

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ จำเป็นต้องมีการออกแบบการสร้างโดยคำนึงถึงหลักการทางวิศวกรรม โดยในการสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ ต้องวิเคราะห์การเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะต้องเกิดแรงต้านของน้ำน้อยที่สุด ปัจจัยอีกอย่างที่ช่วยในการเคลื่อนที่ คือการลอยตัว หากหุ่นยนต์ไม่มีเสถียรภาพในการลอยตัวอาจส่งผลกระทบต่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ ในการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ จะใช้หลักการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าจะต่อเข้ากับแบตเตอรี่ เมื่อมอเตอร์ทำงานจะทำให้เกิดแรงผลัก ช่วยทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในน้ำได้ทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ

2.1 แรงลอยตัว (Buoyant force)[7]

หลักการของแรงดันอุทกสถิตบนผิวโค้งสามารถนำมาใช้คำนวณแรงดันสุทธิบนวัตถุจมหรือวัตถุลอยในของเหลวได้ ซึ่งเป็นกฎของการลอยตัวที่ค้นพบโดยอาร์คิมิดีส (Archimedes) คือ

- 1) วัตถุที่จมในของเหลว แรงลอยตัวแนวตั้งจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่
- 2) วัตถุที่ลอยจะเข้าแทนที่เท่ากับน้ำหนักของวัตถุเองในของเหลวที่วัตถุลอยอยู่

แรงลอยตัวจะเป็นแรงแนวตั้งบนขึ้นประกอบส่วนแบ่งแนวตั้งของวัตถุที่ขึ้นกับแรงดันอุทกสถิตจะ
ได้เป็น

$$F_B = \int_{\text{body}} (p_2 - p_1) dA_H = -\gamma \int (z_2 - z_1) dA_H = (\gamma)(\text{ปริมาตรของวัตถุ}) \quad (2.1)$$

สมการที่ 2.1 กำหนดว่าของไหลที่มีน้ำหนักจำเพาะคงตัวแนวการกระทำของแรงลอยตัวจะผ่านจุดศูนย์กลางปริมาตรของวัตถุที่เข้าไปแทนที่ซึ่งคือจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ จุดที่แรงลอยตัว (Buoyant force), F_B กระทำเรียกว่าจุดศูนย์กลางการลอยตัว (Center of buoyant) ซึ่งกำหนดเป็นจุด B ปกติจุด B อาจจะไม่ตรงกับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ ซึ่งอาจจะมีการแปรผันกับความหนาแน่นได้

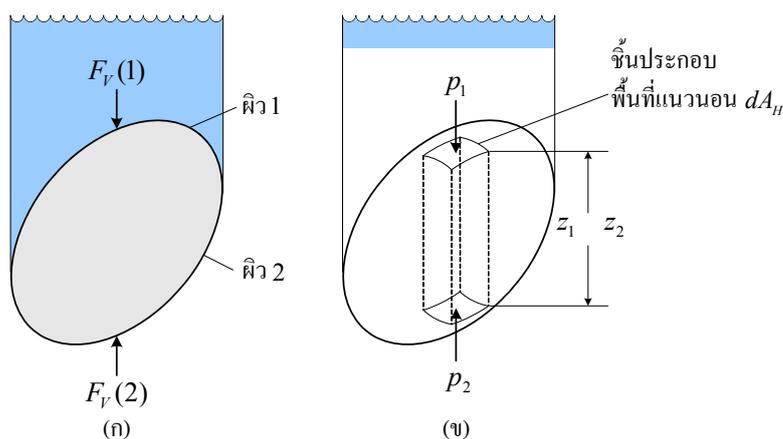
สมการที่ 2.1 สามารถประยุกต์ใช้กับชั้นของไหลโดยรวมน้ำหนักของแต่ละชั้นความหนาแน่น ρ_i ที่เข้าแทนที่ของวัตถุที่จม จะได้

$$(F_B)_{LF} = \sum \rho_i g (\text{Displace volume})_i \quad (2.2)$$

แต่ละชั้นที่ถูกแทนที่จะมีศูนย์กลางปริมาตรนั้น และมีการรวมแรงโมเมนต์ของแรงลอยตัวที่เพิ่มขึ้น หากจุดศูนย์กลางของการลอยตัวของวัตถุมีอีกกรณีหนึ่งคือวัตถุจมเพียงบางส่วน โดยที่จะมีส่วนที่โผล่พ้นจากผิวอิสระดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อส่วนเงาคือปริมาตรที่เข้าแทนที่ในของเหลวสมการ (2.1) สามารถนำมาใช้กับปริมาตรส่วนนี้จะได้

$$F_B = (\gamma) (\text{ปริมาตรที่ถูกแทนที่}) = \text{น้ำหนักของวัตถุที่ลอย} \quad (2.3)$$

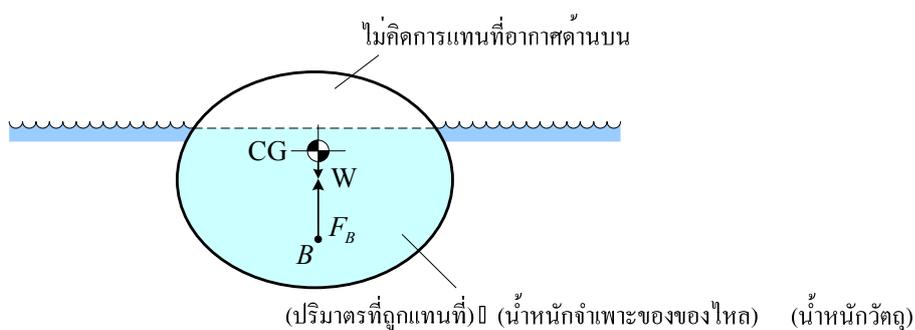
ไม่เพียงแต่แรงลอยตัวจะเท่ากับน้ำหนักวัตถุ แต่แรงลอยตัวยังอยู่ในแนวเส้นตรง(Collinear) เดียวกันกับน้ำหนัก เนื่องจากไม่เกิดโมเมนต์สุทธิในการสมดุลทางอุทก



รูปที่ 2.1 หลักการสองวิธีที่นำไปหาแรงลอยตัวของวัตถุจม [7]

(ก) แรงบนผิวโค้งบนและล่าง

(ข) การรวมแรงดันแนวตั้งของชั้นประกอบ



รูปที่ 2.2 ความสมดุลทางสถิตยศาสตร์ของวัตถุลอย [7]

2.2 เสถียรภาพในการลอยตัว (Stable)[7]

วัตถุลอยค้ำแสดงในรูปที่ 2.3 ตำแหน่งของการลอยตัวอาจพลิกคว่ำที่จังหวะแรกของการลอย ซึ่งเรียกว่าการลอยแบบไม่เสถียรภาพ(Unstable) แต่ถ้ามีการกระทบเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้วัตถุมาอยู่ในตำแหน่งสมดุลนั้น จะเรียกว่าการลอยตัวแบบเสถียรภาพ (Stable) ดังนั้นวิศวกรจึงต้องออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงการลอยที่ไม่เสถียรภาพ ทางเดียวที่จะบอกว่าการลอยเป็นเสถียรภาพหรือไม่ จะดูที่ว่ามีโมเมนต์กลับคืนมาอยู่ที่ตำแหน่งเดิมหรือไม่ ถ้ามีแสดงว่าลอยอยู่อย่างเสถียรภาพ ถ้าไม่เช่นนั้นก็คือว่าไม่เสถียรภาพ หลักการพื้นฐานการคำนวณเสถียรภาพจะพิจารณาจากรูปที่ 2.3 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) ระบุตำแหน่งแรงลอยตัวที่คำนวณจากสมการที่ 2.3 จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุคือจุด G และจุดศูนย์กลางการลอยตัวคือจุด B

2) วัตถุเอียงเป็นมุมเล็กน้อย $\Delta\theta$ เกิดเส้นน้ำ (Waterline) ใหม่ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่ลอยตัวใหม่ที่ จุด B' โดยนำมาใช้ในการคำนวณโดยลากเส้นตั้งขึ้นจากจุด B' ตัดกับเส้นสมมาตรที่จุด M ซึ่งเรียกว่า จุดศูนย์กลางเมตา (Metacenter)

