

ระบบย่อส่วนพลศาสตร์สมมูลยานยนต์จริง

Equivalent Dynamic Scaling System for Real Vehicle

ปริญญา วัฒนกุลชัย และ วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2186588 โทรสาร 0-2186588 อีเมลล์ Witaya.W@chula.ac.th

Parinya Wattananukulchai and Wittaya Wannasuphprasit*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

Phatumwan, Bangkok 10330, Thailand

Tel: 0-21686588, Fax: 0-21686588, E-mail: Witaya.W@chula.ac.th

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

การพัฒนาต้นแบบยานยนต์จริง มีขั้นตอนที่ซับซ้อน การสร้างยานยนต์จริงเพื่อทดสอบต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูงมาก การวิเคราะห์แบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยให้การพัฒนาได้รวดเร็วขึ้น แต่สมการทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับระบบได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของความไม่สมบูรณ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนารูปแบบใหม่ของการพัฒนาต้นแบบยานยนต์จริงย่อส่วนที่มีพฤติกรรมทางพลศาสตร์สมมูลกับยานยนต์จริง โดยสามารถใช้ยานยนต์จริงย่อส่วนในการออกแบบและปรับปรุงยานพาหนะจริงได้ บทความนี้นำเสนอรูปแบบ กระบวนการออกแบบ และสร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน โดยเริ่มจากการอธิบายพลศาสตร์ของรถยนต์ วิเคราะห์แบบจำลองทางพลศาสตร์โดยใช้หลักของกฎการสร้างแบบจำลอง (Scaling Law) โดยนำข้อมูลอ้างอิงจากยานพาหนะจริง เช่น ระยะทางจากล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางมวล, ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างของล้อ, โมเมนต์ความเฉื่อยของรถ, มวลของรถ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะต้องผ่านการวิเคราะห์จากขบวนการทางคณิตศาสตร์, การจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ, กฎความคล้าย, หลักทฤษฎีของพายบักคิงแฮม ซึ่งสุดท้ายจะอยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

คณะวิจัยได้สร้างต้นแบบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนตามกลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าต่างๆ และสามารถควบคุมยานยนต์ย่อส่วนจริงนี้ด้วยผู้ขับที่ผ่านสัญญาณไร้สาย โดยมีลูปรการตอบสนองอยู่ที่ 100 Hz. เพื่อให้มีระบบพลศาสตร์ที่สมมูลได้พัฒนาสร้างอุปกรณ์ทดลองเพิ่มเติมสำหรับวัดค่าและปรับความเฉื่อยซึ่งทำให้สามารถปรับการกระจายมวลของกลุ่มตัวแปรนี้ได้ตรงกับยานยนต์จริง และนอกจากนี้คณะวิจัยพบว่า กลุ่มตัวแปรแรงเสียดทานของล้อยังไม่สอดคล้อง จึงต้องสร้างอุปกรณ์ทดลองวัดค่าแรงต้านการหมุนจากล้อเมื่อถูกขับเคลื่อนด้วยความเร็วในวัสดุต่างๆ และเมื่อเปลี่ยนวัสดุพื้น

และรูปแบบของยางทำให้สามารถจัดกลุ่มสมมูลได้ โดยรายละเอียดและผลการทดลองแสดงไว้ในบทความ

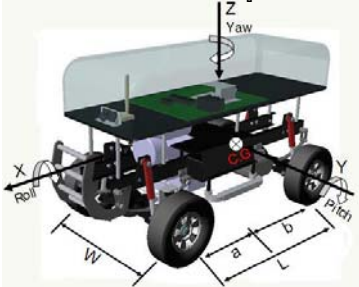
1. คำนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาต้นแบบยานยนต์ ใช้เทคโนโลยีการออกแบบทางวิศวกรรมโดยอาศัยการจำลองจากคอมพิวเตอร์ผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ (Math model) แต่สมการทางคณิตศาสตร์นั้นไม่สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับระบบได้อย่างสมบูรณ์ ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมได้แม่นยำ เป็นประเด็นที่ทำให้ต้องใช้ต้นแบบจริงในการทดสอบเพิ่มเติมซึ่งมีราคาสูงมาก

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่สร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนเพื่อใช้ในการทดสอบ (Hardware in the loop) แทนที่หรือร่วมกับการจำลองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งข้อมูลจากกระบวนการเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงยานพาหนะจริงได้ เนื่องจากเป็นข้อมูลและผลที่เกิดขึ้นจริงกับระบบจริงที่สมมูล

