษตรกรและผู้ประกอบการมักขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นสภาพภูมิอากาศ การจัดการโภชนาศาสตร์ รวมถึงความต้องการของตลาด ทั้งตลาดในประเทศที่นิยมบริโภคเนื้ออกหรือชิ้นส่วนเฉพาะ และตลาดต่างประเทศที่ให้ความสำคัญกับคุณภาพและมาตรฐานการเลี้ยงที่เข้มงวด เพื่อให้ได้ผลผลิตที่ปลอดภัยและมีคุณภาพสูง นอกจากนี้ การใช้โรงเรือนแบบปิด (Evap) ซึ่งมีระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอย่างมีประสิทธิภาพ ยังมีส่วนสนับสนุนการเลี้ยงไก่เนื้อเชิงพาณิชย์ที่เติบโตเร็ว ได้แก่ Ross และ Cobb ขณะที่ผู้ผลิตบางรายอาจเลือกใช้สายพันธุ์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น Hubbard หรือ Arbor Acres เพื่อรับมือกับความผันผวนของสภาพอากาศ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในการเลี้ยงไก่เนื้อในระยะยาว



รูปที่ 2.1 ไก่พันธุ์ ross 308 และการจำแนกเพศ

ที่มา: [https://aviagen.com/assets/Tech\\_Center/Ross\\_PS](https://aviagen.com/assets/Tech_Center/Ross_PS)

### 2.1.1 การอนุบาลและการจัดการลูกไก่ (Brooding Management)

กระบวนการเลี้ยงไก่เนื้อสายพันธุ์ Ross 308 เริ่มต้นตั้งแต่การอนุบาลลูกไก่แรกเกิด (Day-old chicks) ซึ่งเป็นช่วงสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการรอดตายและประสิทธิภาพการเจริญเติบโตในระยะต่อมา ผู้เลี้ยงจะต้องควบคุมอุณหภูมิของโรงเรือนให้อยู่ในช่วงที่ลูกไก่สบาย โดยใช้ฮีตเตอร์หรือเครื่องควบคุมอุณหภูมิ การวางไฟกก (Brooder) อย่างเหมาะสม และรักษาความหนาแน่นของลูกไก่

ตามมาตรฐาน นอกจากนี้ ต้องจัดเตรียมน้ำและอาหารสูตรอนุบาล (Pre-starter feed) ที่มีโปรตีนและพลังงานสูง เพื่อให้ลูกไก่ได้รับสารอาหารที่เพียงพอตั้งแต่ระยะเริ่มต้น ช่วงอนุบาลยังต้องให้ความสำคัญใส่ใจในการตรวจเช็คระบบน้ำดื่ม (Water line) และทำความสะอาดอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดความเสี่ยงในการแพร่กระจายเชื้อโรค การฉีดวัคซีนพื้นฐาน เช่น วัคซีนป้องกันโรคนิวคาสเซิล (ND) และโรคหลอดลมอักเสบติดต่อกัน (IB) ในบางกรณี อาจมีการหยดวัคซีนหรือผสมวัคซีนลงในน้ำดื่ม ซึ่งเป็นอีกแนวทางในการป้องกันโรคระบาดในลูกไก่ด้วย

### 2.1.2 การจัดการโภชนาการ (Nutrition Management)

ไก่ Ross 308 มีอัตราการเจริญเติบโตสูง จึงต้องการโภชนาการที่สมดุลระหว่างโปรตีน พลังงาน แร่ธาตุ และวิตามินในปริมาณที่เหมาะสม สูตรอาหารสำหรับไก่เนื้อจะแบ่งเป็นระยะต่าง ๆ เช่น อาหารระยะ Pre-starter, Starter, Grower และ Finisher โดยแต่ละระยะจะปรับสัดส่วนของสารอาหารให้เหมาะสมกับอัตราการเจริญเติบโตและความต้องการของร่างกายไก่

- 1.Pre-starter/Starter: โปรตีนค่อนข้างสูง (เช่น 21-23%) และพลังงานเพียงพอเพื่อให้ไก่ช่วงแรกสร้างกล้ามเนื้อและโครงสร้างกระดูกที่แข็งแรง
- 2.Grower: ลดสัดส่วนโปรตีนลงเล็กน้อยแต่ยังคงระดับพลังงาน เพื่อให้การเจริญเติบโตต่อเนื่องสมดุล
- 3.Finisher: ลดสัดส่วนโปรตีนลงอีกเล็กน้อย และเพิ่มความสมดุลของพลังงานเพื่อให้ไก่พัฒนาเป็นซากที่มีคุณภาพ

การใช้อาหารที่มีคุณภาพดีและปราศจากสิ่งปนเปื้อนเป็นสิ่งสำคัญ เพราะหากไก่ได้รับสารพิษตกค้างหรือเชื้อราจากวัตถุดิบอาหาร จะกระทบต่อสุขภาพและลดอัตราการเจริญเติบโต ในปัจจุบัน ฟาร์มขนาดใหญ่หลายแห่งในประเทศไทย เริ่มให้ความสำคัญกับมาตรฐานอาหาร เช่น การผลิตอาหารตามหลัก GMP (Good Manufacturing Practice) และ HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point) เพื่อให้มั่นใจได้ถึงคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์

### 2.1.3 การจัดการโรงเรือน (Housing and Environment Management)

การจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้ Ross 308 แสดงศักยภาพได้สูงสุด โรงเรือนมักถูกออกแบบเป็นแบบปิด (Evaporative Cooling System) หรือ “Evap” ซึ่งมีผนังและเพดานที่ป้องกันความร้อนจากภายนอก รวมถึงพัดลมและแผงรังผึ้ง (Cooling Pad) ที่ช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเรือน นอกจากนี้ ยังมีระบบระบายอากาศ (Ventilation) ที่ดี ทำให้ก๊าซแอมโมเนียหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมได้น้อยลง ส่งผลให้ไก่ไม่เครียดและมีสุขภาพแข็งแรงการควบคุมความหนาแน่นของไก่ (Stocking Density) ให้เหมาะสมเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อ

สุขภาพไก่ หากแน่นเกินไป ไก่อาจเกิดความเครียด เพิ่มโอกาสในการแพร่กระจายเชื้อโรค และเกิดอาการเจ็บเท้า (Footpad Dermatitis) อีกทั้งยังต้องบริหารจัดการแสงสว่าง (Lighting Program) ให้เพียงพอและเหมาะสมกับช่วงอายุของไก่ โดยทั่วไปในระบบอุตสาหกรรมอาจกำหนดช่วงเวลาที่เปิดไฟยาว (เช่น 23 ชม.) และพักไฟสั้น (เช่น 1 ชม.) ในช่วงแรก เพื่อกระตุ้นให้ไก่กินอาหารได้มากขึ้น จากนั้นค่อยปรับเวลาเปิด-ปิดไฟให้สมดุลตามอายุ

#### 2.1.4 การดูแลสุขภาพและการป้องกันโรค (Health and Biosecurity)

การดูแลสุขภาพไก่ Ross 308 จำเป็นต้องมีระบบป้องกันโรค (Biosecurity) ที่ดี ซึ่งหมายถึงการควบคุมและตรวจสอบการเข้า-ออกของบุคลากร ยานพาหนะ และอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อป้องกันการนำเชื้อโรคเข้าสู่ฟาร์ม ควรมีจุดล้างล้อรถ จุดพ่นยาฆ่าเชื้อ รวมถึงมาตรการเปลี่ยนชุดและรองเท้าสำหรับคนงานก่อนเข้าพื้นที่เลี้ยงไก่ ตารางการให้วัคซีนไก่ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ไม่ควรมองข้าม ฟาร์มส่วนใหญ่จะปฏิบัติตามโปรแกรมวัคซีนพื้นฐานที่จำเป็น เช่น นิวคาสเซิล (ND) หลอดลมอักเสบ ติดต่อ (IB) และกัมโบโร (IBD) เพื่อเสริมภูมิคุ้มกันต่อโรคระบาดรุนแรง นอกจากนี้ การวัดอุณหภูมิ และเก็บข้อมูลการกิน-การดื่ม การชั่งน้ำหนักไก่แบบสม่ำเสมอ ล้วนเป็นวิธีติดตามสุขภาพและอัตราการเจริญเติบโตของฝูงไก่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.1.5 ระยะเวลาในการเลี้ยงและเก็บผลผลิต (Production Cycle)

สำหรับไก่ Ross 308 ที่มีอัตราการเติบโตเร็ว ระยะเวลาเลี้ยงเพื่อเก็บผลผลิตมักอยู่ในช่วง 35-42 วัน โดยทั่วไป ฟาร์มในประเทศไทยที่ผลิตเนื้อไก่ป้อนตลาดภายในประเทศ มักขุนไก่จนถึงอายุประมาณ 35-38 วัน เพื่อให้ได้น้ำหนักตัวอยู่ราว 2.0-2.5 กิโลกรัม แต่หากเป็นฟาร์มที่ผลิตเพื่อส่งออก หรือต้องการชิ้นส่วนไก่ขนาดใหญ่ เช่น อกไก่หรือสะโพก อาจขุนไก่ให้ถึง 40-42 วัน เพื่อให้ได้โครงสร้างซาก (Carcass) ที่ใหญ่ขึ้นและให้เปอร์เซ็นต์เนื้อออกสูงขึ้น เมื่อถึงกำหนดเก็บผลผลิต ไก่จะถูกจับส่งโรงชำแหละที่มีมาตรฐานสุขอนามัย และกระบวนการผลิตตามหลัก GMP/HACCP เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เนื้อไก่ที่ปลอดภัย ปราศจากสิ่งปนเปื้อน รวมถึงสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ (Traceability) ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในตลาดส่งออกหลายประเทศ

#### 2.1.6 ความสำคัญของ Ross 308 ต่ออุตสาหกรรมและผู้บริโภค

ความนิยมในการเลี้ยง Ross 308 ไม่ได้จำกัดอยู่แค่ในประเทศไทยเท่านั้น แต่ยังแพร่หลายไปทั่วโลก เนื่องจากคุณลักษณะการเจริญเติบโตที่ดีเยี่ยม ให้อัตราคุณภาพสูง ต้นทุนการผลิตต่อกิโลกรัมต่ำ และประหยัดอาหาร ผู้เลี้ยงจึงสามารถทำกำไรได้ในระดับที่น่าพอใจ สำหรับผู้บริโภค เนื้อไก่สายพันธุ์นี้มีความนุ่มพอเหมาะ โดยเฉพาะเนื้ออกที่มีปริมาณโปรตีนสูง ไขมันต่ำ ตอบสนองเทรนด์การบริโภคของคนรุ่นใหม่ใส่ใจสุขภาพ อีกทั้ง การผลิตเนื้อไก่ Ross 308 ยังก่อให้เกิดการจ้าง



งานในภาคเกษตรและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น การแปรรูปเนื้อสัตว์ การขนส่งสินค้า และการตลาดอาหารแปรรูป ซึ่งเสริมสร้างรายได้และกระตุ้นเศรษฐกิจในชนบทและในระดับประเทศ จึงกล่าวได้ว่า Ross 308 เป็นตัวขับเคลื่อนหนึ่งที่ทำให้ประเทศไทยสามารถแข่งขันในตลาดเนื้อไก่โลก และรักษาตำแหน่งผู้ส่งออกเนื้อไก่ชั้นนำอย่างต่อเนื่อง

## 2.2 ผลกระทบของแอมโมเนียและความชื้นที่ไม่เหมาะสมต่อสุขภาพไก่

การเลี้ยงไก่ให้ประสบความสำเร็จนั้น ปัจจัยสำคัญนอกเหนือจากสายพันธุ์ อาหาร และการจัดการโรค คือ คุณภาพอากาศภายในโรงเรือน ซึ่งประกอบด้วยสองตัวแปรหลักที่ต้องควบคุมได้แก่ ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และ ระดับความชื้น (Humidity) หากโรงเรือนขาดการระบายอากาศที่ดีและมีค่าทั้งสองสูงเกินกำหนด จะส่งผลต่อสุขภาพไก่อย่างรุนแรง ทั้งในด้านระบบทางเดินหายใจ การเจริญเติบโต ภูมิคุ้มกัน และเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดโรคต่าง ๆ

### 2.2.1 ก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia) ในโรงเรือนเลี้ยงไก่

#### 1.แหล่งที่มาของแอมโมเนีย

- มูลไก่และน้ำในโรงเรือน: มูลไก่ที่สะสมบนพื้นคอกหรือวัสดุรองพื้นเมื่อเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จะปลดปล่อยแอมโมเนียออกมา
- อาหารตกค้าง: หากอาหารเหลือเน่าเสีย รวมถึงน้ำที่หกเลอะพื้น จะกระตุ้นให้ความชื้นสูงขึ้น และกระตุ้นการย่อยสลาย จนเกิดการก่อกวนของแอมโมเนีย

#### 2.ค่าที่เหมาะสมและผลกระทบหากเกินกำหนด

- ค่าที่แนะนำ: ควรรักษาระดับแอมโมเนียในอากาศให้ต่ำกว่า 20-25 ppm (ส่วนในล้านส่วน) เพื่อสุขภาพและสมรรถภาพของไก่

#### 3.ผลกระทบเมื่อแอมโมเนียสูงเกิน

- โรคระบบทางเดินหายใจ: แอมโมเนียเข้มข้นสูงจะระคายเคืองทางเดินหายใจและเยื่อปอด ส่งเสริมให้ไก่ติดเชื้อแบคทีเรียหรือไวรัสได้ง่าย เช่น โรคหลอดลมอักเสบติดต่อกัน (Infectious Bronchitis, IB) โรคหลอดลมอักเสบจากเชื้อ E. coli หรือการเกิด CRD (Chronic Respiratory Disease) ร่วมกับเชื้อ Mycoplasma
- การอักเสบของตาและเยื่อปอด (Conjunctivitis): ไก่จะแสดงอาการตาแดง น้ำตาไหลหรือหลับตาบ่อย
- การกินอาหารลดลง: ไก่ที่อยู่ในสภาพอากาศไม่ดีจะไม่สบายตัว กินอาหารลดลง ส่งผลให้การเจริญเติบโตช้าลง

- ภูมิต้านทานลดลง: ไก่ที่เครียดจากก๊าซแอมโมเนียมักมีภูมิคุ้มกันลดลง เปิดโอกาสให้โรคติดเชื้ออื่น ๆ เกิดได้ง่าย

## 2.2.2 ความชื้น (Humidity) ในโรงเรือนเลี้ยงไก่

### 1. ที่มาความชื้น

- การหายใจและการคายน้ำของไก่: ไก่ปล่อยไอน้ำออกจากทางเดินหายใจและผิวหนังอย่างต่อเนื่อง

- น้ำในมูลไก่หรือน้ำหกล: วัสดุรองพื้นเปียก การรั่วซึมของระบบน้ำ จะเพิ่มความชื้นในโรงเรือน

- อากาศภายนอก: หากสภาพอากาศภายนอกชื้นมาก และการระบายอากาศในโรงเรือนไม่เพียงพอ ก็ยังเพิ่มความชื้นภายใน

### 2. ค่าที่เหมาะสมและผลกระทบหากเกินกำหนด

- ระดับความชื้นที่แนะนำ: ควรรักษาความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity; RH) ในช่วงประมาณ 50-70% โดยอาจปรับตามอุณหภูมิและอายุของไก่

