

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

ยานสำรวจใต้น้ำหรือหุ่นยนต์สำรวจในที่นี้หมายถึงอุปกรณ์ที่สามารถตั้งโปรแกรมคำสั่ง และควบคุมการทำงานด้วยตัวเอง ประกอบด้วยระบบจักษุการทำงานยากๆ ที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้ หรือทำได้ไม่ดีเท่าหุ่นยนต์ ทำงานซ้ำซากต่อเนื่องได้โดยไม่เหน็ดเหนื่อย สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่ยากลำบากหรืออันตรายได้ เช่นสภาวะที่ไม่มีอากาศ ส่วนประกอบหลักของยานสำรวจแบ่งได้ 3 ส่วนได้แก่

1) ระบบจักษุ เป็นกลไกต่างๆ ของยานสำรวจในการทำงาน เคลื่อนไหวเคลื่อนที่ ข้อต่อ ล้อ มอเตอร์ สายพาน แขนกล มือ ขา เท้า เครื่องเจาะ เครื่องตัด เครื่องขุด ระบบเหล่านี้ต้องใช้หลักการทางฟิสิกส์ เช่น หลักกลศาสตร์ แรงเวกเตอร์ โมเมนตัม หรือวัสดุศาสตร์ เป็นต้น

2) วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยระบบอนาล็อกและระบบดิจิทัล เพื่อใช้ในระบบการควบคุมระบบเซนเซอร์แบบต่างๆ เช่น คลื่นเสียงความถี่สูง อินฟราเรด วัดค่าออกซิเจนในน้ำ มิเตอร์ตรวจวัดแบบต่างๆ ระบบประมวลผลหน่วยความจำ ระบบสำรองและจ่ายพลังงาน เป็นต้น

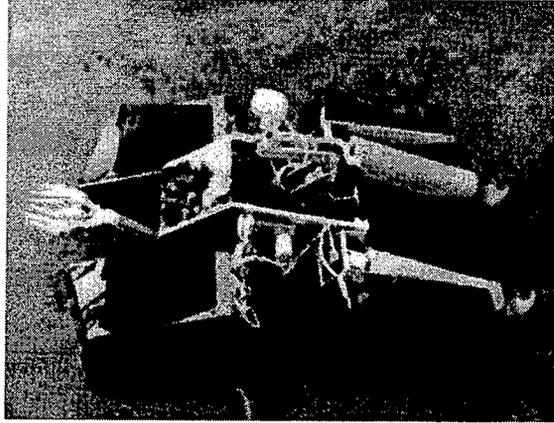
3) ชุดโปรแกรมคำสั่ง ประกอบด้วยชุดโปรแกรมควบคุมการทำงานทั่วไป และโปรแกรมทำงานเฉพาะด้าน โปรแกรมที่ใช้มีทั้งภาษาระดับพื้นฐานอย่างภาษาแอสเซมบลี ระดับกลางอย่างภาษา C และระดับสูงอย่างภาษาเบสิก หรือภาษาปาสคาล

จะเห็นได้ว่าการออกแบบสร้างยานสำรวจใต้น้ำ จะต้องใช้ความรู้หลายด้านผสมผสานกัน โดยใช้องค์ความรู้ด้านต่างๆ มาประยุกต์ เพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวด้วยรีโมทไร้สาย ส่งสัญญาณภาพไร้สายจากกล้องวิดีโอที่ตัวหุ่นยนต์ ซึ่งเคลื่อนที่ใต้น้ำ ดังนั้นจึงต้องใช้ความรู้ทั้งเรื่องของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์, ไมโครคอนโทรลเลอร์, ภาษาโปรแกรม, การรับ - ส่งคลื่นความถี่วิทยุ, การขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และนอกจากนั้น ยังต้องศึกษาเกี่ยวกับแรงลอยตัวในน้ำ เพื่อให้หุ่นยนต์มีเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ใต้น้ำอีกด้วย ซึ่งในบทนี้ ได้รวบรวมทฤษฎีต่างๆ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการสร้างยานสำรวจใต้น้ำไว้ดังต่อไปนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 หุ่นยนต์เพื่อการสำรวจทางน้ำ

หุ่นยนต์เพื่อการสำรวจทางน้ำ [1] สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์พร้อมทั้งส่งภาพกลับมาแสดงผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย ซึ่งตัวของหุ่นยนต์ลอยอยู่บนน้ำคล้ายเรือ ไม่สามารถดำใต้น้ำได้ มีกล้องวิดีโอติดอยู่ที่ตัวหุ่น 2 ตัว ตัวหนึ่งติดตั้งส่วนบนของตัวหุ่นยนต์ เพื่อดูภาพเหนือผิวน้ำ ส่วนอีกตัวหนึ่งติดตั้งอยู่ส่วนล่างของตัวหุ่นยนต์ เพื่อดูภาพใต้น้ำ และมีมือจับเพื่อการหยิบสิ่งของใต้น้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์เพื่อการสำรวจทางน้ำ [1]

ซึ่งงานวิจัยหุ่นยนต์เพื่อการสำรวจทางน้ำนี้ มีข้อมูลที่สามารถนำมาเปรียบเทียบและปรับใช้ในการทำวิจัยหุ่นยนต์สำรวจใต้น้ำ ดังต่อไปนี้

- 1) ผลการทดลองการทำงาน แบ่งเป็นผลการทดลองวัดระยะการรับ - ส่งภาพของกล้องวิดีโอไร้สาย ด้วยเครื่องส่งความถี่วิทยุ และผลการทดลองวัดระยะในการควบคุมทิศทางหุ่นยนต์ไร้สาย ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ทดลองวัดระยะการรับ - ส่งภาพของหุ่นยนต์เพื่อการสำรวจทางน้ำ [1]

ระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับ	ความสามารถในการรับ - ส่งสัญญาณภาพ	
	กล้องเหนือผิวน้ำ	กล้องใต้น้ำ
5 เมตร	รับสัญญาณภาพได้	รับสัญญาณภาพได้
10 เมตร	รับสัญญาณภาพได้	รับสัญญาณภาพได้
15 เมตร	รับสัญญาณภาพได้	รับสัญญาณภาพได้
17 เมตร	สัญญาณภาพไม่ชัดเจน	สัญญาณภาพไม่ชัดเจน
20 เมตร	ไม่สามารถรับสัญญาณภาพได้	ไม่สามารถรับสัญญาณภาพได้

ตารางที่ 2.2 ทดลองวัดระยะการควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์เพื่อการสำรวจทางน้ำ [1]

ระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับ	ความสามารถในการควบคุม
5 เมตร	ควบคุมได้
10 เมตร	ควบคุมได้
15 เมตร	ควบคุมได้
20 เมตร	ควบคุมไม่ค่อยได้
25 เมตร	ไม่สามารถควบคุมได้

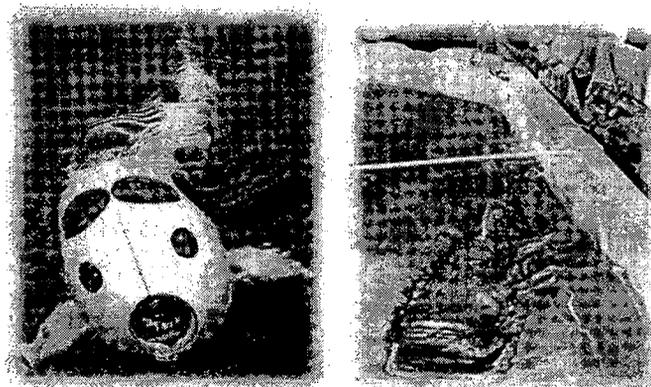
2) ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัย มี 2 เรื่องที่น่าสนใจคือ หนึ่ง การเลือกใช้ความถี่ของรีโมทคอนโทรลที่ใช้ควบคุมทิศทางหุ่นยนต์ ควรใช้ความถี่ห่างจากความถี่ของการรับ - ส่งสัญญาณภาพพอสมควร เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งาน ซึ่งจะทำให้ข้อมูลผิดพลาดและสูญหายได้ สอง การควบคุมทิศทางหุ่นยนต์อาจทำได้ลำบากหากไม่ออกแบบลักษณะการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ให้ดี และอาจเกิดปัญหาจากระดับความใสของน้ำที่ทำการสำรวจจนมากเกินไป รวมไปถึงแรงจากกระแสน้ำ ซึ่งปัญหาที่กล่าวมานี้จะทำให้การควบคุมหุ่นยนต์ควบคุมได้ยากขึ้น

#### 2.1.2 หุ่นยนต์สำรวจใต้น้ำ (Underwater robot) ของต่างประเทศ

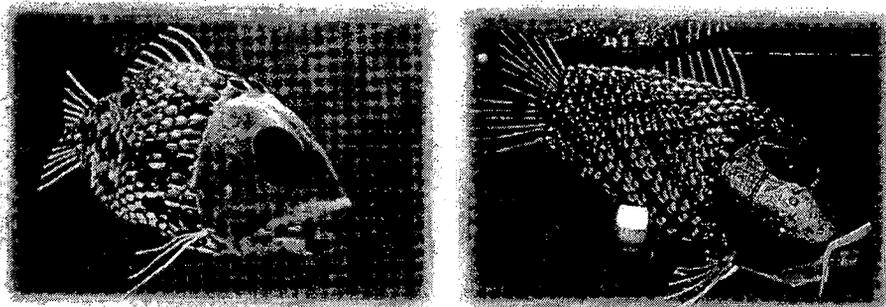
จากการศึกษาข้อมูลหุ่นยนต์หรือยานสำรวจใต้น้ำในปัจจุบันมีรูปแบบที่หลากหลาย ตัวอย่าง เช่น การสำรวจสภาพแวดล้อมใต้น้ำโดยมีแค่การแสดงผลของภาพจากการสำรวจ หรือหุ่นยนต์สำรวจบางประเภทถูกออกแบบให้มีความอัจฉริยะมากขึ้น ซึ่งสามารถวัดค่าต่างๆของสภาพแวดล้อมบริเวณที่สำรวจได้

##### 1) หุ่นยนต์ปลาสำรวจสิ่งแวดล้อม

หุ่นยนต์ปลาการ์ตูนถูกออกแบบให้มีการเคลื่อนไหวได้เหมือนธรรมชาติ ทั้งท่าว่ายน้ำและการกลับตัว มีการบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ด้วยวิทยุบังคับ การทำงานจะมีกล้องถ่ายภาพใต้น้ำเพื่อบันทึกภาพและมีเซนเซอร์ติดที่ปากปลาเพื่อตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ ซึ่งจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก)



(ก) หุ่นยนต์ปลาการ์ตูน



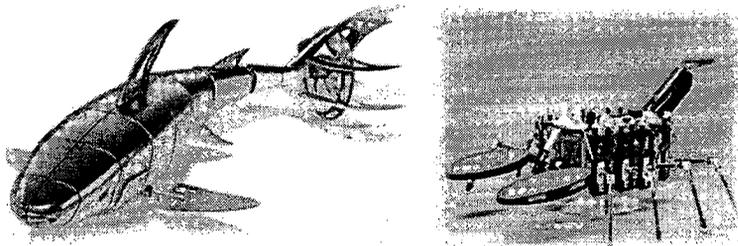
(ข) ปลาหุ่นยนต์เพื่อสิ่งแวดล้อม

รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ปลาสำรวจสิ่งแวดล้อม

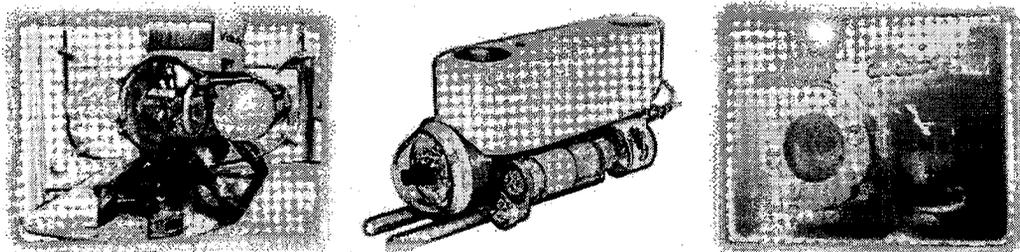
หุ่นยนต์ปลาเพื่อสิ่งแวดล้อม มีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับมลพิษที่สามารถดมกลิ่นสารเคมีอันตรายในน้ำได้ ปลาหุ่นยนต์จะสื่อสารผ่านระบบไร้สาย wi-fi รวมถึงใช้ระบบค้นหาพิกัดตำแหน่งผ่านดาวเทียมหรือจีพีเอส ระหว่างที่ทำการสำรวจแหล่งมลพิษ จะมีการแจ้งเตือนหากพบสารเคมีอันตราย รวมถึงส่งสัญญาณผ่านระบบจีพีเอส เพื่อระบุตำแหน่งที่พบสารเคมี ปลาหุ่นยนต์เคลื่อนไหวร่างกายแบบคลื่นซึ่งทำงานด้วยมอเตอร์ และใช้ครีบและหางช่วยเปลี่ยนทิศทาง โดยมีความเร็วในการเคลื่อนที่ครึ่งเมตรต่อวินาที และสามารถอยู่ในน้ำได้นาน 24 ชั่วโมงโดยไม่ต้องชาร์จไฟ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการสำรวจจะนำไปสร้างแผนที่มลพิษในน้ำแบบเรียลไทม์ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)

2) หุ่นยนต์หรือยานสำรวจใต้น้ำ

หากแบ่งงานวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์หรือยานสำรวจใต้น้ำของต่างประเทศ สามารถแบ่งได้ 2 แบบใหญ่ๆ คือ งานวิจัยหุ่นยนต์เลียนแบบลักษณะการเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ เช่น ปลาฉลาม, แมลงชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) กับงานวิจัยหุ่นยนต์หรือยานเพื่อการสำรวจใต้น้ำ โดยลักษณะโครงสร้างจะมีขนาดใหญ่ดูแข็งแรงคงทนและมีการติดกล้องวิดีโอที่ตัวหุ่นยนต์หรือยานเพื่อนำภาพมาแสดงผลบนพื้นดิน ดังรูปที่ 2.3 (ข)



(ก) หุ่นยนต์เลียนแบบลักษณะการเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ



(ข) ยานเพื่อการสำรวจใต้น้ำ

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของหุ่นยนต์ใต้น้ำ

2.2 แรงพุงและการลอยตัว

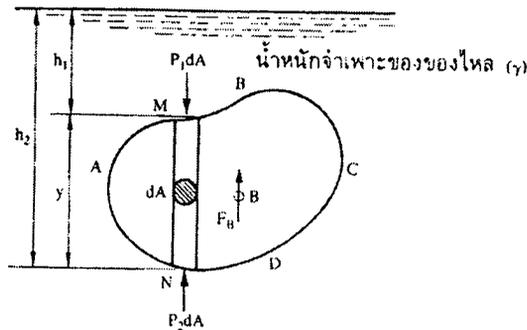
การสร้างหุ่นยนต์สำรวจใต้น้ำ จะต้องคำนึงถึงควมมีเสถียรภาพในการจมและการลอยด้วย มิฉะนั้นหุ่นยนต์อาจเกิดการพลิกคว่ำได้ ดังนั้นการที่จะพิจารณาถึงสภาพการณ์ต่างๆ ในเรื่องดังกล่าว รวมทั้งการออกแบบสร้าง ก็จะต้องเข้าใจหลักการพื้นฐานในเรื่องที่เกี่ยวกับแรงพุง การลอยตัวของวัตถุ จุดศูนย์กลางของแรงพุง ตำแหน่งเมตาเซนเตอร์และความสูงเมตาเซนตริก เพื่อจะได้นำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบสร้างหุ่นยนต์ที่ต้องลอยและจมอยู่ในน้ำ

### 2.2.1 แรงพยุงและศูนย์กลางของแรงพยุง (Buoyant force and center of buoyancy)

เมื่อวัตถุใดๆ จมอยู่ในของไหล ไม่ว่าจะจมเพียงบางส่วนหรือจมทั้งหมดก็ตาม จะมีแรงตัวหนึ่งเกิดขึ้นกับวัตถุนั้นในลักษณะกระทำขึ้น และพยายามที่จะพยุงให้วัตถุนั้นยกขึ้นหรือลอยตัวขึ้น แรงที่พยายามพยุงให้วัตถุที่จมในของไหลลอยขึ้นนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก เราเรียกว่า แรงพยุง (Buoyancy force) และตำแหน่งที่แรงพยุงกระทำกับวัตถุนั้น เราเรียกว่า จุดศูนย์กลางของแรงพยุง (Center of buoyancy)

ขนาดของแรงพยุงเราสามารถวิเคราะห์หาค่าได้โดยใช้หลักการของอาร์คิเมเดส (Archimedes principle) ซึ่งให้นิยามไว้ว่า “เมื่อวัตถุใดๆ จมอยู่ในของไหล ไม่ว่าจะเป็ทั้งหมดหรือบางส่วนก็ตามจะมีแรงยกตัวหรือแรงพยุงตัวมากระทำกับวัตถุนั้น และจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของไหลที่ถูกวัตถุนั้นแทนที่” [2]

แรงพยุงที่กระทำกับวัตถุที่จมในของไหลนั้น เกิดขึ้นจากความกดดันของของไหลที่กระทำกับผิววัตถุนั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แรงพยุงที่กระทำกับวัตถุที่จมในของไหลทั้งก้อน [2]

จากรูปที่ 2.4 วัตถุ ABCD ทั้งก้อนจมในของไหลที่มีน้ำหนักจำเพาะเท่ากับ แรงลัพธ์ของแรงในแนวระนาบ (Horizontal) ที่กระทำรอบๆ ก้อนวัตถุนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากรอบๆ ก้อนวัตถุนี้มีพื้นที่ภาพฉายด้านตรงกันข้ามเท่ากัน ขนาดของแรงระนาบในด้านตรงกันข้ามกันจึงหักล้างกันไปด้วย ผลคือแรงลัพธ์เท่ากับศูนย์ ส่วนแรงในแนวตั้ง (Vertical) ที่กระทำกับวัตถุ เราพิจารณาชิ้นส่วนปริซึมเล็กๆ MN ที่มีพื้นที่หน้าตัด ปลายด้านบนของปริซึม MN จะมีแรงที่เกิดจากความดันของของเหลวเท่ากับ ( ) กระทำจากบนลงล่าง ทำนองเดียวกันที่ปลายด้านล่างของปริซึมจะมีแรงที่เกิดจากความดันของของเหลวเท่ากับ ( ) กระทำจากล่างขึ้นบน จากรูปที่ 2.4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_1 &= \gamma h_1 \\ P_2 &= \gamma h_2 \\ Y &= h_2 - h_1 \end{aligned} \quad (2.1)$$

