

การทดสอบมุมเลี้ยวของรถยนต์

VEHICLE STEERING TEST

อาทร ไทยเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

E-mail: artorn33@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษามุมเลี้ยวของรถยนต์ (รถยนต์ 4 ล้อขนาดเล็ก) เมื่อเทียบกับมุมเลี้ยวของรถยนต์ในแบบอ็คเคอร์มันด์และแบบขนาน โดยการนำรถต่างรุ่น ต่างบริษัทผู้ผลิต จำนวน 6 คัน ขึ้นทดสอบบนแท่นวัดมุมเลี้ยว โดยมีการกำหนดมุมเลี้ยวด้านในที่ 5, 10, 15, 20, 25 องศา และทำการวัดค่ามุมเลี้ยวของล้อด้านนอกและนำไปเปรียบเทียบกับค่ามุมเลี้ยวที่คำนวณตามระบบอ็คเคอร์มันด์ ผลการศึกษาพบว่า รถยนต์ทดสอบจำนวน 6 คัน มีมุมเลี้ยวของล้อด้านนอกมากกว่ามุมเลี้ยวระบบอ็คเคอร์มันด์ และเป็นค่ากลางที่อยู่ระหว่าง ระบบบังคับเลี้ยวแบบอ็คเคอร์มันด์ กับ ระบบบังคับเลี้ยวแบบขนาน

คำสำคัญ: อ็คเคอร์มันด์

ABSTRACT

This research was to study the vehicle angle of small car compare with ackermann and parallel steering angle. By bring different manufacturing, different model cars and test by steering angle tester and fix inner wheel angle at 5, 10, 15, 20, 25 degree and measure outer wheel angles compare with ackermann steering geometry theory angle. The result found that all 6 cars have the outer steering angle more than outer steering angle from ackermann steering geometry theory angle. This result is mean value when compare the angle from ackermann steering geometry and parallel steering geometry

KEYWORDS: Ackermann

บทนำ

ในการเรียนการสอนเรื่องระบบบังคับเลี้ยวของนักศึกษาวิศวกรรมยานยนต์ต้องมีการเรียนรู้ถึงหลักการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวซึ่งถือเป็นระบบที่สำคัญระบบหนึ่งของรถยนต์ หากมีการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวผิดพลาดจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยและอาจเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายโดยเฉพาะขณะขับด้วยความเร็วสูงหรือในขณะถนนลื่น

การออกแบบระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์แต่ละรุ่นจะมีมุมเลี้ยวของล้อตามที่มีผู้ผลิตได้ทำการออกแบบไว้ซึ่งแตกต่างกันตามมิติของรถและเหตุผลอีกหลายประการ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการวัดมุมเลี้ยวของรถแต่ละรุ่น โดยมีผู้ผลิตต่างกัน จำนวน 6 คัน และนำค่ามุมเลี้ยวมาเปรียบเทียบกับค่ามุมเลี้ยวที่คำนวณจากระบบออคเคอร์มานด์ เพื่อศึกษาความแตกต่างและวิเคราะห์ถึงเหตุผลของค่าที่แตกต่างกันในกรณีที่มีความแตกต่างกันมาก

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1 ระบบบังคับเลี้ยว (Steering system)

ระบบบังคับเลี้ยวเป็นระบบกลไกที่ทำหน้าที่ควบคุมการเลี้ยวให้รถเลี้ยวไปในทิศทางที่ต้องการ โดยจะทำหน้าที่ควบคุมสัมพันธ์ไปกับระบบต่าง ๆ เช่น ระบบรองรับ ระบบส่งกำลัง และระบบเบรก เป็นต้น ช่วยให้ผู้ใช้ขับขี่มีความเชื่อมั่นในทุก ๆ ยานความเร็วที่รถได้เคลื่อนที่ไป ระบบบังคับเลี้ยวที่ดีต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้

1) มีความคล่องตัวดีในการบังคับเลี้ยว ทั้งในที่แคบและคดเคี้ยว ระบบบังคับเลี้ยวที่ดีต้องสามารถควบคุมทิศทาง การเลี้ยวของล้อหน้าทั้งสองข้างได้เป็นอย่างดี และมีความคล่องตัวสูง

2) ความเหมาะสมในการบังคับเลี้ยว จุดมุ่งหมายที่สำคัญของระบบบังคับเลี้ยวก็เพื่อให้การบังคับเลี้ยวสะดวกสบาย ขณะที่รถมีความเร็วต่ำพวงมาลัยจะหนักและเบาขึ้นเมื่อรถมีความเร็วสูงขึ้น

3) การคืนกลับของล้อหลังจากการเลี้ยว ต้องกระทำได้อย่างคล่องตัวและสม่ำเสมอ

4) รับการถ่ายทอดอาการเด่นจากพื้นถนนได้น้อย พื้นผิวถนนที่ขรุขระจะต้องไม่มีผลกระทบกับการบังคับเลี้ยว

5) การสูญเสียหารควบคุมและการส่งกำลังของพวงมาลัยจะต้องมีน้อย

ระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์ได้รับการพัฒนา มาเป็นลำดับจนถึงปัจจุบัน เพื่อให้การบังคับเลี้ยวของล้อหน้าเป็นไปด้วยความสะดวก นุ่มนวล แบ่งวิธีบังคับเลี้ยวได้ดังต่อไปนี้

1) ระบบจุดหมุนจุดเดียว (Single Pivot System) ปกติรถยนต์จะมีล้อเพียง 4 ล้อ โดยจุดหมุนของล้อนั้นมีแผ่นเหล็กกลมขนาดใหญ่รองอยู่ จึงเรียกว่า ล้อที่ 5 (Fifth Wheel Steering) บริเวณกึ่งกลางเพลาล้อหน้ามีสลักใหญ่ (King-Pin) เป็นจุดหมุนสำหรับการเลี้ยว โดยมีแผ่นเหล็กกลมขนาดใหญ่ (Fifth Wheel) รองเพื่อลดความฝืด ข้อเสียของวิธีบังคับเลี้ยวแบบนี้ คือ ล้อและเพลาคือเคลื่อนที่ไปด้วยกัน ทำให้มีน้ำหนักมาก และรถจะเสียการทรงตัวได้ถ้าเลี้ยวด้วยความเร็ว วิธีบังคับเลี้ยวแบบนี้เหมาะสำหรับรถพ่วง (Trailers) แต่ไม่เหมาะสำหรับรถยนต์ทั่วไป

