



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนงานวิจัย

การศึกษาจุดศูนย์กลางมวลและสัดส่วนการเบรกที่ส่งผล
กระทบต่อเสถียรภาพการบังคับยานยนต์

A study of center of mass and brake proportional
referred to vehicle handling performance

โครงการวิจัยย่อยที่ 3 การแปรผันของสัดส่วนแรงเบรกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ
การบังคับรถยนต์

The variation of brake proportional effected to
vehicle handling performance

อนันต์ เต็มเปี่ยม

พิเชษฐ์ บุญญาติ

ศุภชัย หลักคำ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๗

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

แผนงานวิจัย

การศึกษาจุดศูนย์กลางมวลและสัดส่วนการเบรกที่ส่งผล
กระทบต่อเสถียรภาพการบังคับยานยนต์

A study of center of mass and brake proportional
referred to vehicle handling performance

โครงการวิจัยย่อยที่ 3 การแปรผันของสัดส่วนแรงเบรกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ
การบังคับรถยนต์

The variation of brake proportional effected to
vehicle handling performance

อนันต์ เต็มเปี่ยม

พิเชษฐ์ บุญญาลัย

ศุภชัย หลักคำ

อนันต์ เต็มเปี่ยม

(หัวหน้าโครงการวิจัยย่อยที่ 3)

พิเชษฐ์ บุญญาลัย

(ผู้ร่วมวิจัย)

ศุภชัย หลักคำ

(ผู้ร่วมวิจัย)

ว่าที่เรือตรีทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

(ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาสัดส่วนแรงเบรกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ โดยการศึกษาพิจารณาถึงการทดสอบ 2 ส่วนหลัก คือ การทดสอบความสามารถในการเบรกและการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์ นอกเหนือจากนี้วัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญรองลงมา คือ การสร้างศูนย์กลางการเรียนรู้และสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ในสายงานวิศวกรรมยานยนต์

ผลการวิจัยพบว่าความสามารถในการเบรกขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการขับขี่ โดยความหน่วงเกิดขึ้นน้อยที่สุดคือสัดส่วนที่ไม่มีกระจายแรงเบรกไปที่เพลาล้อภายใต้สัดส่วน 0:100 ส่วนกรณีของเสถียรภาพการบังคับยานยนต์ พฤติกรรมการส่ายและการกระดกเกิดขึ้นปกติ หากแต่ค่าการลื่นไถลด้านข้างของล้อเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการควบคุมรถยนต์ โดยสัดส่วนแรงเบรก 100:0 มีความเสี่ยงสูงที่สุดต่อเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ เนื่องจากส่งผลให้เกิดการลื่นไถลของล้อที่เพลาท้าย นอกเหนือจากนี้ค่าการลื่นไถลของล้อยังมีค่าเกินกว่าจุดวิกฤตอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นโครงการวิจัยนี้นักวิจัยรุ่นใหม่ยังถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับศูนย์การเรียนรู้ด้านวิศวกรรมยานยนต์ ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้อีกด้วย



ABSTRACT

The aim of this research is to study the brake proportional affected to vehicle stability. Braking performance and vehicle stability testing are the main of research purposes. Otherwise, learning research center and new researcher in automotive engineering are the minor research objectives.

The results of research discovered to the braking performance depend on driver behavior. By the minimum deceleration was appeared on the non-proportion in front axle with braking ratio 0:100. In term of vehicle stabilities, yaw and pitch moment are normally occur by the driving behavior. But the sideslip is an absolutely effect to vehicle handling. With the braking ratio 100:0, there is the highest risk for controlling a vehicle cause of the wheels were locked-up condition in the rear axle. Therefore, the value of the sideslip was exceeded with the criteria. Furthermore, these project researches were got the learning research center and the new researcher in automotive engineering field.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุน ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุก ๆ ท่านที่อำนวยความสะดวกในการประสานงานทั้งหมดจนบรรลุผลสำเร็จอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ของคณะผู้วิจัยทุกท่าน ที่สร้างแรงผลักดันอันก่อให้เกิดกำลังใจในการทำงาน และต่อสู้กับอุปสรรคและสิ่งบั่นทอนกำลังใจต่าง ๆ ให้ผ่านพ้นมาได้ด้วยดีตลอดทุกครั้ง

ขอกราบขอบพระคุณท่านอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ผู้ซึ่งให้โอกาสและสนับสนุนงานวิจัยสำหรับครั้งนี้และทุก ๆ ครั้งที่ผ่านมาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคุณนิธิพล เอกบุญญฤทธิ์ ที่ปรึกษาแผนงานวิจัย แห่งสถาบันยานยนต์ ผู้ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อการวิจัย ตลอดจนเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลวิจัยต่อผู้สนใจรวมทั้งผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็ก ซึ่งเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ในสายงานด้านวิศวกรรมยานยนต์ต่อไป

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และกำลังใจตลอดการระยะเวลาการวิจัยที่ผ่านมา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สัญลักษณ์และความหมาย	ณ
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2	3
วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	14
การออกแบบและการคำนวณ	14
3.1 การออกแบบวงจรแบ่งแรงเบรก	15
3.2 การออกแบบการทดสอบ	16
3.3 การคำนวณ	22
บทที่ 4	24
ผลการวิจัยและการวิจารณ์	24
4.1 สมมุติฐานการวิจัย	24
4.2 สมมุติฐานการทดสอบ	24
4.3 ผลการทดสอบความสามารถในการเบรก	25
4.4 ผลการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์	30
บทที่ 5	44
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	44
5.1 สรุปผลการวิจัย	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
5.3 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก ก	48

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเบรก	7
รูปที่ 2.2 Dynamic Load Transfer	8
รูปที่ 2.3 Actual Braking Force	9
รูปที่ 2.4 ประสิทธิภาพการเบรกสูงสุดหรือจุดเหมาะสมของการออกแบบระบบเบรก	10
รูปที่ 2.5 การลื่นของล้อ	11
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการส่ายของรถยนต์	12
รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการโคลงของรถยนต์	12
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมการกระดกของรถยนต์	13
รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการลื่นไถลของรถยนต์	13
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	14
รูปที่ 3.2 วงจรกระจายแรงดันเบรกของรถยนต์ปกติ	15
รูปที่ 3.3 วงจรกระจายแรงดันเบรกของรถยนต์ที่ถูกออกแบบใหม่	16
รูปที่ 3.4 การปรับเปลี่ยนรถยนต์เป็นแบบ Rigid body	17
รูปที่ 3.5 การชั่งน้ำหนักลงเพลา	17
รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์ปรับสัดส่วนแรงเบรก	19
รูปที่ 3.7 การติดตั้งเครื่องมือวัดมุมพวงมาลัย	20
รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบค่าของมุมลื่นไถลด้านข้าง	20
รูปที่ 3.9 การติดตั้งเครื่องมือวัดความหน่วง	21
รูปที่ 3.10 การติดตั้งกล้องบันทึกภาพยนตร์	21
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเหยียบและเวลาที่ใช้ของสัดส่วน 0:100 ถึง 100:0	26
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรกกรณีสัดส่วนแรงเบรกหน้าที่มีค่าน้อยกว่าสัดส่วนแรงเบรกหลัง	27

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรกกรณีสัดส่วนแรงเบรกหน้ามีค่ามากกว่าถึงเท่ากับสัดส่วนแรงเบรกหลัง	28
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรก	29
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (100:0)	33
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (90:10)	34
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (20:80)	35
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (30:70)	36
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (40:60)	37
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (50:50)	38
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (60:40)	39
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (70:30)	40
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (80:20)	41
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (90:10)	42
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (100:0)	43

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การทดสอบสมรรถนะการเบรกของรถยนต์ตามมาตรฐาน FMCSA	5
ตารางที่ 2.2 ช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนนแบบต่าง ๆ	11
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถยนต์ทดสอบ	18
ตารางที่ 3.2 การคำนวณหาค่า Sideslip angle (β)	23
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดสอบ	24
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างความหน่วง ระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเบรก ซึ่งมีผลมาจากการเหยียบเบรกของผู้ขับขี่	25
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์	30
ตารางที่ 4.4 ผลการลื่นไถลของล้อที่สัดส่วนแรงเบรกต่าง ๆ	31



สัญลักษณ์และความหมาย

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ความหน่วง	m/s^2
g	ความเร่งโน้มถ่วงของโลกมีค่า 9.81	m/s^2
h	ความสูงจุดศูนย์กลางถ่วงรถยนต์ในแนวตั้ง	m
m	มวลของรถยนต์	kg
L	ระยะฐานล้อ	m
A_p	พื้นที่หน้าตัดกระบอกสูบเบรก	m^2
F_b	แรงเบรกรวม	N
F_{bf}	แรงเบรกที่เพลาหน้า	N
F_{br}	แรงเบรกที่เพลาท้าย	N
F_{Zf}	แรงปฏิกิริยาที่เพลาหน้าที่รวมค่า Dynamic Load Transfer	N
F_{Zr}	แรงปฏิกิริยาที่เพลาท้ายที่รวมค่า Dynamic Load Transfer	N
F_s	แรงเบรกจริงที่มาจากระบบไฮดรอลิกส์	N
F_u	แรงเบรกที่กระทำจริงที่จานเบรก	N
P_s	ความดันไฮดรอลิกส์ในระบบเบรก	N/m^2
R_f	แรงปฏิกิริยาที่เพลาหน้า	N
R_r	แรงเบรกที่เพลาท้าย	N
$X_{f,r}$	สัดส่วนแรงเบรกที่กระจายไปที่เพลาหน้าและหลัง	-
r_b	รัศมีจากศูนย์กลางของล้อถึงจุดศูนย์กลางของผ้าเบรก	m
r_{dyn}	รัศมีจากศูนย์กลางของล้อถึงพื้นถนน	m
ΔF_Z	Dynamic Load Transfer	N
μ_{road}	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนน	-
μ_{pad}	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรก	-
θ	มุมพวงมาลัย	-
β	มุม Sideslip	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย

ระบบเบรกเป็นระบบที่ใช้เพื่อการชะลอหรือหยุดรถยนต์ โดยการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อน ภายใต้การสร้างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรก ระบบเบรกถือได้ว่าเป็นระบบความปลอดภัยพื้นฐานของรถยนต์ ซึ่งจัดได้ว่าเป็นระบบที่มีการทำงานก่อนที่อุบัติเหตุจะเกิดขึ้น (Active Safety) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการเบรกที่เกิดขึ้นสูงสุดในขณะขับขี่เกิดจากปัจจัยหลาย 3 ประการคือ ความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ในระบบ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นถนนและสัดส่วนแรงเบรก โดยปัจจัยของสัดส่วนแรงเบรคนั้นเป็นปัจจัยพื้นฐานของการพัฒนาระบบเบรกอย่างมีประสิทธิภาพในปัจจุบันเช่น ระบบป้องกันการล็อกของล้อ (Anti lock brake system) และระบบการกระจายแรงเบรกด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic brake force distribution) ระบบเหล่านี้เป็นระบบที่ช่วยป้องกันการเกิดอุบัติเหตุและรักษาเสถียรภาพหรือการควบคุมของรถยนต์ในทุกสภาวะการขับขี่ ดังนั้นปัจจัยเรื่องสัดส่วนแรงเบรกเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดจากทั้ง 3 ปัจจัย เนื่องจากความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ในระบบ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นถนนนั้นผู้ขับขี่รถยนต์ไม่สามารถที่ควบคุมได้ หากในกรณีของสัดส่วนแรงเบรคนั้นสามารถที่จะกำหนดได้เพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพการเบรกสูงสุดและความปลอดภัยชีวิตและทรัพย์สิน ในทางกลับกันหากมีความผิดพลาดจากการทำงานของระบบเบรกจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงเสถียรภาพการควบคุมรถยนต์ที่อาจจะส่งผลทำให้ผู้ขับขี่เกิดอันตรายได้จากการสูญเสียการบังคับทิศทางของรถยนต์ให้เป็นไปตามที่ต้องการ

หากกล่าวถึงประเทศไทยผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับรถยนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักคือ กลุ่มผู้ใช้รถยนต์ กลุ่มการเรียนการศึกษาและกลุ่มผู้ผลิต ในส่วนของกลุ่มผู้ใช้รถยนต์ คนไทยส่วนใหญ่คือผู้ใช้เทคโนโลยีที่ได้จากการสร้างสรรค์สร้างจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์เท่านั้น ซึ่งมีได้ตระหนักถึงพื้นฐานการทำงานของรถยนต์จึงมีอาจแก้ปัญหาบางประการได้หากเกิดกรณีขัดข้องหรือทำได้เพียงแค่ทำตามคำแนะนำของคู่มือหรือศูนย์บริการเท่านั้น ในกรณีของกลุ่มการเรียนการศึกษาในประเทศไทย นักศึกษายังไม่สามารถเรียนรู้พื้นฐานการทำงานจากการเรียนในห้องเรียนทฤษฎีหรือแม้แต่การลงฝึกปฏิบัติก็ตาม เนื่องจากปัญหาเรื่องสื่อการสอน เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ก้าวไปข้างหน้าอย่างรวดเร็ว ส่วนในกรณีของกลุ่มผู้ผลิตรถยนต์ซึ่งประเทศไทยถือได้ว่าเป็นแหล่งผลิต ประกอบและสร้างขึ้นส่วนยานยนต์ลำดับต้นๆ ของภาคพื้นเอเชีย หากแต่กระบวนการที่กล่าวมานั้นเป็นการทำงานแบบดำเนินงานตามบริษัทแม่ที่อยู่ต่างประเทศ (Action in order) ที่ส่วนใหญ่แรงงานไทยจะใช้เพียงทักษะการทำงานเท่านั้น หากแต่ไม่สามารถทราบถึงความรู้พื้นฐานของการทำงานในแต่ละระบบของรถยนต์ได้ ในขณะที่การวิจัยและพัฒนา (Research and Development) เกิดขึ้นจากผู้ที่เป็น

วิศวกรของบริษัทแม่เท่านั้น จากปัญหาข้างต้นทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาสัดส่วนแรงเบรกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการบังคับรถยนต์โดยเลือกนำเอาปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการเบรกมาพิจารณา เพื่อให้ได้มาเพื่อองค์ความรู้พื้นฐานทางวิชาการ ที่สามารถส่งผลกระทบต่อกลุ่มผู้เกี่ยวข้องกับรถยนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการศึกษาที่เป็นเป้าหมายหลักของการพัฒนาประเทศในอนาคต อีกทั้งยังสามารถนำไปปรับใช้กับกลุ่มต่างๆที่มีส่วนเกี่ยวข้อง เพื่อประโยชน์ต่อการนำใช้งานและทำงานต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสัดส่วนแรงเบรกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการบังคับรถยนต์
- 1.2.2 เพื่อสร้างศูนย์กลางการเรียนรู้และการทดสอบทางวิศวกรรมยานยนต์
- 1.2.3 เพื่อสร้างนักวิจัยหน้าใหม่ทางวิศวกรรมยานยนต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 สร้างชุดทดสอบสัดส่วนแรงเบรกที่สามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนได้
- 1.3.2 สามารถรองรับการทดสอบของรถยนต์ที่มีพิกัดไม่เกิน 3 ตัน
- 1.3.3 การทดสอบและการตรวจสอบเป็นไปตามมาตรฐานของกรมการขนส่งทางบก (ประเทศไทย) และ FMCSA บางส่วน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงผลกระทบของสัดส่วนแรงเบรกต่อเสถียรภาพการบังคับรถยนต์
- 1.4.2 องค์ความรู้พื้นฐานทางวิชาการของเสถียรภาพการบังคับรถยนต์
- 1.4.3 เกิดแหล่งการเรียนรู้ด้านวิศวกรรมยานยนต์ที่สามารถถ่ายทอดองค์ความรู้สู่สาธารณะได้

บทที่ 2

วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สัดส่วนการกระจายแรงเบรก

แรงเบรกของรถยนต์ เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่อการควบคุมรถยนต์ ทั้งกรณีการขับที่ทางตรง และการขับที่ขณะเข้าโค้ง เนื่องจากปัจจัยด้านเวลาการตอบสนอง ปริมาณแรงเบรก สัดส่วนการกระจายแรงเบรก และอัตราหน่วง อย่างไรก็ตามการทดสอบเกี่ยวกับแรงเบรกของรถยนต์ถือเป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบเบรกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น ระบบป้องกันการลื่นไถลของล้อ (ABS) และระบบการกระจายแรงเบรกด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (EBD) ระบบเหล่านี้เป็นระบบที่ช่วยป้องกันการเกิดอุบัติเหตุและมีส่วนในการรักษาเสถียรภาพของรถยนต์ โดย Songwut Mongkonlerdmanee และคณะ [1] ได้ศึกษาสัดส่วนการกระจายแรงเบรกของรถบัส 2 ชั้น 3 เพลาที่ถูกสร้างด้วยจากประสบการณ์ของช่างเทคนิค และประสิทธิภาพการเบรกสูงสุดของระบบหรือจุดเหมาะสมของการออกแบบระบบการกระจายแรงเบรก ซึ่งสรุปได้ว่า การกระจายแรงเบรกของรถบัสดังกล่าวเป็นแบบที่ไม่สามารถปรับตั้งค่าการกระจายแรงเบรกได้หรือ Rigid brake force distribution ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเบรกสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณเพลาหน้าและเพลาท้ายที่ 1 เท่านั้นด้วยการเบรกที่แรงเบรกของทั้ง 2 เพลาดังกล่าวอยู่ที่ 15 kN ที่เพลาหน้า และ 17 kN ที่เพลาท้ายที่ 1 ตามลำดับ

Saiprasit Koetnuyom และคณะ [2] ก็ทำการศึกษาค้นคว้าสัดส่วนการกระจายแรงเบรกของรถบัส 2 ชั้น 3 เพลาที่ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อตรวจสอบการกระจายแรงเบรกในแต่ละเพลา สมรรถนะของระบบเบรก และปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการช่วยเบรกตามมาตรฐานของกรมการขนส่งทางบก (ประเทศไทย) และมาตรฐาน FMCSA ในส่วนของรถบัส สรุปได้ว่ารถบัสที่ถูกออกแบบมานั้นสามารถสร้างแรงเบรกในแต่ละเพลาได้ตามมาตรฐานของกรมการขนส่งทางบกและสามารถสร้างค่าอัตราหน่วงของการเบรกได้ตามมาตรฐาน FMCSA หากแต่ระยะการเบรกไม่สามารถผ่านตามมาตรฐาน อย่างไรก็ตามปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการช่วยเบรกนั้น แรงต้านทานการเคลื่อนที่จากเครื่องยนต์ (Engine brake) ที่ตำแหน่งของเกียร์ต่ำสามารถสร้างแรงต้านทานการเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในกรณีของการทดลองเปรียบเทียบที่ตำแหน่งเกียร์ต่ำและเกียร์สูง (เกียร์ 3 และ 6)

Stephen Saric และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการประมาณแรงเบรกที่ควบคุมการทำงานผ่านระบบไฟฟ้าโดยพิจารณาในเชิงความร้อน ซึ่งเป็นการทำงานรูปแบบใหม่โดยการใช้คุณสมบัติของผ้าเบรกเป็นตัวควบคุมการทำงาน และสามารถใช้อุปกรณ์ปรับค่าลักษณะเฉพาะของพารามิเตอร์ในการคำนวณแรงสัมผัสจากการเบรก ซึ่งทำให้การติดตั้งเซนเซอร์อุณหภูมิสองตัวมีความเพียงพอในการ

ควบคุมการเบรกด้วยการด้วยไฟฟ้า จึงสามารถช่วยลดจำนวนการใช้เซนเซอร์แรงสัมผัสเบรกได้ ซึ่งการทดลองนี้เป็นการแนะนำสำหรับการวิจัยในอนาคต

2.1.2 มาตรฐานการทดสอบระบบเบรกและการกระจายแรงเบรก

มาตรฐานการทดสอบระบบเบรกของกรมการขนส่งทางบกของประเทศไทย [4] ตามประกาศของกรมการขนส่งทางบกของประเทศไทย ลงวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2548 ได้แจ้งการทดสอบสมรรถนะของระบบเบรกและเบรกมือของรถยนต์รวมถึงวิธีการทดสอบไว้ คือ ระบบเบรกจะต้องตอบสนองภายในเวลา 5 วินาทีหลังจากทำการเหยียบเบรก ปริมาณแรงเบรกทั้งหมดจะต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักลงเพลา รวม (GVWR) ของรถยนต์ทั่วไป ส่วนในกรณีรถบัสและรถบรรทุกปริมาณแรงเบรกจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักลงเพลา โดยใช้วิธีการทดสอบบนเครื่องทดสอบแบบลูกกลิ้ง (Roller Brake Tester)

ส่วนกรณีมาตรฐานการทดสอบระบบเบรกในต่างประเทศนั้น มาตรฐานของ (Federal Motor Carrier Safety Administration) FMCSA [5] เป็นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาเพื่อใช้สืบสวนและสอบสวนการชน การเกิดอุบัติเหตุ และมาตรฐานการออกแบบระบบเบรกของบริษัทผู้ผลิตรถยนต์เพื่อพิจารณาการทดสอบสมรรถนะของเบรกรถยนต์ โดยแสดงดังตารางที่ 2.1 โดยทั้ง 2 มาตรฐานมีความแตกต่างกันคือ มาตรฐาน (FMCSA) จะไม่พิจารณาถึงเวลาการตอบสนองระบบ และค่าของปริมาณแรงเบรกที่สูงกว่ามาตรฐานของประเทศไทย ยกเว้นในกรณีเดียว คือ รถยนต์ประเภทนั่งแบบมีภาระการบรรทุก ปริมาณแรงเบรกในแต่ละเพลาที่ต้องการมีค่าเพียงร้อยละ 43.5 เท่านั้น

2.1.3 เสถียรภาพการบังคับรถยนต์

การทดสอบความเร่งด้านข้างนิยมใช้เพื่อพิจารณาเสถียรภาพรถขณะเข้าโค้ง ซึ่งเป็นตัวแปรหลักของอัตราการส่ายของรถยนต์ (Yaw rate) และการถูกรบกวนของพวงมาลัย ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้รถยนต์มีเสถียรภาพการบังคับลดลง เช่น งานวิจัยของ Riener และคณะ [6] ที่ศึกษาปัจจัยความเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวผู้ขับขี่กับรถ และรถกับถนน ในกรณีที่รถขับเข้าโค้ง ซึ่งพวงมาลัยถูกรบกวนจากความเร่งด้านข้าง (Lateral acceleration) ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนการหมุนพวงมาลัยและความเร็วของรถขณะเข้าโค้ง การทดสอบกระทำโดยชดเชยแรงด้านข้างของรถโดยอาศัยร่างกายของตัวผู้ขับขี่ ที่ใช้การประเมินผลจากค่าความดันที่จากแผงวัดความดัน 2 แผง ที่รับความดันจากการเปลี่ยนแปลงท่าทางของผู้ขับขี่ โดยแต่ละแผงมีเซนเซอร์วัดความดันจำนวน 32 ตัวติดตั้งบริเวณที่นั่ง และติดตั้งบริเวณพนักพิงจำนวน 32 ตัวเพื่อจำแนกคุณลักษณะตามสถานการณ์การขับขี่ผ่านโค้ง ผลการทดสอบพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะมีการชดเชยความเร่งด้านข้าง กรณีนี้สามารถทำให้รถเพิ่มความเร็วและเพิ่มความแม่นยำของพวงมาลัย อีกทั้งสามารถลดการตื้อโค้ง (Understeer) และไวโค้ง (Oversteer) ของรถได้

Sohel Anwar [7] ทำการเสนอทฤษฎีและการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยการรักษาเสถียรภาพการควบคุมรถยนต์ที่เป็นแบบ hybrid โดยใช้ระบบเบรกแบบไฟฟ้า Brake by wire ด้วยวิธี Generalized Predictive Control (GPC) เพื่อทำการควบคุมอัตราส่ายของรถยนต์ (yaw rate) ในกรณี under steer และ oversteer ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธี Generalized Predictive