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน แทนที่จะใช้ยานพาหนะจริงคือ ความปลอดภัยของผู้ทดสอบโดยผู้ทดสอบไม่ได้อยู่บนยานพาหนะแต่สามารถรับรู้สิ่งที่เกิดขึ้นได้ผ่านอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูล, สามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไข พื้นถนนและสภาพแวดล้อมในการทดสอบได้ง่ายและรวดเร็ว รวมถึงต้นทุนในการสร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนซึ่งมีราคาถูกกว่ายานพาหนะจริงมาก ทำให้การทดสอบโดยใช้แบบจำลองมีความสำคัญมากขึ้นประกอบกับปัจจุบันความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองได้มีการพัฒนาขึ้นมากทำให้ข้อมูลที่ได้รับความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในวงกว้าง ดังนั้นบทความนี้เสนอการออกแบบและสร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนสำหรับการจำลองทางพลศาสตร์ โดยเริ่มจากการอธิบายถึงพลศาสตร์ของยานพาหนะในแบบสองมิติ (Bicycle model) จากนั้นกล่าวถึงกฎของการสร้างแบบจำลอง (Scaling law) โดยตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบยานพาหนะ

จริงแบบย่อส่วน เช่น ระยะทางจากล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางมวล (a), ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างล้อหน้า (C_{af}), โมเมนต์ความเฉื่อยของรถ (I_z), มวลของรถ (m) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะต้องผ่านการวิเคราะห์จากขบวนการทางคณิตศาสตร์ การจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group), กฎความคล้าย (Similarity law), หลักทฤษฎีของพาย บังคับแถม (PI's theorem) ซึ่งสุดท้ายจะอยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ซึ่งข้อมูลกลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้จะเป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบและสร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน กล่าวคือ ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนที่ออกแบบและสร้างขึ้นมา เมื่อทำการปรับแต่งและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้กลุ่มตัวแปรไร้มิติระหว่างยานพาหนะขนาดจริงและยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแล้ว สามารถนำยานพาหนะจริงแบบย่อไปใช้ทดสอบทางพลศาสตร์แทนยานพาหนะจริงได้ โดยผลที่ได้จากยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนจะมีพฤติกรรมเสมือนกับยานพาหนะขนาดจริงได้อย่างถูกต้องตามเงื่อนไขที่กำหนด



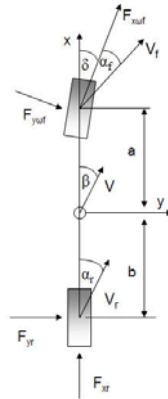
รูปที่ 1 ตำแหน่งและทิศทางตัวแปรของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

2. แบบจำลองพลศาสตร์ของยานพาหนะ (Vehicle Model)

การสร้างสมการพลศาสตร์แบบจำลองนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำสมการแบบจำลองที่ได้ไปสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (ซึ่งกลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้เองจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพความสมมูลระหว่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนกับยานพาหนะจริง)

แบบจำลองยานพาหนะที่ใช้ ณ ที่นี้จะใช้แบบจำลองอย่างง่ายที่เรียกว่า "Linear bicycle model" เป็นแบบจำลองสองมิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านยานยนต์ โดยรวมแนวการเคลื่อนที่ล้อซ้าย-ขวาเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นจึงไม่มีผลจากการโคลงของรถตามแกน Z (แนวตั้งฉากกับระนาบของรถ) และ แนวแกน Y (แนวตั้งฉากกับแนวยาวของรถ) มีสมมติฐานดังนี้

1. รัศมีของการเลี้ยวโค้ง R จะต้องมีความใหญ่เทียบกับ wheelbase (L)
2. มุมบิด θ ของล้อหน้าทั้งสองล้อ จะต้องมีความใกล้เคียงกัน นั่นคือมุมเลี้ยวจะต้องน้อย แต่การเคลื่อนที่บนถนนปกติ นั้นจะมีมุมสลิปด้านข้างไม่มากกว่า $5-10^\circ$
3. ค่ามุมสลิปด้านข้างของล้อ (tire side slip angle) ของล้อหน้า α_f ของทั้งล้อซ้ายและขวา จะต้องมีความใกล้เคียงกัน และค่าสลิปด้านข้างของล้อหลัง α_r ก็เช่นกัน
4. ค่ามุมการสลิปด้านข้าง ที่จุด CG คือ $\beta = \tan^{-1}(v/u)$
5. ไม่พิจารณาแรงเสียดทานอันเนื่องมาจากแรงลมและการกลิ้ง
6. ระบบที่พิจารณาเป็นแบบเชิงเส้น (linear)