3) ถ้าจุด M อยู่เหนือจุด G เส้นความสูงจุดศูนย์กลางเมตา (Metacenter height), เส้นตรง MG จะเป็นบวกและจะเกิดโมเมนต์กลับคืนลอยในตำแหน่งเดิมซึ่งถือว่าเป็นเสถียรภาพ แต่ถ้าจุด M อยู่ต่ำกว่า จุด G เส้นตรง MG จะเป็นลบ วัตถุจะลอยอย่างไม่เสถียรภาพและจะพลิกคว่ำเสถียรภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้น MG เพิ่มขึ้น

ดังนั้นความสูงจุดศูนย์กลางเมตาเป็นสมบัติของภาคตัดและจะใช้แสดงเสถียรภาพของวัตถุลอยสำหรับวัตถุหลายๆภาคตัดและรูปร่าง เช่น เรือ การคำนวณจุดศูนย์กลางเมตาจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุอย่างเด่นชัด

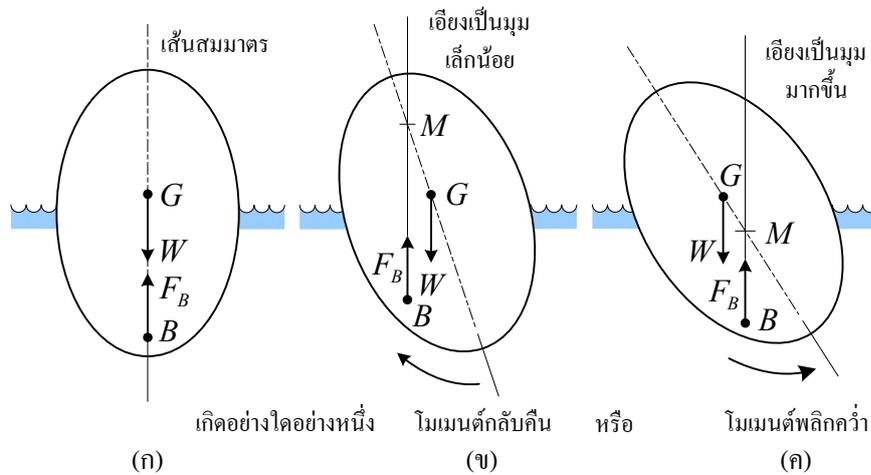
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพกับพื้นที่เส้นน้ำ

เสถียรภาพจากรูปที่ 2.3 นำไปสู่การคำนวณอย่างง่ายเกี่ยวกับโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่เส้นน้ำ (Waterline area) รอบแกนเอียงพิจารณา รูปที่ 2.4 แกน y ของวัตถุกำหนดเป็นเส้นสมมาตร วัตถุเอียงทำมุม θ เล็กน้อย จากนั้นจึงเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็กๆ Obd และโผล่ขึ้นเท่ากับลิ้ม cOa จุด B' ใหม่ของจุดศูนย์กลางการลอยตัวคำนวณเป็นจุดเซนทรอยด์ของส่วนจม aObdc ของวัตถุจะได้

$$\begin{aligned}\bar{x}_{abOdc} &= \int_{cOdea} xdv + \int_{Obd} xdv - \int_{cOa} xdv = 0 + \int_{Obd} x(LdA) - \int_{cOa} x(LdA) \\ &= 0 + \int_{Obd} xL(x\tan\theta dx) - \int_{cOa} xL(-x\tan\theta dx) = \tan\theta \int_{waterline} x^2 dA_{waterline} \\ &= I_0 \tan\theta\end{aligned}\tag{2.4}$$

โดยที่ I_0 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอยเส้นน้ำ (Waterline footprint) ของวัตถุรอบแกนเอียง O ทำการหาปริพันธ์จันแรก แต่จะหายไปเพราะว่าความสมมาตรของส่วนจมเดิม cO เดิมแต่ยังอยู่ สองปริพันธ์รูปคิม ซึ่งนำมารวมกันเป็นค่า I_0 เมื่อ Ldx เท่ากับชิ้นประกอบของพื้นที่ที่เส้นน้ำ ดังนั้นจะหา ระยะจุด M ถึงจุด B จะ ได้

$$\frac{\bar{x}}{\tan\theta} = \overline{MG} = I_0 / v_{\text{submerged}} = \overline{MG} + \overline{GB} \text{ หรือ } \overline{MG} = (I_0 / v_{\text{sub}}) - \overline{GB} \quad (2.5)$$



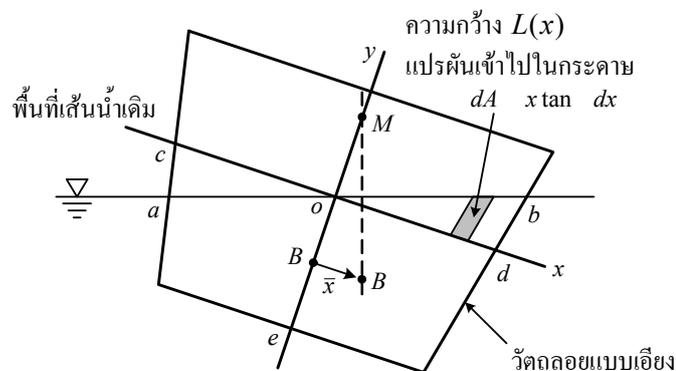
รูปที่ 2.3 การคำนวณหาจุดศูนย์กลางเมตา M ของวัตถุลอยซึ่งแสดงได้สามกรณี[7]

(ก) วัตถุเอียงทำมุม $\Delta\theta$ เล็กน้อย

(ข) B' เคลื่อนออกห่าง (จุด M อยู่เหนือจุด G แสดงว่าเสถียรภาพ)

(ค) B' เคลื่อนเล็กน้อย (จุด M อยู่ต่ำกว่า G แสดงว่าไม่เสถียรภาพ)

วิศวกรจะหาระยะจากจุด G ถึงจุด B จากรูปร่างพื้นฐานและการออกแบบการลอยวัตถุและทำการคำนวณค่า I_0 และปริมาตรส่วนจม v_{sub} ถ้าความสูงจุดศูนย์กลางเมตาเส้น \overline{MG} เป็นบวก วัตถุจะลอยตัวอย่างเสถียรภาพเมื่อมีการรบกวนเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.4 การลอยตัววัตถุเมื่อเอียงผ่านมุม θ เล็กน้อย[7]

2.4 การทดลองการไหลภายนอก [8]

ทฤษฎีชั้นขอบเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่ทำให้เข้าใจพฤติกรรมการไหลแบบหนืด แต่เนื่องจากการไหลแยกตัว ทฤษฎีจึงไม่เพียงพอในการคำนวณปริมาณของสนามการไหล แรงบนวัตถุที่จมในการไหลที่เลขเรย์โนลด์ส์แบบไม่เจาะจง ดังนั้นการทดลองจึงเป็นกุญแจสำคัญของการไหลภายนอก

ข้อมูลการทดลองของการไหลแบบหนืดภายนอกมีเป็นจำนวนมาก หัวข้อนี้จึงให้การบรรยายเบื้องต้นของปัญหาการไหลภายนอก