Control สามารถนำมาใช้ประเมินอัตราการควบคุมเสถียรภาพของรถยนต์ได้โดยยืนยันเปรียบเทียบกับ การทดลองจริงบนถนน

P.S. Els และคณะ [8] ได้นำเสนอถึงการศึกษาการขับเคลื่อนแบบสบายที่กับเสถียรภาพการขับเคลื่อน off-road ซึ่งกล่าวไว้ว่าการขับเคลื่อนที่สบายไม่ใช่การขับเคลื่อนแบบปลอดภัยหรือสามารถควบคุมเสถียรภาพของรถยนต์ โดยการศึกษาที่รถจำลองที่มีระบบการรองรับน้ำหนัก 3 แบบ ที่พิจารณาถึงค่าแรงสปริงและค่าความยืดหยุ่นของระบบรองรับ (Stiff spring and Damper) โดยสรุปได้ว่าระบบรองรับน้ำหนักที่เป็นแบบ passive suspension มีความเหมาะสมมากที่สุดกับการขับเคลื่อนแบบสบายและตั้งข้อสังเกตในการพิจารณาค่าแรงสปริงและค่าความยืดหยุ่นของระบบรองรับที่มีต่อการขับเคลื่อนแบบสบายไว้ 4 แบบ

การทดสอบการโคลงของรถยนต์ เป็นการทดสอบที่น่าสนใจอีกประการหนึ่ง อันเป็นผลจากการออกแบบระบบรองรับน้ำหนัก (Suspension) โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่อยู่เหนือระบบรองรับ (Sprung mass) ที่ส่งผลให้เกิดการพลิกคว่ำในขณะที่เข้าโค้ง ซึ่งการทดสอบการโคลงของรถยนต์ นิยมพิจารณาถึงโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) อันเป็นผลจากแรงกระทำด้านข้างหรือขณะเข้าโค้ง ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Svenson และ Hac [9] ได้ศึกษาผลของการโคลงของตัวรถที่มากเกินไปโดยทดสอบกับรถบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ ขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง โดยเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่ติดตั้งระบบควบคุมเสถียรภาพรถด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Stability Control) หรือ (ESC) และระบบควบคุมมุมเลี้ยว 4 ล้อ (Active Rear Steer) หรือ (ARS) สรุปว่ารถยนต์ทดสอบที่ติดตั้งระบบ (ESC) สามารถลดการโคลงของตัวรถ ส่วนระบบ (ARS) มีผลต่อประสิทธิภาพการบังคับเลี้ยวในขณะความเร็วสูงที่ทำให้การตอบสนองของมุมพวงมาลัยทันต่อความเร็วรถ และช่วยลดภาระการหมุนพวงมาลัยในขณะความเร็วต่ำของผู้ขับขี่ซึ่งทั้งสองระบบนี้จะช่วยให้การขับเคลื่อนปลอดภัยมากขึ้น

งานวิจัยของ Miège และ Cebon [10] ศึกษาถึงความได้เปรียบของระบบการควบคุมการพลิกคว่ำแบบเชิงรุก (Active roll control) ของรถขนาดใหญ่ วิธีการทดสอบกระทำโดยการพัฒนาจากต้นแบบระบบพลิกคว่ำอย่างง่ายหรือแบบพลิกคว่ำ 2 มิติ ด้วยการเพิ่มเชื่อมต่อเข้ากับระบบรองรับที่ถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ให้สามารถเก็บข้อมูลป้อนกลับ (Feedback control) ของค่าความเร่งด้านข้าง ซึ่งระบบการควบคุมการพลิกคว่ำแบบเชิงรุก (Active roll control) นี้สามารถทดสอบกับรถยนต์ได้ทั้งสถานะอยู่ตัว (Steady state) และสถานะไม่อยู่ตัว (Transient) โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบถูกใช้วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ เพื่อนำไปพัฒนาการออกแบบระบบควบคุม เช่น การควบคุมมุมโคลง (Roll angle) ด้วยการชดเชยแรงกดและความหน่วงของระบบรองรับในแนวตั้ง

ตารางที่ 2.1 การทดสอบสมรรถนะการเบรกของรถยนต์ตามมาตรฐาน FMCSA [5]

Type of motor vehicle	Service brake systems		
	Braking force as a percentage of gross vehicle or combination weight [%]	Deceleration in [m/s ²]	Application and braking distance in meter from initial speed at 32.16 km/hr
A. Passenger-carrying vehicles:			
(1) Vehicles with a seating capacity of 10 persons or less, including driver and built on a passenger car chassis	65.2	6.4	6.09
(2) Vehicles with a seating capacity of more than 10 persons, including driver and built on a passenger car chassis ; vehicles built on a truck or bus chassis and having a manufacturer's GVWR of 10,000 pounds or less	52.8	5.181	7.62
(3) All other passenger-carrying vehicles	43.5	4.267	10.67
B. Property-carrying vehicles:			
(1) Single unit vehicles having a manufacturer's GVWR of 10,000 pounds or less.	52.8	5.181	7.62
(2) Single unit vehicles having a manufacturer's GVWR of more than 10,000 pounds, except truck tractors	52.8	5.181	7.62

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

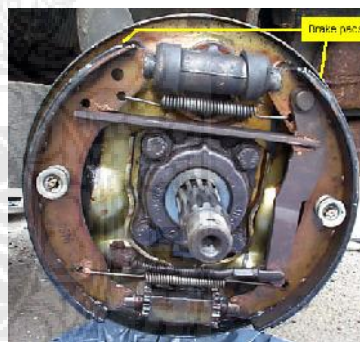
2.2.1 ระบบเบรก

ระบบเบรกใช้เพื่อชะลอความเร็วหรือหยุดรถโดยอาศัยแรงเสียดทาน 2 จุดคือ บริเวณระหว่างผ้าเบรกและจานเบรกและระหว่างยางกับพื้นถนน เนื่องจากระบบเบรกเป็นระบบความปลอดภัยที่สำคัญที่สุดของรถยนต์หรือที่เรียกว่า Active Safety ดังนั้นอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบเบรกจึงต้องมีความสมบูรณ์พร้อมใช้งานอยู่ตลอดเวลา ระบบเบรกที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีด้วยกัน 3 แบบคือ ระบบเบรกไฮดรอลิก (hydraulic brake) ที่ใช้กับรถยนต์ที่มี 2 เพลาทั้งรถยนต์นั่งและบรรทุก ระบบเบรกผสม (air over hydraulic brake) ที่ใช้กับรถยนต์ที่มี 2 เพลา 6 ล้อ เช่นรถบรรทุกขนาดกลาง รถบัสและรถขนส่งมวลชน ระบบเบรกลม (full air brake) ที่ใช้กับรถที่มี 3 เพลา 8 ล้อขึ้นไป เช่นรถบรรทุกขนาดใหญ่และรถบัสขนส่ง 2 ชั้น

อย่างไรก็ตามในระบบเบรกทั้ง 3 แบบนั้นอุปกรณ์การทำงานสามารถแยกได้ 2 ลักษณะคือ ตรีมเบรก (drum brake) และดิสก์เบรก (disc brake) โดยแสดงดังรูปที่ 2.1 หากพิจารณาระบบเบรกไฮดรอลิกในปัจจุบันลักษณะของอุปกรณ์การทำงานจะนิยมใช้เป็นแบบดิสก์เบรกเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเบรกสูงกว่า ระบายความร้อนดีกว่า บำรุงรักษาง่ายกว่าแบบตรีมเบรก ในทางกลับกันตรีมเบรกจะสร้างแรงเบรกได้มากกว่าดิสก์เบรกเนื่องจากหน้าสัมผัสระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรกมีมากกว่า ซึ่งหากต้องการแรงเบรกให้มีค่าเท่ากับ ตรีมเบรกจะต้องเพิ่มแรงดันในระบบให้มากขึ้น



(ก)



(ข)

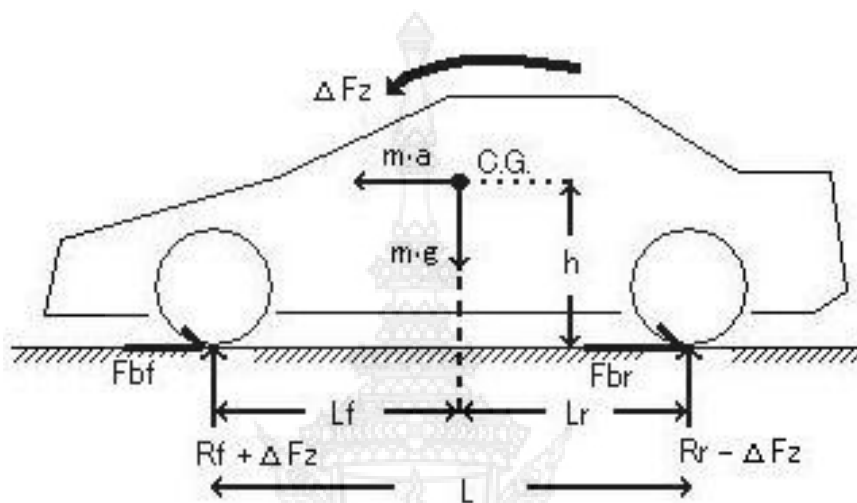
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเบรก (ก) ดิสก์เบรก (ข) ตรีมเบรก

ที่มา <http://www.neutron.rmutphysics.com/teaching-glossary>,
<http://www.reluctantmechanic.com>

2.2.2 แรงเบรกและการกระจายแรงเบรก

แรงเบรกเป็นองค์ประกอบหลักของการสร้างแรงเสียดทานที่กระทำต่อผ้าเบรกและจานเบรก ซึ่งส่งผลกระทบทางการเบรกเพื่อการชะลอหรือหยุดรถยนต์ ปริมาณแรงเบรคนั้นขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของผู้ขับขี่หรือปริมาณแรงเบรกที่อยู่ในระบบไฮดรอลิกส์ หากมีแรงเบรกมากผลกระทบทางการเบรคนั้นจะสั้น หากแรงเบรกมีปริมาณสูงเกิน ยางที่สัมผัสโดยตรงกับผิวของถนนนั้นจะเกิดการลื่นไถล

ของล้อหรือที่เรียกว่าล้อล็อกนั่นเอง ด้วยเหตุผลของการล็อกของล้อนี้จะส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับการบังคับหรือการควบคุมรถยนต์ให้ทิศทางเป็นไปตามที่ผู้ขับขี่ต้องการได้ หากพิจารณาพฤติกรรมของยานยนต์ในขณะที่ทำการเบรคนั้นจะเกิดการส่งถ่ายของมวลในแนวระนาบและแนวตั้งไปที่บริเวณเพลาหน้าของรถยนต์ (Dynamic Load Transfer) ซึ่งพฤติกรรมของการส่งถ่ายของมวลในแนวระนาบและแนวตั้งของรถยนต์แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Dynamic Load Transfer

อย่างไรก็ตามการพิจารณาแรงเบรกที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมของการส่งถ่ายของมวลในแนวระนาบและแนวตั้งของรถยนต์ (Dynamic Load Transfer) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ แรงเบรกที่ได้มาจากอุปกรณ์ในระบบเบรก เช่น กระจับเบรก แรงดันน้ำมัน หม้อลมเบรก เป็นต้น เรียกว่าแรงเบรกกระทำจริง (Actual Braking Force) ส่วนอีกแบบหนึ่งจากเป็นแรงเบรกทางทฤษฎี (Ideal Braking Force) ที่เป็นผลมาจากการประเมินทางทฤษฎีที่ได้จากปัจจัยต่างๆเช่น สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนน (μ_{road}) พฤติกรรมของการส่งถ่ายของมวลในแนวระนาบและแนวตั้งของรถยนต์ มวลของรถยนต์ ระยะห่างของจุดศูนย์กลางถ่วงในแนวตั้งและระนาบ (Centre of gravity) เป็นต้น เพื่อการประมาณค่าแรงเบรกที่เกิดขึ้นในแต่ละเพลา สำหรับแรงเบรกทางทฤษฎีและแรงเบรกกระทำจริง สามารถพิจารณาได้ดังสมการต่อไปนี้

แรงเบรกทางทฤษฎี (Ideal Braking Force) สามารถแบ่งการพิจารณาได้ดังนี้คือ

- การพิจารณาแรงเบรกทางทฤษฎีตามค่า Dynamic Load Transfer
- การพิจารณาแรงเบรกทางทฤษฎีตามสัดส่วนของจุดศูนย์กลางถ่วงในแนวระนาบและแนวตั้ง

- การพิจารณาแรงเบรกทางทฤษฎีตามค่า Dynamic Load Transfer

$$F_b = F_{bf} + F_{br} \quad \text{สมการที่ 1}$$

$$F_{bf} = F_{ZF} \mu_{road} \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$F_{br} = F_{zr} \mu_{road}$$

สมการที่ 3

$$F_{zf} = R_f + \Delta F_z$$

สมการที่ 4

$$F_{zr} = R_r - \Delta F_z$$

สมการที่ 5

$$\Delta F_z = \frac{mah}{L}$$

สมการที่ 6

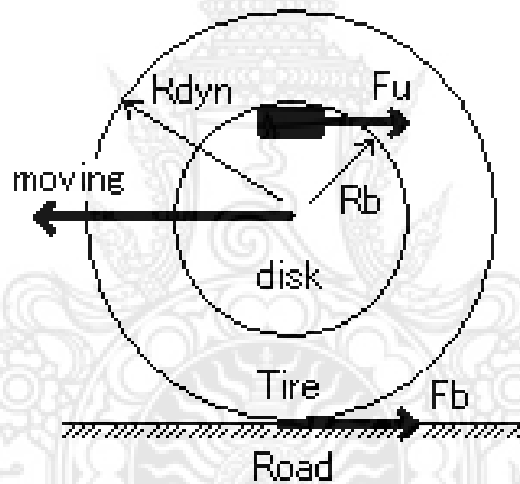
$$R_f = \frac{mgL_r}{L}$$

สมการที่ 7

$$R_r = mg - R_f$$

สมการที่ 8

แรงเบรคกระทำจริง (Actual Braking Force)



รูปที่ 2.3 Actual Braking Force

$$F_{B(AC)} = F_{BF(AC)} + F_{BR(AC)}$$

สมการที่ 9

$$F_{BF,R(AC)} = \frac{F_u r_b}{r_{dyn}}$$

สมการที่ 10

$$F_u = 2\mu_{pad} F_s$$

สมการที่ 11

$$F_s = P_s A_p X_{f,r}$$

สมการที่ 12

เมื่อ

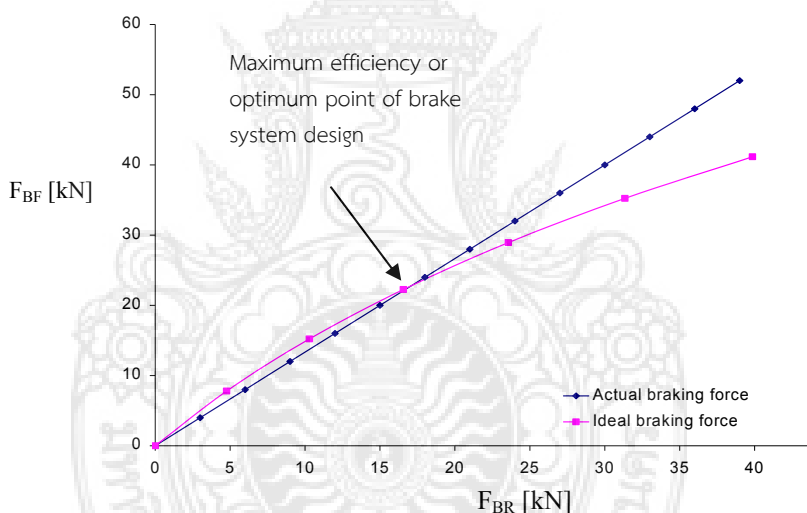
$$F_{B(AC)} = \text{แรงเบรครวมที่กระทำจริง} \quad [N]$$

$$F_{BF(AC)} = \text{แรงเบรคที่กระทำจริงที่เพลหน้า} \quad [N]$$

$$F_{BR(AC)} = \text{แรงเบรคที่กระทำจริงที่เพลท้าย} \quad [N]$$

F_u	= แรงเบรกที่กระทำจริงที่จานเบรก	[N]
F_s	= แรงเบรกจริงที่มาจากระบบไฮดรอลิกส์	[N]
$X_{f,r}$	= สัดส่วนแรงเบรกที่กระจายไปที่เพลาหน้าและหลัง	[-]
μ_{pad}	= สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรก	[-]
P_s	= ความดันของระบบไฮดรอลิกส์ในระบบ	[N/m ²]
A_p	= พื้นที่หน้าตัดของผ้าเบรก	[m ²]
r_b	= รัศมีจากศูนย์กลางของล้อถึงจุดศูนย์กลางของผ้าเบรก	[m]
r_{dyn}	= รัศมีจากศูนย์กลางของล้อถึงพื้นถนน	[m]

ในขณะที่ประสิทธิภาพการเบรกสูงสุดจะเกิดขึ้นหากแรงเบรกกระทำจริงตัดกับแรงเบรกทางทฤษฎีหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นจุดเหมาะสมของการออกแบบระบบเบรก (Optimum point of brake system design) ประสิทธิภาพการเบรกสูงสุดแสดงดังรูปที่ 2.4



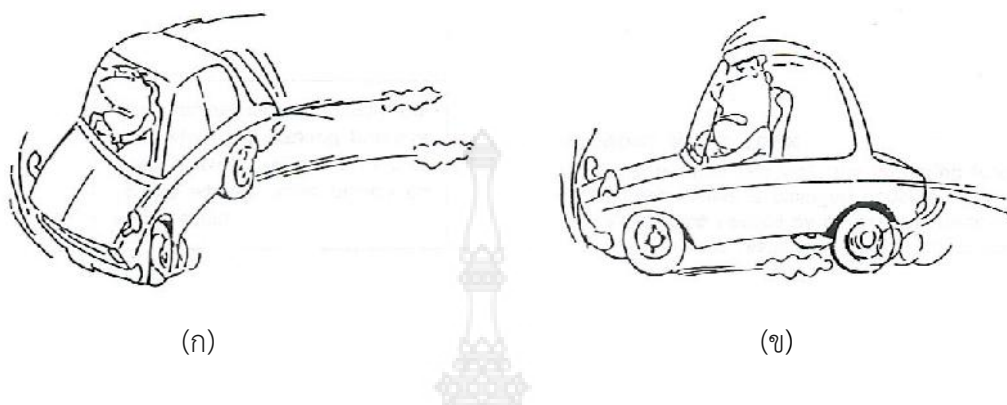
รูปที่ 2.4 ประสิทธิภาพการเบรกสูงสุดหรือจุดเหมาะสมของการออกแบบระบบเบรก

2.2.3 การลื่นไถลหรือการล็อกของล้อ

การลื่นไถลหรือการล็อกของล้อในรถยนต์ที่ไม่มีระบบป้องกันการล็อกของล้อ (Anti-Lock Brake System) เกิดขึ้นได้จาก 2 กรณีคือ ปริมาณของแรงเบรกที่ผู้ขับขี่เหยียบเบรกมีค่ามากเกินไป และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นถนนมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรก ทั้งสองกรณีนี้ทำให้ล้อเกิดการล็อกซึ่งเป็นผลให้การบังคับรถยนต์ไม่เป็นไปตามที่กำหนด

อย่างไรก็ตามความรุนแรงของอันตรายที่เกิดจากการล็อกของล้อระหว่างล้อหน้าและล้อหลังนั้นมีความแตกต่างกัน โดยความรุนแรงนั้นจะมีระดับสูงหากเกิดการล็อกที่บริเวณล้อหลัง สืบเนื่องจากแรงที่กระทำด้านท้ายของรถยนต์นั้นทำให้รถยนต์เกิดการหมุนรอบตัวไม่สามารถควบคุม

รถยนต์ได้ ในทางกลับกันหากเกิดการลื่นที่ล้อหน้าจะส่งผลเพียงการสูญเสียการบังคับเพียงชั่วขณะเท่านั้นการลื่นของล้อแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การลื่นของล้อ (ก) ลื่นหลัง (ข) ลื่นหน้า

2.2.4 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนน (Friction coefficient of road surface)

การเคลื่อนที่ของรถยนต์ไปตามที่ผู้ขับขี่ต้องการนั้น เรากล่าวได้ว่าไม่สามารถเลือกไปตามถนนที่ต้องการได้เสมอไป ดังนั้นรถยนต์ที่เคลื่อนที่ไปทุกสภาพถนนในทุกพฤติกรรมการขับขี่อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ได้ เช่นในกรณีทำการเบรกหรือเข้าโค้งในขณะที่พื้นถนนลื่นทำให้มีโอกาสที่รถยนต์เกิดปัญหาการควบคุม ซึ่งอาจมีความรุนแรงจนเกิดการพลิกคว่ำ จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น เปิดเผยให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการบังคับยานยนต์ ทั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำวิจัยได้นำเสนอตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนน เพื่อประโยชน์ในการช่วยประเมินการขับขี่รถยนต์ ดังแสดงตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนนแบบต่าง ๆ [11]

Type	Range of Friction Coefficient	
	Concrete and Asphalt	Tar macadam
Dry	0.76-0.85	0.58-0.62
Wet	0.48-0.52	0.38-0.42
Oily	0.35-0.40	0.25-0.30

2.2.5 เสถียรภาพการบังคับรถยนต์ (Vehicle stability control)

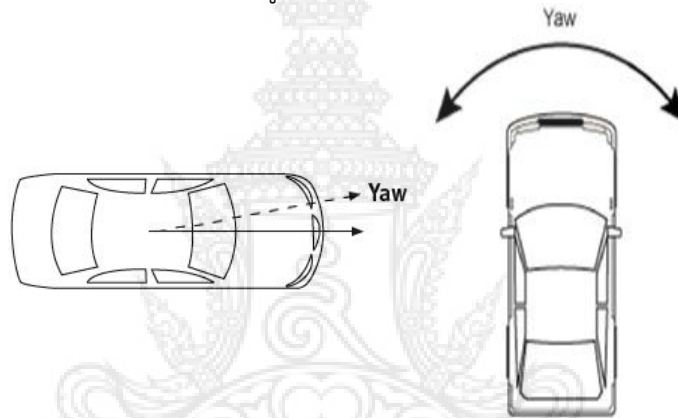
เสถียรภาพการบังคับรถยนต์เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยทั้งของผู้ขับขี่และผู้โดยสาร เนื่องจากการรักษาไว้ซึ่งความมั่นคงของการขับขี่รถยนต์ ทำให้รถยนต์สามารถแล่นอยู่บนท้องถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการรักษาไว้ซึ่งเสถียรภาพของรถยนต์นั้น สามารถพิจารณาหรือชี้วัดได้จากมุม 4 มุม คือ มุมส่าย (Yaw angle) มุมโคลง หรือมุมพลิกคว่ำ (Roll angle)

มุมกระดก (Pitch angle) มุมลื่นไถลด้านข้าง (Sideslip angle) ที่กระทำขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ในสถานะต่างๆ

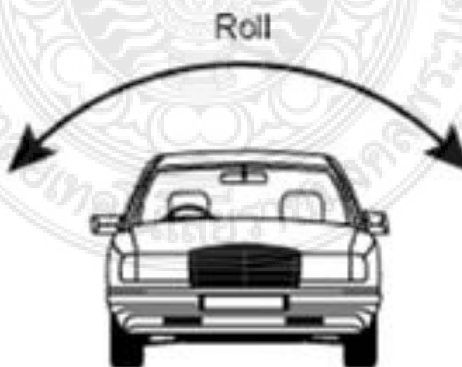
สำหรับมุมส่าย (Yaw angle) เป็นมุมที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาจากด้านหน้าของรถยนต์ อันเป็นผลจากการสูญเสียการควบคุมของพวงมาลัย ทำให้รถยนต์เกิดการส่ายไปมาทั้งด้านซ้ายและด้านขวา พฤติกรรมการส่ายของรถยนต์แสดงดังรูปที่ 2.6

