

การจำลองทางพลวัตของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในประเทศไทย

DYNAMIC SIMULATION OF SEMI-TRAILER IN THAILAND

ปิยวิทย์ มหาโพธิ์
PIYAWIT MAHAPHO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-076-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองทางพลวัตของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในประเทศไทย

DYNAMIC SIMULATION OF SEMI - TRAILER IN THAILAND



ปิยวิทย์ มหาโพธิ์

PIYAWIT MAHAPHO

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 47603 /
วัน, เดือน, ปี 2.1.3ค. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-676-2

DYNAMIC SIMULATION OF SEMI - TRAILER IN THAILAND

PIYAWIT MAHAPHO

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-676-2

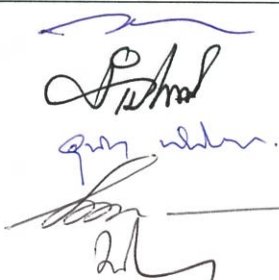
COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองทางพลวัตของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในประเทศไทย
DYNAMIC SIMULATION OF SEMI-TRAILER IN THAILAND
ชื่อนักศึกษา นายปิยวิทย์ มหาโพธิ์
รหัสประจำตัว 42062011
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ผศ.จำลอง	ปราบแก้ว	
ดร.อุนนต์	พิณโสภณ	
ผศ.ธวัชชัย	นาคพิพัฒน์	
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 เมษายน 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัฐชู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....16.....เดือน.....กรกฎาคม.....พ.ศ.....๒546.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองทางพลวัตของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในประเทศไทย
นักศึกษา	นายปิยวิทย์ มหาโพธิ์
รหัสประจำตัว	42062011
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทรงตัวของรถส่วนบุคคลและรถบรรทุกกึ่งพ่วง ซึ่งในปัจจุบันรถยนต์และรถบรรทุกกึ่งพ่วงใช้สำหรับการขนส่งในประเทศไทย วิทยานิพนธ์นี้เป็นการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่มี 6 แกนอิสระ โดยการใช้วิธีหาแบบทุกค่าในการเปลี่ยนแปลงหาค่าที่เหมาะสมของระยะระหว่างจุดยึดถึงจุดศูนย์กลางตัวพ่วงและจุดศูนย์กลางตัวพ่วงถึงเพลาท้ายของตัวพ่วง สมการเป้าหมายให้มีค่า การสิ้นไถล การเหวี่ยง ที่สภาวะคงที่ และมุมระหว่างรถลากกับตัวพ่วงให้มีค่าน้อยที่สุด จากการคำนวณค่าที่เหมาะสมของระยะของจุดยึดถึงจุดศูนย์กลางรถพ่วงและจุดศูนย์กลางรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วงเป็น 6.50 และ 3.50 เมตรตามลำดับ ความเสถียรของรถบรรทุกกึ่งพ่วงได้พิจารณาทั้งสภาวะคงที่และสภาวะชั่วขณะของอัตรา การสิ้นไถล อัตราการเหวี่ยงและมุมระหว่างรถตัวลากและรถพ่วง โดยการใช้วิธีคำนวณแบบเชิงเส้น ภายใต้มุมหารเลี้ยวที่ล้อหน้ารถลากสูงที่ไม่มาก ผลการคำนวณแสดงค่าที่เหมาะสมของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่มีความเสถียร

Thesis Title	Dynamic Simulation of Semi - Trailer in Thailand .
Student	Mr.Piyawit Mahapho
Student ID.	42062011
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongrojn

ABSTRACT

This thesis deals with the study on drive ability of a four wheel vehicle and semi-trailer, Nowadays , four wheel passenger car and semi-trailer vehicles are used for transportation in Thailand . The vehicle accident often occur due to instability . This thesis presents the mathematical model of a six-degree-of-freedom semi-trailer vehicle. Search method was implemented to obtain the optimum design variables of the trailer which are the distance from the fifth wheel to the centroid of the trailer and the distance from the centroid of the trailer axle. The objective function is to minimize the steady sideslip velocity , steady-state yawing velocity and steady-state angle between the tractor and trailer.

From the calculation, the optimum distance from the fifth wheel to the centroid of the trailer and optimum distance from the centroid of the trailer to the trailer are 6.50 and 3.50 meter respectively. The stability of the optimal semi-trailer vehicle is also examined in both steady state and transient state. The transient response of the side slip velocity, yawing velocity and angle between tractor and trailer are also calculated using linearization technique under small step disturbance of the tractor front wheel steer angle. The results show that the optimal semi-trailer has better stability than the commercial semi-trailer

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	2
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่.....	6
2.1 แรงปฏิกิริยาที่ล่อเกิดแรงหนีศูนย์กลาง.....	6
2.2 การเคลื่อนที่ของตัวรถ.....	7
2.3 การสัมผัสเทือน.....	7
2.3.1 การเคลื่อนที่แบบเกี่ยวโยงและไม่เกี่ยวโยง.....	8
2.4 การสัมผัสเทือนเครื่องจักรกล.....	8
2.4.1 เครื่องจักรกล.....	8
2.4.2 การสัมผัสเทือนระบบ.....	9
2.5 การดล.....	13
2.6 การบิด.....	16
2.7 การหาค่าที่เหมาะสม.....	17
2.7.1 ความจำเป็นของการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	19
2.7.2 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในทางวิศวกรรม.....	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8 ประเภทของแบบจำลองของปัญหา.....	20
2.9 ประเภทของแบบจำลองของปัญหา.....	21
2.9.1 กำหนดปัญหา.....	21
2.9.2 การจัดรูปปัญหาให้อยู่รูปแบบทางคณิตศาสตร์.....	22
2.9.3 การทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาและการหาผลลัพธ์ของ...22	22
2.9.4 การทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้	23
2.9.5 การนำผลลัพธ์หรือคำตอบไปใช้งาน.....	23
2.10 ประเภทของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม.....	23
2.11 การหาค่าที่เหมาะสม.....	24
2.12 ประโยชน์ของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสม.....	29
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	31
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	31
3.2 วิธีการทดลอง.....	33
3.3 ผลการทดลอง.....	35
บทที่ 4 การหาค่าที่เหมาะสมของรถยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ.....	37
4.1 รถยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ.....	37
4.2 ผลการวิเคราะห์	38
บทที่ 5 การหาค่าที่เหมาะสมของรถบรรทุกกึ่งพ่วง.....	43
5.1 สมการรถบรรทุกกึ่งพ่วง.....	44
5.2 การวิเคราะห์หาเป้าหมาย.....	50
5.2.1 สมการเป้าหมาย.....	52
5.2.2 สมการขอบเขต.....	54
5.2.3 วิธีการที่ใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสม.....	54
5.3 ผลการวิเคราะห์.....	55
5.4 การเปรียบเทียบพัสดุรถบรรทุกที่ใช้ในปัจจุบัน.....	64

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	86
6.1 บทสรุปขับเคลื่อน 4 ล้อ.....	86
6.2 บทสรุปรถบรรทุกกิ่งฟาง.....	87
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก.กฎระเบียบ มาตรฐาน และข้อบังคับ.....	91
ภาคผนวก ข. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	104
ภาคผนวก ค.รายละเอียดรถบรรทุกและภาพถ่ายการทดลอง.....	111
ภาคผนวก ง. โปรแกรมคอมพิวเตอร์	122
ประวัติผู้เขียน.....	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวหนึ่งของรถบรรทุกกิ่งพ่วง.....	36
4.1 พิกัดและน้ำหนักของรถขับเคลื่อน 4 ล้อ.....	38
6.1 เปรียบเทียบขนาดและพิกัดรถบรรทุกพ่วง.....	88
ก.1 รับน้ำหนักกระบะบรรทุก (ลักษณะ 1)	101
ก.2 รับน้ำหนักบรรทุกพ่วง (ลักษณะ 6)	101
ก.3 รับน้ำหนักรถลากจูง (ลักษณะ 9)	101
ก.4 รับน้ำหนักรถกิ่งพ่วง (ลักษณะ 9)	102

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงกราฟการเคลื่อนที่.....9
2.2	แสดงรอบของการเคลื่อนที่.....10
2.3	แสดงการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม.....10
2.4	แสดงการสั่นสะเทือนแบบกระแทก.....10
2.5	(ก)(ข) การเคลื่อนที่ที่มีคาบเวลา.....11
2.6	(ข) การเคลื่อนที่ไม่เป็นคาบ.....12
2.7	(ก) (ข) ระบบที่มีสองระดับขึ้นความเสรีอิสระ.....13
2.8	แสดงแรงการดล (Impulse force).....13
2.9	เป็นการรวมฟังก์ชันเวลา.....14
2.10	แสดงแรงกระแทก กับแรงการดล.....16
2.11	แสดงการบิด.....17
3.1	แสดงชิ้นส่วนอุปกรณ์ชิ้นที่ 131
3.2	แสดงชิ้นส่วนอุปกรณ์ชิ้นที่ 232
3.3	ผลการทดลองที่น้ำหนัก 25000 กิโลกรัมที่ตำแหน่งที่ 1.....33
3.4	ผลการทดลองที่น้ำหนัก 25000 กิโลกรัมที่ตำแหน่งที่ 2.....34
3.5	ผลการทดลองที่น้ำหนัก 25000 กิโลกรัมที่ตำแหน่งที่ 3.....34
4.1	แสดงภาพรถยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ.....37
4.2	แสดงค่า Target yaw ที่ระยะฐานล้อที่ 3.5 เมตร.....39
4.3	แสดงค่า Target yaw ที่ระยะฐานล้อที่ 4.5 เมตร.....39
4.4	เมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ที่ระยะฐานล้อ 3.1 เมตร.....40
4.5	เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างล้อหน้าและล้อหลัง อัตราส่วน 1 : 0.82.....40
4.6	เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างล้อหน้าและล้อหลัง อัตราส่วน 1 : 1.0641
4.7	เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างล้อหน้าและล้อหลัง อัตราส่วน 1 : 1.21.....41
4.8	เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างล้อหน้าและล้อหลัง อัตราส่วน 1 : 1.3842

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	แสดงส่วนประกอบของรถบรรทุกกึ่งพ่วง.....45
5.2	แสดงระยะจุดจับยึดถึงศูนย์กลางเพลาท้ายรถพ่วง 25000 กิโลกรัม.....56
5.3	แสดงระยะจุดศูนย์กลางตัวพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 25000 กิโลกรัม.....56
5.4	แสดงระยะจุดจับยึดถึงศูนย์กลางเพลาท้ายรถพ่วง 26500 กิโลกรัม.....57
5.5	แสดงระยะจุดศูนย์กลางตัวพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 26500 กิโลกรัม.....57
5.6	แสดงระยะจุดจับยึดถึงศูนย์กลางเพลาท้ายรถพ่วง 32000 กิโลกรัม.....58
5.7	แสดงระยะจุดศูนย์กลางตัวพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 32000 กิโลกรัม.....58
5.8	แสดงระยะจุดจับยึดถึงศูนย์กลางเพลาท้ายรถพ่วง 38000 กิโลกรัม.....59
5.9	แสดงระยะจุดศูนย์กลางตัวพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 3800 กิโลกรัม.....59
5.10	แสดงระยะจุดจับยึดถึงศูนย์กลางเพลาท้ายรถพ่วง 40000 กิโลกรัม.....60
5.11	แสดงระยะจุดศูนย์กลางตัวพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 40000 กิโลกรัม.....60
5.12	แสดงระยะจุดจับยึดถึงศูนย์กลางเพลาท้ายรถพ่วง 43000 กิโลกรัม.....61
5.13	แสดงระยะจุดศูนย์กลางตัวพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 43000 กิโลกรัม.....61
5.14	เปรียบเทียบค่า Sideslip ที่ 25000 กิโลกรัม.....64
5.15	เปรียบเทียบค่า yawing velocity ที่ 25000 กิโลกรัม.....65
5.16	เปรียบเทียบค่า Angle between tractor and trailer ที่ 25000 กิโลกรัม.....65
5.17	เปรียบเทียบค่า Sideslip ที่ 26500 กิโลกรัม.....66
5.18	เปรียบเทียบค่า yawing velocity ที่ 26500 กิโลกรัม.....67
5.19	เปรียบเทียบค่า Angle between tractor and trailer ที่ 26500 กิโลกรัม.....67
5.20	เปรียบเทียบค่า Sideslip ที่ 32000 กิโลกรัม.....68
5.21	เปรียบเทียบค่า yawing velocity ที่ 32000 กิโลกรัม.....69
5.22	เปรียบเทียบค่า Angle between tractor and trailer ที่ 32000 กิโลกรัม.....69
5.23	เปรียบเทียบค่า Sideslip ที่ 38000 กิโลกรัม.....70
5.24	เปรียบเทียบค่า yawing velocity ที่ 38000 กิโลกรัม.....71
5.25	เปรียบเทียบค่า Angle between tractor and trailer ที่ 38000 กิโลกรัม.....71
5.26	เปรียบเทียบค่า Sideslip ที่ 40000 กิโลกรัม.....72
5.27	เปรียบเทียบค่า yawing velocity ที่ 40000 กิโลกรัม.....73
5.28	เปรียบเทียบค่า Angle between tractor and trailer ที่ 40000 กิโลกรัม.....73
5.29	เปรียบเทียบค่า Sideslip ที่ 43000 กิโลกรัม.....74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.32 แสดงค่า Sideslip ที่ความเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมงน้ำหนัก25000 กิโลกรัม.....	76
5.33 แสดงค่า Sideslip ที่ความเร็ว 10 กิโลเมตร/ชั่วโมงน้ำหนัก25000 กิโลกรัม.....	77
5.34 แสดงค่า Sideslip ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมงน้ำหนัก25000 กิโลกรัม.....	77
5.35 แสดงค่า yawing ที่ความเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมงน้ำหนัก25000 กิโลกรัม.....	78
5.36 แสดงค่า yawing ที่ความเร็ว 10 กิโลเมตร/ชั่วโมงน้ำหนัก25000 กิโลกรัม.....	78
5.37 แสดงค่า yawing ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมงน้ำหนัก25000 กิโลกรัม.....	79
5.38 แสดงค่ามุมระหว่างตัวลากกับตัวพวง ที่ความเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง.....	79
5.39 แสดงค่ามุมระหว่างตัวลากกับตัวพวง ที่ความเร็ว 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง.....	80
5.40 แสดงค่ามุมระหว่างตัวลากกับตัวพวง ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง.....	80
ก.1 รถกระบะลักษณะ 1	93
ก.2 รถกระบะลักษณะ 2	94
ก.3 รถกระบะลักษณะ 3	94
ก.4 รถกระบะลักษณะ 4	95
ก.6 รถกระบะลักษณะ 6	96
ก.7 รถกระบะลักษณะ 7.....	97
ก.8 รถกระบะลักษณะ 8	98
ก.9 รถกระบะลักษณะ 9.....	98
ค.1 รูปถ่ายการทดลอง.....	115
ค.2 รูปถ่ายการทดลอง.....	116
ค.4 รูปถ่ายการทดลอง.....	117
ค.6 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดที่ 1.....	119
ค.7 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดที่ 2.....	119
ค.8 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดที่ 3.....	120

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

ψ	เฟส, มุมเฟส
ζ	เฟกเตอร์ตัวหนึ่ง
γ	มวลเฉพาะ , มวลเฉพาะต่อหน่วยความยาว
ω_n	ความถี่ธรรมชาติ
Z	พิกัดตามแนวแกน z
ϕ	มุมแอตติจูด (attitude angle)
$h(t)$	การตอบสนองต่อหนึ่งหน่วยแรงคล
A	เฟกเตอร์ความปลอดภัย
M_1	มวลของรถลากจูง
M_2	มวลของรถพ่วง
C	สัมประสิทธิ์ตัวหนึ่ง
K	ค่าสปริง
a	ระยะห่างระหว่าง แกนเพลลาต้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก
b	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลลาต้อหลังของรถลาก
d	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง
e	ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วง ถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง
h	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลลาต้อหลังของตัวรถพ่วง
δ	มุมการเลี้ยวล้อ

บทที่ 1

บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก จึงได้มีแนวความคิดที่จะศึกษาเพื่อหาว่าตัวแปรใดบ้างเป็นเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุ เนื่องมาจากความไม่เสถียรของตัวรถ โดยปกติขอบเขตของการเสถียร ที่มีผลมาจากวิถีทางตัวเลขคำนวณสมการการเคลื่อนที่ และการหาขอบเขตความเสถียรโดยวิธีการแทนตัวแปรต่างๆ Khan (ปี 1992) ได้ศึกษาการเปลี่ยนช่องทางการจราจรของรถ โดยใช้เทคนิคการคำนวณเปรียบเทียบ

การพลิกคว่ำ เป็นปรากฏการณ์ความไม่เสถียรทางพลวัตอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุ มีการศึกษาความเสถียรจากพื้นเอียง โดย Winkler (ปี ค.ศ. 1992) ส่วน George (ปี ค.ศ. 1992) ซึ่งได้ศึกษาการพลิกคว่ำเช่นกัน ก็พบว่า สาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการพลิกคว่ำเกิดจากห้องขับเคลื่อนที่มีระบบกันสะเทือนอิสระ จึงทำให้ผู้ขับขี่ไม่ทราบถึงสถานะของตัวรถที่แท้จริง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถ จะพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของรถในระนาบของถนน ไม่มีการนำการถ่ายเทมวลมาพิจารณา การศึกษานี้ใช้กรรมวิธีทางตัวเลขมาคำนวณหาคำตอบของการเคลื่อนที่ของรถ โดยการใช้ตัวแปรที่เหมือนกัน เช่นการบังคับเลี้ยวเดียวกันเพื่อให้รถทั้งขับเคลื่อน สองล้อ และ ลี้อ อยู่ในสถานะเดียวกันจึงจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ต่างๆ ของการบังคับเลี้ยวจนได้รัศมีความโค้ง เนื่องจากเงื่อนไขของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังมีข้อจำกัด ด้วยสภาพขอบเขตของการตรวจสอบ ดังนั้นการนำตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์หุ่นจำลองทางคณิตศาสตร์ มาบ่งชี้โดยตรงนั้นจะทำให้เกิดความไม่เสถียรจึงเกิดความคลาดเคลื่อนกับสภาพความเป็นจริง อย่างไรก็ตามค่าที่สามารถหาได้นั้นจะนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางชี้พฤติกรรมเชิงเปรียบเทียบ ปัญหาด้านคมนาคมในการขนส่งสินค้า นับได้ว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง ของการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ โดยเฉพาะการขนส่งทางบก ซึ่งใช้รถบรรทุกเป็นพาหนะในการขนส่ง ซึ่งนอกจากนี้ในแง่ความความสะดวกสบาย และความรวดเร็ว และยังมีต้นทุนไม่สูงนัก เพราะฉะนั้นจึงมีความต้องการในการใช้การขนส่งเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการขนส่ง โดยการเพิ่มปริมาณการขนของแต่ละเที่ยว ทำให้เกิดผลกระทบที่เห็นชัดเจน คือ สภาพถนนที่ชำรุด และเมื่อรถบรรทุกหนักมาก อาจจะส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุ

หน่วยงานรัฐบาลที่รับผลชอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรมการขนส่งทางบก กระทรวงคมนาคม จึงได้พิจารณา โดยให้มีการจดทะเบียนรถพ่วงและกึ่งพ่วงให้นำมาใช้ในกิจการขนส่ง โดยรถทั้งสองประเภทนี้ สามารถที่จะกระจายน้ำหนักบรรทุกลงบนเพลลา ทำให้เกิดภาระกับพื้นถนนไม่เกิดมาตรฐานที่ออกแบบพื้นถนนไว้ และลดการเกิดอุบัติเหตุ และในปัจจุบันการขนส่ง

ที่ใช้ถนนรถบรรทุกกึ่งพ่วงเป็นที่นิยมมากขึ้น โดยการตัดแปลงรถบรรทุกประเภทเก่า นำมาติดตั้งอุปกรณ์ให้ถูกต้องตามกฎหมาย และตัวลากจูงสามารถที่จะดัดแปลงให้เหมาะสมสำหรับงานหลายประเภท

ในปัจจุบันเมื่อความนิยมใช้รถบรรทุกพ่วงและกึ่งพ่วงเพิ่มมากขึ้น สิ่งที่ตามมาคือการเกิดอุบัติเหตุจากรถบรรทุกพ่วงและกึ่งพ่วงก็เพิ่มตามกันมาด้วย จึงเป็นผลเสียที่ตาม

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เพื่อเป็นการศึกษาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือวัสดุในปัจจุบัน เพื่อที่จะสามารถมองเห็นถึงการเคลื่อนที่ในย่านความเร็วต่างๆและลักษณะการเลี้ยว ผลจากการศึกษาข้างต้นจะนำมาประยุกต์เพื่อให้ในการออกแบบ และ กำหนด กฎเกณฑ์ ระเบียบ และมาตรฐานต่างๆ เช่น ระบบรองรับ ระบบเชื่อมต่อ ฯลฯ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ตามที่กฎหมายกำหนด และนำมาเป็นหลักในการพิจารณาเพื่อลดอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นได้ ให้เกิดความเหมาะสมสำหรับการใช้งานของรถบรรทุกขนส่งภายในประเทศ

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Endo S , Ukawa H , Sanda K , Kitagawa A ในปี พ.ศ. 2542 การควบคุมความเร่งของรถบรรทุกหนัก เป็นการศึกษาโดยการเทคนิคการควบคุมความเร่งรถบรรทุกในประเทศญี่ปุ่น

Djoko W. ในปี พ.ศ 2540 ประยุกต์สมการฟังก์ชันลากรางจ์ของการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกที่ความเร็วสูง เป็นการศึกษาประยุกต์สมการฟังก์ชันลากรางจ์เข้ากับรถบรรทุกที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ที่เกี่ยวกับระบบรองรับและระบบของยางงานวิจัยนี้ให้ทราบถึงสมการพื้นฐานของการเคลื่อนที่

Kihong P , Seung -jin , H , Inho B, ในปี พ.ศ 2544 ออกแบบการควบคุมความเสถียรของรถยนต์ ศึกษาพัฒนาทางระบบพลวัตของรถยนต์เพื่อนำไปหาความเสถียรภายใต้การเคลื่อนที่ในแนวราบและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและมุมในการถื่น โถล

Shinichiro H , Kazuyuki O , Shinya N, ในปี พ.ศ 2542 ปรับปรุงการควบคุมรถยนต์แบบไม่เชิงเส้นของรถยนต์เลี้ยวขับเคลื่อน 4 ล้อและขับเคลื่อน 4 ล้อ เป็นการศึกษาแบบไม่เชิงเส้นในการประยุกต์ออกแบบการควบคุมในการขับเคลื่อน

Shingo K , Jido O , Masaru K , ในปี พ.ศ 2541 หาค่าทางพลวัตของค่าความเสถียรของรถยนต์ ศึกษาความเสถียรของรถยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ เมื่อเบรก

Shinichi O , Toshiyaki T , Tsuneo S , ในปี พ.ศ 2538 การประยุกต์แรงที่เกิดขึ้นบนถนนผ่านรถยนต์เมื่อวิ่งผ่านเครื่องกีดขวาง เป็นการศึกษาเกี่ยวกับระบบรองรับและระบบยาง โดยการสร้างเครื่องทดสอบ วัดแรงกระแทก โดยการการคำนวณสมการเชิงคณิตศาสตร์

D.J Cole , D.Cebon ในปี พ.ศ 2538 หาค่าปฏิกิริยาขึ้นตอนของรถบรรทุกพ่วง ศึกษาให้เข้าใจถึงระบบพลวัตระหว่างรถลากจูงและรถพ่วงเป็นการศึกษา ความอิสระ2ชั้นของระบบรองรับ

Fujio M , Keiichi K , Kiyooki M , Hitoshi S , ในปี พ.ศ 2542 การศึกษาเกี่ยวกับความสูงของจุดศูนย์ถ่วงของรถยนต์สำหรับการพลิกคว่ำ

Katsushi M ,Hiroyuki S , Masharu H , ในปี พ.ศ 2541 ศึกษาความเสถียรของรถบรรทุก โดยการควบคุมการเบรก ศึกษาการเหวี่ยงของตัวรถในการเบรกแต่ละล้อและปฏิกิริยา

Masato A , Ikutoku N , ในปี 2540 การวิเคราะห์ปฏิกิริยาของรถยนต์ในขณะเลี้ยวโค้งในขณะเร่งและเบรก

Pushkar H , Jeng-U ,W ในปี พ.ศ 2544 การควบคุมของแรงรถบรรทุกพ่วงและกึ่งพ่วงในระบบถนนทางค่วน

Mongkolwongroj M , Mahapho P , ในปี พ.ศ 2544 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางไดนามิกค้ของรถขณะเลี้ยวโค้ง

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) มาใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในอย่างแพร่หลายในการขนส่งระยะไกลที่ใช้ในประเทศ

เพื่อนำมาวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบกับขนาด และพิกัดของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ทราบถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วง เมื่อมีการเลี้ยวหรือเปลี่ยนช่องทางการจราจร

1.4 ขอบเขตในการวิจัย

เนื่องจากรถบรรทุกพ่วงที่ใช้ในประเทศไทยมีหลายลักษณะที่ใช้กันโดยทั่วไป แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้จะกระทำบนพื้นฐานและข้อกำหนดต่างๆ เช่น กฎ ระเบียบ มาตรฐาน ต่างๆ

กำหนดตามกฎหมายกระทรวงฉบับที่ 4 ออกตามความใน พ.ร.บ การขนส่งทางบก พ.ศ 2524 ที่ทาง กรมการขนส่งทางบก กระทรวงคมนาคม กำหนดไว้ของรถบรรทุกกึ่งพ่วง การวิจัยครั้งนี้จะ พิจารณา คือ การเลื้อน การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรถลากจูงและหางพ่วงที่ สภาวะคงที่ ที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในประเทศไทย จะไม่นำแรงเสียดทานในระบบดัดกำลัง และระบบขับเคลื่อนและยาง สภาวะถนนมาคำนวณเพื่อ โดยการพิจารณาการเคลื่อนที่เกิดขึ้น คือ การเลื้อน การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรถลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่ โดย การสมมุติการเคลื่อนที่ของรถกึ่งพ่วงประเภทหัวลากที่มีการเคลื่อนที่ 3 แกนอิสระและหางพ่วงที่ มีการเคลื่อนที่ 3 แกนอิสระ พิจารณาการความเร็วการลื่นไถล , ความเร็วการเหวี่ยงและ มุม ระหว่างหัวลากและหางพ่วง ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเคลื่อนที่ของตัวรถบรรทุกกึ่งพ่วงเช่น เมื่อรถบรรทุกกึ่งพ่วงวิ่งด้วยความเร็วสูงและน้ำหนักบรรทุกที่มากจะทำให้เกิดการลื่นไถลได้มาก จะทำให้รูดเสียดการทรงตัวและมีผลต่อการพลิกคว่ำ และเมื่อมุมระหว่างรถลากจูงกับรถพ่วงมาก เมื่อเลี้ยวอาจจะก่อให้เกิดการหักพับตัว

ข้อสมมุติฐาน

- 1) หัวลากพิจารณาที่ 3 แกนอิสระและหางพ่วงพิจารณาที่ 3 แกนอิสระ ในขณะที่การ ทำงานจริงนั้นการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้มีไม่น้อยกว่า 25 แกนอิสระ การคำนวณจึงซับซ้อนมาก และจำเป็นที่จะต้องหาข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ สามารถหาค่าได้ หรือจำเป็นที่จะต้องการงบประมาณในการทดลองมหาศาล
- 2) สมมุติว่าจุดศูนย์กลางของตัวหางพ่วงอยู่กึ่งกลางของหางพ่วง และ ไม่นำความสูง ของจุดศูนย์กลางตัวรถถึงพื้นถนนมาพิจารณา
- 3) ไม่คิดผลของสภาพผิวถนน ผิวของยางและแรงดันลมยาง , แรงเสียดทานต่างๆ ที่ เกิดขึ้น ระบบส่งกำลัง ระบบช่วงล่าง จะไม่นำมาพิจารณา

1.5 ขั้นตอนงานวิจัย

แนวทางของการวิจัยการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในประเทศไทยที่ใช้กัน โดยทั่วไปนั้น เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของรถในสภาวะบรรทุกและสภาวะปกติ แต่เนื่องจาก ข้อมูลไม่เพียงพอ และบางชนิดจำเป็นจะต้องมีการทดลอง การทดลองเป็นการทำเครื่องการวัดหา ค่าของระบบรองรับที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกที่ใช้อยู่จริง โดยการใส่รถบรรทุกบรรทุกกึ่งพ่วงของ เอกชน เพื่อนำค่าของสัมประสิทธิ์ตัวหน่วงมาเป็นข้ออ้างอิงในสมมุติฐาน เพื่อที่จะนำค่าต่างๆ มาวิเคราะห์ปัญหาโดยการพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น คือ การเลื้อน การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรถลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่ ทางสมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ โดย

วิทยานิพนธ์นี้จึงใช้การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน คือ การเลื่อน การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรถลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่

1. ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยพิจารณาทางด้านการเคลื่อนที่จริง ในสภาวะต่างๆ
2. การศึกษาการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการใช้พิกัดน้ำหนักร มาตรฐานทางด้านมิติ มาตรฐานของจำนวนเพลลาภายใต้เงื่อนไขของมาตรฐานของระบบความปลอดภัยที่ใช้ในประเทศไทย ตามกฎกระทรวงคมนาคม กำหนดไว้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ วิธีทาง Optimization สามารถนำมาใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมของขนาดของหางพ่วง ตำแหน่งของแกนเพลลา ระยะห่างระหว่างแกนเพลลาของตัวรถพ่วง , ตำแหน่งของจุดยึด Connecting pin เพื่อให้ทราบค่าต่างๆที่เกิดขึ้น ที่การเลื่อน การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างตัวลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่ และเมื่อเทียบกับเวลา เพื่อนำไปสู่การพัฒนาและการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด ที่นำไปสู่การลดอุบัติเหตุ และเพิ่มประสิทธิภาพของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้งานอยู่ในประเทศไทย

บทที่ 2

ทฤษฎีการเคลื่อนที่รถ

2.1 แรงปฏิกิริยาที่ล้อซึ่งเกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงของรถยนต์ มีทิศทางออกไปออกไปด้านนอกโค้งด้วยมีขนาดเท่ากับ $WV^2/(gC)$ แรงนี้จะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาในแนวระดับ ซึ่งทำให้เกิดแรงคู่ควบที่มีค่าเท่ากับ $WV^2h / (gC)$ และมีแนวโน้มที่จะทำให้รถเกิดการพลิกออกจากโค้ง แรงคู่ควบนี้จะสมดุลโดยแรงคู่ควบที่เกิดจากแรงปฏิกิริยาในด้านแนวตั้งด้านในของทั้ง 2 ล้อ และล้อด้านนอกทั้ง 2 ล้อ

ถ้าแรง P_{IF} และ P_{OF} เป็นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากที่ล้อหน้าด้านในและล้อหน้าด้านนอก ส่วน P_{IR} และ P_{OR} เป็นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากที่ล้อหลังด้านในและล้อหลังด้านนอก

$$(P_{IF} + P_{IR}) = (P_{OF} + P_{OR}) a = \frac{W}{g} \frac{V^2}{C} h$$

$$P_{IF} = P_{OF} = \frac{W}{g} \frac{V^2}{C} \frac{h}{a} \frac{l}{2b} \quad (2.1)$$

$$P_{IR} = P_{OR} = \frac{W}{g} \frac{V^2}{C} \frac{h}{a} \frac{(1 - l/b)}{2} \quad (2.2)$$

ในขณะที่รถยนต์เลี้ยว การวิเคราะห์จะแสดงผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะเพิ่มรวมเข้าไปด้วยและกระทำลงบนล้อในทิศทางตรงกันข้ามกันกับการกระจายน้ำหนักลงบนล้อในขณะที่รถยนต์อยู่กับที่ล้อหน้าด้านในและมีแนวโน้มที่จะทำให้รถยนต์เกิดการพลิกออกจากโค้งโดยการพิจารณาผลรวมทั้งหมดของแรงปฏิกิริยาบนล้อด้านในและล้อด้านนอก สามารถกล่าวได้ว่าที่มีผลต่อการพลิกของรถยนต์

- รถยนต์เลี้ยวด้วยความเร็วสูง
- รถยนต์ที่รับภาระบรรทุกที่จุดศูนย์กลางถ่วงอยู่สูง
- รถยนต์รับภาระเกินพิกัด

