

การศึกษาแบบจำลองเชิงทดลองเรื่องการไหลของอากาศผ่านรถไฟฟ้า An Experimental Model Study on Air Flow over a Skytrain

มิ่ง โลกิจแสงทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

บทคัดย่อ

การหาค่าแรงดูดที่กระทำบนรถไฟฟ้านั้นนับว่าเป็นเรื่องที่ไม่ง่ายนัก เนื่องจากจะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่มาก ซึ่งค่าใช้จ่ายในการทดลองก็จะสูงมาก เพื่อลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้จึงต้องออกแบบและสร้างแบบจำลองซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับรถไฟฟ้ายักษ์แต่มีขนาดเล็กกว่า แล้วนำไปทดสอบในอุโมงค์ลมที่มีขนาดเล็ก ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ได้จาก การทดลองจะมีความสัมพันธ์กับค่าที่เกิดขึ้นบนรถไฟฟ้ายักษ์ โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์เชิงมิติและความคล้ายคลึงเชิงพลวัต การกระจายของความดันบนจุดต่างๆของรถไฟฟ้าและค่า C_D ในช่วงพิสัยของเรย์โนลด์ส นัมเบอร์จาก 5.71×10^5 ถึง 1.174×10^6 ก็สามารถหาได้จากแบบจำลองค่าทั้งสองนี้จะแสดงอยู่ในรูปของกราฟ

Abstract

Determination of drag over the skytrain could not be easily done . Since this would require a rather large wind tunnel and conducting such an experiment can become very costly. To circumvent this problem a much smaller model, which is similar to the prototype needs to be designed and constructed. This model will then be tested in a smaller wind tunnel. Based on the principle of the dimensional analysis and dynamic similitude, the pressure distribution on the skytrain and its C_D in the range of Reynolds number from 5.71×10^5 to 1.174×10^6 can be obtained from the model test. These results also were given graphically.

1. บทนำ

ปัญหาการจราจรในกรุงเทพมหานครกำลังมีความรุนแรงมากขึ้นระบบขนส่งมวลชนน่าจะเป็นกลจักรสำคัญตัวหนึ่งที่ช่วยบรรเทาให้ปัญหาเบาบางลง รถไฟฟ้าก็เป็นยานขนส่งมวลชนที่มีประสิทธิภาพสูงมากตัวหนึ่งและมีความสำคัญควรแก่การนำมาศึกษาเพื่อพัฒนาและส่งเสริมการศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุจมทั้งตัวด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ความดันที่เกิดขึ้นบนผิวของวัตถุ จะมีค่าแตกต่างกันไปตามจุดต่าง ๆ บนผิววัตถุ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุนั้น ๆ และค่าเรย์โนลด์ส นัมเบอร์[1] ในที่

นี้ได้ทำการศึกษารูปร่างของรถไฟฟ้าและการไหลที่ความเร็วต่าง ๆ กันไปว่าจะมีการกระจายของความดันอย่างไร นอกจากนี้ยังได้ทดลองหาค่าแรงดูดทั้งหมดที่กระทำกับแบบจำลอง ตามหลักกลศาสตร์ของไหลเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลางที่มีความหนืดจะเกิดทั้งแรงดูดเนื่องจากความเค้นเฉือนและเนื่องจากความดันกระทำบนผิว

ในการศึกษานี้ ข้อมูลที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบรูปทรงของยานพาหนะในลักษณะเดียวกัน(แต่วิ่งด้วยความเร็วที่ช้ากว่ารถไฟฟ้ามก) เพื่อให้มีรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่

2. สัญลักษณ์

C_D	: สัมประสิทธิ์ของแรงดูด
C_{Dr}	: สัมประสิทธิ์ของแรงดูดแบบความเสียดทาน
C_{Dp}	: สัมประสิทธิ์ของแรงดูดแบบความดัน
C_p	: สัมประสิทธิ์ของความดัน
D	: แรงดูด (N)
D_r	: แรงดูดแบบความเสียดทาน (N)
D_p	: แรงดูดแบบความดัน (N)
H	: ความสูงของแบบจำลอง (m)
L	: ความยาวของแบบจำลอง (m)
P	: ความดันที่จุดใด ๆ (Pa)
P_∞	: ความดันในสายธารอิสระ (Pa)
Re	: เรย์โนลด์ส นัมเบอร์
V	: ความเร็วของลม (m/s)
W	: ความกว้างของแบบจำลอง (m)
μ	: ความหนืดสัมบูรณ์ (N.s/m ²)
ν	: ความหนืดคินแมติก (m ² /s)
θ	: มุมระหว่างแนวตั้งฉากกับผิวแบบจำลองและแนวการไหล
ρ	: ความหนาแน่นของอากาศ

3. ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบและคำนวณ

3.1 การออกแบบ[2]

ในปัญหานี้ ตัวแปรตามคือ D ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันรวมกับตัวแปรอิสระอื่นได้ตามสมการ(1) แล้วใช้การวิเคราะห์เชิงมิติในการหาตัวแปรไร้มิติ จากฟังก์ชัน ผลที่ได้เขียนได้ตามสมการ(2)

$$F(D, v_i, \Delta p, \rho, \mu, L) = 0 \quad (1)$$

เมื่อ $\Delta p = p - p_\infty$ ตัวแปรไร้มิติจะเป็น

$$\Phi \left(\frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2}, \frac{\rho V L}{\mu}, \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2} \right) = 0 \quad (2)$$

หรือ

$$\phi(C_D, R_e, C_p) = 0$$

การพิจารณาการไหลของแบบจำลองและต้นแบบจะมีความคล้ายคลึงเมื่อ

$$\begin{aligned} \frac{W_M}{W_P} &= \frac{H_M}{H_P} = \frac{L_M}{L_P} \\ Re_M &= Re_P \\ \left(\frac{\rho V L}{\mu} \right)_M &= \left(\frac{\rho V L}{\mu} \right)_P \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อตัวห้อย M และ P หมายถึงแบบจำลอง และ ต้นแบบตามลำดับ

จากต้นแบบของรถไฟฟ้าซึ่งมีความกว้าง 3120 mm ความสูง 2600 mm (ไม่รวมความสูงของช่วงล้อ) และความยาว 23550 mm ความเร็วสูงสุด 80 km/h และความเร็วเฉลี่ย 35 km/h และจาก รายละเอียดบอกคุณลักษณะของอุโมงค์ลมจะได้ว่า ช่วงส่วนการทำงานของอุโมงค์ลมมีขนาด 300 mm x 300 mm ยาว 610 mm (24in) ความเร็วสูงสุดของลมในอุโมงค์ลมเท่ากับ 40.3 m/s การคำนวณหาขนาดของแบบจำลองนั้นผลที่ได้จาก(3)เป็นไปตามตารางที่ 1

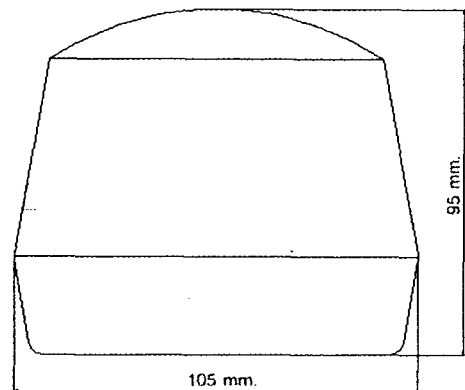
เนื่องจากของไหลที่ใช้ในการทดลองเป็นอากาศ ซึ่งเหมือนกับของไหลที่ผ่านต้นแบบทำให้ $v_M = v_P$ จะได้ $V_M L_M = V_P L_P$ ในการคำนวณสองครั้งแรกจะกำหนดค่าความเร็วของทั้งต้นแบบและแบบจำลองพร้อมทั้งค่าของขนาดของต้นแบบ แล้วหาขนาดของแบบจำลอง

ตารางที่ 1 การคำนวณขนาดของแบบจำลอง

ครั้งที่	V_p (m/s)	V_M (m/s)	H_p (mm)	H_M จาก(3) (mm)	$W \times L \times H$ mm x mm x mm
1	22.2 80 km/h	40.3	2600	1432	1718 x12947 x1432
2	9.72 35 km/h	40.3	2600	627	753 x5680 x627
3	1.023 3.68 km/h จาก(3)	38	2600	70	84 x 500 x 70
แบบจำลองที่ได้จากการออกแบบ					105 x450 x 95

การคำนวณครั้งที่ 1 ปรากฏว่าขนาดของแบบจำลองจะเป็น 1718 mm x 12947 mm x 1432 mm ซึ่งจะมีขนาดทุกส่วนใหญ่กว่าอุโมงค์ลมมาก การคำนวณครั้งที่ 2 ปรากฏว่าขนาดของแบบจำลองจะเป็น 753 mm x 5680 mm x 627 mm ซึ่งจะมีขนาดทุกส่วนใหญ่กว่าอุโมงค์ลมมากเช่นกัน