ส่วนกรณีมุมโคลง หรือมุมพลิกคว่ำ (Roll angle) เป็นมุมที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาจากด้านหน้าของรถยนต์ อันเป็นผลจากความไม่สมดุลของแรงยกตัวในซีกด้านซ้ายและด้านขวาของรถยนต์ พฤติกรรมการโคลงของรถยนต์แสดงดังรูปที่ 2.7

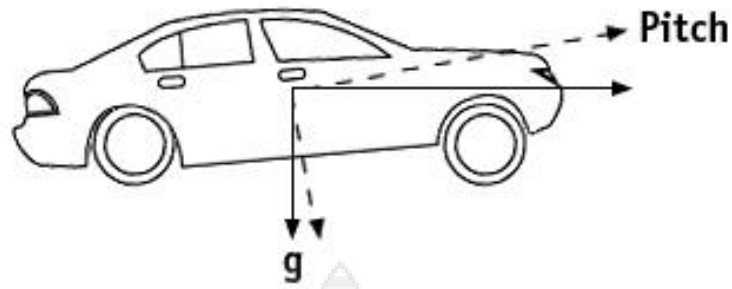
มุมกระดก (Pitch angle) เป็นมุมที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาจากด้านหน้าและด้านข้างของรถยนต์ อันเป็นผลจากสภาพของพื้นถนนที่มีระดับต่างกัน เกิดจากการเบรก และการบรรทุก พฤติกรรมการกระดกของรถยนต์แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการส่ายของรถยนต์
ที่มา : <http://www.sensorsmag.com>

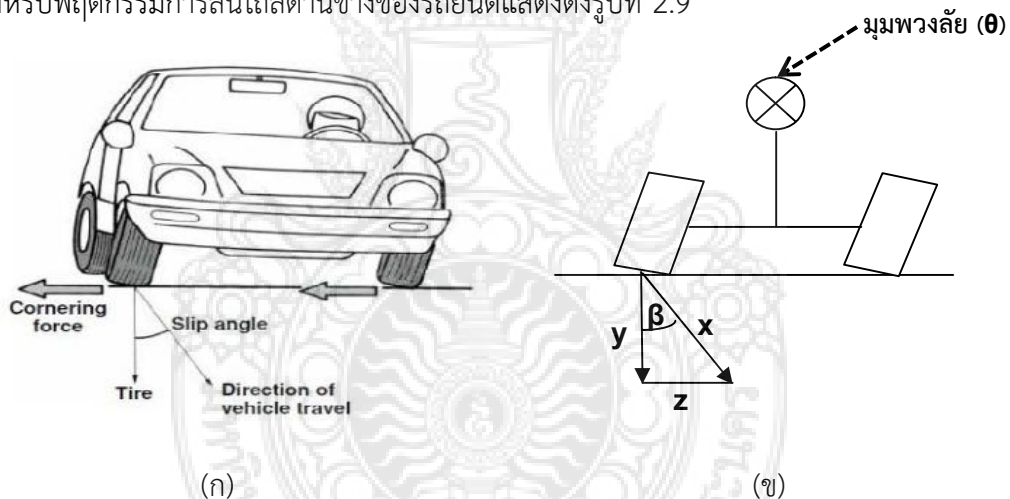


รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการโคลงของรถยนต์
ที่มา : <http://www.findmems.com>



รูปที่ 2.8 พฤติกรรมการกระดกของรถยนต์
ที่มา : <http://www.sensorsmag.com>

มุมลื่นไถลด้านข้าง (Sideslip angle) เป็นมุมที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาจากด้านข้างของรถยนต์ในขณะที่เข้าโค้ง อันเป็นผลจากล้อของรถยนต์พยายามที่จะตั้งหรือผลักรถยนต์ให้เข้าและออกจากโค้ง ซึ่งโดยปกติแล้วมุมลื่นไถลด้านข้างจะมีค่าเป็นบวก (+) และลบ (-) อย่างไรก็ตามหากมีค่าเป็นบวก ยางรถยนต์ก็พยายามที่จะตั้งเข้าไปในโค้ง ส่วนมีค่าเป็นลบยางรถยนต์ก็พยายามที่จะผลักรถยนต์ออกจากโค้ง สำหรับพฤติกรรมการลื่นไถลด้านข้างของรถยนต์แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการลื่นไถลของรถยนต์
ที่มา : <http://www.goldwingfacts.com>

การพิจารณาหามุมลื่นไถลด้านข้าง Sideslip angle (β) ตามรูปที่ 2.9 จะพิจารณาจากมุมพวงมาลัยที่เปลี่ยนไป (θ) ที่ส่งผลให้ระยะของการลื่นไถลของล้อ Sideslip (x) เปลี่ยนตามโดยที่ระยะ y และ z เป็นระยะที่อ้างอิงที่ถูกระบุมาเพื่อพิจารณาค่า Sideslip (x) และ Sideslip angle (β) ซึ่งการคำนวณหาค่า Sideslip angle (β) แสดงดังสมการที่ 14

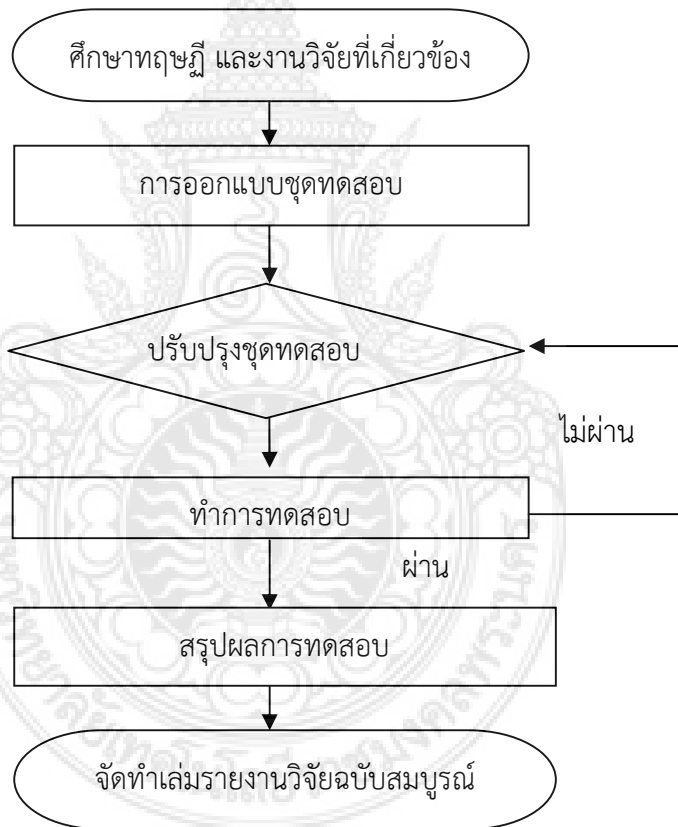
$$\text{Sideslip angle } (\beta) = \sin^{-1}(z/x)$$

สมการที่ 13

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

การจัดทำวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสัดส่วนแรงเบรกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการควบคุมรถยนต์ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์และมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ก่อนการลงมือปฏิบัติและทดสอบ อีกทั้งเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 3.1



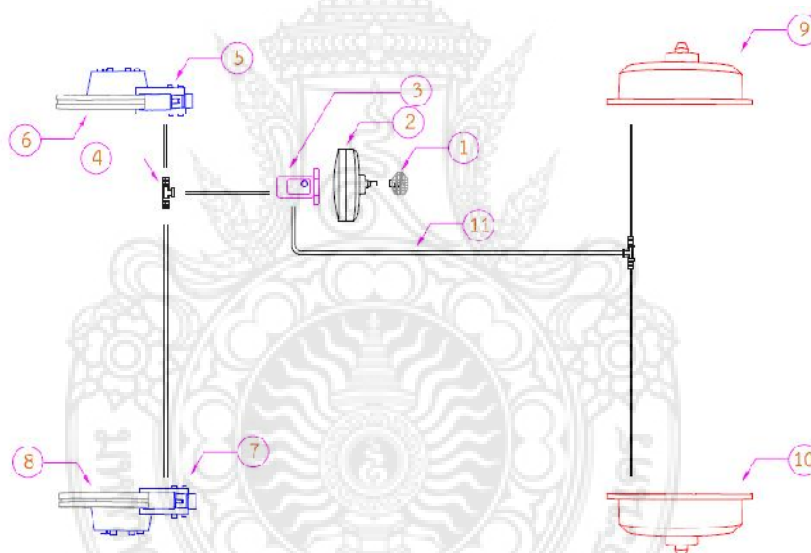
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบวงจรแบ่งแรงเบรก

การออกแบบการกระจายแรงเบรก เป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการจัดทำวิจัยนี้ เนื่องจากโดยปกติแล้วรถยนต์ที่ใช้งานทั่วไปถูกออกแบบการกระจายแรงเบรกแบบคงที่ (Rigid Brake Force Distribution) ดังแสดงตามรูปที่ 3.2 ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบวงจรการกระจายแรงดันเบรกขึ้นมาใหม่ เพื่อให้สามารถศึกษาการกระจายแรงเบรกในสัดส่วนต่าง ๆ โดยวงจรการกระจายแรงดันของระบบเบรกที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.3

สำหรับวงจรกระจายแรงดันเบรกของรถยนต์ปกติมีอุปกรณ์การทำงานหลัก คือ แป้นเหยียบเบรก หม้อลมเบรก กระจุกน้ำมันเบรก น้ำมันเบรก แม่ปั้มเบรก ท่อส่งน้ำมันเบรก ชุดเบรกหน้าและหลัง ดังแสดงตามรูปที่ 3.2

ส่วนกรณีของวงจรกระจายแรงดันเบรกของรถยนต์ที่ออกแบบมาใช้ในการทดสอบของวิจัยนี้มีอุปกรณ์การทำงาน คือ แป้นเหยียบเบรก หม้อลมเบรก กระจุกน้ำมันเบรก น้ำมันเบรก แม่ปั้มเบรก ท่อส่งน้ำมันเบรก ชุดเบรกหน้าและหลัง โดยมีการเพิ่มเติมอุปกรณ์จากวงจรปกติ คือ เกจวัดแรงดัน วาล์วปรับเปลี่ยนแรงดันเบรก แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 วงจรกระจายแรงดันเบรกของรถยนต์ปกติ

หมายเหตุ

หมายเลข 1 คือ แป้นเบรก

หมายเลข 3 คือ แม่ปั้มเบรก

หมายเลข 5 คือ ดิสก์เบรกล้อขวา

หมายเลข 7 คือ ดิสก์เบรกล้อซ้าย

หมายเลข 9 คือ ทรัมเบรกล้อขวา

หมายเลข 11 คือ ท่อน้ำมันเบรก

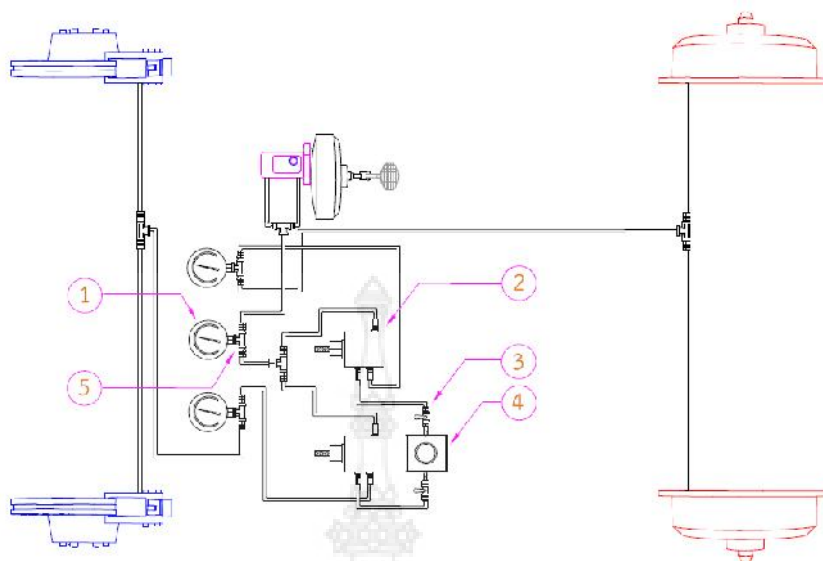
หมายเลข 2 คือ หม้อลมเบรก

หมายเลข 4 คือ ท่อ 3 ทาง

หมายเลข 6 คือ งานเบรกล้อซ้าย

หมายเลข 8 คือ งานเบรกล้อขวา

หมายเลข 10 คือ ทรัมเบรกล้อซ้าย



รูปที่ 3.3 วงจรกระจายแรงดันเบรกของรถยนต์ที่ถูกออกแบบใหม่

หมายเหตุ

หมายเลข 1 คือ เกจวัดแรงดันน้ำมัน	จำนวน 3 ตัว (รวม เฟลาหน้า และเฟลาท้าย)
หมายเลข 2 คือ วาล์วปรับแรงดัน	จำนวน 2 ตัว (เฟลาหน้า และเฟลาท้าย)
หมายเลข 3 คือ วาล์วเดรนน้ำมันเบรก	จำนวน 2 ตัว (เฟลาหน้า และเฟลาท้าย)
หมายเลข 4 คือ ถังจัดเก็บน้ำมันเบรก	จำนวน 1 ตัว
หมายเลข 5 คือ ดิสก์เบรกล้อขวา	จำนวน 7 ตัว

3.2 การออกแบบการทดสอบ

สำหรับการออกแบบการทดสอบในวิจัยนี้ใช้กระบวนการทดสอบตามมาตรฐาน FMCSA No.121 part 49CFR 393.52 (สหรัฐอเมริกา) เป็นหลัก เพื่อใช้ในการศึกษาผลของเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ อันเป็นผลจากการปรับเปลี่ยนสัดส่วนแรงเบรก ดังนั้นก่อนการทดสอบจำเป็นต้องมีการเตรียมการทั้งในส่วนของรถยนต์ อุปกรณ์ สถานที่ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับขั้นตอนการเตรียมการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การเตรียมรถยนต์ทดสอบ

การเตรียมรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ เริ่มต้นจากการนำรถยนต์ไปเปลี่ยนระบบรองรับน้ำหนักให้เป็นแบบ Rigid body โดยการถอดโช้คที่เฟลาหน้าและเฟลาท้าย (Shock absorber) โดยกรณีของเฟลาหน้าใช้เหล็กกล่องแทนที่โช้คบริเวณปีกนกหน้าดังรูปที่ 3.4 (ก) ส่วนเฟลาท้ายใช้สตรัทแทนที่โช้คดังรูปที่ 3.4 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 การปรับเปลี่ยนรถยนต์เป็นแบบ Rigid body (ก) เพลาหน้า (ข) เพลาท้าย

นอกจากนี้ทำการชั่งน้ำหนักลงเพลาหน้าและเพลาท้าย ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักรุ่น TXI-300 ตามรูปที่ 3.5 เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณา โดยข้อมูลของรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1 ยิ่งไปกว่านั้นรถยนต์ดังกล่าวถูกนำไปทำการตั้งศูนย์ เพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความแม่นยำมากที่สุด



รูปที่ 3.5 การชั่งน้ำหนักลงเพลา (ก) เพลาหน้า (ข) เครื่องชั่งน้ำหนัก

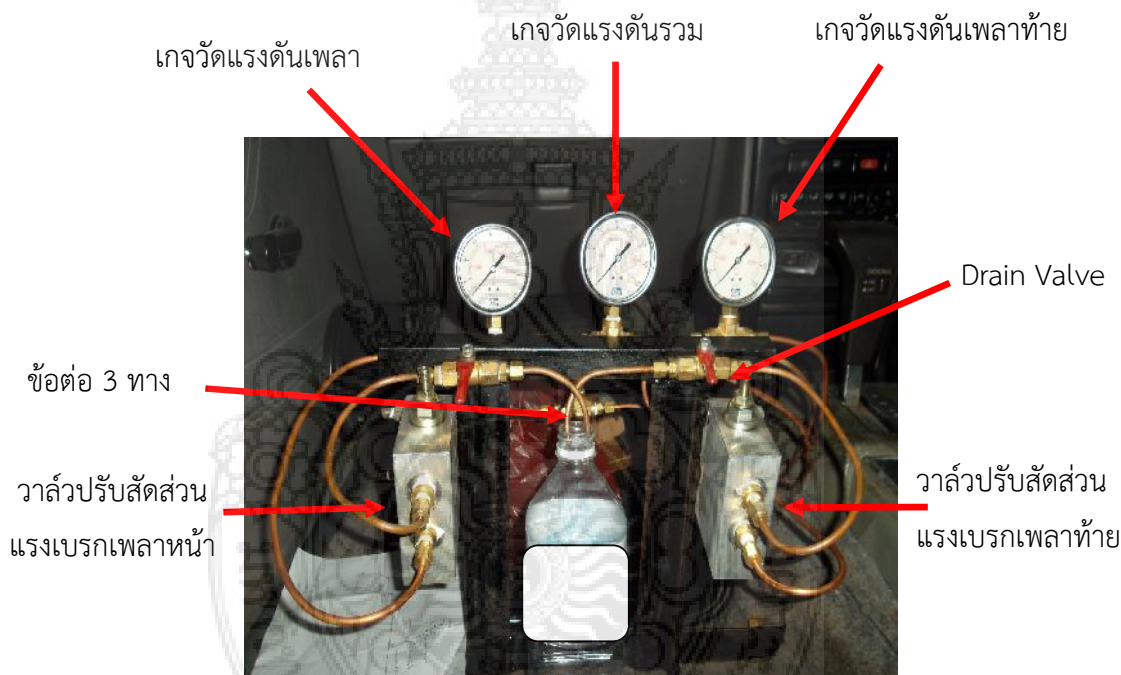
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถยนต์ทดสอบ

รายการ	ค่าและข้อมูลจากการวัด		
ระบบเกียร์	อัตโนมัติ 4 สปีด		
ระบบพวงมาลัย	แบบ	เพาเวอร์	
ระบบกันสะเทือน	หน้า	แบบ Rigid body	
	หลัง	แบบ Rigid body	
ระบบเบรก	หน้า	ดิสก์เบรก	
	หลัง	ดรัมเบรก	
ล้อและยาง	ล้อ	อัลลอยด์ 13"	อัลลอยด์ 13"
	ขนาดล้อ	13"×5.5J	13"×5.5J
	ขนาดยาง	185/70R13	165/70R13
ขนาดและมิติ	ความยาวทั้งหมด (mm)	4,400	
	ความกว้างทั้งหมด (mm)	1,600	
	ความสูงทั้งหมด (mm.)	1,400	
	ระยะฐานล้อ (mm)	2,530	
	ระยะห่างระหว่างล้อคู่หน้า/หลัง (mm)	1,400	1,395
	น้ำหนักลงเพลา (kg)/(N)	1,080/10,595	
	หน้า (ซ้าย:ขวา)	(309 : 330) (3,032 : 3,237)	639 6,269
	หลัง (ซ้าย:ขวา)	(210 : 231) (2,060 : 2,266)	441 4,326
สัดส่วนแรงเบรก	หน้า : หลัง	(60 : 40)	

หมายเหตุ : ข้อมูลจำเพาะของรถทดสอบได้จากการวัด

3.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ปรับตั้งแรงดันเบรก

การติดตั้งอุปกรณ์ปรับตั้งแรงดันเบรกบริเวณเบาะผู้โดยสารด้านหน้า ซึ่งมีการเพิ่มเติมอุปกรณ์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวนี้อาจมีการติดตั้งอุปกรณ์แบ่งแรงดันน้ำมันเบรกระหว่างเพลาด้านหน้าและเพลาด้านท้าย ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในระบบไฮดรอลิกส์ ทำให้เกิดปัญหาเรื่องคุณสมบัติการกัดกร่อนจากการใช้น้ำมันเบรกซิลิโคนบริเวณชุดแม่ปั๊ม กระบอกเบรก (เฉพาะดรัมเบรกหลัง) และคาลิปเปอร์ (เฉพาะดิสก์เบรกหน้า) ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงเปลี่ยนสารตัวกลางในระบบเบรกจากน้ำมันเบรกตามมาตรฐานด้านความปลอดภัยสำหรับน้ำมันเบรกของกรมการขนส่งแห่งสหรัฐอเมริกา Department of Transportation (DOT) ทั้งนี้ผู้วิจัยทำการเปลี่ยนจากมาตรฐาน DOT 3 ไปเป็นน้ำมันไฮดรอลิกส์เบอร์ 32 (AW Hydraulic oil ISO 32) อย่างไรก็ตามสามารถยืดอายุการใช้งานของซิลิโคนดังกล่าว สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ปรับตั้งแรงดันเบรกแสดงดังรูปที่ 3.6



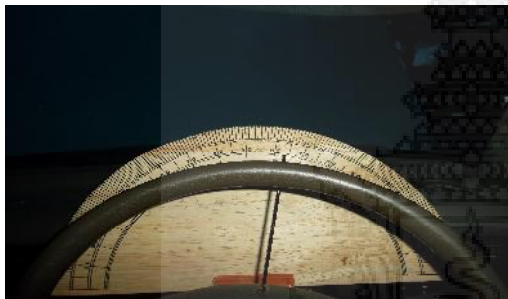
รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์ปรับสัดส่วนแรงเบรก

3.2.3 การติดตั้งเครื่องมือวัดมุมพวงมาลัย

เครื่องมือวัดมุมพวงมาลัยเป็นสิ่งที่จำเป็นอีกประการหนึ่งในการพิจารณาเสถียรภาพของรถยนต์ เนื่องจากข้อมูลที่ได้อาจจากการเคลื่อนที่ของมุมพวงมาลัยถูกนำไปเปรียบเทียบกับมุมล้อที่แปรผันตามการหมุนของพวงมาลัย และถูกใช้มาคำนวณหาค่ามุมลื่นไถลด้านข้าง (Sideslip angle) ที่เป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการชี้วัดความเสถียรของรถยนต์ขณะทดสอบ โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดมุมพวงมาลัยและการเปรียบเทียบค่าของมุมลื่นไถลด้านข้างแสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 การติดตั้งเครื่องมือวัดมุมพวงมาลัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบค่าของมุมเส้นไถลดด้านข้าง

(ก) มุมพวงมาลัยที่เปลี่ยนไป (ข) ระยะของมุมล้อ

3.2.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดความหน่วง

เครื่องมือวัดความหน่วง (VC 4000DAQ) ถูกติดตั้งบริเวณกระจกหน้าด้านในของรถ เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลความหน่วงที่เกิดขึ้นระหว่างการเบรก นอกจากนี้ยังสามารถใช้เก็บข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาเสถียรภาพของรถ เช่น ระยะทางการเบรก เวลาที่ใช้ในการเบรก มุมส่าย (Yaw angle) และ มุมกระดก (Pitch angle) การติดตั้งเครื่องมือวัดความหน่วงแสดงดังรูปที่ 3.9 (ก)