1) แรงต้านของวัตถุสองหรือสามมิติ

ก. วัตถุทู่

ข. รูปร่างเส้นกระแสการไหล

2) สมรรถนะของวัตถุยกตัวได้

ก. ปีกเครื่องบินและเครื่องบิน

ข. กระสุนและวัตถุมีครีป

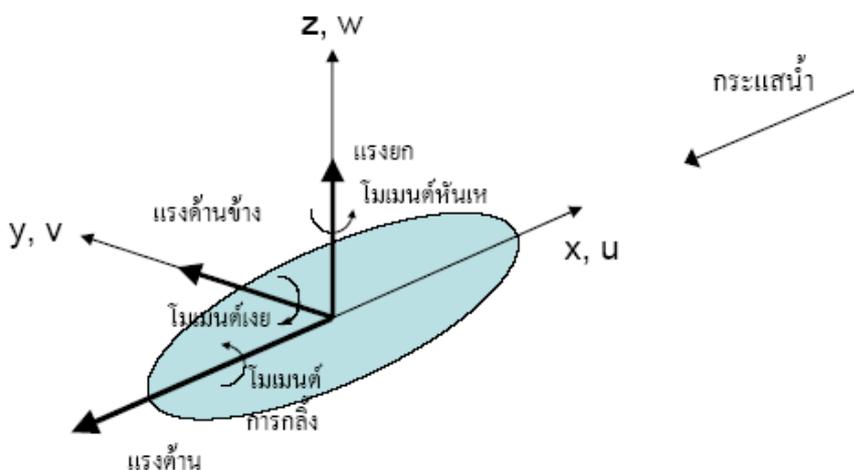
ค. นกและแมลง

2.4.1 แรงต้านของวัตถุจมในการไหล[8]

วัตถุมีรูปร่างแบบไม่เจาะจงเมื่อจมในการไหลของของไหลจะพบแรงและโมเมนต์เนื่องจากการไหล ถ้าวัตถุมีรูปร่างแบบไม่เจาะจงและมีการหมุน การไหลจะมีแรงและโมเมนต์รอบแกนพิกัดสามแกนดังแสดงในรูปที่ 2.5 แกนขนานกับการไหลอิสระและเป็นบวกทางด้านท้ายการไหล แรงบนวัตถุตามแกนนี้เรียกว่า แรงต้าน (Drag) และโมเมนต์รอบแกนนี้เป็นโมเมนต์การกลิ้ง (Rolling moment) แรงต้านทำให้เกิดการสูญเสียการไหลที่สำคัญและจะต้องเอาชนะให้ได้ถ้าวัตถุต้องการเคลื่อนที่ย้อนการไหล

แรงสำคัญอีกแรงหนึ่งที่ตั้งฉากกับแรงต้านและปรกคิการแสดงการใช้งานในลักษณะของการแบกรับน้ำหนักของวัตถุเรียกว่า แรงยก (Lift) โมเมนต์รอบแกนยกนี้เรียกว่า การหันเห (Yaw)

แรงสุดท้ายเป็นแรงด้านข้าง (Side force) และโมเมนต์รอบแกนนี้เป็นโมเมนต์ปีกแล้วเงย (Pitching moment)



รูปที่ 2.5 บทนิยามของแรงและโมเมนต์บนวัตถุที่จมในการไหลแบบเอกรูป

เมื่อวัตถุมีความสมมาตรรอบแกนยกและแกนด้าน ดังเช่น เครื่องบิน เรือ และรถยนต์ที่เคลื่อนที่ตรงเข้าไปในการไหล แรงต้านข้าง โมเมนต์การหักเห และ โมเมนต์การก่อกวนจะหายไปและปัญหาจะลดลงเป็นสองมิติ และมีสองแรงคือแรงยกและแรงต้าน และหนึ่งโมเมนต์หักเห

ขั้นสุดท้ายเมื่อวัตถุมีสองระนาบที่สมมาตรกันดังในรูปที่ 2.6 ถ้าการไหลอิสระขนานกับการตัดขวางของสองระนาบนี้เรียกว่า เส้นคอร์ดหลักของวัตถุ (Principle chord line of the body) วัตถุจะมีเพียงแรงต้านโดยที่ไม่มีแรงยก แรงต้านข้างหรือ โมเมนต์จะก่อเกิดแรงต้านหนึ่งแรง แต่ถ้าการไหลอิสระไม่ขนานกับเส้นคอร์ดวัตถุจะมีการหมุนแบบไม่สมมาตรแรงและ โมเมนต์จะเกิดขึ้นทั้งหมด

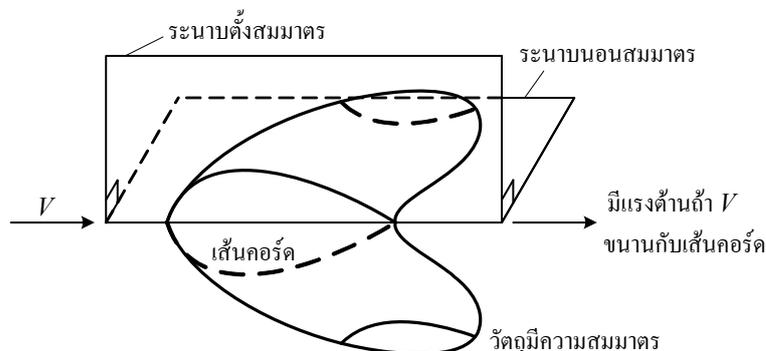
ในการไหลความเร็วต่ำผ่านรูปร่างที่เหมือนกับที่มีเอกลักษณ์การหมุนและความสัมพันธ์กับความขรุขระ สัมประสิทธิ์แรงต้านจะเป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์ส์วัตถุเป็น

$$C_D = f(Re) \tag{2.6}$$

เลขเรย์โนลด์ส์ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลอิสระ V และคุณลักษณะความยาว L ของวัตถุ ปรกติเส้นคอร์ดหรือความยาวของวัตถุจะขนานกับการไหลเป็น

$$Re = VL/v \tag{2.7}$$

สำหรับทรงกระบอก ทรงกลม และแผ่นจาน คุณลักษณะความยาวจะเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง D



รูปที่ 2.6 แรงต้านจะเกิดขึ้นถ้าการไหลขนานกับทั้งสองระนาบที่สมมาตรกัน [8]

2.4.2 คุณลักษณะของพื้นที่ [8]

สัมประสิทธิ์แรงต้านกำหนดโดยใช้คุณลักษณะของพื้นที่ A ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างวัตถุเป็น

$$C_D = \frac{\text{drag}}{\frac{1}{2}\rho VA} \quad (2.8)$$

ตัวประกอบ $\frac{1}{2}$ เป็นของออยเลอร์และเบอร์นูลลี พื้นที่ A ปรกติใช้เพียงหนึ่งลักษณะจากสามลักษณะคือ

- 1) พื้นที่ฉายด้านหน้า (Frontal area) เป็นการมองเห็นวัตถุจากการไหล เหมาะสำหรับวัตถุรูปทู่ (Stubby) เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก รอยน้ด จรวด กระสุนปืน และจีปนาวธ
- 2) พื้นที่ขนานกับทิศทางการไหล (Planform area) เป็นพื้นที่ที่วัตถุที่มองจากข้างบน เหมาะสำหรับความกว้าง วัตถุรูปแบน เช่น ปีก และปีกคิดเรือ
- 3) พื้นที่ผิวเปียก (Wetted area) เป็นพื้นที่ๆ สัมผัสกับของไหล เหมาะสำหรับผิวเรือและเรือบรรทุก

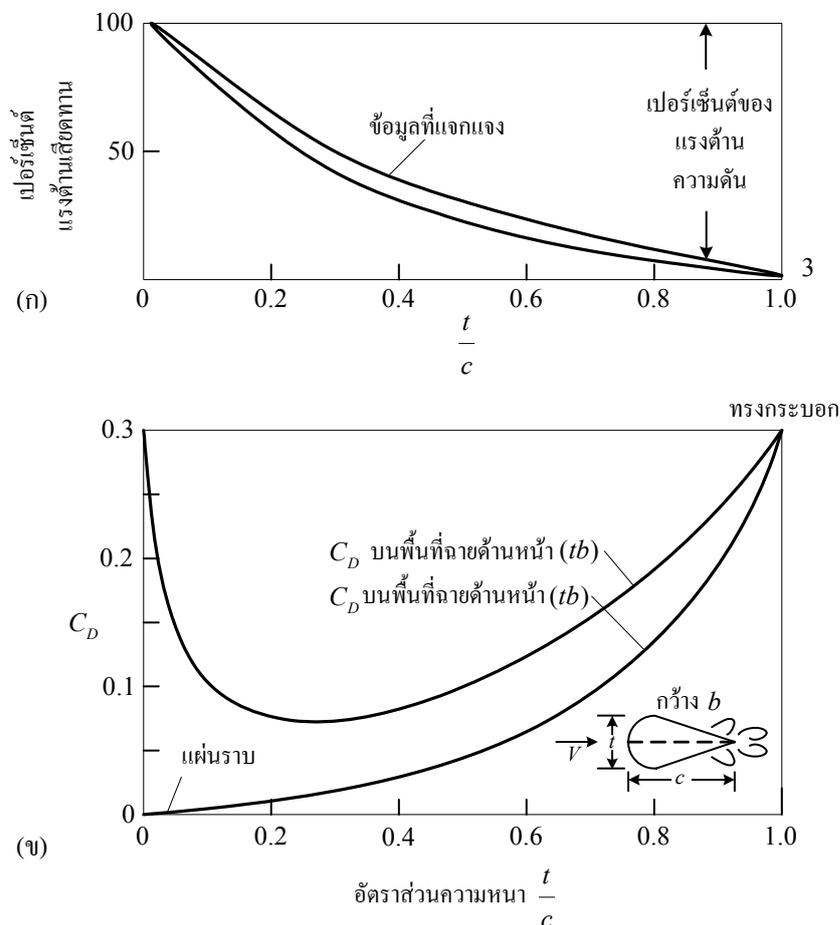
2.4.3 แรงต้านเสียดทานและแรงต้านความดัน [8]