รูปที่ 2 แบบจำลองรถของ Bicycle model

จากกฎของ Newton จะได้ว่า

$$ma_x = F_{xwf} \cos \delta - F_{ywf} \sin \delta + F_{xr} \quad (1)$$

$$ma_y = F_{ywf} \cos \delta + F_{xwf} \sin \delta + F_{yr} \quad (2)$$

$$I_z \dot{r} = aF_{ywf} \cos \delta + aF_{xwf} \sin \delta - bF_{yr} \quad (3)$$

ในการจำลอง จะกำหนดสภาวะความเร็ว (forward velocity) มีค่าคงที่ ดังนั้นแรง F_x จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีมุมเลี้ยวเล็กน้อย ทำให้สมการ (1) จึงไม่มีความจำเป็น และสามารถประมาณให้ $\cos \delta \approx 1$ และ $\sin \delta \approx 0$ ซึ่งมีผลให้เทอม $F_{ywf} \sin \delta$ นั้นจะเป็นค่าจำนวนน้อยที่คูณกัน และสามารถประมาณให้เป็นศูนย์ได้ ดังนั้นจากสมการ (2) และ (3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\dot{v} = -ru + \left(\frac{1}{m}\right)(F_{yf} + F_{yr}) \quad (4)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{1}{I_z}\right)(aF_{yf} - bF_{yr}) \quad (5)$$

ในสมการที่ (4) และ (5) F_{yf} และ F_{yr} คือแรงที่กระท่อล้อ ดังนั้นเมื่อแทนตัวแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้น จะได้สมการของระบบดังนี้

$$\dot{v} = \left(\frac{2C_{af} + 2C_{ar}}{mu}\right)v + \left(\frac{2aC_{af} - 2bC_{ar} - u}{mu}\right)r - \left(\frac{2C_{af}}{m}\right)\delta_f \quad (6)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{2aC_{af} - 2bC_{ar}}{I_z u}\right)v + \left(\frac{2a^2C_{af} + 2b^2C_{ar}}{I_z u}\right)r - \left(\frac{2aC_{af}}{I_z}\right)\delta_f \quad (7)$$

3. การวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimension analysis)

ในการเปรียบเทียบความสมมูลระหว่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนกับยานพาหนะจริงนั้นจะนำเอาทฤษฎีของบักกิงแฮมพายมาประยุกต์กับสมการแบบจำลอง Linear bicycle model เพื่อหาสมการกลุ่มตัวแปรไร้มิติของสมการพลศาสตร์ของยานพาหนะโดยกลุ่มค่าพายที่ได้นี้จะกลุ่มตัวแปรไว้สำหรับเปรียบเทียบยานพาหนะแบบจริงแบบย่อส่วน (Model) กับยานพาหนะจริง (Prototype) เพื่อพิสูจน์ว่า

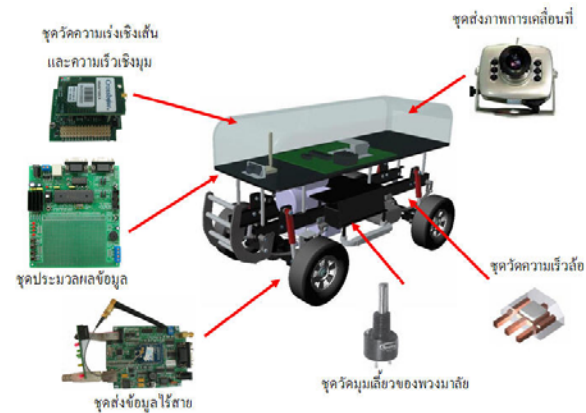
ยานพาหนะทั้งสองเมื่อขนาดเปลี่ยนไปยังคงส่งผลค่าข้อมูลและผลข้างเคียงเช่นเดิมอยู่ จากสมการ (6) และ (7) เมื่อผ่านขบวนการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ จะได้ทั้งหมด 5 กลุ่มดังนี้

$$\Pi_1 = \frac{a}{L}, \Pi_2 = \frac{b}{L}, \Pi_3 = \frac{C_{af}L}{\mu u^2}, \Pi_4 = \frac{C_{ar}L}{\mu u^2}, \Pi_5 = \frac{I_z}{mL^2} \quad (8)$$