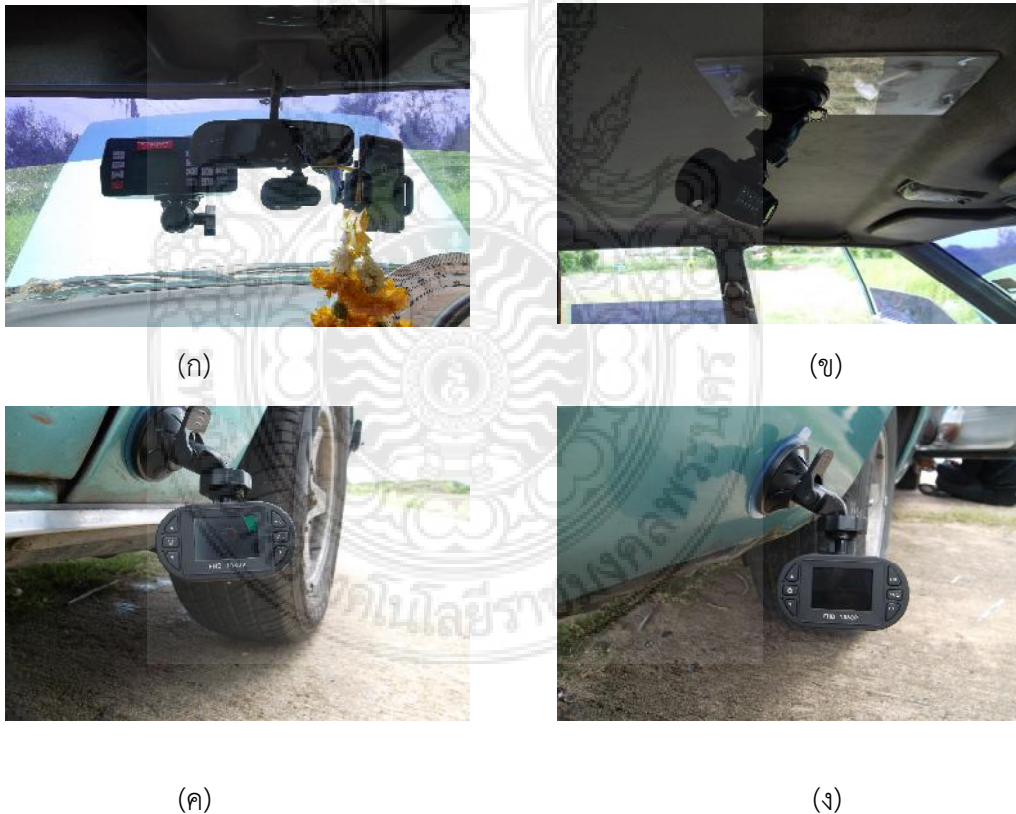
อย่างไรก็ตามคู่มือการใช้งานของ (VC 4000DAQ) แสดงถึงค่าช่วงเวลาการเก็บข้อมูล (Sampling rate) ที่ 100 Hz หรือมีความถี่ในการเก็บผลข้อมูล 100 ครั้งต่อวินาที ซึ่งผลที่ได้จากแรงเหยียบเบรกที่ส่งผ่านตัวตรวจจับแรงเหยียบเบรกตามรูปที่ 3.9 (ข) ส่งผลให้เกิด ความหน่วง ดังนั้นผลของระยะทางการเบรก เวลาที่ใช้ในการเบรก และความเร็วจึงแสดงในข้อมูลการทดสอบเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณของเครื่องมือ ยิ่งไปกว่านั้นเครื่องมือ (VC 4000DAQ) ยังสามารถเปรียบเทียบความเร็วของรถยนต์ ขณะการทดสอบด้วยระบบระบุพิกัดตำแหน่งดาวเทียม (GPS) อีกด้วย



รูปที่ 3.9 การติดตั้งเครื่องมือวัดความหน่วง
(ก) เครื่อง VC 4000DAQ (ข) ตัวตรวจจับแรงเหวี่ยงเบรก

3.2.5 การติดตั้งกล้องบันทึกภาพยนตร์ (VDO)

กล้องบันทึกภาพยนตร์ถูกใช้เพื่อประกอบการพิจารณาถึงพฤติกรรมคนขับ มุมพวงมาลัย และการสั่นไหวของล้อ โดยกล้องบันทึกภาพยนตร์ที่ใช้มีจำนวนทั้งสิ้น 4 ตัว ซึ่งกล้องบันทึกภาพพฤติกรรมคนขับและพวงมาลัยถูกติดตั้งบริเวณห้องโดยสาร ส่วนกล้องบันทึกการสั่นไหวของล้อถูกติดตั้งบริเวณภายนอกของรถ ดังแสดงตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การติดตั้งกล้องบันทึกภาพยนตร์
(ก) พฤติกรรมคนขับ (ข) มุมพวงมาลัย (ค) การสั่นไหวของล้อหน้า (ง) การสั่นไหวของล้อหลัง

3.3 การคำนวณ

3.3.1 การคำนวณหาแรงเบรกที่เพลาน้ำและเพลาท้าย

จากสมการที่ 2.2

$$F_{BF} = F_F \times \mu_{road}$$

กำหนดให้ μ_{road} มีค่า 0.85 (เป็นถนนคอนกรีตแห้งจากตารางที่ 2.1)

$$F_F \text{ มีค่า } 309 + 330 = 639 \text{ kg หรือ } 6,269 \text{ N (จากตารางที่ 3.1)}$$

แทนค่า $F_{BF} = 6,269 \times 0.85 = 5,328 \text{ N}$

ดังนั้นแรงเบรกที่เพลาน้ำมีค่า 5,328 N ซึ่งที่มามีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักลงเพลตามมาตรฐานกรมการขนส่งแห่งประเทศไทย

จากสมการที่ (2.3)

$$F_{BR} = F_R \times \mu_{road}$$

กำหนดให้ μ_{road} มีค่า 0.85 (เป็นถนนคอนกรีตแห้งจากตารางที่ 2.1)

$$F_R \text{ มีค่า } 210 + 231 = 441 \text{ kg หรือ } 4,326 \text{ N (จากตารางที่ 3.1)}$$

แทนค่า $F_{BR} = 4,326 \times 0.85 = 3,677 \text{ N}$

ดังนั้นแรงเบรกที่เพลาท้ายมีค่า 3,677 N ซึ่งที่มามีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักลงเพลตามมาตรฐานกรมการขนส่งแห่งประเทศไทย

3.3.2 การคำนวณหาแรงเบรกรวมของรถยนต์

จากสมการที่ 1

$$F_B = F_{BF} + F_{BR}$$

แทนค่า $F_B = 5,328 + 3,677 = 9,005 \text{ N}$

ดังนั้นแรงเบรกรวมของรถยนต์มีค่า 9,005 N

3.3.3 การคำนวณแรงเบรกตามสัดส่วนแรงเบรก (เพลาน้ำ : เพลหลัง)

กรณีสัดส่วนแรงเบรกเพลาน้ำ 10 : เพลท้าย 90

จากสมการที่ (2.4)

$$\begin{aligned} F'_{BF} &= \mu_{road} \times m \times g \times i_F \\ &= 0.85 \times 1,080 \times 9.81 \times 0.1 = 900.558 \text{ N} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned} F'_{BR} &= \mu_{road} \times m \times g \times i_R \\ &= 0.85 \times 1,080 \times 9.81 \times 0.9 = 8,105.022 \text{ N} \end{aligned}$$

อย่างไรก็ตามผลการคำนวณแรงเบรกตามสัดส่วนทุก ๆ สัดส่วนแรงเบรกแสดงไว้ที่ตารางที่ 4.2

3.3.4 การคำนวณหา Dynamic load transfer

จากสมการที่ (2.4)

$$\Delta F = mah/L$$

กำหนดให้ a มีค่า 0.35 (เป็นค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ VC 4000DAQ)

m มีค่า 1080 kg หรือ 10595 N (จากตารางที่ 3.1)

h มีค่า 0.42 (เป็นการตั้งสมมุติฐานว่าระยะจุดศูนย์ถ่วงในแนวดิ่งคิดเป็นร้อยละ 30)

L มีค่า 2.53 m (จากตารางที่ 3.1)

แทนค่า $\Delta F = 10,595 \times 0.35 \times 0.42 / 2.53 = 616 \text{ N}$

ดังนั้นค่า Dynamic load transfer มีค่า 616 N

3.3.5 การคำนวณหา Sideslip angle

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เรื่องการคำนวณหาค่า Sideslip angle (β) ที่ผลจากการเปลี่ยนแปลงมุมพวงมาลัย (θ) และมุมพวงมาลัยดังกล่าวส่งผลให้ค่า Sideslip (z) เปลี่ยนแปลงโดยค่าจากสมการที่ (2.7) Sideslip angle (β) = $\sin^{-1}(z/x)$ การคำนวณหาค่า Sideslip angle แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การคำนวณหาค่า Sideslip angle (β)

มุมพวงมาลัย (θ)	ระยะ (cm)		Sideslip (z) (m/km)	Sideslip angle (β)
	x	Y		
0	40	40	0	0
10	40	40	1.8	2.5791
20	40	40	2.8	4.0139
30	40	40	3.6	5.1636
40	40	40	4	5.7391
50	40	40	4.5	6.4594
60	40	40	5.5	7.9032
70	40	40	5.9	8.4820
80	40	40	6.5	9.3520
90	40	40	7.5	10.8069

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิจารณ์

4.1 สมมุติฐานการวิจัย

4.1.1 การศึกษาสัดส่วนแรงเบรกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ มีความจำเป็นต้องทราบถึงความสามารถการเบรกของรถยนต์เสียก่อนจากแรงเบรกในสัดส่วนต่าง ๆ

4.1.2 ตัวแปรที่ใช้ในการชี้วัดความสามารถของการเบรก คือ ความหน่วง (Deceleration) ระยะทางการเบรก (Braking distance) และเวลาที่ใช้ในการเบรก (Time of braking) หรืออื่น ๆ

4.1.3 ตัวแปรที่ใช้ในการชี้วัดเสถียรภาพของรถยนต์ คือ มุมลื่นไถลด้านข้าง (Sideslip angle) มุมส่าย (Yaw angle) มุมกระดก (Pitch angle) และการลื่นไถลของล้อ (Wheel lock-up) หรืออื่น ๆ

4.1.4 ตัวแปรใดบ้างที่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน

4.1.5 สัดส่วนแรงเบรกใดส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของรถยนต์ เพราะเหตุใด

4.2 สมมุติฐานการทดสอบ

4.2.1 มีมาตรฐานใดบ้างที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการเบรก

4.2.2 มีเครื่องมือใดบ้างที่ใช้ในการตรวจสอบหรือเก็บค่าตัวแปรที่ต้องการ

4.2.3 ออกแบบการทดสอบอย่างไรให้สอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบ

4.2.4 ประยุกต์แนวทางการทดสอบกับมาตรฐานอย่างไรภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ

4.2.5 มีเงื่อนไขการทดสอบอย่างไร

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดสอบ

สัดส่วนแรงเบรกหน้า:หลัง	ความเร็วเริ่มต้นเบรก	ความสามารถการเบรก			เสถียรภาพการบังคับรถยนต์			
		ตัวชี้วัด			ตัวชี้วัด			
		ความหน่วง	ระยะทาง	เวลา	Sideslip	Yaw	Pitch	Wheel lock-up
0:100 ถึง 100:0	32 km/hr ตาม มาตรฐาน FMCSA	?	?	?	?	?	?	?

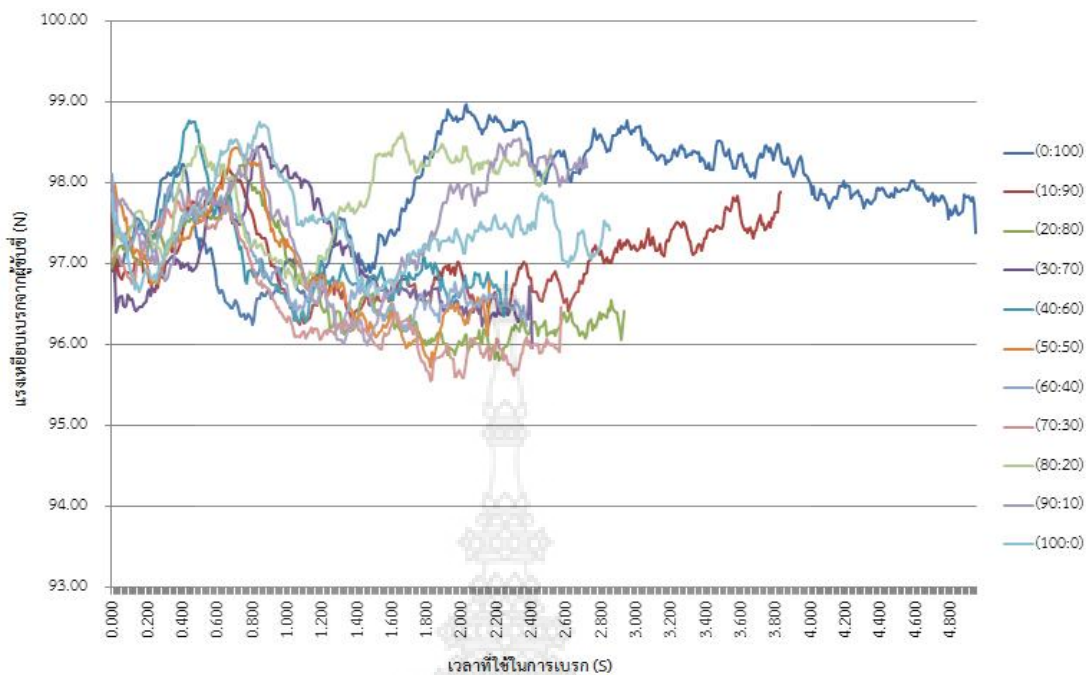
4.3 ผลการทดสอบความสามารถในการเบรก

ความสามารถในการเบรกเป็นความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างความหน่วง ระยะทางในการเบรก และเวลาที่ใช้ในการเบรก ซึ่งเป็นผลมาจากค่าแรงจากการเหยียบเบรกของผู้ขับขี่ โดยความสามารถในการเบรกแสดงดังตารางที่ 4.2 เพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลการทดสอบ ความสัมพันธ์ของพฤติกรรม การเหยียบเบรกในแต่ละสัดส่วนถูกนำเสนอ โดยความสัมพันธ์ของพฤติกรรมในการเหยียบเบรกมีรายละเอียดในการพิจารณา คือ แรงเหยียบที่เกิดขึ้นจากคนขับ ความหน่วง ระยะเบรก และเวลาที่ใช้ในการเบรกเป็นค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด VC 4000DAQ ซึ่งค่าของความหน่วงนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลง พฤติกรรมของรถยนต์ อันเป็นผลมาจากแรงเหยียบของคนขับ ส่วนระยะเบรก และเวลาที่ใช้ในการเบรกเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณของเครื่องมือ VC 4000DAQ ดังกล่าว

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างความหน่วง ระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเบรก ซึ่งมีผลมาจากการเหยียบเบรกของผู้ขับขี่

สัดส่วน แรงเบรก หน้า : หลัง	แรงเหยียบ (N)		ความหน่วง (m/s^2)		แรงเบรก (N)		ระยะ เบรก (m)	เวลาที่ใช้ ในการ เบรก (S)
	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	หน้า	หลัง		
0:100	97.67	98.98	-0.0858	-0.1592	0	9,005.58	31.97	4.810
10:90	96.78	98.18	-0.1010	-0.1789	900.55	8,105.02	23.52	3.690
20:80	96.37	98.23	-0.1241	-0.1944	1,801.11	7,204.46	17.83	2.820
30:70	96.65	98.48	-0.1487	-0.1967	2,701.67	6,303.90	15.03	2.330
40:60	96.67	98.77	-0.1713	-0.2706	3,602.23	5,403.34	14.85	2.320
50:50	96.51	98.43	-0.1738	-0.2589	4,502.69	4,502.79	13.69	2.180
60:40	96.49	98.11	-0.1600	-0.2444	5,403.34	3,602.23	14.83	2.240
70:30	96.12	97.86	-0.1483	-0.2622	6,303.90	2,701.67	15.38	2.470
80:20	97.43	98.61	-0.1432	-0.2744	7,204.46	1,801.11	13.67	2.050
90:10	97.14	98.56	-0.1402	-0.2633	8,105.02	900.55	16.21	2.560
100:0	97.12	98.76	-0.1309	-0.2597	9,005.58	0	16.93	2.720

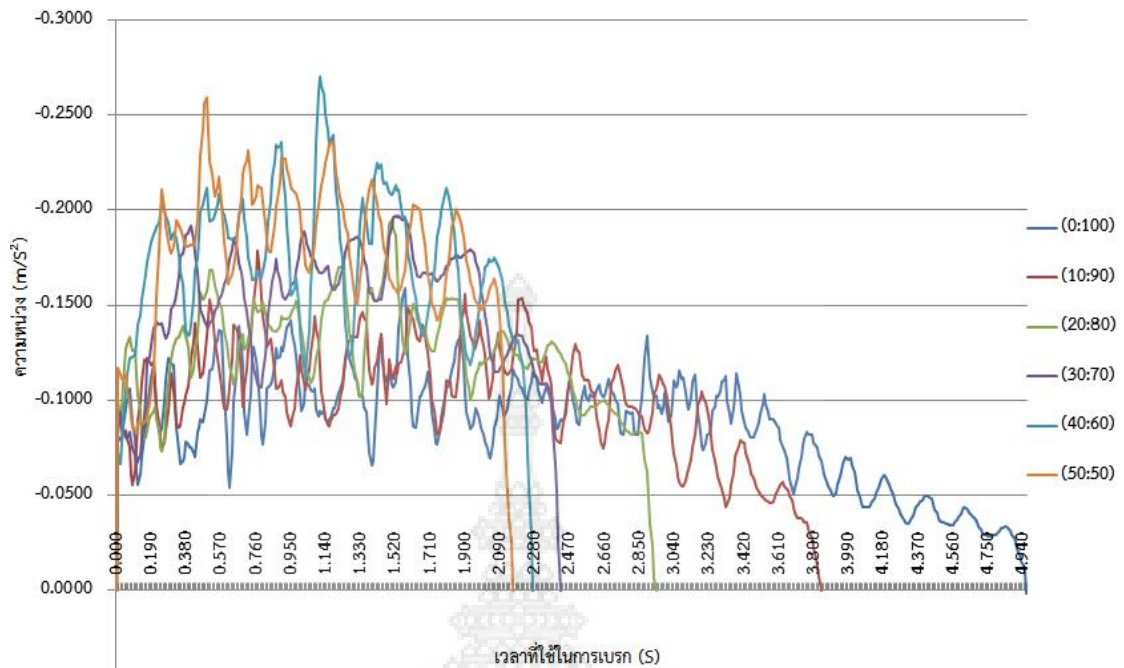
ผลของการทดสอบจากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ความหน่วงสูงสุด เกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 80:20 โดยส่งผลให้ระยะเบรก และเวลาที่ใช้ในการเบรกต่ำที่สุด ในขณะที่ความหน่วงจากการเบรกต่ำที่สุด เกิดขึ้นที่สัดส่วน 0:100 ทำให้ระยะเบรกและเวลาที่ใช้ในการเบรกสูงสุด อย่างไรก็ตามพฤติกรรมแรงเหยียบเบรกจากผู้ขับขี่ ในทุก ๆ สัดส่วน แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเหยียบเบรกและเวลาที่ใช้ของสัดส่วน 0:100 ถึง 100:0

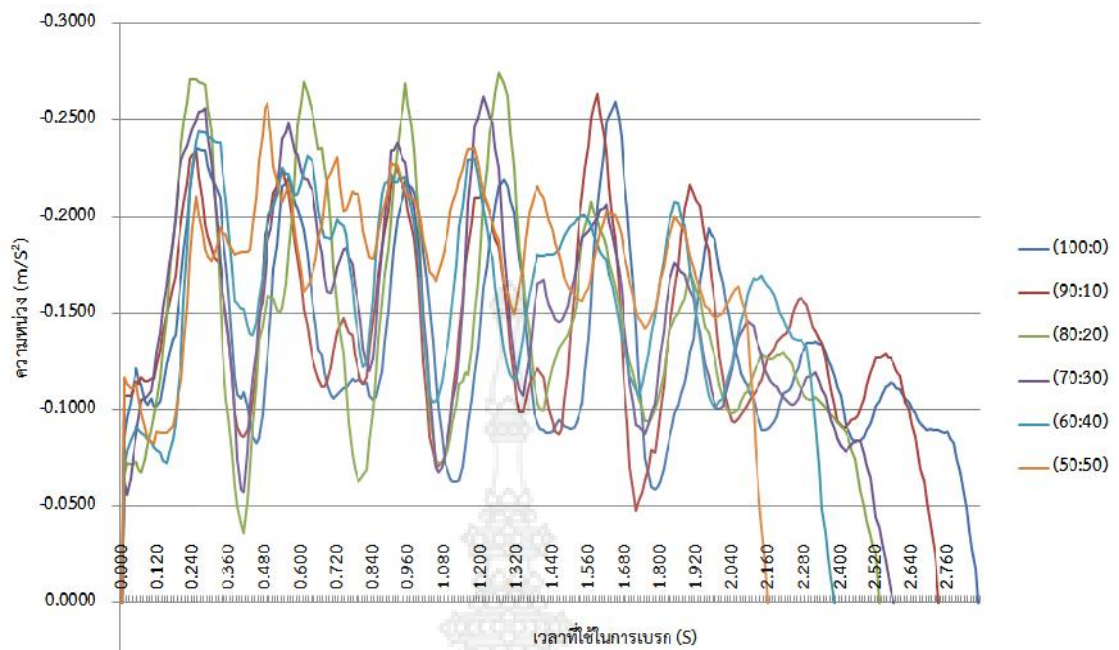
จากรูปที่ 4.1 เปิดเผยให้เห็นว่าในทุก ๆ สัดส่วนแรงเบรก ค่าแรงเบรกอันเกิดมาจากผู้ขับขี่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามพฤติกรรมของผู้ขับขี่ จากการกด ปลด และรักษาแป้นเบรกไว้ โดยหมายถึงการเพิ่มลด และรักษาแรงดันในระบบเบรกไว้ โดยค่าแรงเหยียบในทุก ๆ พฤติกรรมของผู้ขับขี่ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งหมายถึงผลการทดสอบจากผู้ขับขี่ในทุก ๆ สัดส่วนการเบรกมีความน่าเชื่อถือ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในกรณีของความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรก เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจที่ง่ายขึ้น จึงแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว 3 กรณีคือ สัดส่วนแรงเบรกหน้าที่มีค่าน้อยกว่าถึงเท่ากับสัดส่วนแรงเบรกหลัง (0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60 และ 50:50) ดังแสดงรูปที่ 4.2 สัดส่วนแรงเบรกหน้าที่มีค่ามากกว่าถึงเท่ากับสัดส่วนแรงเบรกหลัง (100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50) ตามรูปที่ 4.3 และกรณีการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนแรงเบรกมากที่สุดที่เพลหน้า (0:100) ค่าสัดส่วนแรงเบรกลดที่เพลหน้า (100:0) ค่าสัดส่วนแรงเบรกที่เพลหน้าเท่ากับเพลหลัง (50:50) และค่าสัดส่วนแรงเบรกตามน้ำหนักของรถยนต์ทดสอบ (60:40) ตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงตามรูปที่ 4.4



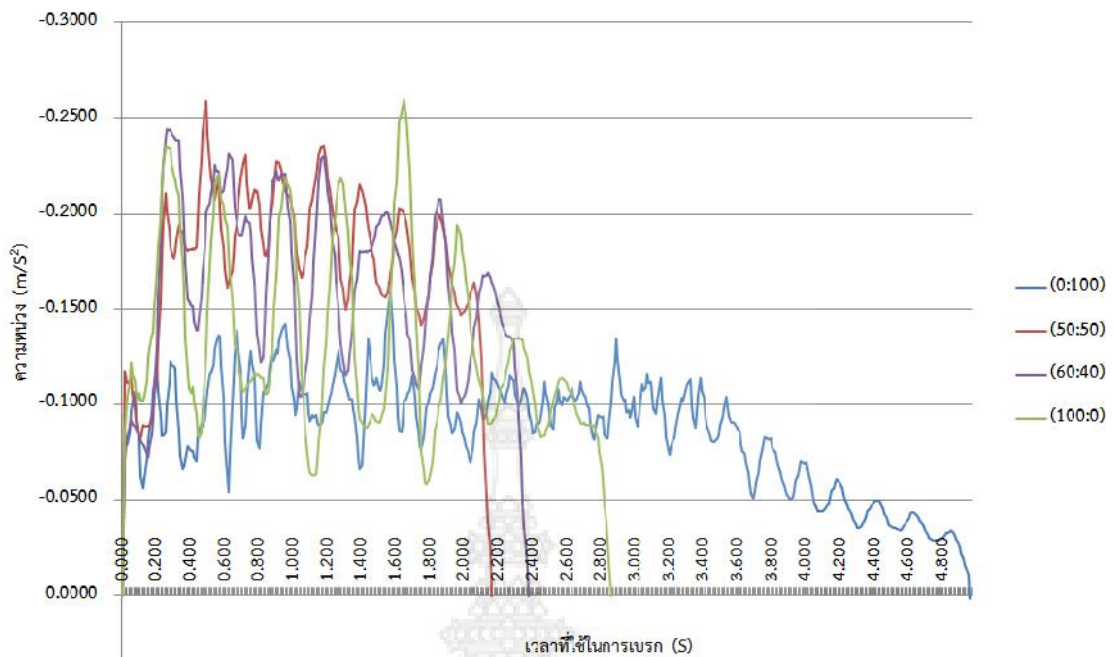
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรกกรณีสัดส่วนแรงเบรกหน้าที่มีค่าน้อยกว่าถึงเท่ากับสัดส่วนแรงเบรกหลัง