2) แบบออคเคอร์มานด์หรือแบบจุดหมุนสองจุด (Ackermann or Double Pivot System) การทำงานของระบบบังคับเลี้ยวแบบนี้ใช้กับระบบรองรับน้ำหนักแบบคานแข็ง โดยที่ปลายทั้งสองของคานหน้านั้นมีจุดหมุน 2 จุด โดยหมุนรอบสลักล้อหน้า ชุดแกนล้อหน้าด้านในเจาะรูสำหรับสวมสลักล้อหน้าเข้ากับคานหน้า ด้านปลายของชุดแกนล้อหน้าจะเป็นเพลาสลักล้อรถ ล้อรถจะหมุนรอบปลายแกนเพลลา ซึ่งเป็นส่วนปลายของชุดแกนล้อ ชุดแกนล้อหน้าจะมีแขนบังคับเลี้ยวยึดติดอยู่ปลายแขนบังคับเลี้ยวจะต่ออยู่กับคันส่ง โดยลูกหมากปลายอีกด้านหนึ่งของแขนบังคับเลี้ยวจะต่ออยู่กับคันชัก

ถ้าพวงมาลัย แขนกระปุกพวงมาลัยหรือขาไก่ จะช่วยเป็นตัวทด ทำให้พวงมาลัยเบาลง ถ้าพวงมาลัยให้เลี้ยวขวา ขาไก่จะเลื่อนไปทางท้ายรถ ดึงคันชักไปด้วยทำให้แขนบังคับเลี้ยว (Steering Knuckle Arm) เคลื่อนที่ตาม แขนบังคับเลี้ยวจะยึดติดเป็นชุดเดียวกับชุดแกนล้อ โดยมีสลักล้อหน้าเป็นจุดหมุน ทำให้ล้อซ้ายเลี้ยวไปทางขวา คันส่งที่ต่ออยู่กับแขนบังคับเลี้ยวด้านซ้ายจะถูกดึงไปทางด้านซ้ายมือ ทำให้ล้อขวาเลี้ยวไปทางด้านขวาด้านขวา ในทางตรงกันข้าม ถ้าพวงมาลัยเลี้ยวซ้าย กลไกต่าง ๆ ก็จะทำตรงกันข้าม ระบบบังคับเลี้ยวแบบนี้รูดอล์ฟ ออคเคอร์มานด์ (Rudolf Ackermann) เป็นผู้คิดค้นออกแบบและเขียนทาวด์

(Feantaund) ได้นำหลักการมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน

1.2 ก้านต่อบังคับเลี้ยว (Steering Linkages)

ก้านต่อบังคับเลี้ยว คือ ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดการเคลื่อนที่ในระบบบังคับเลี้ยว ประกอบด้วยก้านต่อและแขนบังคับเลี้ยว โดยได้รับการส่งถ่ายกำลังจากกระดูกพวงมาลัย การเคลื่อนที่ไปยังล้อหน้าทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ก้านต่อบังคับเลี้ยวมีอยู่หลายแบบที่นิยมใช้กัน แบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

ก้านต่อบังคับเลี้ยวที่ใช้กับระบบรองรับแบบนี้จะมีจุดต่อหลายจุด เพื่อให้ล้อรถแต่ละด้านสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้อย่างอิสระ ระยะห่างระหว่างแขนที่บังคับเลี้ยวจะเปลี่ยนไป คั่นส่งจึงถูกนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมระหว่างล้อทั้งสองด้าน ถ้าใช้คั่นส่งเพียงจุดเดียว มุมโทอินจะเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ล้อเกิดการเต้นขึ้นลง ดังนั้นจึงต้องใช้คั่นส่งถึงสองจุดและเชื่อมต่อการส่งถ่ายแรงด้วยคั่นส่ง ส่วนปลอกสปริงมุมโทอินจะถูกติดตั้งอยู่ระหว่างลูกหมากและคั่นส่งกรณีรถยนต์ที่ใช้กระดูกพวงมาลัยแบบเฟืองสะพานนั้น เฟืองสะพานจะทำหน้าที่แทนคั่นส่งถ่ายแรงไปยังลูกหมากและล้อ

ก้านต่อบังคับเลี้ยวที่ใช้กับระบบรองรับแบบคานแข็งจะประกอบด้วย ขาไก่ คั่นชัก แขนบังคับเลี้ยว คั่นส่งและลูกหมากคั่นส่ง ก้านต่อบังคับเลี้ยวระบบรองรับแบบคานแข็งจะเคลื่อนที่ในลักษณะขึ้นลงในแนวตั้งตามทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวถังรถ จึงไม่จำเป็นจะต้องมีปลอกปรับตัวคั่นส่งต่อไปยังแขนบังคับเลี้ยวทั้งด้านซ้ายและด้านขวา เนื่องจากใช้คั่นส่งตัวเดียว ลูกหมากที่ปลายคั่นส่งจะทำหน้าที่ยอมให้สปริงแหวนเคลื่อนตัวขึ้นลงได้

1.3 ส่วนประกอบของก้านต่อบังคับเลี้ยว

ก้านต่อบังคับเลี้ยวที่ใช้ในการบังคับเลี้ยวของรถยนต์ จะประกอบด้วยที่สำคัญดังนี้

1) ขาไก่ (Pitman Arm) ทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงเคลื่อนจากกระดูกพวงมาลัยไปยังคั่นชักขาไก่ จะมีลักษณะของปลายด้านใหญ่เป็นเทเปอร์ และที่ปลายของเทเปอร์จะถูกเจาะเจาะเป็นร่องให้มีขนาดเท่ากับเพลลาของกระดูกพวงมาลัย ขาไก่จะถูกยึดด้วยนอตประกอบเข้ากับเพลลา ส่วนปลายด้านเล็กของขาไก่