### 3. ผลกระทบหากความชื้นเกินกำหนด

- ฟันคอกชื้นและอับ: อาจเกิดการสะสมของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราต่าง ๆ เช่น เชื้อรา *Aspergillus* spp. ซึ่งอาจทำให้ไก่เป็นโรกระบบทางเดินหายใจ (Aspergillosis)

- ส่งเสริมการเกิดโรคบิด (Coccidiosis): เชื้อโคคซิเดียชอบสภาพแวดล้อมที่อุ่นและชื้นสูง ทำให้แพร่กระจายและเพิ่มจำนวนได้รวดเร็ว

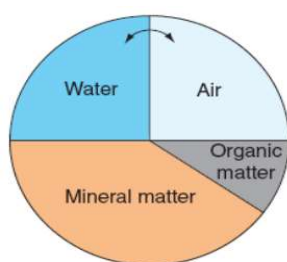
- วัสดุรองพื้นจับตัว: เมื่อวัสดุรองพื้น (เช่น แกลบ ขี้เลื่อย) เปียกชื้นและจับตัวเป็นก้อน จะยังเกิดการสะสมของแบคทีเรียและปลดปล่อยแอมโมเนียเพิ่มขึ้น

- ประสิทธิภาพการระบายความร้อนลดลง: เมื่อความชื้นสูง อากาศจะระบายความร้อนได้ยาก ไก่อาจเครียดจากความร้อน ทำให้กินอาหารน้อยลง โตช้า หรืออาจตายได้ในกรณีรุนแรง

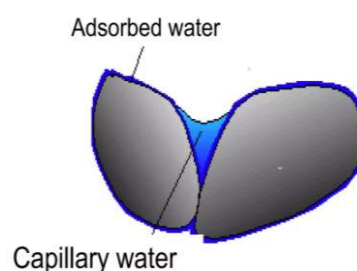
การปล่อยให้ก๊าซแอมโมเนียและระดับความชื้นในโรงเรือนสูงเกินไป เป็นสาเหตุสำคัญที่บั่นทอนสุขภาพและประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่ โดยเพิ่มความเสี่ยงต่อโรกระบบทางเดินหายใจ โรคบิด โรคจากเชื้อรา และทำให้ภูมิคุ้มกันของไก่แยลง เกษตรกรจึงควรให้ความสำคัญกับการจัดการโรงเรือนทั้งในด้านการระบายอากาศ การควบคุมแอมโมเนียไม่ให้เกิน 20-25 ppm และรักษาระดับความชื้นในช่วงประมาณ 50-70% ให้เหมาะสมกับอายุของไก่ การจัดการที่ดีเหล่านี้จะนำไปสู่ฝูงไก่ที่แข็งแรง เติบโตได้อย่างเต็มศักยภาพ ลดต้นทุนการรักษาโรค และสร้างผลกำไรอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมเลี้ยงไก่

## 2.3 ความชื้นในดิน (Soil Moisture)

ความชื้นในดินมีลักษณะทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 สถานะหลัก คือส่วนที่เป็นของแข็งหรือเนื้อดินที่ประกอบด้วยแร่ (mineral matter) และสารอินทรีย์วัตถุ (organic matter) ส่วนที่เป็นของเหลวที่ประกอบด้วยน้ำ (water) และส่วนที่เป็นก๊าซที่ประกอบด้วยอากาศ (air) และไอน้ำ (water vapor) ตามรูปที่ 2.2 (ก) ดังนั้นส่วนที่เป็นของเหลวหรือน้ำในดินจะเป็นความชื้นในดิน (soil moisture) ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ถูกอนุภาคของดินดูดยึดไว้ ทำให้น้ำที่แทรกซึมลงในดินยังคงค้างอยู่ตามช่องของเนื้อดิน (capillary water) หรือเคลือบเป็นฟิล์มรอบอนุภาคดิน (hygroscopic water) ตามรูปที่ 2.2 (ข) ถ้าในส่วนช่องว่างในเนื้อดินมีน้ำอยู่เต็มและไม่มีก๊าซอยู่เลย เรียกว่า ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil) แต่ถ้าในช่องว่างของดินมีทั้งน้ำและก๊าซอยู่ด้วย เรียกว่า ดินที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated soil)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 (ก) แผนภาพส่วนประกอบของดิน (ข) แผนภาพปริมาณน้ำที่ถูกอนุภาคของดินดูดยึดไว้

ที่มา: Training on Climate Smart Irrigation Technology, 22 May 2018

### 2.3.1 การพรวนดิน

การพรวนดินหมายถึงการใช้ส้อมพรวนจอบเสียมหรืออุปกรณ์การเกษตรอื่น ๆ ขุดพลิกหน้าดินที่แห้งกรังให้มีความร่วนซุยทำให้ดินมีความชื้นระบายน้ำและอากาศได้ดีตามรูปที่ 2.2 (ก) รถที่ใช้ในโรงเลี้ยงไก่ที่ใช้สำหรับระบายความชื้นที่สถานประกอบการใช้จริงดังรูปที่ 2.2 (ข) เพื่อทำให้ความชื้นที่อยู่ใต้พื้นปูรองระบายความชื้นออกมา



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 (ก) ภาพตัวอย่างการพรวนดิน (ข) ภาพรถพลิกกลบที่ใช้งานจริง

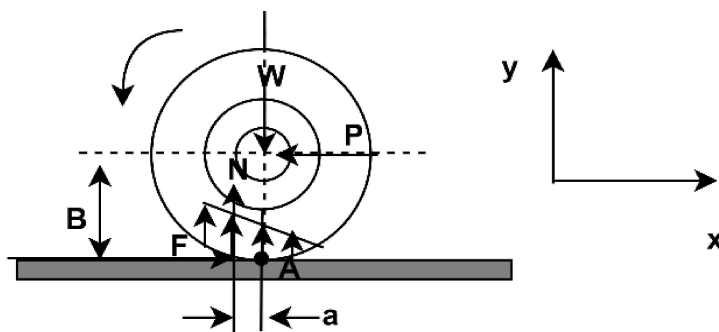
ที่มา: [www.mitrpholmodernfarm.com](http://www.mitrpholmodernfarm.com)

โดยกำหนดรายละเอียดดังนี้ รถพลิกกลบนำทางแบบอัตโนมัติขนาดความกว้าง 0.5 เมตร ความยาว 0.5 เมตร และ สูง 0.3 เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อขนาด 0.075 เมตร มีมวล 20 กิโลกรัม และมีภาระโหลด 20 กิโลกรัม และพิจารณาที่ค่า factor safety 1.3 ดังนั้นจะพิจารณามวลรวมทั้งหมด 52 กิโลกรัม ดังรูปที่ 2.4 โดยวิ่งที่ความเร็ว 0.2 – 0.5 เมตรต่อวินาที ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนสองตัวโดยใช้การขับเคลื่อนแบบ Differential Drive ระหว่างล้อกับมอเตอร์ จะใช้ใช้ในการขับเคลื่อนเพื่อไม่ให้กลบหรือเศษต่างๆเข้ามารบกวนการทำงานของมอเตอร์ โดยใช้การควบคุม ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านการสื่อสารแบบไร้สาย ใช้ Dc motor ติด encoder ในการขับเคลื่อนการทำงาน และใช้ ultrasonic ทำระบบป้องกันการชนของตัวรถ สำหรับชุดพลิกกลบเพื่อทำให้ความชื้นในกลบหรือพื้นปุ๋ยในโรงเลี้ยงไก่ลดลงจะใช้หลักการเหมือนการพรวนดินซึ่งชุดพลิกกลบที่ออกแบบมามี 2 แบบด้วยกัน 1. พานไถ 2. ลูกกลิ้ง

## 2.4 การออกแบบและคำนวณของรถพลิกกลบนำทางแบบอัตโนมัติ

หาขนาดมอเตอร์โดยแรงต้านทั้งหมดมีอยู่ 3 แรง แรงต้านการหมุนของล้อ แรงต้านอากาศ หรือแรงฉุดอากาศ และแรงต้านทางขึ้น

### 2.4.1 แรงต้านการหมุนของล้อ



รูปที่ 2.4 แรงต้านการหมุนของล้อที่เกิดจากการยุบตัวของยางซึ่งกึ่งอยู่บนถนน

แรงต้านการหมุนของล้อจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่าง  $a/b$  และ เรียกสัดส่วนนี้ว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ (coefficient of roiling resistance) ใช้สัญลักษณ์  $K_r$  ดังนั้นถ้ายางรถยนต์แบนมาก ค่า  $a/b$  จะมีค่าสูงขึ้น แรงต้านการหมุนของล้อจะมีค่าสูงขึ้น ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่า  $K_r$  จะลดลง แรงต้านการหมุนของล้อ ดังรูปที่ 2.4 และสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ ( $K_r$ ) ตามชนิดและสภาพของถนนเราจึงเลือกค่าที่มีความใกล้เคียงดังตารางที่ 2.1 จึงหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$R_r = (K_r \times W) + T = (K_r \times M_t g) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $R_r$  = แรงต้านการหมุนของล้อ หน่วยเป็น N

$K_r$  = สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ =  $a/b$

$m_{car}$  = มวลของรถ หน่วย kg

$M_t$  = มวลของรถรวมกับมวลของน้ำหนักที่บรรทุก หน่วย kg

$m_{load}$  = มวลของน้ำหนักที่บรรทุก หน่วย kg

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก หน่วย  $m/s^2$

$T$  = แรงต้านเนื่องจากการหมุนของล้อรถ หน่วย N

ในทางปฏิบัตินั้น ค่า  $R_r$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วของรถเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรในที่นี่จะถือว่า ค่า  $R_r$  มีค่าคงที่ โดยคำนวณจากสมการที่ (2.1)

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ ตามชนิดและสภาพของถนน

| ชนิดและสภาพของถนน      | $K_r$ (เฉลี่ย) |
|------------------------|----------------|
| ถนนลาดยางและถนนคอนกรีต |                |
| สภาพดีเยี่ยม           | 0.014-0.018    |
| สภาพดีพอใช้            | 0.018-0.020    |
| ถนนหินปูพื้น           | 0.023-0.030    |
| ถนนลูกรัง              | 0.020-0.025    |
| ถนนดิน                 |                |
| ดินแข็งอัดแน่น         | 0.025-0.035    |
| ดินเปียกหลังฝนตก       | 0.050-0.150    |
| ถนนทราย                | 0.10-0.30      |

ที่มา: [www.scopus.com](http://www.scopus.com)

#### 2.4.2 แรงต้านอากาศหรือแรงฉุดอากาศ

แรงต้านอากาศเป็นแรงที่มีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่หรือทิศทางตรงข้ามกับแรงที่พยายาม จะทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านกระแสอากาศแรงต้านอากาศคำนวณและหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ(Drag Coefficient) จากตารางที่ 2.2 และหาค่าความหนาแน่นของอากาศ จากตารางที่ 2.3 คำนวณแรงต้านอากาศจากสมการ 2.2

$$R_a = 0.5 \rho V^2 A C_D \quad (2.2)$$

เมื่อ  $R_a$  = แรงต้านอากาศหรือแรงฉุดอากาศ

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

$V^2$  = ความเร็วลมเมื่อวัตถุหยุดนิ่งหรือความเร็วของวัตถุเมื่อลมหยุดนิ่ง  
หน่วยเป็น  $\text{m/s}$

$C_D$  = สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดรถ หน่วยเป็น  $\text{m}^2$

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ(Drag Coefficient) ในรูปร่างต่างๆ

| รูปร่าง (shape)       | Drag Coefficient ( $C_D$ ) |
|-----------------------|----------------------------|
| Sphere                | 0.47                       |
| Half-sphere           | 0.42                       |
| Cone                  | 0.50                       |
| Cube                  | 1.05                       |
| Long-Cylinder         | 0.82                       |
| Shot-Cylinder         | 1.15                       |
| Streamlined-Body      | 0.04                       |
| Streamlined Half-Body | 0.09                       |
| Car                   | 0.27-0.45                  |

ที่มา: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ

| Temperature<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Density, $\rho$<br>( $\text{kg} / \text{m}^3$ ) | Dynamic<br>viscosity, $\mu$<br>( $\text{N}\cdot\text{s} / \text{m}^2$ ) | Kinematic<br>viscosity, $\nu$<br>( $\text{m}^2 / \text{s}$ ) | Specific heat<br>ratio, $\gamma$ |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| -40                                   | 1.514                                           | 1.57 E-5                                                                | 1.04 E-5                                                     | 1.401                            |
| -20                                   | 1.395                                           | 1.63 E-5                                                                | 1.17 E-5                                                     | 1.401                            |
| 0                                     | 1.292                                           | 1.71 E-5                                                                | 1.32 E-5                                                     | 1.401                            |
| 5                                     | 1.269                                           | 1.73 E-5                                                                | 1.36 E-5                                                     | 1.401                            |
| 10                                    | 1.247                                           | 1.76 E-5                                                                | 1.41 E-5                                                     | 1.401                            |
| 15                                    | 1.225                                           | 1.80 E-5                                                                | 1.47 E-5                                                     | 1.401                            |
| 20                                    | 1.204                                           | 1.82 E-5                                                                | 1.51 E-5                                                     | 1.401                            |
| 25                                    | 1.184                                           | 1.85 E-5                                                                | 1.56 E-5                                                     | 1.401                            |
| 30                                    | 1.165                                           | 1.86 E-5                                                                | 1.60 E-5                                                     | 1.400                            |
| 40                                    | 1.127                                           | 1.87 E-5                                                                | 1.66 E-5                                                     | 1.400                            |
| 50                                    | 1.109                                           | 1.95 E-5                                                                | 1.76 E-5                                                     | 1.400                            |
| 60                                    | 1.060                                           | 1.97 E-5                                                                | 1.86 E-5                                                     | 1.399                            |
| 70                                    | 1.029                                           | 2.03 E-5                                                                | 1.97 E-5                                                     | 1.399                            |

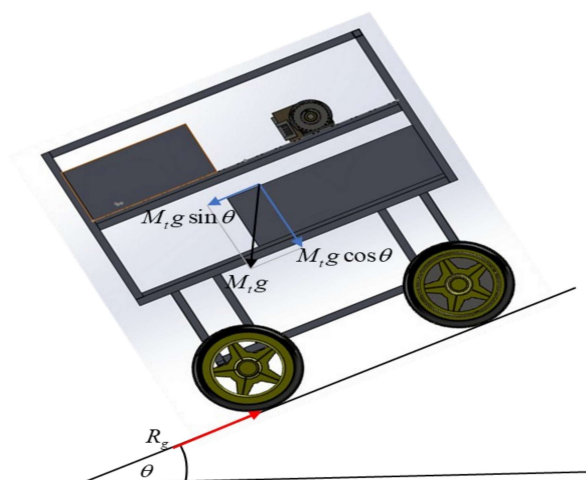
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

| Temperature<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | Density, $\rho$<br>( $\text{kg} / \text{m}^3$ ) | Dynamic<br>viscosity, $\mu$<br>( $\text{N}\cdot\text{s} / \text{m}^2$ ) | Kinematic<br>viscosity, $\nu$<br>( $\text{m}^2 / \text{s}$ ) | Specific heat<br>ratio, $\gamma$ |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 80                                    | 0.9996                                          | 2.07 E-5                                                                | 2.07 E-5                                                     | 1.399                            |
| 90                                    | 0.9721                                          | 2.14 E-5                                                                | 2.20 E-5                                                     | 1.398                            |
| 100                                   | 0.9461                                          | 2.17 E-5                                                                | 2.29 E-5                                                     | 1.397                            |
| 200                                   | 0.7461                                          | 2.53 E-5                                                                | 3.39 E-5                                                     | 1.390                            |
| 300                                   | 0.6159                                          | 2.98 E-5                                                                | 4.84 E-5                                                     | 1.379                            |
| 400                                   | 0.5243                                          | 3.32 E-5                                                                | 6.34 E-5                                                     | 1.368                            |
| 500                                   | 0.4565                                          | 3.64 E-5                                                                | 7.97 E-5                                                     | 1.357                            |
| 1000                                  | 0.2772                                          | 5.04 E-5                                                                | 1.82 E-4                                                     | 1.321                            |