เป็นน้ำหนักจำเพาะของไหล และถ้า มากกว่า แล้ว ความแตกต่างของแรงกระทำขึ้นและแรงกระทำลงก็คือ แรงพยุง ที่กระทำในแนวตั้งกับปริซึม MN ดังนั้นแรงพยุง เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 dF_B &= P_2 dA - P_1 dA \\
 &= \gamma(h_2 - h_1) dA \\
 &= \gamma Y dA
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

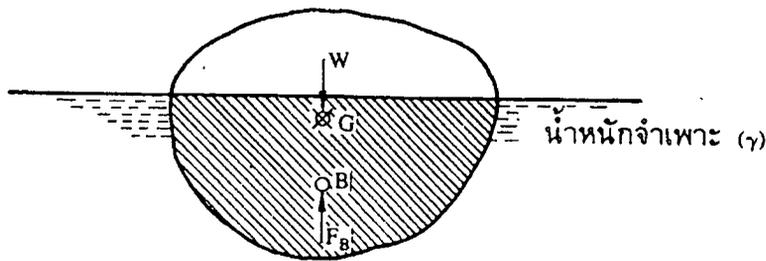
ถ้า  $d\bar{V}$  เป็นปริมาตรของปริซึม MN ในแนวตั้ง ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 F_B &= \int dF_B \\
 &= \int \gamma d\bar{V} \\
 F_B &= \gamma \bar{V}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

แรงพยุง  $F_B$  ทั้งหมดที่กระทำกับวัตถุทั้งก้อน ABCD หาได้จากการอินทิเกรตแรง  $dF_B$

$$\begin{aligned}
 F_B &= \int dF_B \\
 &= \int \gamma d\bar{V} \\
 F_B &= \gamma \bar{V}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

จากสมการ (2.4) เป็นปริมาตรของวัตถุทั้งก้อนที่จมในของไหล และแรงพยุง จะเท่ากับ น้ำหนักของของไหลที่ถูกวัตถุทั้งก้อนแทนที่ ( ) และแรงนี้จะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางของแรงพยุง ซึ่งเป็น ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง (Centroid) ของปริมาตรของของไหลที่ถูกวัตถุแทนที่ ในกรณีที่วัตถุจมทั้งก้อน จุดศูนย์กลางของแรงพยุงจะเป็นจุดเดียวกันกับจุดศูนย์กลางถ่วงของวัตถุนั้น



รูปที่ 2.5 แรงพยุงที่กระทำกับวัตถุที่ลอยอยู่เหนือผิวอิสระของของไหล [2]

ในรูปที่ 2.5 เมื่อวัตถุลอยอยู่เหนือผิวอิสระของของไหล จะมีบางส่วนจมอยู่ในของไหล ทางด้านบนของวัตถุบางส่วนจะสัมผัสกับอากาศ และทางด้านล่างของวัตถุจะจมอยู่ในของไหล ในกรณีนี้น้ำหนักจำเพาะของอากาศไม่ต้องนำมาพิจารณา เพราะเมื่อเปรียบ เทียบกับน้ำหนักจำเพาะของของเหลวแล้วจะมีค่าน้อยมาก น้ำหนักของอากาศที่ถูกทางด้านบนของวัตถุแทนที่ไม่ต้องนำมาพิจารณา ดังนั้นแรงพยุงที่ของเหลว

กระทำกับวัตถุจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกวัตถุส่วนที่จมแน่นแทนที่ และจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางของของเหลวส่วนที่ถูกวัตถุแน่นแทนที่ด้วย

เมื่อวัตถุลอยอยู่ในของไหลในสภาพสมดุล (Equilibrium) นั้น แรงพยุงมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกวัตถุส่วนที่จมแทนที่ แล้วยังเท่ากับน้ำหนักของวัตถุทั้งก้อนด้วย นั่นคือ

$$F_B = w \quad (2.5)$$

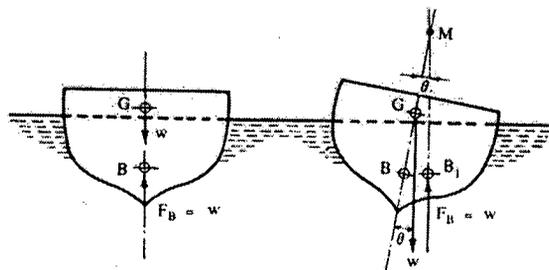
โดยที่  $F_B$  คือแรงพยุงมีหน่วยเป็นนิวตัน (Newton, N)

$w$  คือน้ำหนักของวัตถุมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (Kilogram: k)

ถ้าแนวแรงของแรงพยุงและน้ำหนักอยู่ในแนวเดียวกัน จะไม่มีโมเมนต์ด้วย และถ้าแรงพยุง  $F_B$  เท่ากับน้ำหนักของวัตถุแล้ว วัตถุนี้จะอยู่ในสภาพสมดุลและหยุดนิ่ง และถ้าแรงพยุง มีค่ามากกว่าน้ำหนักวัตถุแล้ว วัตถุก็จะลอยขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงพยุง  $F_B$  เท่ากับน้ำหนักแล้ว วัตถุนี้จึงหยุดนิ่งอีกครั้งหนึ่งได้ ในกรณีตรงกันข้าม ถ้าน้ำหนักวัตถุ มากกว่าแรงพยุง  $F_B$  แล้ว วัตถุนี้ก็จะจมดิ่งลงในของไหลเรื่อยๆ จนกระทั่งมีแรงอื่นมาพยุงหรือช่วยพยุงวัตถุนี้ จนมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุ จึงทำให้วัตถุนี้หยุดนิ่งได้อีกครั้ง

### 2.2.2 เมตาเซนเตอร์และความสูงเมตาเซนตริก (Metacenter and metacentric height)

วัตถุใดๆ ที่ลอยบนของเหลว จะอยู่ในสภาพสมดุลได้ก็ต่อเมื่อน้ำหนักของวัตถุ ที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลาง  $G$  ของวัตถุนี้มีค่าเท่ากับแรงพยุง ที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลางของแรงพยุง  $B$  ในทิศทางตรงกันข้าม แสดงดังรูปที่ 2.6 จุด  $B$  และจุด  $G$  อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน



รูปที่ 2.6 เมตาเซนเตอร์สำหรับวัตถุลอย [2]

ถ้าเรือในรูปที่ 2.6 เกิดการเอียงเล็กน้อยเป็นมุม (Angle of heel) และสมมติว่าจุดศูนย์กลาง  $G$  ยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิมของวัตถุ จุดศูนย์กลางของแรงพยุง  $B$  ถูกเปลี่ยนตำแหน่งไปยัง  $B_1$  อันเนื่องมาจากปริมาตรของของเหลวที่ถูกวัตถุแทนที่มีรูปทรงเปลี่ยนแปลงไป แรงพยุง เดิมกระทำผ่านจุด  $B$  แต่ตอนนี้จะกระทำผ่านจุด  $B_1$  และแนวแรงของ ขึ้นไปตัดกับแนวแกนเดิม ( $BG$ ) ที่จุด  $M$  จุด  $N$  นี้เรียกว่า เมตาเซนเตอร์ (Metacenter) ซึ่งก็คือจุดตัดที่เกิดจากการตัดกันของแกนที่ลากผ่านจุด  $B$  และ  $G$  ในแนวตั้งของวัตถุลอยกับแนวเส้นใหม่ที่เกิดจากแรงพยุงใหม่ที่กระทำผ่านจุด  $B_1$  เมื่อวัตถุเอียงเป็นมุม  $\theta$  ถ้ามุม

$\theta$  เปลี่ยนแปลงน้อยมาก เราถือว่าตำแหน่งของเมตาเซนเตอร์  $M$  ไม่เปลี่ยนแปลง และระยะระหว่างจุดศูนย์กลาง  $G$  และเมตาเซนเตอร์  $M$  ของวัตถุลอย (ระยะ  $GM$ ) เมื่อ  $\theta$  เข้าใกล้  $0$  เรียกว่า ความสูงเมตาเซนตริก (Metacentric height) ตำแหน่งของเมตาเซนเตอร์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของจุดศูนย์กลางนี้จะเป็นตัวบอกถึงลักษณะการทรงตัวของวัตถุที่ลอยบนของเหลวต่อไป

### 2.2.3 เสถียรภาพของวัตถุจมและวัตถุลอย (Stability of submerged and floating bodies)

เสถียรภาพของวัตถุจมและวัตถุลอยหมายถึง เมื่อวัตถุนั้นมีแรงภายนอกมากระทำแล้วทำให้วัตถุนั้นกลับคืนสู่สภาพเดิมได้หรือไม่ วัตถุจมหรือลอยเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งจากเดิมได้ทั้งแนวระนาบและแนวตั้ง ซึ่งมีผลทำให้วัตถุนั้นทรงตัวได้และทรงตัวไม่ได้ ดังเช่นเรือ เมื่อโดนคลื่นกระทำจะเกิดการเอียงขึ้น ตำแหน่งของ  $B$  จะถูกเปลี่ยนไปที่  $B_1$  และแนวแรงใหม่ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดแรงคู่ควบขึ้น ถ้าแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นนั้นพยายามที่จะทำให้เรือคืนสู่สภาพเดิมเราเรียกว่า เรือลำนี้ทรงตัวได้ดี หรือแสดงว่าเรือนั้นลอยอย่างมีเสถียรภาพ แต่ถ้าแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นมีผลทำให้เรือเอียงมากขึ้น เราเรียกว่า เรือลำนี้ทรงตัวไม่ได้ แสดงว่าเรือนั้นลอยอย่างไม่มีเสถียรภาพ

สำหรับวัตถุที่ลอย ความมีเสถียรภาพจะต่างจากวัตถุจม กล่าวคือ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดศูนย์กลางเสถียร เมื่อวัตถุอยู่ในสภาพสมดุล แรงเนื่องจากน้ำหนัก และแรงลอยตัว จะมีขนาดและทิศทางในแนวเดียวกัน เมื่อวัตถุเอียงจากเดิมเป็นมุมเล็กๆ แนวของแรงลอยตัว จะตัดกับแนวเส้นศูนย์กลางของวัตถุที่จุดศูนย์กลางเสถียร [3]

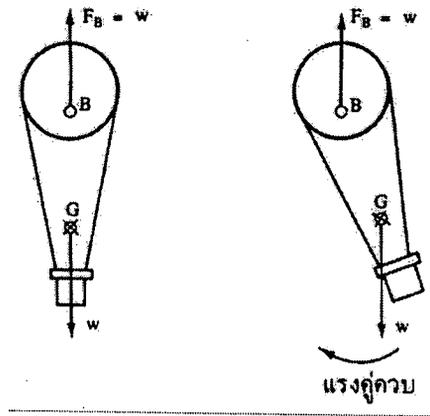
เมื่อวัตถุจมในของไหลหรือลอยบนของไหลที่เกิดการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงภายนอก จะทำให้วัตถุนั้นอยู่ในสถานะต่างๆ 3 สถานะดังนี้

1) สถานะทรงตัวได้ดี (Stable equilibrium) วัตถุที่ลอยหรือจมในของไหลที่มีแรงทำให้วัตถุเอียงเป็นมุม จะทำให้เกิดแรงคู่ควบอันเนื่องจากแรงพยุงใหม่ และแนวแรงพยายามทำให้วัตถุนั้นกลับคืนสู่สภาพเดิมได้จะเรียกว่า วัตถุทรงตัวได้ดี หรือ มีเสถียรภาพในการทรงตัว เปรียบเสมือนว่าลูกเทนนิสตกอยู่ในร่อง กลิ้งอย่างไรก็ตามจะต้องไปหยุดอยู่ในร่องที่ตำแหน่งเดิมทุกครั้ง

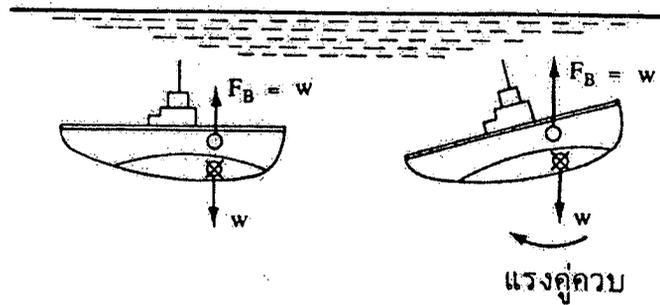
2) สถานะทรงตัวไม่ได้ (Unstable equilibrium) วัตถุที่ลอยหรือจมในของไหลที่มีแรงทำให้วัตถุเอียงเป็นมุม จะเกิดแรงคู่ควบอันเนื่องจากแรงพยุงใหม่ และแนวแรงพยายามเสริมให้วัตถุนั้นเอียงมากขึ้นทุกที เรียกว่า วัตถุทรงตัวไม่ได้ หรือ ไม่มีเสถียรภาพในการทรงตัว เปรียบเสมือนว่าลูกเทนนิสวางอยู่บนเนิน ถ้ามีแรงมากระทำกับลูกเทนนิสเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ลูกเทนนิสต้องตกกลิ้งลงมาจากเนินทันที

3) สถานะทรงตัวเป็นกลางๆ (Neutral equilibrium) วัตถุที่ลอยหรือจมในของไหลที่มีแรงทำให้วัตถุนั้นเอียงเป็นมุม และไม่มีแรงคู่ควบเกิดขึ้น โดยที่จุด  $B$  และ  $G$  อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน วัตถุนี้พร้อมจะหยุดนิ่งได้ทุกตำแหน่ง เรียกว่า วัตถุทรงตัวเป็นกลางๆ เปรียบเสมือนว่าเรากลิ้งลูกเทนนิสไปบนพื้นราบเรียบ มันสามารถหยุดนิ่งได้ทุกตำแหน่งบนพื้นนั้น

สำหรับบอลลูนและเรือดำน้ำจะจมอยู่ในของไหลทั้งหมด ดังนั้นตำแหน่งของจุดศูนย์กลางถ่วงและจุดศูนย์กลางแรงพยุงจะถูกกำหนดให้อยู่กับที่ ดังนั้นในกรณีของวัตถุที่จมในของไหลได้ทั้งก่อน ลักษณะการทรงตัวจึงเป็นไปได้โดยง่าย เช่น ถ้าตำแหน่งของ B อยู่เหนือ G แล้ว ถือว่าเป็นวัตถุที่ทรงตัวได้ดี ดังรูปที่ 2.7



(ก) บอลลูนลอยในอากาศ



(ข) เรือดำน้ำจมในน้ำทะเล

รูปที่ 2.7 การทรงตัวของวัตถุที่จมในของไหลทั้งหมด [2]

จากรูปที่ 2.7 ขณะที่มีความภายนอกมากกระทำกับบอลลูนและเรือดำน้ำ จะทำให้เกิดการแกว่งตัวและเกิดแรงคู่ควบขึ้นในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งมีผลทำให้บอลลูนและเรือดำน้ำพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิม โดยที่จุด B อยู่เหนือ G นั่นคือทั้งบอลลูนและเรือดำน้ำอยู่ในสภาพทรงตัวได้ดีหรือมีเสถียรภาพ ในทางตรงกันข้าม ถ้าตำแหน่งของ B อยู่ต่ำกว่า G แรงคู่ควบที่เกิดขึ้นจะไปเสริมแนวแรงเดิมทำให้บอลลูนและเรือดำน้ำเอียงเพิ่มขึ้น และในที่สุดก็จะพลิกคว่ำไป ถือว่าทั้งบอลลูนและเรือดำน้ำในขณะนี้ทรงตัวไม่ได้หรือไม่มีเสถียรภาพ และถ้าทั้ง B และ G อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน เราถือว่าทั้งบอลลูนและเรือดำน้ำนี้มีการทรงตัวเป็นกลางๆ

## 2.3 ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ( Dissolved Oxygen, DO)

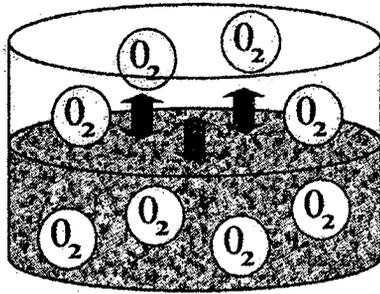
แก๊สหลายชนิดเมื่ออยู่ในน้ำ จะละลายน้ำแต่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำ เช่น แก๊สไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) และแก๊สออกซิเจน (O<sub>2</sub>) แต่มีแก๊สอีกหลายชนิดเมื่ออยู่ในน้ำ จะทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำ เช่น แก๊สแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCL) เป็นต้น แก๊สออกซิเจนเมื่ออยู่ในน้ำจะแพร่กระจายและละลายในน้ำ เรียกว่าแก๊สออกซิเจนที่ละลายในน้ำ หรือ Dissolved Oxygen (DO) หรือเรียกสั้นๆ ว่า “ดีโอ” แหล่งสำคัญที่ให้แก๊สออกซิเจนในน้ำ คือ แก๊สออกซิเจนในบรรยากาศเหนือน้ำที่แพร่ลงสู่น้ำ (ถูกน้ำดูดกลืนไว้) และกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ และแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) การละลายของแก๊สออกซิเจนในน้ำจะละลายจนกระทั่งอิ่มตัว (การกระเพื่อมของคลื่นน้ำช่วยให้แก๊สออกซิเจนผสมกับน้ำได้ง่ายขึ้น) ค่าการละลายได้ของแก๊สออกซิเจนในน้ำ (วัดในสภาวะอิ่มตัว) ณ อุณหภูมิที่กำหนด มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l หรือ ppm) เช่นที่ความดัน 1 บรรยากาศ ปริมาณแก๊สออกซิเจนอิ่มตัว ณ อุณหภูมิ 0° และ 20° มีค่าเท่ากับ 14.60 และ 9.07 mg/l ตามลำดับ เห็นได้ว่าอุณหภูมิของน้ำมีผลต่อการละลายได้ของออกซิเจน (Oxygen solubility) หรือ Saturated value

ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายน้ำของแก๊สออกซิเจนในน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศ และการมีสารอื่นๆที่ละลายอยู่ในน้ำ (เกลือและแก๊สอื่นๆที่ละลายในน้ำ) กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น และความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศลดลง รวมทั้งมีปริมาณสารเจือปนที่ใช้ออกซิเจนในน้ำอยู่ในปริมาณมาก มีผลทำให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง ตัวอย่างเช่น ณ อุณหภูมิ 20° ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำมีค่าเท่ากับ 9.07 mg/l เมื่ออุณหภูมิเป็น 30° ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำมีค่าเท่ากับ 7.51 mg/l

### 2.3.1 ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศต่อการละลายของแก๊สออกซิเจนในน้ำ

เมื่ออากาศสัมผัสกับผิวน้ำ (กำหนดปริมาณของน้ำหนึ่งหน่วย) แก๊สออกซิเจนจะถูกดูดกลืนตรงบริเวณผิวน้ำจนกระทั่งความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนในน้ำอิ่มตัวด้วยอากาศเท่ากับความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนในอากาศอิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดสภาวะสมดุลขึ้น ณ จุดนี้เรียกได้ว่า น้ำอิ่มตัวด้วยออกซิเจน

เมื่อความดันอากาศเหนือน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สออกซิเจนจะละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎการละลายของเฮนรี (การละลายได้ของแก๊สจะแปรตรงกับความดันย่อยของแก๊สนั้นที่อยู่เหนือของเหลว ณ อุณหภูมิคงที่)



รูปที่ 2.8 แก๊สออกซิเจนในอากาศสมดุลกับแก๊สออกซิเจนในน้ำ [4]

จากรูปที่ 2.8 แก๊สออกซิเจนในอากาศสมดุลกับแก๊สออกซิเจนในน้ำ จะได้สมการดังนี้

$$P = KC \quad (2.6)$$

เมื่อ  $P$  คือ ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจน ณ ความดัน 1 บรรยากาศ

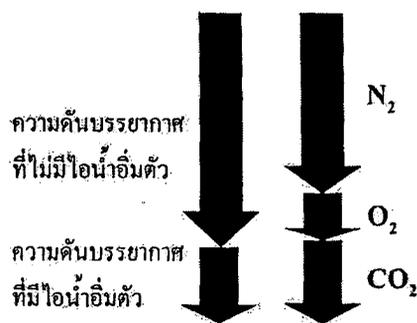
$K$  คือ ค่าคงที่เฮนรี

$C$  คือ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ละลายน้ำ ณ สภาวะสมดุล

ณ สภาวะสมดุลระหว่างอากาศแห้ง ค่าความดันย่อยของแก๊สคิดเป็นร้อยละ 20.95 ของความดันบรรยากาศ และค่าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนจะลดลงที่บริเวณจากผลของไอน้ำ



(ก) ณ สภาวะสมดุลระหว่างอากาศแห้ง (ไม่มีความชื้น)



(ข) ณ สภาวะสมดุลระหว่างอากาศบริเวณผิวน้ำ

รูปที่ 2.9 ความดันของแก๊สออกซิเจน [4]

จากรูปที่ 2.9 แก๊สออกซิเจนละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อความดันบรรยากาศเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันของไอน้ำเพิ่มขึ้น (อุณหภูมิสูงขึ้น) มีผลทำให้ความดันย่อยแก๊สออกซิเจนลดลง แก๊สออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยลง

อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 100% มีผลทำให้ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนลดลง อันเนื่องมาจากความดันไอของไอน้ำ สำหรับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0% จัดเป็นอากาศแห้ง ซึ่งไม่มี ความดันไอของไอน้ำ

ตารางที่ 2.3 ค่าการละลายของแก๊สออกซิเจนเทียบกับอุณหภูมิที่มีความชื้นสัมพัทธ์ [4]

อุณหภูมิ (C°)	ค่าการละลายได้ของแก๊สออกซิเจน (mg/l) ตาม % ของความชื้นสัมพัทธ์	
	0 %	100 %
0	14.66	14.60
1	14.26	14.19
2	13.89	13.81
3	13.53	13.44
4	13.18	13.09
5	12.85	12.75
6	12.54	12.43
7	12.23	12.12
8	11.94	11.83
9	11.66	11.55
10	11.40	11.27
11	11.14	11.01
12	10.90	10.76
13	10.66	10.52
14	10.44	10.29
15	10.22	10.07
16	10.01	9.85
17	9.82	9.65
18	9.63	9.45
19	9.45	9.26
20	9.27	9.07
21	9.11	8.90
22	8.95	8.72
23	8.80	8.56

อุณหภูมิ (C°)	ค่าการละลายได้ของแก๊สออกซิเจน (mg/l / l) ตาม % ของความชื้นสัมพัทธ์	
	0 %	100 %
24	8.65	8.40
25	8.51	8.24
26	8.37	8.09
27	8.24	7.95
28	8.12	7.81
29	8.00	7.67
30	7.88	7.54

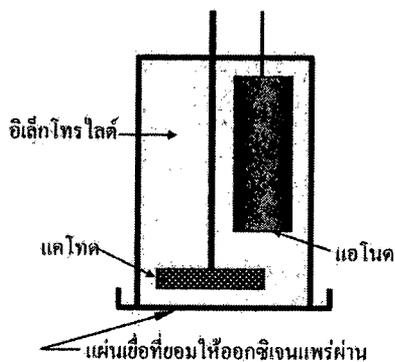
### 2.3.2 การวัดดีไอด้วยเครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO meter)

การวัดปริมาณแก๊สออกซิเจนด้วยเครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำนั้น ใช้งานง่าย และสะดวกต่อผู้ใช้ มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง เครื่องวัดออกซิเจนมีทั้งแบบออกภาคสนาม และแบบใช้ในห้องปฏิบัติการ เครื่องวัดออกซิเจนมีหัววัด 2 แบบ คือ แบบหัววัดกัลป์วานิก (Galvanic probes) และแบบหัววัดโพลารोगราฟิค (Polarographic probes) หัววัดทั้งสองประกอบด้วยขั้ววัดไฟฟ้า (แอโนด และแคโทด) โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนอิสระที่ขั้วแคโทดพร้อมให้กระแสไฟฟ้าออกมา และมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดต่างกันมากกว่า 500 มิลลิโวลต์ (500 mV) ในกรณีที่มีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอก (External potential) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด จะเป็นหลักการของหัววัดแบบโพลารोगราฟิค แต่ถ้าไม่มีการผ่านความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอก ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด จะเป็นหลักการของหัววัดกัลป์วานิก ในที่นี้จะขอล่าถึงหลักการของหัววัดแบบกัลป์วานิกเท่านั้น

#### 1) หัววัดออกซิเจนแบบกัลป์วานิก (Galvani)

หัววัดแบบกัลป์วานิกประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่ทำจากโลหะต่างชนิดกันที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทั้งหมดบรรจุอยู่ในท่อหัววัด ที่ปลายหัววัดจะถูกหุ้มด้วยแผ่นเยื่อที่ยอมให้ออกซิเจนแพร่ผ่าน (Oxygen permeable membrane) ซึ่งอาจเป็นเทฟลอน หรือ พอลิเอทิลีน

อัตราการแพร่ของแก๊สออกซิเจนจะแปรตรงกับความดันย่อยของแก๊สออกซิเจน เมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สออกซิเจนจะแพร่ผ่านแผ่นเยื่อได้มากก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากขึ้นด้วย



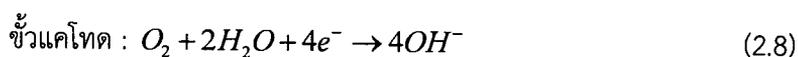
รูปที่ 2.10 แผนภาพส่วนประกอบของหัววัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบกัลวานิก [4]

ขั้วแอโนดนิยมใช้สังกะสีหรือตะกั่ว ส่วนขั้วแคโทด นิยมใช้เงิน

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) หรือโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด และขั้วแคโทดเป็นดังนี้



ที่ขั้วแอโนดที่ทำจากสังกะสีจะให้อิเล็กตรอนออกมา หรือกล่าวได้ว่าขั้วสังกะสีถูกออกซิไดร์ มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ  $-0.76V$

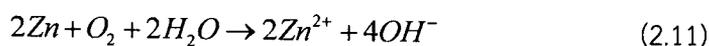


แก๊สออกซิเจนที่แพร่ผ่านเยื่อจะไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด และจะทำปฏิกิริยากับน้ำ เปลี่ยนเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน หรือช่องว่างแก๊สออกซิเจนถูกรีดิวซ์ที่ขั้วแคโทด มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ  $+0.40V$

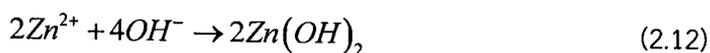
อิเล็กตรอนถูกใช้ไปในขั้วแคโทด 4 โมลอิเล็กตรอน ดังนั้นสมการที่ขั้วแอโนดต้องคูณด้วย 2 ตลอด เพื่อให้มีจำนวนโมลอิเล็กตรอนเท่ากับขั้วแคโทด

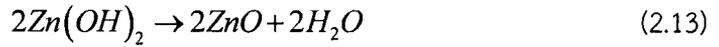


ดังนั้นปฏิกิริยารวมจึงเป็น

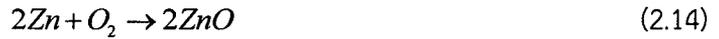


$Zn^{2+}$  และ  $OH^-$  ไอออนที่เกิดขึ้นรวมกันเป็น  $Zn(OH)_2$  และสลายตัวให้  $ZnO$  และ  $H_2O$





ดังนั้นปฏิกิริยารวมจึงเป็น



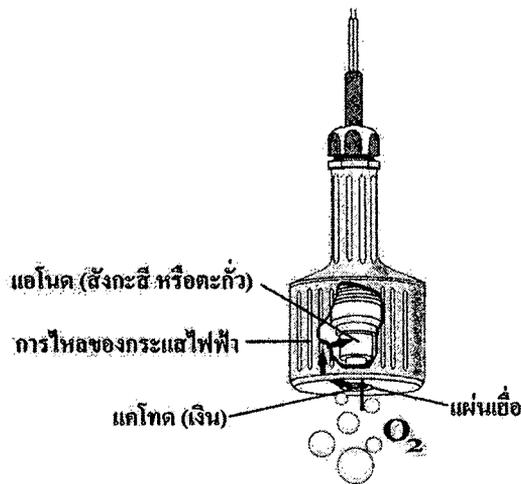
เป็นตะกอนสีขาว มีความเสถียร และไม่ไปเกาะติดที่ขั้วสังกะสี (ขั้วแอโนด) นั่นคือไม่เกิดโพลาไรเซชัน น้ำจะถูกผลิตขึ้นมาใหม่และอิเล็กโทรไลต์ไม่ได้ถูกใช้ ตามทฤษฎีแล้วจึงไม่ต้องเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในหัววัด นี่คือข้อดีของหัววัดแบบกัลวานิก

ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด (Eocell) มีค่าดังนี้  $E_{\text{ocell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} = 0.40 - (-0.76) = 1.16\text{V}$

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่า 0.5V จึงไม่จำเป็นต้องให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอกและอิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วสังกะสีไปยังขั้วเงิน ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ได้ถูกผลิตขึ้นจะไหลจากขั้วเงินไปยังขั้วสังกะสี

หัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบกัลวานิกสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ด้วยตัวเอง (Self-polarizing amperometric cell) สามารถนำมาใช้ตรวจวัดดีโอได้ทันทีโดยไม่ต้องเสียเวลาอุ่นเครื่อง (Warm-up)

กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะเรียกว่า กระแสการแพร่ (Diffusion current) ซึ่งจะแปรโดยตรงกับความเข้มข้นของแก๊สในน้ำและเครื่องวัดดีโอจะมีระบบอ่านเป็นความเข้มข้นในหน่วย mg/l ของแก๊สออกซิเจน (% Saturation, ร้อยละของแก๊สออกซิเจนละลายในน้ำ 1 ลิตร)



รูปที่ 2.11 ลักษณะหัววัดออกซิเจนละลายในน้ำแบบกัลวานิก [4]

2) ปัญหาที่เกิดกับหัววัดแบบกัลป์วานิก

- น้ำที่เกิดรอบๆขั้วแคโทด มีผลทำให้ความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (KCl) ลดลง ควรจะเปลี่ยนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทุกๆ 2 สัปดาห์

- ถ้าใช้ตะกั่วเป็นขั้วแอโนดจะเกิด (Lead (II) oxide) และถ้าใช้สังกะสีจะเกิด ทั้ง และ มีความเสถียรสูงไม่ไปเคลือบขั้วแอโนด จึงทำให้ขั้วแอโนดมีอายุทำงานได้นาน แต่ เคลือบบนผิวแอโนดที่ทำจากสังกะสีบริสุทธิ์ จะทำให้หัววัดไม่ทำงาน ดังนั้นขั้วแอโนดที่ทำด้วยสังกะสีควรทำจากโลหะผสมของสังกะสี (สังกะสีผสมอลูมิเนียมเบริลเลียม) เมื่อมี มาเคลือบมันจะหลุดไปเอง ได้ผิวหน้าของสังกะสีใหม่ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 2.4 ปฏิกริยาสุทธิที่เกิดจากขั้วแอโนดและขั้วแคโทดของหัววัดแบบกัลป์วานิก [4]

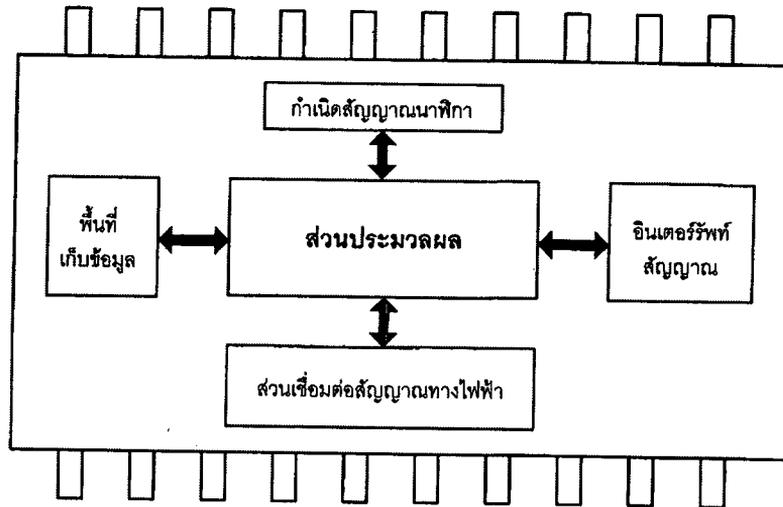
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (ใช้สังกะสีเป็นขั้วไฟฟ้า)	$Zn \rightarrow Zn^{+} + 2e^{-}$
ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด (ใช้เงินเป็นขั้วไฟฟ้า)	$2e^{-} + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2OH^{-}$
ปฏิกิริยาสุทธิ	$Zn + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2OH^{-}$ $Zn(OH)_2$ $Zn(OH)_2 \rightarrow ZnO + H_2O$ $Zn + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow ZnO$

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เสมือนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้า หรือระบบควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความสามารถในการทำงานมากขึ้น โดยสามารถเปลี่ยนแปลงลำดับการทำงานได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขภายในหน่วยความจำ ทำให้สามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์การไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้ แสดงรายละเอียดดังนี้

2.4.1 โครงสร้างหลักภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างหลักภายในไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น แบ่งออกได้หลายส่วนที่จะทำงานสัมพันธ์กัน รูปโครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์ [5]

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าโครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์ มีอยู่ 5 ส่วน คือ ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล ส่วนเชื่อมต่อสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ส่วนอินเตอร์รัพต์สัญญาณ ซึ่งทั้งหมดรับส่งข้อมูลมาที่ส่วนประมวลผล ซึ่งสามารถอธิบายในแต่ละส่วนได้ดังนี้

- 1) ส่วนประมวลผล (Processing unit) คือส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณทางคณิตศาสตร์ หรือ การตัดสินใจแบบมีเงื่อนไข (Logic) ซึ่งจะมีการทำงานที่ซับซ้อน โดยลำดับในการทำงานของส่วนประมวลผลจะขึ้นอยู่กับลำดับคำสั่งในการทำงาน (Programming code) ซึ่งบรรจุอยู่ภายในส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล
- 2) ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูล (Memory unit) คือส่วนที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูล โดยแบ่งชนิดของพื้นที่เก็บข้อมูลเป็น 2 แบบ คือ แบบชั่วคราว (Random Access Memory: RAM) และแบบกึ่งถาวร (Erasable Programmable Read Only Memory: EPROM) ซึ่งพื้นที่เก็บข้อมูลแบบชั่วคราวนี้จะเป็นข้อมูลที่สามารเปลี่ยนแปลงได้อยู่ตลอดเวลาและถูกใช้เป็นข้อมูลในการเก็บค่าตัวแปรในการคำนวณ โดยข้อมูลประเภทนี้จะสูญหายเมื่อเราหยุดจ่ายไฟเลี้ยงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนพื้นที่เก็บข้อมูลแบบกึ่งถาวรจะเป็นข้อมูลที่เก็บคำสั่งการทำงาน (Code) ซึ่งข้อมูลประเภทนี้เราสามารถเปลี่ยนแปลงได้แต่ต้องใช้กรรมวิธีพิเศษแต่ข้อมูลจะไม่สูญหายแม้ว่าจะหยุดจ่ายไฟเลี้ยงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วก็ตาม
- 3) ส่วนเชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้า (Interface unit) จะทำหน้าที่ติดต่อสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีอยู่ 2 แบบคือ อินพุตและเอาต์พุตแบบดิจิทัล (Digital I/O) โดยจะรับข้อมูลและส่งข้อมูลด้วยสัญญาณทางดิจิทัล (Digital signal) และอินพุตเอาต์พุตแบบอนาล็อก (Analog I/O) รับและส่งสัญญาณแบบสัญญาณทางอนาล็อก (Analog signal) ซึ่งในการรับส่งสัญญาณของอนาล็อกจะมีอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์บางรุ่นเท่านั้น
- 4) ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา จะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณนาฬิกาโดยใช้วงจรเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เรียกว่าวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator circuit) ซึ่งมีอุปกรณ์หลักคือ คริสตอล (X-