จะยึดอยู่กับคั่นชักและก้านดึงลูกหมากเพลลาของกระดูกพวงมาลัย

2) แขนบังคับเลี้ยว (Knuckle Arm) แขนบังคับเลี้ยวเป็นแขนที่ยึดติดกับข้อบังคับเลี้ยวจะทำหน้าที่ส่งถ่ายการเคลื่อนที่ของคั่นส่งไปยังล้อหน้า โดยผ่านทางแกนบังคับเลี้ยว

3) แกนบังคับเลี้ยว (Steering Knuckle) จะเป็นตัวรองรับภาระงานที่มากกระทำกับล้อหน้านอกจากนั้นแกนบังคับเลี้ยวยังทำหน้าที่หมุนเพลาล้อให้หมุน ซึ่งจะถูกบังคับให้หมุนเคลื่อนที่ไปมาได้ด้วยลูกหมาก หรือสลักยึดระหว่างคานล้อหน้ากับแขนบังคับเลี้ยว

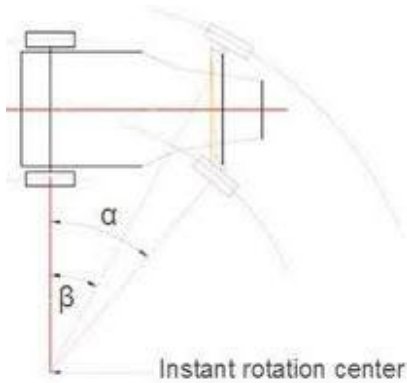
4) คั่นชัก (Drag Link) คือ แขนต่อระหว่างกระดูกพวงมาลัยกับแขนบังคับเลี้ยว รถที่ใช้ระบบรองรับน้ำหนักแบบคานแข็งมักจะใช้คั่นชัก คั่นชักจะทำเป็นท่อนปลายมีสลักกลมและใส่สปริงกันสะเทือน สลักกลมจะทำหน้าที่เป็นลูกหมากต่อเข้ากับขาไก่พวงมาลัย ซึ่งจะส่งต่อแรงจากการเคลื่อนที่จากขาไก่ไปยังคั่นส่ง

5) คั่นส่ง (Tie Rod) คั่นส่งอาจอยู่ด้านหลังหรือด้านหน้าของเพลลาหน้า คั่นส่งทำด้วยเหล็กกลวง โดยที่ปลายทั้งสองทำเป็นเกลียว มักจะทำเป็นเกลียวซ้ายข้างหนึ่งและเกลียวขวาข้างหนึ่ง เกลียวนี้เป็นที่สวมใส่ลูกหมากและมีเหล็กยึด (Clamp) กันคลาย หรืออาจทำเป็นนอตล็อกและมีแหวนพับล็อก เกลียวของปลายคั่นส่งและเกลียวลูกหมากเป็นเกลียวซ้ายและเกลียวขวา จึงทำให้สามารถปรับมุมโทอินได้

6) ลูกหมาก (Tie-Rod End or Ball Socket Joint) ที่ส่วนปลายคั่นส่งจะมีลูกหมากเป็นตัวต่อกับแขนบังคับเลี้ยวและก้านต่ออื่น เช่น ก้านต่อกลาง ซึ่งจะต้องหมุนและเดินได้ จุดหมุนจึงทำเป็นรูปทรงกลมโดยมีสลักยึดกับชิ้นส่วนอื่นได้ ลูกหมากจะมี Ball Stud และเข้าประกอบ (Ball Socket) ส่วนใหญ่เข้าลูกหมากประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เป็นเหล็ก ซึ่งต้องอัดจาระบีชนิดทนน้ำตามระยะเวลา และมีสปริงดันเข้าเข้ากระชับกับ Ball Stud ในปัจจุบันลูกหมากหลายแบบใช้สารไนลอนเป็นเข้า จึงไม่จำเป็นต้องอัดจาระบี ลูกหมากชนิดนี้จึงไม่มีหัวอัดจาระบี

การเลี้ยวของล้อรถยนต์เพื่อเข้าโค้ง จะมีการเลี้ยวที่ล้อหน้า ในกรณีที่ล้อหน้ามี 1 ล้อเช่นรถ 3 ล้อ ขณะเข้าโค้ง รถก็จะมีการเคลื่อนที่ตามล้อหน้า 1 ล้อ แต่ในกรณีรถที่มีล้อด้านหน้า 2 ล้อ เมื่อรถแล่นเข้าโค้ง

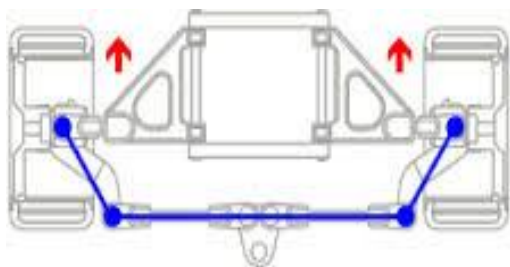
ล้อหน้าทั้งสองจะเลี้ยวเป็นมุมอย่างมีความสัมพันธ์กัน
ดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 มุมเลี้ยวของล้อขณะเข้าโค้ง