ที่มา: (R.D. Blevins)

### 2.4.3 แรงต้านทางชัน

ในกรณีที่รถวิ่งขึ้นทางชัน กำลังจากเครื่องยนต์(หรือมอเตอร์) บางส่วนเพื่อถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทางชัน (Gradient Resistance) ทำให้เครื่องยนต์(หรือมอเตอร์) ต้องทำงานหนักมากกว่าการวิ่งบนถนนระดับ แต่ทางกลับกันถ้ารถยนต์(หรือรถอัตโนมัติ) วิ่งลงทางลาดเครื่องยนต์(หรือมอเตอร์) จะทำงานน้อยลงเพราะมีแรงเสริมจากแรงโน้มถ่วงของโลกแรงต้านทางชันจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ 1.น้ำหนักของรถอัตโนมัติ 2.ความชันของถนน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเกิดแรงต้านทานจากความชัน



จากรูปที่ 2.5 สามารถเขียนสมการแรงต้านทางชันได้ดังนี้

$$R_g = W \sin \theta \quad (2.3)$$

ในกรณีที่  $\theta$  มีค่าน้อย(น้อยกว่า  $20^\circ$ ) จะได้ว่า  $\sin \theta = \tan \theta$  ดังนั้น

$$R_g = W \tan \theta \quad (2.4)$$

ถ้าให้ค่า  $G =$  ความชันในหน่วยเปอร์เซ็นต์  $= \tan \theta \times 100\%$  ดังนั้นได้สูตรหาแรงต้านความชันหน่วยเป็น N

$$R_g = \frac{WG}{100} = (M_t g \times G) / 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $R_g =$  แรงต้านเนื่องจากความชัน หน่วย N

$G =$  ความชันในหน่วยเปอร์เซ็นต์ %

$M_t =$  มวลของรถรวมกับมวลของน้ำหนักที่บรรทุก หน่วย kg

$g =$  ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก หน่วย  $m/s^2$

#### 2.4.4 แรงต้านทั้งหมด ( $R_2$ )

จากสมการ

$$R_t = R_r + R_a + R_g \quad (2.6)$$

POLE ของมอเตอร์ไฟฟ้า คือส่วนประกอบที่เป็นขดลวดพันอยู่รอบแกนของโลหะจะอยู่บริเวณระหว่างขั้วแม่เหล็กภายในมอเตอร์ POLE ของ มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นตัวบ่งบอกความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า ถือเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า หากจำนวน POLE ยิ่งมาก ความเร็วรอบของมอเตอร์จะยิ่งต่ำ แต่จะมีแรงบิดที่สูง ในทางกลับกัน หากจำนวน POLE ยิ่งน้อย จะทำให้มีความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สูง แต่ขณะเดียวกันแรงบิดของมอเตอร์จะน้อย แต่ในความเป็นจริงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละตัวจะไม่เท่ากันและไม่มีสูตรตายตัวในการคำนวณหา เนื่องจากการออกแบบของผู้ผลิตแต่ละแห่งไม่เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ยังมีสูตรคำนวณหาความเร็วรอบต่อนาทีของมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อนำไปคำนวณและเลือกมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้อยู่

โดยคำนวณจากสมการ

$$N = 120 \times f / P \quad (2.7)$$

เมื่อ  $N$  = ความเร็วรอบต่อนาที หน่วย rpm

$f$  = ความถี่ของกระแสไฟขนาด 50 Hz หรือ 60 Hz

$P$  = จำนวน pole ของมอเตอร์

#### 2.4.5 กำลังมอเตอร์

จากการขับเคลื่อนที่ล้อเราสามารถหากำลังขับเคลื่อนของมอเตอร์ได้ เนื่องจากการถ่ายทอดกำลังจะมีการสูญเสียกำลังไปบางส่วน ดังนั้นเมื่อหาค่าย้อนกลับไปที่มอเตอร์กำลังของมอเตอร์จะต้องมีค่ามากกว่ากำลังขับเคลื่อนที่ล้อ ดังนั้นจะได้ดังสมการ

$$P_e = 100 FV / \eta_t \quad (2.8)$$

เมื่อ  $P_e$  = กำลังของมอเตอร์ หน่วย วัตต์ (W)

$F$  = แรงต้านทั้งหมด หน่วย นิวตัน (N)

$V$  = ความเร็วของรถ หน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

$\eta_t$  = ประสิทธิภาพการถ่ายทอด (%)

#### 2.4.6 อัตราการทดเกียร์

$$N_1 G = N_2 Z \quad (2.9)$$

เมื่อ  $N_1$  = อัตราเร็วของเฟืองขับ หน่วย รอบต่อวินาที (rpm)

$N_2$  = อัตราเร็วของเฟืองท้าย หน่วย รอบต่อวินาที (rpm)

$Z$  = อัตราการทดเกียร์

$G$  = อัตราการทดเกียร์

#### 2.4.7 การคำนวณหาทอร์กที่มอเตอร์ส่งให้ล้อ

$$T_2 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right) T_1 \quad (2.10)$$

เมื่อ  $T_2$  = แรงบิดที่มอเตอร์ส่งให้ล้อ หน่วย นิวตันเมตร (Nm.)

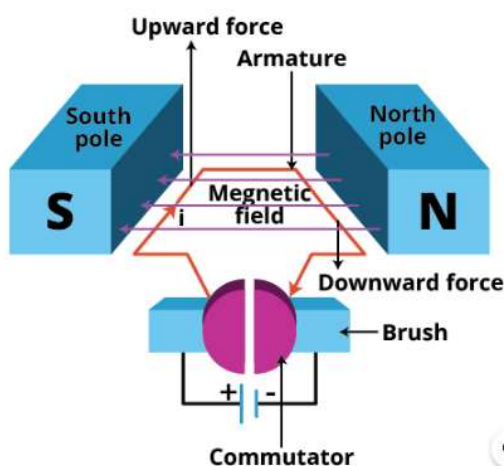
$T_1$  = แรงบิดของมอเตอร์ หน่วย นิวตันเมตร (Nm.)

การออกแบบแบตเตอรี่จะคิดจากพลังงานทั้งที่รั่วใช้พลังงานใหญ่จะมาจากมอเตอร์ โดยจะใช้จากสมการ 2.14 มาคูณกับเวลาเวลาทำงานซึ่งเป็นเวลา 20 นาที ต่อ 1 รอบการชาร์จมา คำนวณย้อนกลับไปขนาดของแบตเตอรี่

## 2.5 การคำนวณพลังของทั้งหมดของรถซึ่งจะนำมาขนาดของแบตเตอรี่

### 2.5.1 มอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรงทำงานโดยการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดที่ตั้งอยู่ในสนามแม่เหล็ก นี่ทำให้เกิดแรงที่ทำให้สนามแม่เหล็กกำเนิดขึ้น โดยแรงนี้ขึ้นอยู่กับกระแส (I) และความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กและแท่งแม่เหล็กเพอร์ไรต์ 2 ชั้นที่มีรูปแบบโค้งยึดติดกับตัวถัง (Stator) เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งเข้าสู่ใจกลางของมอเตอร์ แรงนี้จะวิ่งจากทิศเหนือไปยังทิศใต้ของขั้วแม่เหล็ก ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กวิ่งบนตัวถังโลหะกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่มีการพันกับหุ่นโรเตอร์ (Rotor) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และต้านกับสนามแม่เหล็กถาวร นี่ทำให้เกิดแรงบิด เพื่อหมุนหุ่นโรเตอร์ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มีแรงมากกว่ากระแสจะไหลผ่านไปยังหุ่นโรเตอร์ผ่านแปรงถ่าน (Brush) ซึ่งสัมผัสกับแหวนตัวนำในหุ่นโรเตอร์และแหวนคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เพื่อนำกระแสเข้าไปในขดลวดอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

ที่มา: [www.sciencefacts.net](http://www.sciencefacts.net)

### 2.5.2 กฎของโอห์ม

กฎของโอห์มเป็นกฎที่กำหนดขึ้นมาจากความสัมพันธ์ของปริมาณไฟฟ้าทั้งสามประการ คือ แรงดันไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (I) และความต้านทาน (R) ในวงจรไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไฟฟ้าเพียงส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดจะทำให้วงจรไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามกฎของโอห์ม ความสัมพันธ์ของปริมาณไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าเหล่านี้ มีหน่วยเป็นดังนี้

1. กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมป์ (A)

2. แรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

3. ความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )

ความสัมพันธ์ของปริมาณไฟฟ้าทั้ง 3 ส่วนนี้เป็นดังนี้

$$I \propto V \text{ เมื่อ } R \text{ คงที่} \quad (2.11)$$

และ 
$$I \propto \frac{1}{R} \text{ เมื่อ } V \text{ คงที่} \quad (2.12)$$

### 2.5.3 กำลังไฟฟ้ากับกฎของโอห์ม

กำลังไฟฟ้าสามารถนำมาใช้งานร่วมกับกฎของโอห์มได้

$$P = VI \quad (2.13)$$

เมื่อ  $P =$  กำลังไฟฟ้า หน่วย วัตต์ (W)

$V =$  แรงดันไฟฟ้า หน่วย โวลต์ (V)

$I =$  กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์ (A)

ที่มา: วงจรไฟฟ้ากระแสตรง พันธุ์ศักดิ์ พุฒมานิตพงศ์

การคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่จากพลังงานที่ใช้ไปคูณด้วยเวลาจะได้พลังของระบบที่ต้องใช้

$$E_p = V_p I_p \quad (2.14)$$

เมื่อ  $E_p =$  พลังงานของแบตเตอรี่ หน่วย วัตต์ (W)

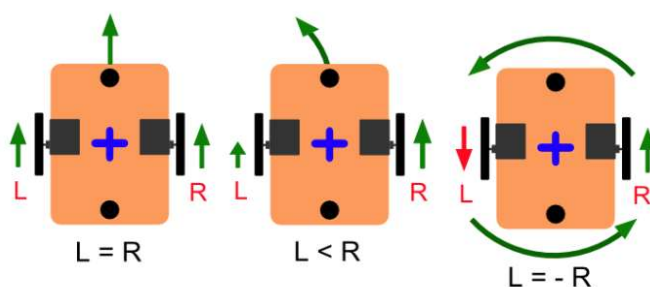
$V_p =$  แรงดันไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ หน่วย โวลต์ (V)

$I_p =$  กระแสไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ หน่วย แอมแปร์ (A)

ที่มา: (John Warner)

## 2.6 ระบบขับเคลื่อนและการเลี้ยว

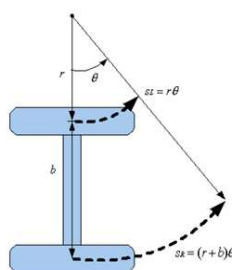
ระบบขับเคลื่อนและการเลี้ยวใช้เป็น Differential Steering โดยเรามีสองมอเตอร์คู่หน้าถ้ารถจะไปข้างมอเตอร์ทั้งสองจะหมุนด้วยความเร็วเท่ากันหรือไปข้างหลังจะหมุนด้วยความเร็วเท่ากันถ้าจะเลี้ยวซ้ายมอเตอร์ข้างซ้ายจะหมุนช้ากว่าด้านขวาจะทำให้ตัวรถไปทางด้านซ้ายหรือถ้าจะเลี้ยวขวามอเตอร์ด้านขวาจะหมุนช้ากว่าด้านซ้ายจะทำให้ตัวรถไปทางด้านขวาดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวรถ

ที่มา: <https://42bots.com>

Differential Steering คือกลไกควบคุมรถที่ต้องอาศัยการหมุนเฟืองท้ายของล้อซ้ายและขวา เพื่อให้สามารถเลี้ยวได้ ด้วยการปรับความเร็วของล้อเหล่านี้อย่างอิสระ ยานพาหนะสามารถเปลี่ยนทิศทางและหมุนรอบจุดศูนย์กลางได้ วิธีการบังคับทิศทางนี้มักใช้ในหุ่นยนต์ รถถัง และรถเซ็นวิลแชร์ มันเกี่ยวข้องกับการใช้แหล่งแรงบิดที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละล้อหรือกลไกเกียร์ที่ซับซ้อน ความเรียบง่ายของการออกแบบ โครงสร้างน้ำหนักเบา และความคุ้มค่าทำให้ Differential Steering เป็นตัวเลือกยอดนิยม ช่วยให้ยานพาหนะสามารถหมุนรอบจุดศูนย์กลางได้อย่างคล่องตัวและง่ายดาย เราจะหามุมเลี้ยวได้จากรูปที่ 2.8 และสมการ 2.15



รูปที่ 2.8 การคำนวณระยะทางที่ครอบคลุมในระบบขับเคลื่อนแบบดิฟเฟอเรนเชียล

ที่มา: Ahmad et al., 2014

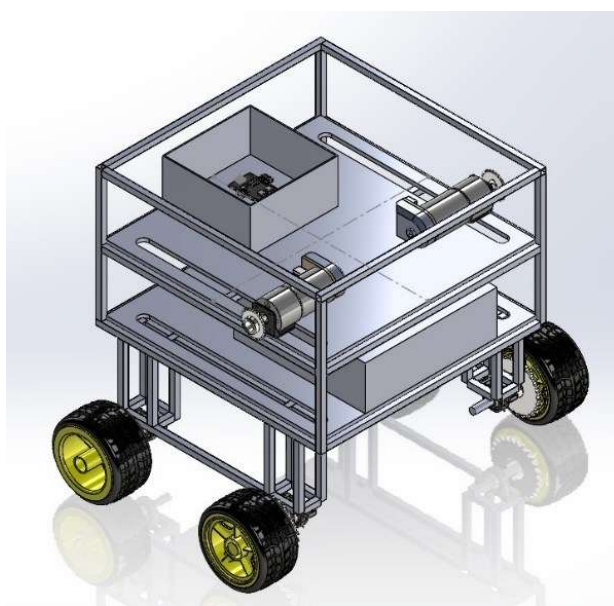
$$\theta = \frac{S_0}{r + b/2} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\theta$  = มุมที่เลี้ยวได้