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าค่าความหน่วงสูงสุดเกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 40:60 และความหน่วงต่ำสุดเกิดขึ้นที่สัดส่วน 0:100 โดยภายใต้สัดส่วนดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการเบรกมากที่สุดโดยเป็นผลให้ระยะเบรกยาวที่สุดอีกด้วย ส่วนกรณีของเวลาที่ใช้ในการเบรกลดน้อยสุดเกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 50:50 ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเบรกลดน้อยสุดควรปรากฏขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 40:60 เนื่องจากค่าความหน่วงสูงสุดเกิดขึ้นที่สัดส่วนนี้ อย่างไรก็ตามผลของเวลาในการเบรกที่น้อยที่สุด เป็นผลสืบเนื่องมาจากค่าความหน่วงภายใต้สัดส่วนแรงเบรก 50:50 มีความสม่ำเสมอมากกว่าในสัดส่วนอื่น ๆ อันเป็นผลจากพฤติกรรมของผู้ขับขี่ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่ความสม่ำเสมอของการเหยียบเบรกมีผลโดยตรงกับระยะทางการเบรก



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรกกรณีสัดส่วนแรงเบรกหน้าที่มีค่ามากกว่าถึงเท่ากับสัดส่วนแรงเบรกหลัง

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความหน่วงต่ำสุดและสูงสุดเกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 60:40 และ 80:20 ตามลำดับ ส่วนกรณีของเวลาที่ใช้ในการเบรคน้อยสุดเกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 50:50 เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรกกรณีสัดส่วนแรงเบรกหน้าที่มีค่าน้อยกว่าถึงเท่ากับสัดส่วนแรงเบรกหลังตามรูปที่ 4.2 ซึ่งหากสังเกตค่าความแตกต่างของความหน่วงภายใต้สัดส่วนแรงเบรก 50:50 ทั้งรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่ามีความแตกต่างน้อยกว่าสัดส่วนแรงเบรกอื่น ๆ ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการเบรกมากที่สุดคือสัดส่วนแรงเบรก 100:0 จากผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถตั้งข้อสังเกตหรือสมมุติฐานได้ว่า หากไม่มีแรงเบรกมากกระทำที่เพลาดใด ๆ ผลของเวลาที่ใช้ในการเบรกจะมีค่ามาก ซึ่งส่งผลให้ระยะทางเบรกยาวตามไปด้วย



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรก

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและที่ใช้ในการเบรกในสัดส่วนต่าง ๆ คือ สัดส่วนแรงเบรกมากที่สุดที่เพลหน้า (100:0) สัดส่วนแรงเบรกลดน้อยสุดที่เพลหน้า (0:100) สัดส่วนแรงเบรกที่เพลหน้าเท่ากับเพลหลัง (50:50) และสัดส่วนแรงเบรกตามน้ำหนักของเพลของรถยนต์ทดสอบ (60:40) ตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบสัดส่วนที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.4

ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงและเวลาที่ใช้ในการเบรกพบว่าเวลาที่ใช้ในการเบรกลดน้อยที่สุดจนกระทั่งมากที่สุดเป็นของสัดส่วนแรงเบรก 50:50, 60:40, 100:0 และ 0:100 ตามลำดับ ซึ่งผลของความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลจำเพาะในด้านน้ำหนักของเพลของรถยนต์ทดสอบที่น้ำหนักของเพลหน้ามีค่ามากกว่าน้ำหนักของเพลหลัง ดังนั้นหากสัดส่วนแรงเบรกที่เพลหน้ามีค่ามากกว่าเพลหลัง ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเบรกและระยะเบรกลดน้อยกว่าสัดส่วนแรงเบรกที่เพลหลังมีค่ามากกว่าเพลหน้า อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการเบรกของสัดส่วนแรงเบรก 60:40 ควรมีค่าต่ำกว่าสัดส่วนแรงเบรก 50:50 จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้หากพิจารณาถึงค่าของเวลาในการเบรกของทั้ง 2 สัดส่วนมีค่าต่างกันเพียง 0.2 วินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 8.3 เท่านั้น

4.4 ผลการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์

ผลการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์เป็นวัตถุประสงค์หลักดังที่กล่าวมาแล้ว โดยผลการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์เป็นความสัมพันธ์ต่อเนื่องจากการทดสอบความสามารถในการเบรกจากสัดส่วนแรงเบรกต่าง ๆ โดยพิจารณาถึงตัวแปรหลักต่อไปนี้ คือ มุมสาย (Yaw angle) มุมกระดก (Pitch angle) การลื่นไถลของล้อ (Wheel lock-up) รวมไปถึงค่าการลื่นไถลด้านข้าง (Sideslip) อันเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมพวงมาลัยของรถยนต์ขณะทำการทดสอบ (θ) ที่ถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นมุมบิดของล้อ (β) สำหรับผลการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์แสดงดังตารางที่ 4.3 ส่วนในกรณีผลของการลื่นไถลของล้อทั้ง 4 ล้อแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์

สัดส่วนแรงเบรก หน้า:หลัง	Max. Yaw angle (deg/s)		Max. Pitch angle (deg/s)		มุมพวงมาลัย		
	(+)	(-)	(+)	(-)	θ	β	Sideslip (m/km)
0:100	3.8	5.1	11.0	12.1	5	1.2895	0.9
10:90	3.0	2.7	9.4	14.9	8	2.0632	1.4
20:80	3.6	8.9	7.4	18.7	10	2.5791	1.8
30:70	2.7	6.7	6.0	9.7	15	3.2965	2.3
40:60	4.9	3.8	8.1	11.2	32	5.2787	3.7
50:50	6.6	3.9	9.7	8.3	2	0.5158	0.4
60:40	6.1	2.6	8.4	8.8	7	1.8053	1.3
70:30	4.2	2.1	9.6	13.5	2	0.5158	0.4
80:20	4.3	9.5	10.5	8.2	23	4.3588	3.0
90:10	6.9	3.6	9.3	7.7	48	6.3153	4.4
100:0	4.2	6.5	8.5	10.4	60	7.9032	5.5

หมายเหตุ : Yaw angle (+) คือ การสายของรถไปทางด้านขวาจากตำแหน่งศูนย์กลาง
 Yaw angle (-) คือ การสายของรถไปทางด้านซ้ายจากตำแหน่งศูนย์กลาง
 Pitch angle (+) คือ การกระดกขึ้นของรถจากตำแหน่งศูนย์กลาง
 Pitch angle (-) คือ การกดตัวลงของรถจากตำแหน่งศูนย์กลาง

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการส่ายของรถยนต์ไปด้านขวา (+) สูงสุดเกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 90:10 ส่วนการส่ายของรถยนต์ไปด้านซ้าย (-) สูงสุดเกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 80:20 สำหรับการกระดกขึ้นของรถสูงสุด (+) และการกดตัวลงของรถ (-) เกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 0:100 และ 20:80 ตามลำดับ ทั้งนี้พฤติกรรมของ Yaw angle และ Pitch angle สามารถใช้ในการประเมินเสถียรภาพการควบคุมรถยนต์ในสภาวะการขับขี่แบบต่าง ๆ ได้ ซึ่งหากค่า Yaw angle และ Pitch angle มีค่าอยู่ในระดับวิกฤตส่งผลให้การควบคุมการทรงตัวของรถยนต์ยากขึ้น และอาจส่งผลต่อความปลอดภัยต่อผู้ขับขี่รวมถึงผู้โดยสารและสิ่งแวดล้อมรอบข้าง สำหรับพฤติกรรมส่ายของรถยนต์ และพฤติกรรมการกระดกแสดงดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.15

กรณีของการเปลี่ยนแปลงมุมพวงมาลัย (θ) เป็นผลทำให้การบิดของมุมล้อเปลี่ยนตามไปด้วยซึ่งหากมีค่าสูงเกินกว่าค่าวิกฤต ทั้งนี้นิยมใช้เป็นค่า Sideslip มีหน่วยเป็น m/km โดยค่าปกติของ Sideslip มีค่าระหว่าง 0.6 - 5 m/km [17] อย่างไรก็ตามในการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์ในสัดส่วนแรงเบรก 100:0 มีค่า Sideslip สูงสุดที่ 5.5 m/km ดังนั้นจึงมีความเสี่ยงต่อผู้ขับขี่ รวมถึงสิ่งแวดล้อมรอบข้าง เช่น ผู้โดยสาร คนเดินถนน และผู้ขับขี่รถคันอื่น ๆ เป็นต้น

ตารางที่ 4.4 ผลการสิ้นไกลของล้อที่สัดส่วนแรงเบรกต่าง ๆ

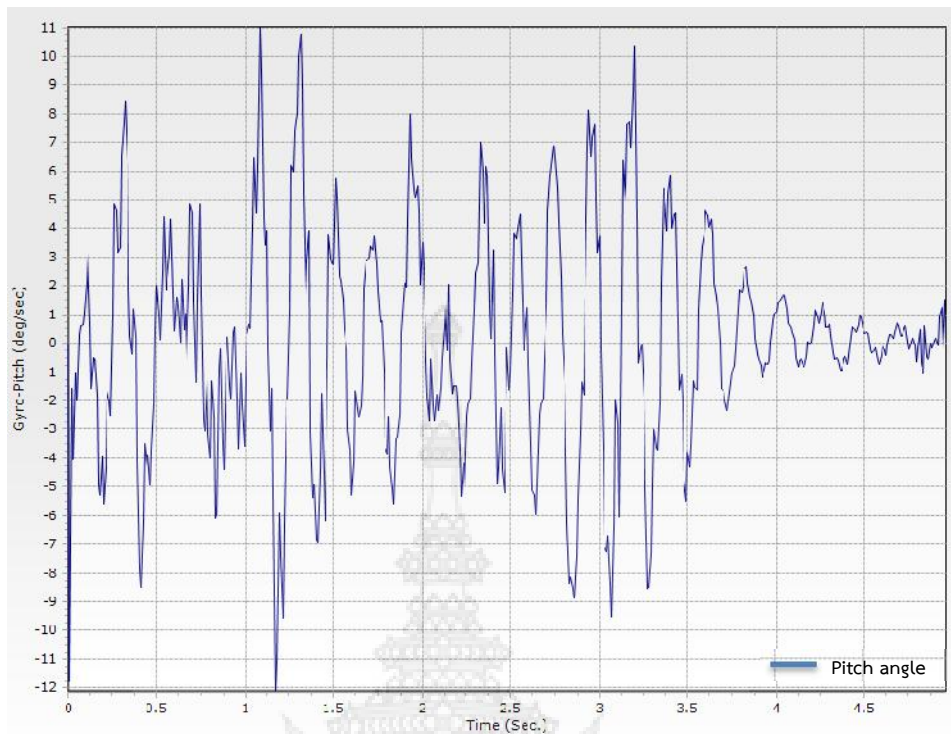
สัดส่วนแรงเบรก หน้า:หลัง	การสิ้นไกลของล้อ			
	หน้าซ้าย	หน้าขวา	หลังซ้าย	หลังขวา
0:100	x	x	x	x
10:90	x	x	x	x
20:80	x	x	x	x
30:70	x	x	x	x
40:60	x	x	x	x
50:50	x	x	x	x
60:40	√	x	x	x
70:30	√	x	x	x
80:20	√	x	x	x
90:10	√	x	x	x
100:0	x	x	x	x

หมายเหตุ : x คือ เกิดการสิ้นไกลของล้อ
√ คือ ไม่เกิดการสิ้นไกลของล้อ

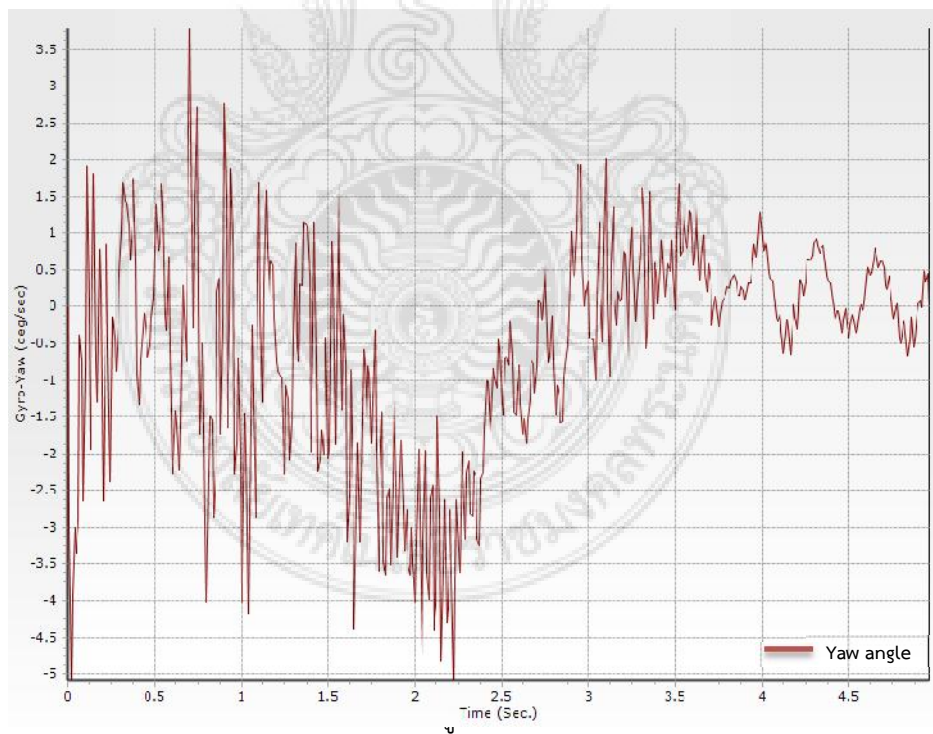
สำหรับผลการลื่นไถลของล้อที่สัดส่วนแรงเบรกต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.4 สะท้อนให้เห็นถึงว่าในทุก ๆ สัดส่วนแรงเบรกที่ทำการทดสอบ ล้อมีการลื่นไถลทั้งสิ้น โดยที่สัดส่วนแรงเบรก 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50 และ 100:0 เกิดการลื่นไถลในทุก ๆ ล้อ ส่วนสัดส่วนแรงเบรก 60:40, 70:30, 80:20 และ 90:10 ไม่เกิดการลื่นไถลเฉพาะล้อหน้าด้านซ้ายเท่านั้น อย่างไรก็ตามผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าล้อเกิดการลื่นไถลในทุก ๆ สัดส่วนแรงเบรก เป็นผลมาจากระบบเบรกที่ถูกออกแบบไว้เป็นระบบปิดจึงมีความดันในระบบค้างอยู่ (Storage pressure) แม้ว่าการแบ่งสัดส่วนการเบรกให้มีค่าเป็นศูนย์ ในกรณี 0:100 และ 100:0 แล้วก็ตาม หากแต่ในทางปฏิบัติยังมีความดันในระบบที่ค้างอยู่ซึ่งถูกใช้เพื่อเตรียมความดันให้พร้อมกับการใช้งาน ดังนั้น ในกรณีการแบ่งสัดส่วนแรงเบรก 0:100 และ 100:0 จึงยังคงมีแรงดันค้างในระบบส่งผลให้ล้อเกิดการลื่นไถลได้ จากแรงเบรกที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบเบรก ซึ่งในกรณีนี้สัดส่วนแรงเบรก 0:100 และ 100:0 กลไกของชุดเบรกจะไม่ทำงานก็ตาม หากแต่สัดส่วนแรงเบรก 100:0 จะส่งผลต่อความเสี่ยงของผู้ขับขี่ เนื่องจากค่า Sideslip เกินค่าวิกฤตตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามการลื่นไถลของล้อควรเกิดขึ้นในทุก ๆ สัดส่วนแรงเบรก และทุก ๆ ล้อหากถนนที่ทำการทดสอบมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเดียวกัน ซึ่งในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนน อาจมีความแตกต่างกันบางในการทดสอบแต่ละครั้ง ดังนั้นผลการลื่นไถลของล้อจึงเป็นไปตามตารางที่ 4.4

4.4.1 ผลการทดสอบค่า Pitch angle และ Yaw angle

สำหรับการทดสอบหาค่า Pitch angle และ Yaw angle พฤติกรรมการกระดกและการส่ายของรถควบคู่กันไป ที่พิจารณาต่อหน่วยของมุม (deg/s) เนื่องจากพฤติกรรมทั้งสองกรณีนี้เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นไปพร้อม ๆ กัน ที่เป็นองค์ประกอบในการพิจารณาถึงเสถียรภาพของรถยนต์ในช่วงเวลานั้น ๆ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง Pitch angle และ Yaw angle ในทุก ๆ สัดส่วนแรงเบรกแสดงดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.15 ตามลำดับ

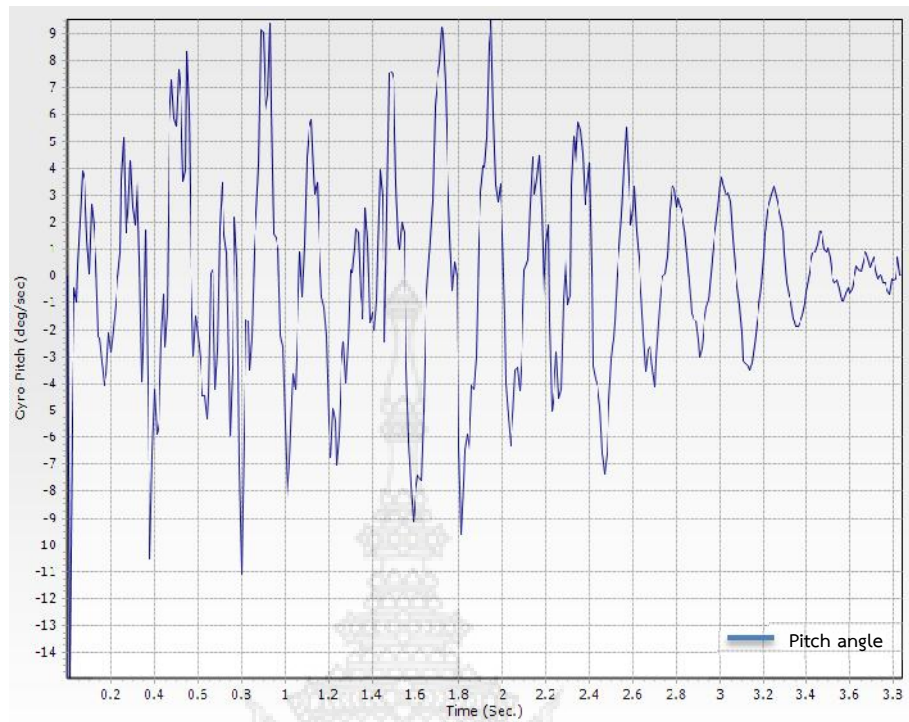


(รูป ก)

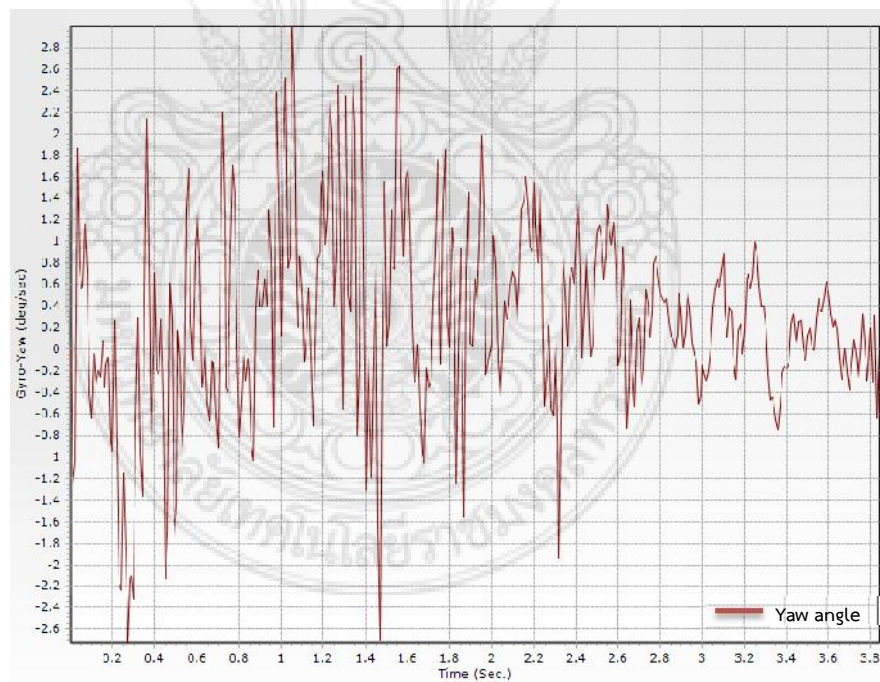


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ ของสัดส่วนแรงเบรก (0:100)

(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle



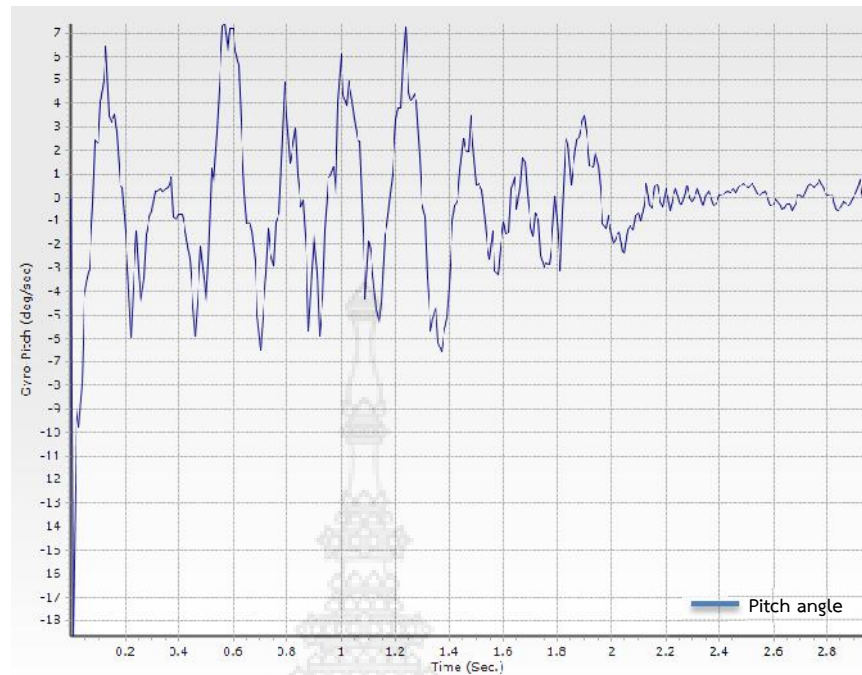
(รูป ก)



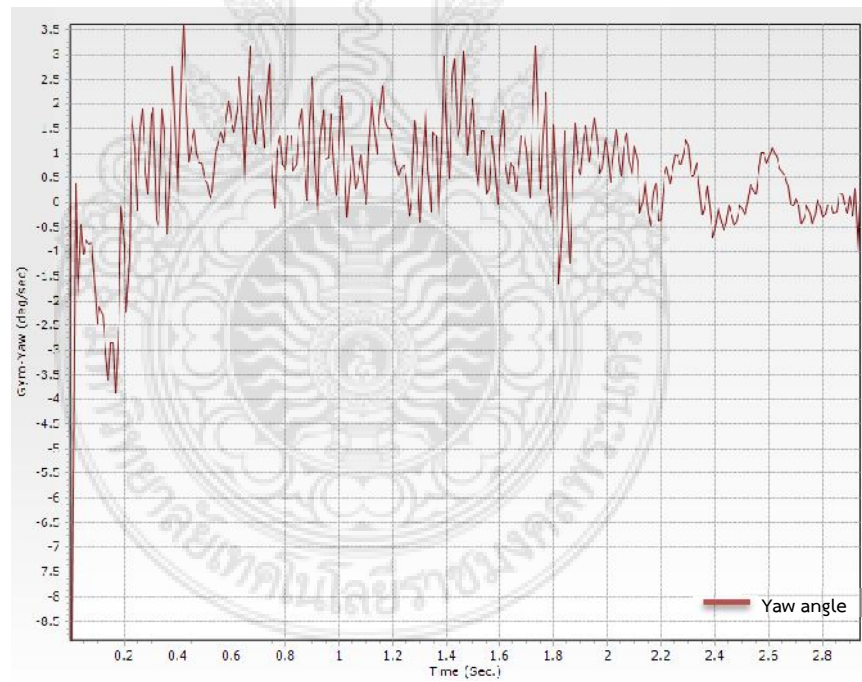
(รูป ข)