จากกลุ่มค่าพายที่ได้นำไปใช้สำหรับการเปรียบเทียบความคล้ายระหว่างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนกับยานพาหนะจริงดังนั้นในการสร้างแบบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนต้องคำนึงถึงโครงสร้างที่สามารถปรับแต่งได้ตามต้องการได้อย่างถูกต้อง

4. การออกแบบและสร้างแบบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้นานพาหนะจริงแบบย่อส่วนอัตรา 1:10 สามารถเปลี่ยนอัตราทดความเร็วได้ 3 ระดับ บนตัวยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งเชิงเส้น (Acceleration module), ความเร็วเชิงมุม (Angular module) ในแกน x, y และ z, อุปกรณ์วัดมุม (Potentiometer), อุปกรณ์วัดความเร็วที่ล้อ (Hall sensor), กล้องส่งภาพการเคลื่อนไหวแบบไร้สาย (1.2GHz), ตัวประมวลผลข้อมูล (dsPIC30F4011) และชุดส่งข้อมูลแบบสาย (Zigbee IEEE 802.15.4, 2.4GHz) สำหรับการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ให้สมมูลกับยานพาหนะจริงด้วย



รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

5. การวัดและปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ

หลังจากสร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน ตามที่ได้ออกแบบไว้แล้ว นำเอากลุ่มตัวแปรไร้มิติที่คำนวณได้มาใช้อ้างอิงในการปรับแต่งความสมมูลเทียบกับยานพาหนะจริง โดยอาศัยข้อมูลจาก NHTSA [1] ได้มีการเก็บข้อมูลมากกว่า 700 คัน ซึ่งได้เลือกยานพาหนะจริงมาอ้างอิงคือ Ford Taurus - Driver + 3 Passengers + Rear Cargo เนื่องจากมีความเหมาะสมกับยานพาหนะที่สร้างขึ้นมา สำหรับขั้นตอนและวิธีการอธิบายดังต่อไปนี้

5.1 จุดศูนย์กลางของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน (Center of Gravity)

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

จากข้อมูลยานพาหนะจริงทำให้ทราบว่ายานพาหนะจริงแบบย่อส่วนควรจะมีจุดศูนย์กลางถ่วงตำแหน่งใด ดังนั้นจึงทำการกำหนดจุดให้ยานพาหนะแบบย่อส่วนแล้วนำไปแขวนผลที่ได้ดังรูปที่ 4



(ก) ก่อนปรับแต่ง



(ข) หลังปรับแต่ง

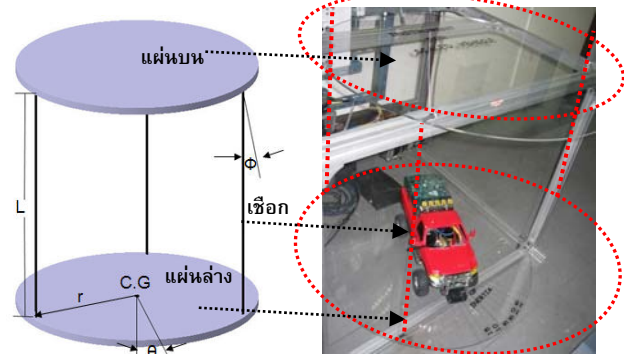
รูปที่ 4 การวัดจุดศูนย์กลางถ่วงของยานพาหนะ จากรูปที่ 4(ก) จะเห็นว่ายานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีจุดศูนย์กลางถ่วงไม่เป็นที่แน่นอนตามยานพาหนะจริง ดังนั้นจึงต้องทำย้ายอุปกรณ์และเพิ่มมวลเพื่อให้ลักษณะทางกายภาพระหว่างยานพาหนะทั้งสองสมมูลกันจากรูปที่ 4(ข) จะเห็นว่าตอนนี้ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีตำแหน่งเดียวกับยานพาหนะจริงแล้ว

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความสมมูลของตัวแปรไร้มิติกลุ่มที่ 1 และ 2

Description	a(m)	b(m)	L(m)	$\Pi_1=a/L$	$\Pi_2=b/L$
Full size	1.1700	1.5200	2.690	0.4349	0.56506
Scaled	0.1212	0.1588	0.280	0.4329	0.56714

5.2 โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

การหาค่าความเฉื่อยเชิงมุมสมมูลนั้น คณะวิจัยได้สร้างอุปกรณ์วัดค่าความเฉื่อยดังแสดงในรูปที่ 5 โดยวัดคาบเวลาที่เกิดจากการแกว่งแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามสูตร อุปกรณ์ทดลองนี้เรียกว่า Three-string torsional pendulum ค่าที่ได้ถือว่ามีความเที่ยงตรงสูง[7]