Tal) มากำหนดช่วงเวลาในการประมวลผล (Execute time) ของส่วนประมวลผล โดยจะมีผลต่อความเร็วในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้สัญญาณนาฬิกาจะยังใช้กำหนดความเร็วในการรับส่งข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม (Digital series communication signal) และกำหนดความถี่ในส่วนของตัวตั้งเวลา (Timer) ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

5) ส่วนอินเทอร์รัพท์สัญญาณ จะทำหน้าที่จัดลำดับความสำคัญในการทำงานในกรณีที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ทำงานในลักษณะหลายงานพร้อมกัน (Multitasking) ซึ่งจะอำนวยความสะดวกอย่างมากในการเขียนโปรแกรมเพื่อรองรับการทำงานลักษณะนี้

#### 2.4.2 ประเภทของไมโครคอนโทรลเลอร์

เราสามารถแบ่งประเภทของไมโครคอนโทรลเลอร์ตามลักษณะการทำงานด้านการประมวลผลได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ RISC (Reduced Instruction Set Computer) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีโครงสร้างการทำงานที่มีจำนวนชุดคำสั่งน้อยและแต่ละคำสั่งจะทำงานแบบง่ายๆ แต่ความเร็วในการทำงานแต่ละคำสั่งจะสูงมากซึ่งถือเป็นข้อเด่น แต่มีข้อด้อยคือชุดคำสั่งจะทำงานอย่างง่ายๆ คำสั่งในการคำนวณจะมีแค่เพียงคำสั่ง บวก และ ลบ

2) ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ CISC (Complex Instruction Set Computer) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีโครงสร้างการทำงานมีชุดคำสั่งที่มากกว่าแบบ RISC ซึ่งแต่ละคำสั่งจะสามารถทำงานที่ซับซ้อนได้โดยใช้เพียงแค่ 1 คำสั่งเท่านั้น ซึ่งจะสะดวกมากในการใช้งานที่มีการคำนวณที่ซับซ้อน หากจะเปรียบเทียบกันพบว่า ข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ CISC จะมีคำสั่งที่ทำงานได้ซับซ้อนมากกว่า แต่ข้อด้อยคือความเร็วในการทำงานสำหรับแบบ CISC คือความเร็วในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ CISC ต่อ 1 คำสั่ง จะช้ากว่าการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ RISC

#### 2.4.3 ชนิดของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Peripheral Interface Controller (PIC)

ส่วนประมวลผลของหุ่นยนต์สำรวจได้นำ ที่ทำหน้าที่ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ และเปิด - ปิดการใช้งานกล้องวิดีโอ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ในการควบคุมการทำงาน เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้สามารถใช้งานได้หลากหลายด้วยตัวมันเอง โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นถือเป็นส่วนสำคัญมาก เปรียบเสมือนเป็นสมองของหุ่นยนต์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC หากแบ่งออกตามชนิดของ Program memory สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

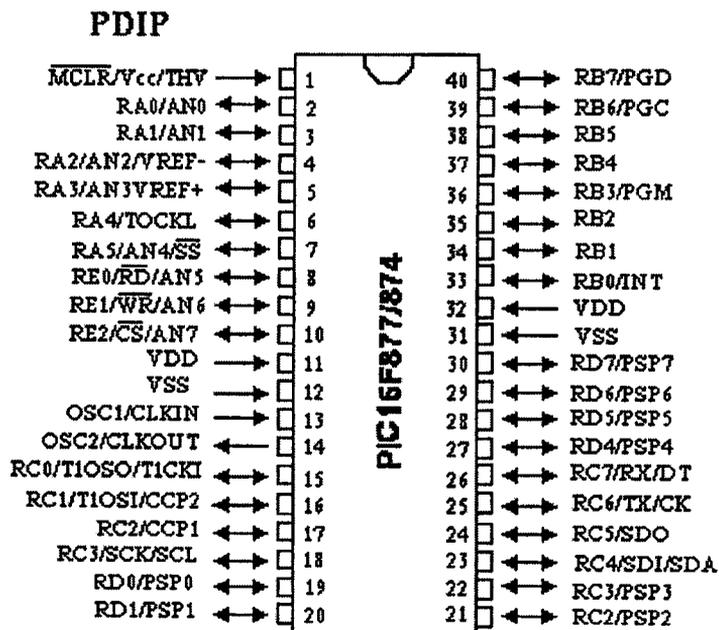
1) One Time Programmable (OTP) เป็นชิพที่มีราคาถูกที่สุดจาก 3 แบบเนื่องจากว่าชนิดนี้จะสามารถทำการโปรแกรมได้แค่ครั้งเดียวเท่านั้น หลังจากชิพได้ถูกโปรแกรมไปแล้วจะไม่สามารถโปรแกรมเข้าไปใหม่ได้อีก ดังนั้นประเภทนี้จะนิยมใช้หลังจากได้พัฒนาโปรแกรมจนกระทั่งจุดบกพร่องต่างๆ ในโปรแกรมไม่มีอีกแล้ว เพราะจะมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับชนิดอื่น จะมีตัวอักษร C แสดงบนตัวชิพ เช่น 16C74, 16C84 เป็นต้น

2) EPROM เป็นชิพที่เมื่อเขียนโปรแกรมเข้าไปแล้วสามารถโปรแกรมใหม่ด้วยการลบโปรแกรมเดิม โดยให้แสง Ultra Violet (UV) ส่องผ่านเข้าไปยังชิพ ประมาณ 5 - 10 นาที ดังนั้นที่ด้านบนของชิพจะมีกรอบกระจกเพื่อให้แสง UV สามารถส่องผ่านเข้าไปในตัวชิพได้ แต่ก็มีจำนวนครั้งในการลบโปรแกรมเช่นกัน เมื่อลบโปรแกรมด้วยแสง UV มากๆ เข้าก็จะไม่สามารถโปรแกรมเข้าไปได้แล้ว จะมีตัวอักษร JW หรือมีกรอบกระจกอยู่บนตัวชิพ

3) Electronically Erasable Programmable Read Only Memory (EEPROM) เป็นชิพที่สามารถอ่านหรือเขียนด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า ใช้เวลาในการลบข้อมูลไม่กี่วินาที และสามารถลบและเขียนใหม่ได้หลายพันครั้ง ทำให้เป็นที่นิยมที่สุดใน 3 ประเภท มีตัวอักษร F เป็นตัวบอก เช่น 16F84, 16F877 ซึ่งหุ่นยนต์สำรวจได้นำที่สร้างก็ใช้ชิพประเภทนี้เช่นกัน โดยเบอร์ที่เลือกใช้คือ 16F877A

#### 2.4.4 โครงสร้างภายนอกและสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877

ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877 บรรจุอยู่ในตัว Plastic Dual – In line Package (PDIP) ซึ่งมีลักษณะเดียวกับไอซีแบบตึนตะขาบที่พบเห็นโดยทั่วไป มีขาต่อใช้งานทั้งสิ้น 40 ขา ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การจัดขาของ PIC 16F877 [6]

จากรูปที่ 2.13 เป็นโครงสร้างภายนอกของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877 ซึ่งสามารถแบ่งการจัดขาต่อใช้งานของ PIC 16F877 ได้เป็น 4 กลุ่มคือ

- 1) กลุ่มสัญญาณนาฬิกา มี 2 ขา คือ OSC1/CLKIN และ OSC2/CLKOUT
- 2) กลุ่มขาควบคุม มี 1 ขา คือ MCLR
- 3) กลุ่มขาพอร์ตอินพุต - เอาต์พุต มี 33 ขา
- 4) กลุ่มขาไฟเลี้ยง มี 2 ขา คือ ขา VSS หรือขากราวด์ และขา VDD หรือขาไฟเลี้ยง

ซึ่งจำนวนขาพอร์ตใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ PIC ขึ้นอยู่กับเบอร์ที่เลือกใช้งาน มีจำนวนพอร์ตน้อยไม่เท่ากัน ตามความจำเป็นของผู้เลือกใช้ ซึ่งพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC สามารถที่จะกำหนดหน้าที่ในการทำงานได้มากกว่าหนึ่งหน้าที่ ก่อนการใช้งานพอร์ตจึงต้องตรวจสอบคุณสมบัติของแต่ละพอร์ตก่อนว่ามีคุณสมบัติอย่างไรและสามารถทำงานในหน้าที่ใดได้บ้าง สามารถแสดงรายละเอียดและคุณสมบัติของพอร์ตได้ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดคุณสมบัติของพอร์ต A ของ PIC 16F877 [7]

ขาพอร์ต	บิตที่	บัฟเฟอร์	รายละเอียดการทำงาน
RA0/AN0	0	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ช่องที่ 0
RA1/AN1	1	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ช่องที่ 1
RA2/AN2/V <sub>REF-</sub> /V <sub>REF</sub>	2	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ช่องที่ 2 - อินพุตแรงดันอ้างอิงลบจากวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล - เอาต์พุตแรงดันอ้างอิงของโมดูลแรงดันอ้างอิง
RA3/AN3/V <sub>REF+</sub>	3	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ช่องที่ 3 - อินพุตแรงดันอ้างอิงบวกจากวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล
RA4/T0CKI/C1OUT	4	ST	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - อินพุตสัญญาณนาฬิกาภายนอกของไทม์เมอร์ 0 - เอาต์พุตวงจรเปรียบเทียบแรงดันอนาล็อกช่องที่ 1 (Comparator) หรือเอาต์พุตแบบ Open drain
RA5/SS/AN4/C2OUT	5	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ช่องที่ 4 - ขาอินพุตสัญญาณ Slave select สำหรับการสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส - เอาต์พุตวงจรเปรียบเทียบแรงดันอนาล็อกช่องที่ 2

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดคุณสมบัติของพอร์ต B [7]

ขาพอร์ต	บิตที่	บัฟเฟอร์	รายละเอียดการทำงาน
RB0/INT	0	TTL/ST <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณอินเทอร์รัプトจากภายนอก
RB1	1	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล
RB2	2	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล
RB3/PGM <sup>(3)</sup>	3	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - อินพุตรับแรงดันโปรแกรมต่ำ +5v (โหมด LPV) หาก Enable ไว้
RB4	4	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินเทอร์รัプトเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลอจิกหาก Enable ไว้
RB5	5	TTL	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินเทอร์รัプトเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลอจิกหาก Enable ไว้
RB6/PGC	6	TTL/ST <sup>(2)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินเทอร์รัプトเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลอจิกหาก Enable ไว้ - ขาสัญญาณนาฬิกาของการดีบักในวงจร (ICD)
RB7/PGD	7	TTL/ST <sup>(2)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินเทอร์รัプトเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลอจิกหาก Enable ไว้ - ขาสัญญาณนาฬิกาของการดีบักในวงจร (ICD)

ตารางที่ 2.7 รายละเอียดคุณสมบัติของพอร์ต C [7]

ขาพอร์ต	บิตที่	บัฟเฟอร์	รายละเอียดการทำงาน
RC0/T1OSO/T1CKI	0	ST	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตเอาต์พุตจากออสซิลเลเตอร์ของไมโครเมอร์ 1 - ขาพอร์ตอินพุตสัญญาณนาฬิกาของไมโครเมอร์ 1
RC1/T1OSI/CCP2	1	ST	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตเอาต์พุตจากออสซิลเลเตอร์ของไมโครเมอร์ 1 - ขาพอร์ตอินพุตวงจรถับสัญญาณ/วงจรถับเอาต์พุตเปรียบเทียบ/วงจรถับเอาต์พุต Pulse-Width Modulation (PWM) โมดูล CCP2
RC2/CCP1	2	ST	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตวงจรถับสัญญาณ/วงจรถับเอาต์พุตเปรียบเทียบ/วงจรถับเอาต์พุต PWM โมดูล CCP2
RC3/SCK/SCL	3	ST	-ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล -ขาพอร์ตสัญญาณนาฬิกาของวงจรถับ SPI และบัส I <sup>2</sup> C
RC4/SDI/SDA	4	ST	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตของวงจรถับ Serial Peripheral Interface (SPI) และข้อมูลของบัส I <sup>2</sup> C
RC5/SDO	5	ST	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตเอาต์พุตของวงจรถับ SPI
RC6/TX/CK	6	ST	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตเอาต์พุตการสื่อสารอนุกรมของวงจรถับข้อมูลแบบอะซิงโครนัส (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter : USART) - ขาสัญญาณนาฬิกาแบบอะซิงโครนัส
RC7/RX/DT	7	ST	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตเอาต์พุตการสื่อสารอนุกรมของวงจรถับ USART

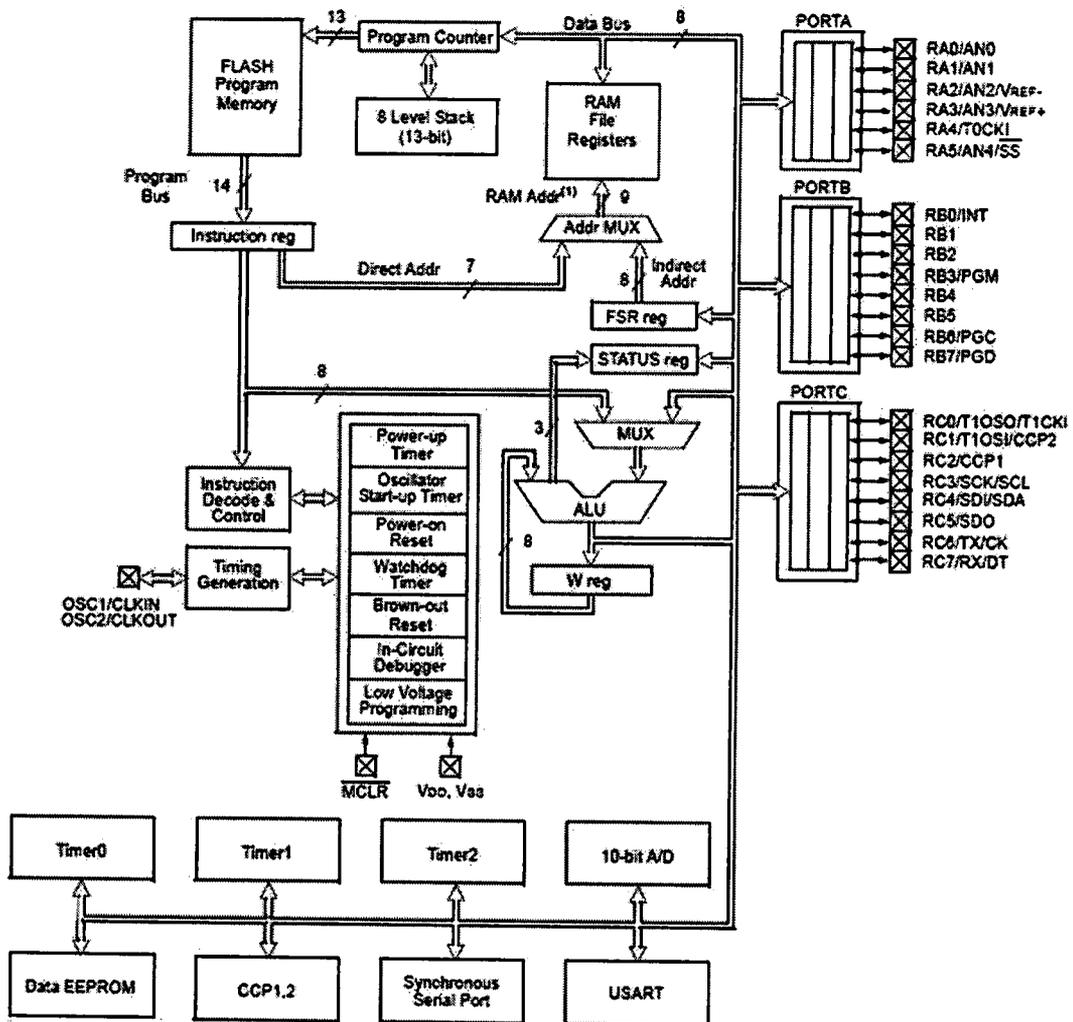
ตารางที่ 2.8 รายละเอียดคุณสมบัติของพอร์ต D [7]

ขาพอร์ต	บิตที่	บัฟเฟอร์	รายละเอียดการทำงาน
RD0/PSP0	0	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตแบบขนานบิต 0
RD1/PSP1	1	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตแบบขนานบิต 1
RD2/PSP2	2	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตแบบขนานบิต 2
RD3/PSP3	3	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตแบบขนานบิต 3
RD4/PSP4	4	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตแบบขนานบิต 4
RD5/PSP5	5	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตแบบขนานบิต 5
RD6/PSP6	6	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตแบบขนานบิต 6
RD7/PSP7	7	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตแบบขนานบิต 7

ตารางที่ 2.9 รายละเอียดคุณสมบัติของพอร์ต E [7]

ขาพอร์ต	บิตที่	บัฟเฟอร์	รายละเอียดการทำงาน
RE0/RD/AN5	0	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตควบคุมการอ่านในโหมดส่วนขยายแบบขนาน - ขาพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลช่องที่ 5
RE1/WR/AN6	1	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตควบคุมการอ่านในโหมดส่วนขยายแบบขนาน - ขาพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลช่องที่ 6
RE2/CS/AN7	2	ST/TTL <sup>(1)</sup>	- ขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตดิจิตอล - ขาพอร์ตอินพุตเลือกอุปกรณ์ในโหมดส่วนขยายแบบขนาน - ขาพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลช่องที่ 6

ส่วนของสถาปัตยกรรมภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877 สามารถแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สถาปัตยกรรมภายในของ PIC 16F877 [6]

การจัดการหน่วยความจำของ PIC 16F877 ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ หน่วยความจำโปรแกรม, หน่วยความจำข้อมูล และหน่วยความจำของ EEPROM อธิบายในแต่ละส่วนได้ดังนี้