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (10:90)

(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle

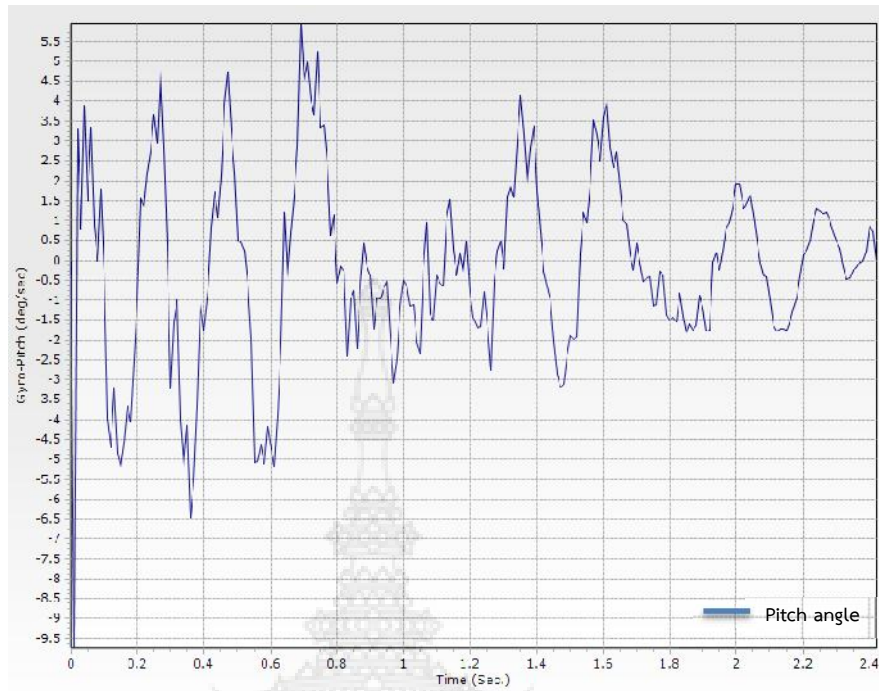


(รูป ก)

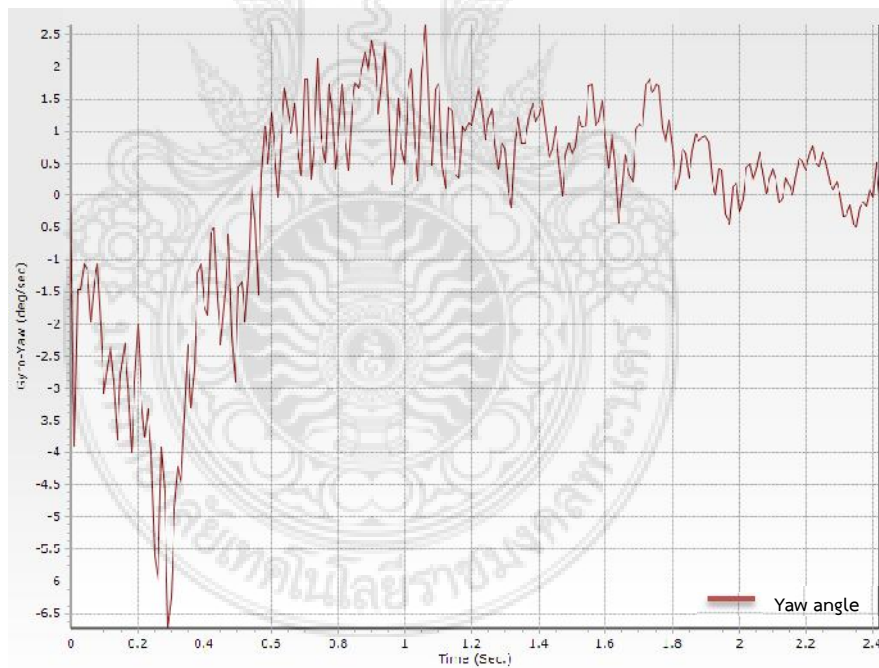


(รูป ข)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (20:80)
 (ก) Pitch angle (ข) Yaw angle



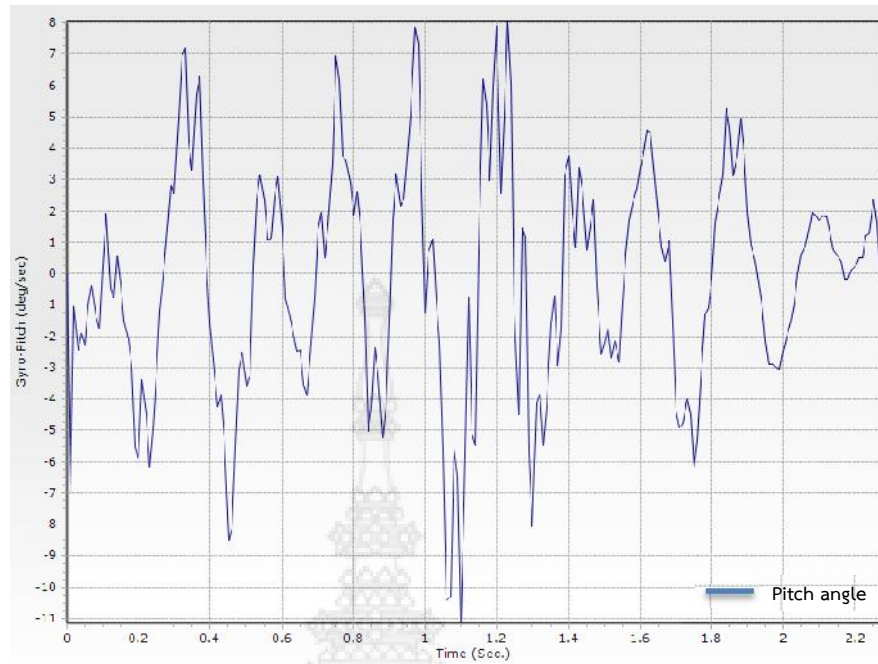
(รูป ก)



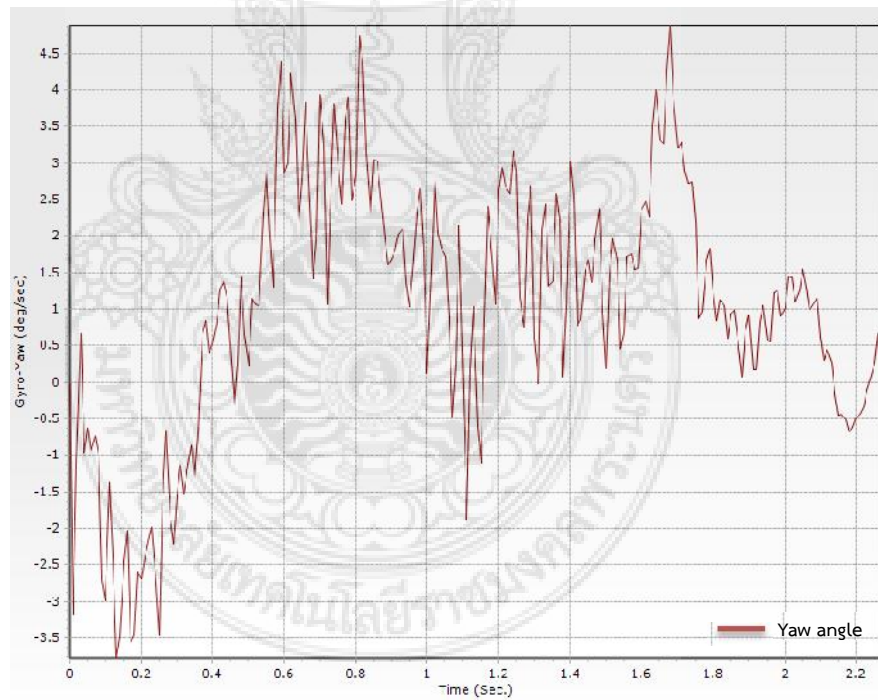
(รูป ข)

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (30:70)

(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle

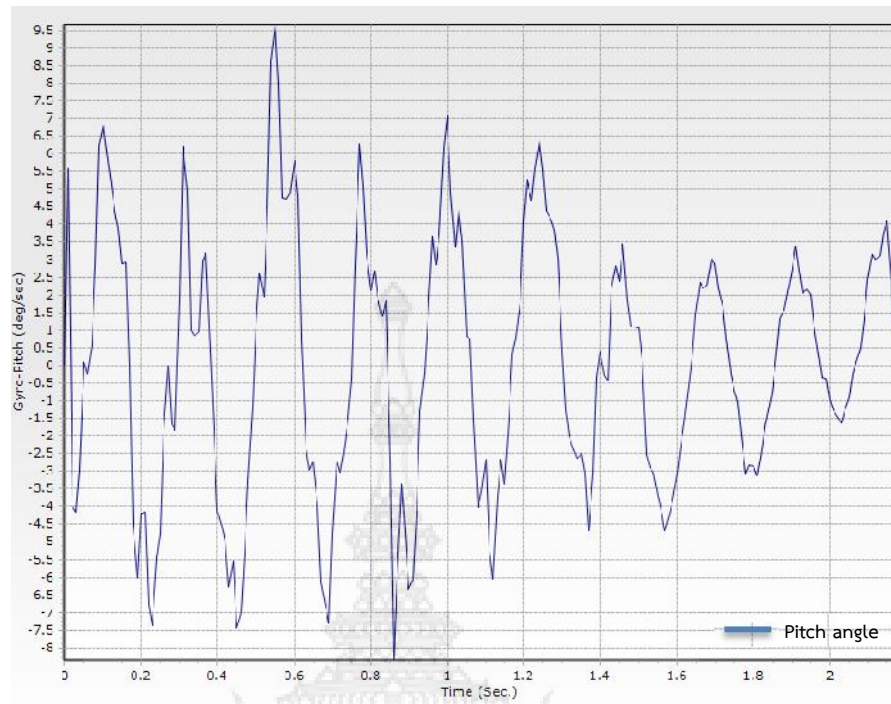


(รูป ก)

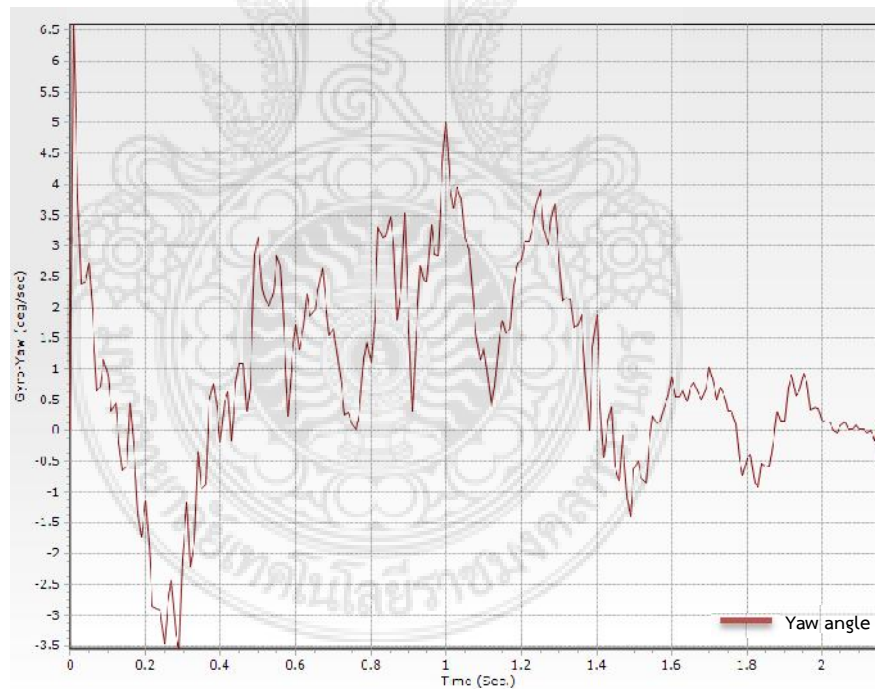


(รูป ข)

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (40:60)
(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle



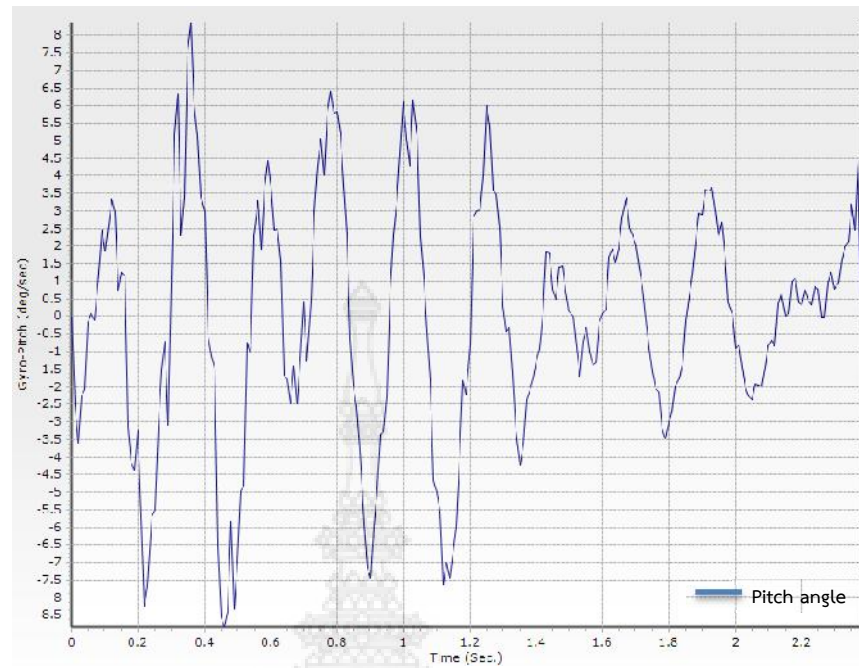
(รูป ก)



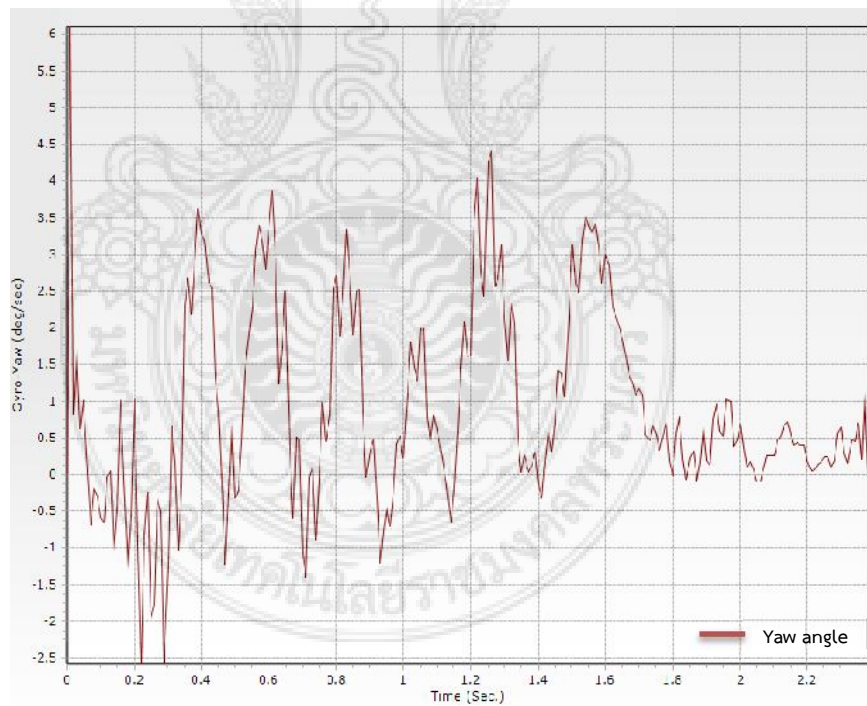
(รูป ข)

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (50:50)

(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle



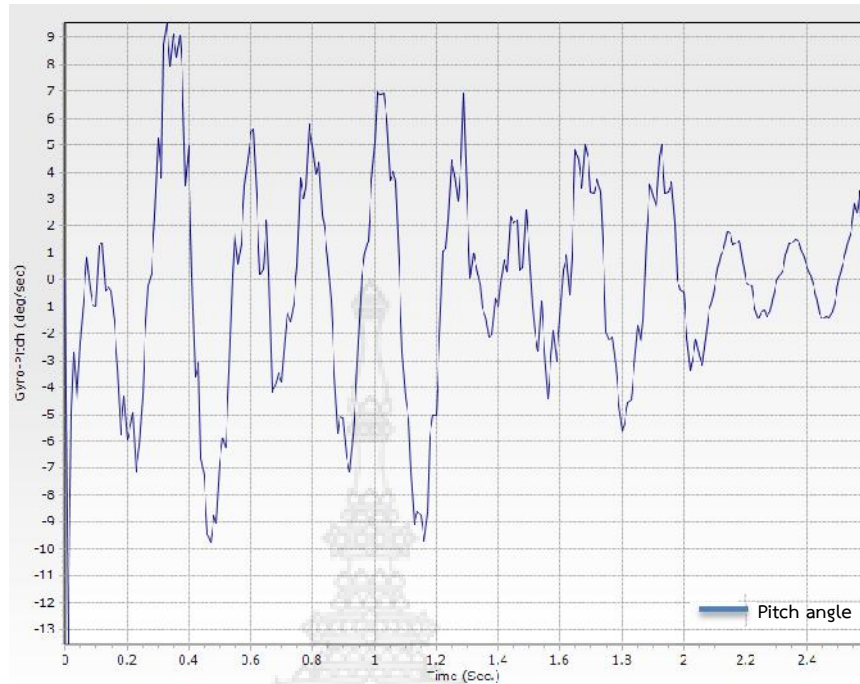
(รูป ก)



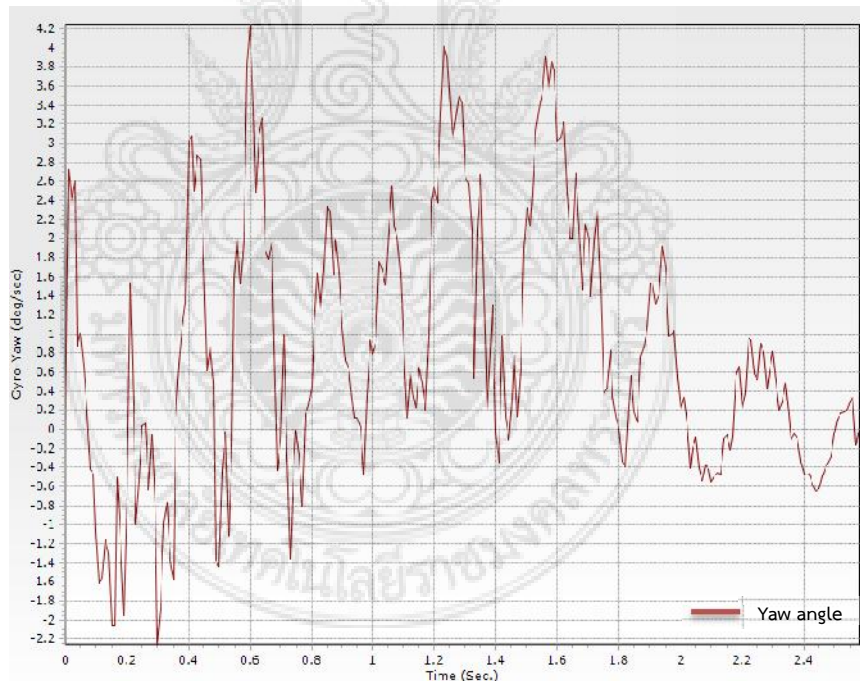
(รูป ข)

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (60:40)

(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle



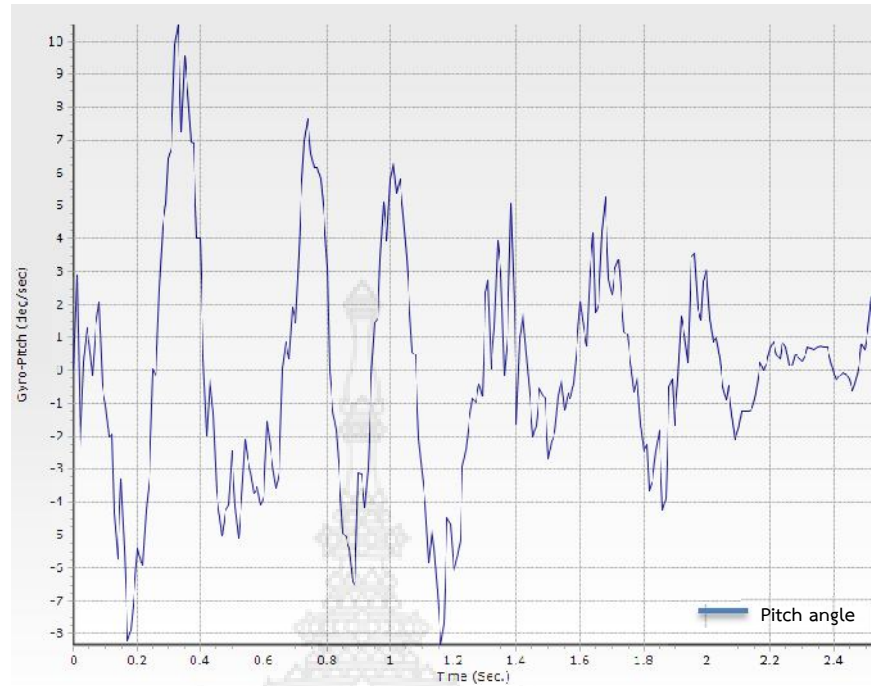
(รูป ก)



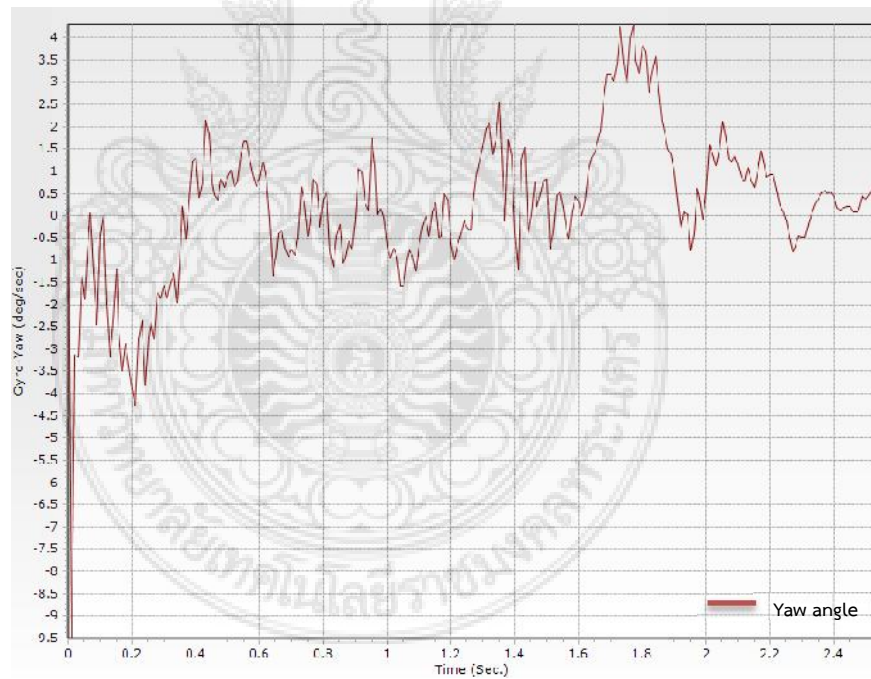
(รูป ข)