รูปที่ 5 ทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อยของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วน

จากรูปที่ 5 จะได้สมการในการคำนวณดังนี้

$$\sum M_z : -r(m_o + m_p)g \sin\phi = (I_p + I_p)\ddot{\theta} \quad (9)$$

การทดลองกำหนดให้มุมเชือกมีค่าน้อยเพื่อความเป็นเชิงเส้นในการทดลอง ฉะนั้นจะได้สมการเป็นดังนี้

$$l_{sc} + l_p = \frac{(m_o + m_p)r^2 g}{l} \left(\frac{\tau}{2\pi}\right)^2 \quad (10)$$

ในการทดลอง จำเป็นต้องให้จุดศูนย์กลางถ่วงระหว่างแผ่นอุปกรณ์ทดลองและยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีความสอดคล้องกัน โดยเงื่อนไขในการทดลอง มุมบิดในการแกว่งต้องไม่เกิน 5 องศา และการเก็บข้อมูลจะต้องทำซ้ำไม่ต่ำกว่า 20 ครั้ง หลังจากนั้นนำเอาค่าเฉลี่ยมาใช้ในการคำนวณ จากการทดลองหาพบว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนมีค่ามากกว่ายานพาหนะจริง ดังนั้นจึงปรับแต่งโดยเพิ่มมวลที่สมมาตรเข้าไปในบริเวณใกล้จุดศูนย์กลางถ่วงของยานพาหนะเพื่อลดค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ในทางตรงข้ามหากเพิ่มมวลสมมาตรออกจากจุดศูนย์กลางถ่วงก็จะทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความสมมูลของตัวแปรไร้มิติกลุ่มที่ 5

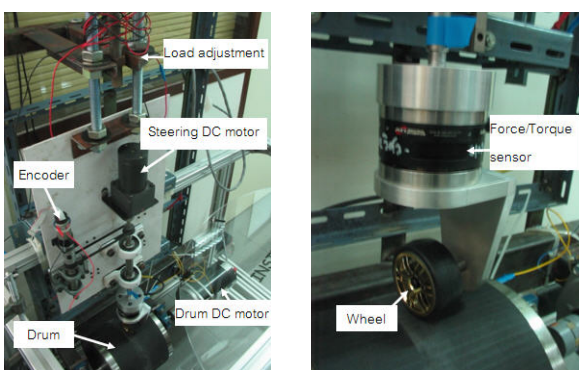
Description	m(kg)	I _{zz} (kg.m ²)	L(m)	$\Pi_5 = I_{zz}/mL^2$
Full size	1857.90	3282.00	2.690	0.2441
Scaled	5.04	0.09748	0.280	0.2466

5.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อ (Cornering Stiffness)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อได้จาก อัตราส่วนระหว่างแรงในการเลี้ยว ต่อ มุมสลิปด้านข้างของล้อ ดังสมการ 11

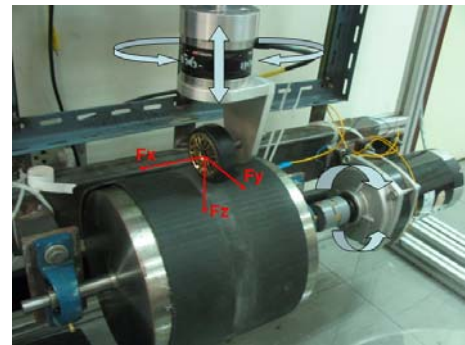
$$C_\alpha = \frac{F_y}{\alpha} \quad (11)$$

งานวิจัยนี้จึงได้สร้างเครื่องทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อ ขึ้นมาดังรูปที่ 6



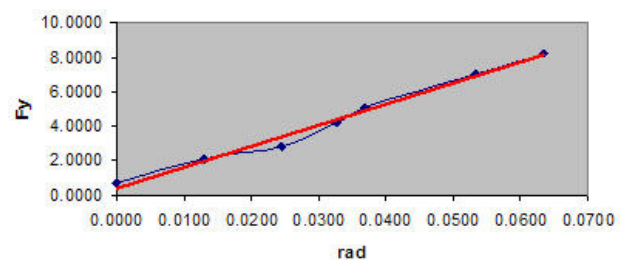
รูปที่ 6 ชุดอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อ