จากรูปที่ 1 มุมเลี้ยวของล้อด้านในจะมีค่ามากกว่า
มุมเลี้ยวของล้อด้านนอก เพื่อให้ล้อหน้าที่เลี้ยวตั้งฉาก
กับรัศมีโค้ง ซึ่งรถแต่ละคันจะมีค่าความสัมพันธ์ของมุม
เลี้ยวที่แตกต่างกันตามค่าของ Wheelbase และ Track
Width ของรถแต่ละคัน โดยถ้าค่ามุมเลี้ยวของล้อหน้า
ทั้งสอง ไม่สัมพันธ์กันในขณะเลี้ยว ก็จะทำให้การยึด
เกาะถนนของล้อหน้าขณะเข้าโค้งทำได้ไม่ดี ซึ่งอาจเกิด
เสียงดังขณะเลี้ยวโค้ง หรือเกิดการสึกหรอของยางเร็ว
อย่างผิดปกติ

ในการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวแบบนี้เรียกว่า
ระบบAckermann Steering Geometry โดยจะทำให้
ให้รูปทรงกลไกของระบบบังคับเลี้ยว เกิดเป็นรูปทรง
สี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งทำให้เกิดมุมเอียงของแขนบังคับ
เลี้ยวทั้งสองข้างที่ทำให้การเลี้ยวของล้อซ้ายและ
ล้อขวานั้นมีความสัมพันธ์กัน กลไกระบบบังคับเลี้ยว
แบบออคเคอร์มานด์ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบบังคับเลี้ยวแบบออคเคอร์มานด์



รูปที่ 3 แขนบังคับเลี้ยวของตุ้มล้อ

จากรูปที่ 3 มุมของแขนบังคับเลี้ยวจะถูกคำนวณ
โดยใช้ค่ามุมเลี้ยวตามทฤษฎี ค่า Wheelbase และค่า
Track Width มาทำการคำนวณการออกแบบระบบ
บังคับเลี้ยว ดังในสมการที่ 1

$$2r \sin \varphi = r \sin (\varphi + \alpha) + r \sin (\varphi - \beta) \quad (1)$$

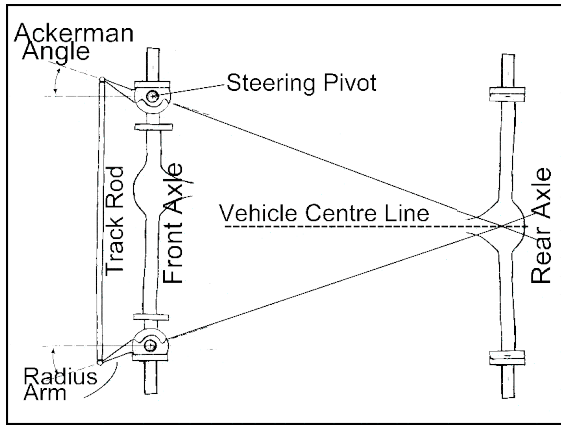
- เมื่อ r คือ ความยาวของแขนบังคับเลี้ยว
- φ คือ มุมของแขนบังคับเลี้ยว
- α คือ มุมเลี้ยวของล้อด้านใน
- β คือ มุมเลี้ยวของล้อด้านนอก

โดยที่มุมเลี้ยวของล้อด้านในและล้อด้านนอก
สามารถคำนวณดังในสมการที่ 2 และสมการที่ 3

$$\tan \alpha = \frac{\text{Wheelbase}}{x - 0.5 \text{ TrackWidth}} \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{\text{Wheelbase}}{x + 0.5 \text{ TrackWidth}} \quad (3)$$

- เมื่อ x คือ รัศมีการเลี้ยวของรถ

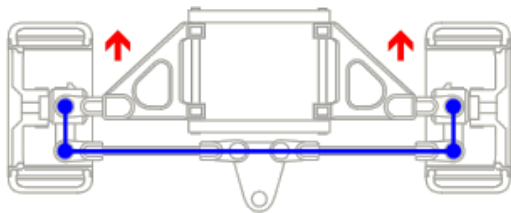


รูปที่ 4 การลากเส้นมุมของแขนบังคับเลี้ยวอ็คเคอร์มานด์

การคำนวณมุมของแขนบังคับเลี้ยวอ็คเคอร์มานด์ อีกวิธีการทำโดยการลากเส้นจากจุดหมุนของล้อหน้า ทั้งสองข้างมาตัดกันที่แนวของเพลาหลัง ดังในรูปที่ 4 ซึ่งจะสามารถคำนวณมุมของแขนบังคับเลี้ยวได้ ดังในสมการที่ 4

$$\tan \phi = \frac{\text{Track Width}}{2 \text{ Wheelbase}} \quad (4)$$

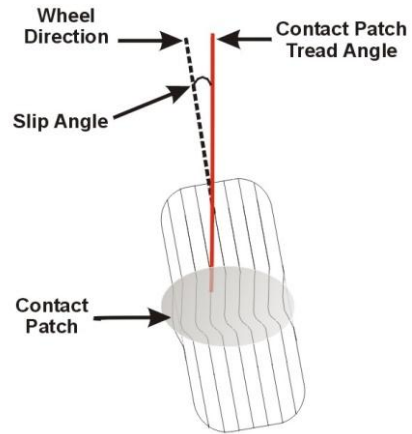
การออกแบบระบบบังคับเลี้ยวอีกแบบเรียกว่า ระบบบังคับเลี้ยวแบบขนาน (Parallel Steering Geometry) ดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระบบบังคับเลี้ยวแบบขนาน

กลไกของระบบบังคับเลี้ยวแบบนี้ แขนบังคับเลี้ยวของล้อด้านซ้ายและด้านขวาจะขนานกัน ส่งผลให้เมื่อทำการเลี้ยวแล้ว จะมีมุมเลี้ยวของล้อด้านนอกและมุมเลี้ยวของล้อด้านในเท่ากัน