ด้วยเหตุที่ขัดกำลังความสามารถของอุโมงค์ลมมีจำกัดเช่นนี้ การคำนวณครั้งที่ 3 จึงได้กำหนดค่าขนาดของทั้งต้นแบบและแบบจำลอง



รูปที่ 1 ขนาดของแบบจำลองรถไฟฟ้า

พร้อมทั้งค่าของความเร็วของแบบจำลองแล้วหาความเร็วของต้นแบบ จะได้ขนาดที่นำไปสร้าง 84 mm x 500 mm x 70 mm ดังนั้นการศึกษานี้เป็นไปในช่วงพลัยหนึ่งของความเร็วของรถไฟฟ้าเท่านั้น เพื่อความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์วัด ขนาดของแบบจำลองจะกำหนดให้เป็น 105 mm x 450 mm x 95 mm ดังแสดงในรูปที่ 1

3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของไหลที่มีความหนืด จะเกิดแรงดูดโดยมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดูดแบบความดันและแรงดูดแบบความเสียดทาน

$$D = D_p + D_f \quad (4)$$

แรงดูดรวม D สามารถวัดได้จากเครื่องวัดแรงบนตัวอุโมงค์ลม สำหรับการไหลผ่านแผ่นแบนที่วางทำมุม θ กับทิศทางการไหลเมื่อคิดเฉพาะความดัน ดังนั้นค่าแรงดูดแบบความดันหาได้จาก

$$D_p = \int_{\text{surface}} (P - P_\infty) \cos \theta dA \quad (5)$$

$$C_{Dp} = \frac{D_p}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = \int C_p \cos \theta dA \quad (6)$$

สมการ (6) สามารถหาค่าได้ด้วยการอินทิเกรตเชิงตัวเลข[3] หลังจากนั้นแรงดูดแบบความเสียดทานคำนวณได้จาก (4)

3.3 การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

สำหรับการไหลผ่านแผ่นแบนที่วางขนานกับทิศทางการไหล จะประมาณแรงจุดแบบความเสียดทานซึ่งจะได้จากสูตรต่าง ๆ ดังนี้ การไหลแบบ Laminar[4]

$$C_{Df} = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}} \quad (7)$$

การไหลแบบ Turbulent[5]

$$C_{Df} = \frac{0.455}{(\log Re_L)^{2.58}} \quad \text{เมื่อ } Re_L < 10^9 \quad (8)$$

การไหลแบบผสม(transition) คือ ช่วงแรกจะเป็นการไหลแบบ Laminar แล้วค่อย ๆ กลายเป็นการไหลแบบ Turbulent

$$C_{Df} = \frac{0.455}{(\log Re_L)^{2.58}} - \frac{1610}{Re_L} \quad \text{เมื่อ } 5 \times 10^5 < Re_L < 10^9 \quad (9)$$

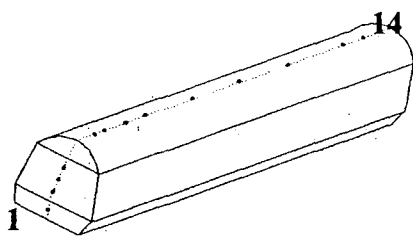
4. การทดลอง

4.1 แบบจำลอง

แบบจำลองที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำด้วยไม้ balsa ทั้งหมด ส่วนท่อนวัดความดันทำจากสายพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3mm ในการสร้างแบบจำลองมีข้อจำกัดบางประการคือช่วงล่างของรถไฟฟ้าไม่ได้ถูกนำมาจำลอง รายละเอียดเล็กน้อยต่างๆ เช่น หน้าต่าง ประตู ของรถไฟฟ้า ไม่ได้ถูกจำลอง

4.2 การติดตั้งจุดวัดความดัน

จุดวัดความดันวางเป็นแบบแถวเดียวบนระนาบผากลางตามแนวแกนยาวของรถ การเลือกจำนวนจุดวัดความดันและตำแหน่งการติดตั้งจะพิจารณาจากรูปร่างของแบบจำลองโดยส่วนใดที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันที่ผิวของแบบจำลองมาก บริเวณนั้นก็จะติดตั้งจุดวัดความดันถี่มาก[4] ซึ่งในการทดลองนั้นทำการติดตั้งจุดวัดความดันทั้งหมด 14 จุด โดยที่ตำแหน่งของจุดวัดความดันเริ่มจากจุดที่ 1 ซึ่งอยู่ด้านล่างของหน้ารถไปถึงจุดที่ 14 ซึ่งอยู่ที่ขอบหลังคาของท้ายรถดังรูปที่ 2 ส่วนสายวัดความดันต่อจากภายในรถมาออกท้ายรถซึ่งเปิดโล่ง ในการทดลองนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมในอุโมงค์ลมไปเรื่อยๆ ตั้งแต่ 18 - 37 m/s