ระหว่างตัวรถกับล้อจะมีอุปสรรคอย่างหนึ่ง คือ สปริง ติดตั้งอยู่เพื่อให้ตัวรถกับล้อรถสามารถยืดหยุ่นแก่กันและกัน บางครั้งเรียกระบบนี้ว่า ระบบรองรับหรือระบบสปริง

2.2 การเคลื่อนที่ของตัวรถ

การให้ความสบายแก่ผู้ใช้นั้นหมายถึงว่าในขณะที่รถแล่นไปนั้น ตัวรถที่เคลื่อนที่ไปในระดับเดียวและที่นิ่งไม่เด่นกระดอนขึ้นลงตลอดทางที่รถแล่นไป แต่ความจริงแล้ว ในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปนั้นจะต้องมีการเร่งและการเบรคเลี้ยวรถ หรือแล่นผ่านถนนขรุขระ ผลจากการทำเช่นนั้นทำให้เคลื่อนที่ในแนวแกนทั้งสามแกนการเคลื่อนที่ คือ ขณะรถยนต์เบรค หรือเร่ง หัวรถจะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลง (pitch) เป็นการเคลื่อนที่ และในขณะที่รถแล่นบนถนนขรุขระทำให้รถส่าย (yaw) เป็นการเหวี่ยงซ้ายขวา เป็นการเคลื่อนที่ไปรอบแนวแกนคิ่งของตัวรถ และในขณะที่รถเลี้ยวจะเกิดแรงเหวี่ยงให้เกิดรถโคลง (roll) เอียงไปมาเป็นเกิดการเคลื่อนที่หวนรอบแนวแกนขนานตามแกนยาวรถ

2.3 การสั่นสะเทือน

ของระบบที่มีระดับความเสรีสองชั้น หมายถึง การพิจารณาการเคลื่อนที่ของมวลๆ หนึ่งที่มีพิกัดของการเคลื่อนที่สองพิกัดของการเคลื่อนที่ที่เป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน หรือพิจารณา มวลสองมวล โดยที่แต่ละมวลมีพิกัดการเคลื่อนที่ และพิกัดการเคลื่อนที่ของแต่ละมวลไม่ขึ้นต่อกัน การสั่นสะเทือนของระบบที่มีความเสรีสองชั้นตอนจะมีความซับซ้อนมากกว่าระบบที่มีความเสรีชั้นเดียว แต่ถ้าเข้าใจถึงวิธีการพิจารณาระบบเสรีสองชั้นแล้ว ก็จะเข้าใจระบบเสรีหลายชั้นโดยไม่ยากนัก เนื่องจากจะใช้การวิเคราะห์แบบเดียวกัน กรณีที่ระบบมีระดับความเสรีมากกว่าหนึ่งชั้น จะพบจำนวนความถี่ธรรมชาติของระบบเท่ากับจำนวนนั้นของ

ความเสรี และจำนวนชั้นความเสรีจะมีค่าเท่ากับจำนวนของพิกัดตำแหน่งของพิกัดตามรูป ซึ่งประกอบด้วยมวล 2 ก้อน ถ้าพิจารณาว่ามวลแต่ละก้อนมีพิกัดเป็น x_1 และ x_2 ก็จะเป็นระบบที่มีการเคลื่อนที่สองชั้น แต่ถ้าพิจารณาว่าระบบมีการเคลื่อนที่เป็น x_1, y_1, z_1 และ x_2, y_2, z_2 ก็จะเป็นระบบที่มีการเสรีหกชั้น เนื่องจากจำนวนความถี่ธรรมชาติของระบบเท่ากับจำนวนชั้นความเสรี ในกรณีที่ระบบมีการสั่นสะเทือนเสรีที่ความถี่ธรรมชาติค่าใดค่าหนึ่ง จะเรียกการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งนั้นว่าฐานนิยมนปกติ (Normal Mode) หรือฐานนิยมนมุขสำคัญ (Principal Mode)

2.3.1 การเคลื่อนที่แบบเกี่ยวโยงและไม่เกี่ยวโยง

ระบบที่มีระดับความเสรีสองชั้น จะมีสมการของการเคลื่อนที่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์สองสมการ ถ้าสมการเป็นสมการเชิงเส้นและพารามิเตอร์ของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา สมการการเคลื่อนที่แบบทั่วไปจะเป็นการกำหนดตามสมการจะเห็นว่าทุกๆสมการจะประกอบ ด้วยสามเทอมที่เป็นพจน์แท้ ส่วนที่เหลือจะเป็นพจน์ที่เกี่ยวโยงกันระหว่างพิกัด x_1 และ x_2 หรือพิกัด x_2 และ x_1 ความแตกต่างของระบบสมการการเคลื่อนที่ 2-DOF ส่วนมากในสมการที่ไม่มีไม่มีตัวหน่วง จะมีรูปแบบ ดังนี้

$$\begin{aligned} m_{11}\ddot{x}_1 + m_{12}\ddot{x}_2 + k_{11}x_1 + k_{12}x_2 &= 0 \\ m_{12}\ddot{x}_1 + m_{22}\ddot{x}_2 + k_{21}x_1 + k_{22}x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

สมการสามารถแยกเป็นในรูปแบบ Matrix

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

อาจจะหาระบบพิกัดเป็นรูปแบบของสองสมการที่แต่ละสมการสามารถแก้ได้อิสระ เช่น พิกัดเรียกว่า *principal coordinates* ถึงแม้ว่าอาจจะเป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบ ไม่มีตัวหน่วงที่มันไม่สามารถใช้ได้กับสมการที่มีตัวหน่วง ตามสมการที่แสดงเป็น Zero dynamic และ Static coupling แต่ว่าพิกัดที่มีตัวหน่วง [7]

2.4 การสั่นสะเทือนเครื่องจักรกล

การศึกษาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล ควรจะต้องทราบค่าจำกัดความต่างหลักพื้นฐาน และธรรมชาติทั่วไป ของการสั่นสะเทือนควรมีหลักความรู้พื้นฐานในวิชากลศาสตร์

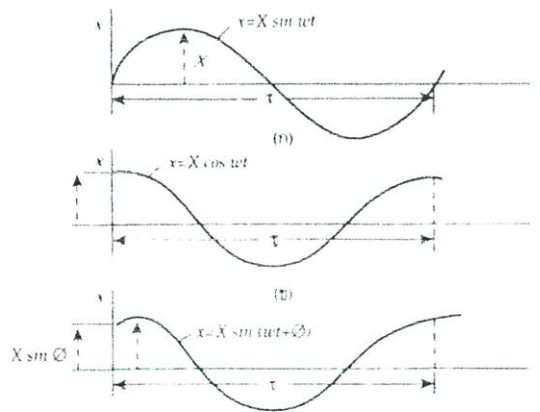
2.4.1 การสั่นสะเทือนเครื่องจักรกล [5]

การเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนการเคลื่อนที่ดังกล่าวอาจจะมีลักษณะรูปร่างที่แน่นอน หรือไม่แน่นอนก็ได้ โดยทั่วไปแล้วการสั่นสะเทือนจะแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ การสั่นสะเทือนเสรี และการสั่นสะเทือนแบบบังคับ การสั่นสะเทือนแบบเสรีนั้นจะเกิดขึ้นในขณะที่ระบบเคลื่อนที่ไปมา โดยที่ไม่มีมีแรงมากระทำที่ระบบ ความถี่ในการเคลื่อนที่ไปเรียกว่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งอาจจะมีค่าเดียวหรือหลายค่า การสั่นสะเทือนแบบบังคับเป็น

การสั่นสะท้อนในขณะที่มีแรงภายนอกมากระทำกับระบบและทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเดียวกับแรงที่มากระทำ ความถี่เท่ากับความถี่ของแรงที่มากระทำ แต่ถ้าความถี่ของแรงที่มากระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติ ระบบนั้นเราจะเรียกว่าเป็นระบบที่อยู่ในสภาพการสั่นพ้อง คือการที่จะมีการสั่นสะท้อนอย่างรุนแรงและเป็นอันตรายต่อระบบเกิดการชำรุดเสียหาย ซึ่งโดยปกติเครื่องกลจะมีตัวหน่วงอยู่ในระบบด้วย เช่นเมื่อเกิดการเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนที่มีการสัมผัสกัน การเสียดทานที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีการยึด-หดตัว ในความถี่ธรรมชาตินั้นเราจะทำการสมมุติให้มีค่าตัวหน่วงน้อยมาก หรืออาจจะไม่มีตัวหน่วงเลย

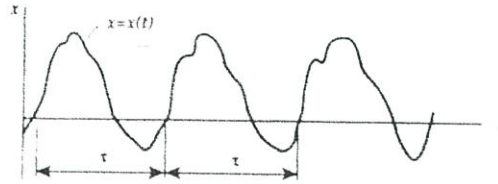
2.4.2 การสั่นสะท้อนของระบบ

ถ้ามีพลังงานมาทำกับระบบปกติมวลจะสะสมพลังงานจลน์และสปริงหรือส่วนที่ยืดหยุ่น จะสะสมพลังงานศักย์ สมมุติให้มวลเคลื่อนที่ขึ้นลงเฉพาะในแนวตั้ง จากตำแหน่งสมดุล ถ้าดึงมวลลงในแนวตั้ง แล้วปล่อยมวล มวลจะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลง ถ้าการเคลื่อนที่ขึ้นลงในเวลาที่เท่ากัน จะเรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า การเคลื่อนที่เป็นคาบ ถ้าสปริงมีค่าตัวความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด และเวลาจะเป็นแบบโคไซน์ และเรียกการเคลื่อนที่แบบ ฮาร์มอนิก แสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อ x เป็นการกระจัด และ t เป็นเวลา ความแตกต่างของรูป ก , ข , ค ขนาดสูงสุดของการกระจัด เรียกว่าแอมพลิจูด ส่วนเฟสแทนที่ด้วย ϕ และเรียกว่า ω ว่า ความถี่



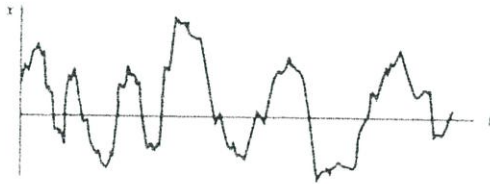
รูปที่ 2.1 แสดงกราฟการเคลื่อนที่

เงื่อนไขการเคลื่อนที่อาจทำให้ระบบเคลื่อนที่ต่างออกไปจากฮาร์มอนิก แต่ยังมีลักษณะเป็นรอบ เช่น การเคลื่อนที่รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่มีการกระจัดเท่ากันในหนึ่งรอบ เรียกว่า รอบการเคลื่อนที่ หรือ รอบ และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งรอบจะเรียกว่า คาบ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ T มีหน่วยเป็นวินาที จำนวนรอบของการเคลื่อนที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเรียกว่า ความถี่ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ f โดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที

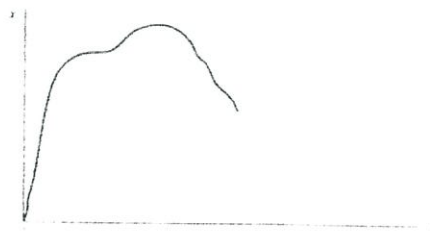


รูปที่ 2.2 แสดงรอบของการเคลื่อนที่

การสั่นสะเทือนอาจจะมีรูปร่างลักษณะที่ไม่แน่นอน ดังเช่นในรูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ที่ไม่มีส่วนที่ซ้ำกันเลย การสั่นสะเทือนแบบนี้เป็นแบบ การสั่นสะเทือนแบบ สุ่ม ซึ่งอาจจะเกิดจากแรงที่มากระทำมีค่าไม่เท่ากัน หรือมีขนาดของแรงที่มากระทำนั้นมีความไม่แน่นอนมากระทำต่อระบบ ส่วนการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระทำกระทัดรัดจะมีการตอบสนองของระบบเป็นช่วงเวลาสั้น[5]



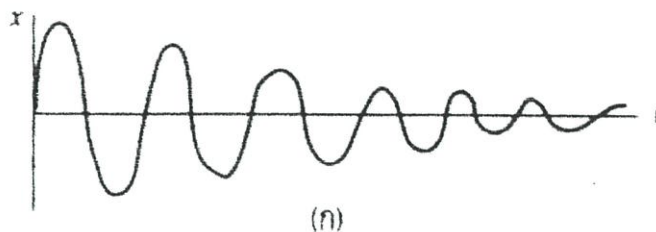
รูปที่ 2.3 แสดงการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม



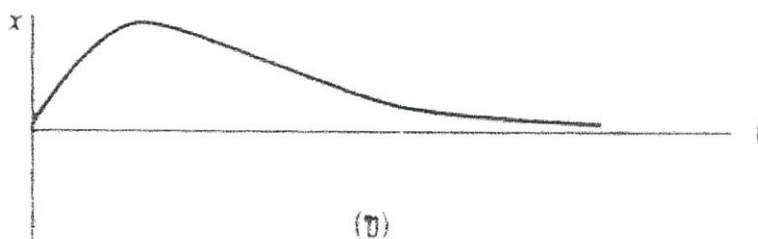
รูปที่ 2.4 แสดงการสั่นสะเทือนแบบกระแทก

เมื่อระบบการสั่นสะเทือนที่มีตัวหน่วง เช่น การต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ ลักษณะการเคลื่อนที่จะคล้ายกับรูปที่ 2.5 (ก) จะแสดงให้เห็นเราสามารถทราบคาบเวลาได้ ส่วนในรูปที่ 2.5

(ข) จะไม่มีคาบเวลาและการเคลื่อนที่ในรูปที่ 2.5 (ข) คือการเคลื่อนที่ไม่เป็นคาบ การบอกตำแหน่งหรือรูปร่างของการเคลื่อนที่ของระบบอาจจะจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันหลายฟังก์ชันจำนวนของฟังก์ชันนี้จะเป็นตัวกำหนดจำนวนระดับชั้นความถี่ของระบบ เช่นในรูปที่ 2.6 จำนวนฟังก์ชันเพียงแห่งเดียวสามารถบอกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของระบบได้

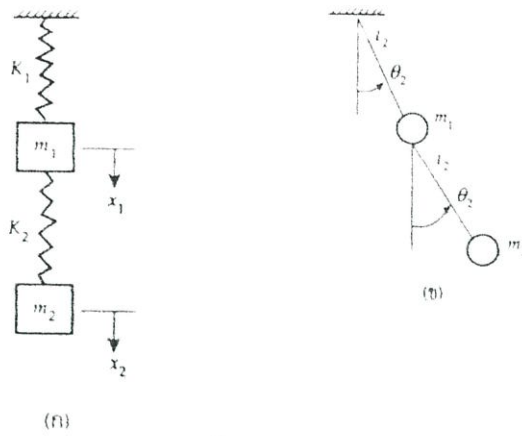


รูปที่ 2.5 (ก) การเคลื่อนที่มีคาบเวลา

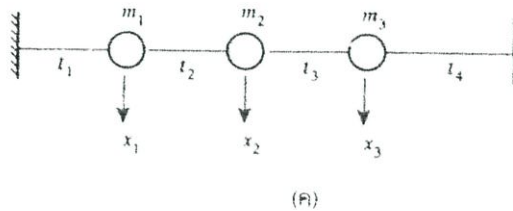


รูปที่ 2.5 (ข) การเคลื่อนที่ไม่เป็นคาบ

จึงเป็นระบบที่มีหนึ่งระดับชั้นความถี่ ส่วนในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) จะเป็นระบบที่มีระดับชั้นความถี่และรูปที่ 2.6 (ค) จะเป็นระบบที่มีความถี่สามชั้น ระบบที่มีชั้นระดับความถี่มากกว่าสองระดับขึ้นไป เรามักจะเรียกว่าระบบหลายชั้นระดับความถี่ สำหรับระบบที่มวลและหยุนตัวการกระจายสม่ำเสมอและต่อเนื่อง เช่น เพลลา คาน จะมีระดับชั้นความถี่มาก เพราะระบบคานและเพลลาประกอบส่วนของมวล และหยุนตัวจำนวนมากนั่นเอง



รูปที่ 2.6 (ก) (ข) ระบบที่มีสองระดับขั้นความเสรีอิสระ



รูปที่ 2.7 (ค) ระบบที่มีสามขั้นระดับความเสรีอิสระ

สำหรับระบบหลายระดับขั้นความเสรี เงื่อนไขเริ่มต้นการเคลื่อนที่อาจจะทำให้การเคลื่อนที่ของระบบแต่ละพิกัดอิสระที่เป็นแบบฮาร์มอนิก และเรียกลักษณะรูปร่างของการเคลื่อนที่ดังกล่าว ฐานนิยมปกติ การสั่นสะเทือนและจำนวนฐานนิยมของการเคลื่อนที่เท่ากับจำนวนระดับขั้นความเสรีของระบบ โดยปกติแล้วทั่วไปประสงค์จะให้เกิดการสั่นสะเทือน เพราะการสั่นสะเทือนอาจจะทำให้เครื่องจักรกลเกิดการชำรุดเสียหาย แรงอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนนั้นจะส่งผลไปยังฐานเครื่องหรือชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ของเครื่องจักรกล เนื่องมาจากการสั่นสะเทือนนั้นจะทำให้เกิดเสียงและการสั่นคลอน ส่วนของเครื่องจักรกลนั้นจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลายชิ้นและซับซ้อน แต่เราสามารถที่จะจำลองหรือแทนเครื่องจักรกลดังกล่าวในแบบจำลองอย่างง่าย ส่วนประกอบด้วยมวล , สปริง , และตัวหน่วง หรือเรียกระบบจำลองนี้ว่า ระบบสมมูล หรือ แบบจำลองการสั่นสะเทือน

เมื่อระบบทางพลวัตถูกกระตุ้น โดย $F(t)$, ผลจะถูกเรียกว่า Transient response เช่น ในสถานะคงที่ โดยทั่วไปแล้วการสั่นจะไม่นำมาแสดง เช่นการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติ กับความกว้างของความถี่ที่เปลี่ยนไปในแบบอิสระ ในแต่ละชนิดของการกระตุ้น[6] ครั้งแรกนี่เป็นการ

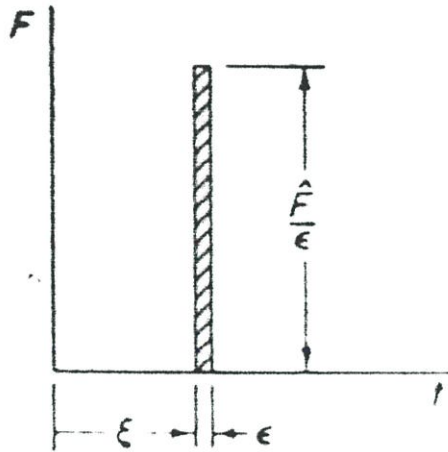
ศึกษาระบบมวลของสปริงที่มีการกระตุ้นแบบเร็ว เพราะว่าในกรณีนี้เราสนใจในปัญหาการสั่น สะเทือนแบบชั่วคราว

2.5 การดล

เป็นการอินทิเกรตแรงกับเวลา เรียกว่า \hat{F}

$$F = \int \hat{F}(t) dt \quad (2.4)$$

ความถี่แรงที่มีขนาดใหญ่กับช่วงเวลาสั้น แต่กับเวลาที่มีขอบเขต แรงนี้ถูกเรียกว่า การดล



รูปที่ 2.7 แสดงแรงการดล (Impulse force)

รูปที่ 2.7 แสดงแรงที่ขนาดใหญ่ \hat{F}/ϵ กับช่วงระหว่าง ϵ เข้าใกล้ ศูนย์ เช่น แรงที่ไม่สิ้นสุด อย่างไรก็ตามกำหนดแรง โดยการอินทิเกรตเวลา เป็น \hat{F} ด้วยการถูกพิจารณาขอบเขต จำกัด เมื่อ \hat{F} เท่ากับรวมกัน เช่นในกรณีที่ควบคุมแรง $\epsilon \rightarrow 0$ ในกรณีนี้เรียกว่า การดลหนึ่งหน่วย หรือ *delta function* ฟังก์ชันนี้ที่ $t = \xi$ เป็นเช่นเดียว โดย $\delta(t - \xi)$ ตามคุณสมบัติ[6]

$$\delta(t - \xi) = 0 \quad \text{สำหรับทั้งหมด } t \neq \xi$$

$$\int_0^{\infty} \delta(t - \xi) dt = 1.0 \quad 0 < \xi < \infty \quad (2.5)$$

เมื่อ $\delta(t - \xi)$ ถูกรวมกับฟังก์ชันของเวลา $f(t)$ ที่แสดงรูปที่ 2.9 ผลอาจจะเป็น ศูนย์ ที่ $t = \xi$ และอินทิเกรตกับเวลาจะเป็น

$$\int_0^{\infty} f(t) \delta(t - \xi) dt = f(\xi) \quad (2.6)$$

เพราะว่า $F dt = m dV$, \hat{F} ที่มีวลจะเป็นผลให้เปลี่ยนแปลงความเร็วขณะนั้นเท่ากับ \hat{F}/m นอกเหนือจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การสั่นสะเทือนอิสระ เมื่อไม่มีระบบรองรับของสปริง กับที่สภาวะเริ่มต้น $x(0)$ และ $\dot{x}(0)$ สมการ

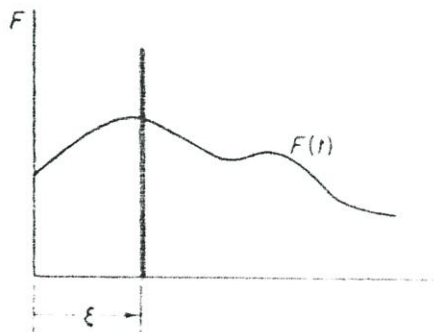
$$x = \frac{\dot{x}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t + x(0) \cos \omega_n t \quad (2.7)$$

ดังนั้นผลของระบบสปริงที่เริ่มจากอื่น โดยการคล

$$x = \frac{\hat{F}}{m\omega_n} \sin \omega_n t = \hat{F} h(t) \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_n} \sin \omega_n t \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.9 เป็นการรวมฟังก์ชันเวลา

เมื่อใช้ระบบแบบมีตัวหน่วง จะเริ่มกับสมการการสั่นสะเทือนอิสระ กับ $x(0) = 0$;

$$x = \frac{\dot{x}(0)e^{-\zeta\omega_n t}}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t \quad (2.10)$$

สำหรับที่สภาวะเริ่มต้น $\dot{x}(0) = F/\hat{m}$ ในสมการ

$$x = \frac{\hat{F}}{m\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t \quad (2.11)$$

ที่สภาวะกระทำรวดเร็วเป็นส่วนที่สำคัญมากในส่วนของชั่วคราว และเป็นเหมือนกัน โดย $h(t)$ ทั้งในกรณีทั้งสองแบบทั้งมีตัวหน่วงและไม่มีตัวหน่วงสมการสำหรับการสั่นรวดเร็วสามารถแสดงในรูป

$$x = \hat{F}h(t) \quad (2.12)$$

มีการตอบสนอง $h(t)$ ที่การคลหนึ่งหน่วย อาจจะเป็นการตั้งสมการสำหรับการตอบสนองของระบบ โดยแรงครั้งเดียว $f(t)$ สำหรับการพัฒนานี้ เราจะพิจารณาแรงนี้คู่ไปกับแรงคล ที่แสดงในรูป เมื่อมีการทดสอบการคล ที่เวลา $t = \xi$

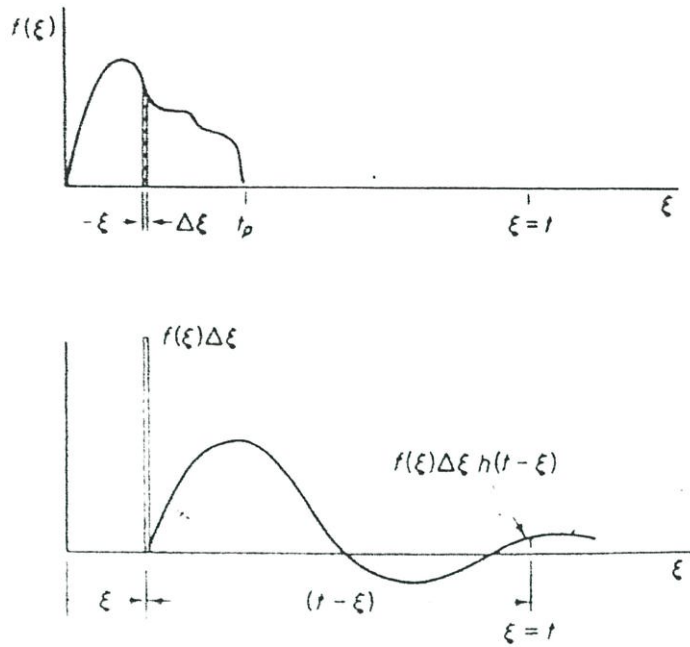
$$\hat{F} = f(\xi)\Delta\xi \quad (2.13)$$

และการตอบสนองเวลาที่ t เป็นอิสระเวลาผ่านไป $t - \xi$,

$$f(\xi)\Delta\xi h(t - \xi) \quad (2.14)$$

เมื่อการตอบสนอง $h(t - \xi)$ เป็นหนึ่งหน่วยการคลที่เริ่ม $t = \xi$ เพราะว่าเราจะพิจารณาที่ระบบเชิงเส้น ดังนั้นการรวมกันทั้งหมดของการตอบสนอง โดยการอินทิเกรต

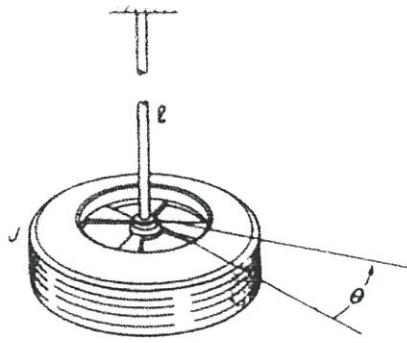
$$x(t) = \int f(\xi)h(t - \xi)d\xi \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.10 แสดงแรงกระแทก กับแรงการดล

2.6 การสั่นสะเทือนแบบการบิด

โดยทั่วไปแล้วชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนเป็นจำนวนมาก และชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลอาจจะเกิดการสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่ การงอ การบิดตัวและการกระแทกที่เกิดขึ้น ในส่วนนี้เราจะนำการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการบิดตัวของเครื่องจักรกลมาพิจารณา และชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่เกิดสั่นสะเทือนจากการบิดตัวนั้นจะเป็นชิ้นส่วนที่ซับซ้อนมาก สามารถจำลองมองเห็นภาพได้ เช่น เพลาดังแสดงในรูปที่ 2.11 ถ้าสมมุติขนาดของเพลานำหนักน้อย และมีค่าของสปริง ซึ่งมีหน่วยเป็น $N-m$ ต่อเรเดียน I เป็น โมเมนต์ที่หมุนรอบแกนของวงกลม ซึ่งหน่วยคือ $kg-m^2$ สามารถให้การกระจัดเชิงมุมเป็น เรเดียน และมีค่าเป็นบวก ถ้าทิศทางในการหมุนเป็นดังรูป ดังนั้นแรงต้านการบิดของเพลานำหนักที่เกิดขึ้นบนแผ่นกลมจะมีค่าเท่ากับ $T=K_r\theta$ ซึ่งมีทิศทางเป็นดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการบิด

สมการการหมุนของการเคลื่อนที่มีลักษณะเดียวกับสมการ Newton's

$$J\ddot{\theta} = -K\theta \tag{2.16}$$

เมื่อ J เป็นโมเมนต์เฉื่อยของมวล K เป็น rotation stiffness และ θ เป็นมุมของการหมุนเป็นเรเดียน ดังนั้นความถี่ธรรมชาติการบิด $K=GI_p/l$ เมื่อ $I_p=\pi d^4/32$ และ l = ความยาวของแท่ง และ $G = 80 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ เป็นค่า shear modulus ของเหล็ก สมการความถี่ธรรมชาติ โมเมนต์เฉื่อยของล้อและยาง เป็น [5]

$$J = \frac{K}{\omega_n^2} \tag{2.17}$$

2.7 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จัดอยู่ในส่วนของวิชาการวิจัยและดำเนินงาน ซึ่งเป็นแขนงวิชาที่พัฒนามาแล้วเป็นเวลานาน และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับกันสำหรับถึงความสำเร็จและผลประโยชน์ที่ได้รับจากการนำเทคนิคนี้มาใช้ นักวิชาการในหลายๆสาขาอาชีพ ได้พยายามอย่างยิ่งในการวิจัยปัญหาในสายงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อที่จะได้นำวิธีการต่างๆนำมาพัฒนาปรับปรุงสายงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถทำให้แก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และผลลัพธ์ที่ต้องการความถูกต้องและแม่นยำมาก แนวโน้มความสนใจและการนำวิธีการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ จึงมีเพิ่มมากขึ้น

ในปีคริสต์ศักราช 1937 ซึ่งอยู่ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยฝ่ายทหารของอังกฤษ ได้ให้นักวิทยาศาสตร์ ชื่อว่า Sir Robert Watson – Wait ที่ทำการวิเคราะห์ปัญหาในการใช้ อุปกรณ์เรดาห์ในการจับเครื่องบินและเวลาที่เข้าศึกจะเข้าโจมตี ถ้าเรดาห์สามารถจับความเร็วก็สามารถจะให้มีเวลาเตรียมการส่งเครื่องบินขึ้นต่อสู้ได้ทัน และวิธีการปฏิบัติงานจนได้ผลเป็นตัวเลขนำเสนอต่อรัฐบาลเพื่อปรับปรุงสถานีเรดาห์ทั้งหมดของกองทัพ ในปีคริสต์ศักราช 1941 กองทัพอากาศอังกฤษได้จัดตั้งหน่วยวิจัยทางทหารและนำไปใช้แพร่หลายในหน่วยงานของกองทัพบกและกองทัพเรือ ในปีคริสต์ศักราช 1942 รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้ตั้งหน่วยงานวิจัยดำเนินงานเป็นครั้งแรก โดยได้รับคำแนะนำจากกองทัพอังกฤษและร่วมกันในการปฏิบัติงานกับกองทัพอังกฤษ ในประเทศประเทศอเมริกาได้ตั้งหน่วยวิจัยดำเนินงานโดยใช้ชื่อต่างกัน กองทัพอังกฤษเรียกว่า Operation Analysis ในกองทัพเรือเรียกว่า Operation Research and Operation Evaluation ในปีคริสต์ศักราช 1940 นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้พัฒนาวิธีการ เรียกว่า โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เพื่อนำไปใช้ในเรื่องการจัดสรรทรัพยากรในวงการอุตสาหกรรม และนักคณิตศาสตร์ชาวอเมริกา ชื่อว่า George B. Dantzig ได้คิดค้นวิธีการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพสูงที่เรียกว่า วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method)

ในปีคริสต์ศักราช 1947 และในปีคริสต์ศักราช 1950 Von Neuman ได้พัฒนา วิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) สำหรับแก้ปัญหาในโครงการป้องกันเรือดำนิวเคลียร์ ในปีคริสต์ศักราช 1958 กองทัพเรือสหรัฐอเมริกาได้ทำการวิจัยเพื่อหาวิธีวางแผนและควบคุมงานในโครงการผลิตและติดตั้งจรวดที่เรียกว่า โพลาริส (Polaris) โดยได้คิดค้นวิธี PERT (Program Evaluation Review Technique) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้รู้จักเพียงในกลุ่มนักวิจัยดำเนินงานก็ได้รับการพัฒนาใช้กับวงการอุตสาหกรรม ทำให้การวิจัยดำเนินงานได้รับการยอมรับและได้การพัฒนาทั้งวิธีการและรูปแบบให้ทวิขอบเขต ขนาดและซับซ้อน ตามการขยายตัวของเศรษฐกิจและสังคม

เมื่อสงครามโลกครั้งที่ 2 สิ้นสุดลง ประเทศอังกฤษได้นำเอาวิธีการวิจัยดำเนินงานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมประเภทแรก ต่อมาจึงได้ขยายตัวเข้าไปสู่อุตสาหกรรมประเภทอื่น และใช้ในการ ส่วนสหรัฐอเมริกานั้นไม่ค่อยให้ความสนใจในการนำไปประยุกต์กับงานการบริหารงานด้านธุรกิจมากนักในระยะแรกจนกระทั่งได้มีการขยายตัวในการใช้เครื่องจักรแทนคนสำหรับอเมริกาจึงได้รับการฟื้นฟูและส่งเสริมวิทยาการแขนงนี้จนนิยมใช้อย่างแพร่หลาย ได้มีการจัดตั้งสมาคมและจัดสอนขึ้นในมหาวิทยาลัยและสถาบันศึกษาชั้นสูง ในปีคริสต์ศักราช 1950 ได้มีการคิดค้นเครื่องคอมพิวเตอร์ และได้มีการนำเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิจัยดำเนินงาน ทำให้การวิจัยดำเนินงานได้รับการพัฒนาหลักการและวิธีการไปสู่ข่ายงานต่างๆ ที่มีความซับซ้อนได้มากขึ้น