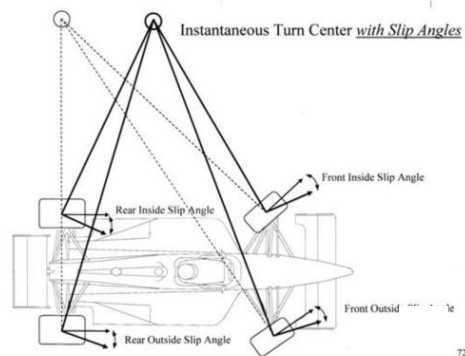
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการออกแบบระบบบังคับเลี้ยว ได้แก่ Tyre Slip Angle คือ ค่าความแตกต่างระหว่างมุมเลี้ยวของล้อและทิศทางที่ยางกำลังตัวไป โดย Tyre Slip Angle จะเกิดขณะเข้าโค้งที่ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางสูง



Wheel Turning Left

รูปที่ 6 Tyre Slip Angle ของยางขณะเลี้ยวซ้าย

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นการเกิด Tyre Slip Angle ที่ทำให้แนวการกลิ้งตัวของยางเบี่ยงเบนไปจากแนวของยางปกติ จากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขณะเข้าโค้ง เพราะฉะนั้นยางที่มีแก้มยางเตี้ย จะพบว่า Tyre Slip Angle จะมีค่าน้อยกว่ายางที่มีแก้มยางสูง



รูปที่ 7 Tyre Slip Angle ของยางทั้ง 4 เส้น ขณะเข้าโค้ง

จากรูปที่ 7 จะเห็นการเกิด Tyre Slip Angle ทั้ง 4 ล้อ ขณะเข้าโค้งซ้าย ทำให้ความแตกต่างของมุมเลี้ยวของล้อหน้า ระหว่างล้อด้านซ้ายและด้านขวาลดลง

ผลการทดลอง

เมื่อนำรถทดสอบขึ้นสู่แท่น เพื่อทำการทดสอบวัดมุมเลี้ยวของล้อหน้า ซึ่งรถทดสอบขณะทำการวัดมุมเลี้ยวสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 8 โดยใช้เครื่องมือวัดมุมเลี้ยวของล้อหน้า และจะทำการทดสอบรถยนต์ครั้งละหนึ่งคัน จากจำนวนรถยนต์ที่นำมาทำการทดสอบทั้งหมด 6 คัน



รูปที่ 8 รถทดสอบขณะทำการวัดมุมเลี้ยว

จากการทดสอบรถยนต์ 4 ล้อขนาดเล็ก ซึ่งมีรุ่นของรถยนต์และบริษัทผู้ผลิตรถยนต์แตกต่างกัน จำนวนทั้งหมด 6 คัน ก่อนทำการทดลอง ได้ทำการบันทึกค่า Track Width และ Wheelbase ของรถแต่ละคัน ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นจะเริ่มทำการทดลองวัดมุมล้อ โดยจะทำการตั้งให้ล้อตรงและเริ่มหมุนพวงมาลัยของรถและให้มุมล้อด้านในเลี้ยวเพิ่มขึ้นทีละ 5 องศา จนถึงค่ามุมเลี้ยวของล้อด้านในสูงสุด 25 องศา โดยจะทำการวัดค่ามุมเลี้ยวของล้อด้านในเป็นหลัก และทำการวัดค่ามุมเลี้ยวของล้อด้านนอก โดยมีการทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยและทำการบันทึกผลตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 8

ตารางที่ 1 ค่า Track Width และ Wheelbase

รถคันที่	Track Width (cm)	Wheelbase (cm)
1	144	245
2	149	243.5
3	147	263
4	148	258
5	147.5	247
6	148	255

จากตารางที่ 1 นั้น เมื่อนำค่า Track Width และ Wheelbase ไปคำนวณมุมเลี้ยวของล้อด้านนอกของรถทดสอบทั้ง 6 คันแล้ว สามารถแสดงความแตกต่างของมุมเลี้ยวล้อด้านนอกระหว่างมุมของรถทดสอบ มุมที่ได้จากวิธีการคำนวณ และมุมที่ได้จากวิธีการลากเส้นของรถทดสอบทั้ง 6 คันได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณมุมของแขนบังคับเลี้ยว

รถคันที่	มุม ϕ ด้วยวิธีการคำนวณ (องศา)	มุม ϕ ด้วยวิธีการลากเส้น (องศา)
1	28	16.19
2	29	17.01
3	27	15.61
4	28	16.00
5	28	16.62
6	28	16.18

จากตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างมุมของการคำนวณมุมของแขนบังคับเลี้ยวที่ได้จากวิธีการคำนวณกับวิธีการลากเส้น พบว่า วิธีการคำนวณนั้นมีค่ามากกว่าวิธีการลากเส้น และเมื่อนำมุมของแขนบังคับเลี้ยวนี้ไปออกแบบสำหรับการนำไปใช้งาน จะพบว่า วิธีการคำนวณนั้นจะมีมุม Toe Out มากกว่าวิธีการลากเส้นอีกด้วย

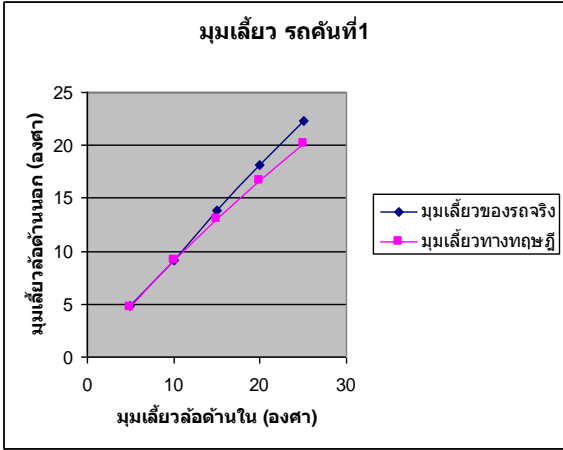
ทั้งนี้สามารถแสดงตารางค่ามุมเลี้ยวของล้อด้านนอกของรถทดสอบทั้งหมด 6 คัน ตามลำดับ ได้ดังต่อไปนี้