$S_0$  = ระยะจากจุดหมุนถึงล้อนอกสุด

$r$  = ระยะจากจุดหมุนถึงล้อในสุด

$b$  = ระยะล้อด้านขวาถึงล้อด้านซ้าย



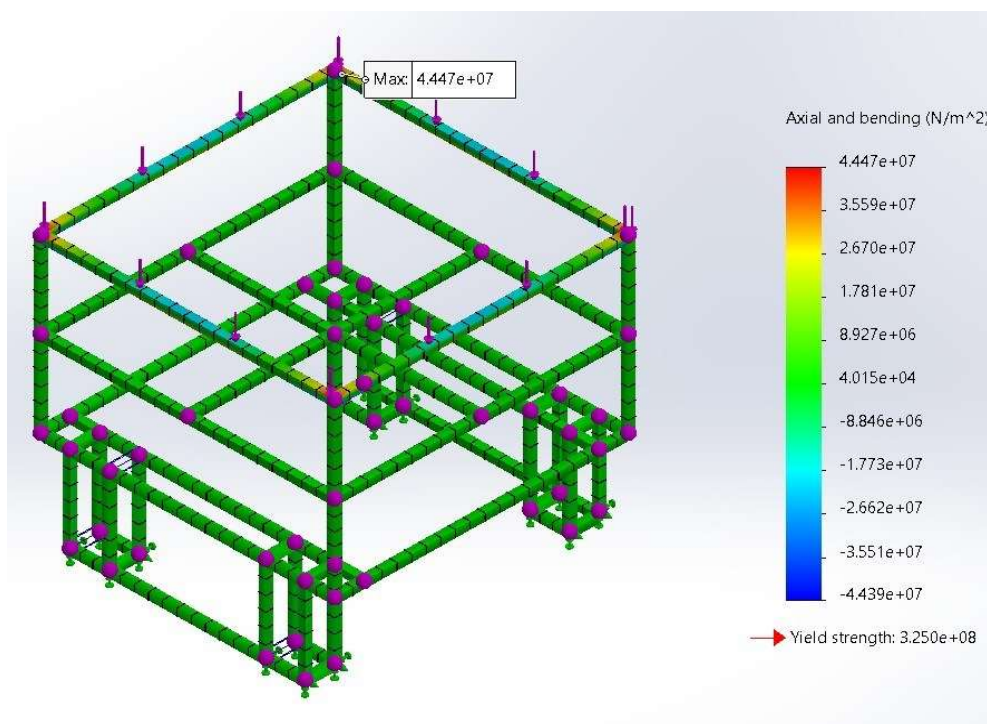
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการออกแบบรถพลิกแกลบนำทางแบบอัตโนมัติ

## 2.7 แบบจำลองโครงสร้างด้วยคอมพิวเตอร์

Finite Element Method (FEM) หรือที่มักเรียกว่า “FEM” เป็นเทคนิคเชิงตัวเลข (Numerical Method) สำหรับการวิเคราะห์และจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างหรือระบบทางวิศวกรรมหลายประเภท อาทิ สะพาน อาคาร เครื่องยนต์ ใบพัดกังหันลม หรือแม้กระทั่งการจำลองทางชีวกลศาสตร์ (Biomechanics) ในมนุษย์และสัตว์ FEM ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายตั้งแต่ระดับการศึกษาไปจนถึงการประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงและช่วยประหยัดเวลา ต้นทุนในการออกแบบ รวมถึงการทดสอบต้นแบบ (Prototype) ได้อย่างมีนัยสำคัญ

### 2.7.1 Finite Element Method

Finite Element Method เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่นำสมการทางฟิสิกส์ หรือสมการอนุพันธ์ (Differential Equations) มาผ่านกระบวนการประมาณค่า (Approximation) ด้วยการแบ่งโดเมนหรือชิ้นส่วนของโครงสร้างวัตถุออกเป็นองค์ประกอบย่อยจำนวนมาก เรียกว่า “Element” (เอลิเมนต์) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะสะท้อนความสัมพันธ์ของปริมาณทางวิศวกรรมที่สนใจ อาทิ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) อุณหภูมิ หรือการกระจัด (Displacement) ตัวอย่างที่เข้าใจได้ง่าย คือ การแบ่งคานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยหลาย ๆ ส่วน โดยแต่ละส่วนจะมีโหนด (Nodes) ตั้งอยู่ที่ปลายหรือจุดที่กำหนดไว้ เมื่อได้สมการความสมดุล (Equilibrium Equations) ของแต่ละเอลิเมนต์แล้ว จึงนำมารวมเข้าด้วยกันเพื่อหาผลโดยรวมของโครงสร้าง ทำให้สามารถทราบได้ว่า เมื่อมี โหลด (Load) หรือแรงภายนอกกระทำ จุดใดจะเกิดความเค้นสูงสุด หรือมีค่าการโก่งตัว (Deflection) สูงสุด



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการจำลอง Finite Element Method

#### 2.7.1.1 หลักการพื้นฐานของ Finite Element Method (FEM)

##### 1. การสร้างแบบจำลอง (Discretization)

- นำโครงสร้างหรือโดเมนที่สนใจมาแบ่งออกเป็นองค์ประกอบขนาดเล็ก (Element) หลากหลายรูปทรง เช่น สามเหลี่ยม (Triangle), สี่เหลี่ยม (Quadrilateral), เตตระฮีดรอน (Tetrahedron) หรือเฮกซะฮีดรอน (Hexahedron)
- การเลือกชนิดและความละเอียดของเอลิเมนต์ส่งผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ
- 2. การกำหนดสมการ (Formulation)
  - ในแต่ละเอลิเมนต์ จะมีสมการหรือตัวแปร (Degrees of freedom) เช่น การกระจัด ( $x, y, z$ ) ในปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) หรืออุณหภูมิ ( $T$ ) ในปัญหาการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)
  - อาศัยหลักสมมูลทางฟิสิกส์ เช่น กฎของฮุก (Hooke's Law) หรือสมการการนำความร้อน (Fourier's Law) ควบคู่กับทฤษฎีอื่น ๆ เพื่อสร้างเมทริกซ์ความแข็ง (Stiffness Matrix) หรือเมทริกซ์การนำความร้อน (Conductivity Matrix)
- 3. การประกอบสมการ (Assembly)
  - เมื่อได้เมทริกซ์ของเอลิเมนต์แต่ละชิ้นแล้ว ต้องนำเมทริกซ์เหล่านั้นมารวมกันเป็นเมทริกซ์รวม (Global Matrix) ที่แสดงพฤติกรรมทั้งหมดของโครงสร้างหรือระบบ
- 4. การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)
  - ในการวิเคราะห์ด้วย FEM ต้องกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) เช่น การยึดจับ (Fixed, Pinned) หรือแรงกระทำ (Load, Pressure) เพื่อให้สมการของระบบมีความสมบูรณ์และสามารถแก้ไขได้
- 5. การแก้ระบบสมการ (Solution)
  - ใช้วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Methods) เช่น วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian Elimination) หรือการทำซ้ำ (Iterative Methods) ในการแก้สมการขนาดใหญ่ที่ได้จากระบวนการประกอบเมทริกซ์ เพื่อหาค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น การกระจัด ความเครียด ความเค้น หรืออุณหภูมิ
- 6. การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post-Processing)
  - ภายหลังจากการแก้สมการ ค่าในแต่ละโหนดจะสามารถนำมาแสดงผลเป็นภาพ (Contour Plot) หรือในรูปแบบตาราง เพื่อแสดงบริเวณที่มีความเค้นสูงสุดหรือค่าการกระจัดสูงสุด เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจทางวิศวกรรม

### 2.7.1.2 ข้อดีและข้อจำกัดของ Finite Element Method (FEM)

#### ข้อดี



1. ความยืดหยุ่น: FEM สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาหลากหลายสาขา เช่น กลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics), กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics), การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer), คลื่นและการสั่นสะเทือน (Vibration), แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) เป็นต้น
2. ความแม่นยำ: หากมีการสร้างเมช (Mesh) ที่มีความละเอียดและกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) อย่างถูกต้อง ผลลัพธ์ที่ได้จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงเป็นอย่างยิ่ง
3. การประหยัดต้นทุนและเวลา: ช่วยลดปริมาณการทดลองทางกายภาพ (Physical Testing) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง เพราะสามารถจำลองเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### ข้อจำกัด

1. ความซับซ้อนในการเตรียมโมเดล: ต้องอาศัยความรู้ทั้งทางทฤษฎีและการใช้ซอฟต์แวร์ FEM อีกทั้งบางปัญหาต้องอาศัยเวลาและความเชี่ยวชาญในการสร้างเมชและกำหนดเงื่อนไขอย่างเหมาะสม
2. ข้อจำกัดเชิงตัวเลข: ในบางกรณี เช่น ปัญหาที่มีระดับความแปรปรวนสูง (High Gradient) หรือเมื่อโปรแกรมแก้สมการไม่ลู่เข้าค่า (non-convergence) อาจจำเป็นต้องใช้เมชที่มีความละเอียดมากหรือนำเทคนิคเฉพาะมาใช้ ซึ่งต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง
3. ต้องการข้อมูลวัสดุที่แม่นยำ: คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) เช่น โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือความแข็งแรงของวัสดุ ต้องมีความถูกต้อง หากข้อมูลไม่ถูกต้อง ผลการวิเคราะห์อาจคลาดเคลื่อนมาก

### 2.7.2 จุดศูนย์กลาง (Center of gravity)

จุดศูนย์กลาง (Center of Gravity) นับเป็นแนวคิดทางฟิสิกส์ที่มีบทบาทสำคัญยิ่งในการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นอาคาร สะพาน ยานพาหนะ หรือหุ่นยนต์ เพราะจุดศูนย์กลางเป็นตำแหน่งสมมุติที่รวม “มวล” ของระบบทั้งหมดไว้ที่จุดเดียว เมื่อมีแรงโน้มถ่วงกระทำต่อวัตถุ วิศวกรจำเป็นต้องทราบว่าจุดศูนย์กลางตั้งอยู่ตรงไหน เพื่อคาดการณ์หรือวิเคราะห์ว่าโครงสร้างจะรับแรงอย่างไร และมีความเสถียรเพียงใด ในกระบวนการออกแบบโครงสร้างโดยทั่วไป เช่น อาคารสูงหรือสะพาน วิศวกรจะคำนึงถึงการกระจายน้ำหนักของโครงสร้าง และแรงต่าง ๆ ที่อาจกระทำต่อมัน เช่น แรงลม แรงสั่นสะเทือนจากการใช้งาน หรือแม้แต่แรงกระทำจากแผ่นดินไหว หากจุดศูนย์กลางของโครงสร้างอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและไม่เลื่อนไปนอกฐานรองรับ โอกาสการล้มเอียงหรือวิบัติ (Failure) ก็จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ยิ่งอาคารมีความ

สูงมากเท่าไร การวิเคราะห์ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงยังเป็นสิ่งที่ไม่อาจมองข้ามไปได้ ยานพาหนะ เช่น รถยนต์ รถบรรทุก หรือแม้แต่เครื่องบิน ล้วนต้องอาศัยหลักการเกี่ยวกับจุดศูนย์ถ่วงมาใช้ในการวางตำแหน่งเครื่องยนต์ ระบบบรรทุกน้ำหนัก และผู้โดยสารให้เกิดความสมดุลมากที่สุด หากจุดศูนย์ถ่วงถูกออกแบบให้ต่ำและกระจายมวลอย่างเหมาะสม รถจะทรงตัวดีขึ้นขณะเลี้ยว หรือเปลี่ยนความเร็วกะทันหัน ช่วยลดความเสี่ยงในการพลิกคว่ำ ส่วนในเครื่องบิน การกำหนดจุดศูนย์ถ่วงระหว่างส่วนหัว (Nose) ส่วนปีก (Wing) และส่วนหาง (Tail) มีความสำคัญในการควบคุมให้เครื่องบินบินได้อย่างมีเสถียรภาพ หากจุดศูนย์ถ่วงไม่เหมาะสม ตัวเครื่องอาจจะเสียการทรงตัวระหว่างบินหรือขณะลงจอด

ในสายงานหุ่นยนต์และเมคาทรอนิกส์ หลักการจุดศูนย์ถ่วงมีบทบาทชัดเจนในเรื่องการทรงตัวของหุ่นยนต์หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ หุ่นยนต์เดินสองขา หรือโดรน (Drone) ที่ต้องลอยอยู่ในอากาศอย่างสมดุล ผู้พัฒนาและวิศวกรจำเป็นต้องคำนวณตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของหุ่นยนต์เพื่อให้มั่นใจว่าเมื่อมีการเคลื่อนแขนกลหรือเปลี่ยนทิศทางการบิน หุ่นยนต์หรือโดรนจะไม่โคลงเคลงจนตกลงมา นอกจากนี้ในงานอวกาศก็ต้องวิเคราะห์จุดศูนย์ถ่วงเพื่อให้ยานอวกาศเคลื่อนที่ได้อย่างสมดุลขณะโคจรรอบโลกหรือระหว่างลงจอดบนพื้นผิวดาวเคราะห์

สำหรับหลักการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ จุดศูนย์ถ่วงมักหาได้โดยการแบ่งวัตถุหรือโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ (Discrete Elements) แล้วหาค่าเฉลี่ยของพิกัดตำแหน่งแต่ละส่วนตามน้ำหนักหรือมวล ซึ่งในเชิงวิศวกรรมสมัยใหม่ มีการใช้ซอฟต์แวร์ช่วยออกแบบ (CAD) และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) เป็นตัวช่วยคำนวณ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถดูภาพรวมของโครงสร้าง ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง และผลกระทบของแรงต่าง ๆ ได้อย่างสะดวกและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สูตรทางคณิตศาสตร์ในการหาจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity) สำหรับกรณีวัตถุที่แบ่งออกเป็นส่วนย่อย (Discrete Masses) แต่ละส่วนมีมวล  $m_i$  และมีตำแหน่งศูนย์กลางของส่วนนั้น ๆ ที่  $(x_i, y_i, z_i)$  สามารถคำนวณจุดศูนย์ถ่วง  $(x_{cg}, y_{cg}, z_{cg})$  ของวัตถุทั้งระบบได้โดยใช้หลักการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) ของตำแหน่งและมวล ดังนี้

$$x_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i x_i)}{\sum_{i=1}^n m_i}, y_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i y_i)}{\sum_{i=1}^n m_i}, z_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i z_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนส่วนย่อยที่แบ่งของวัตถุ

$m_i$  คือ มวลของส่วนที่  $i$

$(x_i, y_i, z_i)$  คือ พิกัดของศูนย์กลางมวลของส่วนนั้นๆ

$\sum_{i=1}^n m_i$  คือ ผลรวมของมวลทุกส่วน

ระบบการควบคุมที่จะใช้เข้ามาควบคุมตำแหน่งตามเส้นทางรถในการหมุนของมอเตอร์เราจะใช้เป็นระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System) ถ้าระบบเกิดการรบกวนเกิดขึ้นระบบจะใช้ค่าความผิดพลาด (error) ที่เกิดขึ้นเข้ามาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้เพื่อชดเชยตำแหน่งที่หายไปให้มอเตอร์รักษาตำแหน่งได้ค่าที่ Set point

## 2.8 ระบบควบคุม

### 2.8.1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบควบคุม

ในการพิจารณางานที่ต้องการประยุกต์ใช้การควบคุมสามารถเขียนองค์ประกอบในรูปแบบของระบบดังนี้พื้นฐานของระบบควบคุมจะมีองค์ประกอบดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมพื้นฐานองค์ประกอบพื้นฐานของระบบควบคุม

ที่มา: Franklin, G. F

กำหนดเป้าหมายของการควบคุม (Set Point) คือการกำหนดค่าเป้าหมายหรือค่าอ้างอิง (Reference Input) ของการควบคุมงานที่ต้องการ เช่น การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศให้อยู่ที่อุณหภูมิ 25 °C การควบคุมความเร็วของมอเตอร์สายพานลำเลียงที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาทีซึ่งสามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณเข้า(Input) ให้กับระบบ