2.7.1 ความจำเป็นของการหาค่าเหมาะสมที่สุด (The Need for Optimization)

เป้าหมายที่สำคัญในการแก้ปัญหาในทางอุตสาหกรรม คือการตัดสินใจเลือกทางที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหา เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตที่จะต้องทำการปรับปรุงส่วนใดบ้าง การจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้ได้ประโยชน์เกิดขึ้นมากที่สุด การเลือกวิธีการออกแบบที่มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นน้อยที่สุดและให้ผลกำไรได้มากที่สุด การดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพจะสามารถทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง การออกแบบทางวิศวกรรมจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบ ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงในปัจจัยหลายๆด้าน เช่น รูปร่าง น้ำหนัก ราคา งบประมาณ เป็นต้น

ปัญหาดังกล่าวทำให้ข้อกำหนดในการออกแบบมีความยุ่งยากยิ่งขึ้น เมื่อทางเลือกที่เป็นไปได้มีหลายทางเลือก ผู้ออกแบบจะทำการเลือกทางเลือกที่ตรงกับความต้องการที่กำหนดไว้ โดยการนำวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด ซึ่งคำตอบที่ได้จะอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของปัญหาที่กำหนดขึ้นตามลักษณะของปัญหาหรือตามความต้องการ

2.7.2 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในทางวิศวกรรม

ปัจจุบันมีการประยุกต์การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น

- 1 การออกแบบเครื่องบินเพื่อให้มีน้ำมันน้อยที่สุด
- 2 การกำหนดนโยบายการผลิตที่ดีที่สุด การกำหนดระดับจำนวนการผลิต เพื่อให้ได้กำไรมากที่สุดภายใต้ทรัพยากรที่มีอยู่จำกัด
- 3 หาทิศทางการเดินทางที่เหมาะสมที่สุดของยานอวกาศ
- 4 การจัดสรรทรัพยากรน้ำเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
- 5 การออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องจักรกล ให้มีขนาดที่เหมาะสมและมีราคาประหยัด
- 6 ใช้ในการหาสถานที่ตั้งโรงงานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าไปสู่ผู้บริโภคมากที่สุด
- 7 ใช้หาระบบหรือกระบวนการทางเคมีที่เหมาะสม
- 8 วางแผนการซ่อมบำรุงและการเปลี่ยนส่วนของเครื่องจักรกลที่เหมาะสมในการดำเนินงาน
- 9 ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม
- 10 ใช้ในการเลือกเงื่อนไขในการตัดโลหะให้ได้ปริมาณชิ้นส่วนที่ต้องมากที่สุดและมีค่าใช้จ่ายในการผลิตน้อยที่สุด
- 11 การออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ หม้อแปลงไฟฟ้า ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

- 12 การออกแบบในแบบในการทางวิศวกรรมโยธา เช่น การออกแบบอาคาร สะพาน และเขื่อน เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำที่สุด
- 13 ใช้ในการจัดระบบการสื่อสารและคมนาคม เพื่อให้ได้ผลตอบแทนมากที่สุด
- 14 ใช้ในการออกแบบวางระบบประปา เพื่อให้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด
- 15 การตัดส่วนการผสมอาหารสัตว์ว่าจะต้องใช้วัตถุดิบอย่างไรบ้าง จำนวนเท่าไร ที่จะทำ ให้ต้นทุนในการผสมอาหารต่ำที่สุด โดยที่คุณค่าของอาหารสัตว์นั้นยังคงเป็นไปตาม มาตรฐาน

การออกแบบทางวิศวกรรมมีเป้าหมายของการออกแบบ คือ การเลือกค่าของตัวแปรที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ภายใต้เงื่อนไขหรือสภาวะแวดล้อมที่กำหนดจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบ หรือจากทฤษฎีเกี่ยวข้อง เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ที่ผู้ออกแบบต้องการ และเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมและข้อกำหนดในการออกแบบ เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นวิธีที่นำข้อดีทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการศึกษาปัญหาเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด นักออกแบบต้องคำนึงเสมอว่าการออกแบบควรเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบควรเป็นสิ่งที่สังคมต้องการและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เมื่อทราบความเป็นไปได้ โดยขั้นตอนนี้อาจมีการทำซ้ำ เพื่อให้แนวคิดที่วางไว้มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

สมัยก่อนในการออกแบบผลิตภัณฑ์จะใช้วิธีการดั้งเดิมที่กำหนดไว้ก่อนหน้า เมื่อทำตามขั้นตอนดังกล่าวก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยไม่มีการปรับปรุงแก้ไขวิธีการออกแบบที่ใช้ ไม่มีการพัฒนา ในความเป็นจริงในการออกแบบควรมีปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด คือการเลือกขนาดหรือวัตถุที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นตามข้อกำหนดที่กำหนด เช่น มีราคาอยู่ในช่วงที่กำหนด สามารถทำงานได้ตามต้องการ โดยทั่วไปการออกแบบที่เหมาะสมอยู่ภายใต้พื้นฐานความรู้ทางวิศวกรรมที่อยู่ในรูปของสมการความสัมพันธ์ หรือกราฟแสดงความสัมพันธ์ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบ

2.8 ประเภทของแบบจำลองของปัญหา[9]

แบบจำลอง (Model) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพราะจะเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าเราเข้าใจลึกซึ้งในปัญหามากน้อยแค่ไหน แบบจำลองโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. **แบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model)** คือแบบจำลองที่จำลองของจริงออกมาให้มีรูปร่างอย่างเดียวกัน และมองเห็นเหมือนจริง เช่น แบบจำลองการจับยึดของ โมเลกุลทางเคมี ทำให้ทราบถึงลักษณะของการจับยึดของอนุภาค

2. **แบบจำลองแผนภาพ (Schematic Model)** คือ การแสดงข้อเท็จจริงหรือข้อความต่างๆ ออกมาเป็นแผน ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการทำความเข้าใจ หรือเป็นการรวบรวมข้อมูลต่างๆ มาจำลองในรูปของแผนภาพ หรือแผนภูมิต่างๆ แบบจำลองแผนภาพนี้อาจจะเหมือนหรือไม่เหมือนกับสภาพการณ์ของเหตุการณ์จริงก็ได้ แผนภาพแสดงปริมาณการขายสินค้าในแต่ละไตรมาส แผนภูมิควบคุมชนิดค่าเฉลี่ย-พิสัย เป็นต้น
3. **แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)** คือการจำลองสภาพเหตุการณ์ต่างๆ ออกมาในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวการของตัวในการตัดสินใจต่างๆ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการทำนายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอนาคต หรือในการควบคุมการดำเนินงานขององค์กรต่าง ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ถึงแม้ว่าจะพยายามสร้างแบบจำลองแบบจำลองนี้จะต้องสร้างภายใต้ข้อสมมุติฐานต่าง ๆ ดังนั้นในการทำนายเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจะต้องคำนึงถึงถึงสมมุติฐานนี้ด้วย เพราะในบางครั้งสมมุติฐานที่กำหนดขึ้นอาจจะไม่ถูกต้อง ทำให้ค่าคำตอบที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริงหรือในบางครั้งการตั้งสมมุติฐานไม่ถูกต้องอาจทำให้ไม่สามารถหาค่าคำตอบได้

2.9 ขั้นตอนของการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา[9]

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมไม่ว่าจะเป็นการแก้ปัญหาใด ๆ ก็ตามจะต้องมีวิธีการและขั้นตอนในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังต่อไปนี้

2.9.1 การกำหนดปัญหา

ปัญหาที่จะทำการแก้ไขจะต้องกำหนดขอบเขตและเป้าหมายของการแก้ปัญหาอย่างชัดเจน เพราะในบางครั้งขอบเขตของปัญหากว้างเกินไปหรือไม่ชัดเจน จะทำให้การแก้ปัญหาเป็นไปได้อย่างยาก ในบางครั้งไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้หรือถ้าแก้ไขปัญหาได้ผลลัพธ์ได้จะไม่ถูกต้อง ปัญหาอาจมีปัญหามากมายในขณะเดียวกัน และเป้าหมายแต่ละอย่างมีความสำคัญไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งเป้าหมายออกเป็น 2 ประเภท คือ

- เป้าหมายเดี่ยว เป้าหมายของปัญหามีเพียง 1 เป้าหมายเท่านั้น ซึ่งเป็นเป้าหมายแบบสูงสุดหรือต่ำสุดก็ได้ เช่น ต้องการออกแบบเครื่องบินเพื่อให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด การออกแบบวางแผนการวางท่อประปาเพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายในการวางท่อน้อยที่สุด เป็นต้น
- เป้าหมายหลายเป้าหมาย คือ เป้าหมายที่มีมากกว่า 1 เป้าหมาย ซึ่งแต่ละเป้าหมายอาจจะเป็นแบบเดียวกัน หรือตรงกันข้ามกันก็ได้ เช่น ต้องการทำส่วนแบ่งสินค้าในตลาดมีค่าสูงสุด

และขณะเดียวกันต้องการทำให้ได้ผลกำไรรวมสูงสุด ปัญหาลักษณะนี้เรียกว่า เป้าหมายแบบเดียวกัน แต่ในบางกรณีเป้าหมายอาจจะเป็นคนละแบบก็ได้ เช่น ต้องการผลิตสินค้าเพื่อให้ได้กำไรสูงสุด และในขณะเดียวกันต้องทำให้เสียค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดด้วย

ขั้นตอนในการกำหนดปัญหาของการออกแบบพอกกล่าวโดยสังเขปได้

- กำหนดเป้าหมายของการออกแบบ
- ศึกษาตัวแปรในการแปรในการออกแบบที่มีผลต่อเป้าหมายของการออกแบบ
- กำหนดข้อจำกัดหรือเงื่อนไขของการออกแบบ
- กำหนดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ปัญหาและระยะในการดำเนิน

2.9.2 การจัดรูปปัญหาให้อยู่รูปแบบทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้จัดตั้งปัญหาและทำความเข้าใจกับปัญหาอย่างถูกต้องแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการจัดรูปแบบของปัญหาให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยจัดรูปปัญหาให้เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะโครงสร้างดังนี้

- สมการกำหนดเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของเป้าหมายกับตัวแปรสำหรับตัดสินใจ สมการเป้าหมายนี้เป็นแบบสูงสุดหรือต่ำสุด (Maximize , Minimize) ก็ได้ และค่าของสมการเป้าหมายจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของตัวแปรสำหรับการตัดสินใจเช่น การผลิตเพื่อให้อัตราต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด การผลิตสินค้าเพื่อให้ได้กำไรสูงสุด การออกแบบชิ้นส่วนต่างเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุด โดยสมการแสดงความสัมพันธ์อาจจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา
- สมการแสดงขอบข่ายหรือเงื่อนไขบังคับ (constraint) ซึ่งแสดงขอบเขตหรือข้อจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากรในรูปของสมการ (equality) หรือสมการ (inequality)
- ตัวแปรในการออกแบบหรือตัวแปรตัดสินใจ เป็นตัวแปรที่มีความต่อเนื่อง ตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง และตัวแปรที่มีเป็นจำนวนเต็ม

2.9.3 การทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาและการหาผลลัพธ์ของปัญหา

บ่อยครั้งที่รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาไม่ถูกต้อง เนื่องจากความบกพร่องบางประการ ทำให้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไม่ใช่ตัวแทนของปัญหาอย่างแท้จริง ตรวจสอบการใช้หน่วยและมิติของตัวแปรต่าง ๆ ว่าสอดคล้องกันหรือไม่ โดยสามารถทำการตรวจสอบด้วยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์ แล้วดูว่าจะทำให้ผลลัพธ์ได้นั้นสอดคล้องกับค่าที่ควรจะเป็นหรือไม่และ ตรวจสอบโดยใช้ข้อมูลในอดีตมาทดสอบรูปแบบทาง

คณิตศาสตร์แล้วให้นำเอาผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับความจริงที่เกิดขึ้น ในการหาผลลัพธ์หรือค่าคำตอบของปัญหาจะเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของแต่ละวิธีว่าเหมาะสมกับปัญหาหรือสามารถแก้ปัญหาก็ได้หรือไม่ และเมื่อได้ผลลัพธ์แล้วต้องคำนึงถึงพฤติกรรมของผลลัพธ์ที่จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวแปรในการออกแบบของปัญหาเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือจะต้องมีการวิเคราะห์ความไว ซึ่งการวิเคราะห์ความไวนี้มีความสำคัญมากเพราะว่าถ้าตัวแปรในการออกแบบของปัญหาที่ศึกษาไม่อาจประมาณค่าได้แน่นอนจะต้องหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมค่าต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

2.9.4 การทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

ถ้าหากผลที่ได้ถูกต้องและน่าเชื่อถือได้จะต้องสามารถทดสอบได้โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ข้อมูลในอดีตกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง ๆ อย่างไรก็ตามการทดสอบความถูกต้องไม่เหมาะสมกับปัญหาที่ไม่เคยเกิดมาก่อน เพราะจะไม่มีข้อมูลในอดีตที่จะนำมาเปรียบเทียบได้

2.9.5 การนำผลลัพธ์หรือคำตอบไปใช้งาน

จะต้องทำการแปลผลลัพธ์ที่ได้ให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานได้ และเมื่อนำไปใช้งานแล้วควรทำการประเมินผลการใช้งานเพื่อนำข้อบกพร่องที่ได้มาปรับปรุงและแก้ไขเป็นไปตามความต้องการต่อไป เพราะในบางครั้งผลลัพธ์ที่ได้ไม่สามารถทำให้เป็นจริงตามที่เราร้องการได้หรือไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ

2.10 ประเภทของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด [10][11][12]

ลักษณะของปัญหาและตัวแปรในการออกแบบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็น สิ่งที่เราควรให้ความสำคัญ เพราะวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดในการใช้แก้ปัญหาแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของปัญหา ประเภทของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งตามลักษณะต่าง ๆ ได้ 6 ประเภท คือ

1. แบ่งตามสมการขอบเขต คือ ปัญหาที่มีสมการกำหนดขอบเขตของสมการการออกแบบ และปัญหาไม่กำหนดสมการขอบเขต
2. แบ่งตามลักษณะของตัวแปรในการออกแบบ คือ ถ้าสมการเป้าหมายมีตัวแปรในการออกแบบเพียงหนึ่งตัวจะเรียกปัญหาแบบนั้นว่า ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตัวแปรเดียว (Single – Variable Optimization) ถ้าสมการเป้าหมายมีตัวแปรในการออกแบบสองหรือมากกว่านั้น เรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายตัวแปร

(Multi-Variable Optimization) หรือถ้าค่าของแปรในการออกแบบเป็นจำนวนเต็มเรียกปัญหานั้นว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบจำนวนเต็ม (Integer optimization) เป็นต้น

3. แบ่งตามลักษณะของสมการเป้าหมาย คือ สมการเป้าในการออกแบบมีทั้งแบบเป้าหมายเดียวและเป้าหมายหลายเป้าหมาย สมการเป้าหมายเดียวคือปัญหาที่มีจำนวนของสมการเป้าหมายเพียงสมการเดียว ส่วนสมการเป้าหมายหลายเป้าคือปัญหาที่มีจำนวนของสมการเป้าหมายมากกว่าหนึ่งสมการเป้าหมาย
4. แบ่งตามลักษณะความสัมพันธ์ของสมการเป้าหมาย คือ ถ้าสมการเป้ามีความสัมพันธ์ของสมการเป้าหมายเป็นแบบเชิงเส้นจะเรียกปัญหานั้นว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโปรแกรมเชิงเส้น (linear Programming , LP) หรือสมการเป้าหมายมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นจะเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear Program, NLP)
5. แบ่งตามลักษณะของสมการเป้าหมายที่ขึ้นกับกับเวลา คือ ถ้าปัญหาเป็นปัญหาที่ขึ้นอยู่กับเวลาจะเรียกปัญหาแบบนั้นว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบพลศาสตร์ (Dynamic optimization) ถ้าเป็นปัญหาที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาจะเรียกว่า ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบสถิตย์ (Static optimization)
6. แบ่งตามลักษณะของข้อมูล คือ ถ้าปัญหาที่มีทราบค่าของข้อมูลที่แน่นอนจะเรียกปัญหานั้นว่า ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบทราบค่าแน่นอน (Deterministic optimization) ส่วนปัญหาที่ไม่สามารถทราบค่าข้อมูลได้อย่างแน่นอนจะเรียกว่า ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบทราบค่าไม่แน่นอน (Stochastic optimization)

2.11 วิธีการหาค่าที่เหมาะสม [8][13][14]

วิธีการหาค่าคำตอบของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งได้ 4 วิธีคือ

2.11.1 วิธีกราฟ (Graphical Method)

เป็นวิธีที่ต้องพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมการเป้าหมายและตัวแปรในการออกแบบ ข้อจำกัดของวิธีนี้ใช้ได้กับปัญหาหนึ่งมิติและมิติเท่านั้น กล่าวคือจำนวนตัวแปรในการออกแบบสูงสุดที่จะใช้วิธีนี้ได้ต้องไม่เกินสองตัว

2.11.2 วิธีการวิเคราะห์ (Analytical Technique)

สิ่งสำคัญของปัญหาที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ในการหาค่าตอบ คือ สมการความสัมพันธ์ต้องสามารถหาอนุพันธ์ได้และความสัมพันธ์ของสมการต้องเป็นแบบต่อเนื่อง เพราะในการหา

คำตอบของปัญหาจะใช้วิธีหาค่าอนุพันธ์ของสมการเป้าหมาย ถ้าปัญหาเป็นแบบที่มีสมการขอบเขตจำกัดจะใช้วิธีตัวคูณของลากรองจ์ (Lagrange multipliers) ทำการแปลงสมการขอบเขตให้เป็นเทอมที่เพิ่มขึ้นของสมการเป้าหมายจะทำให้ปัญหาที่ไม่สามารถสมการขอบเขตจำกัด

2.11.3 วิธีการทดลอง (Experimental Technique)

วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องแปลงปัญหาให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ เป็นการทดลองหาคำตอบทุกทางเลือกที่เป็นที่เป็นได้ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้หาคำตอบที่เหมาะสม วิธีการนี้เหมาะสมกับปัญหาที่ไม่มีซับซ้อนและตัวแปรในการออกแบบมีจำนวนมาก ใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบนานและมีค่าใช้จ่ายมากกว่าวิธีอื่น

2.11.4 วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Technique)

วิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่ทำซ้ำเพื่อหาคำคำตอบที่เหมาะสมที่สุด สามารถแยกประเภทได้จากหลายลักษณะคือ สามารถแบ่งได้จากลักษณะของสมการเป้าหมายและจากลักษณะของปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับหรือไม่เงื่อนไขบังคับ เป็นต้น

2.11.5 แบ่งตามลักษณะของสมการเป้าหมาย

การแบ่งประเภทของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามลักษณะของสมการเป้าหมายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1 โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming) เป็นวิธีการใช้ในการแก้ปัญหาค่าที่ต้องการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัญหานั้น ๆ โดยวิธีโปรแกรมคณิตศาสตร์จะใช้กับปัญหาที่เป็นแบบคงที่ (Steady problems) โดยมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังนี้

สมการเป้าหมายแบบสูงสุดหรือต่ำสุด : $y(x)$

สมการขอบข่าย : $f_i(x) \geq 0 ; i=1,2,\dots,m$

โดยที่ $x=(x_1,x_2,\dots,x_n)$

วิธีการของโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ ได้แก่

- วิธีการวิเคราะห์ปัญหา (Analytical Method) หรือทฤษฎีของการหาค่าสูงสุดหรือหาค่าต่ำสุด (Classical Theory of Maxima and Minima)
- วิธีการวิเคราะห์ปัญหาที่ฟังก์ชันมีการโค้งนูน (Convex Programming) เป็นวิธีที่ต้องพิจารณาการโค้งนูนของสมการความสัมพันธ์ ในบางครั้งคำตอบที่ได้อาจจะไม่เป็นคำตอบที่แท้จริงได้ ซึ่งเรียกว่า Local solution ในปัญหาหนึ่งอาจจะมี local solution หลายค่าก็ได้ แต่จะมีคำตอบที่แท้จริงเรียกว่า global solution เพียงค่าเดียว ส่วนมากจะเกิดปัญหาที่มีความสัมพันธ์ของสมการเป็นแบบสมการไม่เชิงเส้น
- วิธีจีโอเมตริกโปรแกรมมิ่ง (Geometric Programming) เป็นวิธีใหม่ที่สุดวิธีหนึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ใช้แก้ปัญหาของโปรแกรมแบบไม่เชิงเส้นพัฒนาโดย ดัฟฟิน (Duffin)

ปีเตอร์สัน (Peterson) และซีเนอร์ (Zener) โดยรูปแบบของปัญหาจะเป็นผลบวกของโพลิโนเมียลทั้งสมการเป้าหมายและสมการข้อจำกัดหรือสมการเงื่อนไขบังคับ โดยเลขชี้กำลังเป็นบวกเรียกว่า โพลีโนเมียล (posynomial) และอาจเป็นจำนวนเต็มหรือเลขทศนิยมก็ได้ โดยจะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสมการเป้าหมายก่อนหลังจากนั้นจึงจะทำการหาค่าตัวแปรในการออกแบบที่เหมาะสม (ตัวแปรตัดสินใจ) ความยากง่ายในการแก้ปัญหาจะขึ้นจะขึ้นอยู่กับดีกรีของความยากของปัญหา สามารถหาค่าดีกรีความยากได้จาก $N-n-1$ โดยที่ N คือจำนวนเทอมในสมการเป้าหมาย รวมกับจำนวนเทอมในสมการเงื่อนไขบังคับ n คือ จำนวนตัวแปรในการออกแบบหรือตัวแปรตัดสินใจ ถ้าดีกรีของความยากของปัญหามีค่าเท่าศูนย์ปัญหาดังกล่าวสามารถหาค่าคำตอบโดยใช้วิธีจีโอมेटริกโปรแกรมมิ่งและปัญหาที่ง่ายที่สุดสำหรับกรณีที่ดีกรีความยากของปัญหามากกว่าศูนย์ ยังสามารถใช้วิธีจีโอมेटริก โปรแกรมมิ่งได้ แต่จะใช้เวลาในการแก้ปัญหามากกว่า

- วิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่งที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ของสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขบังคับจะต้องเป็นฟังก์ชันคณิตศาสตร์เป็นเชิงเส้น (Linear relationship) (คือ ตัวแปรทุกตัวจะต้องมีกำลังเป็นหนึ่ง) โดยสมการเงื่อนไขบังคับอาจจะอยู่ในรูปแบบสมการหรือสมการก็ได้ โปรแกรมเชิงเส้นได้เริ่มใช้ครั้งแรกเมื่อ เริ่มคริสต์ศักราช 1930 เริ่มจากการทำแบบจำลองทางเศรษฐศาสตร์ หลังจากนั้นระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 กองทัพอากาศสหรัฐได้นำไปใช้ในคริสต์ศักราช 1947 George B. Method สมาชิกคนหนึ่งในกลุ่มทำงานของกองทัพอากาศได้นำเสนอวิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) ปัจจุบันวิธีนี้ได้รับความนิยมอย่างยิ่ง
- วิธีโปรแกรมควอดราติก (Quadratic Programming) เป็นวิธีที่นำมาแก้ไขความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการเป้าหมายเป็นแบบควอดราติกและความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการเงื่อนไขบังคับเป็นแบบเชิงเส้น ในการแก้ปัญหาจะนำการเขียนให้ปัญหาให้อยู่ในรูปฟังก์ชันลากรองจ์ (Lagrangian function) และเงื่อนไขของ คูนท์คเกอร์ (Kuhn-Tucker) ในการทำให้สมการในรูปแบบของฟังก์ชันลากรองจ์เป็นสมการเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้ปัญหาดังกล่าวมีความสัมพันธ์ของตัวแปรเป็นแบบเชิงเส้นสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ปัญหา เช่น วิธีซิมเพล็กซ์ในการแก้ปัญหา
- วิธีโปรแกรมแบบจำนวนเต็ม (Integer Programming) เป็นวิธีในการแก้ปัญหาที่คำตอบของตัวแปรในการออกแบบหรือตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็ม เช่น การหาจำนวนผู้โดยสารน้อยที่สุดของการบินในแต่ละเที่ยว เพื่อที่จะดูแลไม่ให้เกิดการขาดทุนในเที่ยวบินนั้น การหาปริมาณรถสูงสุดที่ถนนสายนั้นสามารถรองรับได้ โดยที่ไม่เกิดปัญหาการจราจรติดขัดได้

- วิธีโปรแกรมไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Programming) หรือวิธีการค้นหา (Search Method) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมวิธีหนึ่งที่สมการมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น นิยมใช้วิธีนี้ค้นหาในการแก้ปัญหา วิธีการค้นหาเป็นวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) หรือ วิธีกำจัด (Elimination Method) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การค้นหาเชิงกำหนด (Deterministic Search) โดยกระบวนการไม่คำนึงถึงค่าที่คลาดเคลื่อนจากการทดลอง

2. การค้นหาเฟ้นสุ่ม (Stochastic Search) จะนำค่าการคลาดเคลื่อนเชิงสุ่มมาพิจารณาด้วย วิธีการค้นหาสามารถใช้ได้ทั้งฟังก์ชันที่ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง หรือแม้แต่ฟังก์ชันไม่สามารถหาอนุพันธ์ได้ และในระหว่างทำการค้นหาจะได้ค่าของสมการเป็นหลายค่า หลังจากนั้นจึงสรุปเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่แท้จริง

นอกจากนี้วิธีโปรแกรมไม่เป็นเชิงเส้นสามารถแบ่งออกเป็น ลักษณะอื่น ๆ ได้ดังนี้

1. กรณีตัวแปรเดียว (Single Variable) เช่น วิธีการค้นหาแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (Unrestricted Search) การค้นหาเอกรูป (Uniform Dichotomous Search) การค้นหาแบบทวิภาค (Sequential Dichotomous Search) การค้นหาภาคตัดทอง (Golden Section Search) การหาแบบทุกค่า (Exhaustive Search)

2. กรณีตัวแปรหลายตัวแปรและไม่มีเงื่อนไขบังคับ (Multivariable , Unconstrained Optimization) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสมการไม่ต้องหาอนุพันธ์ เช่น การค้นหาแบบแลตทิซ (Lattice Search) การค้นหาทีละตัว (Univariate Search) และการค้นหาแบบกริด (Grid Search) และวิธีการที่ต้องมีการหาอนุพันธ์ เช่น การค้นหาตามทางชันที่สุด (Steepest Asecent Method) วิธีของนิวตัน (Newton's Method) วิธีโบรเดน-เฟลทเซอร์ – โกลด์เฟรบ-เชนโน (Broyden-Fletcher –goldfarb-shanno Method) วิธี เดวิดอน-เฟลทเซอร์ – พาว์เวล (Davidon-Fletcher –goldfarb-shanno Method)

2. กรณีตัวแปรหลายตัวแปรและมีเงื่อนไขบังคับ (Multivariable , Constrained Optimization) เช่น วิธีการค้นหาโดยตรงขนาดขั้นที่เปลี่ยนแปลง (Search with Fixed Step Size) วิธีการค้นหาปรับเปลี่ยนขนาดของขั้นที่เปลี่ยนแปลง (Search with very Step Size) วิธีการค้นหาแบบทุกค่า (Exhaustive Search)

วิธีการค้นหาการเปลี่ยนแปลง เป็นวิธีการหาที่ใช้ในการหาฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา ลักษณะของปัญหาจะเป็นแบบพลศาสตร์ (Dynamic ProBLEms) โดยมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$\text{สมการเป้าหมายแบบสูงสุดหรือต่ำสุด ; } I[y(x),y'(x)]dx$$

สมการเงื่อนไขบังคับจะอยู่ในรูปอินทิเกรตหรือดิฟเฟอเรนเชียล

วิธีการของการหาค่าเปลี่ยนแปลง ได้แก่

- วิธีทางแคลคูลัส (Calculus of Variation) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้วิธีดั้งเดิม (Classical Method) คือทางแคลคูลัส วิธีการนี้ใช้กับปัญหาที่มีรูปแบบสมการที่ต้องหาอนุได้ และสมการเงื่อนไขบังคับต้องกับต้องเป็นแบบสมการ (Equality Constraint) เท่านั้น สำหรับกรณีที่มีสมการเงื่อนไขบังคับเป็นสมการ (Inequality Constraint) ต้องใช้วิธีอื่นเพื่อหาคำตอบของปัญหา วิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายได้แก่ วิธีการใช้ตัวคูณลากรองจ์ ได้รับการพัฒนาครั้งแรกในช่วงคริสต์ศักราช 1736-1813 โดย โจเซฟ ลูอิส ลากรองจ์ (Joseph Louis Lagrange) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส
- วิธีโปรแกรมพลศาสตร์ (Dynamic Programming) ที่สมการความสัมพันธ์เป็นสมการต่อเนื่อง ลักษณะของปัญหาที่จะใช้วิธี โปรแกรมพลศาสตร์ ในการแก้ปัญหาจะต้องจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. ปัญหาใหญ่ต้องสามารถแตกออกเป็นปัญหาย่อย ๆ ได้แต่ละปัญหาย่อยจะมีตัวแปรในการออกแบบเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น และปัญหาย่อยเหล่านี้เรียกว่า ขั้นตอน (stage)

2. ขั้นตอนแต่ละขั้นตอนจะต้องกำหนดหมายเลขให้สัมพันธ์กัน

- 3 ผลลัพธ์ที่เหมาะสมของการตัดสินใจในแต่ละขั้นตอนจะส่งผลไปยังขั้นตอนถัดไป
- 4 ผลลัพธ์ที่เหลืออยู่ในแต่ละขั้นเป็นอิสระจากผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดที่นำไปใช้ยังขั้นตอนถัดไป
- 5 ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาใหญ่จะได้อมาจากการแก้ปัญหาย่อยตั้งแต่ขั้นตอนแรกถึงขั้นตอนสุดท้าย
- 6 สมการผลตอบแทนสะสมจะสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนที่ n ได้ต่อเมื่อสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอน $n-1$ ได้เสียก่อน
- 7 สมการผลตอบแทนสะสมหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดได้โดยการทำจากข้างหลังไปข้างหน้า และทำที่ละขั้นตอนเรียงลำดับกันไป

2.11.6 แบ่งตามลักษณะสมการเงื่อนไขบังคับ

การแบ่งประเภทของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามลักษณะของสมการเงื่อนไขบังคับสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. ปัญหาที่มีสมการเงื่อนไขบังคับ เป็นปัญหาที่มีสมการเงื่อนไขบังคับเพื่อกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปรในการออกแบบ เช่น $10 \leq X \leq 20$ โดย X เป็นตัวแปรในการออกแบบ ซึ่งสมการเงื่อนไขจะมีรูปแบบของสมการหรืออสมการก็ได้ โดยความสัมพันธ์ของสมการเป็นแบบสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้นก็ได้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของปัญหานั้น

- ปัญหาที่ไม่มีสมการการเงื่อนไขบังคับ โดยทั่วไปปัญหาส่วนใหญ่จะเงื่อนไขบังคับเสมอ แต่ในบางครั้งในการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะไม่คำนึงถึงสมการเงื่อนไขที่บังคับนั้น เพราะสมการเงื่อนไขบังคับบางสมการหรือทั้งหมดไม่มีผลต่อค่าคำตอบของปัญหา บางปัญหาที่ไม่มีสมการเงื่อนไขบังคับอาจจะเกิดจากการปรับเปลี่ยนให้สมการเงื่อนไขบังคับไปเป็นเทอมที่เพิ่มเข้าในสมการเป้าหมาย ซึ่งทำให้สมการเงื่อนไขบังคับที่มีอยู่หายไป