1) หน่วยความจำโปรแกรม มีโครงสร้างเป็นหน่วยความจำแบบแฟลช (Flash) มีขนาด 8 กิโลเวิร์ด โดยใน 1 เวิร์ด (Word) ของ PIC 16F877 มีขนาด 14 บิต (Bit) มีโปรแกรมนับ (Program counter) ขนาด 13 บิต ที่สามารถอ้างตำแหน่งความจำได้ 8000 x 14 ตำแหน่ง โดยมีตำแหน่ง Reset vector ที่ 0000h และ Interrupt vector ที่ 0004h

2) หน่วยความจำข้อมูลหน่วยความจำข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 4 Bank ซึ่งเป็นที่อยู่ของ General purpose register และรีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ (Special Function Register: SFR) ซึ่งสามารถเปลี่ยน Bank ได้โดยการเลือกบิต PR0 และ PR1 ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การเซตบิต PR1 และ PR0 เลือก Bank

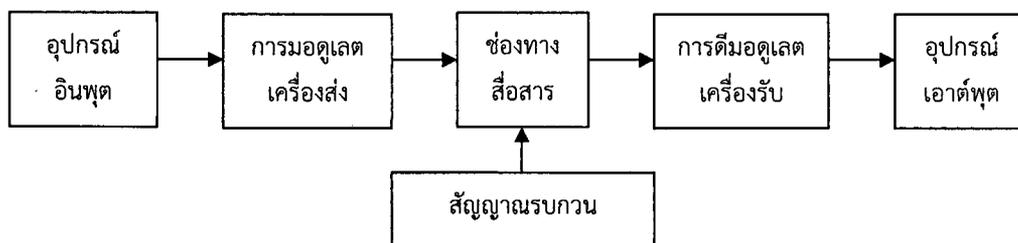
PR1	PR0	สถานะ
0	0	Bank0
0	1	Bank1
1	0	Bank2
1	1	Bank3

แต่ละ Bank มีถึง 128 Bytes แต่ส่วนต้นของแต่ละ Bank จะเป็นที่อยู่ของ Special function file มีขนาด 8 บิต มี 32 ตัว ที่ถูกกำหนดหน้าที่และตำแหน่งไว้แล้ว และอีก 96 ตัว จะได้รับการกำหนดให้ใช้งานอย่างอิสระ

3) หน่วยความจำที่เป็น EEPROM สามารถเก็บข้อมูลได้ 256 ตำแหน่ง (0x00 – 0xFF) การติดต่อโดยอ้อมผ่าน SFR 6 ตัวคือ EEDATA, EEDATH, EEADR, EEADRH, EECON1 และ EECON2

#### 2.5 เครื่องรับ – ส่งสัญญาณภาพไร้สาย (Antenna Video Wireless: AV Wireless)

ยานสำรวจใต้น้ำใช้การรับ – ส่งข้อมูลภาพแบบไร้สาย จึงต้องใช้เครื่องรับ – ส่งสัญญาณภาพไร้สาย ซึ่งในปัจจุบันนี้ มีให้เลือกใช้งานอยู่ 2 ความถี่ ได้แก่ 1.2 Giga Hertz (GHz) และ 2.4 GHz มีข้อแตกต่างกันอยู่ที่ระยะการการรับ – ส่งสัญญาณภาพ คือเครื่องรับ – ส่งสัญญาณภาพไร้สายที่ความถี่ 1.2 GHz จะสามารถรับ – ส่งได้ไกลถึงประมาณ 1 กิโลเมตร แต่เครื่องรับ – ส่งสัญญาณภาพไร้สายที่ความถี่ 2.4 GHz จะสามารถรับ – ส่งได้ไกลเพียง 100 เมตรเท่านั้น แต่ราคาก็จะถูกกว่าหลายเท่า หลักการทำงานใช้ระบบสื่อสารทั่วไป แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ระบบสื่อสารพื้นฐาน [11]

ระบบสื่อสารโดยพื้นฐานประกอบด้วย อุปกรณ์อินพุต (Input device) เครื่องส่ง ช่องทางการสื่อสาร (Communication channel) หรือมักจะมีสัญญาณรบกวนมารบกวนเครื่องรับและอุปกรณ์เอาต์พุต (Output device) ซึ่งอธิบายส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

### 2.5.1 อุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต

ความจริงอุปกรณ์อินพุตก็คือ อุปกรณ์ที่แปลงข่าวสารเป็นสัญญาณไฟฟ้า ส่วนอุปกรณ์เอาต์พุตก็คืออุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากลับมาเป็นข่าวสารนั่นเอง มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปแล้วแต่การใช้งาน เช่น กล้องการต่อกล้องวงจรปิด อุปกรณ์อินพุตก็เป็นกล้องวงจรปิด และอุปกรณ์เอาต์พุตอาจเป็นหลอดภาพโทรทัศน์ สำหรับกล้องวิดีโอทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงจากภาพไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่วนหลอดภาพโทรทัศน์แสดงผลทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากลับคืนเป็นพลังงานแสง โดยข่าวสารที่รับหรือส่งระหว่างกันแบ่งออกเป็น 3 พวกใหญ่ๆ คือ

1) เสียง (Audio) ได้แก่ เสียงพูดในระบบโทรศัพท์ เสียงพูด หรือเสียง ดนตรี ซึ่งต้องการคุณภาพเสียงดีในระบบวิทยุกระจายเสียง

2) ภาพ (Picture) ได้แก่ ภาพนิ่งในระบบโทรสาร (Facsimile) และระบบส่งภาพระยะไกล (Telephoto) ภาพยนตร์ในระบบโทรทัศน์

3) ข้อมูล (Data) ส่วนใหญ่ทำการส่งมาเป็นรหัสให้แก่เครื่องยนต์ เครื่องจักร เครื่องคอมพิวเตอร์ ฯลฯ

### 2.5.2 เครื่องส่ง

ทำหน้าที่รับสัญญาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์อินพุต แล้วทำการมอดูเลต (Modulate) ลงบนคลื่นพาหะความถี่สูง เครื่องส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง กับมอดูเลต เครื่องส่งส่วนใหญ่มักมีภาพขยายอีกเพื่อให้สัญญาณที่ส่งออกอากาศมีกำลังแรงทำให้สื่อสารกันได้ไกลขึ้น

### 2.5.3 ช่องทางสื่อสาร

ช่องทางสื่อสารในที่นี้ ได้แก่ บรรยากาศ อวกาศว่าง (Free space) หรือสาย ฯลฯ โดยช่องทางสื่อสารของระบบวิทยุอาศัยการแผ่คลื่นวิทยุออกไป โดยผ่านบรรยากาศซึ่งเป็นตัวกลาง (Medium) ซึ่งคลื่นเดินทางจากเครื่องส่งผ่านไปยังเครื่องรับ

### 2.5.4 ความถี่และความยาวคลื่น

เรานิยมแบ่งคลื่นวิทยุออกเป็นย่านความถี่ต่างๆ โดยมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz: Hz) ในประวัติศาสตร์การวิทยุ ได้แบ่งคลื่นวิทยุตามความยาวคลื่น (Wavelength) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความยาวคลื่นเป็นไปตามสูตร

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2.15)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

$v$  คือ ความเร็วของคลื่นวิทยุในอากาศ เท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

$f$  คือ ความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์

ตารางที่ 2.11 ย่านความถี่ ความถี่ และความยาวคลื่น [11]

ย่านความถี่	ความถี่	ความยาวคลื่น
Very low frequency (VLF)	ต่ำกว่า 30 kHz	ยาวกว่า 10 km
Low frequency (LF)	30 – 300 kHz	10 – 1 km
Medium Frequency (MF)	300 – 3000 kHz	1000 – 100 m
High frequency (HF)	3 – 30 MHz	100 – 10 m
Very high frequency (VHF)	30 – 300 MHz	10 – 1 m
Ultra high frequency (UHF)	300 – 3000 MHz	100 – 10 cm
Super high frequency (SHF)	3 – 30 GHz	10 – 1 cm
Extremely high frequency (EHF)	30 – 300 GHz	10 – 1 mm

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานความถี่ในกิจการสื่อสารต่างๆ [11]

ย่านความถี่	ตัวอย่างการใช้งานในกิจการสื่อสาร
VLF	โทรเลข โซนาร์
LF	วิทยุนำร่อง โทรเลข โทรพิมพ์
MF	วิทยุกระจายเสียง การสื่อสารระยะปานกลาง
HF	การสื่อสารระยะไกล วิทยุกระจายเสียง
VHF	วิทยุกระจายเสียง การแพร่ภาพโทรทัศน์ การสื่อสารระยะใกล้
UHF	การสื่อสารการบิน การสื่อสารระยะใกล้
SHF	เรดาร์ การสื่อสารไมโครเวฟ ดาวเทียม
EHF	การสื่อสารทางแสง

### 2.5.5 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวน เป็นสัญญาณที่เข้ามาแทรกแซงหรือรบกวน (Interfere) สัญญาณรบกวนที่ได้รับเข้ามาแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทคือ

1) สัญญาณรบกวนบรรยากาศ (Atmospheric noise) เกิดขึ้นจากความแปรปรวนของบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก เช่น พายุฟ้าผ่า ก่อให้เกิดคลื่นวิทยุแผ่กระจายไปรอบโลก สัญญาณรบกวนบรรยากาศเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาแม้จะไม่มีพายุฝนฟ้าคะนองก็ตาม

2) สัญญาณรบกวนจากอวกาศ (Space noise) เกิดจากดวงอาทิตย์และดวงดาวนับล้านๆ ดวงในจักรวาล ดวงอาทิตย์เป็นวัตถุที่มีขนาดมหึมาและมีความร้อนสูงถึง 6,000 องศาเซลเซียสที่ผิวดวงอาทิตย์ ฉะนั้นดวงอาทิตย์จะแผ่พลังงานออกมามีสเปกตรัมความถี่ที่กว้างมาก พลังงานนี้ปรากฏออกมาเป็น

สัญญาณรบกวนคงที่ อย่างไรก็ตาม ที่ผิวดวงอาทิตย์ยังมีความแปรปรวนอื่นๆ อีก เช่น จุดบนดวงอาทิตย์ (Sun spot) การลุกโชติช่วง (Solar flare) ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้ดวงอาทิตย์บางดวงที่ไกลออกไปจากระบบสุริยะจักรวาลก็มีคุณสมบัติเหมือนดวงอาทิตย์ คือ มีความร้อนสูงและสามารถกำเนิดสัญญาณรบกวนมายังโลกได้

3) สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสิ่งประดิษฐ์ที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man - made noise) ได้แก่ สัญญาณรบกวนจากมอเตอร์ไฟฟ้า เช่น พัดลมที่เป่าผม เครื่องดูดฝุ่น นอกจากนี้ก็ยังมีสัญญาณรบกวนจากระบบจุดระเบิดของรถยนต์ การรื้อของสายไฟแรงสูง หลอดไฟลูออเรสเซนต์ ฯลฯ

4) สัญญาณรบกวนภายในตัวอุปกรณ์เครื่องรับ (Internal noise) แยกเป็น 2 ประเภทคือ สัญญาณรบกวนอุณหภูมิตัว (Thermal noise) และสัญญาณรบกวนช็อต (Shot noise) โดยสัญญาณรบกวนอุณหภูมิตัวเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron) ในตัวอุปกรณ์ ซึ่งในบางครั้งเรียกว่า Johnson noise ส่วนสัญญาณรบกวนช็อต เกิดขึ้นในอุปกรณ์แอคทีฟ (Active device) ทุกชนิด เนื่องจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล (Hole)

#### 2.5.6 เครื่องรับ

เมื่อรับสัญญาณจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ สัญญาณจะมีกำลังอ่อนลง อีกทั้งยังมีสัญญาณรบกวนเข้ามาแทรกแซงสัญญาณที่ต้องการรับอีกด้วย ดังนั้นการรับสัญญาณอ่อนๆ เช่นนี้ เครื่องรับจึงต้องมีความสามารถพิเศษในการเลือกรับและขยายเอาเฉพาะสัญญาณความถี่ที่ต้องการ พร้อมทั้งต้องมีกรรมวิธีในการกำจัดสัญญาณรบกวน สัญญาณที่รับเข้ามาได้จะผ่านการตีมอดูเลต (Demodulate) เพื่อแปลงสัญญาณข่าวสารที่เข้ามาอดูเลตกลับมา ซึ่งในกรรมวิธีนี้ค่อนข้างซับซ้อนพอสมควร

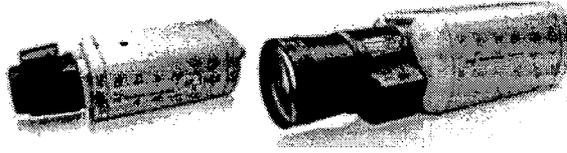
### 2.6 กล้องโทรทัศน์วงจรปิด

กล้องโทรทัศน์วงจรปิด (Close Circuit Television: CCTV) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณภาพ ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า กล้องโทรทัศน์วงจรปิด มีทั้งแบบขาว/ดำ (Monochrome) และสี (Color) ความสามารถในการทำงาน หรือ การใช้งานจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความต้องการของงานตามแต่วัตถุประสงค์ในการเลือกใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.6.1 ชนิดของกล้องโทรทัศน์วงจรปิด

ในปัจจุบันชนิดของกล้องโทรทัศน์วงจรปิดมีอยู่หลายแบบ ซึ่งในการเลือกใช้ในแต่ละแบบก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของผู้ใช้ ซึ่งสามารถแบ่งชนิดได้ดังต่อไปนี้

- 1) กล้องโทรทัศน์วงจรปิดแบบกระบอก (Regular camera) กล้องวงจรปิดชนิดนี้นั้นจะมีข้อดีในส่วนที่สามารถเปลี่ยนในส่วนของเลนส์ (Lens) ได้ ซึ่งเลนส์นั้นจะมีหลากหลายขนาดให้เลือกขึ้นอยู่กับความต้องการและระยะที่ต้องการเช่น 4, 6, 8, 12, 16 mm แสดงกล้องโทรทัศน์วงจรปิดแบบกระบอกดังรูปที่ 2.16



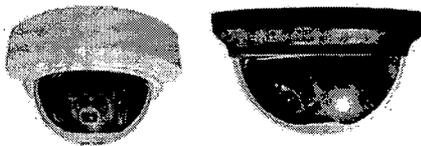
รูปที่ 2.16 กล้องโทรทัศน์วงจรปิดแบบกระบอก [12]

- 2) กล้องโทรทัศน์วงจรปิดแบบอินฟราเรด (Infrared camera) กล้องวงจรปิดชนิดอินฟราเรดนั้น จะมีความสามารถที่โดดเด่นนั้นก็คือสามารถที่จะมองเห็นในที่ที่มีแสงน้อยๆ ได้ หรือที่มีด นั้นเอง ส่วนตอนกลางวันภาพที่เห็นก็จะเป็นปกติเหมือนกล้องวงจรปิดทั่วไปหากต้องการให้ มองเห็นในที่มืดได้ดีๆ ต้องดูที่ตัวกล้องว่ามีหลอด Light Emitting Diode (LED) เท่าไหร่ ยิ่ง มากยิ่งดี แสดงกล้องโทรทัศน์วงจรปิดแบบอินฟราเรดดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กล้องโทรทัศน์วงจรปิดแบบอินฟราเรด [12]

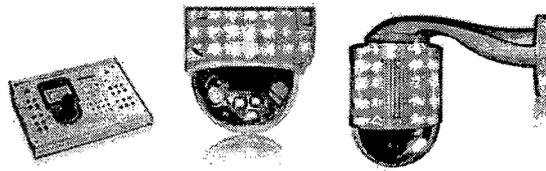
- 3) กล้องโทรทัศน์วงจรปิดแบบโดม (Dome camera) กล้องวงจรปิดประเภทโดมนี้เป็นกล้อง วงจรปิดที่เหมาะสมและง่ายในการติดตั้งภายในซึ่งเพดานอาจจะเป็นแบบฝ้าเปิด จะทำให้กล้อง ออกมาดูสวยงามมากเพราะว่าจะไม่มีส่วนใดออกมาให้เห็นเลยนอกจากตัวกล้อง แนะนำให้ ติดในสำนักงานต่างๆ หรือในบ้านที่มีเพดานเป็นฝ้าเปิด แสดงกล้องวงจรปิดแบบโดมดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กล้องโทรทัศน์วงจรปิดแบบโดม [12]

- 4) กล้องวงจรปิดแบบอัจฉริยะ (Speed dome) กล้องวงจรปิดแบบอัจฉริยะนี้นั้นความสามารถ พิเศษของมันที่สำคัญก็คือ ตัวกล้องนั้นสามารถที่จะควบคุมได้ด้วยตัว Control สามารถนั่ง

อยู่ที่ห้อง Monitor แล้วปรับเพื่อที่จะจับภาพได้ว่าต้องการให้หมุนไปจับภาพในมุมไหนส่วน กล้องชนิดอื่นนั้น ไม่สามารถทำได้ แล้วใน Function ส่วนนี้เองที่ทำให้ราคาของกล้องวงจร ปิดชนิดนี้แพงกว่าแบบอื่นๆ แสดงภาพกล้องวงจรปิดแบบอัจฉริยะดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กล้องโทรทัศน์วงจรปิดอัจฉริยะ [12]

### 2.6.2 ชนิดของเลนส์

- 1) FIX IRIS IRIS ของเลนส์จะไม่สามารถปรับได้ ทำให้จะต้องใช้ในสถานที่ภายในอาคาร ที่มีแสงสว่างคงที่ตลอดเวลา
- 2) MANUAL IRIS IRIS ของเลนส์จะสามารถปรับได้ด้วยช่างเทคนิคที่ติดตั้งกล้อง เหมาะ สำหรับงานในอาคารที่มีความสว่างในแต่ละห้องไม่เท่ากัน สามารถปรับแสงให้เหมาะสมในแต่ละห้องได้
- 3) AUTO IRIS เป็นเลนส์ที่ IRIS จะปรับขนาดการรับแสงเอง โดยอัตโนมัติขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ตกกระทบเลนส์ เหมาะสำหรับติดตั้งนอกอาคารที่ความสว่าง เปลี่ยนตามแสงอาทิตย์