ชุดควบคุม (Controller) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและประมวผลระบบซึ่งจะประกอบด้วยชุดฮาร์ดแวร์ประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์และชุดซอฟต์แวร์ประกอบด้วยโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมการทำงานของระบบ โดยมีเป้าหมายให้เกิดการตอบสนองค่าเอาต์พุตที่ต้องการซึ่งมีทั้งระบบควบคุมที่เป็นอนาล็อกและระบบควบคุมดิจิทัล

ชุดกระตุ้นระบบ (Actuator) คือส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณควบคุมให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณควบคุมไปเป็นพลังงานต่างๆ ที่ระบบต้องการเช่นเครื่องทำความร้อน (Heating System) โดยทำการเปลี่ยนสัญญาณควบคุมทางไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน การปรับความเร็วรอบของระบบสายพานลำเลียง (Conveyor System)

กระบวนการ (Process) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ดำเนินการ (Operation) เมื่อได้รับสัญญาณจากชุดกระตุ้นเช่น ตัวทำความร้อน (Heater) มอเตอร์ (Motor) เป็นต้น

ผลการควบคุมระบบ (Output System) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แสดงผลของการควบคุมระบบซึ่งอาจแสดงในรูปแบบผลตอบสนองของระบบ ทำให้ทราบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ (Error) เพื่อใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพของระบบควบคุม

## 2.8.2 ประเภทของระบบควบคุม

ระบบควบคุมสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System)
2. ระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System)

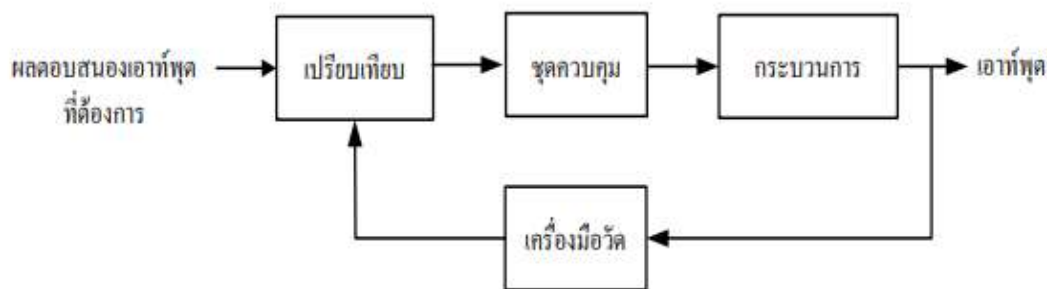
ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System) คือระบบที่มีการป้อนอินพุตซึ่ง อาจอยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าที่ระบบ (System) และได้สัญญาณออกหรือเอาต์พุต โดยไม่มีการ นำสัญญาณป้อนกลับมาที่ระบบซึ่งสามารถแสดงในลักษณะของบล็อกไดอะแกรมในรูปแบบที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบเปิด

ที่มา: Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (n.d.). Feedback control of dynamic systems (4th ed.). Pearson Prentice Hall.

ระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System) คือระบบที่มีการป้อนอินพุต ซึ่งอาจอยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าที่ระบบ (System) และมีอุปกรณ์เครื่องมือวัด (Measurement) นำสัญญาณเอาต์พุตป้อนกลับสู่ระบบเพื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการซึ่งสามารถแสดงในลักษณะของบล็อกไดอะแกรมในรูปแบบที่ 2.13



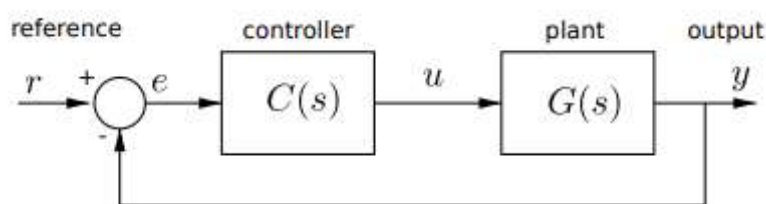
รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปิด

ที่มา: Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (n.d.). Feedback control of dynamic systems (4th ed.). Pearson Prentice Hall.

### 2.8.3 ตัวควบคุม PID

สิ่งสำคัญอันดับแรกของระบบควบคุมก็คือเสถียรภาพ เพราะถ้าระบบไม่มีเสถียรภาพเราก็ไม่สามารถควบคุมระบบได้ สำหรับลักษณะผลตอบสนองนั้น เรามักต้องการให้ได้ผลตอบสนองที่เร็ว นั่นคือ ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) ส่วนพุงเกิน (Overshoot) ที่ยอมรับได้ ส่วนความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวนั้นต้องให้มีค่าเป็นศูนย์หรือต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากนี้จะระบุเฉพาะในแต่ละระบบ

คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบ PID ตัวควบคุมในระบบควบคุมมีหลายชนิด แต่ที่ใช้ในระบบควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่ เป็นตัวควบคุมแบบ PID



รูปที่ 2.14 ระบบควบคุมป้อนกลับ

ที่มา: Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (n.d.). Feedback control of dynamic systems (4th ed.). Pearson Prentice Hall.

เมื่อพิจารณา รูปที่ 2.14 เรากำหนดให้  $R(s)$  คือสัญญาณอ้างอิง  $Y(s)$  คือสัญญาณออกที่วัดได้  $E(s)$  คือ สัญญาณคลาดเคลื่อนออกจากค่าอ้างอิง

$$E_{(s)} = R_{(s)} - Y_{(s)} \quad (2.17)$$

และ  $U_{(s)}$  คือ สัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุม เมื่อใช้ตัวควบคุม PID เราจะได้ว่า

$$C_{(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.18)$$

ดังนั้น สัญญาณควบคุมสามารถบรรยายในโดเมนเวลาได้ดังนี้

$$u(t) = K_p (e_{(t)} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2.19)$$

ตัวควบคุม PID ประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional หรือ P) แบบอินทิกรัล (Integral หรือ I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน ( $K_p$ ) ค่า integral time ( $T_i$ ) และ derivative time ( $T_d$ ) รายละเอียดของการควบคุมพื้นฐานแต่ละแบบมีดังนี้

Proportional Action (P) เป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการก็คือสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมป้อนเข้ากระบวนการ มีค่าเป็นสัดส่วนกับความผิดพลาด (error = setpoint-output) ที่เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง Proportional Action ทำหน้าที่เป็นอัตราขยายเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $K_p$  การควบคุมเชิงสัดส่วนนี้สามารถควบคุมระบบได้ดีระดับหนึ่ง เหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการผลตอบสนองรวดเร็ว ในขณะเดียวกันยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ค่าหนึ่ง ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานหรือพารามิเตอร์บางตัวในระบบ ก็อาจทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ เช่น ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว (steady state error) หรือที่เรียกว่า “offset” ตัวควบคุมแบบ P ไม่สามารถแก้ไขให้หมดไปได้ แต่สามารถลดผลได้ โดยเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมเพื่อเพิ่มขนาดของสัญญาณควบคุม ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุมมากเกินไปก็อาจจะทำให้ผลตอบแวกได้ เนื่องจากระบบจะไวต่อการเปลี่ยนแปลง

Integral Action (I) สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบ PI สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$U_{(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) E_{(s)} = \left( K_p + \frac{K_p}{s T_i} \right) E_{(s)} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $T_i$  คือ Integral time (วินาที) วิธีนี้จะสามารถแก้ความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวได้ เนื่องจากเสมือนเพิ่มชั่วที่จุดกำเนิดให้กับระบบวงเปิด แต่ก็ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

สัมพัทธ์ลดลง โดยทั่วไปแล้วระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI จะมีช่วงเวลาการแกว่งนานกว่าช่วงเวลาที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน 50% หรือ

$$T_{(PI)} = 1.5T_{(P)} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $T_{pi}$  คือ ช่วงเวลาในการแกว่งของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI และ  $T_{(p)}$  คือ ช่วงเวลาในการแกว่งของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบ P อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (time constant) น้อย ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก ปัญหานี้จะใหญ่มากและอาจทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้ (เช่น ระบบควบคุมระดับ)

Derivative Action (D) การควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัลต่างก็มีข้อจำกัด และอาจทำให้เกิดปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการเนื่องจากการแกว่งมาก อย่างไรก็ตาม ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มตัวอนุพันธ์ สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบ PID สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$U_{(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E_{(s)} = \left( K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_d s \right) E_{(s)} \quad (2.22)$$

ในทฤษฎีระบบควบคุม Derivative action ทำหน้าที่เสมือนกับการเพิ่มศูนย์ (zero) หนึ่งตัวให้กับระบบ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม  $K_d$  มากเกินไป อาจจะทำให้ระบบมีผลตอบที่ช้า (Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (n.d.). Feedback control of dynamic systems (4th ed.). Pearson Prentice Hall)

## 2.9 การระบุเอกลักษณ์ระบบ

System Identification หรือการระบุเอกลักษณ์ระบบ คือ กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) จากข้อมูลที่ได้จากระบบจริง (Real System) โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงทดลอง (Experimental Data Analysis) เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถพยากรณ์พฤติกรรมหรือการตอบสนองของระบบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำที่สุดแบบจำลองที่ได้จาก System Identification มักอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการผลต่าง (Differential or Difference Equations) ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer Functions) หรือในรูปแบบของโมเดลเชิงสถานะ (State-Space Models) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานในด้านการออกแบบตัวควบคุม (Controller Design) หรือในการวิเคราะห์ความเสถียรและสมรรถนะของระบบควบคุม

### 2.9.1 ขั้นตอนของกระบวนการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

1. การเก็บข้อมูล (Data Acquisition) เป็นการดำเนินการเก็บข้อมูลจากระบบที่สนใจ โดยเลือกสัญญาณอินพุตและวัดสัญญาณเอาต์พุต เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพและเหมาะสมในการวิเคราะห์ต่อไป โดยสัญญาณอินพุตที่นิยมใช้ ได้แก่ Step Input, Impulse Input, Ramp Input และ Random Input เป็นต้น

2. การเลือกโครงสร้างของแบบจำลอง (Model Structure Selection) เลือกโครงสร้างของแบบจำลองที่เหมาะสมกับระบบที่ศึกษา ตัวอย่างโครงสร้างที่นิยมได้แก่

แบบจำลองเชิงเส้น (Linear Models) โดยทั่วไปนิยมแสดงในรูปของสมการถ่ายโอน (Transfer Function) ดังนี้

$$G(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \dots + b_m}{a_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \dots + a_n} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $G(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

$S$  คือ ตัวแปรเชิงซ้อน (Complex Frequency)

$a_i, b_i$  คือพารามิเตอร์ของระบบ (Coefficients)

แบบจำลองเชิงไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Models) โดยทั่วไปนิยมแสดงในรูปของสมการถ่ายโอน (Transfer Function) ดังนี้

สมการสถานะเชิงไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear State Equation)

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (2.24)$$

สมการเอาต์พุตเชิงไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Output Equation)

$$y(t) = g(x(t), u(t), t) \quad (2.25)$$

เมื่อ  $x(t)$  คือ ตัวแปรสถานะของระบบ (State Variables) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$u(t)$  คือ ตัวแปรอินพุตของระบบ (Input Variables) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$y(t)$  คือ ตัวแปรเอาต์พุตของระบบ (Output Variables) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$t$  คือ เวลา (Time)

$f()$  และ  $g()$  คือ ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะเชิงไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ



แบบจำลองเชิงสถานะ (State-Space Models) โดยทั่วไปนิยมแสดงในรูปของ  
สมการถ่ายโอน (Transfer Function) ดังนี้

สมการสถานะ (State equation)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.26)$$

สมการเอาต์พุต (Output equation)

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.27)$$

เมื่อ  $x(t)$  คือ เวกเตอร์สถานะ (State vector)

$u(t)$  คือ เวกเตอร์อินพุต (Input vector)

$y(t)$  คือ เวกเตอร์เอาต์พุต (Output vector)

$A$  คือ เมทริกซ์สถานะ (State matrix)

$B$  คือ เมทริกซ์อินพุต (Input matrix)

$C$  คือ เมทริกซ์เอาต์พุต (Output matrix)

$D$  คือ เมทริกซ์ป้อนตรง (Direct transmission matrix)

โดยที่เมทริกซ์มีขนาดดังนี้:

$A$ :  $n \times n$

$B$ :  $n \times m$

$C$ :  $p \times n$

$D$ :  $p \times m$

(โดย  $n$  คือจำนวนสถานะ,  $m$  คือจำนวนอินพุต,  $p$  คือจำนวนเอาต์พุต)

### 3. การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (Parameter Estimation)

ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่เลือก โดยใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เช่น

Least Squares (LS) Method เป็นวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยมีแนวคิดหลักคือการลดค่าผลรวมของกำลังสองของข้อผิดพลาด (Sum of Squared Errors) ระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่พยากรณ์จากแบบจำลอง วิธีนี้เหมาะสมกับแบบจำลองเชิงเส้นและมีข้อดีคือความง่ายในการคำนวณ

Recursive Least Squares (RLS) Method เป็นวิธีที่มีลักษณะเป็นการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์อย่างต่อเนื่องแบบเรียลไทม์ (Real-time) ทำให้สามารถใช้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ตามเวลาได้

Maximum Likelihood Estimation (MLE) เป็นวิธีที่มองหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความน่าจะเป็น (Likelihood) ของข้อมูลที่วัดได้มีค่าสูงที่สุด วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการระบุระบบที่มี Noise หรือความไม่แน่นอนสูง

4. การนำไปประยุกต์ใช้งาน แบบจำลองที่ได้จากการทำ System Identification สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น

- การออกแบบระบบควบคุม PID (PID Controller Tuning)
- การออกแบบระบบควบคุมเชิงพยากรณ์ (Model Predictive Control, MPC)
- การวิเคราะห์และคาดการณ์พฤติกรรมระบบเชิงพลวัต (Dynamic Systems)
- การตรวจสอบสุขภาพและการวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบ (System Health Monitoring and Fault Diagnosis)

## 2.10 รีโมทวิทยุเครื่องบิน (Aircraft Radio Remote Control)

รีโมทวิทยุเครื่องบิน (Radio Control: RC) คือระบบควบคุมอุปกรณ์ระยะไกลโดยใช้สัญญาณคลื่นวิทยุ มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในการควบคุมอากาศยานไร้คนขับ (UAV) และเครื่องบินบังคับ เพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถบังคับทิศทางการบินและการทำงานของระบบต่างๆ ของเครื่องบินได้จากระยะไกลระบบรีโมทวิทยุเครื่องบินมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

### 2.10.1 ส่วนประกอบของรีโมทวิทยุเครื่องบิน

ระบบรีโมทวิทยุมีองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือตัวส่งสัญญาณ (Transmitter: TX) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมไปยังเครื่องบิน โดยผู้ควบคุมสามารถสั่งงานผ่านคันโยก (Stick) และสวิตช์ (Switch) ตัวรับสัญญาณ (Receiver: RX) ติดตั้งอยู่บนตัวเครื่องบิน มีหน้าที่รับสัญญาณจากตัวส่งและส่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เช่น Servo Motor หรือ ESC เพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของเครื่องบิน

### 2.10.2 หลักการทำงานของระบบรีโมทวิทยุ

เมื่อผู้ควบคุมขยับคันโยกบนรีโมท ตัวส่ง (Transmitter) จะเปลี่ยนตำแหน่งของคันโยกเป็นสัญญาณวิทยุ ส่งออกไปยังตัวรับ (Receiver) ที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องบิน จากนั้นตัวรับจะนำสัญญาณนั้นมาแปลงเป็นคำสั่งทางไฟฟ้า (สัญญาณ PWM หรือสัญญาณดิจิทัล) ส่งไปควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องบินเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหวตามต้องการ