2.11.7 ชนิดของคำตอบ

คำตอบที่ได้จะมีอยู่สองชนิด คือ Local solution และ Global solution ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Algorithms of Optimization) ส่วนใหญ่จะให้คำตอบเป็นแบบ Local solution กล่าวคือ คำคำตอบของจุดดังกล่าวจะให้คำตอบของสมการเป้าหมายต่ำสุดจากคำตอบของจุดใกล้เคียง ซึ่งวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไม่สามารถหา Global solution ได้ ซึ่งคำตอบที่เป็น Global solution จะหาได้ยากมาก ปัญหาที่มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นจะไม่พบกับปัญหาดังกล่าว ส่วนมากปัญหาดังกล่าวจะเกิดปัญหาที่มีความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นเท่านั้นทั้งปัญหาแบบเงื่อนไขบังคับ (Constrained) และแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (Unconstrained) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่เป็นฟังก์ชันที่มีความนูน (Convex function) หรือมีความเว้า (Concave function) ต้องมีความระมัดระวังในการตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้เป็น Global solution

2.12 ประโยชน์ของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการออกแบบ

ประโยชน์ของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้หรือนำไปใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการออกแบบมีดังนี้ คือ

- สามารถลดเวลาในการออกแบบได้ กล่าวคือ โดยทั่วไปในการออกแบบนั้นค่าของตัวแปรในการออกแบบแต่ละตัวเราไม่อาจทราบได้ เมื่อเราไม่ทราบค่าของตัวแปรในการออกแบบดังกล่าว ทำให้เราจำเป็นต้องสุ่มค่าตัวแปรในการออกแบบ เพื่อนำมาออกแบบจริง โดยที่เราไม่ทราบว่าค่าตัวแปรนั้นทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นไปตามกำหนดได้ตั้งแต่ต้นหรือไม่ ถ้าผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามต้องการก็ต้องทำการสุ่มค่าตัวแปรในการออกแบบใหม่ จะทำให้เสียเวลาในขั้นตอนนี้มากและทำให้ค่าจ่ายมากขึ้นด้วย เมื่อเรานำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนนี้ลงได้อีกด้วย
- สามารถนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปช่วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้มากยิ่งขึ้น

3. ทำให้ขั้นตอนในการออกแบบหรือขั้นตอนพัฒนาผลิตภัณฑ์ ใช้จำนวนคนและเครื่องจักรน้อยลงและสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในตอนนี้ได้
4. สามารถนำประสบการณ์ของออกแบบหรือปัญหาที่พบมาช่วยที่พบมาช่วยในการกำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขบังคับ เพื่อให้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นตัวแทนของปัญหาอย่างแท้จริง ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เราควรให้ความสำคัญและมีความระมัดระวังในการกำหนดขอบเขตและลักษณะของปัญหา เพราะถ้าไม่มีความเข้าใจในปัญหาหรือความต้องการที่แท้จริง คณิตที่ได้จากการใช้วิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดก็ไม่สามารถแก้ปัญหาได้จริงหรือในบางครั้งไม่สามารถหาค่าคำตอบได้
5. เมื่อนำวิธีการที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการออกแบบ สามารถเปลี่ยนค่าตัวแปรเปลี่ยนค่าตัวแปรในการออกแบบได้ที่หลายตัว และสามารถ เปลี่ยนสมการเงื่อนไขบังคับได้ เพื่อให้สมการดังกล่าวแทนปัญหาอย่างแท้จริง ซึ่งถ้าเราใช้วิธีพล็อตกราฟหรือใช้ตารางจะมีความยุ่งยากมากและใช้เวลานานเป็นต้น

ข้อจำกัดของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

1. การกำหนดปัญหาถ้ากำหนดเป้าหมายไม่ถูกต้องและเข้าใจยาก เมื่อนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการแก้ปัญหาต่างๆ หรือในบางกรณีไม่สามารถหาค่าคำตอบ
2. วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะมีความยุ่งยากมาก เมื่อนำไปใช้แก้ปัญหาที่มีความสัมพันธ์ของสมการเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องและเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้หาค่าที่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ยาก และใช้เวลาในการคำนวณนานหรือบางครั้งก็ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้
3. คำตอบที่ได้จากการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด อาจจะไม่ใช่คำตอบที่แท้จริง (Global solution) ของปัญหา ดังนั้นจะต้องทำการตรวจสอบให้แน่ชัด โดยทำการเปลี่ยนค่าเริ่มต้นหลาย ๆ ค่า เพื่อดูว่าคำตอบที่ได้ยังเป็นค่าเดิมหรือไม่ ถ้ายังเป็นค่าเดิมแสดงว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่แท้จริง
4. วิธีการทุกวิธีของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไม่สามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาได้ทุกปัญหา เพราะวิธีการบางวิธีมีข้อจำกัดหรือขั้นตอนที่แตกต่างกันไป เช่น วิธี Quasi-Newton ใช้ได้กับปัญหาที่สามารถหาอนุพันธ์ได้เท่านั้น ดังนั้นในการเลือกวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของวิธีนั้นด้วย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

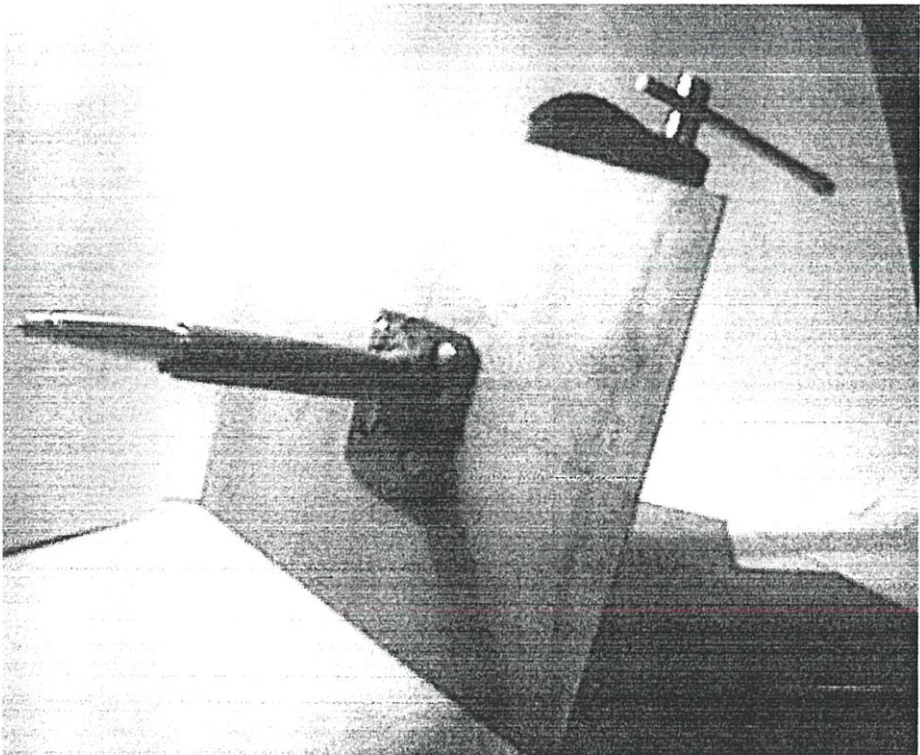
การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาค่าของสัมประสิทธิ์ตัวหนักที่นำไปใช้ในการคำนวณของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้กันในประเทศ

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

การทดลองเป็นการทดลองเพื่อที่จะนำค่าของสัมประสิทธิ์ตัวหนักที่ใช้ในรถบรรทุกในการขนส่งภายในประเทศ จากการทดลอง เพื่อที่จะนำค่าของตัวแปรนี้ไปใช้ในสมการของรถบรรทุกกึ่งพ่วง เพื่อเป็น

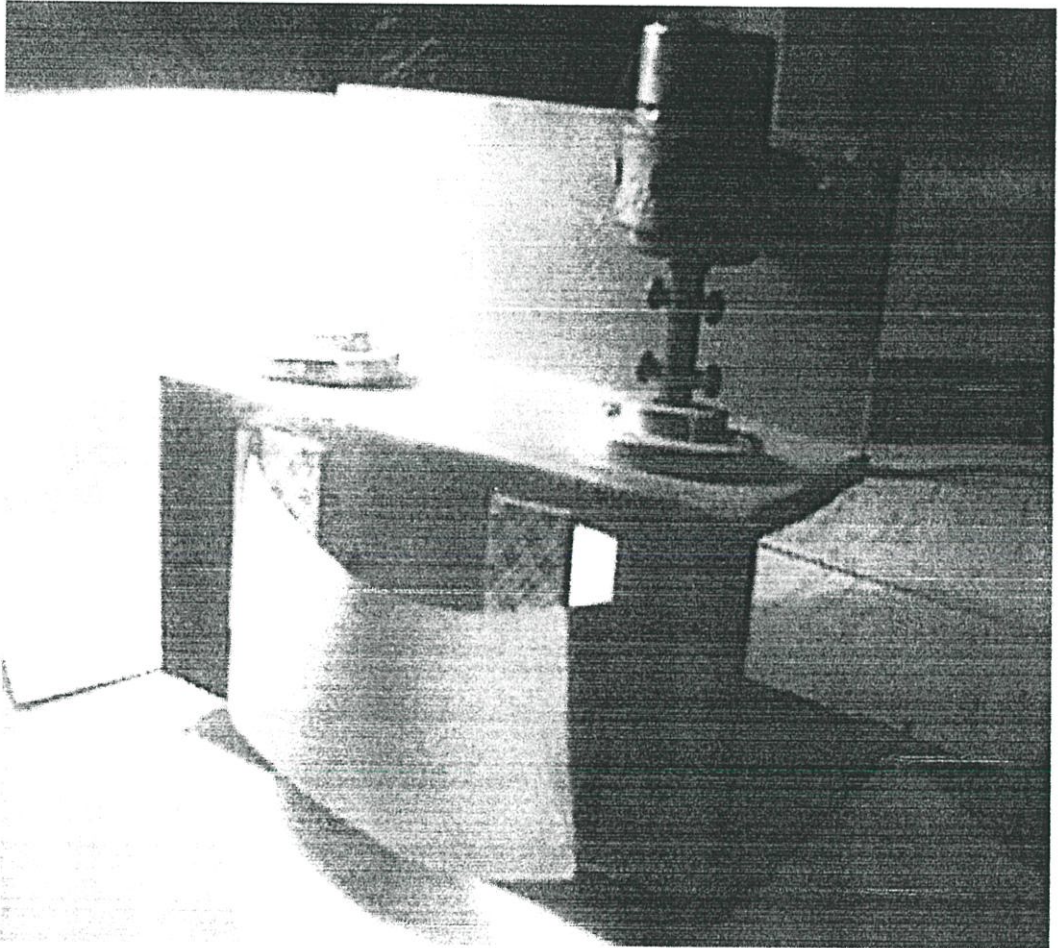
3.3.1 ชั้นส่วนของชุดทดลองนี้จะประกอบได้ด้วย อุปกรณ์ชิ้นหลักๆ 2 ชิ้น

1. ชั้นส่วนที่นำไปติดตั้งเข้ากับตัวรถ จะประกอบได้ด้วย แผ่นฐานและอุปกรณ์จับยึด เพื่อนำไปติดตั้งกับตัวรถบรรทุก และ ปากกาจะยึดอยู่ที่กึ่งกลางของถาดรอง



รูปที่ 3.1 แสดงชิ้นส่วนอุปกรณ์ชิ้นที่ 1

2. เป็นชิ้นส่วนที่ตั้งอยู่กับพื้น ส่วนประกอบของชิ้นส่วน มีลักษณะเป็นกล่องที่ภายในเจาะช่องที่ด้านหน้าของกล่องให้มีขนาดพอให้กระดาม้วนขนาด 2.5 นิ้ว สามารถสอดผ่านจากด้านในกล่องออกมาที่ด้านหน้าของกล่อง ภายในกล่องจะมีส่วนที่เป็นแกน 2 แกน โดยสอดม้วนกระดาม้วนผ่านอีกทางช่องหนึ่ง โดยมีลูกรอกหมุนให้ม้วนกระดาม้วน โดยใช้มอเตอร์ขนาด AC 3 โวลต์ เป็นตัวดันกำลัง เพื่อที่จะขับให้ม้วนกระดาม้วน โดยที่กระดาม้วนวิ่งจากช่องหนึ่งไปม้วนเก็บไว้ยังอีกแกนหนึ่ง



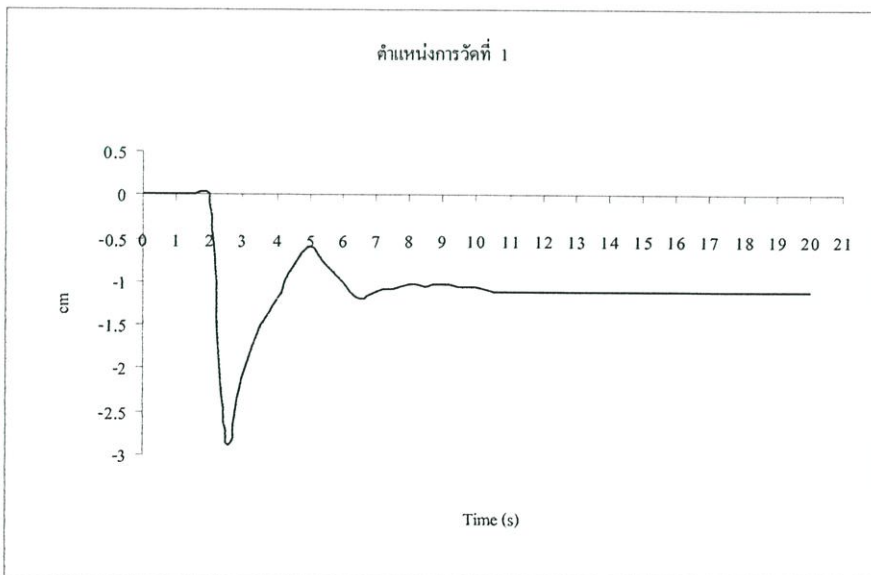
รูปที่ 3.2 แสดงชิ้นส่วนที่ 2 ใช้สำหรับการหมุนลูกกิ้ง

3.2 วิธีการทดลอง

1. นำชิ้นส่วนที่ (1) ไปติดตั้งเข้ากับรถบรรทุกกึ่งพ่วง ในตำแหน่งที่ใกล้กับตัว
หน่วยช่วงหน้าของรถลากจูง ยึดให้แน่น
2. นำชิ้นส่วนที่ (2) ติดตั้งในส่วนนี้จะมิชาตั้ง ตั้งลงในตำแหน่งกึ่งกลางของ ชิ้น
ส่วนแรก โดยให้บริเวณปลายปากกา ตรงในตำแหน่งที่กำหนดไว้ในม้วนกระดาษ
3. เปิดมอเตอร์ให้หมุน เพื่อที่จะดึงกระดาษม้วนจะม้วนให้ผ่านปลายปากกา เพื่อที่
จะให้เห็นการยุบตัวของค่าของสัมประสิทธิ์ตัวหน่วงในขณะเดียวกันนั้น ให้รถบรรทุกได้
ทำการขนถ่ายตู้บรรจุสินค้าลงในขณะนั้นด้วย เมื่อตู้บรรจุสินค้าลงกระทบบที่รถบรรทุกจะ
เกิดการยุบตัวของตัวหน่วง ดังนั้นปากกาก็จะบันทึกการยุบตัวของสัมประสิทธิ์ตัวหน่วง
ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่เกิดขึ้นจริง
4. การทดลองนี้จะทำการติดตั้งบันทึกผล 3 ตำแหน่งของรถบรรทุกกึ่งพ่วง

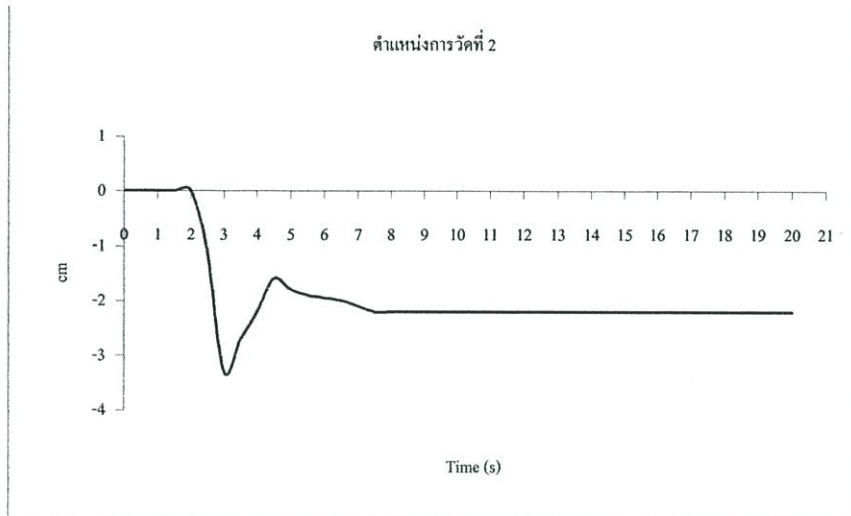
ตำแหน่งที่ 1	ส่วนล้อหน้าของรถบรรทุกลากจูง (ภาคผนวก ค.6)
ตำแหน่งที่ 2	ส่วนแกนเพลาล้อหลังของรถบรรทุกลากจูง (ภาคผนวก ค.7)
ตำแหน่งที่ 3	ส่วนแกนเพลาล้อหลังของรถตัวพ่วง (ภาคผนวก ค.8)

3.2 ผลจากการทดลอง

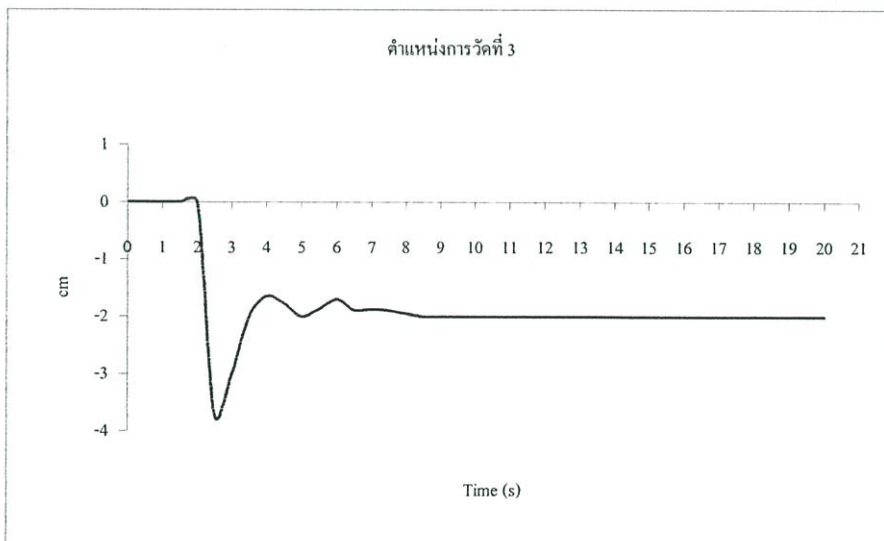


รูปที่ 3.3 จากการทดลองน้ำหนักบรรทุกที่ 25000 กิโลกรัมที่ตำแหน่งที่ 1

เมื่อได้กราฟจากการทดลองก็นำมาใช้ในสมการที่ 3.1 โดยการหาค่า Damping ที่ได้ของรถบรรทุกกึ่งพ่วง



รูปที่ 3.4 จากการทดลองน้ำหนักบรรทุกที่ 25000 กิโลกรัมที่ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 3.5 จากการทดลองน้ำหนักบรรทุกที่ 25000 กิโลกรัมที่ตำแหน่งที่ 3

การตอบสนอง โดยมี Input เป็น Step function โดยสมมุติให้เป็นแบบ 1 แกนอิสระ ค่า
 แฟกเตอร์ตัวหน่วง ζ สามารถหาค่าได้จากการทดลอง โดยการวัดสัญญาณการเคลื่อนที่ของมวล
 สมมุติว่าในการวัดวัดสัญญาณการเคลื่อนที่ของมวล ที่เวลา $t = t_0$ จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น x_0
 และที่เวลา $t = t_1 = t_0 + \tau$ จะมีแอมพลิจูดเป็น x_1 ซึ่งเวลาเวลา
 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วงของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในประเทศไทย

$$x = \frac{F_0}{k} \left[1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t - \psi) \right]$$

การหาค่าอัตราส่วนการหน่วงโดยวิธีส่วนลดเชิงลอการิทึม

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \ln \left[\frac{\frac{F_0}{K} \left(1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t_1}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_1 - \psi) \right)}{\frac{F_0}{K} \left(1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n(t_1+\tau)}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n(t_1+\tau) - \psi) \right)} \right] \quad (3.1)$$

$$\ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) = \ln \left[\frac{\left(1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t_1}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right)}{\left(1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n(t_1+\tau)}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right)} \right]$$

เมื่อ

δ = ส่วนลดเชิงลอการิทึม

x_1 = แอมพลิจูดที่ 1

x_2 = แอมพลิจูดที่ 2

F_0 = แรงเริ่มต้น

K = ค่าคงที่สปริง

ω_n = ความถี่ธรรมชาติ

t_1 = เวลาเริ่มต้น

ζ = แฟกเตอร์ตัวหน่วง

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวหนึ่งของรถบรรทุกกึ่งพ่วง ผลการคำนวณที่น้ำหนักรถบรรทุกพ่วงที่หัวลากที่ 6000 กิโลกรัมและ รถตัวพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวหนึ่งของรถบรรทุกกึ่งพ่วง

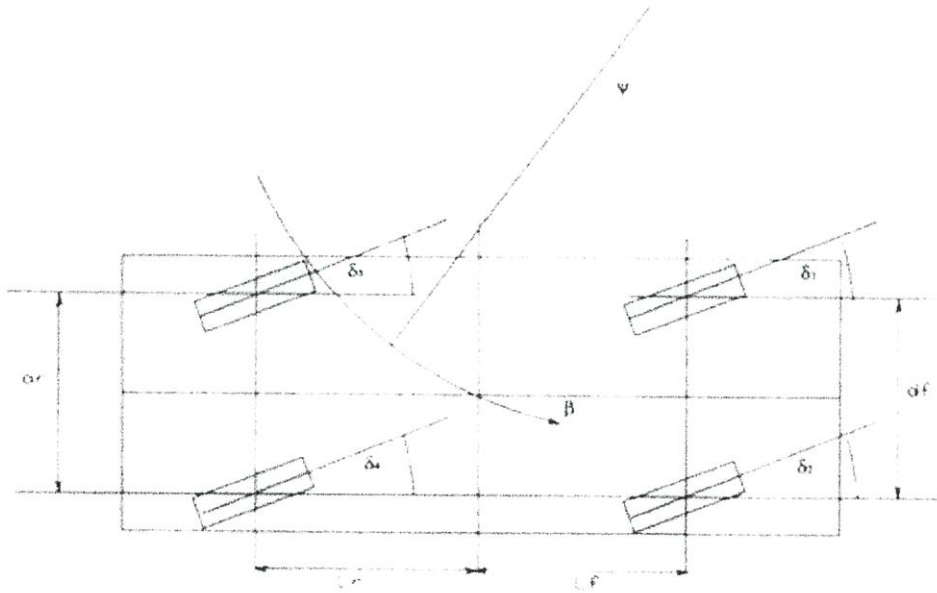
ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ	ω_n	ζ	น้ำหนักลงที่เพลลา	K (kN/m)	สัมประสิทธิ์ตัวหนึ่ง (kNs/m)
1	9.1285	0.410	7163	596889.6	53.655
2	6.3245	0.297	11873	473471.71	389.65
3	5.976	0.615	19000	678538.42	158.52

บทที่ 4

การหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของรถยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ

4.1 รถยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ

การให้ความสบายแก่ผู้ใช้นั้นหมายถึงว่าในขณะที่รถแล่นไปนั้น ตัวรถที่เคลื่อนที่ไปในระดับเดียวและที่นั่งไม่เด็นกระดอนขึ้นลงตลอดทางที่รถแล่นไป แต่ความจริงแล้ว ในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปนั้นจะต้องมีการเร่งและการเบรคเลี้ยวรถ หรือแล่นผ่านถนนขรุขระ ผลจากการทำเช่นนั้นทำให้เคลื่อนที่ในแนวแกนทั้งสามแกนการเคลื่อนที่ คือ ขณะรถยนต์เบรค หรือเร่ง หัวรถจะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลง (pitch) เป็นการเคลื่อนที่ และในขณะที่รถแล่นบนถนนขรุขระทำให้รถส่าย (yaw) เป็นการเหวี่ยงซ้ายขวา เป็นการเคลื่อนที่ไปรอบแนวแกนคิ่งของตัวรถ และในขณะที่รถเลี้ยวจะเกิดแรงเหวี่ยงให้เกิดรถโคลง (roll) เอียงไปมาเป็นเกิดการเคลื่อนที่ไหวรอบแนวแกนขนานตามแกนยาวรถ รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถยนต์ ภายใต้มุมในการเลี้ยวคงที่ ในขณะที่รถยนต์เร่งและเบรคจะใช้เป็นเครื่องมือแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ในส่วนของการเคลื่อนที่ของรถยนต์ และแสดงสมการการเคลื่อนที่ของรถยนต์



รูปที่ 4.1 แสดงภาพรถยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ

4.1.1 การควบคุมการเหวี่ยงของพาหนะ[3]

จากการควบคุมการเหวี่ยงของตัวรถยนต์ ระบบต้องใช้ คอมพิวเตอร์ ในการหาความเสถียรหรือ ไม่เสถียรของพฤติกรรมของรถ ที่แท้จริงมาจากการคำนวณจากสมการด้านล่าง โดยการกำหนด

ตัวแปรการเหวี่ยงของตัวรถยนต์

$$\gamma_T = \left[\frac{1}{1 + AV^2} \right] \frac{V}{L} \delta \quad (4.1)$$

ตัวแปรร่วม

$$A = \frac{m}{2L^2} \frac{K_f L_f - K_r L_r}{K_f K_r} \quad (4.2)$$

เมื่อ

V = ความเร็วรถยนต์ (m/s)

L = ระยะฐานล้อ (m)

M = น้ำหนักรถยนต์ (kg)

L_f = ระยะเพลาล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางตัวรถ (m)

L_r = ระยะเพลาล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางตัวรถ (m)

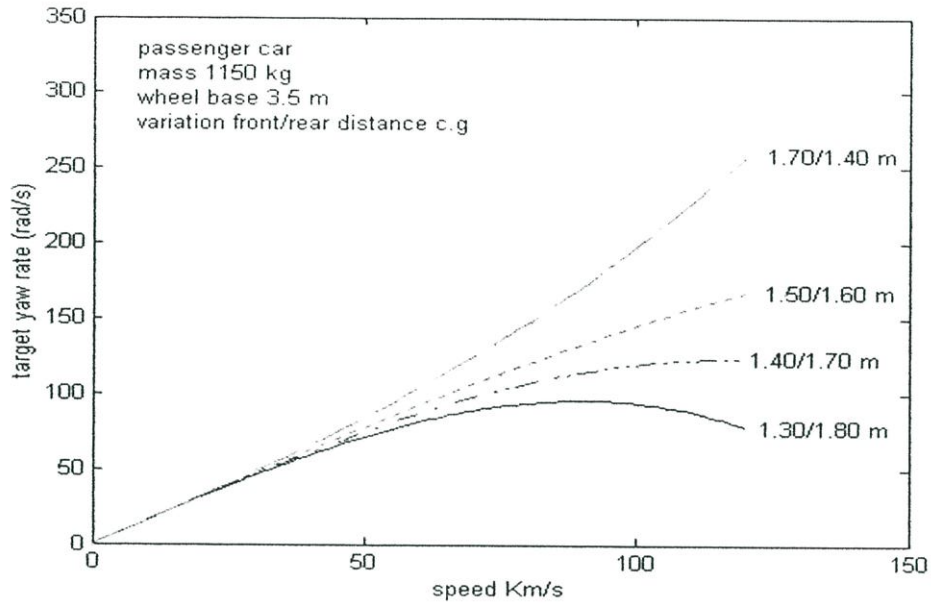
δ = มุมเลี้ยวล้อรถยนต์ (rad)

4.2. ผลการวิเคราะห์รถยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้อ

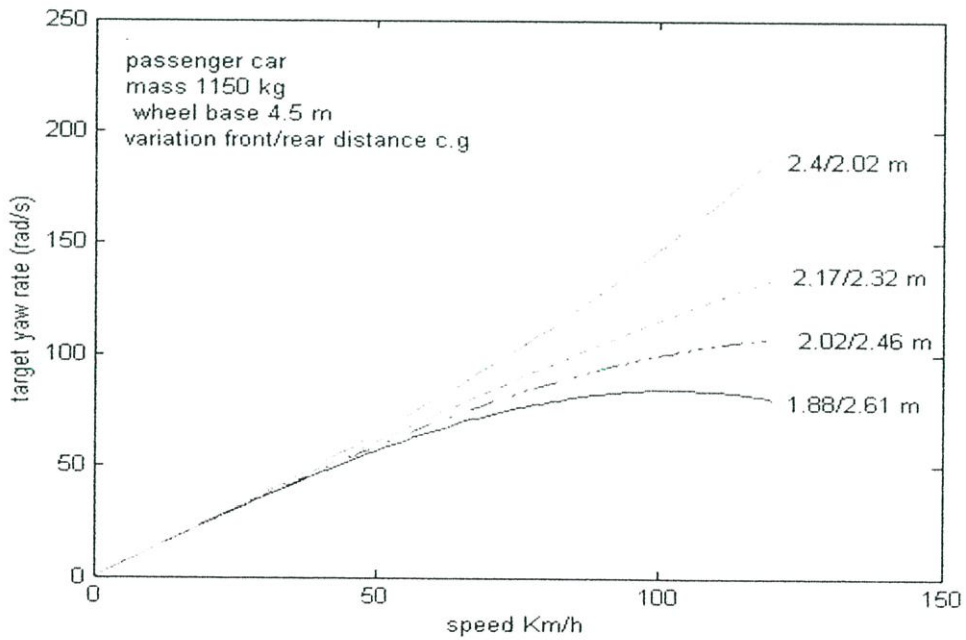
โดยเป็นการจำลองโมเดลทางไดนามิกซ์และผลของการเปลี่ยนแปลงระยะของฐานล้อให้มีช่วงความห่างของแกนเพลาล้อและแกนเพลาล้อหลัง แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยการศึกษาี้จะเป็นศึกษาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการคำนวณ ดังนั้นการคำนวณศึกษาี้เพื่อหาระยะฐานล้อที่เกิดความเสถียรมากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักรถ และระยะฐานล้อ

ตารางที่ 4.1 พิกัดและน้ำหนักรถยนต์ ขับเคลื่อน 4 ล้อ

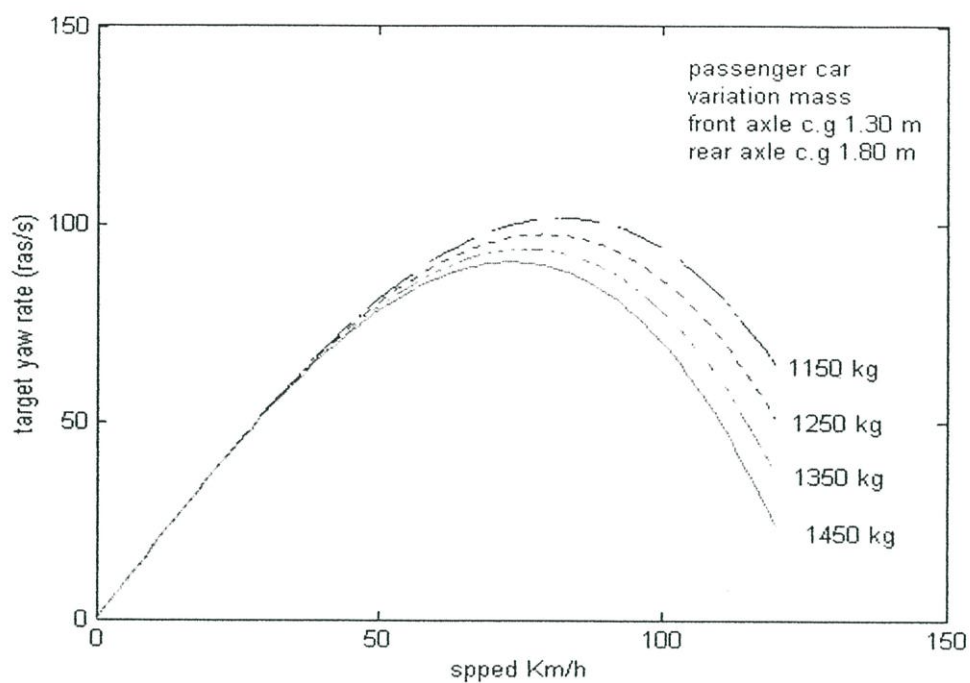
น้ำหนักรถ	1150 , 1250 , 1350 , 1450 กิโลกรัม
ระยะฐานล้อ	2.5 , 3.1 , 3.5 , 4.5 เมตร
ความสูงใต้ท้องรถ	0.4 เมตร
อัตราส่วนน้ำหนักที่ลงเพลา หน้า/หลัง	59 / 41 เปอร์เซนต์