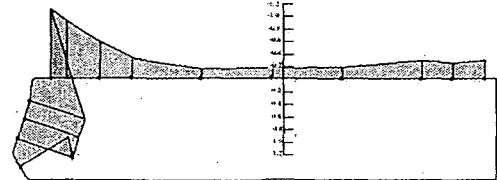


รูปที่ 2 จุดที่ทำการติดตั้งท่อวัดความดันบนแบบจำลองรถไฟฟ้า

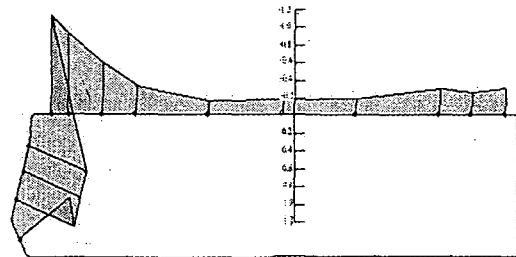
5. ผลการทดลองและข้อสรุป

ลักษณะการกระจายของความดัน หรือ ค่า C_p ที่จุดต่างๆของผิวแบบจำลองตัดกับระนาบผากลางของรถ ที่ความเร็ว 18 m/s และ 37 m/s ซึ่งจะเทียบได้กับค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ Re_L เท่ากับ 5.71×10^5

และ 1.174×10^6 ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 การกระจายของความดันในช่วงค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ส่วนใหญ่จะสอดคล้องกับสมการเบอร์นูลลี[1] เช่นบนหลังคารถซึ่งมีการไหลด้วยความเร็วสูง ความดันก็จะต่ำ



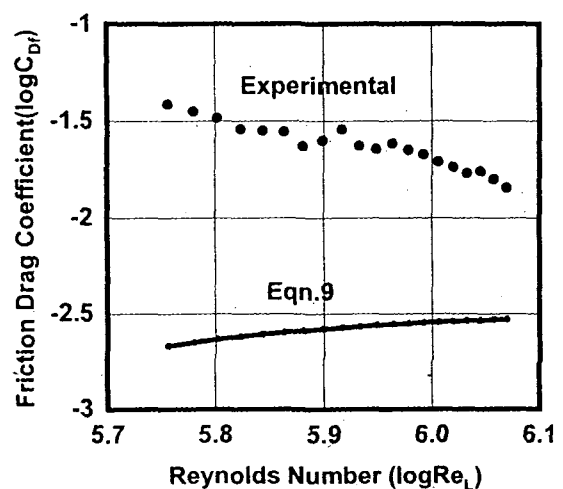
(a)



(b)

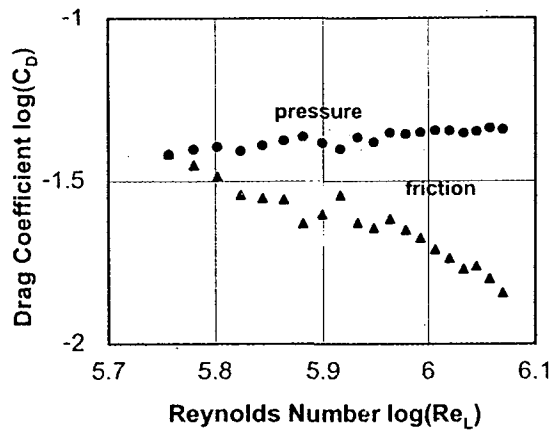
รูปที่ 3 การกระจายของความดันตลอดความยาวแบบจำลองรถไฟฟ้าที่ความเร็ว (a) 18 m/s (b) 37 m/s

ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ของแรงจุดแบบความเสียดทานระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากสมการ(9) แสดงไว้ในรูปที่ 4 ปรากฏว่าผลกระทบจากความหนืดบนรถไฟจะลดลงอย่างมากซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของเทวดตุ้งซึ่งเป็นรูปประกอบของรูปเรขาคณิตหลายรูป[1] และเมื่อเทียบกับกรณีของแผ่นแบนในสมการ(9) แล้วที่ค่าเรย์โนลด์สประมาณ 3×10^6 สมการ(9) น่าจะใช้ประมาณค่าแรงจุดเนื่องจากความเสียดทานได้โดยไม่เกิดความคลาดเคลื่อนจนเป็นผลกระทบมากจนเกินไป