### 2.10.3 คลื่นความถี่ที่นิยมใช้ในการควบคุมรีโมทวิทยุ

ปัจจุบันความถี่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ความถี่ 2.4 GHz เนื่องจากมีการรบกวนน้อย มีช่องสัญญาณมาก และส่งข้อมูลได้แม่นยำ โดยใช้เทคโนโลยีหลักสองแบบ ได้แก่

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) เป็นระบบที่เปลี่ยนความถี่ไปเรื่อยๆ เพื่อลดการรบกวนจากสัญญาณอื่น
- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เป็นการส่งข้อมูลที่มีความปลอดภัยและความเสถียรสูง ใช้ในการส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

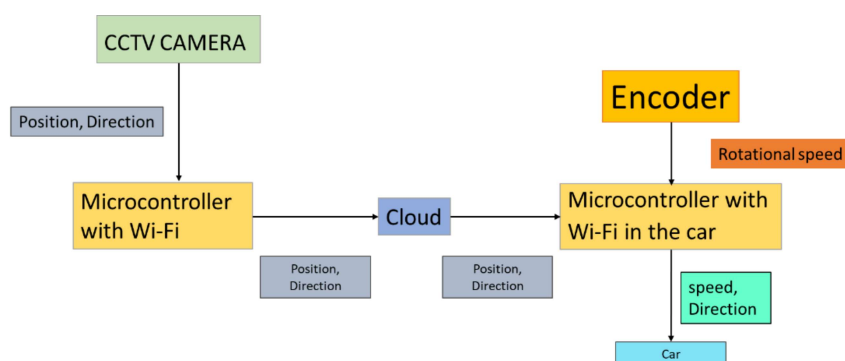
### 2.10.4 รูปแบบของสัญญาณควบคุม

การควบคุมเครื่องบินด้วยรีโมทวิทยุโดยทั่วไปจะใช้สัญญาณ 2 แบบ คือ

1. สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) สัญญาณนี้จะใช้ควบคุม Servo หรือ ESC โดยมีการส่งสัญญาณความกว้างของพัลส์ในช่วงประมาณ 1000–2000 ไมโครวินาที เพื่อควบคุมตำแหน่งหรือความเร็วของอุปกรณ์

2. สัญญาณดิจิทัล (Serial Protocol) เป็นการส่งข้อมูลในรูปแบบอนุกรม ตัวอย่างเช่น SBUS หรือ IBUS ซึ่งจะสามารถส่งข้อมูลหลายช่องพร้อมกันด้วยความเร็วสูง ทำให้ควบคุมได้แม่นยำมากขึ้น

การรับส่งข้อมูลผ่านWi-Fi โดยข้อมูลที่รับส่งมาจะมาจากกล้องจะมี ตำแหน่ง,ทิศทาง และเส้นทางในการเดินรถโดยจะทำงานโดยกล้องจะส่งข้อมูลไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วจะส่งข้อมูลขึ้นไปที คลาวด์ (Cloud) แล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ที่อยู่ทีตัวรถจะทำการดึงข้อมูลมาจากคลาวด์ (Cloud) และทำการสั่งมอเตอร์ให้ทำงาน ดังรูปที่ 2.15



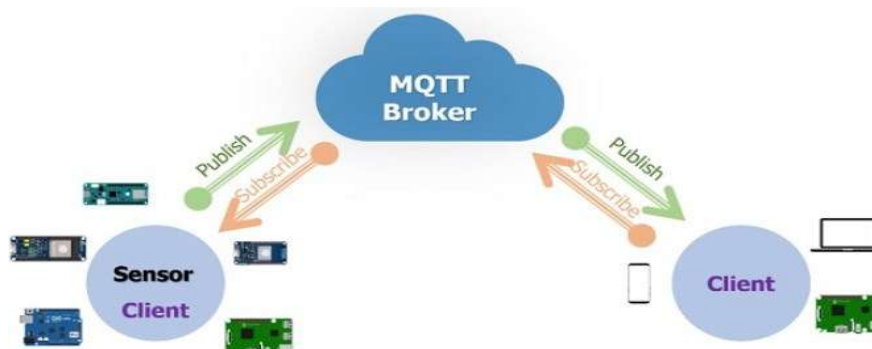
รูปที่ 2.15 หลักการรับส่งข้อมูล

## 2.11 การสื่อสารไร้สายผ่าน WI-FI

ระบบเครือข่ายไร้สายหรือ WLAN (Wireless Local Area Network) คือระบบการสื่อสารข้อมูลที่ไม่ต้องการใช้สายสื่อสาร โดยใช้การส่งคลื่นความถี่วิทยุและคลื่นอินฟราเรดในย่านวิทยุ RF เพื่อการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ที่ต่อกัน โดยใช้ทางอากาศโดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้สายสื่อสารเพื่อการเชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สายมีความสามารถที่ทำให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ทั้งที่อยู่ในระยะทางที่ทะลุผ่านกำแพง ฝ้า เพดาน หรือวัตถุก่อสร้างอื่น ๆ โดยที่ไม่ต้องการการติดตั้งสายสื่อสารเพิ่มเติม

### 2.11.1 เอ็มคิวทีที โพรโตคอล (MQTT Protocol)

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) เป็นโพรโตคอลที่ถูกออกแบบมีขนาดเล็กเพื่อการสื่อสารแบบ M2M (Machine to Machine) ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยวิศวกรจาก IBM และ Eurotech ในปี 1999 เพื่อใช้ในระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ในการเชื่อมต่อท่อส่งน้ำมันบนเครือข่ายที่ไม่มีความเสถียรอย่างอินเทอร์เน็ตดาวเทียม ซึ่งหลังจากนั้นก็ถูกบริจาคและกลายเป็น Open Standard ในปี 2014 โดย OASIS MQTT เป็นสถาปัตยกรรมแบบ Client/Server ที่มี topology แบบ hub-and-spoke โดยที่ปลายทางทำหน้าที่เป็น Client และเชื่อมต่อแบบ TCP ไปยัง Server ที่รู้จักว่า Broker ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งข้อมูล ระหว่าง Client ที่เป็น Publisher และ Subscriber ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การรับส่งข้อมูลของ MQTT

ที่มา: [www.blog.thaieasyelec.com](http://www.blog.thaieasyelec.com)

MQTT แบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก:

1. Broker: Broker เป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูลระหว่าง Client โดยมีการสร้างเส้นทาง (Routing) ด้วยหัวข้อ (Topic) โดย Client ต้อง Subscribe ใน Topic ที่ต้องการ จากนั้น Broker จะส่งข้อมูลทั้งหมดที่ถูก Publish ใน Topic นั้นให้ โดยที่ Client สื่อสารกันโดยที่ไม่รู้จักกัน

2. Client: Client เป็นได้ทั้ง Publisher และ Subscriber ที่เชื่อมต่อไปยัง Broker สามารถเชื่อมต่อแบบ persistent ที่ทำการสร้าง session ค้างไว้เปิดตลอดเวลาเพื่อติดต่อกับ Broker หรือแบบ transient ที่ Broker ไม่สามารถติดตามสถานะได้

3. Topic: Topic เป็นเหมือนที่อยู่หรือ endpoint บน Broker ที่ Client เชื่อมต่อเพื่อรับส่งข้อความระหว่างกัน

### 2.11.2 Ultra-wideband (UWB)

ในยุคที่เทคโนโลยีไร้สายก้าวไกลและเชื่อมต่อทุกสิ่งทุกอย่างเข้าด้วยกัน การหาวิธีส่งผ่านข้อมูลอย่างรวดเร็ว แม่นยำ และปลอดภัยได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนานวัตกรรมใหม่ๆ Ultra-wideband (UWB) จึงกลายเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีมานี้ เนื่องจากมีศักยภาพในการระบุตำแหน่ง (Positioning) ในระดับเซนติเมตร ส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง และมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Interference) ได้ดี UWB ไม่ได้เป็นเทคโนโลยีใหม่ในแวดวงวิศวกรรมคลื่นความถี่ หากแต่เคยถูกนำไปใช้ในงานทางทหารและเรดาร์มาก่อนหลายสิบปี กระทั่งปัจจุบัน มีการพัฒนาและย่อส่วนให้มีขนาดเล็กพอจะฝังลงในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น สมาร์ทโฟน สมาร์ทวอตช์ หรือแท็กติดตามของหาย จึงส่งผลให้ UWB มีแนวโน้มจะกลายเป็น “ตัวจุดประกาย” ที่ทำให้การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ IoT ทั่วโลกพัฒนาก้าวกระโดด

Ultra-wideband (UWB) คือเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่อาศัยการกระจายคลื่นในช่วงความถี่ (Bandwidth) ที่กว้างเป็นพิเศษ (เกินกว่า 500 MHz ขึ้นไป) ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลด้วยรูปแบบพัลส์ (Pulse) สั้น ๆ ซึ่งมี กำลังส่งต่ำ แต่ครอบคลุมคลื่นความถี่กว้างอย่างต่อเนื่อง ความแตกต่างของ UWB เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีไร้สายอื่น ๆ เช่น Wi-Fi, Bluetooth หรือ Zigbee คือ วิธีการสร้างสัญญาณที่กระจายออกไปในย่านความถี่ที่กว้างกว่า ซึ่งให้ข้อดีทั้งด้านการส่งข้อมูลความเร็วสูง ระยะเวลาดีเลย์ที่ต่ำ และความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง

#### 1. หลักการทำงานของ Ultra-wideband (UWB)

- Pulse-based Transmission

UWB ไม่ได้ใช้คลื่นความถี่แคบหรือช่องสัญญาณแคบ ๆ แบบ Wi-Fi หรือ Bluetooth แต่จะส่งสัญญาณพัลส์ในช่วงกว้างหลายร้อยเมกะเฮิรตซ์หรือมากกว่า ทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงและสามารถแยกแยะสัญญาณได้ดี

- Time of Flight (ToF) & Time Difference of Arrival (TDoA)

การตรวจวัด “เวลาที่ใช้เดินทาง” ของพัลส์จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ ช่วยคำนวณระยะได้แม่นยำในระดับเซนติเมตรยังมีจุดรับหลายจุด (เช่น การใช้ Anchor หลายตัวในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร) ก็สามารถคำนวณตำแหน่ง 2 มิติหรือ 3 มิติได้อย่างละเอียด

#### - Low Power & Short Range

UWB จะกระจายคลื่นไปในย่านความถี่กว้าง แต่กำลังส่ง (Power) ค่อนข้างต่ำ ทำให้เหมาะกับงานระยะใกล้ถึงระยะปานกลางความถี่กว้างยังช่วยลดสัญญาณรบกวนและการชนสัญญาณ (Collision) กับอุปกรณ์อื่น ๆ ความสามารถและข้อดีของ Ultra-wideband (UWB) ความละเอียดในการระบุตำแหน่ง (High-precision Positioning) สามารถวัดระยะผิดพลาดได้ในระดับเซนติเมตร ทำให้ UWB เหมาะกับการใช้ติดตามตำแหน่งภายในอาคาร (Indoor Positioning) หรือระบบ Asset Tracking ในคลังสินค้า โรงงาน หรือห้างสรรพสินค้า

#### 2. ความเร็วในการถ่ายโอนข้อมูล (High Data Rate)

ด้วยแบนด์วิดท์กว้าง UWB สามารถรองรับการส่งผ่านข้อมูลที่มีอัตรารับ-ส่งสูง แม้ภายในระยะทางไม่ไกลมากตอบสนองได้ฉับไว (Low Latency) เหมาะกับงานที่ต้องการการตอบสนองเรียลไทม์

#### 3. สัญญาณรบกวนต่ำ (Low Interference)

กำลังส่งต่ำกระจายความถี่กว้าง ทำให้สัญญาณของ UWB ไม่เข้มข้น (Spectral Density ต่ำ) และรบกวนอุปกรณ์อื่นในย่านใกล้เคียงน้อยลง

#### 4. ความปลอดภัย (Security)

วิธีการส่งแบบพัลส์และการวัดเวลาที่แม่นยำ ทำให้เกิดการปลอมแปลงหรือขโมยสัญญาณได้ยากกว่าสัญญาณไร้สายทั่วไปส่งเสริมให้ UWB ถูกนำไปใช้ในระบบความปลอดภัย เช่น การเข้าถึงสถานที่หรือการปลดล็อกอัจฉริยะ (Smart Access Control)

## 2.12 การหาตำแหน่ง

ในยุคปัจจุบัน การระบุตำแหน่ง (Positioning) ไม่ได้จำกัดเพียงแค่การใช้งานระบบ GPS เพื่อหาพิกัดบนพื้นโลกอีกต่อไป แต่ยังรวมถึงการหาตำแหน่งในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร (Indoor) อีกด้วย เนื่องจากสัญญาณ GPS ไม่สามารถเจาะทะลุผนังและสภาพภายในอาคารได้ดีเท่าที่ควร จึงทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาเทคโนโลยี การหาตำแหน่งภายในอาคาร (Indoor Positioning) ขึ้นมา เพื่อรองรับการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย ทั้งในด้านธุรกิจ การบริการ และความปลอดภัย

### 2.12.1 การหาตำแหน่งในอาคาร (Indoor Positioning)

การหาตำแหน่งในอาคาร หมายถึงกระบวนการกำหนดหรือระบุตำแหน่งของวัตถุหรือบุคคลภายในพื้นที่ที่มีการปิดล้อม เช่น อาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้า โรงแรม หรือคลังสินค้า ระบบที่ให้บริการดังกล่าว เรียกว่า Indoor Positioning System (IPS) ซึ่งโดยหลักแล้ว มีเป้าหมายเพื่อระบุตำแหน่งให้มีความแม่นยำในระดับเมตรหรือเซนติเมตร (ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี) และสนับสนุนการทำงานแบบเรียลไทม์ เทคโนโลยีหลักที่ใช้ใน Indoor Positioning มีดังต่อไปนี้

#### 1. Bluetooth Low Energy (BLE) Beacon

ใช้ Beacons หรือเครื่องส่งสัญญาณขนาดเล็กที่กระจายคลื่น BLE เป็นระยะ เมื่อสมาร์ทโฟนเข้ามาอยู่ในระยะ ก็จะจับสัญญาณและคำนวณระยะหรือความแรงของสัญญาณ (RSSI) ข้อดีคือ ราคาถูก ติดตั้งง่าย พลังงานต่ำ และรองรับโทรศัพท์สมาร์ทโฟนรุ่นใหม่ได้ทันที ข้อจำกัดคือ ความแม่นยำอาจต่ำกว่าระบบอื่น หากสภาพแวดล้อมมีสัญญาณรบกวนหรือมีการสะท้อนสัญญาณสูง

## 2. Wi-Fi Positioning

ใช้จุดกระจายสัญญาณ Wi-Fi (Access Point) หลายจุด เพื่อให้สมาร์ทโฟนหรืออุปกรณ์จับสัญญาณและคำนวณตำแหน่งจากข้อมูลความแรงของสัญญาณ หรือละติจูด/ลองจิจูด จากฐานข้อมูลแผนที่ของผู้ให้บริการติดตั้งง่าย เพราะหลายอาคารมีจุด Wi-Fi อยู่แล้ว แต่ความแม่นยำอาจไม่สูงนัก (ระดับ 5-10 เมตร) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของ Access Point และความซับซ้อนของอาคาร