1) รถทดสอบคันที่ 1 สามารถแสดงตารางค่ามุมเลี้ยวของล้อด้านนอก ได้ดังตารางที่ 3

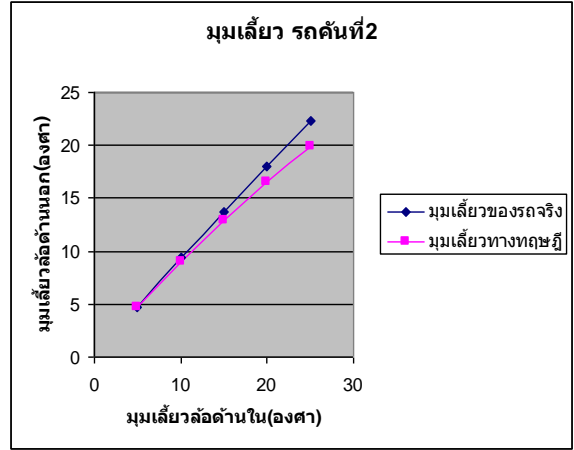
ตารางที่ 3 ค่ามุมเลี้ยวของล้อด้านนอกของรถคันที่ 1

มุมเลี้ยวของล้อด้านใน (องศา)	มุมเลี้ยวของล้อด้านนอก (องศา)		
	การทดสอบรถ	วิธีการคำนวณ	วิธีการลากเส้น
5.00	4.90	4.75	4.88
10.00	9.50	9.07	9.50
15.00	13.50	13.03	13.90
20.00	17.90	16.69	18.05
25.00	22.30	20.10	22.00

จากตารางที่ 3 แสดงมุมเลี้ยวของล้อด้านนอกที่คำนวณได้จากการทดสอบรถ วิธีการคำนวณ และวิธีการลากเส้น พบว่าที่มุมเลี้ยวของล้อด้านใน 25 องศา มีความแตกต่างของมุมเลี้ยวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการคำนวณ 2.2 องศา และมีความแตกต่างของมุมเลี้ยวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการลากเส้น 0.3 องศา และสามารถสร้างกราฟความแตกต่างของมุมเลี้ยวล้อด้านนอกระหว่างมุมของรถจริงกับมุมทางทฤษฎีได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความแตกต่างของมมเลียวล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎี ของรถคันที่ 1



รูปที่ 10 ความแตกต่างของมมเลียวล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎี ของรถคันที่ 2

2) รถทดสอบคันที่ 2 สามารถแสดงตารางค่ามมเลียวของล้อด้านนอก ได้ดังตารางที่ 4

3) รถทดสอบคันที่ 3 สามารถแสดงตารางค่ามมเลียวของล้อด้านนอก ได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ค่ามมเลียวของล้อด้านนอกของรถคันที่ 2

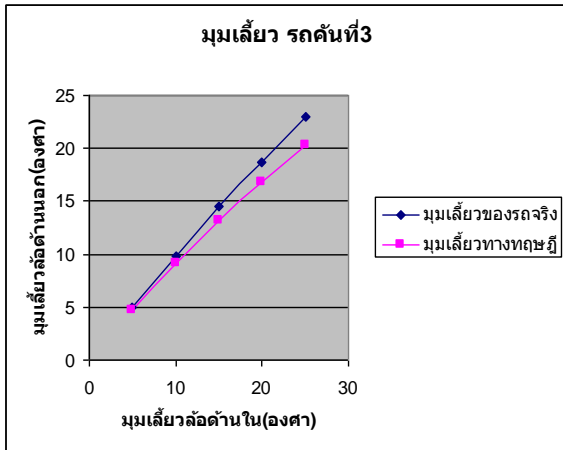
ตารางที่ 5 ค่ามมเลียวของล้อด้านนอกของรถคันที่ 3

มมเลียวของล้อด้านใน (องศา)	มมเลียวของล้อด้านนอก (องศา)		
	การทดสอบรถ	วิธีการคำนวณ	วิธีการลากเส้น
5.00	4.90	4.74	4.87
10.00	9.70	9.04	9.50
15.00	13.80	12.96	13.89
20.00	18.00	16.57	17.95
25.00	22.40	19.94	21.85

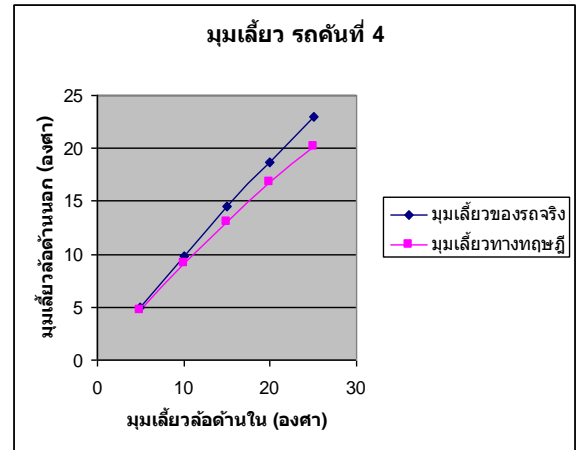
มมเลียวของล้อด้านใน (องศา)	มมเลียวของล้อด้านนอก (องศา)		
	การทดสอบรถ	วิธีการคำนวณ	วิธีการลากเส้น
5.00	5.00	4.76	4.89
10.00	9.90	9.11	9.52
15.00	14.50	13.11	13.96
20.00	18.30	16.82	18.15
25.00	22.70	20.29	22.10

จากตารางที่ 4 แสดงมมเลียวของล้อด้านนอกที่คำนวณได้จากการทดสอบรถ วิธีการคำนวณ และวิธีการลากเส้น พบว่าที่มมเลียวของล้อด้านใน 25 องศา มีความแตกต่างของมมเลียวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการคำนวณ 2.46 องศา และมีความแตกต่างของมมเลียวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการการลากเส้น 0.55 องศา และสามารถสร้างกราฟความแตกต่างของมมเลียวล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎีได้ดังรูปที่ 10