### 2.6.3 ความละเอียดของภาพ (Resolution)

ภาพจากกล้องวงจรปิดจะมีความชัดเจนมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับแผ่นรับภาพ Charge Coupled Device (CCD) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

- 1) Normal resolution มีความละเอียดของภาพปกติประมาณ 330 – 380 เส้น
- 2) High resolution มีความละเอียดของภาพสูงประมาณ 400 – 550 เส้น

### 2.6.4 ความไวแสง (Sensitivity)

ความไวแสง หมายถึง ปริมาณแสงน้อยที่สุด ที่จะสามารถมองเห็นภาพได้ กล้อง โทรทัศน์ วงจรปิด จะสามารถรับภาพได้ จะต้องมีส่วนส่งไปที่วัตถุและสะท้อนออกมาจากวัตถุนั้น กล้องแต่ละรุ่น แต่ละผู้ผลิต จะมีความไวแสงแตกต่างกันไป ในการเปรียบเทียบความไวของกล้องแต่ละกล้อง ควรจะ เปรียบเทียบที่มาตรฐานเดียวกัน

### 2.6.5 ความสว่าง (Illumination)

คุณสมบัติของอุปกรณ์รับภาพของ กล้อง โทรทัศน์ วงจรปิด (CCTV) นั้น ไม่ใช่มีผลเฉพาะต่อ ความไวที่มีต่อแสงสว่างเท่านั้น แต่ยังมีผลต่อสีของวัตถุอีกด้วย คุณภาพ ของภาพที่ดีจะขึ้น อยู่กับความเข้ม ของแสงที่ฉากรับภาพ ในกรณีของ กล้อง โทรทัศน์ วงจรปิด (CCTV) ที่ เป็น กล้องสี ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิสี ( Colour Temperature) ที่ได้จากแสงสว่างร่วมกันกับแหล่งกำเนิดแสง ทั่ว ๆ ไป เพราะประกอบด้วยแสง สีชนิดต่าง ๆ รวมกัน และแสงบริเวณรอบ ๆ กล้องที่จับภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้แสงไม่

คงที่ตลอดเวลาการกำหนดค่าความสว่างของ กล้อง โทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) มีหน่วยเป็นลักซ์ :Lux นั้น ต้องคำนึงถึงความสว่างของพื้นที่กล้องจับภาพ, การสะท้อนของแสงที่ฉากรับภาพ, ระยะห่างของวัตถุจาก รับภาพถึงตัวกล้อง โทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) ซึ่งทำให้อัตราการสูญเสียของแสงที่หายไปรวมถึงการเลือกใช้ ชนิดของเลนส์เป็น องค์ประกอบการพิจารณาด้วย

#### 2.6.6 ระบบซิงค์ (Synchronization)

โดยทั่วไป กล้อง โทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) จะมีวงจรกำเนิด ซิงค์ในตัวของมันเองอยู่แล้ว ซิงค์ของกล้องแต่ละตัวจะไม่ตรงกัน หากเรานำกล้องหลาย ๆ ตัว มาใช้ร่วมกันโดยผ่าน เครื่องลำดับภาพ (Sequence Switcher) และแสดงภาพบนจอมอนิเตอร์ จะสังเกตเห็นได้ว่าในขณะที่เครื่องลำดับภาพสลับ ภาพจาก กล้อง โทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) ตัว หนึ่งไปยังอีก กล้องโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) ตัวหนึ่งนั้น ภาพจะกระตุกในแนวตั้งบนจอมอนิเตอร์ ซึ่งจะมีผลต่อการบันทึกภาพวิดีโอ เมื่อนำภาพวิดีโอขึ้นมาเล่นสลับ ทำให้ภาพล้าเป็นช่วง ๆ ตามจังหวะ การสลับภาพของเครื่องลำดับภาพ

### 2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

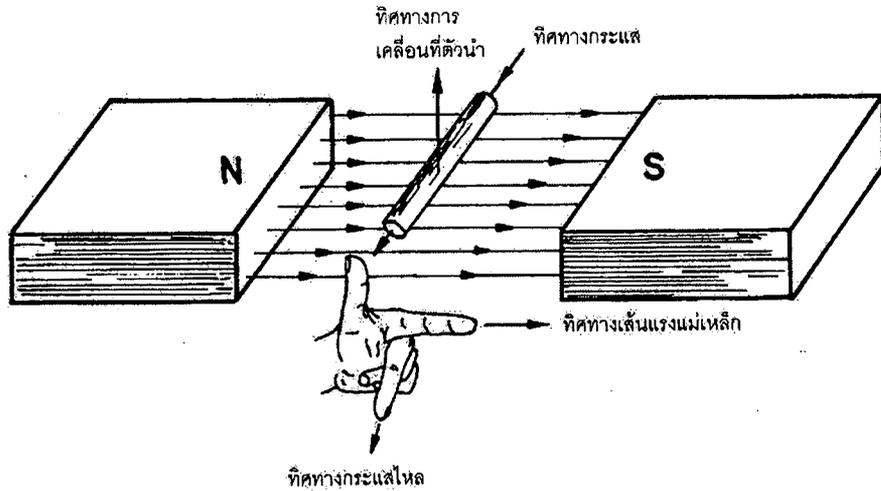
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีส่วนประกอบสำคัญๆที่เหมือนกันซึ่งดูจาก ภายนอกแล้วจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการส่วนที่แตกต่างก็คือลักษณะการใช้งานเท่านั้น เครื่องกำเนิด ไฟฟ้ากระแสตรงได้รับพลังงานกลจากภายนอกมาขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนตัดกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจาก ขดลวดฟิล์มคอยล์ในเครื่องกำเนิดนั้น ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้รับพลังงานจากภายนอกทำให้เกิด สนามแม่เหล็กขึ้นในมอเตอร์นั้นไปขับเคลื่อนตัวนำในอาร์เมเจอร์หมุน ดังนั้นเพลลาของมอเตอร์ก็จะหมุน ซึ่ง จะได้พลังงานกลออกไปใช้งาน

#### 2.7.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในอดีตมีนักวิทยาศาสตร์ 2 ท่าน คือ นายไฮนริช เลนซ์ ชาวเยอรมัน และ เซอร์จอห์น อัมโบ รส เฟลมมิง ชาวอังกฤษ ได้ทดลองและพบหลักการการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ

เมื่อมีลวดตัวนำหมุนตัดกับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในลวดตัวนำ นั้นและทิศทางการไหลของกระแสในลวดตัวนำจะไหลในทิศทางที่ต้านการหมุนของขดลวดตัวนำนั้น ซึ่งกฎ ในเรื่องทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้านี้เรียกว่า กฎของเลนซ์

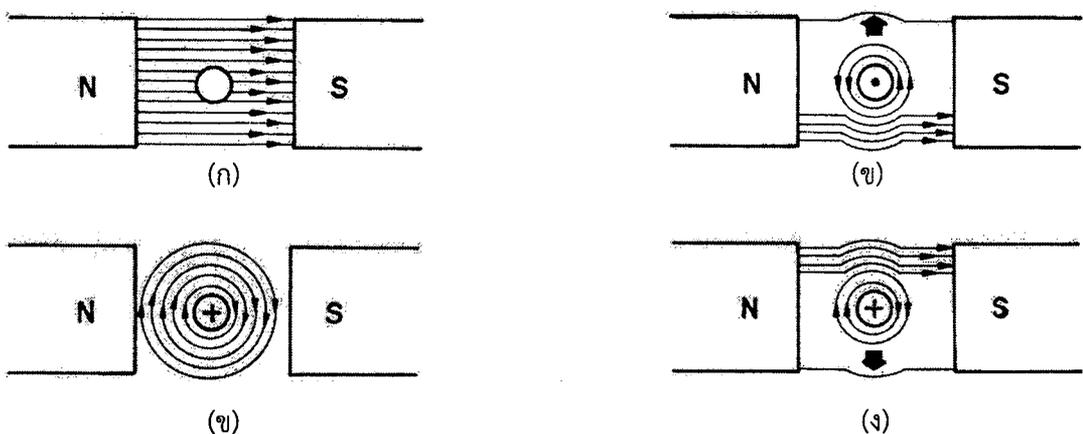
เซอร์เฟลมมิงได้ค้นพบวิธีพิจารณาว่าการหมุนของมอเตอร์จะหมุนไปทางใดนั้น ถ้าทราบทิศ ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ก็จะพบความสัมพันธ์ดังนี้คือ ถ้าทราบทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ทิศ ทิศทางการไหลของกระแสในตัวนำ จะทำให้ทราบทิศทางของการหมุนของขดลวดตัวนำได้ การค้นพบนี้ เรียกว่ากฎมือซ้ายของเฟลมมิง ความสัมพันธ์สามารถทำได้โดยการใช้มือซ้าย กางนิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ และ นิ้วกลางให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ให้นิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางเคลื่อนที่ของตัวนำ นิ้วชี้ชี้ทิศทางของเส้นแรง แม่เหล็กและนิ้วกลางชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กฎมือซ้ายของแฟลมมิง [13]

ถ้าลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบๆลวดตัวนำนั้น ดังนั้น ถ้าลวดตัวนำนี้วางอยู่ในสนามแม่เหล็กอื่น สนามแม่เหล็กทั้งสองจะทำปฏิกิริยากันทันที โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กนั้นจะไม่ตัดกัน ดังนั้นจึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กนั้นเกิดการผลักกันเป็นเหตุให้ที่ด้านหนึ่งจะมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมาก ส่วนอีกด้านหนึ่งเส้นแรงแม่เหล็กหนีห่างออกไปจากกัน ผลก็คือจะมีสนามแม่เหล็กหนาแน่นมากที่ด้านหนึ่งและจะมีความหนาแน่นน้อยอีกด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ค) และ 2.28 (ง)

เส้นแรงแม่เหล็กที่มีความพยายามที่จะผลักตนเองออกห่างจากเส้นแรงแม่เหล็กอื่นเสมอ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจากตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ก) และ 2.28 (ข) นี้จะพยายามผลักเส้นแรงแม่เหล็กเส้นอื่นให้หนีห่างออกไป จะทำให้ผลลวดตัวนำเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน และถ้ากระแสที่ไหลในตัวนำเปลี่ยนทิศทางจากเดิมคือกระแสไหลออกดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ค) และเปลี่ยนเป็นกระแสไหลเข้าดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ง) เส้นแรงแม่เหล็กก็จะพยายามผลักตัวนำให้เคลื่อนที่ลงด้านล่าง



รูปที่ 2.20 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กที่ขดลวดตัวนำ [13]

การที่ลวดตัวนำต้องเคลื่อนที่นี้จะต้องเคลื่อนที่ติดกับสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก จึงทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในลวดตัวนำนั้นจำนวนหนึ่ง การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้เป็นไปตามกฎของเลนซ์ โดยทิศทางของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะต้านกับการเคลื่อนที่ที่ทำให้ลวดตัวนำนั้นเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากภายนอกเข้าไปในลวดตัวนำ หรือเมื่อพิจารณาโดยใช้กฎมือขวาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกฎมือซ้ายสำหรับมอเตอร์แล้ว จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในลวดตัวนำจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าต่อต้านหรือแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Counter e.m.f. or back e.m.f.) ใช้สัญลักษณ์ หรือ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์เสมอ

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อการใช้งานจริงในอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์จึงมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ลบด้วยแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ เขียนเป็นสมการได้คือ

$$I_a R_a = V - E_b$$

$$\text{หรือ} \quad E_b = V - I_a R_a \quad (2.16)$$

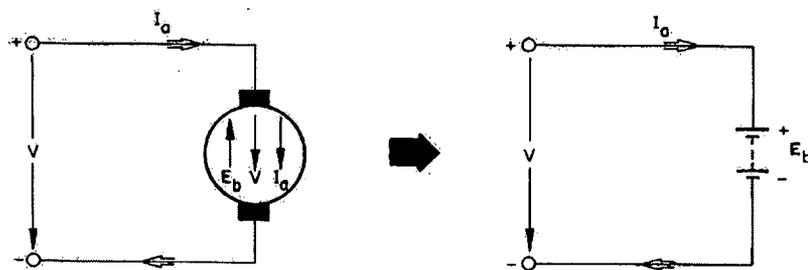
เมื่อ  $E_b$  = แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (V)

$V$  = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (V)

$I_a$  = กระแสที่ไหลในอาร์เมเจอร์ (A)

$R_a$  = ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์

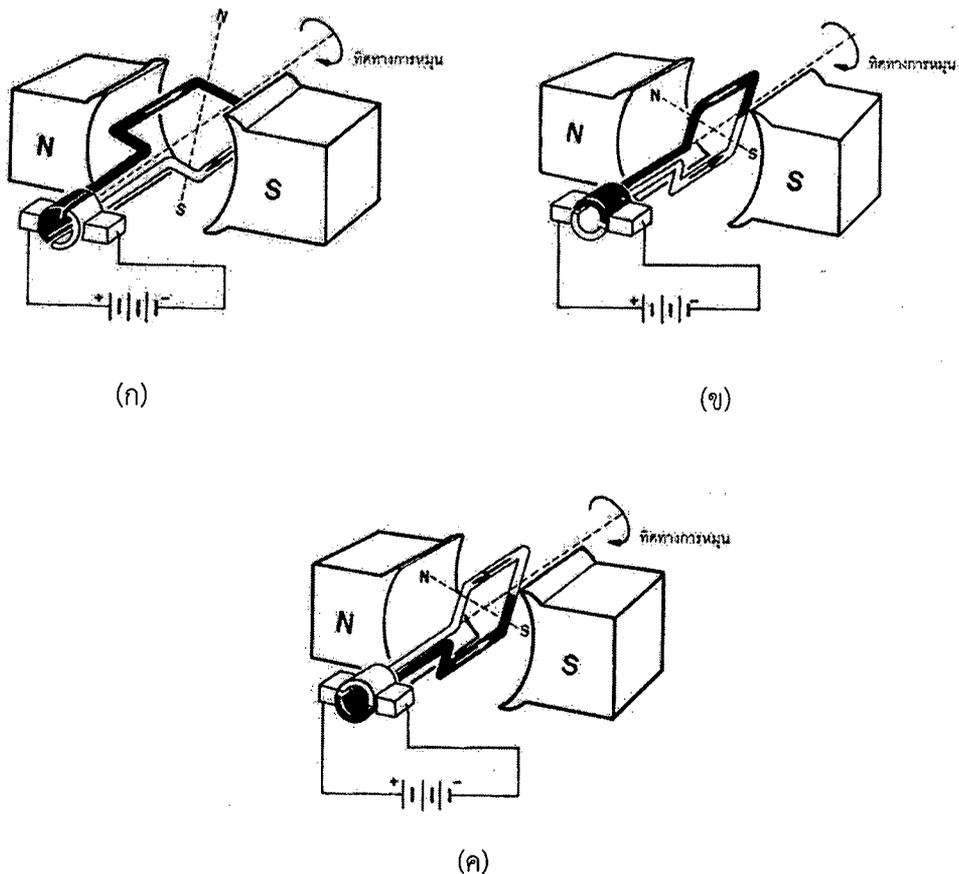
ค่าของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับนี้จะมีค่าไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเปรียบเทียบได้เหมือนกับในอาร์เมเจอร์นั้นมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซ่อนอยู่ และจ่ายไฟออกมาตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 วงจรเทียบเคียงของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ [13]

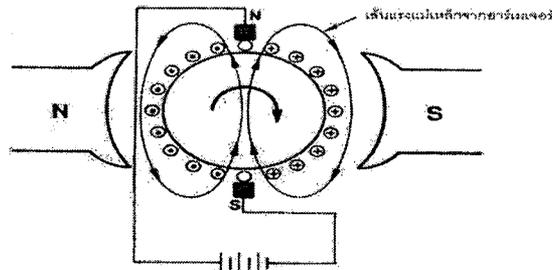
จากรูปที่ 2.22 เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่ายซึ่งประกอบด้วยขดลวดที่วางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กโดยปลายทางของขดลวดทั้งสองข้างต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์ด้านละซี่ ซึ่งจะมีแปรงถ่านต่อไว้

และแปร่งถ່ำนที่ทั้งสองต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอกขดลวดตัวนำนั้นจะต้องหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก เมื่อขดลวดอยู่ ณ ตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก) กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทำให้อำบนของขดลวดเป็นขั้วเหนือและด้านล่างของขดลวดเป็นขั้วใต้ตามกฎมือขวา ขั้วแม่เหล็กของขดลวดจะถูกดูดหรือถูกผลักขึ้นอยู่กับว่าเป็นขั้วเหมือนกันหรือต่างกัน ทำให้ขดลวดหมุนได้ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งเป็นความพยายามที่จะทำให้ขั้วต่างกันเข้ามาหากันและต่อมาเมื่อขดลวดหมุนมาอยู่ที่ 90 องศา คือตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ข) กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะเปลี่ยนทิศทาง (กลับทาง) ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดนั้นกลับขั้ว ดังนั้นขณะนี้จะกลายเป็นขั้วเหมือนกันผลักกันลวดตัวนำก็จะหมุนเลยต่อไปอีก ซึ่งเป็นกรหมุนได้เพราะขั้วเหมือนกันผลักกันแต่ถ้าขดลวดตัวนำหมุนไปครบ 180 องศา คือตำแหน่งที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ค) ปฏิกริยาเช่นเดียวกับขั้วแม่เหล็กที่ 2 จะเกิดขึ้นใหม่อีกครั้ง คือกระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะเปลี่ยนทิศทางขั้วแม่เหล็กที่ขดลวดจะกลายเป็นขั้วต่างกันผลักออกจากกันอีก ผลก็คือมอเตอร์จะหมุนได้ตลอดเวลา ดังนั้นคอมมิวเตเตอร์จึงมีบทบาทกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้กระแสที่ไหลเข้าขดลวดกลับทางได้ทันทีที่ขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันกำลังเผชิญหน้ากัน เมื่อกลับทางไหลก็จะทำให้ขั้วของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์เปลี่ยนให้ผลักจากกันต่อมอเตอร์ก็จะหมุนได้ตลอดเวลา



รูปที่ 2.22 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย [13]