## 3. Ultra-wideband (UWB)

ใช้เทคโนโลยีคลื่นความถี่กว้างพิเศษ ส่งผลให้วัดเวลาเดินทางของสัญญาณ (Time of Flight) ได้แม่นยำระดับเซนติเมตรเหมาะกับสถานที่ที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น คลังสินค้าอัตโนมัติ การติดตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หรืออุปกรณ์ราคาแพงแต่มี ข้อจำกัดคือต้องใช้ฮาร์ดแวร์เฉพาะและต้นทุนติดตั้งสูงกว่าระบบ BLE หรือ Wi-Fi

## 4. Radio Frequency Identification (RFID)

ใช้คลื่นวิทยุและแท็ก (Tag) แบบพาสซีฟหรือแอคทีฟ เพื่อระบุตัวตนของวัตถุ โดยมีเครื่องอ่าน (Reader) ที่ส่งสัญญาณเข้าไปกระตุ้นแท็กนิยมใช้ในระบบคลังสินค้าขนาดใหญ่ แต่จะระบุวัตถุอย่างละเอียดได้น้อยกว่าระบบอื่นที่คำนวณระยะได้

## 5. Geomagnetic Positioning

ใช้เซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็กของสมาร์ทโฟน และเปรียบเทียบกับข้อมูล “ลายเซ็นสนามแม่เหล็ก (Magnetic Fingerprint)” ที่บันทึกไว้ล่วงหน้าในพื้นที่อาคารไม่ต้องติดตั้งฮาร์ดแวร์เพิ่มเติม แต่ต้องมีการทำแผนที่สนามแม่เหล็ก (Mapping) ภายในอาคาร ซึ่งอาจยุ่งยากและใช้เวลานาน

## 6. Sensor Fusion (IMU, Gyroscope, Accelerometer)

ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีข้างต้นโดยประมวลผลกับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ในสมาร์ทโฟน เช่น การหมุน (Gyroscope), ความเร่ง (Accelerometer), ทิศทาง (Compass) เพื่อปรับปรุงความแม่นยำมากขึ้น เหมาะกับการเดินทางในพื้นที่ระยะสั้นหรือเชื่อมโยงกับระบบนำทาง (Dead Reckoning)

### 2.12.2 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

RSSI ย่อมาจาก Received Signal Strength Indicator หมายถึง “ค่าความแรงของสัญญาณ (ไร้สาย) ที่ตัวรับวัดได้” ในแต่ละช่วงเวลาหรือแต่ละแพ็กเกจของการรับสัญญาณ ยิ่งค่าของ RSSI สูง แสดงว่าสัญญาณที่รับได้มีความแรงมาก (ซึ่งหมายถึงตัวรับอยู่ใกล้แหล่งส่งสัญญาณมาก หรือไม่มีการสูญเสียระหว่างทางมากนัก) ในทางกลับกัน หาก RSSI มีค่าน้อย แสดงว่าสัญญาณที่รับมีความแรงน้อย อาจเนื่องมาจากระยะทางที่ไกลขึ้น สิ่งกีดขวาง หรือการรบกวนจากสภาพแวดล้อม โดยส่วนมาก ค่า RSSI ถูกแสดงเป็นหน่วย dBm (เดซิเบลมิลลิวัตต์) ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้บอกความเข้มของสัญญาณในเชิงล็อก (Logarithm) ยกตัวอย่างเช่น ค่า -30 dBm หมายถึงสัญญาณที่แรงมาก (อยู่ใกล้แหล่งส่ง) ในขณะที่ค่า -90 dBm ถือว่าอ่อนมาก อาจใกล้ระดับที่อุปกรณ์รับไม่ไหว

#### 1. หลักการทำงานของ Received Signal Strength Indicator (RSSI)

การแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ (Radio Propagation) สัญญาณที่ถูกปล่อยจาก Access Point (AP) หรือ Beacon จะแพร่กระจายในทุกทิศทาง และค่อย ๆ ลดทอนความแรงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นตามกฎการสูญเสียกำลังของสัญญาณ (Path Loss) ปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้สัญญาณลดทอน เช่น ผนัง พื้น วัสดุสะท้อน หรือการรบกวนจากคลื่นความถี่ใกล้เคียงกัน

การวัดค่า (Measurement) อุปกรณ์รับ (เช่น สมาร์ทโฟนหรือแท็บ) จะจับสัญญาณไร้สายจาก AP หรือ Beacon ที่อยู่รอบ ๆ และวัดระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) แต่ละแบรนด์และรุ่นของอุปกรณ์อาจมีการรายงาน RSSI ต่างกันไปตามมาตรฐานฮาร์ดแวร์และเฟิร์มแวร์ การอนุมานระยะทางจากค่า RSSI

เมื่อทราบความแรงของสัญญาณ (RSSI) เราสามารถประมาณ “ระยะทาง” ระหว่างตัวส่งกับตัวรับได้ โดยใช้สมการการสูญเสียสัญญาณ (Path Loss Model) ตัวอย่าง Path Loss Model ทั่วไป เช่น

$$\text{Distance} = 10^{\left( \frac{\text{MeasuredPower} - \text{RSSI}}{10 \times n} \right)} \quad (2.28)$$

เมื่อ *Distance* คือ ระยะทาง มีหน่วยเป็น เมตร

*RSSI* คือ ค่าความแรงของสัญญาณ มีหน่วยเป็น dBm

*n* คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม อยู่ในช่วง 2-6

*Measured Power* คือค่าความแรงของสัญญาณมาตรฐานได้ในระยะ 1 เมตร

### 2.12.3 Trilateration

Trilateration หมายถึง วิธีการทางเรขาคณิตในการระบุตำแหน่งของจุดหนึ่งในระนาบสองมิติ (2D) หรือในอวกาศสามมิติ (3D) โดยอาศัย “ระยะทาง” จากจุดดังกล่าวไปยังแหล่ง



อ้างอิง (Reference Points) ที่ทราบพิกัดแน่นอนอย่างน้อย 3 จุด (ในกรณี 2D) หรือ 4 จุด (ในกรณี 3D) จากนั้นจึงนำค่า “ระยะทาง” เหล่านี้มาไขว้กันเพื่อให้ทราบว่าจุดที่ต้องการอยู่ตรงไหนใน 2D: ต้องใช้ Anchor อย่างน้อย 3 จุดใน 3D: ต้องใช้ Anchor อย่างน้อย 4 จุด การรู้ “ระยะทาง” อาจได้จากการวัดเวลาการเดินทางของคลื่นวิทยุ (Time of Flight) หรือการคำนวณจากความแรงของสัญญาณ (RSSI) เป็นต้น

#### - หลักการทำงานของ Trilateration

การกำหนดพิกัดของ Anchor ต้องทราบพิกัดที่แน่นอน ( $X, Y$  หรือ  $X, Y, Z$ ) ของจุดอ้างอิงอย่างน้อย 3 หรือ 4 จุด ยกตัวอย่างเช่น เรามี Anchor 3 จุดในระนาบ 2D ที่ตำแหน่ง  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  วัดระยะทางจากจุดที่จะระบุตำแหน่งอุปกรณ์ที่ต้องการหาตำแหน่ง (เช่น สมาร์ทโฟน) จะวัด “ระยะทาง” จากการรับคลื่นสัญญาณของ Anchor แต่ละตัว ระยะทางอาจได้จากหลายเทคนิค เช่น Time of Flight (ToF): ใช้ความเร็วแสงคูณเวลาที่คลื่นใช้เดินทางหรือ Received Signal Strength Indicator (RSSI) ประเมินระยะจากค่าความแรงของสัญญาณ แต่แม่นยำน้อยกว่าวิธีวัดเวลา

#### - สร้างสมการทางเรขาคณิต

ใน 2D การทราบระยะทาง  $d_1, d_2, d_3$  จาก Anchor 3 จุด สามารถเขียนสมการวงกลมรัศมี  $d_i$  ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $(x_i, y_i)$  จุดตัดของวงกลมทั้งหมดจะเป็นคำตอบของตำแหน่ง  $(x, y)$  ของอุปกรณ์ในอุดมคติ (หากจุดตัดไม่สนิทเพราะมีความคลาดเคลื่อน ก็หาจุดเหมาะสมที่สุด) โดยคำนวณตำแหน่งสุดท้ายใช้อัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ (เช่น Least Squares) เพื่อปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่วัดได้ สุดท้ายจะได้พิกัด  $(x, y)$  ที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด

#### - ข้อดีและข้อจำกัดของ Trilateration

##### ข้อดี

1. เข้าใจง่าย: เป็นหลักการเรขาคณิตที่ตรงไปตรงมา ใช้ระยะทางมาไขว้ (Intersect)

2. ประยุกต์หลากหลาย: สามารถนำไปใช้กับระบบ GPS, UWB, Wi-Fi, BLE หรือเทคโนโลยีคลื่นวิทยุอื่น ๆ ได้

3. ใช้จุดอ้างอิงน้อย: ใน 2D ต้องการ Anchor เพียง 3 จุดเท่านั้น

##### ข้อจำกัด

1. ต้องวัดระยะทางได้แม่นยำ: หากการวัดระยะมีความคลาดเคลื่อนมาก หรือมี Noise สูง ตำแหน่งสุดท้ายจะผิดเพี้ยน

2. ต้องรู้ตำแหน่ง Anchor อย่างถูกต้อง: หากจุดอ้างอิงไม่ถูกต้อง หรือปรับเปลี่ยนตำแหน่งโดยไม่อัปเดต ระบบจะให้ค่าตำแหน่งผิด

3. ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม: ในการใช้งาน Indoor ข้อมูลระยะทางอาจโดนรบกวนด้วยผนังหรือการสะท้อนสัญญาณ ทำให้ Trilateration ไม่แม่นยำ

- ตัวอย่างสมการคำนวณ Trilateration (กรณี 2 มิติ)

ในการคำนวณตำแหน่ง  $(x, y)$  บนระนาบ 2 มิติ เราจำเป็นต้องมีจุดอ้างอิง (Anchor) อย่างน้อย 3 จุด โดยแต่ละจุดมีพิกัด  $(x_i, y_i)$  และระยะทาง (หรือรัศมี) จากจุดอ้างอิงไปยังจุดที่เราต้องการหาตำแหน่งคือ  $r_{i\_iri}$  (ได้จากการวัดหรือคำนวณด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น Time of Flight หรือ RSSI) ดังนั้น หากสมมติให้มี 3 Anchor ได้พิกัดและระยะดังนี้

$$\text{Anchor } A : (x_1, y_1), r_1$$

$$\text{Anchor } B : (x_2, y_2), r_2$$

$$\text{Anchor } C : (x_3, y_3), r_3$$

ตำแหน่ง  $(x, y)$  ที่ต้องการหาจะต้องทำให้เป็นไปตามสมการระยะของวงกลมทั้ง 3 วง ดังนี้

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \quad (2.29)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \quad (2.30)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \quad (2.31)$$

- การลดรูปสมการ (Linearization)

เพื่อลดความซับซ้อน มักใช้วิธี “ลบสมการ” (Subtracting Equations) ให้เหลือรูปเชิงเส้น (Linear) แล้วแก้ระบบสมการ ซึ่งทำได้โดยลบสมการ (2.25) ออกจากสมการ (2.24) และลบสมการ (2.25) ออกจากสมการ (2.24) ตามลำดับ

สมการที่ (2.24) - (2.25)

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y = (r_1^2 - r_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \quad (2.32)$$

สมการที่ (2.24) - (2.26)

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y = (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (2.33)$$

- แก่ระบบสมการเชิงเส้น (A) และ (B)

หลังจากได้สมการ (A) และ (B) ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นในตัวแปร  $x$  และ  $y$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$a_1x + b_1y = c_1$$

$$a_2x + b_2y = c_2$$

โดยเปรียบเทียบ

$$a_1 = 2(x_2 - x_1), b_1 = 2(y_2 - y_1), c_1 = (r_1^2 - r_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2)$$

$$a_2 = 2(x_3 - x_1), b_2 = 2(y_3 - y_1), c_2 = (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2)$$

จากนั้นใช้วิธีการแก้สมการเชิงเส้นทั่วไป (เช่น Cramer's Rule หรือ Inverse Matrix) เพื่อหาคำตอบ  $(x, y)$  นี่ก็คือตำแหน่งของจุดที่ต้องการในระบบพิกัด 2 มิติ

$$x = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2}, y = \frac{a_1 c_2 - c_1 a_2}{a_1 b_2 - b_1 a_2} \quad (2.34)$$

## 2.13 ปรัชน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.13.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการเลี้ยงไก่

(Dsouza & Arumugam MuthuKumaraswamy, 2023) เสนอระบบเฝ้าระวังอัจฉริยะที่ใช้หุ่นยนต์เพื่อวิเคราะห์ความเป็นอยู่ที่ดีของปศุสัตว์และการตรวจหาโรคตั้งแต่เริ่มต้นในฟาร์มสัตว์ปีกโดยใช้ Raspberry Pi 4 และ Arduino UNO โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับค่าต่างๆเช่น แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความชื้น และการเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิต ระดับแอมโมเนียภายในฟาร์มจะต้องจำกัดอยู่ที่ 25 ppm ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ควรเกิน 3000 ppm อุณหภูมิควรอยู่ภายใน 30-35°C และความชื้นควรอยู่ที่ประมาณ 65-70%

(Teddy, n.d.) พัฒนาฟาร์มสัตว์ปีกอัจฉริยะที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์ (RTOS) บน Arduino โดยจะมีการวัดค่าต่างๆเช่น แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและความชื้น มีการทำงานโดย ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่กำหนดจะเปิดหลอดไฟ ถ้าค่าของแอมโมเนียสูงขึ้นเกิน 0.5 ppm จะทำการเปิดพัดลม และได้ทำการเปรียบเทียบระบบที่มี RTOS และไม่มี RTOS ระบบที่มี RTOS ทำงานได้ดีกว่าเนื่องจากสามารถกำหนดลำดับความสำคัญของงานได้ใน RTOS ซึ่งงานที่มีลำดับความสำคัญสูงกว่าจะทำก่อน

(Budiarto et al., 2020) ทำการออกแบบระบบฟาร์มไก่โดยมีการวัดค่าของแอมโมเนียและอุณหภูมิ ระดับแอมโมเนียภายในฟาร์มจะต้องจำกัดอยู่ที่ 25 ppm ดังตารางที่ 2.4 อุณหภูมิของไก่จะมีอุณหภูมิเฉพาะตามอายุของไก่ในฟาร์มนั้นๆ ถ้าค่าของ แอมโมเนียและอุณหภูมิสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ระบบจะทำงานและส่ง SMS ให้กับผู้ใช้งานหรือจะของฟาร์มว่ามีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้น

ตารางที่ 2.4 ระดับแอมโมเนียและผลกระทบต่อนก

| Ammonia (ppm) | Smelled          | Egg production effect | Weight loss effect |
|---------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| 20-25         | Began to smell   | No                    | No                 |
| 25-30         | Smells           | Slight                | Slight             |
| 50-60         | strong smell     | Yes (+)               | Yes (+)            |
| 100           | Nasal irritation | Yes (++)              | Yes (++)           |
| 200           | Eye irritation   | Yes (+++)             | Yes (+++)          |

ที่มา: Budiarto et al., 2020

ถ้าระดับแอมโมเนียเกินค่ามาตรฐานจะทำให้ไก่เกิดโรคระบบหายใจและระบบผิวหนังและทำให้น้ำหนักตัวของไก่ลดลงเนื่องจากป่วยยังทำให้แบคทีเรียเชื้อราเติบโตได้ดีด้วยดัง รูปที่ 2.17 (ก) และ (ข)