ทฤษฎีแรงต้านมีน้อยไม่เพียงพอในที่นี้ ยกเว้นสำหรับแผ่นราบ เพราะว่าวัตถุที่มีรูปร่างอื่นๆ จะเกิดการไหลแยกตัว ทฤษฎีชั้นขอบสามารถทำนายจุดไหลแยกตัวได้ แต่ไม่สามารถประมาณได้แม่นยำ จากการแจกแจงความดันในเขตการแยกตัวมีความแตกต่างระหว่างความดันสูงในเขตด้านหน้าสแตกเนชันและความดันต่ำในเขตหลังการแยกตัว ซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านขนาดใหญ่เรียกว่าแรงต้านความดัน (Pressure drag) ซึ่งเป็นการรวมกันของความเค้นเฉือนหรือแรงต้านเสียดทานของวัตถุเป็น

$$C_D = C_{D,press} + C_{D,fric} \quad (2.9)$$

แรงต้านเสียดทานและแรงต้านความดันจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของวัตถุ รูปที่ 2.7 แสดงข้อมูลแรงต้านสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกที่มีความลึกมาก (เข้าไปในกระดวย) ที่ความหนาเป็นศูนย์กลางวัตถุมีลักษณะเป็นแผ่นราบและแรงต้านเสียดทานเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่ความหนาเท่ากับความยาวคอร์ด์ซึ่งเรียนแบบทรงกระบอกกลม แรงต้านเสียดทานจะเป็นเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ แรงต้านเสียดทานและแรงต้านความดันเท่ากับที่ความหนา $t/c = 0.25$

ข้อสังเกต ค่า C_D ในรูปที่ 2.7(ข) มองเห็นความแตกต่างที่เดียวเมื่อพื้นที่ฉายด้านหน้าแทนที่พื้นที่ขนานกับทิศทางกรไหล เส้นกราฟสองเส้นในรูปที่ 2.7(ข) แสดงข้อมูลแรงต้านบางค่า



รูปที่ 2.7 แรงต้านของเส้นการไหลทรงกระบอกสองมิติที่ $Re_c = 10^6$ [8]

(ก) ผลของอัตราส่วนความหนาบนเปอร์เซ็นต์ของแรงต้าน

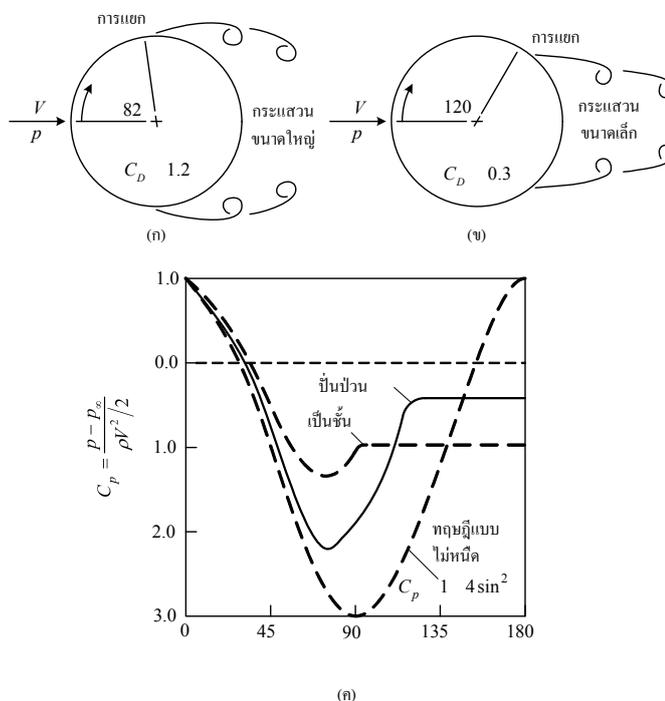
(ข) แรงต้านรวมเทียบกับความหนาเมื่อสองพื้นที่แตกต่างกัน

ในรูปที่ 2.8 แสดงผลที่เกิดขึ้นนั้บพลันของการไหลแยกตัวและความล้มเหลวของทฤษฎีชั้นขอบทฤษฎีการแจกแจงความดันแบบไม่หนืดบนทรงกระบอกก้นป้านแสดงดังเส้นประในรูปที่ 2.8(ค) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านความดันเป็น

$$C_p = (p - p_\infty) / (1/2)\rho V^2 = 1 - 4\sin^2\theta \tag{2.10}$$

โดยที่ p_∞ และ V คือความดันและความเร็วการไหลอิสระตามลำดับ การแจกแจงความดันชั้นขอบการไหลเป็นแบบชั้นและแบบปั่นป่วน ในรูปที่ 2.8(ค) แตกต่างจากทฤษฎีนี้ การไหลแบบเป็นชั้นจะเป็นแบบไม่เสถียรจนไปสู่ความชันในช่วงด้านการไหลบนด้านท้ายของทรงกระบอกและการแยกตัวเกิดขึ้นที่มุม $\theta = 82$ องศา เกิดการไหลวนขนาดใหญ่และความดันต่ำมากในเขตการไหลแยกตัวแบบเป็นชั้นซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านขนาดใหญ่มีค่า $C_D = 1.2$

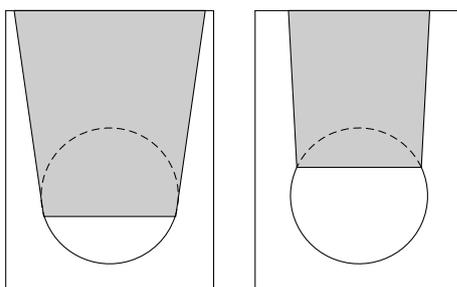
ชั้นขอบปั่นป่วนในรูปที่ 2.8(ข) มีความต้านทานสูง และการแยกตัวจะเกิดขึ้นช้าจนกระทั่งมีมุม $\theta = 120$ องศาและมีผลการไหลวนน้อยมาก ความดันสูงบนด้านหลังและแรงต้านน้อยกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ $C_D = 0.3$



รูปที่ 2.8 การไหลผ่านทรงกระบอกกลม [8]

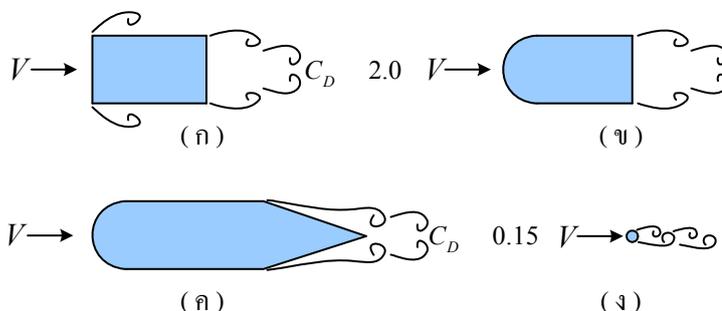
- (ก) การแยกตัวสำหรับการไหลแบบชั้น
- (ข) การแยกตัวสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน
- (ค) ทฤษฎีและการแจกแจงความดันผิวจริง