แต่ถ้าอาร์เมเจอร์ที่ใช้ขดลวดหลายชุด แต่ละชุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกันกับขดลวด 1 ชุด ในขณะที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กซึ่งจะมีช่วงแสดงในรูปที่ 2.23 ขั้วเหนือของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์จะดูดเข้าหาขั้วใต้ของขั้วแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กหลัก แรงดึงดูดกันนี้ทำให้มีแรงผลักรวมที่อาร์เมเจอร์ ทำให้หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เกิดแรงบิดที่สม่ำเสมอราบเรียบไม่กระตุกเพราะมีขดลวดหลายๆชุดที่อยู่ติดกันผลัดกันทำงานที่ละชุดตามลำดับการมีขดลวดหลายๆชุดเช่นนี้จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กพัทธ์ที่อาร์เมเจอร์ขึ้นค่าหนึ่ง ซึ่งเปรียบเสมือนว่ามีค่าคงที่ หรือสนามแม่เหล็กที่อาร์เมเจอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่คงที่ในขณะที่อาร์เมเจอร์กำลังหมุนอยู่



รูปที่ 2.23 การเกิดสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ [13]

แรงที่กระทำบนขดลวดตัวนำต่อหนึ่งขดในขณะที่มีกระแสไหลผ่านตัวนำนั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนกระแสที่ไหล ความเข้มของสนามแม่เหล็กและความยาวของตัวนำในส่วนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก (หรือความยาวของส่วนตัวนำที่ใช้งานจริง) แรงที่เกิดขึ้นนี้ใช้สัญลักษณ์  $F$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = BIl \quad (2.17)$$

เมื่อ  $F$  = แรงที่กระทำที่ขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นนิวตัน (Newton, N)

$B$  = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber per square metre, Wb/m<sup>2</sup>) หรือ เทสลา (Tesla, T)

$l$  = ความยาวของตัวนำในส่วนที่ผ่านสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเมตร (Metre, m)

$I$  = กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere, A)

จากสมการจะเห็นว่า ถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ และความยาวของขดลวดตัวนำมีค่าคงที่ แรงผลักรวมหรือแรงที่กระทำก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดตัวนำเพียงอย่างเดียว

แรงบิด (Torque) แรงบิดที่เกิดขึ้นนี้ใช้สัญลักษณ์  $T$  และสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

$$T = Fr \quad (2.18)$$

เมื่อ  $T$  = แรงบิดที่เกิดขึ้นมีหน่วยวัดเป็นนิวตันเมตร (Newton-metre, N-m)

$r$  = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลากับตัวนำมีหน่วยวัดเป็นเมตร (Metre, m)

## 2.7.2 ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีโครงสร้างและส่วนประกอบเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทุกประการ ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานแทนกันได้เป็นอย่างดี การแบ่งชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบ่งออกได้เป็น 4 แบบคือ

- 1) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately – excited DC motor)
- 2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชั๊นท์ (DC shunt motor)
- 3) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีรี่ส์ (DC series motor)
- 4) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบคอมพาวด์ (DC compound motor)

มอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกนั้น ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 2 ชุด เพื่อจ่ายให้ขดลวดฟิลด์ และขดลวดอาเมเจอร์อย่างละชุด จึงไม่นิยมใช้กัน จะใช้งานในงานเฉพาะอย่างเป็นกรณีพิเศษเท่านั้น แต่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชั๊นท์ แบบซีรี่ส์ และแบบคอมพาวด์นั้น เป็นมอเตอร์ที่ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงชุดเดียว จึงนิยมใช้กันมากกว่าแบบแรก

## 2.8 ทฤษฎีแสงสว่างพื้นฐาน

นิยามของแสงเกิดขึ้นมาตั้งแต่เมื่อยังไม่มีการประดิษฐ์คิดค้นหลอดไฟฟ้าขึ้น จึงอ้างอิงแสงจากเทียนไขที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงในสมัยก่อน เกิดเป็นหน่วยของแสงสว่างที่เกี่ยวข้องกับเทียน เช่น แสงเทียน (Candlepower) แคนเดลา (Candela, cd) ฟุตแคนเดิล (Footcandle, fc) และฟุตแลมเบิร์ต (Footlambert, FL)

แสง 1 แคนเดลา มีค่าเท่ากับความเข้มของแสงจากเทียน 1 เล่ม ที่ส่องในความมืด และแสงจากเทียน 1 เล่ม ที่ส่องบนพื้นที่ 1 ตารางฟุตให้สว่างขึ้น ก็คือระดับความสว่าง 1 ฟุตแคนเดิล หน่วยของแสงดังกล่าวใช้กันอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งต่างกับหน่วยของแสงที่ใช้ในยุโรป ที่เป็นระบบ SI รายละเอียดของค่านิยามต่างๆที่เกี่ยวข้องกับแสงสว่างมีดังนี้

### 2.8.1 ปริมาณแสง (Luminous flux, )

คือแสงทั้งหมดที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิดหรือตกลงบนพื้นที่รับแสง หรืออาจเปรียบเทียบได้ว่าเป็นอัตราการไหล (Rate of flow) ของพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงออกมาในรูปของกำลังไฟฟ้า (Power) มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt, W) แต่สำหรับแสงสว่างจะหมายถึง ค่าที่วัดออกมาเป็นปริมาณแสง (Luminous flux) ที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิด มีหน่วยเป็น ลูเมน (Lumen, lm) ตัวอย่างเช่น เทียนทั่วไป ให้แสงประมาณ 12.57 ลูเมน ในขณะที่

- หลอดไส้ 100 วัตต์ ให้ปริมาณแสง 1,360 ลูเมน
- หลอดฟลูออโรสเซนต์ 36 วัตต์ ให้ปริมาณแสง 2,500 ลูเมน
- หลอดโซเดียมความดันต่ำ 400 วัตต์ ให้ปริมาณแสง 48,000 ลูเมน

### 2.8.2 ประสิทธิภาพของแสง (Luminous efficacy, )

หมายถึง อัตราส่วนของปริมาณแสง ( $\phi$ ) ที่ปล่อยออกมาจากพลังงานที่ใช้ (Watt, W) เพื่อให้ได้แสงปริมาณนั้นออกมา มีหน่วยเป็น ลูเมนต่อวัตต์ (lumen/watt, lm/W) หลอดไส้เป็นหลอดที่มีประสิทธิภาพของแสงต่ำเพราะกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดไฟ ส่วนใหญ่เปลี่ยนไปเป็นความร้อน แต่ให้ปริมาณแสงออกมาน้อย ตัวอย่างค่าประสิทธิภาพของแสงจากหลอดไฟได้แก่

- หลอดไส้ 100 วัตต์ มีค่า 13.6 ลูเมน/วัตต์
- หลอดฟลูออโรเรสเซนต์ 36 วัตต์ มีค่า 70 ลูเมน/วัตต์
- หลอดโซเดียมความดันต่ำ 400 วัตต์ มีค่า 120 ลูเมน/วัตต์

โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อการให้แสง ดังสมการ

$$\eta = \phi / W \quad (2.19)$$

เมื่อ  $\eta$  = ประสิทธิภาพของแสง

$\phi$  = อัตราส่วนของปริมาณแสง

$W$  = พลังงานที่ใช้

### 2.8.3 Solid angle ( $\omega$ หรือ $\Omega$ )

เป็นการวัดสัดส่วนของพื้นที่ผิวทรงกลมที่ครอบคลุมด้วยพื้นที่สมมุติรูปทรงกรวย ที่มีส่วนแหลมที่สุดของกรวยอยู่ที่ จุดศูนย์กลางของทรงกลมนั้นๆหรืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวส่วนที่พิจารณาของทรงกลม ( $A$ ) ต่อรัศมีของทรงกลมนั้นๆยกกำลังสอง ( $r^2$ ) มีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (Steradian, sr)

$$\omega = A / r^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\omega$  = Solid angle มีหน่วยเป็นลูเมน ต่อ สเตอเรเดียน (lm/sr) หรือ แคนเดลา (candla, cd)

$A$  = อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของทรงกลม

$r$  = รัศมีของทรงกลม

### 2.8.4 ความเข้มแสง (Luminous Intensity, $I$ )

เป็นค่าที่ใช้บอกความมากน้อยของปริมาณแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ดังนั้นความเข้มของแสง ( $I$ ) หรือที่สมัยก่อนเรียกว่า "แรงเทียน" (Candlepower) ก็คือปริมาณแสง ( $\phi$ ) ในหน่วยลูเมน (lm) จากแหล่งกำเนิดแสงที่วัดได้ใน Solid angle ใดๆ ( $\omega$ ) มีหน่วยเป็นลูเมน ต่อ สเตอเรเดียน (lm/sr) หรือ แคนเดลา (Candla, cd)

$$I = \varphi / \omega \quad (2.21)$$

เมื่อ  $I$  = ความเข้มแสง

$\varphi$  = ปริมาณแสง มีหน่วยเป็นลูเมน (lm)

$\omega$  = Solid angle มีหน่วยเป็นลูเมน ต่อ สเตอเรเดียน (lm/sr) หรือ แคนเดลา (candla, cd)

เราจะเห็นตัวอย่างของค่าความเข้มแสงที่กระจายออกไปในทิศทางต่างๆได้จากกราฟที่เรียกว่า แผนภาพแสดงการกระจายความเข้มแสง (Polar curve หรือ Intensity Distribution Diagram) หรือ กราฟแสดงการกระจายแรงเทียน (Candlepower Distribution Curve)

เมื่อนำแหล่งกำเนิดแสงที่เล็กมากจนถือว่าเป็นเสมือนจุด (Point source) และมีค่าความเข้มแสงสม่ำเสมอทุกทิศทาง เท่ากับ 1 แคนเดลา มาวางไว้ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมรัศมี 1 หน่วย ปริมาณแสงที่พุ่งออกมาและตกกระทบบนทุกๆหนึ่งตารางหน่วยของพื้นที่ทรงกลมนี้ จะมีค่าเท่ากับ 1 ลูเมน พื้นที่ผิวทั้งหมดของทรงกลมรัศมี 1 หน่วย มีค่าเท่ากับ 12.57 ตารางหน่วยพื้นที่ ดังนั้นความเข้มแสง 1 แคนเดลา จะเปล่งแสงออกมาเป็นปริมาณเท่ากับ 12.57 ลูเมน

#### 2.8.5 ความส่องสว่าง (Illuminance, $E$ )

เมื่อมีปริมาณแสง ( $\varphi$ ) ตกกระทบบน 1 หน่วยพื้นที่ใดๆ ( $A$ ) จะได้ความส่องสว่าง ( $E$ ) มีหน่วยเป็นลูเมนต่อหน่วยพื้นที่ (Lumen per unit area) ตัวอย่างของค่าความส่องสว่างโดยทั่วไปได้แก่ เมื่อวัดค่าความส่องสว่างบนระนาบที่ห่างจากเทียนออกมา 1 เมตร จะมีค่าเท่ากับ 1 ลักซ์

- บนโต๊ะทำงานในสำนักงานธรรมดาทั่วไป เท่ากับ 500 ลักซ์
- บนพื้นดินในที่โล่งเมื่อฟ้าหลัว เท่ากับ 10,000 ลักซ์
- บนพื้นดินในที่โล่งเมื่อท้องฟ้าสดใส เท่ากับ 100,000 ลักซ์

โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงและพื้นที่รับแสง ดังสมการ

$$E = \varphi / A \quad (2.22)$$

เมื่อ  $E$  = ความส่องสว่าง มีหน่วยเป็นลูเมนต่อหน่วยพื้นที่

$\varphi$  = ปริมาณแสง มีหน่วยเป็นลูเมน (lm)

$A$  = อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของทรงกลม

หากพิจารณาจากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุด (Point source) ในทรงกลม เมื่อทรงกลมนี้มีรัศมี 1 ฟุต ปริมาณแสง 1 ลูเมน ที่พุ่งไปตกบนพื้นที่หนึ่งตารางฟุตของผิวทรงกลม ปริมาณความส่องสว่างที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 1 ลูเมนต่อตารางฟุต (lm/ft<sup>2</sup>) หรือ 1 ฟุตแคนเดิล (Foot-candle, ft) ในทำนอง

เดียวกันถ้ารัศมีของทรงกลมนั้นมีค่าเท่ากับ 1 เมตร ปริมาณความส่องสว่างที่เกิดขึ้น จะมีค่าเท่ากับ 1 ลูเมน ต่อตารางเมตร ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ) หรือ 1 ลักซ์ (Lux, lx) โดยที่ 1 ฟุตแคนเดิล เท่ากับ 10.76 ลักซ์

ถ้าแหล่งกำเนิดแสงมีขนาดเล็กมากจนถือได้ว่ามีลักษณะเป็นจุด ค่าความส่องสว่างบนพื้นผิวนั้นจะขึ้นอยู่กับ ระยะห่างและมุมของแสงที่ตกกระทบ จึงเกิดเป็นสมการหาค่าความส่องสว่างอีกสมการหนึ่ง

เมื่อพิจารณาความเข้มของการสว่างในทิศทางใดๆ ( $I$ ) จากแหล่งกำเนิดแสง แสงที่เดินทางเป็นระยะทาง ( $d$ ) มาตกลง บนพื้นผิวที่มุมใดๆ ( $\theta$ ) (มุมระหว่างที่แสงตกกระทบ และเส้นตฉากกับพื้นผิวนั้น) จะหาปริมาณความส่องสว่างได้จากสมการ

$$E = I \cos \theta / d^2 \quad (2.23)$$

เมื่อ  $E$  = ปริมาณความส่องสว่างบนพื้นที่ผิวที่พิจารณา มีหน่วยเป็น ลักซ์ (lx) หรือฟุตแคนเดิล (fc)

$I$  = ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนของแหล่งกำเนิดแสง ในทิศทางที่พุ่งไปสู่พื้นผิวที่พิจารณา มีหน่วยเป็น แคนเดลา (cd)

$d$  = ระยะทางระหว่างพื้นที่ผิวที่พิจารณากับแหล่งกำเนิดแสง มีหน่วยเป็น เมตร (m) หรือ ฟุต (ft)

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า “กฎกำลังสองผกผัน” (inverse square law) และ “กฎของแลมเบิร์ต” (Lambert’s law) กฎกำลังสองผกผันกล่าวว่า “ค่าความส่องสว่าง ( $E$ ) จะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและพื้นที่รับแสง” ส่วน กฎของแลมเบิร์ตกล่าวว่า “ปริมาณแสงที่ตกลงบนพื้นผิวของวัตถุจะแปรผันตามค่า  $\cos$  ของมุมตกกระทบ ( $\theta$ )”

#### 2.8.6 ความสว่าง (Luminance, $L$ )

เมื่อแสงตกกระทบวัตถุแล้วสะท้อนกลับหรือส่องผ่านวัตถุเข้าสู่ตา ทำให้มองเห็นวัตถุนั้นได้ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ความสว่าง” มีหน่วยเป็น แคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) หรือ ฟุตแลมเบิร์ต (Footlambert, FL)

เมื่อวัตถุที่แสงตกกระทบมีพื้นผิวที่ช่วยกระจายแสง (Diffuse) ค่าความสว่างจะแปรผันตรงกับค่าความส่องสว่าง และสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงหรือสัมประสิทธิ์การส่องผ่านของแสง ดังสมการ

$$L = I \rho / A \quad \text{หน่วย } \text{cd}/\text{m}^2 \quad (2.24)$$

$$L = \Gamma / A \quad \text{หน่วย } \text{cd}/\text{m}^2 \quad (2.25)$$

$$L = E (fc) \rho \quad (2.26)$$

$$L = E(fc)\pi \quad \text{หน่วย FL} \quad (2.27)$$

ค่าความสว่างขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง ( $I$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ( $\rho$ ) หรือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $\rho$ ) ของวัตถุ และพื้นที่ของวัตถุที่มองเห็น (area viewed) หรือค่าระดับความส่องสว่างบนวัตถุ ( $E$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ( $\rho$ ) หรือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $\Gamma$ ) ของวัตถุ

$$I = LA \cos \varphi \quad (2.28)$$

เมื่อ  $L$  = ความสว่าง

$A$  = พื้นที่ผิวของวัตถุ

$I$  = ความเข้มของแสง

## 2.9 วงจรขยายสัญญาณ

สัญญาณไฟฟ้าจากตัวเซ็นเซอร์วัดออกซิเจนโดยปกติแล้วมีขนาดแรงดันที่ต่ำมาก คือ ประมาณ 8 มิลลิโวลต์ - 15 มิลลิโวลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณก่อนที่จะนำไปประมวลผลต่อไป วงจรขยายสัญญาณที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณไฟฟ้าจากตัวเซ็นเซอร์วัดออกซิเจนควรมีคุณสมบัติดังนี้

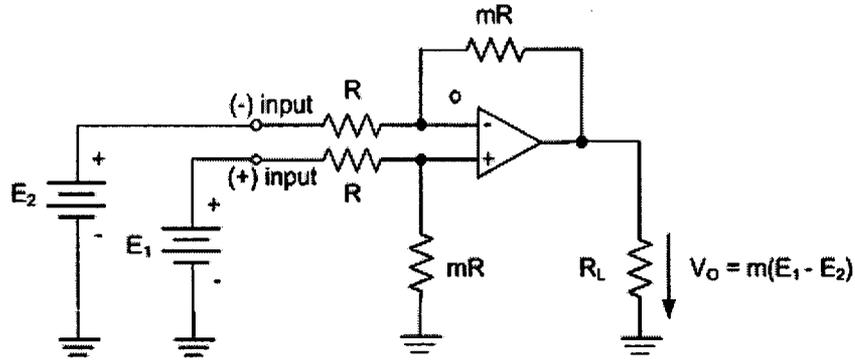
1) มีกำลังขยายสูง เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าจากตัวเซ็นเซอร์มีขนาดน้อยมากดังนั้นวงจรขยายจึงต้องมีกำลังขยายที่สูงๆ