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (70:30)

(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle

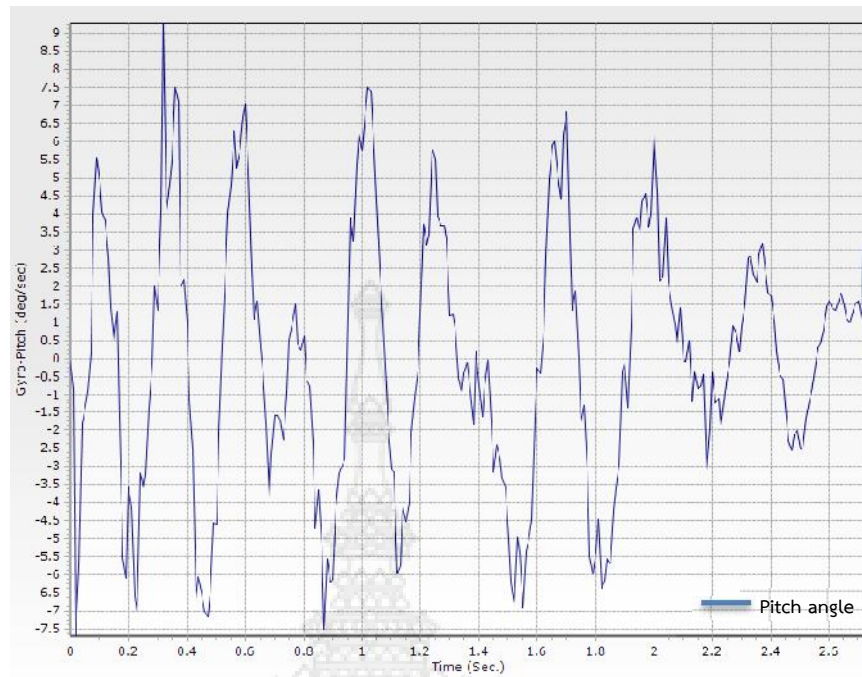


(รูป ก)

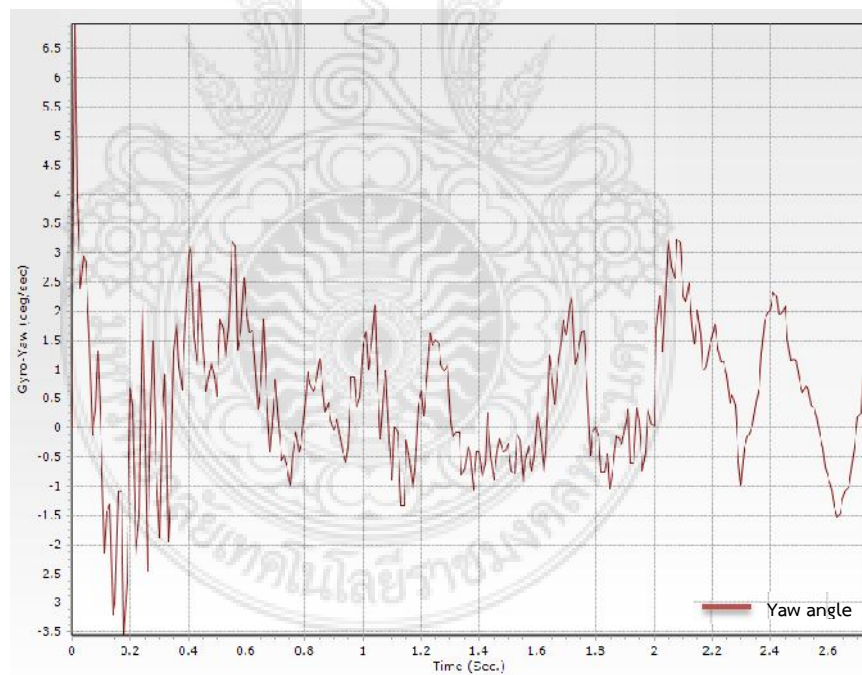


(รูป ข)

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (80:20)
(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle

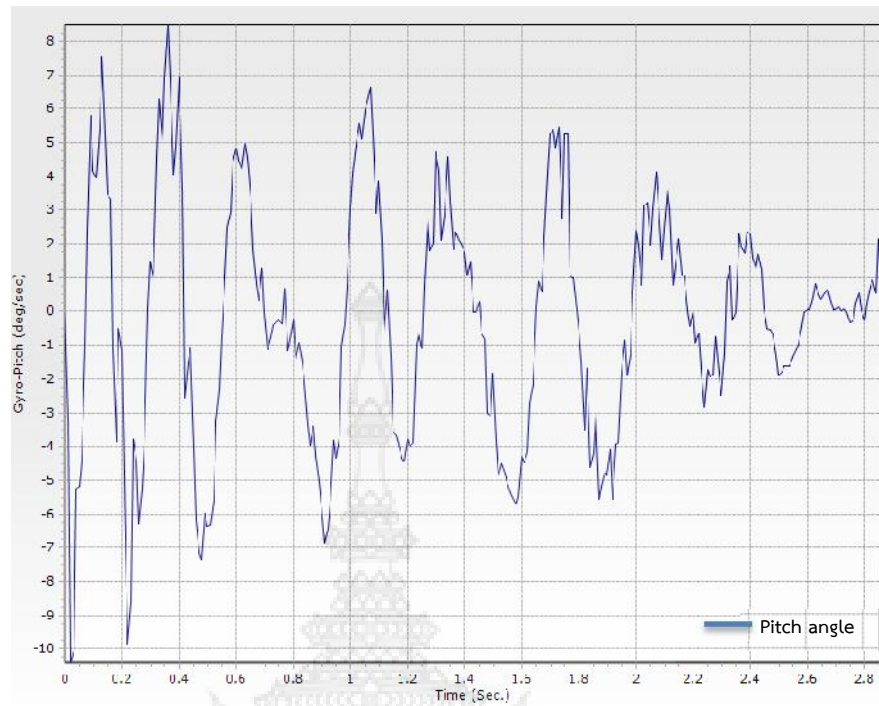


(รูป ก)

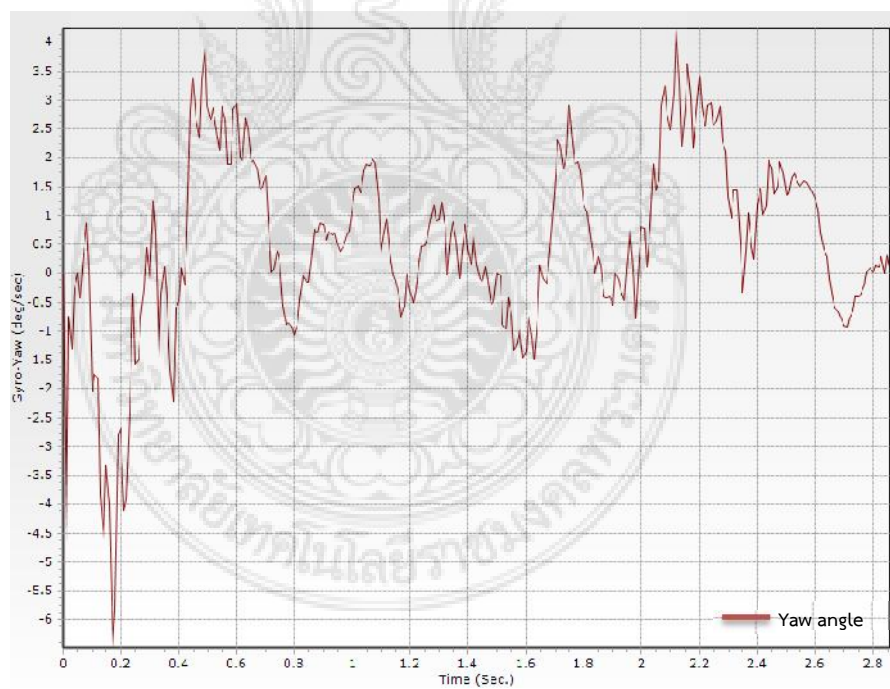


(รูป ข)

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (90:10)
(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle



(รูป ก)



(รูป ข)

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนแรงเบรก (100:0)

(ก) Pitch angle (ข) Yaw angle

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยคือ เพื่อศึกษาสัดส่วนแรงเบรกที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ โดยการศึกษาพิจารณาถึงการทดสอบ 2 ส่วนหลัก คือ การทดสอบความสามารถในการเบรกและการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์ นอกเหนือจากนี้วัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญรองคือ การสร้างศูนย์กลางการเรียนรู้และสร้างนักวิจัยหน้าใหม่ในสายงานวิศวกรรมยานยนต์ ยิ่งไปกว่านั้นผลการวิจัยถูกสรุปตามสมมุติฐานการวิจัยตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 โดยรายละเอียดของผลสรุปในแต่ละวัตถุประสงค์ถูกกล่าวต่อไปดังนี้

5.1.1 สรุปผลการทดสอบด้านความสามารถในการเบรก

ความหน่วงสูงสุด เกิดขึ้นที่สัดส่วนแรงเบรก 80:20 โดยส่งผลให้ระยะเบรก และเวลาที่ใช้ในการเบรกต่ำที่สุด ในขณะที่ความหน่วงจากการเบรกต่ำที่สุด เกิดขึ้นที่สัดส่วน 0:100 ทำให้ระยะเบรกและเวลาที่ใช้ในการเบรกสูงสุด ดังนั้น ความหน่วง ระยะทางการเบรก และเวลาที่ใช้ในการเบรกขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของผู้ขับขี่ อย่างไรก็ตามการออกแบบสัดส่วนแรงเบรกควรมีความสอดคล้องกับข้อมูลจำเพาะในด้านน้ำหนักลงเพลา เพื่อความเหมาะสมกับการใช้งานในทุก ๆ รูปแบบของการขับขี่

5.1.2 สรุปผลการทดสอบเสถียรภาพของรถยนต์

การเกิดการส่าย (Yawing moment) และการกระดก (Pitching moment) เกิดขึ้นปกติหากผู้ขับขี่ทำการเบรกไม่ว่าสัดส่วนแรงเบรคนั้นจะมีค่าเท่าใดก็ตาม หากแต่ตัวแปรที่ใช้วัดความเสี่ยงต่อการรักษาเสถียรภาพของรถยนต์นั้นขึ้นอยู่กับมุมการลื่นไถล (Sideslip angle) รวมไปถึงการล็อกของล้อที่เพลาท้าย เนื่องจากการล็อกของล้อที่เพลาท้ายส่งผลให้รถยนต์สูญเสียการควบคุมโดยสิ้นเชิงในทางกลับกันหากเกิดการล็อกที่เพลาหน้า รถยนต์เพียงสูญเสียการควบคุมชั่วขณะเท่านั้น ซึ่งในกรณีนี้ภายใต้สัดส่วนแรงเบรกทุก ๆ สัดส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัดส่วนแรงเบรก 100:0 ส่งผลอย่างมากต่อความเสี่ยงของผู้ขับขี่ เนื่องจากค่าการลื่นไถล (Sideslip) เกินค่าวิกฤตและเกิดการล็อกที่เพลาท้าย

5.1.3 สรุปผลด้านศูนย์กลางการเรียนรู้

โครงการวิจัยนี้อยู่ภายใต้แผนงานวิจัยที่มีความครอบคลุมเพียงพอต่อการเป็นศูนย์กลางการเรียนรู้ในระดับเริ่มต้น สำหรับการวิจัยในสายงานวิศวกรรมยานยนต์เน้นงานด้านเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ เนื่องจากภายใต้แผนงานวิจัยดังกล่าวนี้มีเครื่องมือ และกระบวนการทดสอบที่ถูกสร้าง

ขึ้นมาเพื่อรองรับสำหรับการทดสอบ อีกทั้งมีรถยนต์ต้นแบบที่ติดตั้งอุปกรณ์เฉพาะทางที่ใช้ในการศึกษาและทดสอบ อีกทั้งสามารถทำการสาธิตให้แก่ผู้สนใจได้

5.1.4 สรุปผลสร้างนักวิจัยหน้าใหม่

ในโครงการวิจัยนี้ได้แก่นักวิจัยหน้าใหม่ในสายงานวิศวกรรมยานยนต์ คือ นายพิเชษฐ์ บุญญาลัย ซึ่งโดยปกติผู้ร่วมวิจัยท่านนี้มีพื้นฐานทางด้านช่างยนต์อยู่แล้ว หากแต่การเข้าร่วมในการวิจัยนี้ทำให้เพิ่มเติมกระบวนการคิด และวิธีการทดสอบทางวิศวกรรมยานยนต์ รวมไปถึงเครื่องมือเฉพาะด้านที่ใช้ในการทดสอบอีกด้วย

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำวิจัย

การออกแบบระบบเบรกที่ใช้ในการทดสอบเกิดข้อจำกัดในด้านสารตัวกลาง ซึ่งระบบทั่วไปใช้น้ำมันเบรก หากแต่ในโครงการวิจัยนี้ใช้น้ำมันไฮดรอลิก เนื่องจากวาล์วที่ใช้ในการทดสอบเป็นวาล์วที่ใช้ในระบบไฮดรอลิก ดังนั้นจึงเกิดปัญหาเรื่องการเปื้อนของซิล ซึ่งความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญที่สุด ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบอายุการใช้งานของซิลก่อนการทดสอบจริง เพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วซึมของระบบ อันเป็นเหตุให้เกิดอันตรายได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การทดสอบควรตระหนักถึงความปลอดภัยเป็นหลัก ผู้ขับขี่รถทดสอบควรเป็นผู้ที่มีความชำนาญในการขับรถยนต์

5.3.2 การเลือกสถานที่ทำการทดสอบ ควรเป็นสนามทดสอบที่มีมาตรฐาน เนื่องจากผลของความถูกต้องของข้อมูล อีกทั้งปลอดภัยจากบุคคลภายนอก

บรรณานุกรม

- [1] Songwut Mongkonlerdmanee, Kullayot Suwantaraj and Suphachai Lakkam, **“Vehicle Handling Performance and Testing Guideline”**, KMUTT Research and Development Journal, Vol. 36 No.3 (2013).
- [2] Saiprasit Koetniyom and Songwut Mongkonlerdmanee, **“Experimental Investigation of Brake Behavior for Modified Three-Axle Double Deck Bus in Thailand”**, วารสารวิศวกรรม มหาวิทยาลัยสยาม ปีที่ 15 (2008).
- [3] Stephen Saric, Alireza Bab-Hadiashar and Johannes van der Walt, **“Estimating clamp force for brake-by-wire systems: Thermal considerations”**, Mechatronics Journal, Vol.19 (2009), pp. 886–895.
- [4] กรมการขนส่งทางบก (ประเทศไทย). **“มาตรฐานการทดสอบระบบเบรกของกรมการขนส่งทางบกของประเทศไทย”**, กรมการขนส่งทางบก (ประเทศไทย), 9 ธันวาคม (2548).
- [5] Federal Motor Carrier Safety Administration, **“Rules and Regulations for brake Performance”**, FMCSA No. 121 part 49CFR 393.52 (2002).
- [6] Riener S., **“Intelligent vehicle handling: Steering and body posture while cornering”**, Architecture of Computer System, Vol.4934 (2008), pp.14.
- [7] Soheli Anwar, **“Generalized Predictive Control of yaw dynamics of a hybrid brake-by-wire equipped vehicle”**, Mechatronics Journal, Vol. 15 No.9, (2005), pp. 1089–1108.
- [8] P.S. Els, N.J Theron, P.E Uys and M.J Thoerisson **“The ride confort VS. handling compromise for off-road vehicles”**, Journal of Terramechanics, Vol.44 (2007), pp.303-317
- [9] Sveson L. and Hac A., **“Influence of Chassis Control Systems on Vehicle Handling and Rollover Stability”**, Enhanced safety of vehicles, NHTSA. No. 05-0324, (2005).

- [10] Miège A. J. P. and Cebon D., “**Active roll control of an experimental articulated vehicle**” SAGE Journal Online, (2010).
- [11] Hamm G. and Burk G., “**Tables for the Automotive Trade**” New Age International P. Ltd., ISBN: 9780852263501., (1992).
- [12] แหล่งที่มา : <http://www.neuton.rmutphysics.com/teaching-glossary>. ค้นเมื่อ พฤษภาคม 2555
- [13] แหล่งที่มา : <http://www.relutantmechanic.com>. ค้นเมื่อ พฤษภาคม 2555
- [14] แหล่งที่มา : <http://www.sensormag.com>. ค้นเมื่อ พฤษภาคม 2555
- [15] แหล่งที่มา : <http://www.findmems.com>. ค้นเมื่อ พฤษภาคม 2555
- [16] แหล่งที่มา : <http://www.goldwingfacts.com>. ค้นเมื่อ พฤษภาคม 2555
- [17] แหล่งที่มา : <http://www.f1technical.net>. ค้นเมื่อ กันยายน 2556

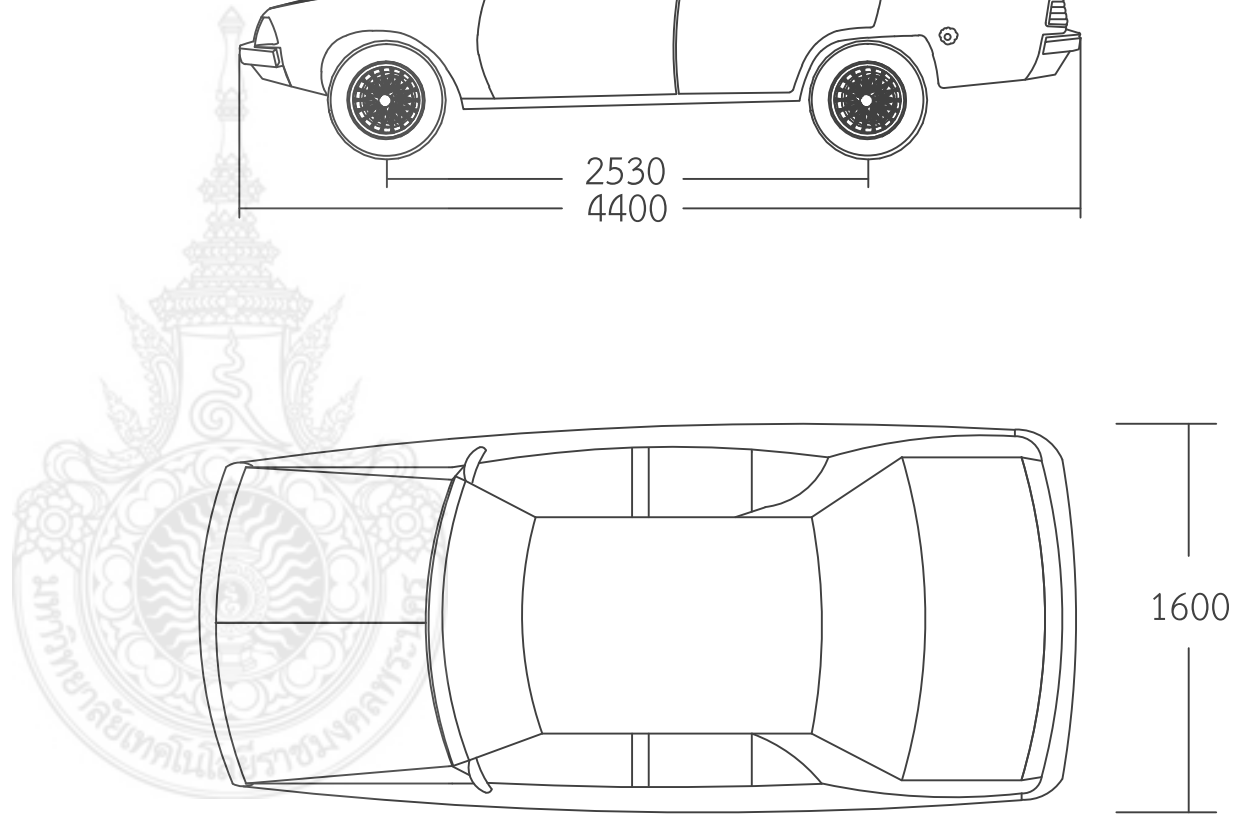
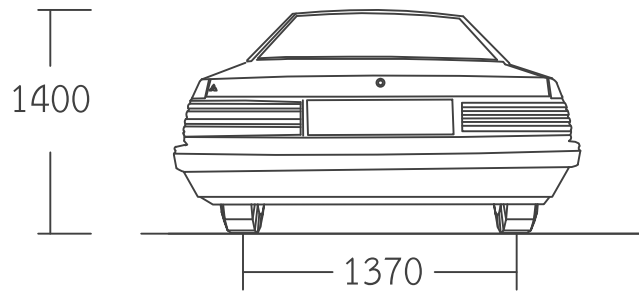
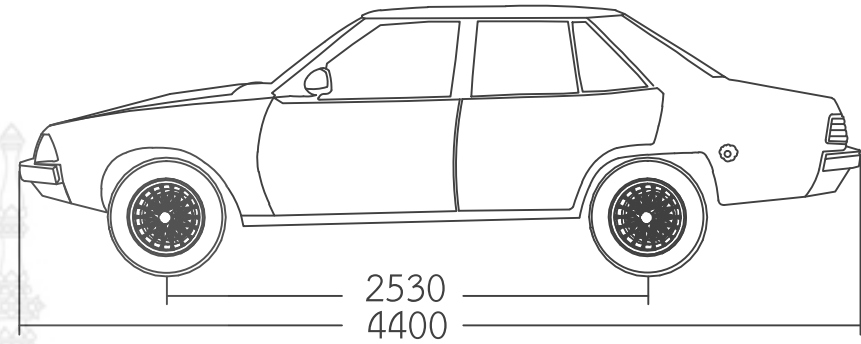
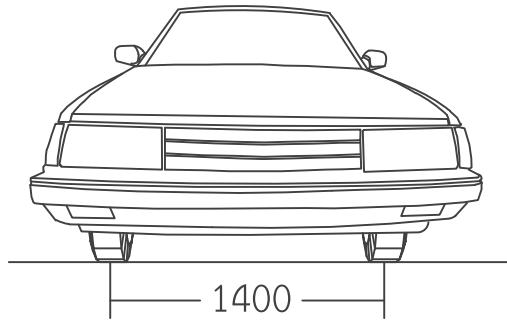