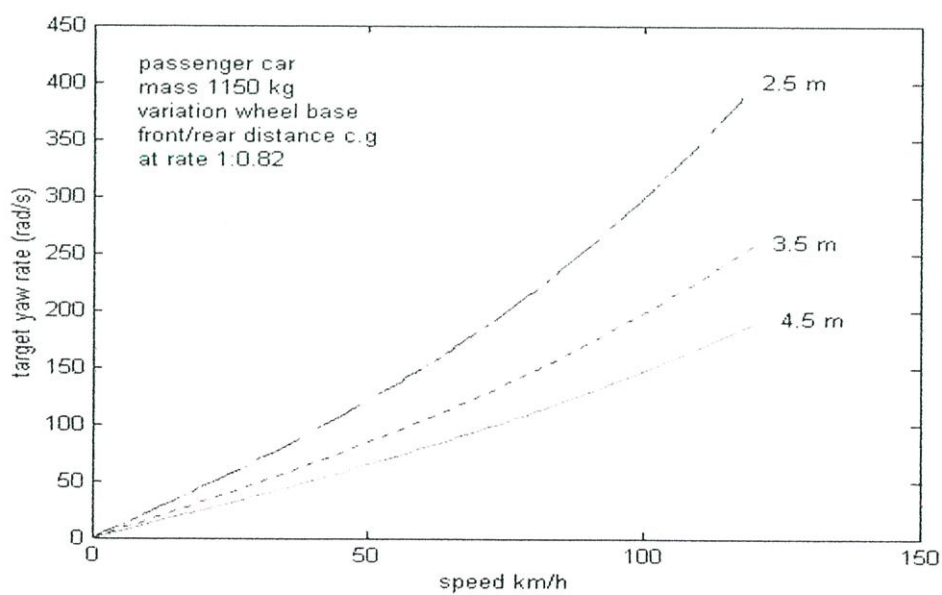
รูปที่ 4.2 แสดงค่า Target yaw ที่ระยะฐานล้อที่ 3.5 เมตร



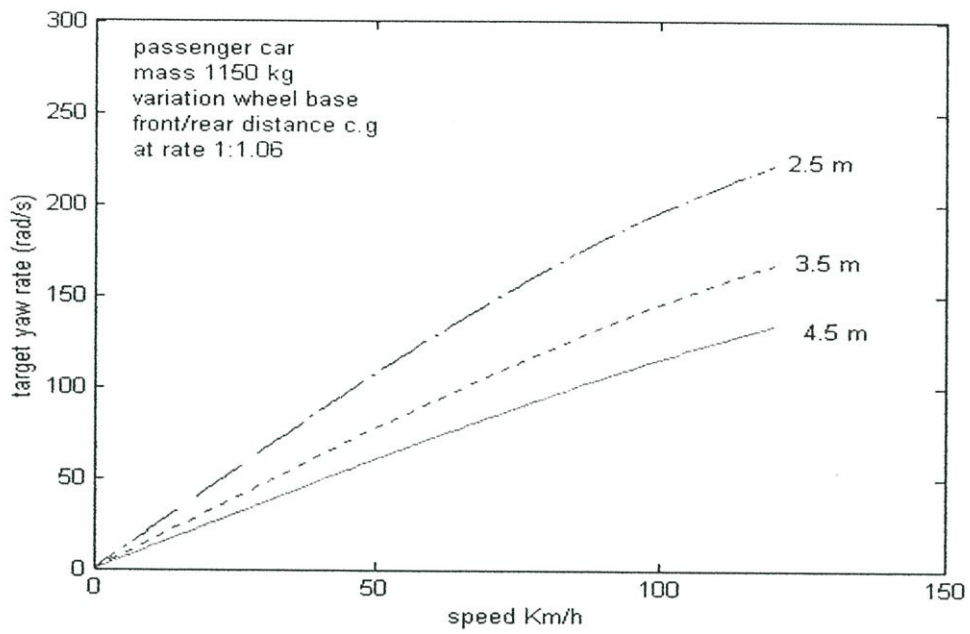
รูปที่ 4.3 แสดงค่า Target yaw ที่ระยะฐานล้อที่ 4.5 เมตร



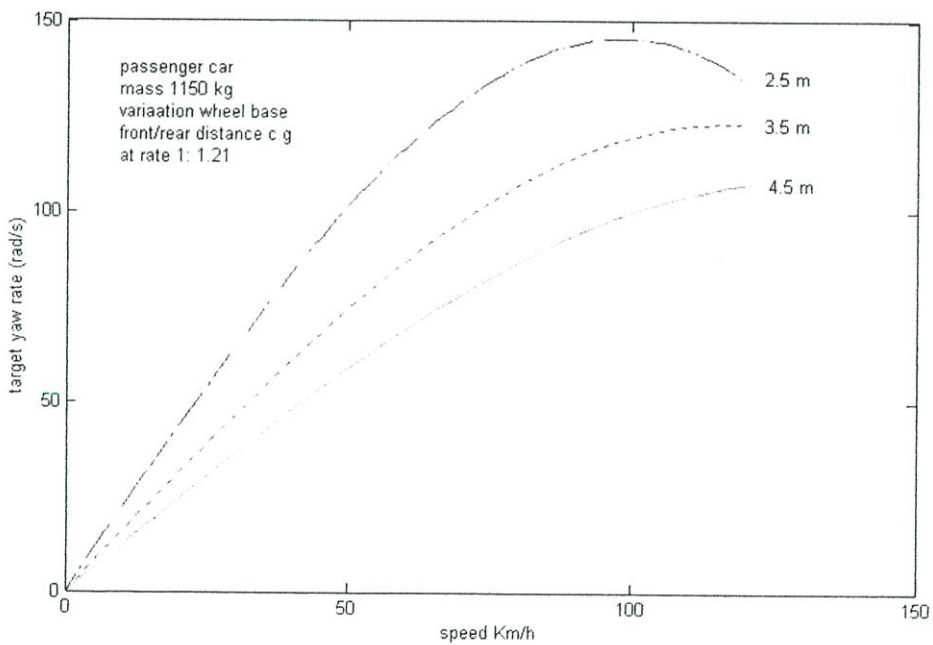
รูปที่ 4.4 เมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ที่ระยะฐานล้อ 3.1 เมตร



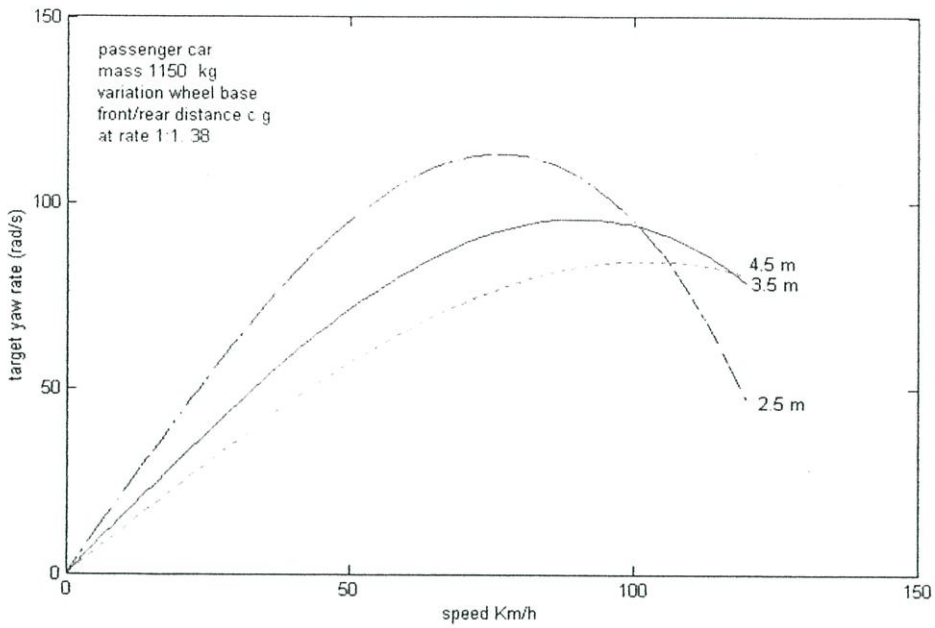
รูปที่ 4.5 เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างล้อหน้าและล้อหลัง อัตราส่วน 1 : 0.82



รูปที่ 4.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างล้อหน้าและล้อหลัง อัตราส่วน 1 : 1.06



รูปที่ 4.7 เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างล้อหน้าและล้อหลัง อัตราส่วน 1 : 1.21



รูปที่ 4.8 เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างล้อหน้าและล้อหลัง อัตราส่วน 1 : 1.38

รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของแกนเพลาล้อหน้ากับแกนเพลาล้อหลัง ถึงจุดศูนย์กลาง โดยค่าการเหวี่ยงที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 1.30/1.80

รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของแกนเพลาล้อหน้ากับแกนเพลาล้อหลัง ถึงจุดศูนย์กลางเมื่อระยะฐานล้อเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น

รูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของรถยนต์ โดยกำหนดให้มีระยะฐานล้อที่ 3.1 เมตร

รูปที่ 4.5 - 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของแกนเพลาล้อหน้ากับแกนเพลาล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางเมื่อเปลี่ยนแปลงเป็นอัตราส่วน

เมื่อการเปลี่ยนแปลงระยะของฐานล้อจะทราบได้ว่า เมื่อระยะฐานล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางตัวรถน้อยกว่าระยะของฐานล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางรถจะสามารถทำให้รถเกิดความเสถียรได้ดีกว่าระยะฐานล้อหลังมากกว่าระยะฐานล้อหน้า ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วคล้ายกับการบรรทุกของนั้นถ้าบรรทุกของให้น้ำหนักลงที่เพลาท้ายมากนั้นจะทำให้จุดศูนย์กลางของตัวรถเคลื่อนมาทางเพลาท้ายทำให้ระยะฐานล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางมีระยะมากกว่าระยะฐานล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางตัวรถ ดังนั้นรถมีความเสถียรน้อยลงทำให้การบังคับรถลำบาก

บทที่ 5

การหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดรถบรรทุกกิ่งพวง

เมื่อการขนส่งระยะไกลมีปริมาณการขนส่งเพิ่มจำนวนการขนส่งมากขึ้น ทำให้รถบรรทุกกิ่งพวงบางคันต้องบรรทุกภาระหนักเกินปริมาณ และ เกินที่กฎหมายได้กำหนดไว้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการหารค่า การเหวี่ยง , การเลี้ยว , การเคลื่อนที่ , มุมที่ตัวรถกับหางพวง ให้ค่าเหล่านั้นเกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อที่จะลดค่าที่เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ และเพื่อที่จะพัฒนาในทางด้านการออกแบบขนาดของตัวรถบรรทุกกิ่งพวง ซึ่งขนาดที่งานวิจัยนี้ได้นำมาพัฒนานั้นจะประกอบได้ด้วย ตัวแปรหลัก คือ

- 1 a คือระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก
- 2 b คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของรถลาก
- 3 d คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพวง
- 4 e คือระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพวง ถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพวง
- 5 h คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพวงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพวง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรถบรรทุกกิ่งพวง โดยการนำวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) มาใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวรถที่ช่วงนำหนักตามที่กฎหมายกำหนดไว้ เพื่อโดยการพิจารณาการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น คือ การเลี้ยว การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรถลากและหางพวงที่สภาวะคงที่ โดยการสมมุติการเคลื่อนที่ของรถกิ่งพวงประเภทหัวลากที่มีการเคลื่อนที่ 3 แกนอิสระและหางพวงที่มีการเคลื่อนที่ 3 แกนอิสระ พิจารณาการความเร็วการสิ้นไกล , ความเร็วการเหวี่ยงและ มุมระหว่างหัวลากและหางพวง ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเคลื่อนที่ของตัวรถบรรทุกกิ่งพวง

- 1) หัวลากพิจารณาที่ 3 แกนอิสระและหางพวงพิจารณาที่ 3 แกนอิสระ ในขณะที่การทำงานจริงนั้นการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกิ่งพวงที่ใช้มีไม่น้อยกว่า 25 แกนอิสระ การคำนวณจึงซับซ้อนมาก และจำเป็นที่จะต้องหาข้อมูลจากการทดลองที่ไม่สามารถหาค่าได้ หรือจำเป็นที่จะต้องการงบประมาณในการทดลองมหาศาล
- 2) สมมุติว่าจุดศูนย์กลางของตัวหางพวงอยู่กึ่งกลางของหางพวง และ ไม่นำความสูงของจุดศูนย์กลางตัวรถถึงพื้นถนนมาพิจารณา

- 3) ไม่คิดผลของสภาพผิวถนน ผิวของยางและแรงค้ำลมยาง , แรงเสียดทานต่างๆ ที่เกิดขึ้น ระบบส่งกำลัง ระบบช่วงล่าง จะไม่นำมาพิจารณา

5.1 สมการรถบรรทุกกึ่งพ่วง

รถบรรทุกกึ่งพ่วงถูกสร้างเป็น 2 ส่วน รถตัวลาก คือ พาหนะที่มี 2 แกนเพลารองรับ สำหรับส่วนที่ปลายด้านหลังเป็นหางพ่วง ส่วนตัวยึด ซึ่งจะเป็อนิสระในการหมุนในลักษณะเหวี่ยงและกระดก ส่วนคอนท้ายของรถพ่วงจะอยู่ที่แกนเพลลาของตัวรถพ่วงนั้น[3] แต่ที่ส่วนที่เกี่ยวข้องนั้นเป็นที่เคลื่อนที่เป็นอิสระ เมื่อระบบที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ที่มีจุดจับยึดเป็นตัวต่อระหว่างรถตัวลากและรถตัวพ่วง ลักษณะนี้จึงได้นำมาประยุกต์เพื่อที่จะหาการเคลื่อนที่ที่ผิดไปจากแนวระดับระหว่างตัวรถลากและตัวรถพ่วง ซึ่งบางครั้งจะเกิดขึ้นในระหว่างการเบรค การวิเคราะห์ประเภทของข้อต่อจับยึดนั้นแสดงในลักษณะสมการสมดุลการเคลื่อนที่ และลักษณะเฉพาะของยางกับการลื่นและผิวถนน ไปจนถึงผลกระทบที่มีต่อการเคลื่อนที่ในเวลาลากจูง ข้อต่อจับยึด การควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวรถบรรทุกพ่วง สามารถที่จะศึกษาได้จากสมการพื้นฐาน เมื่อมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพิ่มมากขึ้น และการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่ นั้นสามารถที่จะพิจารณาได้จากสมการไม่เชิงเส้น และสมการนั้นจะถูกแทนด้วยสัมประสิทธิ์การเสียด ความเสถียรและพฤติกรรมของการเลี้ยวต้องใช้สมการที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะสามารถที่จะได้รับมาจาก การตั้งสมมุติฐานของการเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วคงที่

เพื่อโดยการพิจารณาการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น คือ การเลื้อน การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรถลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่ โดยการสมมุติการเคลื่อนที่ของรถกึ่งพ่วงประเภทหัวลากที่มีการเคลื่อนที่ 3 แกนอิสระและหางพ่วงที่มีการเคลื่อนที่ 3 แกนอิสระ พิจารณาการความเร็วการลื่นไถล ที่จะต้องให้รถบรรทุกเกิดการลื่นไถลน้อย , การเหวี่ยงของตัวรถบรรทุกกึ่งพ่วงและ มุมระหว่างหัวลากและหางพ่วงจะสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่ง เมื่อรถบรรทุกกึ่งพ่วงเกิดมุมระหว่างรถลากจูงกับรถพ่วงมากอาจจะทำให้เกิดการพับตัว ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเคลื่อนที่ของตัวรถบรรทุกกึ่งพ่วง ในขณะที่การทำงานจริงนั้นการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้มีไม่น้อยกว่า 25 แกนอิสระ สมมุติว่าจุดศูนย์กลางของตัวหางพ่วงอยู่กึ่งกลางของหางพ่วง และไม่นำความสูงของจุดศูนย์กลางตัวรถถึงพื้นถนนมาพิจารณาไม่คิดผลของสภาพผิวถนน ผิวของยางและแรงค้ำลมยาง , แรงเสียดทานต่างๆ ที่เกิดขึ้น ระบบส่งกำลัง ระบบช่วงล่าง จะไม่นำมาพิจารณา

- b ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอตตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรอตลาก
 d ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรอตลากถึงจุดยึดตัวรอตพ่วง
 e ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรอตพ่วง ถึงจุดศูนย์กลางของตัวรอตตัวพ่วง
 h ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรอตพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรอตพ่วง

X_1 แรงที่ล้อน้ำรอตลากจูง แกนระนาบ

X_2 แรงที่ล้อหลังรอตลากจูง แกนระนาบ

X_3 แรงที่ล้อรอตพ่วง แกนระนาบ

X แรงที่รอตพ่วงกระทำกับรอตลากจูงในแนวแกนระนาบ

Y แรงที่รอตพ่วงกระทำกับรอตลากจูงในแนวแกนตั้ง

แสดงในรูปที่ 5.1 เป็นการพิจารณาของตัวรอตลากและตัวรอตพ่วงทั้งสองระบบที่เชื่อมต่อกัน โดยการควบคุมที่ จุดจับยึด (Connecting Pin)

สมการของตัวรอตลากจูง [3][7]

$$\begin{aligned} m_1(\dot{U} - V\dot{\theta}) &= -X_1 \cos \delta - X_2 + X \\ m_1(\dot{V} + U\dot{\theta}) &= f_1(\alpha_1) + f_2(\alpha_2) + X_1 \sin \delta - Y \\ I_1 \ddot{\theta} &= af_1(\alpha_1) + bf_2(\alpha_2) + aX_1 \sin \delta + dY \end{aligned} \quad (5.1)$$

มวลของรอตลากจูง m_1 โดยคิดเป็นมวลหนึ่งก้อนและ \dot{U} เป็นความเร็วของรอตลากจูงในแนวแกนระนาบ \dot{V} เป็นความเร็วของรอตลากจูงในแนวแกนตั้งฉากกับแกนระนาบ X_1 เป็นแรงที่ล้อน้ำของรอตลากจูงโดยที่ล้อน้ำจะมุมของการเลี้ยวที่ล้อ X_2 เป็นแรงที่ล้อหลังของรอตลากจูง α_1 มุมการลื่นไถลของยางที่ล้อน้ำ α_2 มุมการลื่นไถลของยางที่ล้อหลังรอตลากจูง X แรงที่รอตพ่วงกระทำกับรอตลากจูงที่จุดจับยึดในแนวแกนระนาบ Y แรงที่รอตพ่วงกระทำกับรอตลากจูงที่จุดจับยึดในแนวตั้งฉากกับแกนระนาบ

สมการตัวรอตพ่วง[3][7]

$$\begin{aligned} m_2(\dot{U}' - V'\dot{\theta}') &= -X_3 - Y \sin \psi - X \cos \psi \\ m_2(\dot{V}' + U'\dot{\theta}') &= f_3(\alpha_3) + Y \cos \psi - X \sin \psi \\ I_2 \ddot{\theta}' &= hf_3(\alpha_3) - e(-Y \cos \psi + X \sin \psi) \end{aligned} \quad (5.2)$$

มวลของรพ่วง m_2 โดยคิดเป็นมวลหนึ่งก้อนและ \dot{u}' เป็นความเร็วของรพ่วงในแนวแกนระนาบ \dot{v}' เป็นความเร็วของรพ่วงในแนวแกนตั้งฉากกับแกนระนาบ X_3 แรงที่ล้อหลังของรพ่วง α_3 มุมการลื่นไถลของยางที่ล้อหลังของรพ่วง X แรงที่รพ่วงกระทำกับรตลากงที่จุดจับยึดในแนวแกนระนาบ Y แรงที่รพ่วงกระทำกับรตลากงที่จุดจับยึดในแนวตั้งฉากกับแกนระนาบ

มุมระหว่างตัวรตลากงกับตัวรพ่วง

$$\psi = \psi_0 + \int_0^1 (\dot{\theta} - \dot{\theta}') dt \quad (5.3)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \dot{\theta} - \dot{\theta}'$$

ทั้งสองส่วนนี้จะถูกกันด้วยจุดยึด (Connecting pin) ดังนั้นความเร็วของหมุด จากรูปที่ 5.1

$$U' = U \cos \psi - (V - d\dot{\theta}) \sin \psi \quad (5.4)$$

$$V' + e\dot{\theta}' = U \sin \psi + (V - d\dot{\theta}) \cos \psi$$

ดังนั้นความเร่งจะเป็น คือแรงที่มากกระทำซึ่งเป็นผลมาจากจุดจับยึด

$$U' = \dot{U} \cos \psi - U(\dot{\theta} - \dot{\theta}') \sin \psi - (\dot{V} - d\dot{\theta}) \sin \psi - (V - d\dot{\theta})(\dot{\theta} - \dot{\theta}') \cos \psi$$

$$V' = \dot{U} \sin \psi + U(\dot{\theta} - \dot{\theta}') \cos \psi + (\dot{V} - d\dot{\theta}) \cos \psi - (V - d\dot{\theta})(\dot{\theta} - \dot{\theta}') \sin \psi - e\dot{\theta}' \quad (5.5)$$

การที่เราแทนที่ u' และ v' เราจะได้อีก 4 สมการที่ตามมา สมการเหล่านี้จะสามารถที่จะอธิบายการเคลื่อนที่ตามปกติของรถบรรทุกพ่วง ซึ่งบางครั้งอาจจะมีเบรค หรือการเร่งความเร็ว ซึ่งในส่วนนี้ อาจจะเกิดการลื่นไถลของล้อเกิดขึ้นได้

$$(m_1 + m_2)\dot{U} - m_2 e \sin \psi \dot{\theta}' = (m_1 + m_2)V\dot{\theta} - m_2 d \dot{\theta}'^2 - m_2 e \sin \psi \dot{\theta}'^2 - X_1 \cos \delta - X_2 - X_3 \cos \psi + f_3(\alpha_3 \sin \psi)$$

$$(m_1 + m_2)\dot{V} - m_2 d \ddot{\theta} - m_2 e \sin \psi \ddot{\theta}' = -(m_1 + m_2)U\dot{\theta} + m_2 e \sin \psi \dot{\theta}'^2 + f_1(\alpha_1) + f_2(\alpha_2) f_3(\alpha_3) \cos \psi + X_1 \sin \delta + X_3 \sin \psi$$

$$- m_2 d \dot{V} + (I_1 + m_2 d^2) \ddot{\theta} + m_2 e d \cos \psi \ddot{\theta}' = m_2 d U r - m_2 e d \sin \psi \ddot{\theta}' + a f_1(\alpha_1) - b f_2(\alpha_2) - d f_3(\alpha_3) \cos \psi + a X_1 \sin \delta - d X_3 \sin \psi$$

$$m_2 e \sin \psi \dot{U} - m_2 \cos \psi \dot{V} + m_2 e d \cos \psi \ddot{\theta}' + (I_1 + m_2 d^2) \ddot{\theta}' - m_2 e \cos \psi U \dot{\theta}' \quad (5.6)$$

$$- m_2 e \cos \psi V \dot{\theta}' + m_2 e d \cos \psi \dot{\theta}'^2 - (h + e) f_3(\alpha_3)$$

แรงกระทำด้านข้างหรือการลื่นไถลด้านข้างเป็นแรงที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสระหว่างถนนและยาง เพื่อให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวรถ โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของยาง รูปปร่างของพื้นที่สัมผัสและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ยางและการยุบตัวและการบิดตัวของตัวรถ สำหรับรูปแบบของยางนั้น ได้ผู้ศึกษาไว้แล้ว โดยจะนำรูปแบบที่ได้จาก Eshlema et.al (1973) ซึ่งเป็นแบบจำลองอยู่ในรูปสมการ [3][7]

$$X_i = \frac{-1.5\mu_i Z_i}{\alpha_{mi}} \left(\alpha_i - \frac{\alpha_i^3}{\alpha_{mi}^2} \right) \quad (5.7)$$

เมื่อ

$$\mu_i = 1 - \left(\frac{0.35Z_i}{30258} \right)$$

$$\alpha_{mi} = 0.1557079 \left(1 + \frac{Z_i}{30258} \right)$$

โดยที่ I คือ หมายเลขของยางแต่ละเส้น และ Z_i คือน้ำหนักที่ตกลงที่ยาง

ในกรณีที่พิจารณาว่าขบวนมีสภาพคงตัวไม่มีการบิดเบี้ยว มุมที่ขบวนเกิดการเคลื่อนสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบเรขาคณิตและการเคลื่อนที่มวลรวมของรถบรรทุกทั้งขบวน โดยที่ α_1 เป็นมุมการลื่นไถลที่ล้อหน้ารถลากจูง α_2 เป็นมุมการลื่นไถลที่ล้อหลังรถลากจูง α_3 เป็นมุมการลื่นไถลที่ล้อหลังรถพ่วง [7]

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{V + a\dot{\theta}}{U} - \delta \\ \alpha_2 &= \frac{V - b\dot{\theta}}{U} \\ \alpha_3 &= \frac{V' - h\dot{\theta}'}{U'} = \frac{U \sin \psi + (V - d\dot{\theta}) \cos \psi - (h - e)\dot{\theta}'}{U \cos \psi - (V - d\dot{\theta}) \sin \psi}\end{aligned}\tag{5.7a}$$

5.1.1 พาหนะเคลื่อนที่ความเร็วเป็นเชิงเส้น[3]

สำหรับการเคลื่อนที่ของรถที่ความเร็วคงที่ เคลื่อนที่เป็น $\cos \psi = 1, \sin \psi = \psi$ โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ U ที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก และคั้งนั้นในเทอม $U\theta$, U เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของ θ ที่ สำหรับสถานะเริ่ม

$$\psi = \int_0^1 (\dot{\theta} - \dot{\theta}') dt$$

$$\theta' = \dot{\theta} - \dot{\psi}$$

$$\dot{\theta}' = \ddot{\theta} - \ddot{\psi}$$

ประยุกต์สมการที่ (5.5), (5.7a)

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{V + a\dot{\theta}}{U} - \delta \\ \alpha_2 &= \frac{V - b\dot{\theta}}{U} \\ \alpha_3 &= \psi + \frac{V - (d + e + h)\dot{\theta} + (h + e)\psi}{U}\end{aligned}\quad (5.7b)$$

และจัดอยู่ในรูป Linearized

$$\begin{bmatrix} \frac{(m_1 + m_2)D}{C_1 + C_2 + C_3} & -\frac{m_2(d+e)D + (m_1 + m_2)U}{aC_1 - bC_2 - (d+e+h)C_3} & m_2eD^2 - \frac{(h+e)}{U}C_3D \\ -m_2dD & \frac{\{I_1 + m_2d(d+e)\}D - m_2dU}{a^2C_1 + b^2C_2 + (d+e+h)C_3} & -C_3 \\ -\left(\frac{aC_1 - bC_2 - dC_3}{U}\right) & \frac{m_2edD^2 + \frac{(h+e)}{U}C_3D}{+dC_3} & \\ -m_2eD + \frac{(h+e)}{U}C_3 & \frac{\{I_2 + m_2e(d+e)\}D - m_2eU}{(h+e)(d+e+h)C_3} & -\{I_2 + m_2e^2\}D^2 \\ & & + (h+e)C_3 + \frac{(h+e)^2}{U}C_3D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_1 \\ -aC_1 \\ 0 \end{bmatrix} \delta$$

ที่สภาวะคงที่ ของ V , θ , และ ψ เป็น ศูนย์

$$\begin{bmatrix} \frac{-C_1 + C_2 + C_3}{U} & \frac{(m_1 + m_2)U}{aC_1 - bC_2 - (d+e+h)C_3} & -C_3 \\ \frac{aC_1 - bC_2 - dC_3}{U} & \frac{-m_2dU}{a^2C_1 + b^2C_2 - d(d+e+h)C_3} & dC_3 \\ \frac{h+e}{U}C_3 & \frac{-m_2eU}{(h+e)(d+e+h)C_3} & (h+e)C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1 \\ -aC_1 \\ 0 \end{bmatrix} \delta$$

จากสมการที่สภาวะคงที่แล้วอาจจะเพิ่มการเลี้ยวของล้อเข้าไป ในกรณีที่มีมุมการเลี้ยวคงที่ และ δ เป็นมุมในการเลี้ยวที่ล้อหน้า

การลื่นไถลที่ความเร็วคงที่

$$V/\delta = \frac{UC_1 \{ [m_1 a l_2 + m_2 h(a+d)] U^2 + I_1 I_2 b C_2 \}}{U^2 \{ m_1 I_2 (a C_1 - b C_2) + m_2 h [(a C_1 - b C_2) + d(C_1 + C_2)] \} + I_1^2 I_2 C_1 C_2} \quad (5.8)$$

การเหวี่ยงที่ความเร็วคงที่

$$\theta/\delta = \frac{UC_1 C_2 I_1 I_2}{U^2 \{ m_1 I_2 (a C_1 - b C_2) + m_2 h [(a C_1 - b C_2) + d(C_1 + C_2)] \} + I_1^2 I_2 C_1 C_2} \quad (5.9)$$

มุมที่ตัวรถลากกับตัวรถพ่วง

$$\psi/\delta = \frac{U^2 C_1 C_2 m_2 e l_1}{C_3 U^2 \{ m_1 I_2 (a C_1 - b C_2) + m_2 h [(a C_1 - b C_2) + d(C_1 + C_2)] \} + I_1^2 I_2 C_1 C_2 C_3} \quad (5.10)$$

การทดลองนี้เป็นการหา ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงและค่าความถี่ธรรมชาติ เพื่อที่จะนำไปสู่การหาค่า สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในประเทศจริง โดยผู้ทำได้จัดทำชุดทดลองขึ้นเพื่อที่จะทำการทดลอง โดยการวัดการยุบตัวของตัวรถ เมื่อมีการรับภาระจากการยุบตัวของระบบรองรับที่เกิดขึ้นจริง

5.1.2 การวิเคราะห์ทางพลวัตของรถบรรทุกกึ่งพ่วง

จากสมการที่ 5.6 เป็นสมการไม่เชิงเส้น ใช้วิธี Linearized แก่สมการเป็นเชิงเส้น แล้วจัดเป็นรูปเมตริกซ์ แล้ว Inveese laplace เพื่อที่จะหาชุดสมการ เพื่อนำไปสู่การหา ชุดสมการของการลื่นไถล , การเหวี่ยง , มุมระหว่างรถลากจูงกับรถตัวพ่วง

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ V \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \delta$$

$$\left[\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & B_1 \\ 0 & C_{22} & C_{23} & C_{24} & Z_2 \\ 0 & 0 & D_{33} & D_{34} & Q_3 \\ 0 & 0 & 0 & E_{44} & P_4 \end{array} \right]$$

$$\psi = \frac{(Z_4C_{22} - Z_2C_{42})(C_{33}C_{22} - C_{23}C_{32}) - (Z_3C_{22} - Z_2C_3)(C_{43}C_{22} - C_{23}C_{42})}{(C_{44}C_{22} - C_{24}C_{42})(C_{33}C_{22} - C_{23}C_{32}) - (C_{34}C_{22} - C_{24}C_{32})(C_{43}C_{22} - C_{23}C_{42})}$$

$$\theta = \frac{E_{44}Q_3 - D_{34}P_4}{D_{33}E_{44}}$$

$$v = \frac{(Z_2E_{44}D_{33}) - (C_{24}P_4D_{33}) - (C_{23}E_{44}Q_3) - (C_{23}D_{34}P_4)}{D_{33}E_{44}C_{22}}$$

$$U = B_1D_{33}E_{44}C_{22} - a_{14}P_4D_{33}C_{22} - a_{13}(E_{44}Q_3 - D_{34}P_4)C_{22} - a_{12}(Z_2E_{44}D_{33} - C_{24}P_4D_{33} - C_{23}E_{44}Q_3 - C_{23}D_{34}P_4)$$