ความแตกต่างของรูปร่างที่เหมือนกันระหว่างการไหลแยกตัวเป็นชั้นที่ไม่เสถียรและแรงต้านการไหลแยกตัวปั่นป่วนสามารถเห็นได้ของทรงกลมในรูปที่ 2.9 การไหลแบบเป็นชั้นรูปที่ 2.9(ซ้าย) แยกตัวที่ 80 องศา มีค่า $C_D = 0.5$ ขณะที่การไหลแบบปั่นป่วนรูปที่ 2.9(ขวา) แยกตัวที่ 120 องศา มีค่า $C_D = 0.2$ ที่เลขเรย์โนลด์ส์เดียวกันและชั้นขอบปั่นป่วนเกิดขึ้นด้วยการปะทะเข้ากับจุกของลูกบอล ลูกกอล์ฟที่ลอยในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์นี้เจตนาทำเป็นหลุม ก็เพื่อนำไปสู่ชั้นขอบปั่นป่วนที่มีแรงต้านต่ำนั่นเอง



รูปที่ 2.9 การไหลแยกตัวแบบชั้นและแบบปั่นป่วนสำหรับลูกโบว์ลิ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 216 มิลลิเมตร โดยน้ำมีความเร็ว 7.6 เมตร/วินาที [8] เมื่อลูกบอลมีผิวเรียบ ทำให้ชั้นขอบเป็นแบบชั้น (ซ้าย) และเมื่อลูกบอลมีผิวขรุขระจากทราย ทำให้การไหลแบบปั่นป่วน(ขวา)

โดยทั่วไปไม่สามารถเน้นการไหลตามรูปร่างเพื่อลดแรงต้านที่เลขเรย์โนลด์ส์ 100 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมรูปที่ 2.10(ก) มีการแยกตัวที่ทุกมุมคมและมีแรงต้านสูงมาก ส่วนโค้งมนแบบจุกรูปที่ 2.10(ข) จะลดแรงต้านลงไป 45 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่า C_D ยังสูงอยู่ การไหลด้านหลังถึงขอบด้านท้ายแหลมคมรูปที่ 2.10(ค) จะลดแรงต้านลงไป 85 เปอร์เซ็นต์ ถึงค่าต่ำสุด ดังเทียบกับทรงกระบอกกลมในรูปที่ 2.10(ง) ที่มีความหนาเพียงหนึ่งในแปด และหนึ่งในสามพันเมื่อผ่านหน้าตัด (ค) รูปที่ 2.10(ค) ซึ่งมีแรงต้านเหมือนกับรถยนต์ประสิทธิภาพสูง

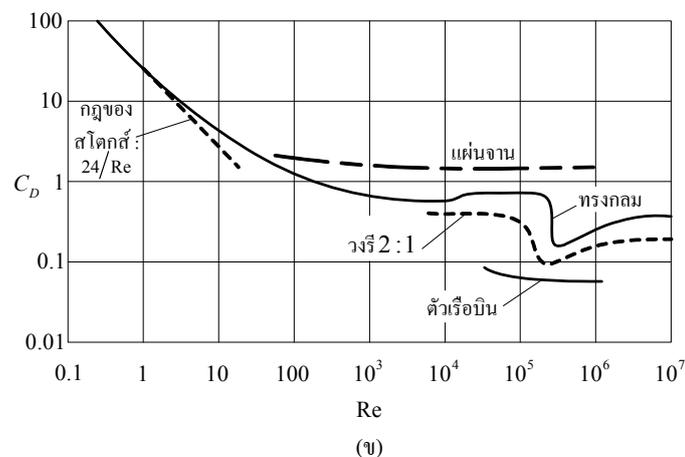
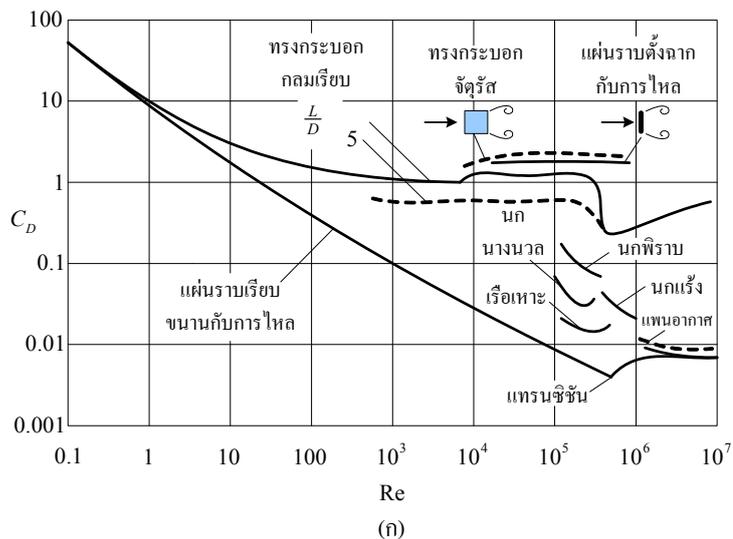


รูปที่ 2.10 การไหลเพื่อลดแรงต้านของวัตถุ ค่า C_D สัมพันธ์กับพื้นที่ฉายด้านหน้า [8] (ก) ทรงกระบอกสี่เหลี่ยม, (ข) จุกโค้งมน, (ค) จุกโค้งมนและการไหลแบบขอบคมด้านท้าย, (ง) ทรงกระบอกกลม

2.4.4 วัตถุสองมิติ[8]

แรงต้านของวัตถุที่มีความกว้าง (Wide span) แบบสองมิติเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) วัตถุมีค่า C_D สูงที่ความเร็วแบบคืบคลานที่มีค่า $Re \leq 1.0$ การแยกตัวเกิดขึ้นที่เลขเรย์โนลด์ส์สูง ค่า C_D ที่แสดงในรูปนั้นสัมพันธ์กับพื้นที่ระนาบที่ขนานกับทิศการไหล ข้อสังเกต เลขเรย์โนลด์ส์จะไม่ขึ้นกับความหยาบผิวที่ Re สูง

สำหรับแรงต้านของวัตถุสองมิติที่มีความยาว(length) และความสูง(height) แบบสองมิติดังแสดงในตารางที่ 2.1 ที่มีค่า C_D สัมพันธ์กับพื้นที่ฉายด้านหน้าถ้าพิจารณาตัดจุมกโค้งมน ตัวอย่างเช่น ยานดำน้ำควบคุมระยะไกลมีพื้นที่ฉายด้านหน้าเป็นทรงตัดจุมกโค้งที่มีความยาว 44 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ซึ่งจากจากตาราง 2.1 คือ $\frac{L}{H} = \frac{44 \text{ cm.}}{20 \text{ cm.}}$ 2.2 ซึ่งนำค่าที่คำนวณ C_D ที่ได้มาหาช่วงประมาณเทียบกับในตารางที่ 2.1 ได้ค่า $C_D = 0.6988$



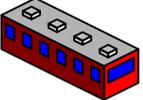
รูปที่ 2.11 สัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุเรียบที่เลขมัคต่ำ [8]

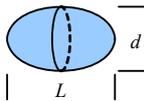
(ก) วัตถุสองมิติ และ (ข) วัตถุสามมิติ

2.4.5 วัตถุสามมิติ[2]

สัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุสามมิติดังแสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.11