จากรูปที่ 6 หลักการทำงานโดยเริ่มจากให้ตีหมุนด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง ในขณะที่นั้นทำการสั่งให้หมุนมุมเลี้ยวของล้อโดยการควบคุมแบบ PID (เพิ่มและลดมุมได้ทีละ 0.18 องศา) และทำการวัดข้อมูลแรงต้านข้างที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์วัด (Force/Torque sensor)



รูปที่ 7 ทิศทางของแรงที่กระทำต่อล้อ

เงื่อนไขในการทดลองเพื่อหาล้อที่มีความสมมูลกับยานพาหนะจริงได้ทำการทดสอบล้อ 2 ชนิดแต่ละชนิดแบ่งออกเป็น แบบที่มียางใน และไม่มียางใน และพื้นผิวถนน 6 ชนิดแต่ละชนิดมีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันออกไป โดยในการทดลองแต่ละครั้งจะนำพื้นผิวถนนไปติดที่ตีหมุน การเลี้ยวจะอยู่ในช่วง ± 4 องศา ซึ่งเป็นช่วงเชิงเส้นตามพฤติกรรมของล้อ ยาง ค่าที่ได้นำไปแสดงในกราฟแล้ว โดยวิเคราะห์หาค่าความชัน



รูปที่ 8 ความชันมุมเลี้ยวและแรงต้านข้างของล้อการทดลองที่ 5

จากรูปที่ 8 สามารถนำความชันที่ได้ไปแทนในสมการที่ 11 โดยการทดลองทั้งหมดมี 25 การทดลอง สรุปออกมาได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อและผิวถนนแต่ละชนิด

เงื่อนไขทดสอบ	Cf(N/rad)	Cr(N/rad)
ล้อแบบ1 ถนนแบบ1 (มียางใน)	72.77	78.81
ล้อแบบ1 ถนนแบบ1 (ไม่มียางใน)	68.79	70.5
ล้อแบบ1 ถนนแบบ2 (มียางใน)	55.49	47.45
ล้อแบบ1 ถนนแบบ2 (ไม่มียางใน)	32.705	43.21
ล้อแบบ1 ถนนแบบ3 (มียางใน)	44.89	32.12
ล้อแบบ1 ถนนแบบ3 (ไม่มียางใน)	37.44	42.77
ล้อแบบ1 ถนนแบบ4 (มียางใน)	44.38	43.12
ล้อแบบ1 ถนนแบบ4 (ไม่มียางใน)	56.11	50.22
ล้อแบบ1 ถนนแบบ5 (มียางใน)	55.06	36.5
ล้อแบบ1 ถนนแบบ5 (ไม่มียางใน)	47.82	48.82
ล้อแบบ1 ถนนแบบ6 (มียางใน)	40.96	40.32
ล้อแบบ1 ถนนแบบ6 (ไม่มียางใน)	43.66	57
ล้อแบบ2 ถนนแบบ1 (มียางใน)	-	140

จากตารางที่ 3 เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อและผิวถนนแต่ละแบบไปแทนในกลุ่มตัวแปรไร้มิติในกลุ่มที่ 3 และ 4 จากผลการทดลองจะได้ล้อแบบที่ 1(ไม่มียางใน) และถนนแบบที่ 3 ที่มีความสมมูลกับยานพาหนะจริงที่ได้เลือกไว้เป็นต้นแบบ

ความซับซ้อนของการปรับค่าต่างๆ ที่ควรระวังคือต้องไม่ให้การปรับค่ากลุ่มตัวแปรใด ๆ กระทบตัวแปรอื่น และต้องมีอุปกรณ์วัดค่าที่ถูกต้องหลังจากที่ได้ปรับค่าต่างๆ ให้กลุ่มตัวแปรไร้มิติมีความสมมูลกับยานยนต์จริงแล้ว คณะวิจัยก็ได้ยานยนต์ยี่ห้อส่วนที่มีพฤติกรรมทางพลศาสตร์สมมูลกับยานยนต์จริง โดยสรุปความสมมูลของกลุ่มตัวแปรต่างๆ ระหว่างยานยนต์จริง กับยานยนต์ยี่ห้อส่วนดังตารางที่ 4