จากตารางที่ 5 แสดงมมเลียวของล้อด้านนอกที่คำนวณได้จากการทดสอบรถ วิธีการคำนวณ และวิธีการลากเส้น พบว่าที่มมเลียวของล้อด้านใน 25 องศา มีความแตกต่างของมมเลียวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการคำนวณ 2.41 องศา และมีความแตกต่างของมมเลียวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการการลากเส้น 0.6 องศา และสามารถสร้างกราฟความแตกต่างของมมเลียวล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎีได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความแตกต่างของมุลีเยวล้อด้านนอก ระหว่างมุลีเยวของรถจริงกับมุลีเยวทางทฤษฎี ของรถคันที่ 3



รูปที่ 12 ความแตกต่างของมุลีเยวล้อด้านนอก ระหว่างมุลีเยวของรถจริงกับมุลีเยวทางทฤษฎี ของรถคันที่ 4

4) รถทดสอบคันที่ 4 สามารถแสดงตารางค่ามุลีเยวของล้อด้านนอก ได้ดังตารางที่ 6

5) รถทดสอบคันที่ 5 สามารถแสดงตารางค่ามุลีเยวของล้อด้านนอก ได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ค่ามุลีเยวของล้อด้านนอกของรถคันที่ 4

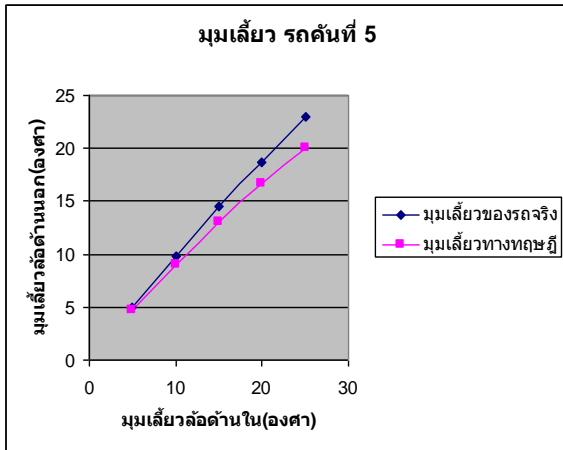
ตารางที่ 7 ค่ามุลีเยวของล้อด้านนอกของรถคันที่ 5

มุลีเยวของล้อด้านใน (องศา)	มุลีเยวของล้อด้านนอก (องศา)		
	การทดสอบรถ	วิธีการคำนวณ	วิธีการลากเส้น
5.00	5.00	4.76	4.88
10.00	9.90	9.09	9.50
15.00	14.70	13.07	13.88
20.00	18.40	16.75	17.96
25.00	22.34	20.19	21.87

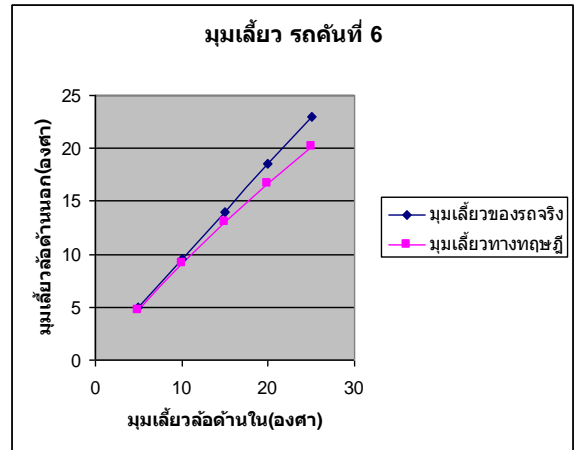
มุลีเยวของล้อด้านใน (องศา)	มุลีเยวของล้อด้านนอก (องศา)		
	การทดสอบรถ	วิธีการคำนวณ	วิธีการลากเส้น
5.00	5.00	4.75	4.87
10.00	10.00	9.06	9.50
15.00	14.80	13.00	13.89
20.00	18.90	16.64	18.00
25.00	23.43	20.03	21.90

จากตารางที่ 6 แสดงมุลีเยวของล้อด้านนอกที่คำนวณได้จากการทดสอบรถ วิธีการคำนวณ และวิธีการลากเส้น พบว่าที่มุลีเยวของล้อด้านใน 25 องศา มีความแตกต่างของมุลีเยวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการคำนวณ 2.15 องศา และมีความแตกต่างของมุลีเยวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการการลากเส้น 0.47 องศา และสามารถสร้างกราฟความแตกต่างของมุลีเยวล้อด้านนอก ระหว่างมุลีเยวของรถจริงกับมุลีเยวทางทฤษฎีได้ดังรูปที่ 12

จากตารางที่ 7 แสดงมุลีเยวของล้อด้านนอกที่คำนวณได้จากการทดสอบรถ วิธีการคำนวณ และวิธีการลากเส้น พบว่าที่มุลีเยวของล้อด้านใน 25 องศา มีความแตกต่างของมุลีเยวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการคำนวณ 3.4 องศา และมีความแตกต่างของมุลีเยวของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการการลากเส้น 1.53 องศา และสามารถสร้างกราฟความแตกต่างของมุลีเยวล้อด้านนอก ระหว่างมุลีเยวของรถจริงกับมุลีเยวทางทฤษฎีได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความแตกต่างของมมเฉลี่ยล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎี ของรถคันที่ 5



รูปที่ 14 ความแตกต่างของมมเฉลี่ยล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎี ของรถคันที่ 6

6) รถทดสอบคันที่ 6 สามารถแสดงตารางค่ามมเฉลี่ยของล้อด้านนอก ได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่ามมเฉลี่ยของล้อด้านนอกของรถคันที่ 6

มมเฉลี่ยของล้อด้านใน (องศา)	มมเฉลี่ยของล้อด้านนอก (องศา)		
	การทดสอบรถ	วิธีการคำนวณ	วิธีการลากเส้น
5.00	5.00	4.75	4.88
10.00	9.80	9.08	9.50
15.00	13.80	13.05	13.90
20.00	18.10	16.72	18.05
25.00	22.80	20.15	22.00