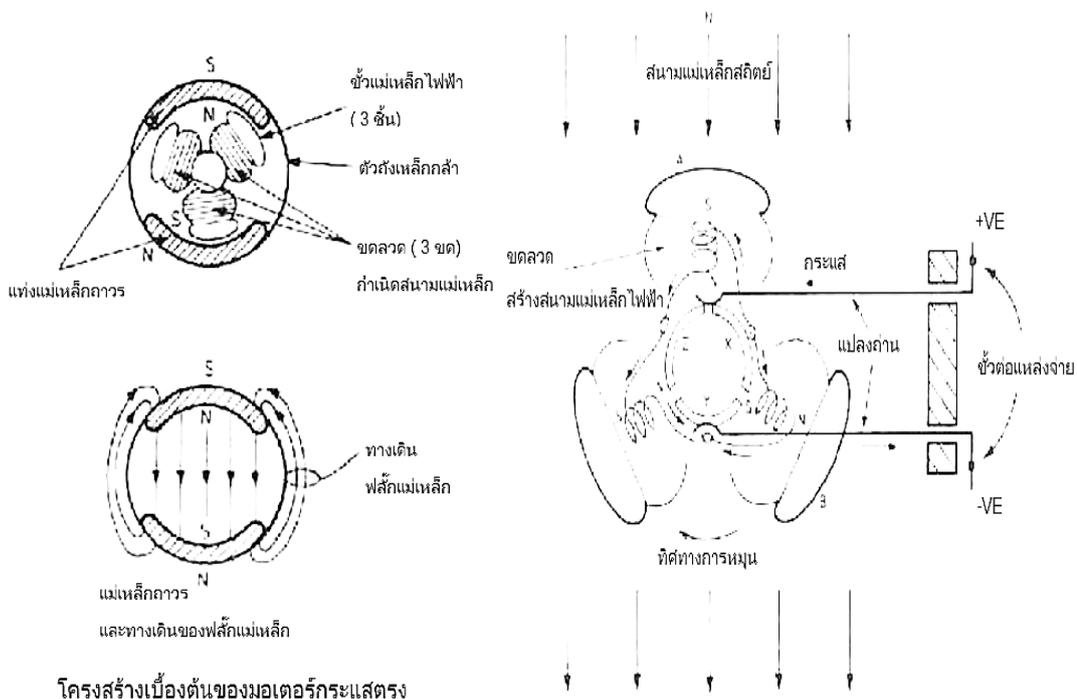
ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุสามมิติที่ $Re_d \geq 10^4$ [8]

วัตถุ	C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า	วัตถุ	C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า
ลูกบาศก์:	1.07	กรวยกลม:	$\frac{C_D}{\theta}$: 10° 20° 30° 40° 60° 75° 90° 0.30 0.40 0.55 0.65 0.80 1.05 1.15
→		การไหลแบบเป็นชั้น	
→		ผ่านทรงกระบอกสั้น:	$\frac{L/D}{C_D}$: 1 2 3 5 10 20 40 0.64 0.68 0.72 0.74 0.82 0.91 0.98 1.20
ด้วย:	1.4	→	
→		จานรูปพาราโบลา	
→	0.4	ที่มีรูพรุน:	??? : 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 ← C_D : 1.42 1.33 1.20 1.05 0.95 0.82 → C_D : 0.95 0.92 0.90 0.86 0.83 0.80
แผ่นจาน:	1.17	←	
→		←	
ร่มชูชีพ	1.2	←	← $C_D A$ 9 ft ² ↑ $C_D A$ 1.2 ft ²
(รู้อย):	1.2	→	
เส้นทางการไหลรถไฟ	$C_D A$ 8.5 m ²	ต้นสน:	$\frac{U, m/s}{C_D}$: 10 20 30 40 1.2 0.2 1.0 0.2 0.7 0.2 0.5 0.2
(ประมาณรอยนต์ 5 คัน):		→	
		หัวลากรถบรรทุก:	ไม่มีอุปกรณ์หันเห: 0.96 มีอุปกรณ์หันเห: 0.76
จักรยาน:		→	
→			
สูงขึ้น: $C_D A$ 0.51 m ² , รถมแข่ง: $C_D A$ 0.30 m ²			

วัตถุ	อัตราส่วน C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า	วัตถุ	อัตราส่วน C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า
แผ่นราบรูปสี่เหลี่ยม:	b/h 1 1.18 5 1.2 10 1.3 20 1.5 2.0	ทรงกระบอกผิวหน้าเรียบ:	L/d 0.5 1.15 1 0.90 2 0.85 4 0.87 8 0.99
→		→	
รูปกลมไข่:	L/d 0.75 0.5 0.2 1 0.47 0.2 2 0.27 0.13 4 0.25 0.1 8 0.2 0.08	ทรงกลมมีแรงลอยตัว:	C_D 0.95
→		135 Re_d 1E5	

2.5 มอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR) [9]

มอเตอร์กระแสตรงจะมีหลักการทำงานโดยวิธีการผ่านกระแสให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก โดยส่วนของแรงนี้จะขึ้นอยู่กับกระแสและกำลังของสนามแม่เหล็ก



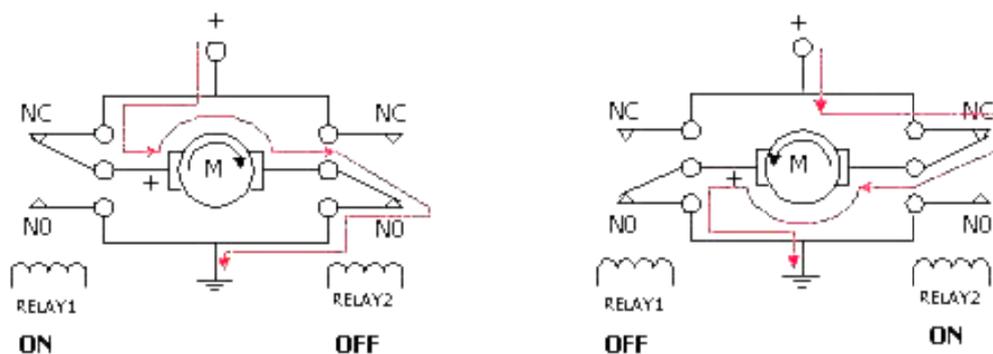
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างทั่วไปของมอเตอร์กระแสตรง [9]

จากในรูปทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กจะเกิดจากแท่งแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ 2 ชั้นที่ขึ้นรูปเป็นแบบโค้งยึดติดกับตัวถังได้พอดี เพื่อที่จะให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งเข้าสู่ใจกลางของมอเตอร์ได้ ดังนั้นความเข้มของแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของแม่เหล็กด้วย ซึ่งส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กวิ่งไปบนตัวถังโลหะ กระแสไฟฟ้าในขดลวดที่พันกับขั้วโรเตอร์ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และต้านกับสนามแม่เหล็กถาวร จึงเกิดเป็นแรงบิดเพื่อที่จะหมุนขั้วโรเตอร์ให้ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มีแรงมากกว่า กระแสก็จะไหลผ่านไปยังขั้วโรเตอร์ โดยผ่านแปรงถ่าน ซึ่งจะสัมผัสกับแหวนตัวนำในขั้วโรเตอร์ และแหวนคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 3 เซกเมนต์เพื่อที่จะทำหน้าที่นำกระแสเข้าขดลวดนั่นเอง

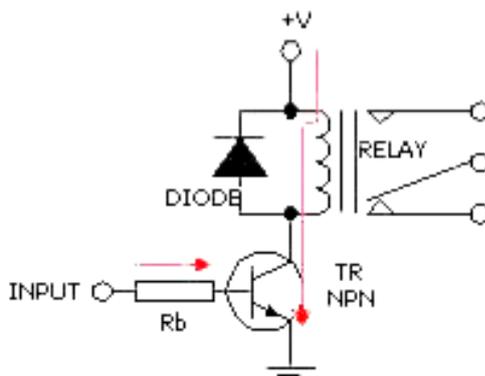
2.5.1 การขับและกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR) [9]

ในการใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการหมุน และทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงนั้น เราจะต้องมีส่วนของวงจร ที่เรียกว่าวงจรขับมอเตอร์ (Driver) ในส่วนของวงจรกลับทิศทางของมอเตอร์นั้น สามารถที่จะใช้รีเลย์ต่อวงจร สวิตช์เพื่อกลับทิศทางของขั้วไฟกระแสตรง หรืออาจใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นวงจรขับกำลังเช่น ทรานซิสเตอร์ มอสเฟต แล้วแต่วิธีที่เราจะเลือกใช้งาน