2) มี Common Mode Rejection Ratio (CMRR) สูง CMRR เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน หาได้จากอัตราส่วนของกำลังขยายเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันเข้าที่ขั้วสัญญาณทั้งสองของแอมพลิไฟเออร์ต่อกำลังขยายเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่เหมือนกันที่ขั้วทั้งสอง ในส่วนของวงจรขยายจะจัดวงจรในลักษณะของวงจรขยายความแตกต่าง (Difference Amplifier) หลักการลดสัญญาณรบกวนด้วยการใช้วงจรขยายความแตกต่างนี้คือ จะไม่ขยายสัญญาณที่มีศักย์ไฟฟ้าที่เหมือนกันในทางตรงกันข้ามจะขยายสัญญาณที่มีศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

วงจรขยายอินสตรูเมนต์เช่นหรืออาจเรียกย่อๆ ว่าวงจร IA นั้นเป็นวงจรทำหน้าที่ขยายสัญญาณผลต่างของสัญญาณอินพุตทั้งสองของวงจร ซึ่งพัฒนามาจากหลักการของวงจรขยายสัญญาณผลต่างพื้นฐาน (difference Amplifier) ข้อดีของวงจรอินสตรูเมนต์เช่นคือ มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูง อัตราขยายสัญญาณของวงจรและมีความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน (Common Mode Rejection Ration : CMRR) สูงมาก ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของวงจรอินสตรูเมนต์เช่นจะให้ผลใกล้เคียงกับวงจรขยายสัญญาณผลต่างในทางอุดมคติมากที่สุดวงจรหนึ่ง วงจรขยายที่ใช้สำหรับตรวจวัดเป็นเครื่องมือหรือใช้สำหรับควบคุมที่ดี จะเป็นวงจรชนิดอินสตรูเมนต์เช่น ซึ่งประกอบไปด้วยออปแอมป์และตัวต้านทานค่าความเที่ยงตรงสูง โดยพื้นฐานแล้ววงจรขยายอินสตรูเมนต์เช่นก็คือ วงจรที่พัฒนามาจากวงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Amplifier) หรือวงจรขยายผลต่าง

### 2.9.1 พื้นฐานของวงจรดิฟเฟอเรนเชียล

วงจรดิฟเฟอเรนเชียล นี้จะนำมาใช้ในการตรวจวัดก็ได้ หรือจะนำมาใช้ขยายสัญญาณขนาดเล็ก (โดยสัญญาณขนาดเล็กนี้หมายถึงสัญญาณแรงดันที่มีขนาดน้อยกว่า 10 มิลลิโวลต์ลงไป)

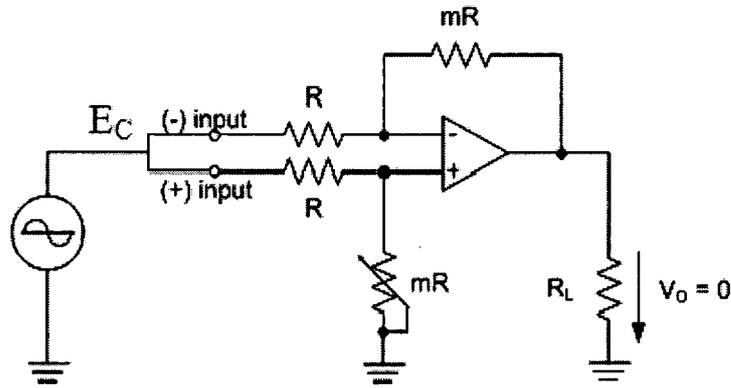


รูปที่ 2.24 พื้นฐานของวงจรดิฟเฟอเรนเชียล [15]

ในรูปที่ 2.24 ตัวต้านทานที่ใช้จะมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยมาก (1 เปอร์เซ็นต์) โดยต่อเข้ากับออปแอมป์เป็นวงจรดิฟเฟอเรนเชียล หรือวงจรขยายค่าแตกต่าง ถ้า  $E_1$  ถูกลัดวงจรจะเป็นวงจรขยายแบบอินเวอร์ตซึ่งจะให้ค่าขยายเท่ากับ  $-m$  เท่าของแรงดัน  $E_2$  แต่ในกรณีที่  $E_2$  ถูกแทนด้วยการลัดวงจร แรงดัน  $E_1$  จะถูกแบ่งโดย  $R$  และ  $mR$  จนเหลือเพียง  $E_1 m(1+m)$  ที่ขาบวกของออปแอมป์ เมื่อมองวงจรเป็นวงจรขยายแบบนอนอินเวอร์ตจึงเราจะได้ค่าขยายเท่ากับ  $(m+1)$  เท่าของแรงดัน  $E_1$  หรือประมาณเท่ากับ  $mE_1$  และ  $E_2$  ปรากฏอยู่ที่ขาทั้งสองของออปแอมป์ ค่าแรงดันเอาต์พุตจะเท่ากับ  $V_o = mE_1 - mE_2$  หรือเขียนเป็นสมการดังนี้

$$V_o = mE_1 - mE_2 = m(E_1 - E_2) \quad (2.29)$$

ซึ่งจากสมการนี้ทำให้สรุปได้ว่า แรงดันเอาต์พุตของวงจรดิฟเฟอเรนเชียล (หรือ  $V_o$ ) จะเป็นค่าระดับแรงดันที่แตกต่างของแรงดันที่ขาบวกและลบของออปแอมป์ คูณกับค่าอัตราขยายของวงจรนั่นเอง ในกรณีที่  $E_1 = E_2$  แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ควรจะเป็น 0 โวลต์ วิธีการที่จะทำให้แรงดันอินพุตทั้งสองเท่ากันได้ง่ายที่สุดก็คือ การรวบปลายอินพุตทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยแรงดันอินพุตนี้เราเรียกว่า ECM หรือแรงดันอินพุตแบบคอมมอนโหมด (Common-Mode Input Voltage) ดังแสดงในรูปที่ 2.25



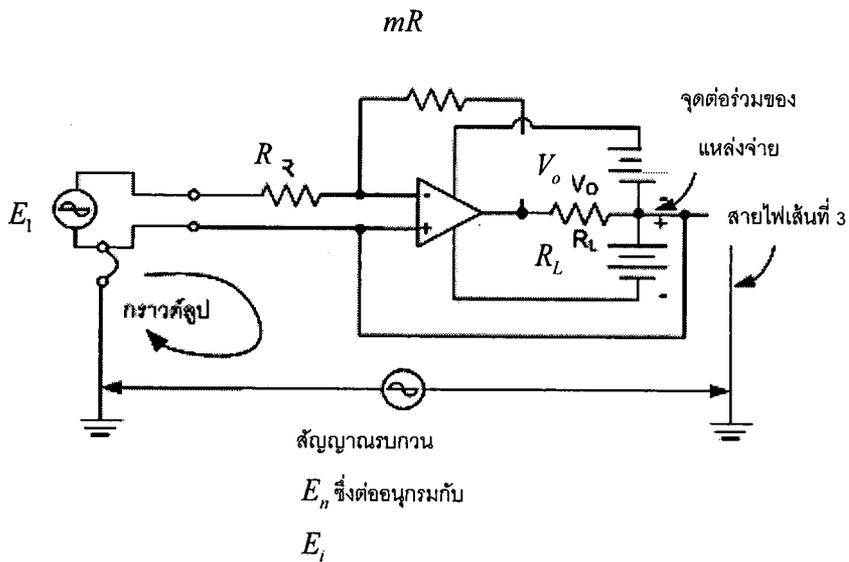
รูปที่ 2.25 อัตราขยายแรงดันแบบคอมมอนโหมด [15]

ดังนั้นแรงดัน  $V_o$  ควรจะมีค่าเป็นศูนย์ถ้าอัตราส่วนระหว่างตัวต้านทานเท่ากัน (ระหว่างค่าของ  $mR$  และ  $R$ ) ซึ่งมีผลทำให้เกิดอัตราขยายแรงดันแบบคอมมอนโหมด หรือ  $V_o / E_{CM}$  (Common Mode Voltage Gain) ที่มีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ

#### 2.9.2 วงจรดิฟเฟอเรนเชียล เทียบกับวงจรขยายทั่วไป

พิจารณาวงจรขยายอินเวอร์ตดังในรูปที่ 2.26 คอมมอนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้ออปแอมป์ และกราวด์ ของ  $R_f$  จะต่อร่วมกันและลงดินไว้ และที่ตัวถังของแหล่งจ่ายสัญญาณ (Signal Source) ก็มีการต่อลงดินด้วยเช่นกัน แต่แม้ว่าที่แหล่งจ่ายสัญญาณจะมีการต่อลงดินไว้ ก็เป็นไปได้ที่จะมีการรั่วของตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุของแหล่งจ่ายสัญญาณเอง ทำให้เกิดกราวด์ลูป (Ground Loop) ในรูปที่ 2.26 ซึ่งทำให้เกิดกระแส และแรงดันสัญญาณรบกวน (Noise) ขึ้นมาได้โดยในรูปเราจะแทนด้วยค่า  $E_n$  ซึ่งเมื่อแรงดันทั้งสองถูกนำไปขยายด้วยอัตราส่วนเท่าๆ กันเราอาจจะไม่สามารถตรวจรับสัญญาณที่ต้องการได้

ค่า  $E_n$  นี้จะต่ออนุกรมกับค่า  $E_i$  ซึ่งแรงดันทั้งสองนี้จะถูกขยายด้วย  $-100$  เท่าซึ่งเป็นไปได้ที่ค่าของ  $E_n$  จะมีค่ามากกว่าค่าของ  $E_i$  (ในขณะที่ก่อนป้อนเข้าสู่ออปแอมป์)



รูปที่ 2.27 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลจะช่วยให้สัญญาณรบกวนกลายเป็นแรงดันคอมมอนโหมด [15]

### 2.9.3 เพิ่มความต้านทานด้านอินพุต

วงจรรขยายดิฟเฟอเรนเชียลทั่วไปมีข้อด้อยอยู่สองประการคือ มีความต้านทานอินพุตที่ต่ำและการปรับเปลี่ยนอัตราขยายทำได้ยาก เพราะอัตราส่วนของตัวต้านทานทั้งด้านขาลบและขาบวกของออปแอมป์จะต้องมีสัดส่วนที่เท่ากันมากที่สุด สำหรับวิธีการแก้ปัญหาในกรณีแรก สามารถแก้ไขได้โดยการใส่วงจรบัฟเฟอร์ หรือวงจรตามแรงดันเข้าที่อินพุตของวงจรทั้งด้านขาลบและขาบวก ดังรูปที่ 2.28 เอาต์พุตของออปแอมป์  $A_1$  จะมีค่าเป็น  $E_1$  และเอาต์พุตของออปแอมป์  $A_2$  จะมีค่าเป็น  $E_2$  เมื่อเทียบกับกราวด์ สำหรับแรงดัน  $V_0$  ที่ตกคร่อม  $R_L$  จะเป็นแรงดันที่เกิดจากความแตกต่างระหว่าง  $E_1$  และ  $E_2$  ซึ่งเป็นแรงดันที่ต้องการวัดนั่นเอง

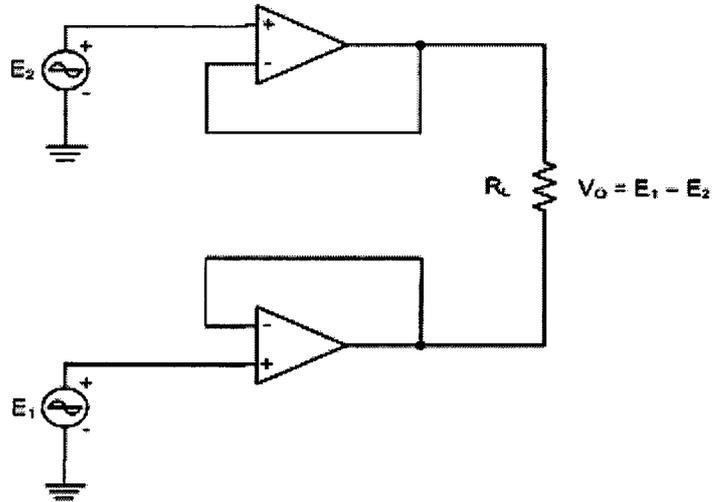
สำหรับข้อด้อยประการที่สองของวงจรรขยายดิฟเฟอเรนเชียล คือการที่วงจรมีความต้านทานอินพุตต่ำ ทำให้การปรับเปลี่ยนอัตราขยายทำได้ยาก สามารถแก้ไขได้โดยใช้ตัวต้านทานเพียง 3 ตัวเท่านั้น โดยใช้วงจรจากรูปที่ 2.28 มาต่อตัวต้านทานเพิ่มดังรูปที่ 2.29 เนื่องจากแรงดันที่ขาบวกและลบของ ออปแอมป์จะมีค่าเท่ากันเสมอ แรงดันที่จุด 1 และจุด 2 (เมื่อเทียบกับกราวด์) ก็จะมีค่าเป็น  $E_1$  และ  $E_2$  ตามลำดับ ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $aR$  (ตัวต้านทานปรับค่าได้) มีค่าเท่ากับ  $E_1 - E_2$  ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านจะมีค่าสมการดังนี้

$$I = \frac{(E_1 - E_2)}{aR} \quad (2.30)$$

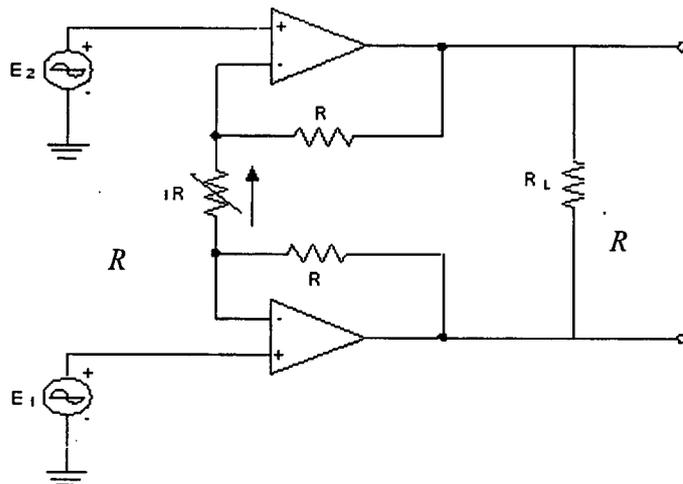
เมื่อ  $E_1$  มีค่ามากกว่า  $E_2$  ทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าจะเป็นดังรูปที่ 2.37 ดังนั้นเองแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวต้านทานทั้งสามจะมีค่าเท่ากับ

$$V_o = (E_1 - E_2)(1 + 2/a) \quad (2.31)$$

เมื่อ  $a = aR/R$



รูปที่ 2.28 วงจรขยายเอาต์พุตเป็นแรงดันดิฟเฟอเรนเชียล โดยด้านหน้าของวงจรเป็นบัฟเฟอร์ [15]



รูปที่ 2.29 การดัดแปลงวงจรในรูปที่ 2.28 ให้สามารถปรับค่าอัตราขยายได้ [15]

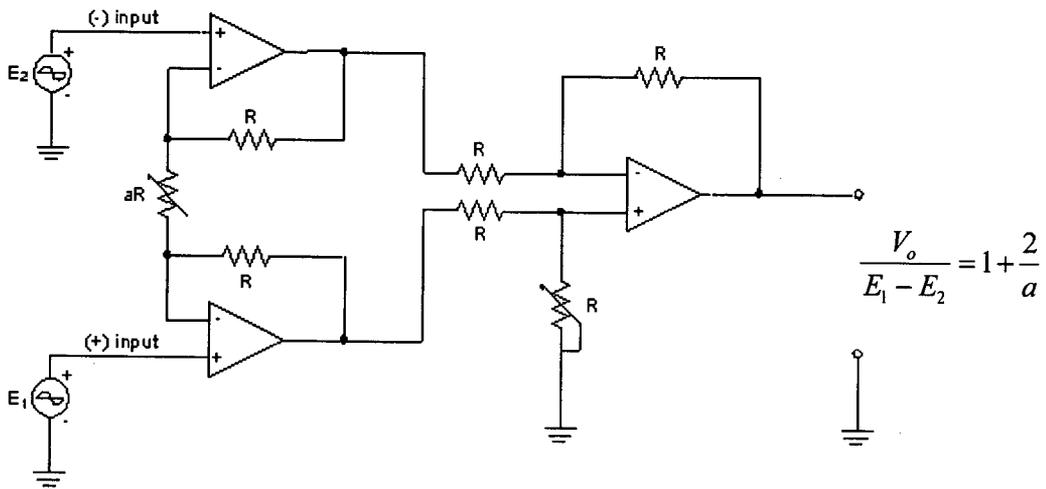
### 2.9.4 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน

วงจรขยายสตรูเมนเตชันในรูปที่ 2.30 เป็นการออกแบบเพิ่มจากวงจรในรูปที่ 2.29 โดยนำวงจรในรูปที่ 2.24 มาต่อเพิ่ม โดยสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ทางเอาต์พุตเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{V_o}{E_1 - E_2} = 1 + \frac{2}{a} \quad (2.32)$$

และเมื่อ  $E_1$  ถูกป้อนเข้าที่ขาบวกของออปแอมป์ ในขณะที่  $E_2$  ป้อนเข้าที่ลบ จะได้คุณสมบัติโดยย่อของวงจรขยายอินสตรูเมนเตชันดังนี้

- 1) อัตราขยายแรงดันซึ่งจะนำมาคูณกับค่า  $E_1 - E_2$  จะกำหนดได้โดยตัวต้านทานเพียงตัวหนึ่ง
- 2) ความต้านทานทางด้านอินพุตจะมีค่าสูงมาก และไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราขยายในขณะที่ออปแอมป์ธรรมดาทั่วไป จะมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีนี้เสมอ
- 3)  $V_o$  ไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันคอมมอนที่มาจากทั้ง  $E_1$  และ  $E_2$  เลย แต่จะเป็นผลที่ขึ้นกับค่าของแรงดันแตกต่างเท่านั้น



รูปที่ 2.30 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน [15]

วงจรขยายอินสตรูเมนเตชันจะใช้ออปแอมป์ 3 ตัว โดยออปแอมป์ 2 ตัวแรกจะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณอินพุตเข้ามา ขณะที่ออปแอมป์ตัวสุดท้ายจะเป็นวงจรภาคเอาต์พุตทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณ นอกจากนี้วงจรขยายอินสตรูเมนเตชันสามารถปรับค่าอัตราขยายสัญญาณได้