ภาคผนวก

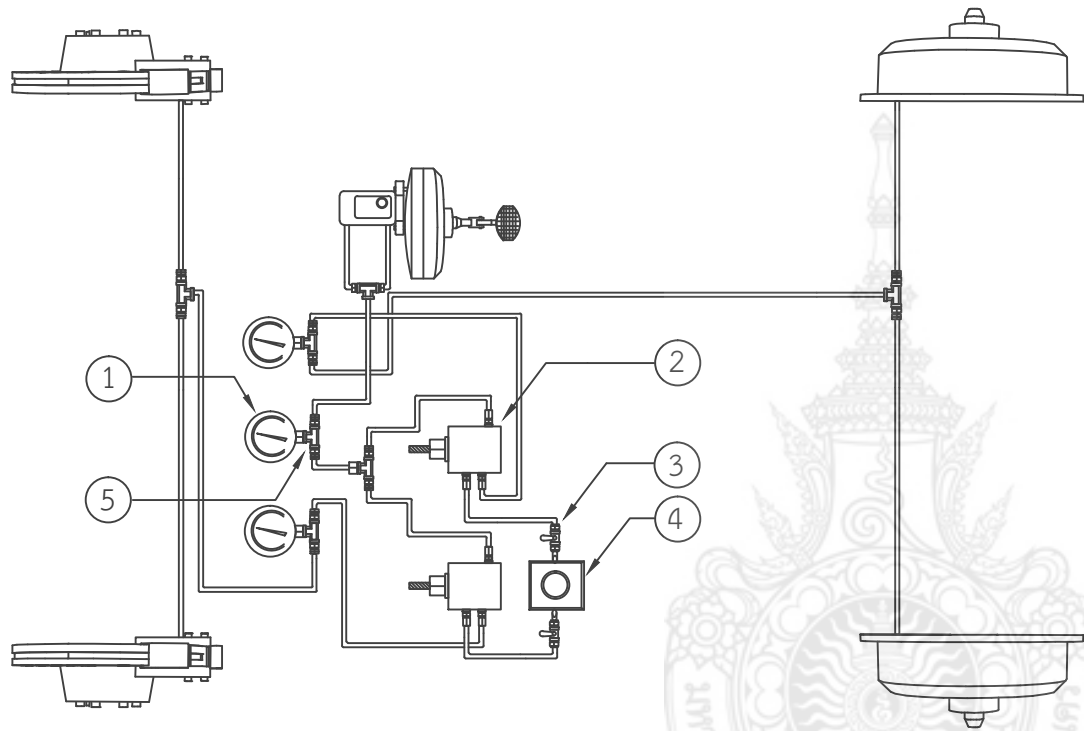


ภาคผนวก ก
แบบชุดทดสอบ

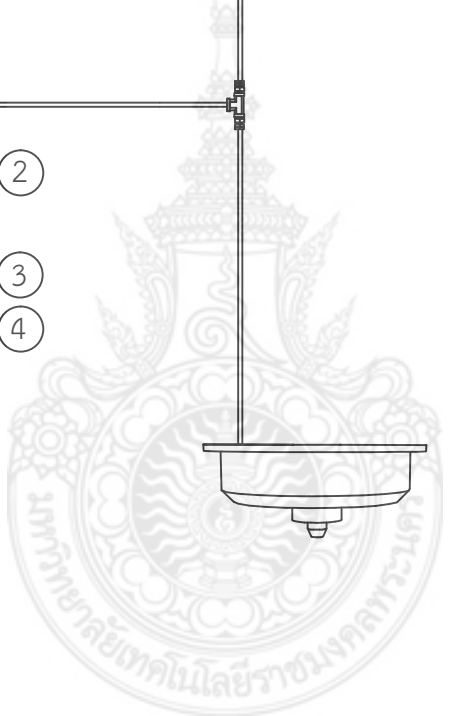




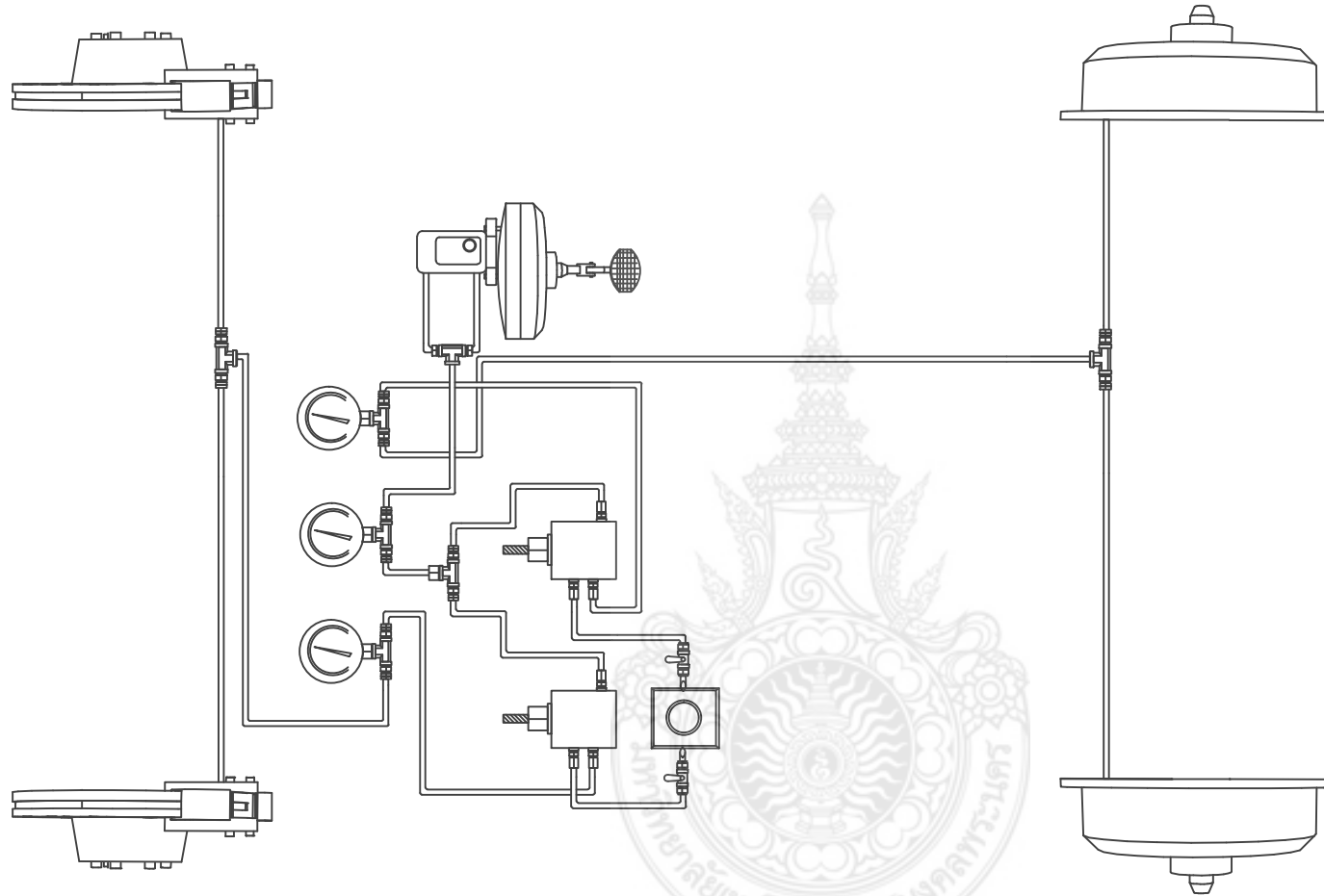
CHECK	I.BOODKRONG	4 NOV 2013	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON	
DRAW	S.SORNSUP	4 NOV 2013		
APPROVED	S.MONGKONLERDMANEE	7 NOV 2013	TITLE : A STUDY OF BRAKE PROPORTIONAL EFFECTED TO VEHICLE CONTROL	ASSEMBLY : Testing Vehicle
DIMENSION : mm	NAME	DATE		 Third Angle Projection
			SCALE : NOT TO SCALE	
			SHEET : 1 of 7	




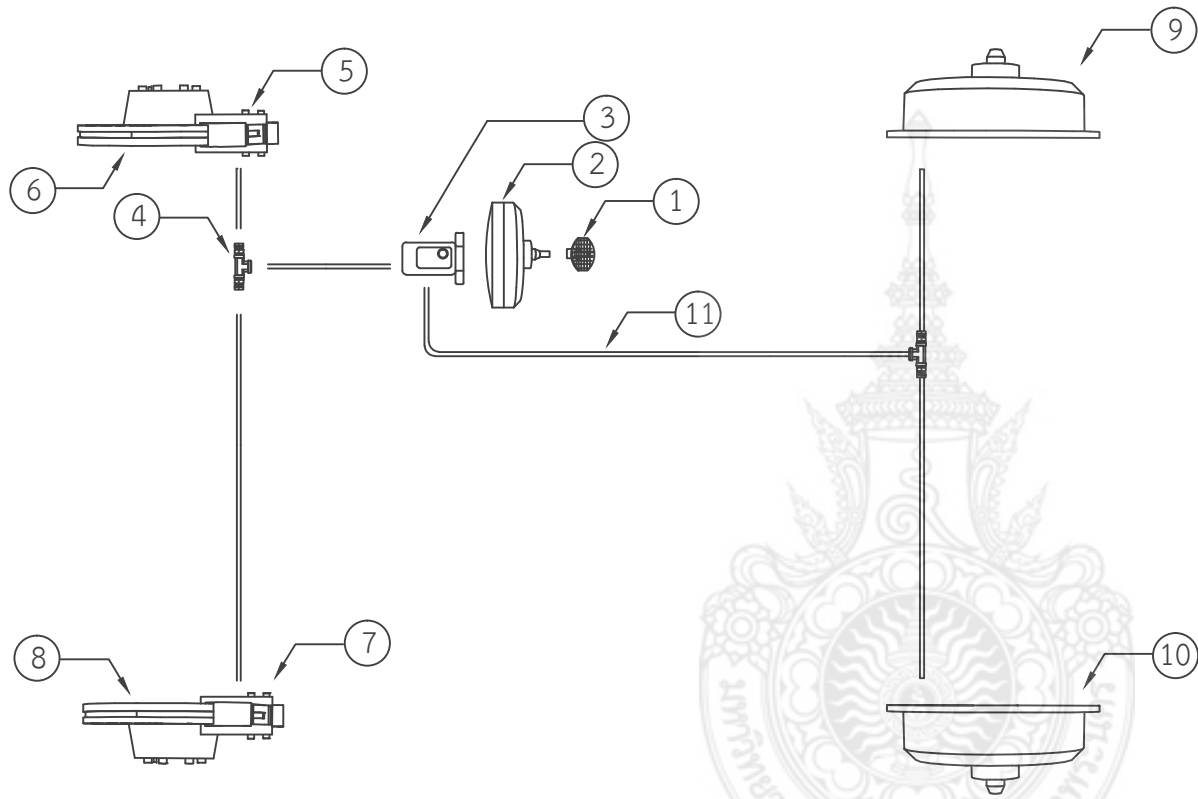
1	เกจวัดแรงดันน้ำมัน 3 ตัว
2	วาล์วปรับแรงดัน 2 ตัว
3	ก๊อกปิด เปิดน้ำมัน 2 ตัว
4	ถังเก็บน้ำมัน
5	ท่อสามทาง 7 ตัว




CHECK	I.BOODKRONG	8 DEC 2013	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
DRAW	S.SORNSUP	8 DEC 2013				
APPROVED	S.MONGKONLERDMANEE	12 DEC 2013	TITLE : A STUDY OF BRAKE PROPORTIONAL EFFECTED TO VEHICLE CONTROL	ASSEMBLY : Equipment of New Design Braking System 1	 Third Angle Projection	SCALE : NOT TO SCALE
DIMENSION : -	NAME	DATE				SHEET : 6 of 7

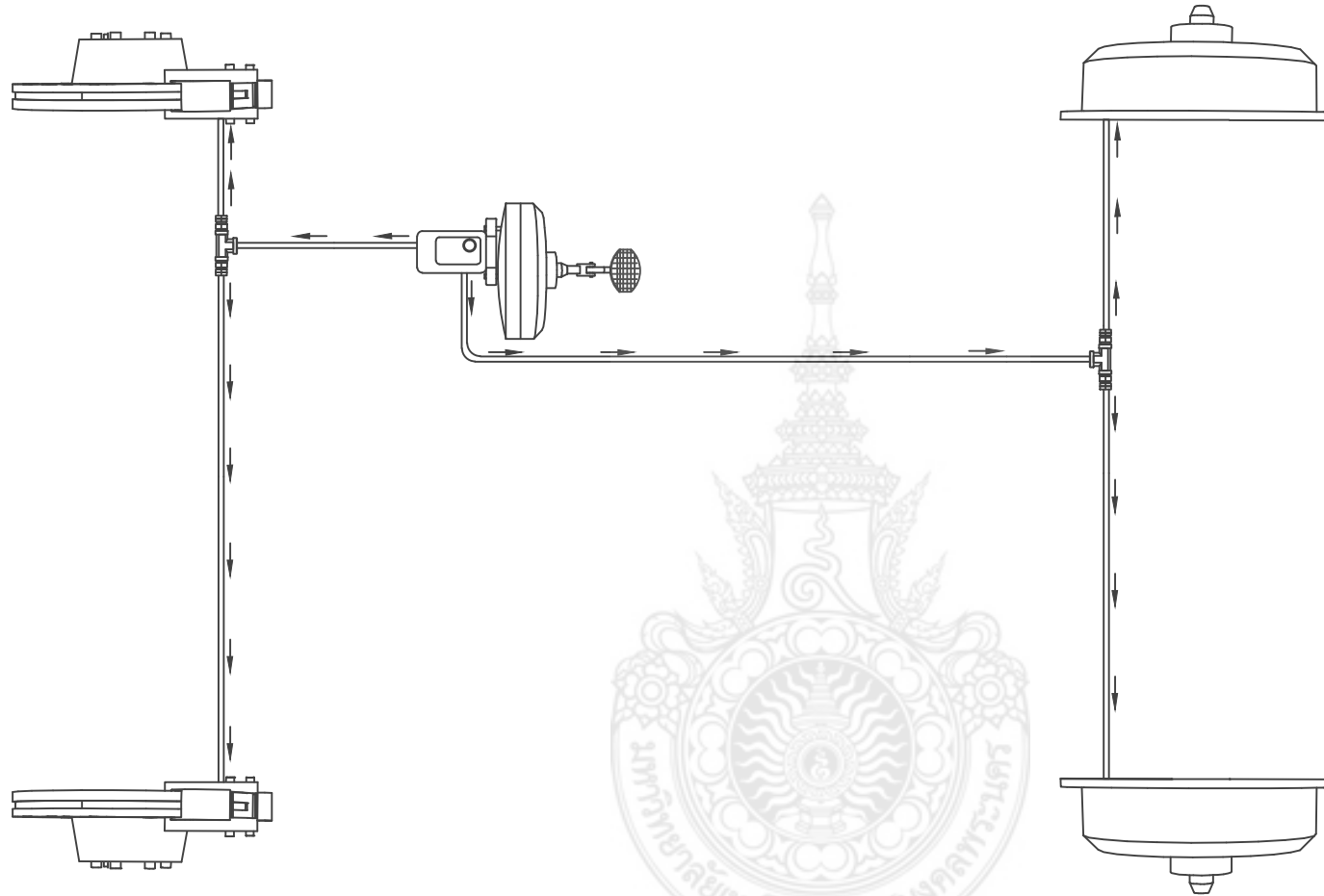



CHECK	I.BOODKRONG	8 DEC 2013	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
DRAW	S.SORNSUP	8 DEC 2013				
APPROVED	S.MONGKONLERDMANEE	12 DEC 2013	TITLE : A STUDY OF BRAKE PROPORTIONAL EFFECTED TO VEHICLE CONTROL	ASSEMBLY : New Design Braking System	 Third Angle Projection	SCALE : NOT TO SCALE
DIMENSION : -	NAME	DATE				SHEET : 5 of 7

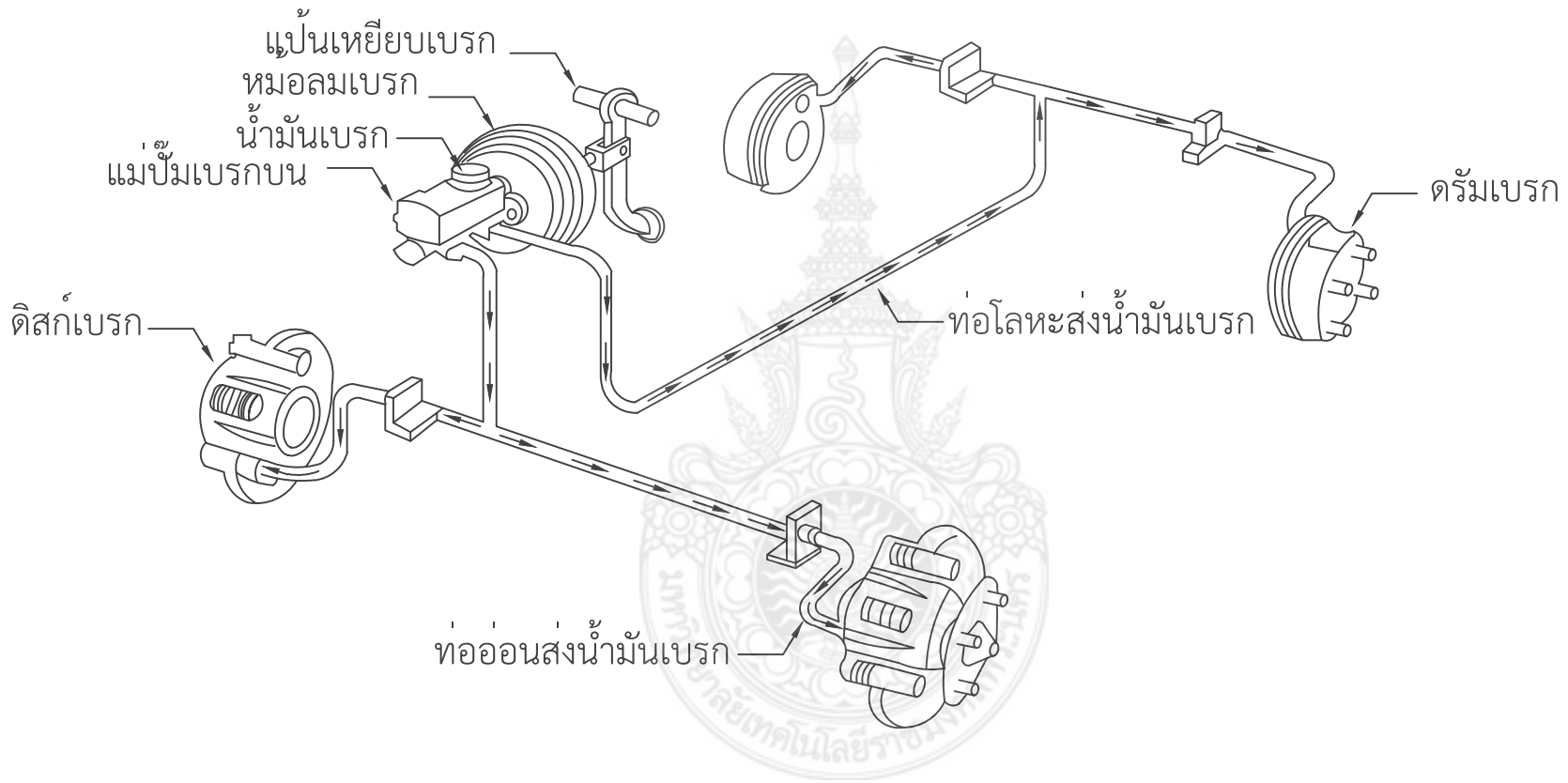



1	แป้นเหยียบเบรก
2	หม้อลมเบรก
3	แม่ปั๊มเบรก
4	ทอสามทาง
5	ดิสก์เบรกล่อขวา
6	จานเบรกล่อขวา
7	ดิสก์เบรกล่อซ้าย
8	จานเบรกล่อซ้าย
9	ดรัมเบรกล่อขวา
10	ดรัมเบรกล่อซ้าย
11	ทอโลหะสงน้ำมันเบรก

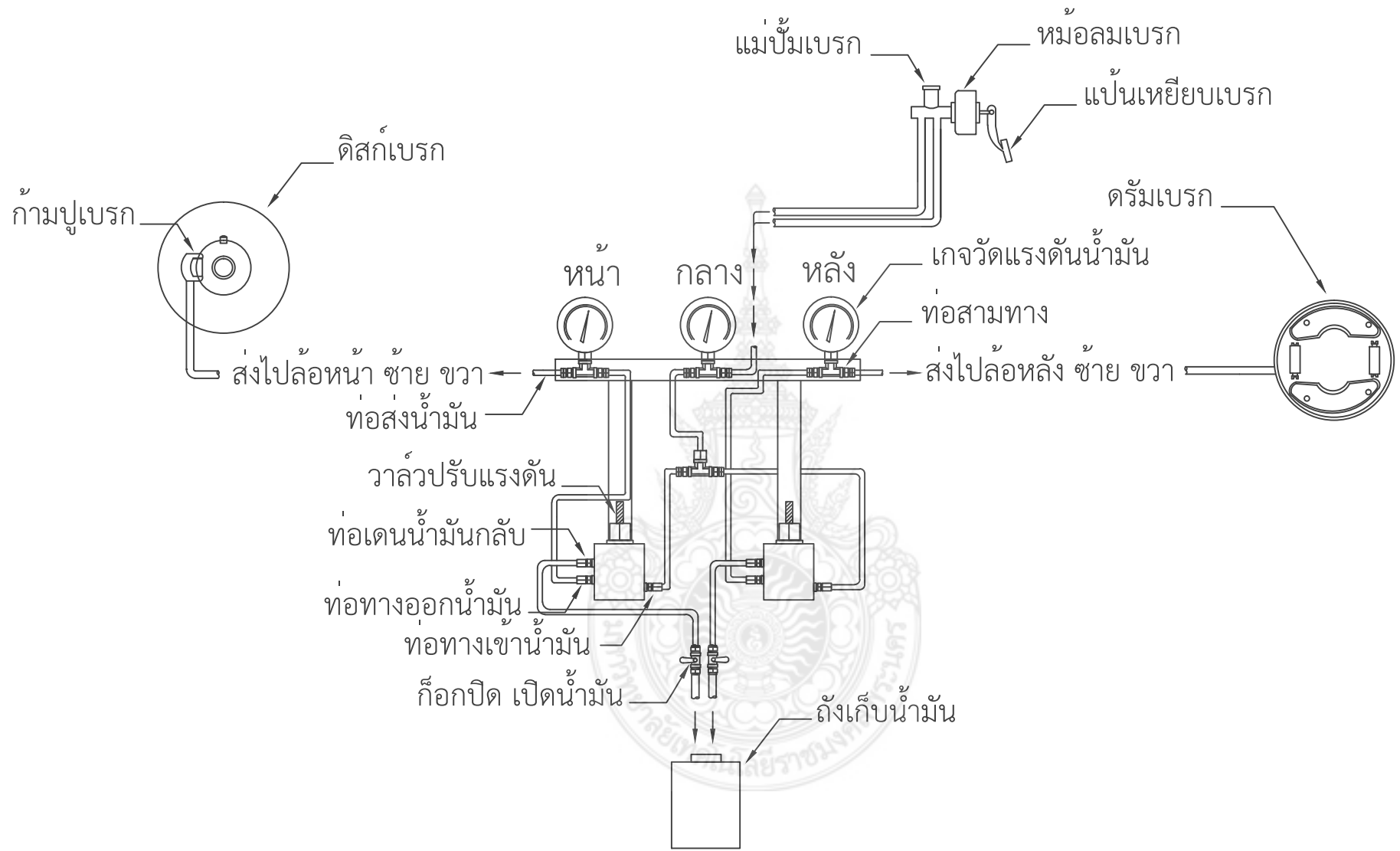
CHECK	I.BOODKRONG	8 NOV 2013	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON			
DRAW	S.SORNSUP	8 NOV 2013				
APPROVED	S.MONGKONLERDMANEE	13 NOV 2013	TITLE : A STUDY OF BRAKE PROPORTIONAL EFFECTED TO VEHICLE CONTROL	ASSEMBLY : Equipment of Normal Braking System	 Third Angle Projection	SCALE : NOT TO SCALE
DIMENSION : -	NAME	DATE				SHEET : 4 of 7




CHECK	I.BOODKRONG	8 NOV 2013	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
DRAW	S.SORNSUP	8 NOV 2013			
APPROVED	S.MONGKONLERDMANEE	13 NOV 2013	TITLE : A STUDY OF BRAKE PROPORTIONAL EFFECTED TO VEHICLE CONTROL	ASSEMBLY : Normal Braking System 2	
DIMENSION : -	NAME	DATE		 Third Angle Projection	SCALE : NOT TO SCALE SHEET : 3 of 7



CHECK	I.BOODKRONG	4 NOV 2013	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON		
DRAW	S.SORNSUP	4 NOV 2013			
APPROVED	S.MONGKONLERDMANEE	7 NOV 2013	TITLE : A STUDY OF BRAKE PROPORTIONAL EFFECTED TO VEHICLE CONTROL	ASSEMBLY : Normal Braking System 1	 Third Angle Projection
DIMENSION : -	NAME	DATE			



CHECK	I.BOODKRONG	8 DEC 2013	DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING IN FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA-NAKHON	
DRAW	S.SORNSUP	8 DEC 2013		
APPROVED	S.MONGKONLERDMANEE	12 DEC 2013	TITLE : A STUDY OF BRAKE PROPORTIONAL EFFECTED TO VEHICLE CONTROL	ASSEMBLY : Equipment of New Design Braking System 2
DIMENSION : -	NAME	DATE	 SCALE : NOT TO SCALE SHEET : 7 of 7	