แทนค่า a_{11} ในสมการ (ภาคผนวก ง.) ที่ได้มาจาก แยก PARTIAL-FRACTION แล้วใช้วิธี Laplace และ Inverse Laplace

$$V = 2.24e^{-2.67154t} - 9.0166e^{-0.633t} + 4.5435e^{-0.4876t} \cos 0.42t + 3.2342e^{-0.1938t} \cos 1.73t - 11.25e^{-0.48t} \sin 0.42t + 6.0031e^{-0.193875t} \sin 1.73t$$

$$\theta = 0.0007272 - 17.818e^{-2.67154t} + 169.525e^{-0.633t} - 165.052e^{-0.4876t} \cos 0.41957t + 14.337e^{-0.1938t} \cos 0.5142t + 43.3155e^{-0.4876t} \sin 0.41957t - 27.984e^{-0.93875t} \sin 0.5142t$$

$$\psi = -0.55678e^{-2.669t} - 0.0366e^{-0.0216t} + 0.9376e^{-0.48t} - 0.3443e^{-0.2325t} [\sin 0.34t + \cos 0.34t]$$

5.2 การวิเคราะห์หาเป้าหมาย

5.2.1 สมการเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของรถบรรทุกพ่วงที่มีการเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น และหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของขนาดระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วง และระยะจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเคลื่อนที่ให้มีค่า การเคลื่อน การเหวี่ยงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างตัวลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่ หาค่าที่เหมาะสมที่สุด

สมการเป้าหมายของรถบรรทุกพ่วงที่มี คือ การเคลื่อน การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างตัวลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่ เพื่อโดยการพิจารณาการเคลื่อนที่เกิดขึ้น คือ การเคลื่อน การเหวี่ยงที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรถลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่ โดยการสมมุติการเคลื่อนที่ของรถกึ่งพ่วงประเภทหัวลากที่มีการเคลื่อนที่ 3 แกนอิสระและหางพ่วงที่

มีการเคลื่อนที่ 3 แกนอิสระ พิจารณาการความเร็วการลื่นไถล , ความเร็วการเหวี่ยงและ มุมระหว่างหัวลากและหางพ่วง ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเคลื่อนที่ของตัวรถบรรทุกกึ่งพ่วง

- 1) หัวลากพิจารณาที่ 3 แกนอิสระและหางพ่วงพิจารณาที่ 3 แกนอิสระ ในขณะที่การทำงานจริงนั้นการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้มีไม่น้อยกว่า 25 แกนอิสระ การคำนวณจึงซับซ้อนมาก และจำเป็นที่จะต้องหาข้อมูลจากการทดลองที่ไม่สามารถหาค่าได้ หรือจำเป็นที่จะต้องการงบประมาณในการทดลองมหาศาล
- 2) สมมุติว่าจุดศูนย์กลางของตัวหางพ่วงอยู่ที่กึ่งกลางของหางพ่วง และ ไม่นำความสูงของจุดศูนย์กลางตัวรถถึงพื้นถนนมาพิจารณา
- 3) ไม่คิดผลของสภาพผิวถนน ผิวของยางและแรงดันลมยาง , แรงเสียดทานต่างๆ ที่เกิดขึ้น ระบบส่งกำลัง ระบบช่วงล่าง จะไม่นำมาพิจารณา

$$\text{Min } Y = W_1 * R_1 + W_2 * R_2 + W_3 * R_3$$

$$R_1 = V / \delta = \frac{UC_1 \{ [m_1 a l_2 + m_2 h(a + d)] U^2 + l_1 l_2 b C_2 \}}{U^2 \{ m_1 l_2 (a C_1 - b C_2) + m_2 h [(a C_1 - b C_2) + d(C_1 + C_2)] \} + l_1^2 l_2 C_1 C_2}$$

$$R_2 = \theta / \delta = \frac{UC_1 C_2 l_1 l_2}{U^2 \{ m_1 l_2 (a C_1 - b C_2) + m_2 h [(a C_1 - b C_2) + d(C_1 + C_2)] \} + l_1^2 l_2 C_1 C_2}$$

$$R_3 = \psi / \delta = \frac{U^2 C_1 C_2 m_2 e l_1}{C_3 U^2 \{ m_1 l_2 (a C_1 - b C_2) + m_2 h [(a C_1 - b C_2) + d(C_1 + C_2)] \} + l_1^2 l_2 C_1 C_2 C_3}$$

เมื่อ

U ความเร็ว (m/s)

M_1 มวลของตัวรถลาก 6000 kg

M_2 มวลของตัวรถพ่วง 19000 kg

δ มุมการเลี้ยวของล้อหน้า

θ Yawing Velocity

ψ มุมระหว่างรถตัวลากงกับรถตัวพ่วง

L_1 ระยะ a + b

L_2 ระยะ e + h

I_1 โมเมนต์ความเฉื่อยของรถตัวลาก (2.68 x 10⁴ kg.m²)

I_2 โมเมนต์ความเฉื่อยของรถพ่วง (3.27 x 10⁵ kg.m²)

C_1 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน้าของตัวรถลาก 53.655 (kNs/m)

C_2 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน้าของตัวรถลาก 389.650(kNs/m)

C_3 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน้าของแกนเพลลาของตัวรถพ่วง 158.520(kNs/m)

a ระยะห่างระหว่าง แกนเพลลาหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก 2.43(m)

b ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลลาหลังของตัวรถลาก 2.05(m)

d ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง 0.623(m)

e ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วง ถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง 6.50(m)

h ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลลาหลังของตัวรถพ่วง 3.50(m)

W_1 ค่า Weight factor ของค่าการเลื่อน ที่ความเร็วคงที่

W_2 ค่า Weight factor ของค่าการเหวี่ยง ที่ความเร็วคงที่

W_3 ค่า Weight factor ของค่ามุมที่ตัวลากกับตัวพ่วง

5.2.2 สมการเงื่อนไขบังคับหรือสมการขอบเขต(Constraints Equation)

การออกแบบขนาดต่างๆ และระยะความห่าง และในการออกแบบนี้จะมีตัวแปร ในส่วนของตัวรถลาก I_1 คือ ระยะห่าง a+b และในส่วนของตัวรถพ่วง I_2 คือ ระยะห่าง e+h ที่เกิดขึ้นภายใต้ขอบเขตและสมการเงื่อนไข ดังนี้

$$0 \leq I_1 \leq 8.0 \quad \text{m}$$

$$0 \leq I_2 \leq 12.5 \quad \text{m}$$

5.2.3 วิธีการที่ใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของขนาดรถบรรทุกพ่วง

การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดได้เลือกใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด วิธีทำ คือวิธีการค้นหาทุกค่า(Exhaustive Search)

ขั้นตอนแรกทำการใส่ค่าเริ่มต้น คือค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของขนาดของตัวรถพ่วงหลัง จากนั้นใช้วิธีการค้นหาทุกค่า(Exhaustive Search) ซึ่งการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนนี้ จะเป็นการค้นหา

5.2.4 วิธีการค้นหาทุกค่า(Exhaustive Search)

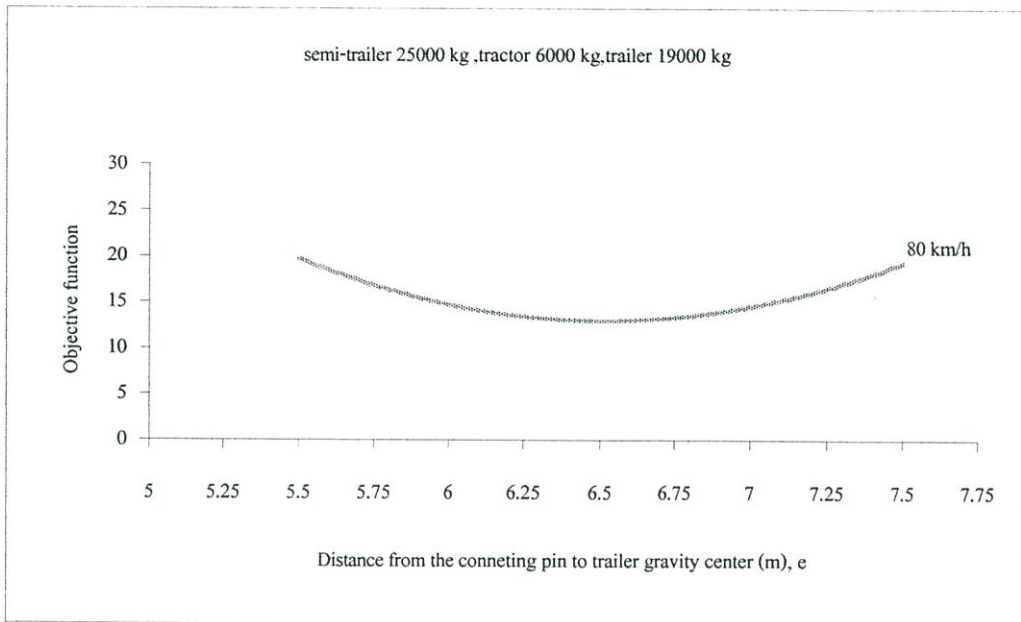
วิธีการค้นหาทุกค่าเป็นวิธีที่สามารถใช้กับปัญหาที่ทราบขอบเขตที่แน่นอนของตัวแปร ในการออกแบบ โดยทำการค้นหาที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรในการออกแบบ เริ่มต้นค้นหา จากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้หรือค่าขอบเขตต่ำที่สุด แล้วค่อยขยับค่าขึ้นหรือเพิ่มค่าขึ้นจนถึงค่ามากที่สุดของตัวแปรในการออกแบบเป็นไปได้อีกหรือค่าขอบเขตสูงสุด ในการขยับหรือการเพิ่มค่าขึ้นของตัวแปรในการออกแบบจะขึ้นอยู่กับว่าจะค้นหาแบบละเอียดหรือหยาบ ถ้าต้องการให้ละเอียดก็จะเพิ่มค่าขึ้นทีละน้อย ๆ จะทำให้การคำนวณมีความละเอียดยิ่งขึ้นแต่จะใช้เวลาในการคำนวณนาน หรือถ้าต้องการค้นหาแบบหยาบก็จะเพิ่มค่าขึ้นทีละมากผลการคำนวณจะมีค่าผิดพลาดมากแต่จะใช้เวลาในการค้นหาน้อยหลังจากคำนวณแล้วจะได้จำนวนค่าสมการเป้าหมายออกมาที่เกิดจากการเพิ่มค่าตัวแปรในการออกแบบทุก ๆ ตัว หลังจากนั้นทำการเลือกค่าสมการเป้าหมายว่าค่าตัวแปรในการออกแบบค่าไหนที่ทำให้ได้ค่าสมการเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุดตามที่ต้องการ ในการศึกษาครั้งนี้เป็นปัญหาที่หาค่าต่ำสุด

5.3 ผลการวิเคราะห์รถบรรทุกกึ่งพ่วง

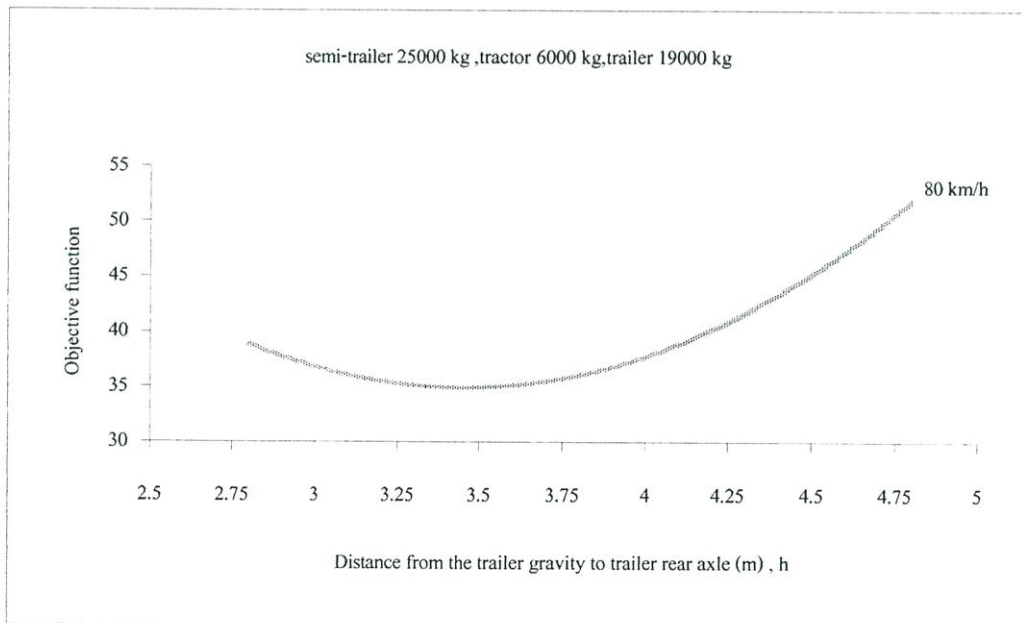
การหาค่าที่เหมาะสมของรถบรรทุกกึ่งพ่วงในด้านของขนาดความยาวของระยะฐานล้อ และตำแหน่งของตัวจับยึด โดยจะแบ่งออกเป็น

- a หมายถึง ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก ที่ 2.43 เมตร
 - b หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก ที่ 2.05 เมตร
 - d หมายถึงระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วงที่ 0.623 เมตร
 - e หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วง ถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง
 - h หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง
- โดยนำหน้ากรรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่นำมาจากการทดลองที่นำมาคำนวณ 25000 , 26500 , 32000 , 38000 , 40000 , 43000 กิโลกรัมโดยการพิจารณาที่ ความเร็ว 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง เมื่อกำหนด $w_1 = 0.1$, $w_2 = 0.2$, $w_3 = 0.1$ การผลการคำนวณดังภาพ

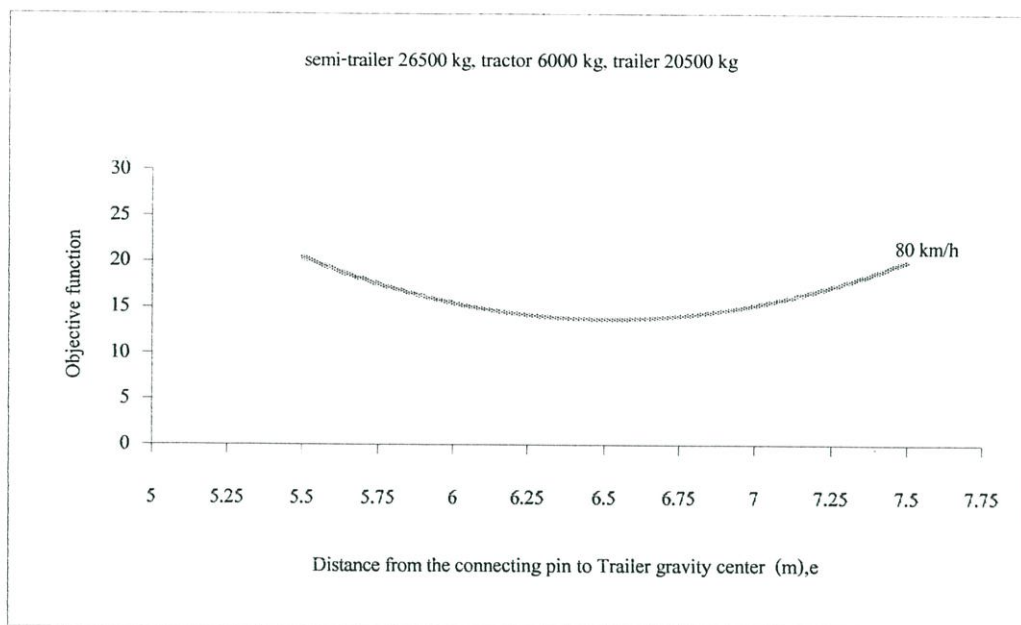
5.3.1 ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วง และ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง แต่ละน้ำหนัก



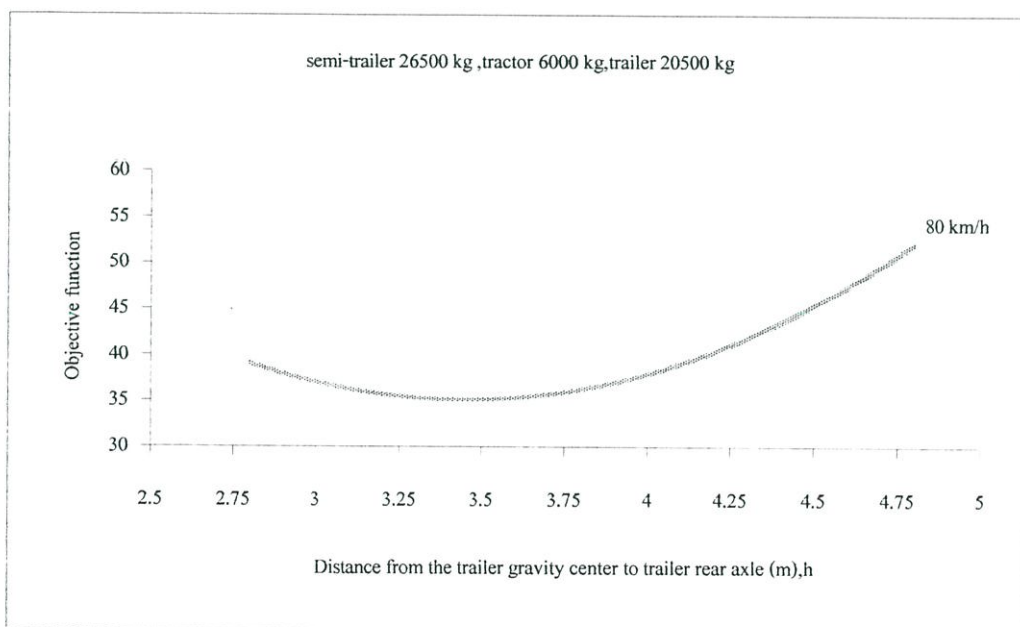
รูปที่ 5.2 แสดงระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วง ที่ 25000 กิโลกรัม



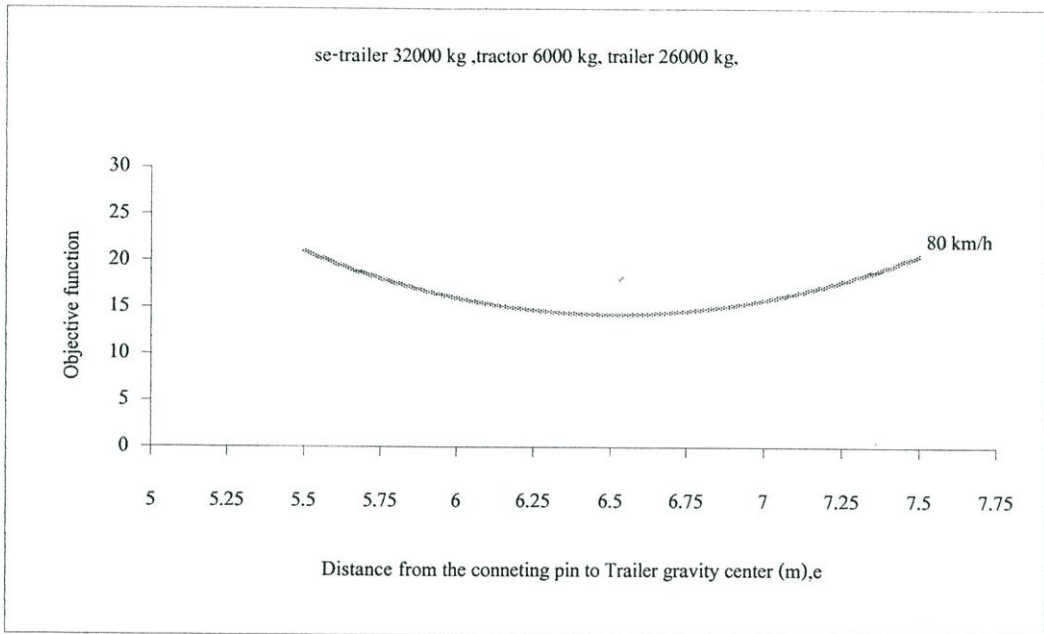
รูปที่ 5.3 แสดงระยะจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง ที่ 25000 กิโลกรัม



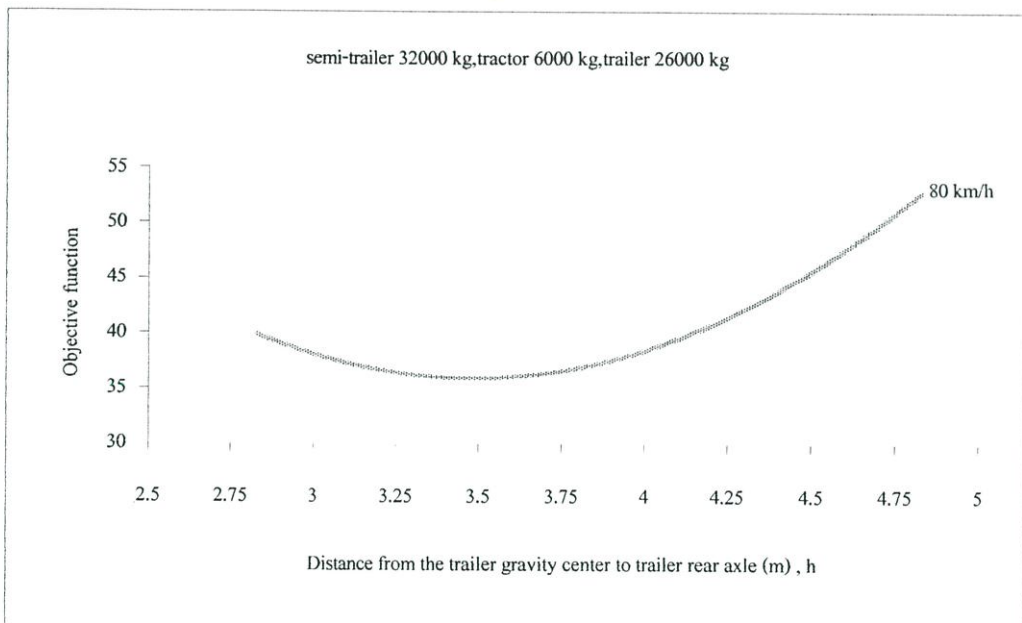
รูปที่ 5.4 แสดงระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วง ที่ 26500 กิโลกรัม



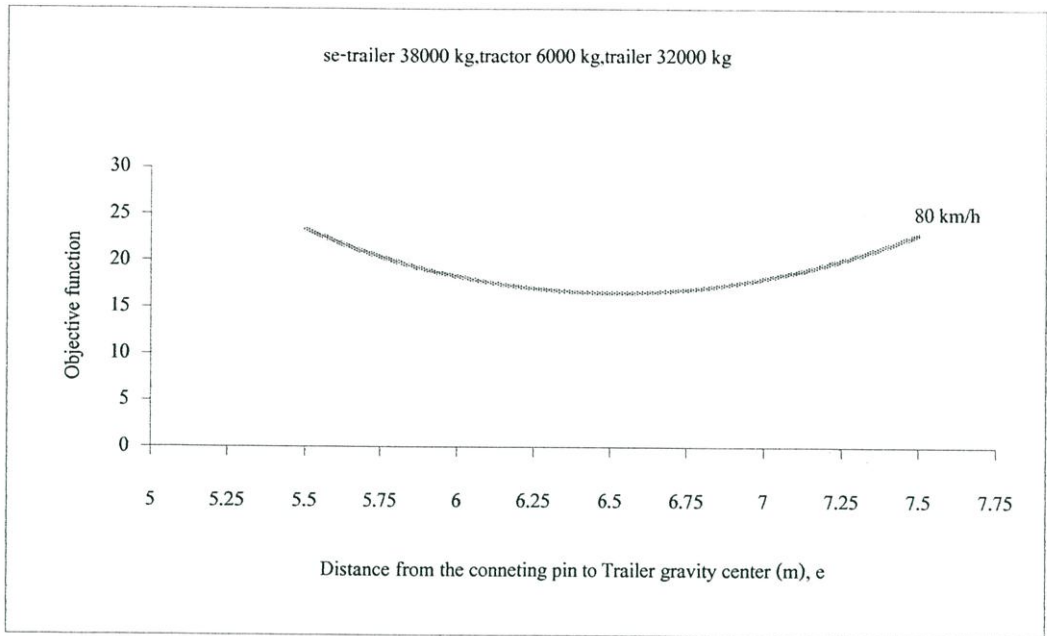
รูปที่ 5.5 แสดงระยะจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง ที่ 26500 กิโลกรัม



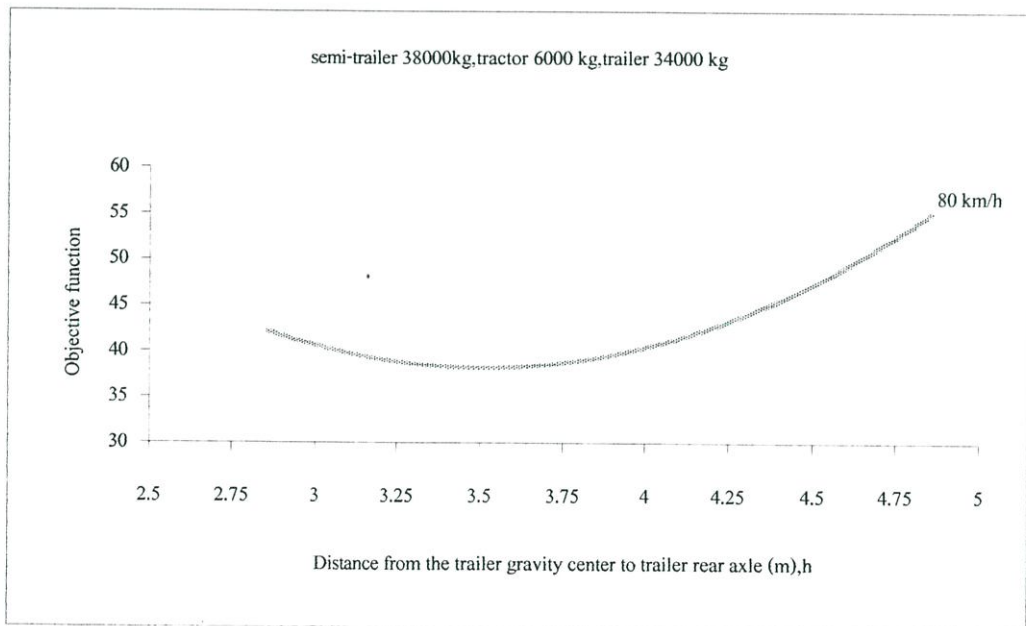
รูปที่ 5.6 แสดงระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วง ที่ 32000 กิโลกรัม



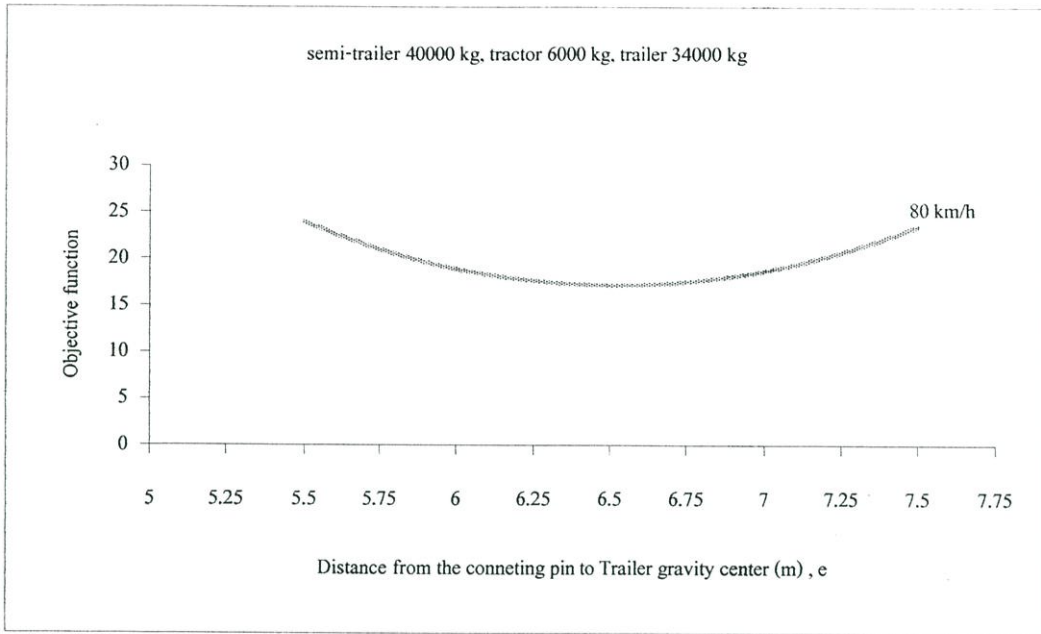
รูปที่ 5.7 แสดงระยะจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงเพลาทำขรถพ่วง ที่ 32000 กิโลกรัม



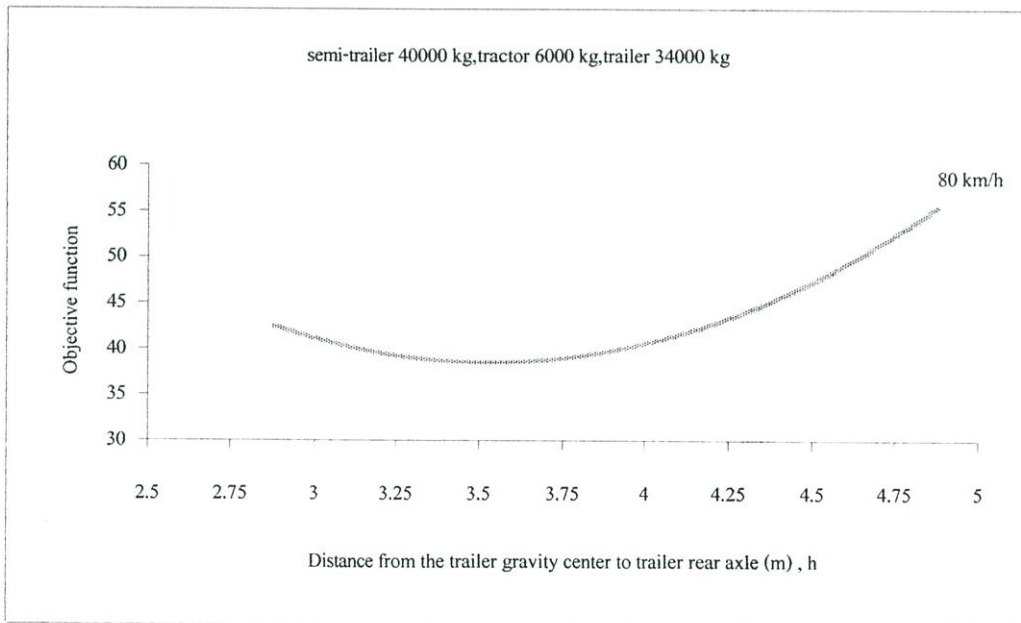
รูปที่ 5.8 แสดงระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วง ที่ 38000 กิโลกรัม



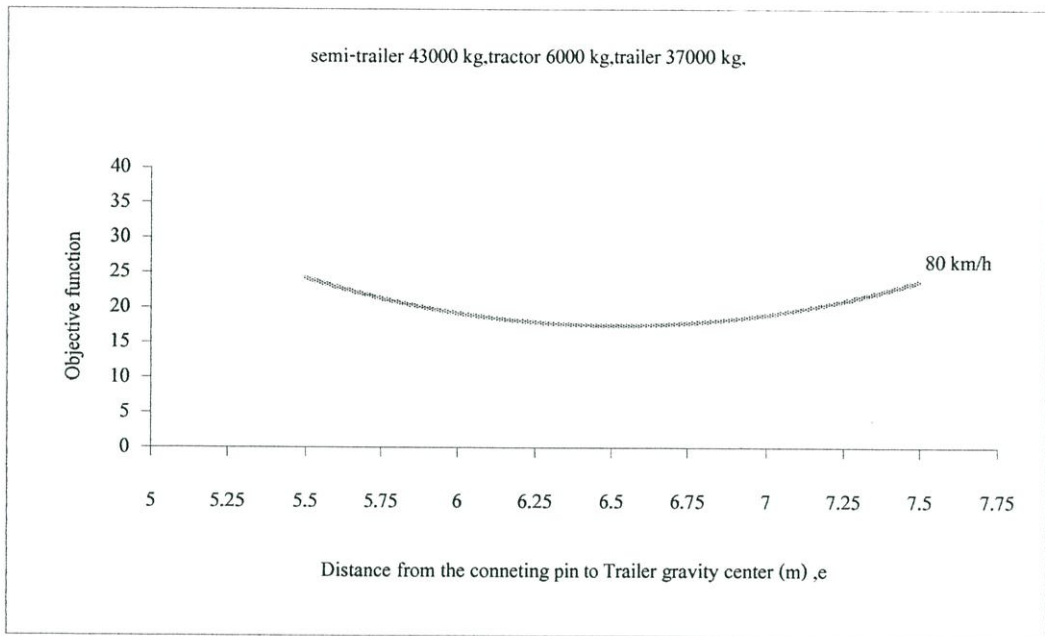
รูปที่ 5.9 แสดงระยะจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง ที่ 38000 กิโลกรัม