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_{Df} และ Re_L ของแบบจำลองรถไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบบทบาทของแรงดูดแบบความดันและแบบเสียดทานที่มีต่อแบบจำลอง ปรากฏว่าแรงดูดแบบความเสียดทานลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 5 ในขณะที่แรงดูดแบบความดันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในที่นี้พอสรุปได้ว่าเมื่อรถไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วที่สูงขึ้น แรงดูดที่เกิดจากความดันจะเป็นตัวที่ควบคุมพฤติกรรมของรถไฟฟ้าสำหรับช่วงเรย์โนลด์สต่ำๆ ที่ใช้ในการทดลอง และด้วยเหตุที่แรงดูดแบบใดแบบหนึ่งอาจจะมีบทบาทเหนืออีกแบบหนึ่งในช่วงเรย์โนลด์สต่ำๆ กัน ก็ไม่เป็นที่ประหลาดใจเลยที่จะมีลักษณะการไหลที่แตกต่างกันเกิดขึ้น[6]



รูปที่ 5 สมบัติของแรงดูดแบบความดันและแบบความเสียดทานจากการทดลอง สำหรับแบบจำลองรถไฟฟ้า

ในการทดลองนี้ได้ติดตั้งแบบจำลองไว้ในลักษณะให้ด้านล่างของรถไฟฟ้าอยู่ใกล้กับผนังข้างด้านหนึ่งของอุโมงค์ลม ซึ่งคงจะมีส่วนช่วยในการจำลองสภาพการณ์จากผลที่เกิดจากพื้นรางรถไฟได้ดี ส่วนหลังคาและด้านข้างของรถไฟฟ้า อยู่ห่างจากผนังของช่วงส่วนการทำงานในอุโมงค์ลม ประมาณ 2 และ 1 เท่าของขนาดของตัวรถในทิศทางเดียวกันตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นไปได้อย่างยิ่งที่ลักษณะการไหลผ่านแบบจำลองจะมีผลกระทบจากผนังของอุโมงค์ลมบ้าง

สำหรับผลการศึกษาแบบจำลองเชิงทดลองของการไหลผ่านรถไฟ ข้อมูลที่ได้ในครั้งนี้น่าจะไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง แต่ด้วยการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนก็น่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยอ้อม ประเด็นสำคัญในที่นี้ก็คือกฎของความคล้ายคลึงเชิงพลวัต กล่าวคือ ค่าเรย์โนลด์สต่ำๆ เท่ากันค่าสมบัติของแรงดูดก็จะเท่ากันด้วย[6] แต่ด้วยขีดจำกัดด้านสมรรถนะของเครื่องมือทดลอง ในการศึกษาจึงไม่สามารถทำให้เป็นไปตามหลักความคล้ายคลึงที่เราคิดโดยเฉพาอย่างยิ่งตามแนวความยาวของรถ และนอกจากนี้ช่วงความเร็วที่ทดลองก็นำไปเทียบกับช่วงปฏิบัติงานจริงของรถไฟฟ้าไม่ได้ แต่สิ่งที่ไม่อาจปฏิเสธได้เลย ก็คือประโยชน์ต่อการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์โดยการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ด้วยวิธีนี้

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้คงไม่สามารถสัมฤทธิ์ผลไปได้ ถ้าไม่ได้รับความช่วยเหลือด้านข้อมูลจากองค์การรถไฟฟ้ามหานคร จึงขอขอบคุณไว้ในโอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Munson, B.R., Young, D.F., and Okiishi, T.H., "Fundamentals of Fluid Mechanics," 3rd Ed., Wiley, 1998.
2. แดนไท ทองผิว, ชีเรช มนัสยกรณ์, และ สมนึก ญาณิ์ทิระ, "การศึกษาโดยการทดลองของการไหลผ่านรถไฟฟ้ามหานคร," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. Froberg, C-E, "Introduction to Numerical Analysis," 2nd Ed., Addison-Wesley, 1969.
4. Fox, R.W., and , McDonald, A.T. , "Introduction to Fluid Mechanics," 4th Ed., Wiley, 1994.
5. Schlichting, H. , "Boundary-layer Theory," 6th Ed., McGraw-Hill, 1968.
6. Shapiro, A.H., "Shape and Flow: the Fluid Dynamics and Drag," Heinemann, 1977.