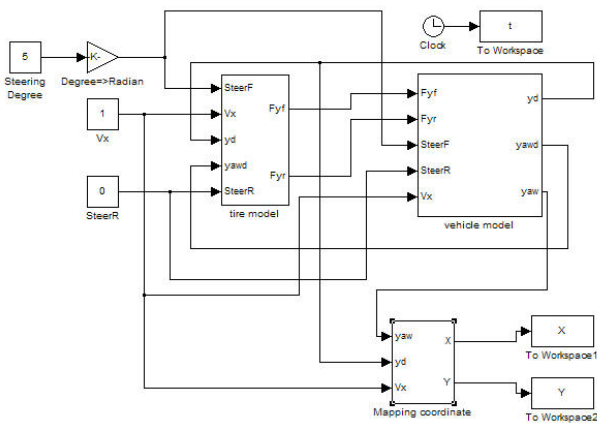
ตารางที่ 4 กลุ่มตัวแปรไร้มิติระหว่างต้นแบบและแบบจำลองหลังปรับ

Description	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5
Full size	0.4393	0.5607	2.0800	2.3761	0.2468
Scaled	0.4349	0.5651	2.0804	2.5725	0.2441

จากตารางที่ 4 สามารถสรุปได้ว่ายานพาหนะจริงแบบยี่ห้อส่วนมีความสมมูลกับยานพาหนะจริงต้นแบบ ดังนั้นสามารถที่จะนำเอายานพาหนะจริงแบบยี่ห้อส่วนไปทดสอบทางพลศาสตร์แทนยานพาหนะจริงได้

6. การจำลองระบบพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม

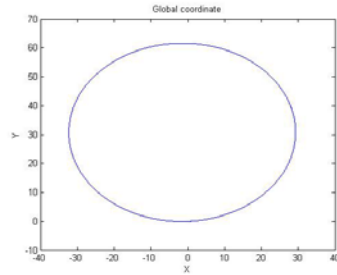
หลังจากทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะจริงแบบยี่ห้อส่วนแล้ว นำค่าตัวแปรที่ได้ไปจำลองระบบทางพลศาสตร์เทียบกับยานพาหนะจริง ผ่านโปรแกรมของ MATLAB ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การจำลองพลศาสตร์ผ่านโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 9 เมื่อแทนตัวแปรของยานพาหนะจริงและยานพาหนะจริงแบบยี่ห้อส่วนจากตารางที่ 5 ลงไปในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น ผลที่ได้จะเห็นว่ายานพาหนะทั้งสองมีความสมมูลกัน เช่นผลจากความเร่งเชิงเส้น, ความเร็วเชิงมุมที่เกิดขึ้นบนตัวยานพาหนะจะแตกต่างกันแค่อัตราส่วนที่ย่อขนาดลงมาเท่านั้น รูปที่ 10-11 แสดงให้เห็นว่ายานพาหนะทั้งสองมี trajectory ที่สมมูลกัน

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22



รูปที่ 10 trajectory ของยานพาหนะจริง



รูปที่ 11 trajectory ของยานพาหนะจริงแบบยี่ห้อส่วน

ตารางที่ 5 ข้อมูลจำเพาะระหว่างยานพาหนะจริงและแบบยี่ห้อส่วน

Description	Full size	Scaled
m(kg)	1857.90	5.04
Iz(kg.m ²)	3282	0.0975
a(m)	1.170	0.124
b(m)	1.520	0.157
L(m)	2.690	0.280
$C_{\alpha r}$ (N/rad)	107462	37.44
$C_{\alpha f}$ (N/rad)	132880	42.77
U(m/s)	8.648	1

7. ระบบควบคุมบนยานพาหนะจริงแบบยี่ห้อส่วน

ในส่วนของการทำงานของระบบทั้งหมดของยานยนต์ยี่ห้อส่วนนี้ ประกอบไปด้วยระบบหลักๆ สามส่วนด้วยกันคือ 1) ระบบสื่อสารรับส่งคำสั่ง 2) ระบบขับเคลื่อนและควบคุม และ 3) ระบบวัดค่าสัญญาณและภาพ

1. ระบบสื่อสารรับคำสั่งจากระบบควบคุมภายนอก โดยค่าที่ไปควบคุมคือสัญญาณความเร่ง, ความเร็ว และมุมเลี้ยว (steering) ไปยังตัวยานพาหนะจริงแบบยี่ห้อส่วนผ่านทางชุดรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สาย (RF Module)

2. ระบบขับเคลื่อนและควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมมุมเลี้ยวของยานยนต์พร้อมทั้งระบบขับเคลื่อนต่างๆ ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยังเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อทำการสั่งการเลี้ยวของมุมล้อ เปลี่ยนอัตราเฟืองทดกำลัง และปรับความเร็ว