จากรูปเป็นการใช้รีเลย์ควบคุมการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยการควบคุมการปิด - เปิดที่รีเลย์ 2 ตัว ซึ่งจะทำหน้าที่กลับทิศทางของขั้วไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์ โดยการสลับการทำงานของรีเลย์ เช่น ให้รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน (ON) และรีเลย์ตัวที่ 2 หยุดทำงาน (OFF) จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทางซ้าย และในทำนองเดียวกันถ้าหากรีเลย์ตัวที่ 1 หยุดทำงาน (OFF) และรีเลย์ตัวที่ 2 ทำงาน (ON) ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา

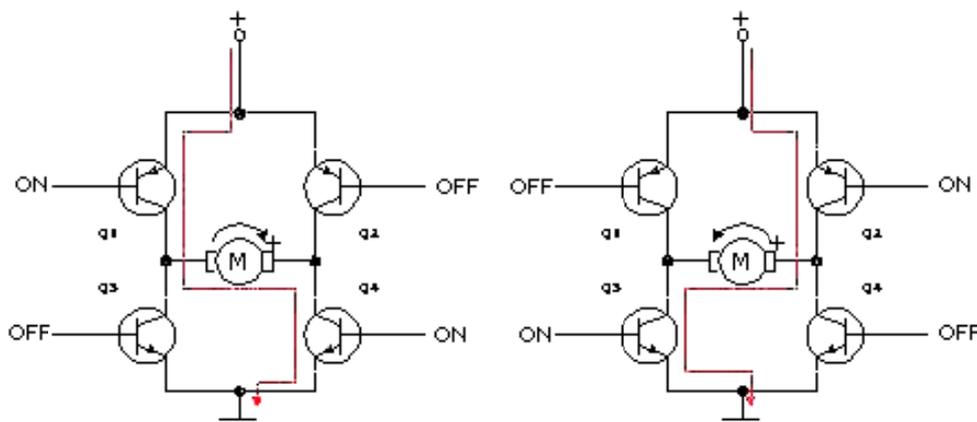


รูปที่ 2.13 แสดงการกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้รีเลย์ [9]



รูปที่ 2.14 แสดงการใช้ทรานซิสเตอร์เพื่อขับรีเลย์ให้ทำงาน [9]

จากรูปเป็นวงจรขั้วรีเลย์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายกระแส ด้วยเหตุผลเพราะไม่สามารถจะใช้ขา เอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ป้อนกระแสไฟที่ขดลวดของรีเลย์โดยตรงได้ เนื่องจากว่ากระแสที่จ่ายออกมาจากขา เอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นเราจึงต้องมีส่วนของวงจรทรานซิสเตอร์เพื่อที่จะทำการขยายกระแสให้เพียงพอในการป้อนให้กับขดลวดของรีเลย์ ส่วนไดโอดนำมาต่อไว้สำหรับป้องกันแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในขณะเกิดการยุบตัว ซึ่งอาจจะทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้



รูปที่ 2.15 แสดงการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขับและกำหนดทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง [9]

จากรูปเป็นวงจรลิเนียร์บริดจ์แอมป์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง 4 ตัวที่ทำหน้าที่ขับ และควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ถ้าหากกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q4 อยู่ในสภาวะทำงาน (Active) กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทรานซิสเตอร์จากซ้ายไปขวา โดยผ่านมอเตอร์กระแสตรงทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา ในทำนองเดียวกันถ้าหากเราทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 อยู่ในสภาวะทำงาน (Active) กระแสไฟฟ้าก็จะไหลจากทางขวาไปทางซ้ายซึ่งจะส่งผลให้มอเตอร์กลับทิศทางหมุนจากทางขวาไปทางซ้าย

2.5.2 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง[9]

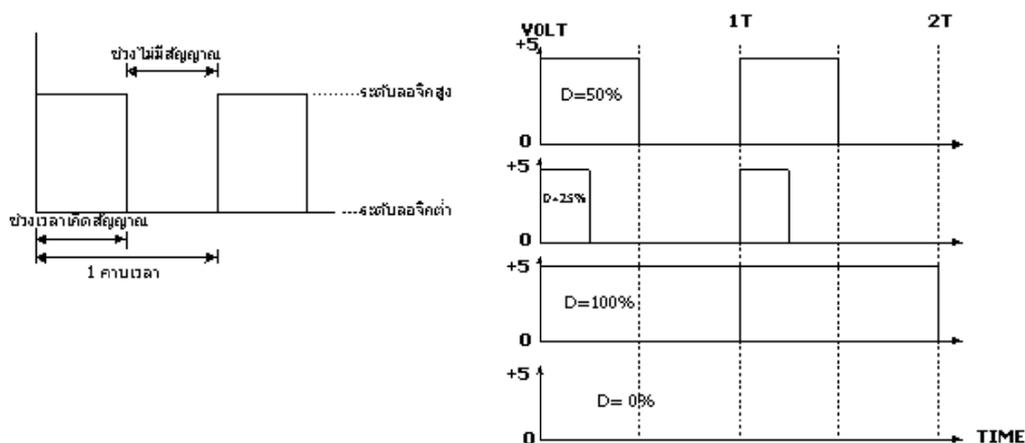
การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งอาจจะใช้วิธีการควบคุมแบบพื้นฐานทั่วไปเช่นการควบคุมด้วยวิธีการใช้ตัวต้านทานปรับค่าโดยต่ออนุกรมกับมอเตอร์ หรือใช้วิธีการการควบคุมโดยการเปลี่ยนค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ แต่การควบคุมในวิธีดังกล่าวถึงแม้ว่าจะควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้คงที่ได้ แต่ที่ความเร็วต่ำจะส่งผลให้แรงบิดต่ำไปด้วย ดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีการควบคุมโดยการจ่ายกระแสไฟให้กับมอเตอร์เป็นช่วงๆ โดยอาศัย

กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้เป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง ซึ่งเราเรียกว่าวิธีการของการมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation)

2.5.3 วิธีการมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ (PWM) [9]

การมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation) จะเป็นการปรับเปลี่ยนที่สัดส่วน และความกว้างของสัญญาณพัลส์ โดยความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่าของดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) นั้นเอง ซึ่งค่าของดิวตี้ไซเคิล คือช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูง โดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับเท่ากับ 50เปอร์เซ็นต์ก็หมายถึงใน 1 รูปสัญญาณพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ครึ่งหนึ่ง และสถานะลอจิกต่ำอยู่อีกครึ่งหนึ่ง ดังรูปและในทำนองเดียวกันถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่ามาก หมายความว่าความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีความกว้างมากขึ้น หากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ก็หมายความว่าไม่มีสถานะลอจิกต่ำเลย ซึ่งค่าดิวตี้ไซเคิลสามารถ จะหาได้จากค่าความสัมพันธ์ดังนี้

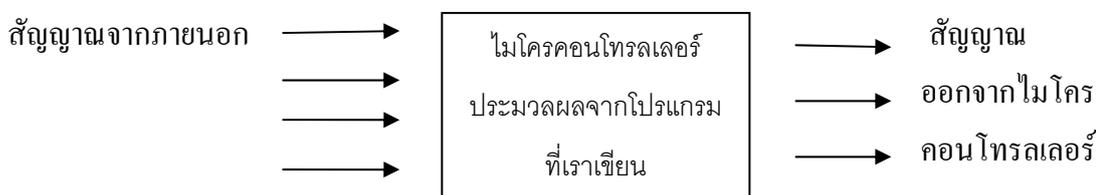
$$\text{ค่าดิวตี้ไซเคิล} = \left(\frac{\text{ช่วงของสัญญาณพัลส์/คาบเวลาทั้งหมดของสัญญาณ}}{\text{คาบเวลาทั้งหมดของสัญญาณ}} \right) \times 100\%$$



รูปที่ 2.16 แสดงความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าดิวตี้ไซเคิลของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่ [9]

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) [10]