จากตารางที่ 8 แสดงมมเฉลี่ยของล้อด้านนอกที่คำนวณได้จากการทดสอบรถ วิธีการคำนวณ และวิธีการลากเส้น พบว่าที่มมเฉลี่ยของล้อด้านใน 25 องศา มีความแตกต่างของมมเฉลี่ยของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการคำนวณ 2.65 องศา และมีความแตกต่างของมมเฉลี่ยของล้อด้านนอกของการทดสอบรถกับวิธีการการลากเส้น 0.8 องศา และสามารถสร้างกราฟความแตกต่างของมมเฉลี่ยล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎีได้ดังรูปที่ 14

สรุปผล

จากการทดลองสามารถสรุปผลแยกดังนี้

- 1) ในการเปรียบเทียบมมเฉลี่ยของล้อด้านนอก จากการวัดจริงกับมมเฉลี่ยของล้อด้านนอกทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณ รถทดสอบจำนวน 6 คัน มีมมเฉลี่ยของล้อด้านนอกขณะทำการเลี้ยวมากกว่ามมเฉลี่ยของล้อด้านนอกแบบอ็คเคอร์มันด์จากวิธีคำนวณ
- 2) ที่มมเฉลี่ยของล้อด้านใน 25 องศา ของรถทดสอบคันที่ 1 มีค่าความแตกต่างของมมเฉลี่ยของล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎีน้อยที่สุด เท่ากับ 0.3 องศา และรถทดสอบคันที่ 5 นั้นมีค่าความแตกต่างของมมเฉลี่ยของล้อด้านนอก ระหว่างมมของรถจริงกับมมทางทฤษฎีมากที่สุด เท่ากับ 3.4 องศา
- 3) ค่าของมมเฉลี่ยของล้อด้านนอกที่ทำการทดสอบ ทั้ง 6 คัน เป็นค่าที่อยู่ช่วงกลาง ระหว่างระบบบังคับเลี้ยวแบบอ็คเคอร์มันด์และแบบขนาน
- 4) ค่าของมมเฉลี่ยของล้อด้านนอกที่ทำการทดสอบ ทั้ง 6 คัน มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากระบบอ็คเคอร์มันด์ ด้วยวิธีการลากเส้นมากกว่าวิธีการคำนวณ

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลอง สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- 1) ผลการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนได้บ้าง โดยอาจมีสาเหตุมาจากสภาพระบบบังคับเลี้ยวของรถแต่ละคัน ซึ่งมีอายุการใช้งานมาแล้วแตกต่างกัน

2) เนื่องจากรถบางคันมีการเปลี่ยนแปลงล้อ ทำให้ออฟเซตของล้อเปลี่ยนแปลงไปจากที่บริษัทนั้นได้ออกแบบไว้ ซึ่งอาจส่งผลต่อการเลี้ยวและการวัดมุมเลี้ยวบนเครื่องทดลอง

3) จากผลการทดลอง พบว่าการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวของรถทดสอบทั้ง 6 คัน มุมเลี้ยวของล้อที่ได้ไม่ใกล้เคียงกับระบบอ็คเคอร์แมนด์แบบค่านวน แต่จะใกล้เคียงกับระบบอ็คเคอร์แมนด์แบบลากเส้น หรือค่าอยู่ระหว่างระบบอ็คเคอร์แมนด์แบบค่านวนกับระบบบังคับเลี้ยวแบบขนาน

4) จากการที่มุมของแกนบังคับเลี้ยวมีค่าอยู่ระหว่างระบบบังคับเลี้ยวอ็คเคอร์แมนด์แบบค่านวนกับระบบบังคับเลี้ยวแบบขนานอาจมีสาเหตุมาจากผู้ผลิตรถอาจไม่ต้องการให้ระบบบังคับเลี้ยวเป็นอ็คเคอร์แมนด์อย่างเต็มรูปแบบ เนื่องมาจากการเกิด Tyre Slip Angle ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เมื่อเข้าโค้งด้วยความเร็วสูง ซึ่งหากเกิด Tyre Slip Angle มาก จะเหมาะกับระบบบังคับเลี้ยวแบบขนานหรือระบบ Anti Ackermann มากกว่า

ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการตรวจสอบสภาพของลูกหมากต่าง ๆ ของระบบบังคับเลี้ยวและระบบรองรับให้มีสภาพที่ดีก่อนทำการทดสอบ เนื่องจากรถที่มาทดสอบมีอายุการใช้งานและสภาพที่แตกต่างกัน หากลูกหมากของระบบรองรับน้ำหนัก หรือระบบบังคับเลี้ยวมีความหลวมเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้มุมของการเลี้ยวคลาดเคลื่อนไปหลายองศา

2) รถที่มาทำการทดสอบควรเป็นรถที่ใช้กะทะล้อและยางตามมาตรฐานของรถคันนั้น เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากออฟเซตของกะทะล้อ ซึ่งถ้ามีออฟเซตผิดไปมากจะส่งผลทำให้ล้อลื่นไถลจากเบ้นหมุนและทำให้ผลการวัดมุมเลี้ยวมีความคลาดเคลื่อน นอกจากนั้น การที่รถใช้กะทะล้อที่มีออฟเซตผิดไปจากที่ได้ออกแบบไว้ ยังส่งผลต่อการเกาะถนนขณะรถทำการเลี้ยว

3) รถที่จะนำมาทดสอบควรมีการตั้งศูนย์ล้อก่อน เพื่อให้การทดสอบมีความเที่ยงตรงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ธีระยุทธ สุวรรณประทีป. 2551. วิศวกรรมยานยนต์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์วิทย์พัฒนา.

เผด็จ แสนเกษม. 2539. กลศาสตร์ยานยนต์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น.

J Reimpell & H Stoll. 1996. The Automotive Chassis. Engineering Principles : ARNOLD.