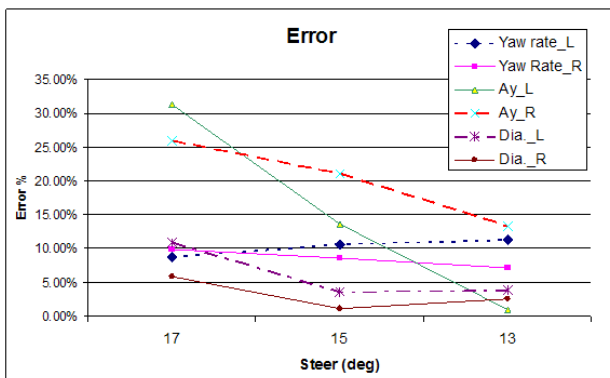
3. ระบบวัดค่าสัญญาณและภาพ ประกอบด้วยเซ็นเซอร์ต่างๆ ที่วัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณและประเมินผลทางพลศาสตร์ นอกจากนั้นยังส่งสัญญาณภาพเคลื่อนไหวของยานยนต์มาด้วย

ระบบโดยรวมทั้งหมดสามารถควบคุมได้ในความถี่ 100 Hz โดยแยกกระบวนการส่งภาพออกจากกระบวนการส่งสัญญาณ ดูรายละเอียดของระบบควบคุมทั้งหมดได้ใน [9]



รูปที่ 13 ยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนสมมูล

จากการทดลองระบบสมมูลของยานพาหนะจริงย่อส่วน เมื่อนำไปทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด พบว่าระบบแสดงค่าความสมมูลได้ดีเมื่อมีมุมเลี้ยวต่ำกว่า 13 องศา ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองยานยนต์ทางคณิตศาสตร์สองมิติ และการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงของล้อ ดังที่นำเสนอไว้ข้างต้น ในรูปที่ 14 เป็นกราฟแสดงค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่จำลองจากโปรแกรม และค่าที่ได้จากอุปกรณ์วัดบนยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนแสดงให้เห็นว่า การนำยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนไปทดสอบแทนยานพาหนะจริงนั้นจะได้ความสมมูลเมื่อขับด้วยมุมเลี้ยวไม่มากเกินไป เนื่องจากผลของการสลีปที่ล้อ ซึ่งไม่ได้อยู่ในช่วงเชิงเส้นที่พิจารณา ดังนั้นจะเกิดค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 14 ค่าผิดพลาดกับมุมเลี้ยว

สนามที่ใช้ทดสอบนี้ [9] จะติดตั้งพื้นผิวชนิดเดียวกับในการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อและผิวถนน ซึ่งในการทดลองกับยานยนต์ย่อส่วนนี้สามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการทดสอบง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย

8. สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและสร้างยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนสำหรับการจำลองทางพลศาสตร์โดยการสร้างและออกแบบจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลและกลุ่มตัวแปรไร้มิติของยานพาหนะจริง โดยสร้างอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นเพื่อปรับค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างของยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนให้สมมูลทางพลศาสตร์ ยานยนต์นี้ได้ถูกติดตั้งระบบขับเคลื่อน ระบบภาพ ระบบวัดค่าสัญญาณและระบบสื่อสารเพื่อควบคุมและส่งค่าต่างๆ ผลการทดลองเบื้องต้นเป็นที่น่าพอใจ โดยปัจจุบันต้นแบบยานพาหนะจริงแบบย่อส่วนนี้ใช้ในงานวิจัยระดับสูงด้านพลศาสตร์ยานยนต์

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- Sean N.Brennan, 2002. On size and control: The use of dimensional analysis in controller design, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- C.L.A.van Maren, J. Sika, 2001. Scaled Vehicle Dynamic of Davinci Project, Delft University of Technology.
- Sean N.Brennan, 1999. Modeling and control issues associated with scaled vehicles, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Hoblet, Philip C, 2003. Scale-model vehicle analysis for the design of a steering controller, US Naval Academy Annapolis.
- Joop Pauwelussen, 1998. Real-time video-based monitoring of vehicle position and orientation within an automated vehicle framework, HAN University.
- Thomas D. Gillespie, 1992. Fundamental of Vehicle Dynamics Society of Automotive Engineers, Inc.
- Shigley, J. E. and J.J Uicker, 1995. Theory of Machines and Mechanisms, McGraw-Hill Co, Singapore.
- ศุภฤติ จันทรานุกุล, 2548. เอกสารประกอบการสอนวิชา Automotive Control, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และคณะ, 2550. รายงานวิจัย Development of Novel Evaluation Systems for Vehicle Dynamics, Driving, and Components.