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำงานตามเงื่อนไขต่างๆ ตามที่เราเขียนหรือตั้งโปรแกรมไว้ โดยที่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เองสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกได้ทันที(แล้วแต่เบอร์และคุณสมบัติของเบอร์นั้นๆ)เราจึงสามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์ไปประยุกต์ใช้ในงานการควบคุมต่างๆ มากมาย เช่น การควบคุมมอเตอร์ การควบคุมหลอดไฟ หรือการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ เป็นต้น แต่หลายคนคงเคยได้ยินว่า ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือโปรเซสเซอร์มาแล้ว แต่ไมโครโปรเซสเซอร์โดยทั่วไปจะทำหน้าที่ประมวลผล และทำงานเร็วมากแต่ไม่เหมาะนำมาทำงานในลักษณะการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้(สามารถทำได้แต่ต้องใช้อุปกรณ์รอบข้างเสริมมาก เช่น เบอร์ Z80 เป็นต้น) ดังนั้นในงานควบคุมขนาดเล็กเรานิยมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาใช้งานมากกว่าด้วยสาเหตุไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายค่ายหลายเบอร์ให้เลือกใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดเล็ก และราคาถูก ไมโครคอนโทรลเลอร์ปัจจุบันสามารถเขียนโปรแกรมได้หลายภาษา เช่น C เป็นต้น ทำให้เรียนรู้ได้เร็ว มีเครื่องมือสนับสนุนในการทำงานมากมาย ปัจจุบันมีหนังสือให้ความรู้ทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์มากมายทั้งภาษาไทยและต่างประเทศมีใช้ในการสอนตั้งแต่ระดับ ปวช. ปวส. และปริญญาตรี



รูปที่ 2.17 การควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ [10]

2.6.1 ส่วนประกอบภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์[11]

ภายในตัวของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เองจะโครงสร้างต่างๆ ดังนี้

1) ส่วนประมวลผล (Processing unit) ทำหน้าที่คำนวณทางคณิตศาสตร์และการตัดสินใจแบบมีเงื่อนไข (Logic)

2) ส่วนเก็บข้อมูล (Memory) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น -เก็บแบบชั่วคราว (Ram) จะเก็บได้เมื่อมีไฟเลี้ยงอยู่ และเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงข้อมูลจะสูญหาย

หาย

-เก็บแบบถาวร (Eprom) จะใช้ในการเก็บ Code เป็นส่วนใหญ่ ข้อมูลไม่หายเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง

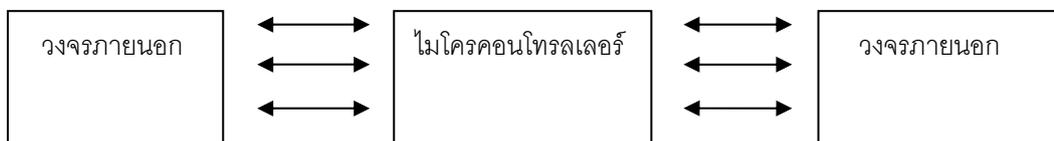
3) ส่วนเชื่อมต่อ หรือ Port ต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่รับ-ส่งสัญญาณให้กับอุปกรณ์ภายนอกได้

4) ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา โดยที่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะสามารถทำงานได้เมื่อมีสัญญาณนาฬิกา ส่วนมากเราจะใช้ คริสตอล (X-TAL) มาเป็นตัวกำเนิดสัญญาณจากภายนอกก่อนส่งไปภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

2.6.2 การเรียนรู้การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์[11]

การใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นเราไม่อาจจะนำตัวไอซีชนิดนี้ไปใช้งานเดี่ยวๆ ได้ แต่จะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกต่อร่วมด้วยเสมอ ดังนั้นการที่จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดีนั้นจำเป็นต้องมีพื้นฐานของการใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเช่นกัน นอกจากความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ แล้วยังต้องมีความเข้าใจลักษณะสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นๆ รวมทั้งการมีเครื่องมือในการทดลองและทดสอบการเขียนโปรแกรม

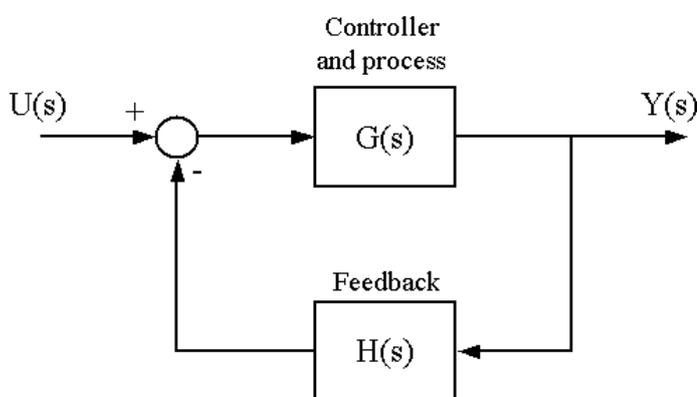
ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ปัจจุบันมีตัวคอมไพเลอร์ภาษาต่างๆ ให้เลือกใช้ เช่นภาษาแอสเซมบลี ภาษา C ภาษาเบสิก เป็นต้น ส่วนจะเลือกใช้ภาษาไหนก็แล้วแต่ตามใจชอบภาษาแอสเซมบลี เป็นภาษาที่มีความสามารถสูง แต่ใช้เวลาศึกษานาน เป็นภาษาแรกๆ ในการใช้งานสมัยก่อนหน้านี้ ภาษาเบสิก เป็นภาษาที่เขียนได้ง่าย ใช้เวลาเรียนรู้ได้เร็ว ภาษา C เช่นเดียวกับภาษาเบสิก คือ เขียนง่าย มีความสามารถใกล้เคียงกับ แอสเซมบลี เรียนรู้ได้เร็ว เนื่องจากตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายตระกูล และหลายเบอร์แต่ละเบอร์ก็มีความสามารถแตกต่างกันไปดังนั้น หากต้องการศึกษาเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ใด สามารถศึกษาได้จาก Datasheet ของเบอร์นั้นๆ



รูปที่ 2.18 การออกแบบคอนโทรลเลอร์ [11]

2.7 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

การใช้งานระบบควบคุมป้อนกลับ (feedback) หรือควบคุมแบบลูปปิด (close-loop control) ดังแสดงด้วยแผนภาพกรอบในรูปที่ 2.19 จะกระทำเพื่อมั่นใจว่าระบบมีลักษณะที่ดี ทั้งนี้เพื่อความเชื่อมั่นพื้นฐานว่าระบบจะทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ ระบบจะทำงานอย่างน่าเชื่อถือภายใต้การควบคุม ด้วยอินพุตที่เราทราบ คือ ระบบที่ใช้ประโยชน์ได้ดีจะต้องมีเสถียรภาพ (stable) ทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ และระบบที่แท้จริง ในความเป็นจริงไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดๆ ที่จะถูกต้องสมบูรณ์แบบโดยธรรมชาติแล้วแบบจำลองก็จะ มีความผิดพลาดในพารามิเตอร์



รูปที่ 2.19 ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ

หรือในสมการทางคณิตศาสตร์ปรากฏมาด้วยเสมอ (model errors) ความผิดพลาดของแบบจำลอง อาจอยู่ในรูปความไม่แน่นอนในค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง เมื่อระบบทำงานในสภาพแวดล้อมจริง นอกจากระบบจะได้รับอินพุตอ้างอิงที่ป้อนให้ระบบแล้วยังมีสัญญาณหรือพลังงานอื่นๆ จากภายนอกเข้าไปกระทำกับระบบอีกด้วย สัญญาณที่แทรกเข้ามาจากภายนอกเหล่านี้ รวมเรียกว่า การรบกวน

ในการออกแบบและใช้งานระบบควบคุมนั้น ส่วนใหญ่เราจะใช้ระบบแบบลูปปิด(close-loop) เพราะระบบจะใช้สัญญาณป้อนกลับมาช่วยในการหาค่าความผิดพลาดที่จะใช้ในการควบคุม เพื่อให้ระบบดำเนินงานเองโดยอัตโนมัติได้ เอาต์พุตของระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามอินพุตตลอดเวลาด้วยกลไกการป้อนกลับ (feedback) ซึ่งอาศัยเซนเซอร์ $H(s)$ ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นตัวป้อนสัญญาณกลับ

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} U(s)$$