(ก)



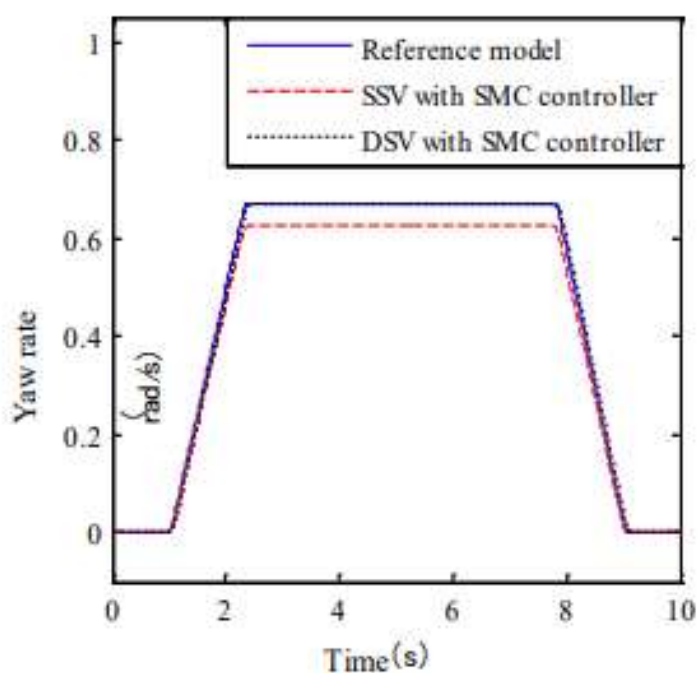
(ข)

รูปที่ 2.17 (ก) ภาพตัวอย่างผิวหนังช่วงอกไก่อักเสบ (ข) ภาพตัวอย่างไก่มีน้ำมูก

ที่มา: [www.betagro-agro.com](http://www.betagro-agro.com)

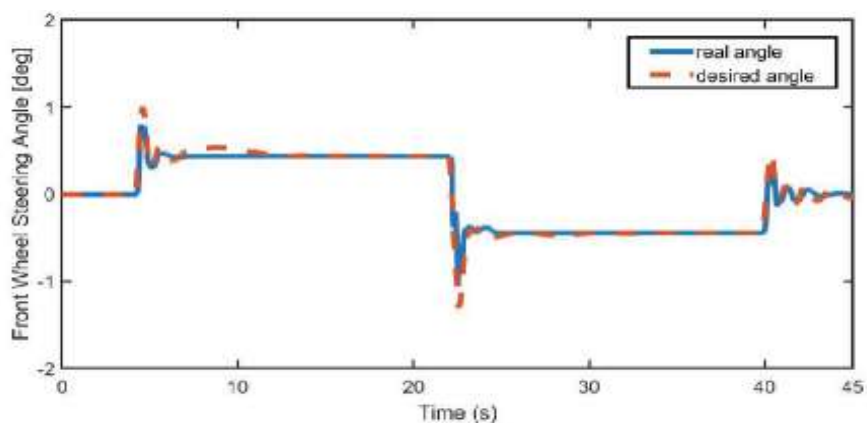
### 2.13.2 งานวิจัยเกี่ยวกับออกแบบระบบควบคุมและการเลี้ยง

(Tian et al., 2018) ทำการออกแบบการเลี้ยงทั้ง 4 ล้อของรถไฟฟ้า โดยมีการเลี้ยงแบบ skid steering vehicle (SSV) และ differential steering vehicle (DSV) ทำการจำลองร่วมของ Casim และ Simulink และใช้ตัวควบคุม sliding mode controller ผลจากการทำแบบจำลองการเลี้ยงแบบ differential steering ได้ผลดีกว่าแบบ skid steering. เพราะว่าการเลี้ยงแบบ differential steering แรงบิดในการขับเคลื่อนเพียงท้ายที่น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับ skid steering และยังทำการควบคุมอัตราการหมุนและมุมด้านข้างของรถได้อย่างแม่นยำ ดังรูปที่ 2.18



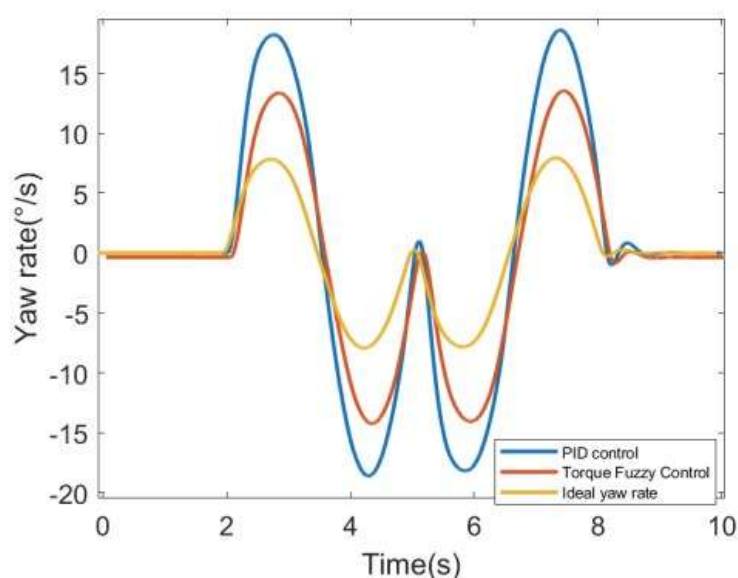
รูปที่ 2.18 Yaw rate curves with  $k_{r0}$  increased by 5% (Tian et al., 2018)

(Yang et al., 2021) ออกแบบระบบสำหรับการเลี้ยวแบบ differential steering รถไฟฟ้าไร้คนขับถ้าเกิดข้อผิดพลาดในการวิ่งตามเส้นทางที่กำหนดไว้ระบบที่ออกแบบไว้จะทำงานโดยใช้ตัวควบคุม Feedforward Controller และ Anti-Integral-windup SMC Controller มาช่วยในการควบคุม เขาได้ทำการจำลองใน Carmaker, Simulink ผลการจำลอง การบังคับ differential steering สามารถติดตามมุมล้อหน้าที่ต้องการและเส้นทางอ้างอิงได้อย่างแม่นยำและเสถียร ดังรูปที่ 2.19



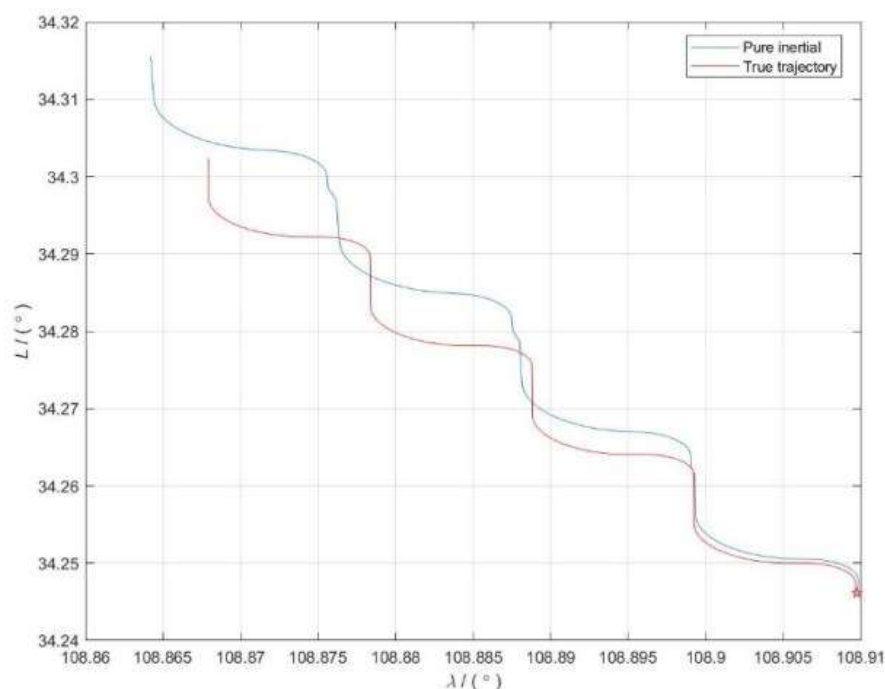
รูปที่ 2.19 Front wheel steering angle (Yang et al., 2021)

(Yuan & Xun, 2022) ออกแบบระบบควบคุมการเลี้ยวแบบ differential steering โดยเปรียบเทียบตัวควบคุม 2 ตัว ได้แก่ fuzzy controller และ PID controller สร้างแบบจำลองจาก Recurdyn, Simulink จำลองการบังคับเลี้ยวในสภาวะคงที่และการวิเคราะห์การจำลองการเปลี่ยนเลนอย่างรุนแรง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมการประสานแรงบิดแบบฟัซซี่มีผลการควบคุมที่ดี รักษาเสถียรภาพการควบคุมในระหว่างการขับขึ้นยานพาหนะได้ดีกว่า PID controller ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 Comparison diagram of vehicle yaw rate (Yuan & Xun, 2022)

(Kang, 2022) ทำการออกแบบการทำงานของระบบ Strapdown Inertial Navigation System (SINS) และ Couple Odometer ทำงานด้วยกัน โดยเอาใช้ในการบังคับเลี้ยวแบบ differential steering ได้การจำลองใน MATLAB ผลการจำลองการใช้อัลกอริทึมแบบผสมผสานให้ความแม่นยำมากกว่าการใช้ Strapdown Inertial Navigation System (SINS) อย่างเดียวดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 Navigation result of pure inertial navigation (Kang, 2022)

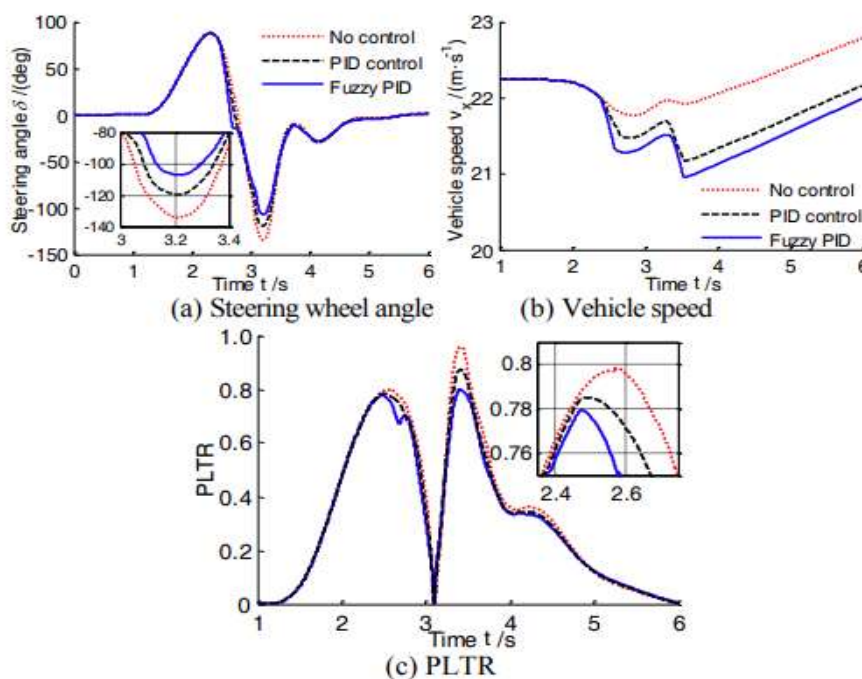
แผนที่และเส้นทางในการใช้จะรับมาจากกล้อง CCTV สิ่งที่ได้ออกมาจากคือตำแหน่งและทิศทางโดยจะรับส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi ที่ตัวรถจะมีไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถรับ Wi-Fi ได้ โดยที่ตัวรถจะมี sensor คือ encoder ซึ่งสามารถรู้ความเร็วได้สามารถคำนวณหาระยะทางได้และตำแหน่งได้ โดยจะกำหนดจุดหนึ่งในแผนที่ของเราให้มีค่า 0,0 เมื่อรถเดินทางเราจะสามารถเอาความเร็วรถมาคำนวณหาระยะทางทำให้รู้ว่าจะระยะและตำแหน่งของรถถึงจุดหมายหรือยัง

### 2.13.3 งานวิจัยเกี่ยวกับแผนที่

(Yenginer et al., n.d.) ออกแบบจำลองการวางแผนเส้นทาง การติดตามเส้นทาง และการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์โดยหุ่นยนต์จะใช้หุ่นยนต์ 4 ล้อที่ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดระยะด้วยเลเซอร์สร้างแบบจำลองใน Gazebo เพื่อดำเนินการวางแผนเส้นทางตามภาคสนามและการติดตามเส้นทางที่เป็นไปได้โดยใช้ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ (ROS) อัลกอริทึมที่ใช้มีอัลกอริทึม A\* สำหรับการวางแผนเส้นทาง และวิธีไดนามิกวินโดว (DWA) สำหรับการติดตามเส้นทาง ผลการทำแผนที่แม่นยำ การวางแผนเส้นทางแม่นยำ และการติดตามเส้นทางในสภาพแวดล้อมจำลองแม่นยำ

(Haiqing Li al. 2020) ออกแบบและจำลองเส้นทางและระบบควบคุมของยานพาหนะอัตโนมัติโดยการสร้างเส้นทางได้ใช้ อัลกอริทึมฝูงมด (ant colony algorithm) ส่วนการควบคุมความเร็วและเบรกใช้ fuzzy PID controller โปรแกรมที่ใช้ MATLAB ผลที่ได้ อัลกอริทึมฝูงมดสามารถวางแผนเส้นทางที่ไม่มีการชนกันได้อย่างมีประสิทธิภาพและ fuzzy PID controller

ทำงานได้ดีทั้งในด้านความเร็วและการติดตามเส้นทางช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามเส้นทาง และการจัดการภายใต้การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางฉุกเฉิน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 Response comparisons output from vehicle control model

ที่มา: Haiqing Li al. 2020)

(Jiang et al., n.d.) ออกแบบและทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยใช้ กล้องที่สามารถวัดความลึกได้ (RGBD Sensor) การวางแผนเส้นทางได้ใช้ the probabilistic roadmap algorithm (PRM) ในการทำแผนที่ขึ้นมากล้องเจออุปสรรคที่มีความสูงจะตรวจจับแล้วทำการแปลงรูปภาพเป็น binary image แล้วนำไปเข้าสู่ PRM จากการทดลองสามารถหลบสิ่งกีดขวางได้และวิ่งตามเส้นทางที่วางไว้ได้ดี

## 2.14 สรุป

จากการศึกษาทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า จึงควรให้ความสำคัญกับการจัดการโรงเรือนทั้งในด้านการระบายอากาศ การควบคุมแอมโมเนียไม่ให้เกิน 20-25 ppm และรักษาระดับความชื้นในช่วงประมาณ 50-70% ให้เหมาะสมกับอายุของไก่และการออกแบบรถพลิกเกลบนำทางแบบอัตโนมัติสำหรับใช้งานในโรงเลี้ยงไก่ได้คำนวณแรงต้านต่างๆเพื่อนำไปใช้เลือกขนาดของ



มอเตอร์นำไปสู่การเลือกแบตเตอรี่ของระบบทั้งหมดและได้ทำการเลือกการลิ้นแบบ Differential Drive ช่วยให้ลิ้นและเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ โดยปรับความเร็วของล้อซ้ายและขวาอย่างอิสระ