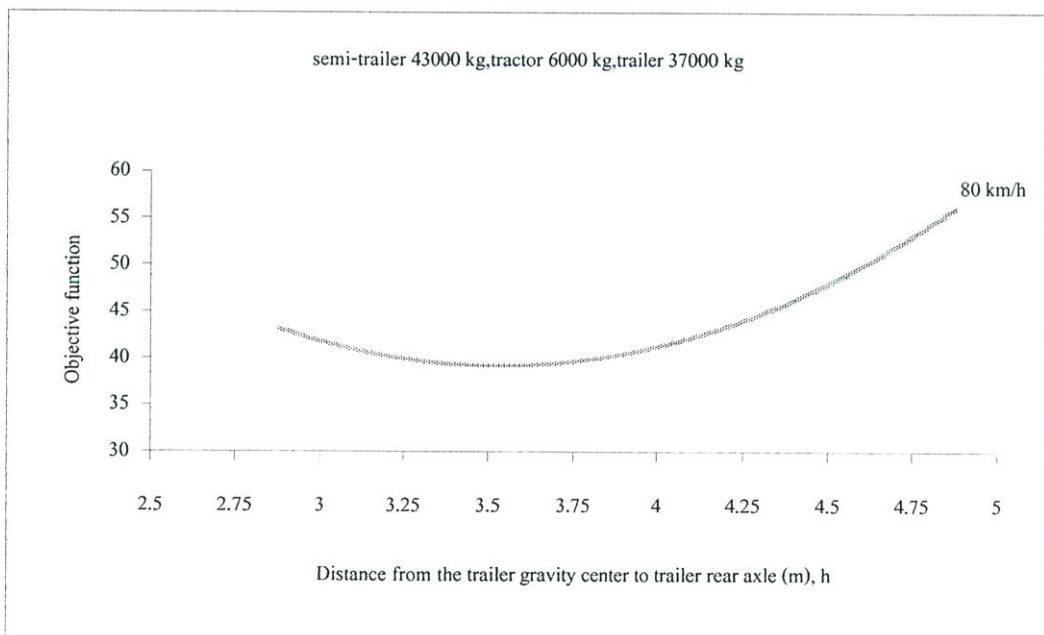
รูปที่ 5.10 แสดงระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วง ที่ 40000 กิโลกรัม



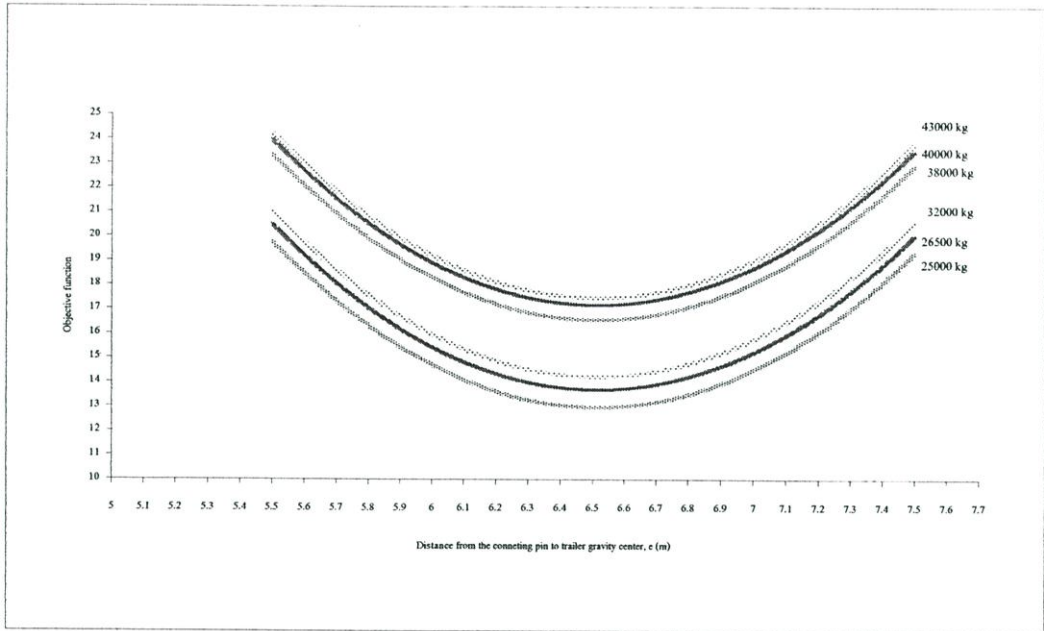
รูปที่ 5.11 แสดงระยะศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงแกนเพลลาทำยรถตัวพ่วง ที่ 40000 กิโลกรัม



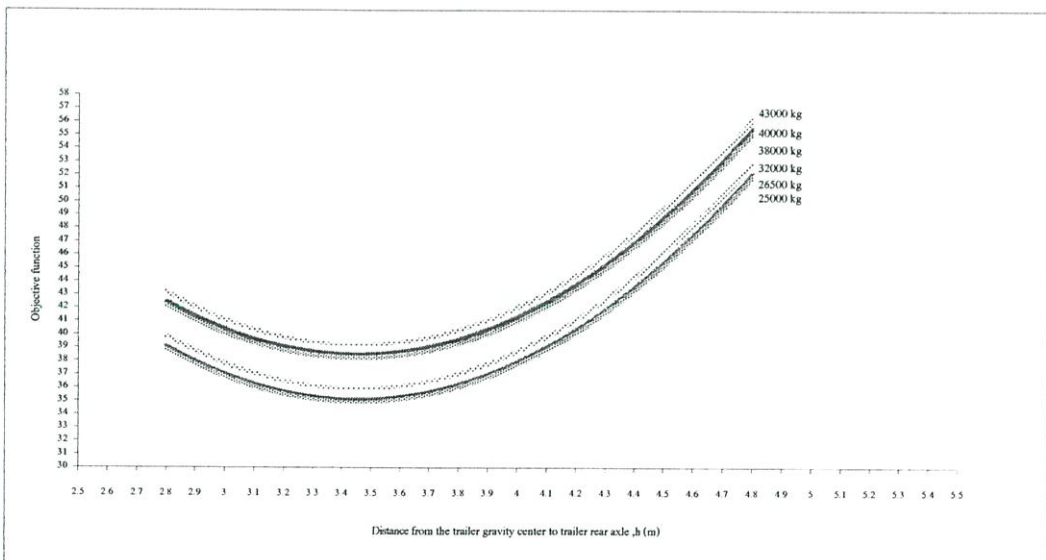
รูปที่ 5.12 แสดงระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วง ที่ 43000 กิโลกรัม



รูปที่ 5.13 แสดงระยะศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงแกนเพลลาท้ายรถตัวพ่วง ที่ 43000 กิโลกรัม



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก



รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบระยะศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

รูปที่ 5.2 - 5.3 น้ำหนัก 25000 กิโลกรัม แสดงตำแหน่งของระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงจะได้ค่าประมาณที่ 6.5 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 14 และ ระยะระยะจุดศูนย์กลางรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 3.5 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 35

รูปที่ 5.4 - 5.5 น้ำหนัก 26500 กิโลกรัม แสดงตำแหน่งของระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงจะได้ค่าประมาณที่ 6.54 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 14 และ ระยะระยะจุดศูนย์กลางรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 3.5 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 35

รูปที่ 5.6 - 5.7 น้ำหนัก 32000 กิโลกรัม แสดงตำแหน่งของระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงจะได้ค่าประมาณที่ 6.52 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 15 และ ระยะระยะจุดศูนย์กลางรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 3.5 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 36

รูปที่ 5.8 - 5.9 น้ำหนัก 38000 กิโลกรัม แสดงตำแหน่งของระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงจะได้ค่าประมาณที่ 6.54 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 17 และ ระยะระยะจุดศูนย์กลางรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 3.55 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 38

รูปที่ 5.10 - 5.11 น้ำหนัก 40000 กิโลกรัม แสดงตำแหน่งของระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงจะได้ค่าประมาณที่ 6.56 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 17 และ ระยะระยะจุดศูนย์กลางรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 3.55 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 38

รูปที่ 5.12 - 5.13 น้ำหนัก 43000 กิโลกรัม แสดงตำแหน่งของระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงจะได้ค่าประมาณที่ 6.59 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 18 และ ระยะระยะจุดศูนย์กลางรถพ่วงถึงเพลาท้ายรถพ่วง 3.57 เมตร โดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 40

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบระยะจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถพ่วงเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เมื่อน้ำหนักรถมากขึ้นจะทำให้ค่าสมการเป้าหมายเพิ่มมากขึ้นและระยะจะเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะอยู่ในช่วง 6.5 เมตร

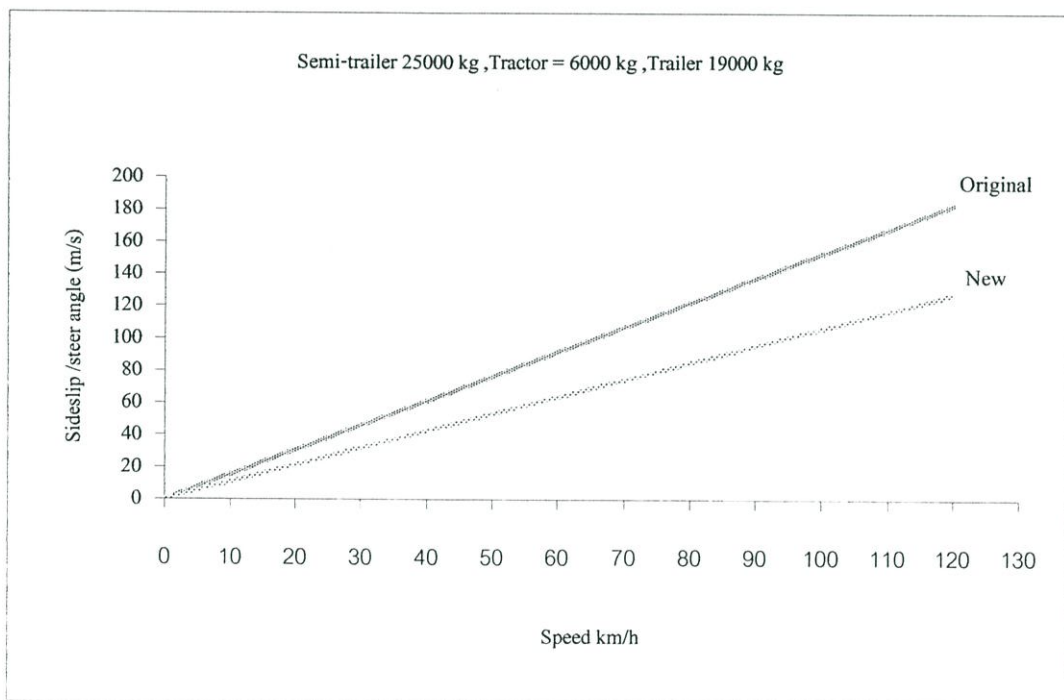
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบระยะศูนย์กลางของตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาท้ายรถตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักค่าของสมการเป้าหมายเพิ่มมากขึ้นตามน้ำหนักจะได้ระยะที่ 3.5 เมตร

เมื่อค่าของสมการเป้าหมายระยะของจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของของรถพ่วงจะมีค่าสมการเป้าหมายอยู่ในช่วง 14 - 18 ซึ่งอยู่ในระยะ 6.5 - 6.59 เมตรที่น้ำหนัก 25000 ถึง 43000 กิโลกรัมตามลำดับ และระยะจากจุดศูนย์กลางถึงเพลาท้ายรถพ่วง ซึ่งจะมีระยะอยู่ในช่วง 3.5 - 3.58 เมตร โดยเมื่อเพิ่มน้ำหนักขึ้นจะทำให้ระยะทั้งสองนั้นเพิ่มขึ้นตามด้วย แต่ค่าของสมการเป้าหมายก็จะเพิ่มตามด้วย เพราะฉะนั้นค่าที่จะนำมาพิจารณาต่อคือพิจารณาที่ ค่า ระยะของจุดจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของของรถพ่วง 6.5 เมตร และ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงเพลาท้ายรถพ่วง 3.5 เมตร

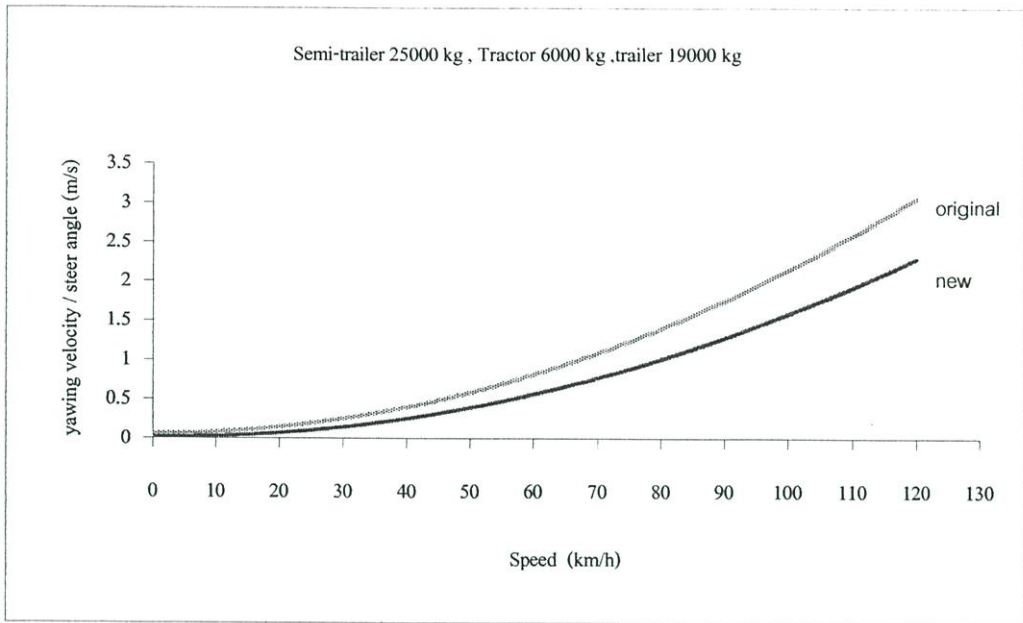
5.4 เปรียบเทียบพิกัดและน้ำหนักรถบรรทุกที่ใช้ในปัจจุบัน

ขนาดและพิกัดน้ำหนักที่ใช้ในปัจจุบันของรถบรรทุกกึ่งพ่วง เป็นการเปรียบเทียบรถบรรทุกพ่วงที่ใช้อยู่กับผลการคำนวณ เพื่อนำมาเปรียบเทียบโดยขนาดและพิกัดของรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้ในปัจจุบันเป็นแบบ รถยนต์ลากจูงฮีโน่ รุ่น เอฟเอ็ม 211 แบบ 6 × 2 [ผนวก ก] โดยใช้ค่าของตัวหน่วงที่ได้จากการทดลอง และตัวรถพ่วง [ผนวก ก]

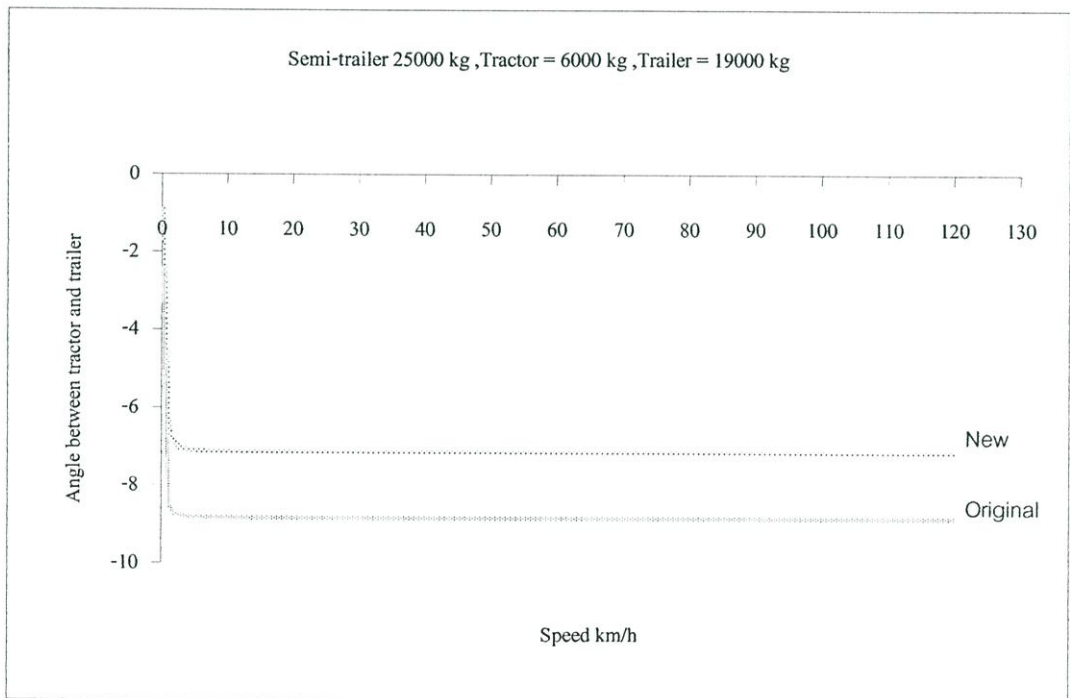
โดยที่ใช้สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงที่ได้จากการคำนวณ โดยการเปรียบเทียบนี้จะมีน้ำหนักที่นำมาพิจารณา 25000 กิโลกรัม โดยให้น้ำหนักของรถลากจูงหนัก 6000 กิโลกรัม



รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 25000 กิโลกรัม



รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 25000 กิโลกรัม

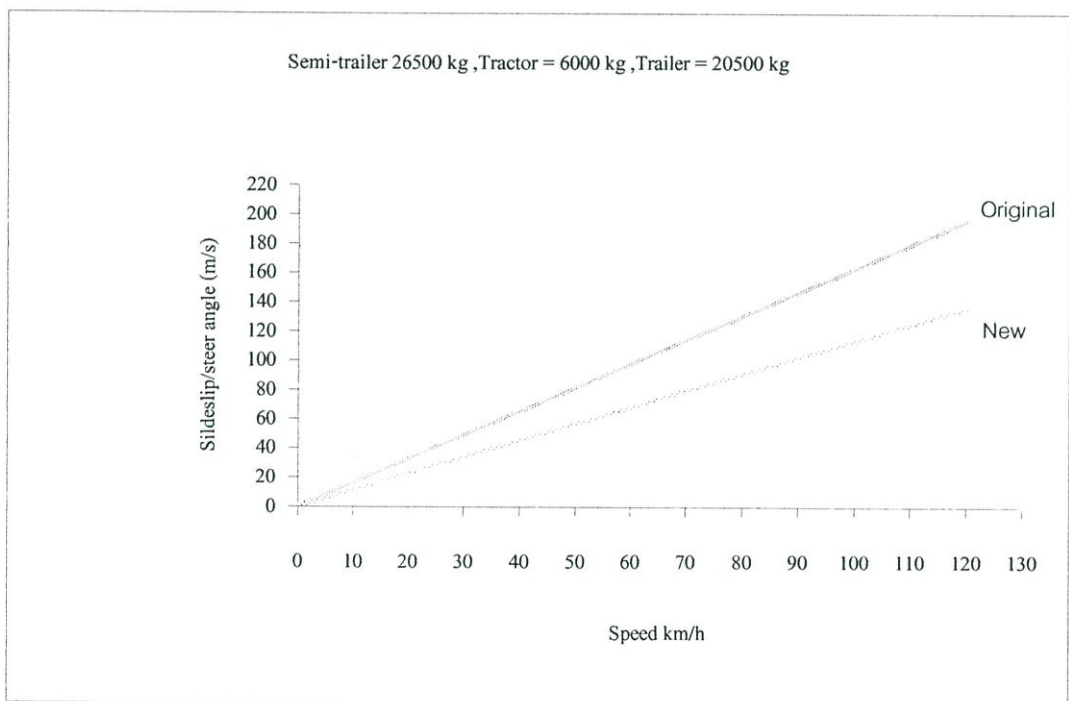


รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ที่ 25000 กิโลกรัม

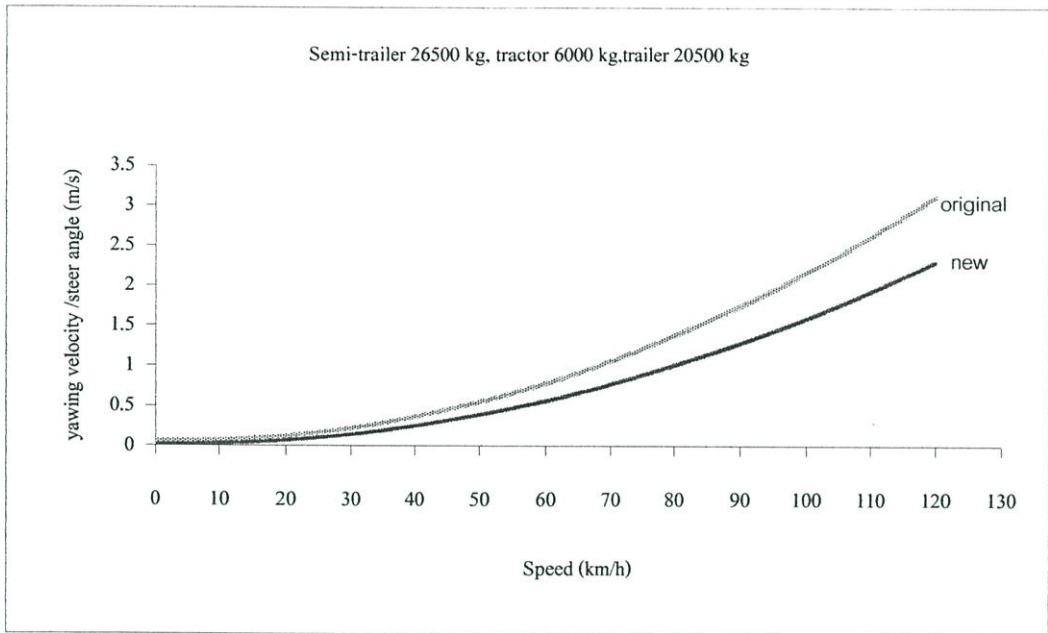
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Sideslip Velocity / Steer Angle น้อยกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่จริง

รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Yawing Velocity / Steer Angle น้อยกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่จริง

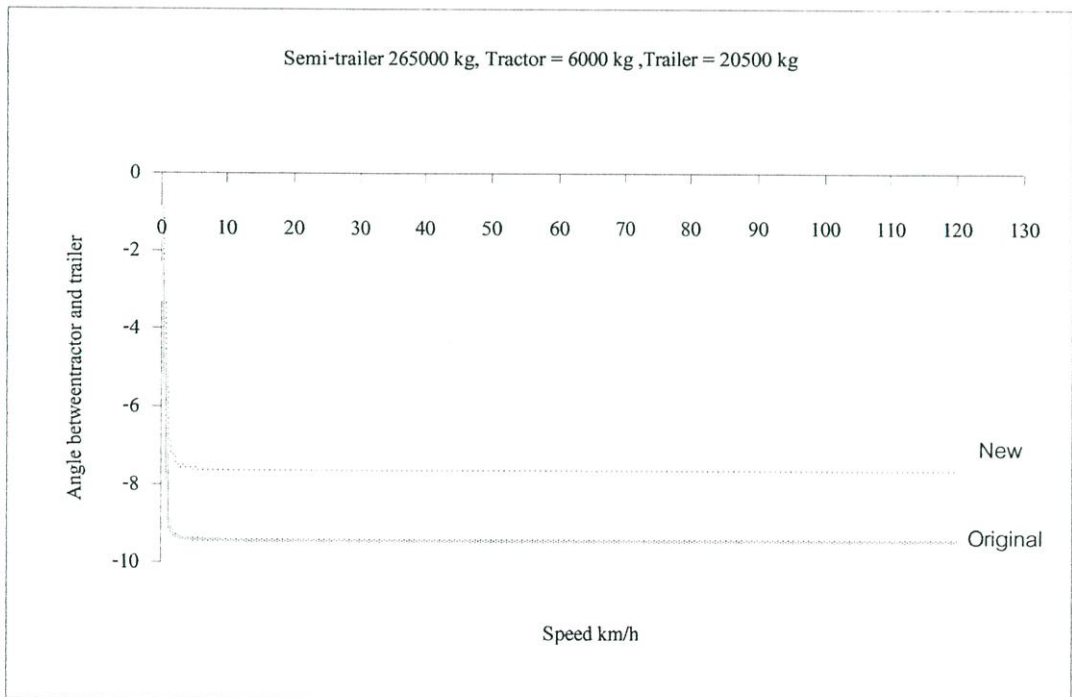
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle โดยจะเริ่มที่ -7 ที่ความเร็ว 3 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดขึ้นน้อยกว่า ขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่จริง



รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity / Steer Angle ที่ 26500 กิโลกรัม



รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 26500 กิโลกรัม

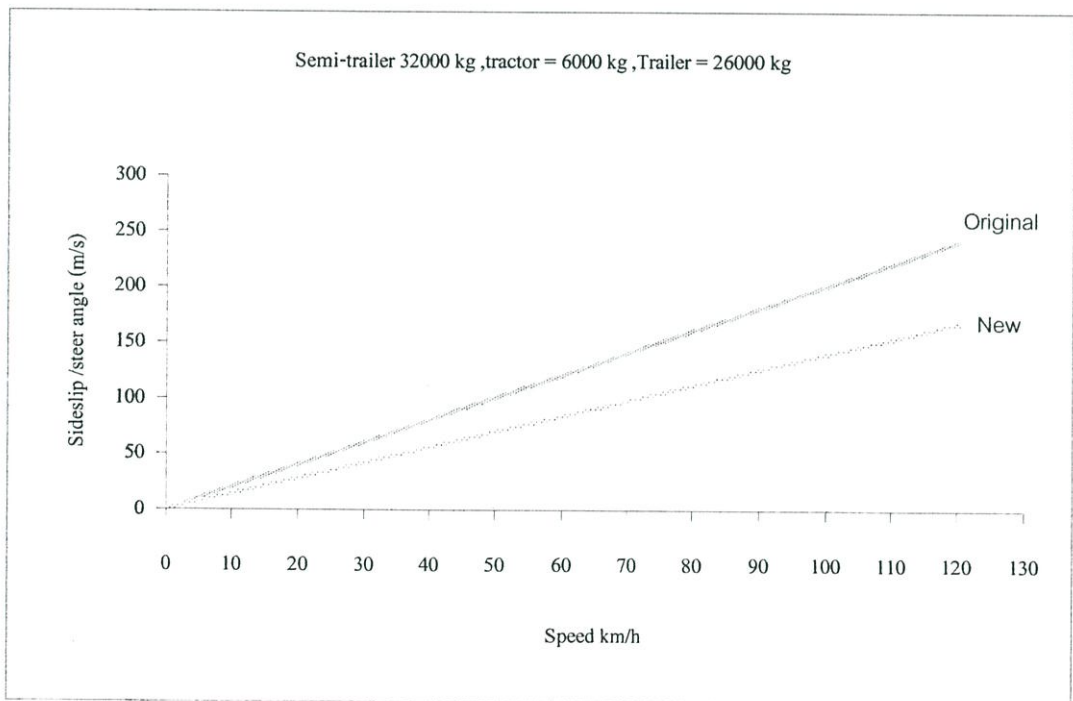


รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ที่ 26500 กิโลกรัม

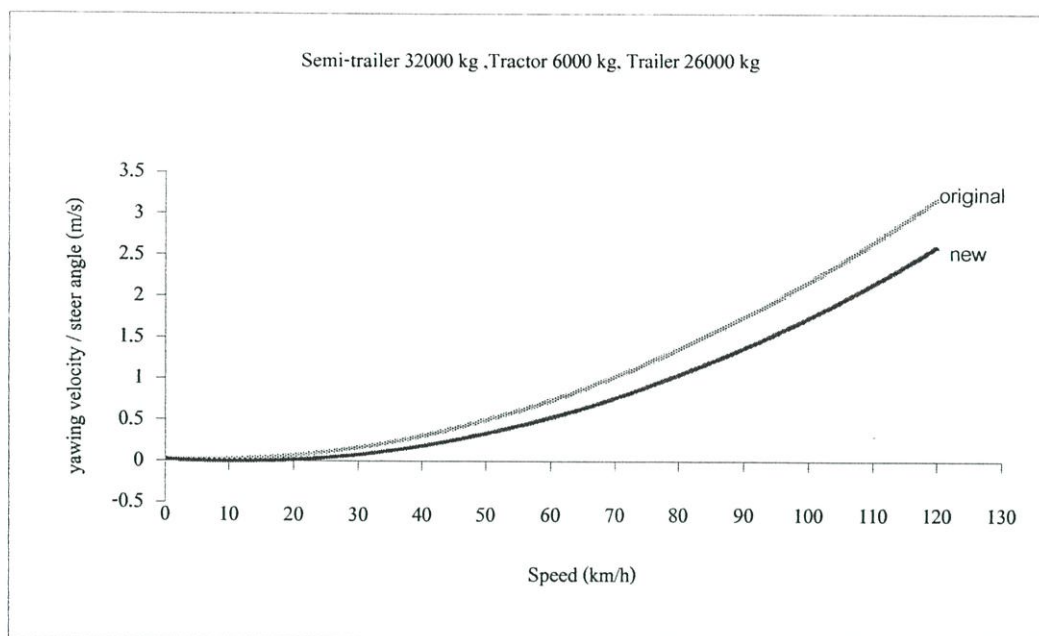
รูปที่ 5.17 เป็นการเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle โดยมีค่าความเร็วเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ 26500 กิโลกรัม โดยที่น้ำหนักของรถลากจูงที่ 6000 กิโลกรัมและน้ำหนักตัวรถพ่วง 20500 กิโลกรัม เปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Sideslip Velocity / Steer Angle น้อยกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานปัจจุบัน

รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Yawing Velocity / Steer Angle น้อยกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานปัจจุบัน

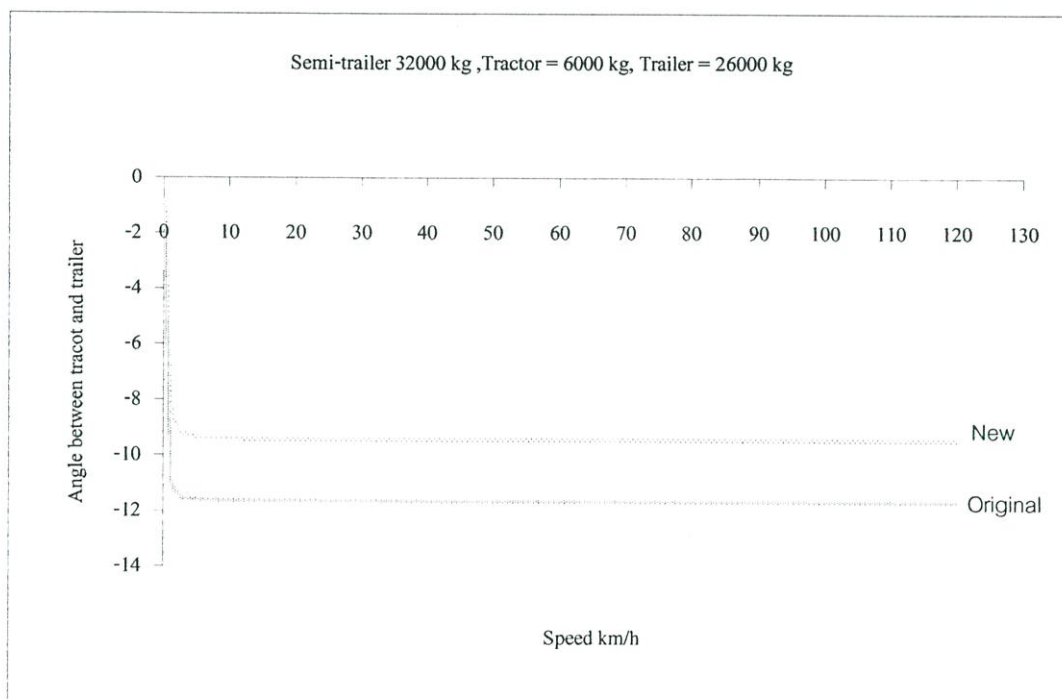
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle โดยจะเริ่มที่ -7.8 ที่ความเร็ว 3 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดขึ้นน้อยกว่า ขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน



รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 32000 กิโลกรัม



รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 32000 กิโลกรัม

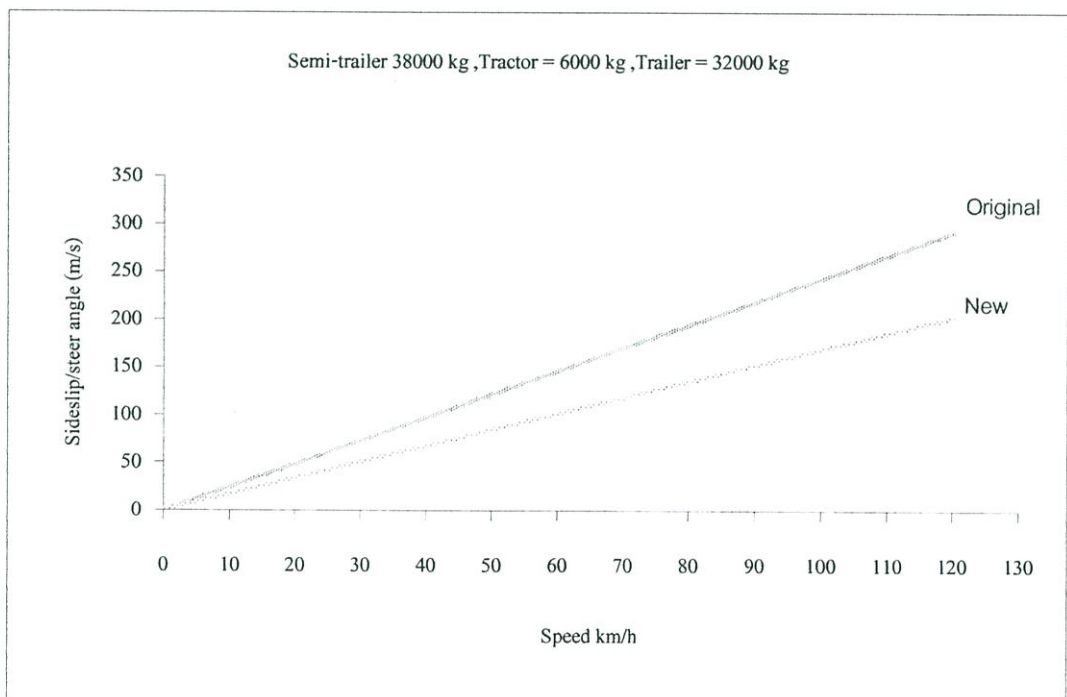


รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ที่ 32000 กิโลกรัม

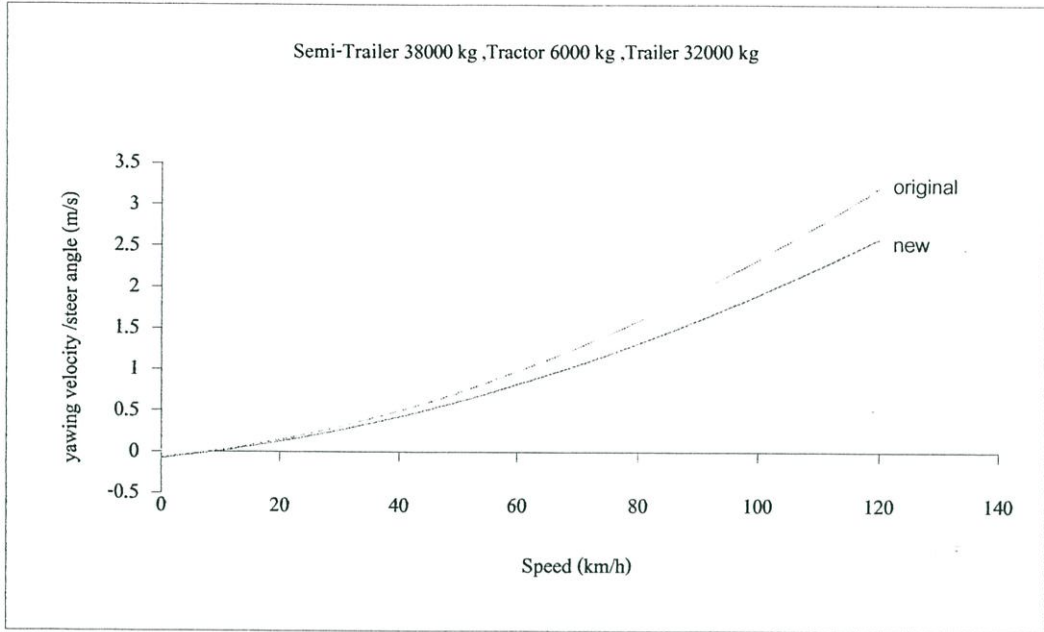
จากรูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle โดยมีค่าความเร็วเปรียบเทียบน้ำหนักรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ 32000 กิโลกรัม โดยที่น้ำหนักของรถลากจูงที่ 6000 กิโลกรัมและน้ำหนักตัวรถพ่วง 26000 กิโลกรัม เปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Sideslip Velocity / Steer Angle ต่ำกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Yawing Velocity / Steer Angle น้อยกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

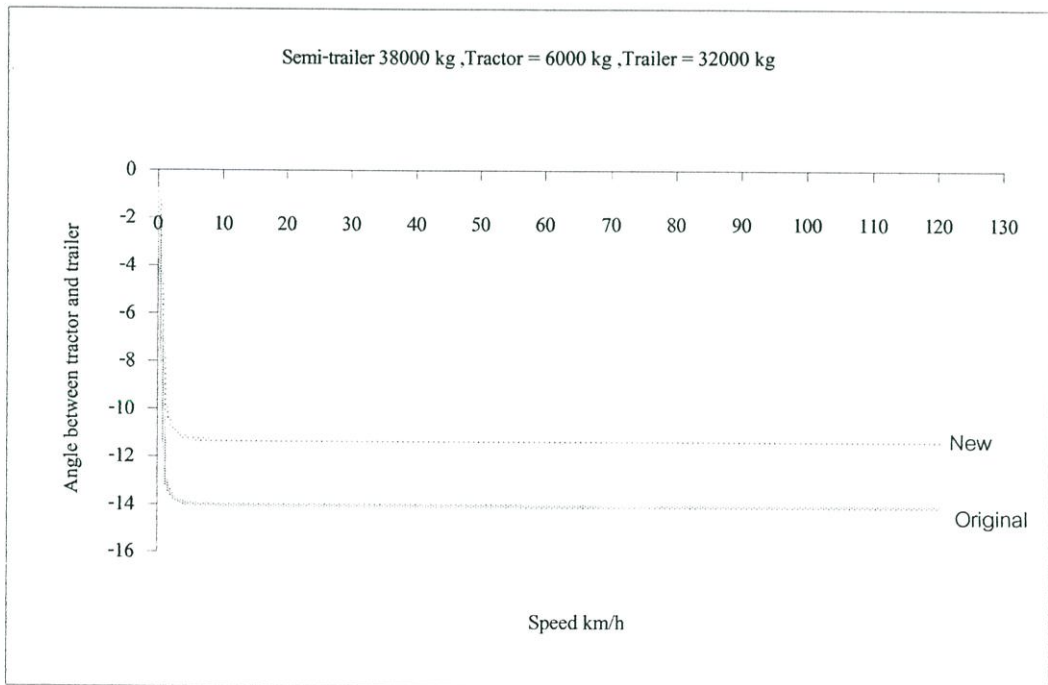
รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle โดยจะเริ่มที่ -8 ที่ความเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดขึ้นน้อยกว่า ขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน



รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 38000 กิโลกรัม



รูปที่ 5.24 การเปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 38000 กิโลกรัม

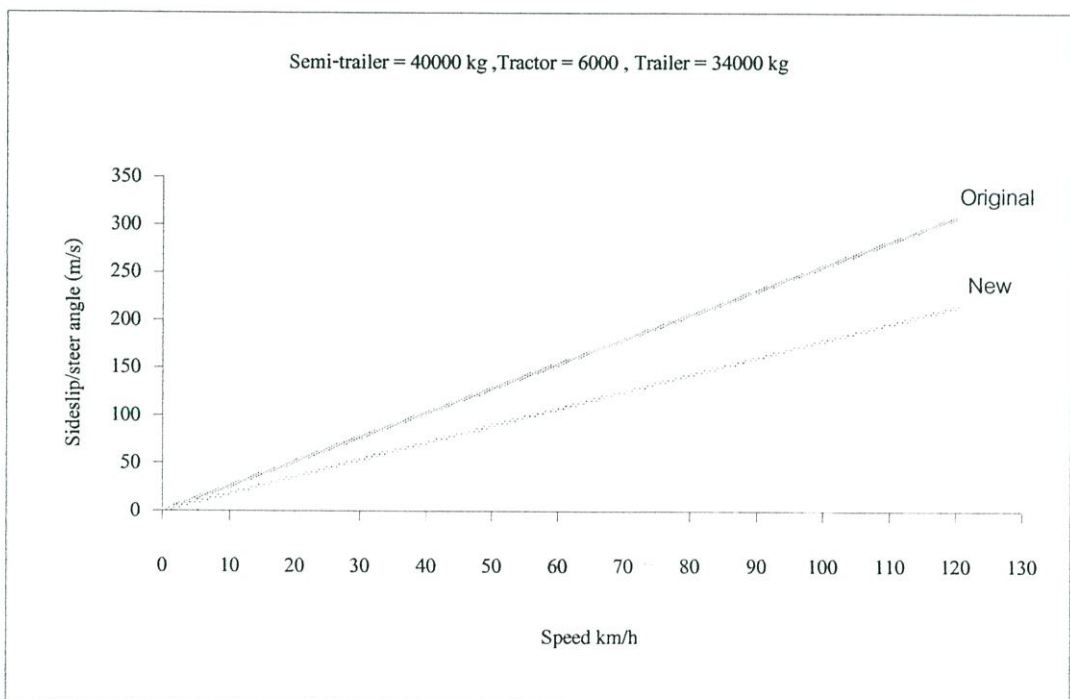


รูปที่ 5.25 การเปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ที่ 38000 กิโลกรัม

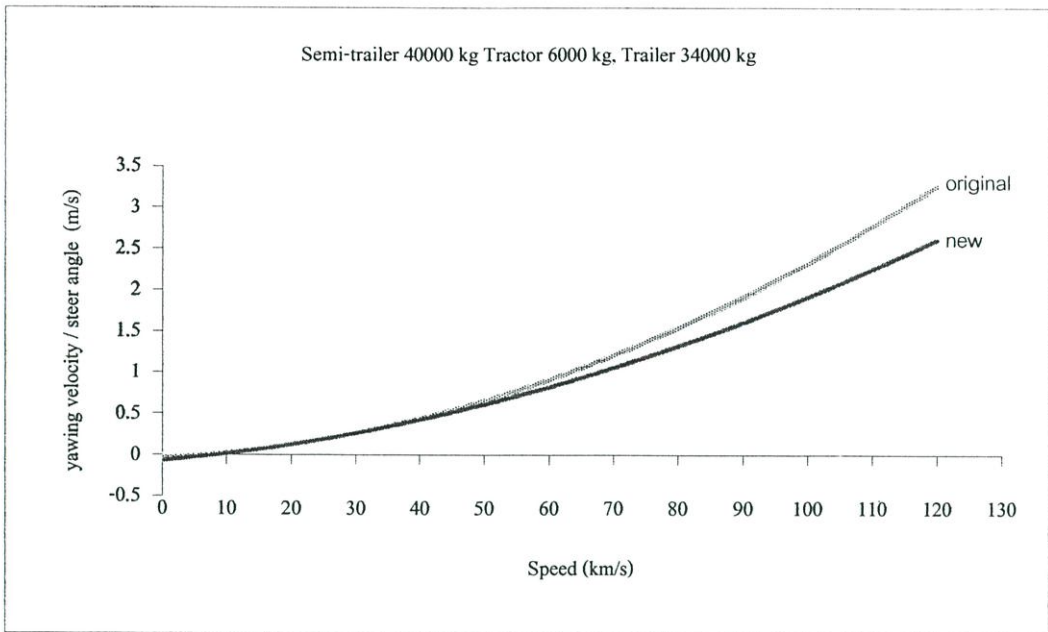
รูปที่ 5.23 เป็นการเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle โดยมีค่าความเร็วเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ 38000 กิโลกรัม โดยที่น้ำหนักของรถลากจูงที่ 6000 กิโลกรัมและน้ำหนักตัวรถพ่วง 32000 กิโลกรัม เปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Sideslip Velocity / Steer Angle ต่ำกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Yawing Velocity / Steer Angle น้อยกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

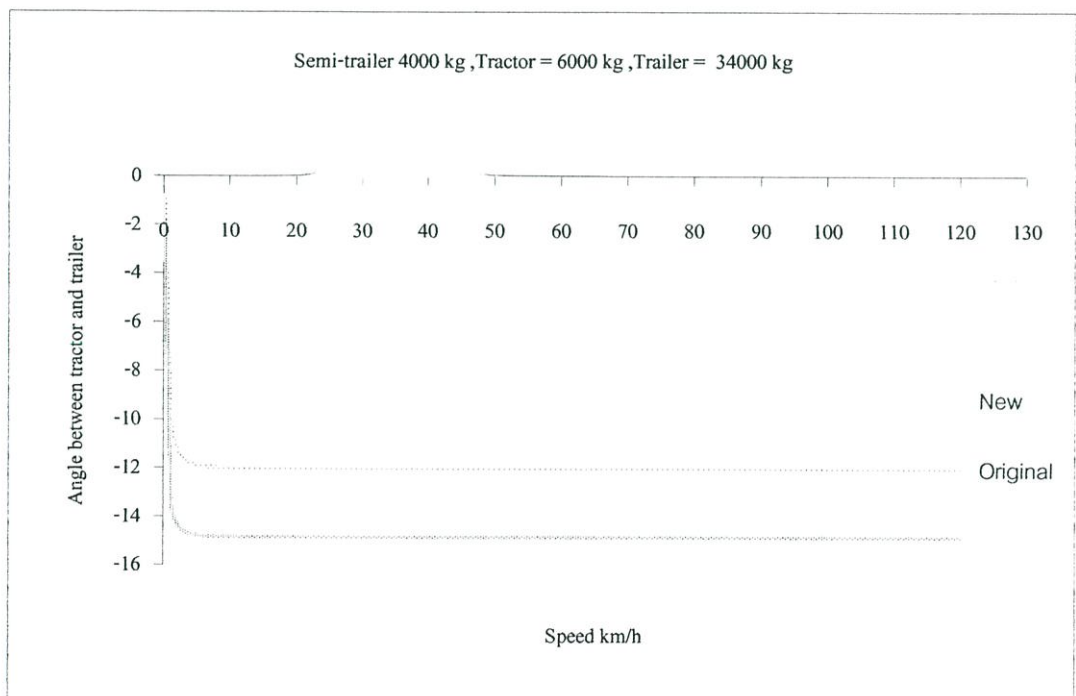
รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle โดยจะเริ่มที่ -11 ที่ความเร็ว 7 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดขึ้นต่ำกว่า ขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน



รูปที่ 5.26 การเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 40000 กิโลกรัม



รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 40000 กิโลกรัม

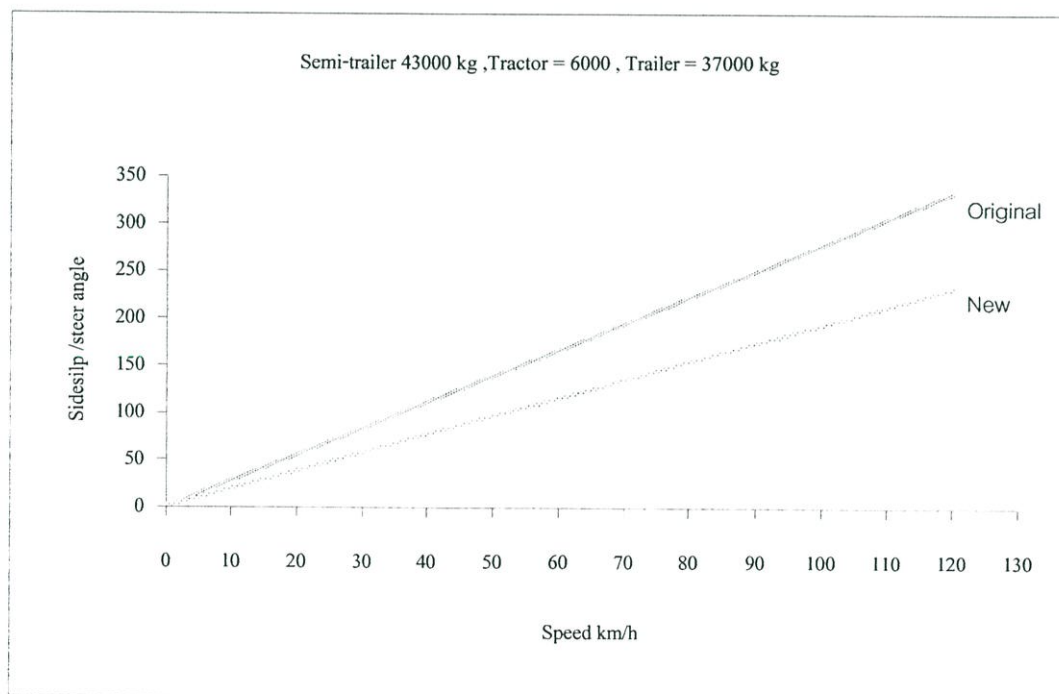


รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle
ที่ 40000 กิโลกรัม

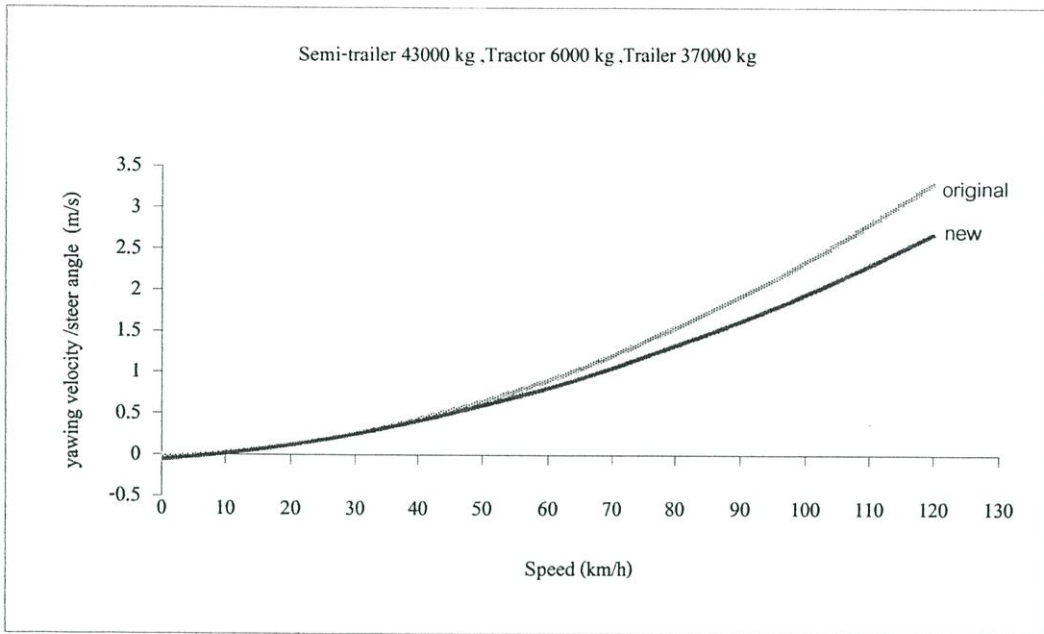
รูปที่ 5.26 เป็นการเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle โดยมีค่าความเร็วเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกทุกกึ่งพวงที่ 40000 กิโลกรัม โดยที่น้ำหนักของรถลากจูงที่ 6000 กิโลกรัมและน้ำหนักตัวรถพ่วง 34000 กิโลกรัม เปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพวงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Sideslip Velocity / Steer Angle ต่ำกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพวงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Yawing Velocity / Steer Angle น้อยกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

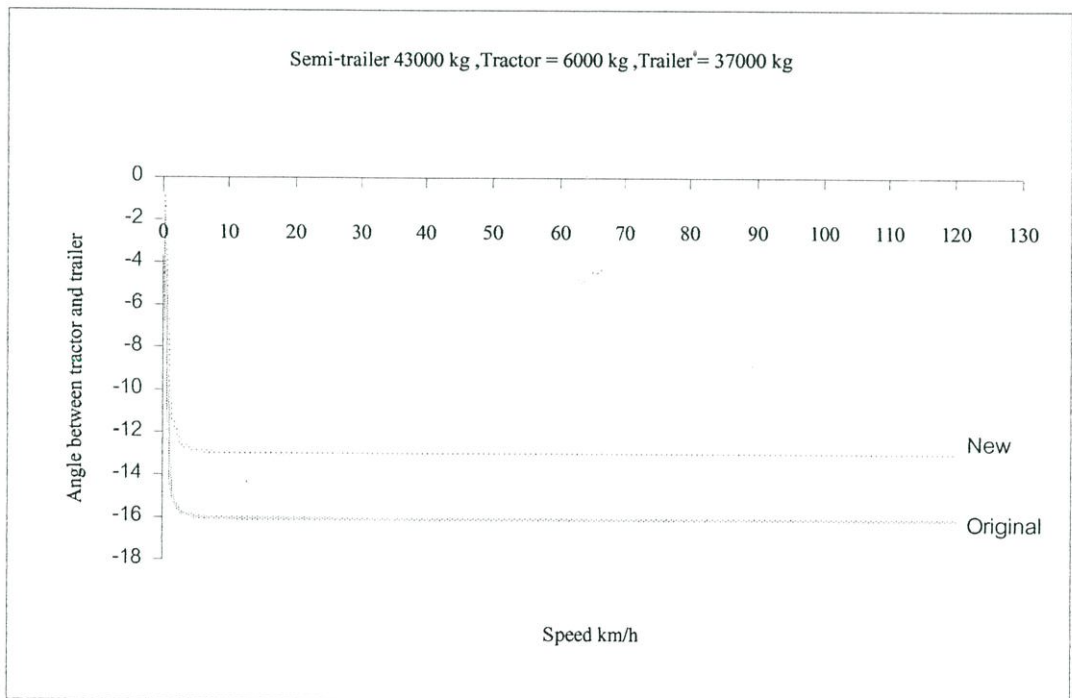
รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกกึ่งพวงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle โดยจะเริ่มที่ -12 ที่ความเร็ว 7 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดขึ้นต่ำกว่า ขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน



รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 43000 กิโลกรัม



รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 43000 กิโลกรัม



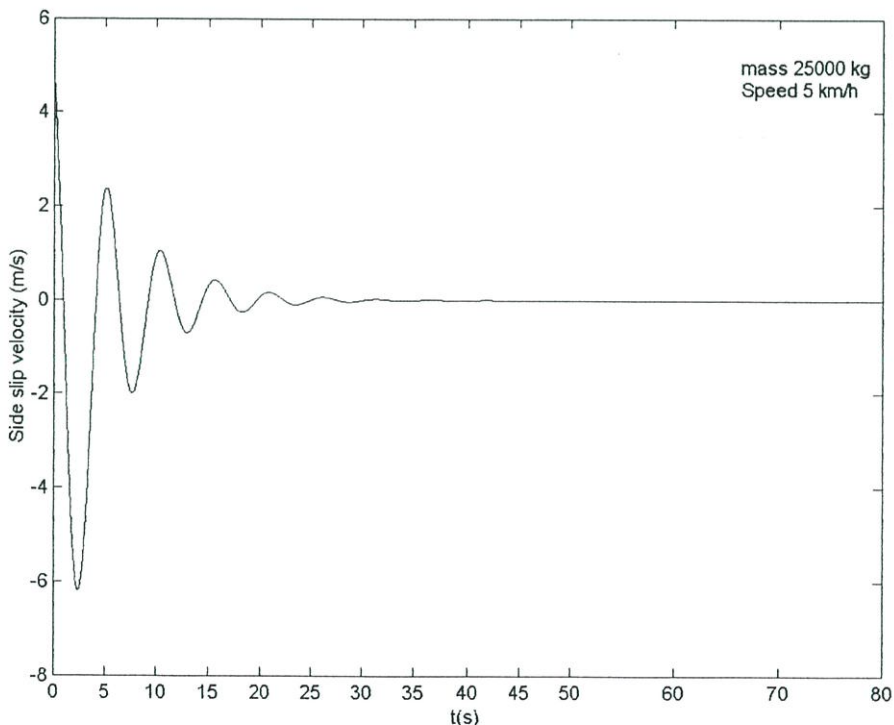
รูปที่ 5.31 การเปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ที่ 43000 กิโลกรัม

รูปที่ 5.29 เป็นการเปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle โดยมีค่าความเร็วเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ 43000 กิโลกรัม โดยที่น้ำหนักของรถลากจูงที่ 6000 กิโลกรัมและน้ำหนักตัวรถพ่วง 37000 กิโลกรัม เปรียบเทียบค่าของ Sideslip Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Sideslip Velocity / Steer Angle ต่ำกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

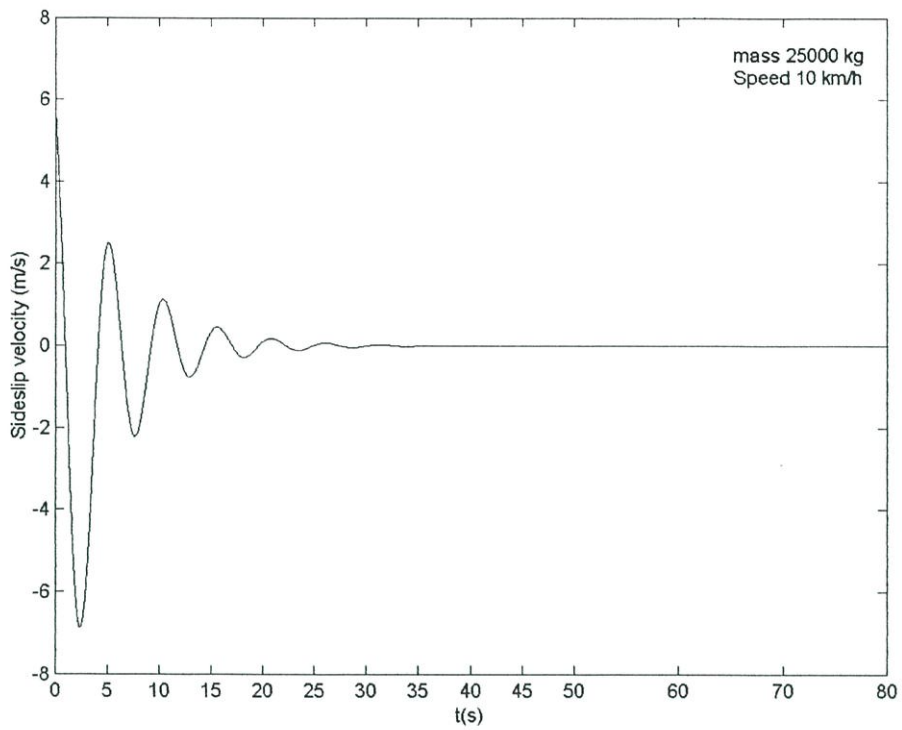
รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบค่าของ Yawing Velocity ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Yawing Velocity / Steer Angle น้อยกว่าขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบค่าของ Angle Between Tractor and Trailer ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกทั้งพ่วงที่ใช้งานจริงและจากการคำนวณ ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle โดยจะเริ่มที่-13 ที่ความเร็ว 7 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดขึ้นต่ำกว่า ขนาดและพิกัดของรถที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

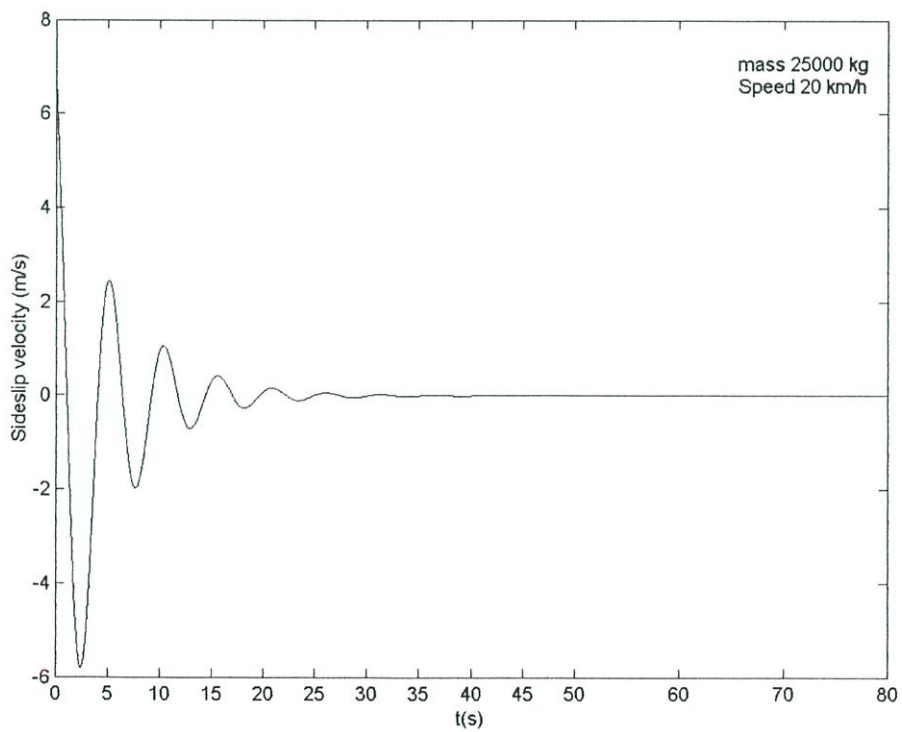
5.4 ผลการคำนวณทางพลวัตของรถบรรทุกทั้งพ่วงที่น้ำหนัก 25000 กิโลกรัม



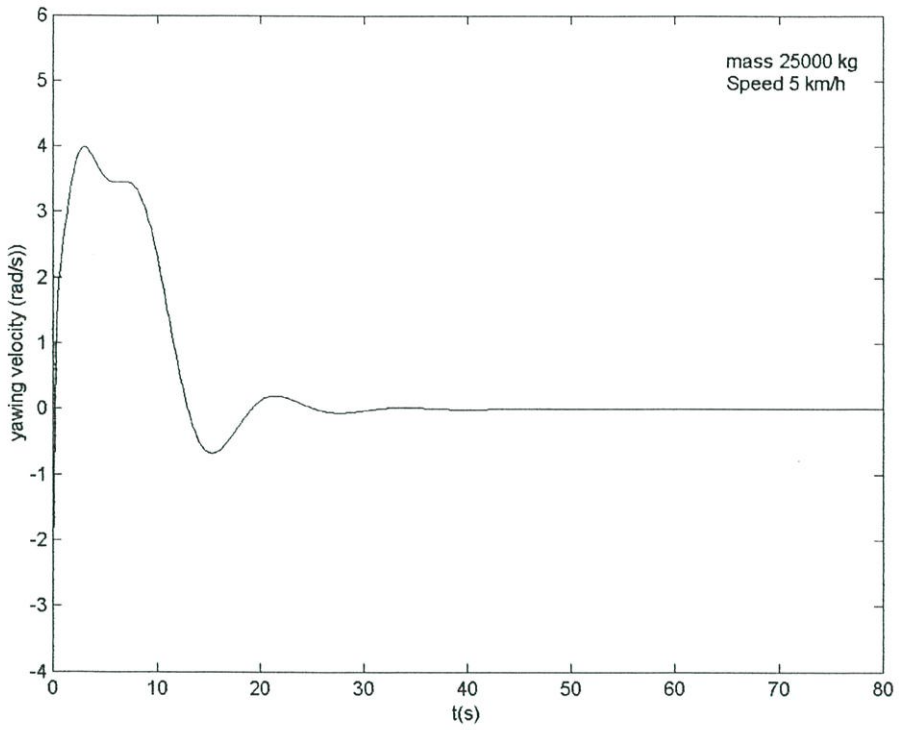
รูปที่ 5.32 แสดงค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง



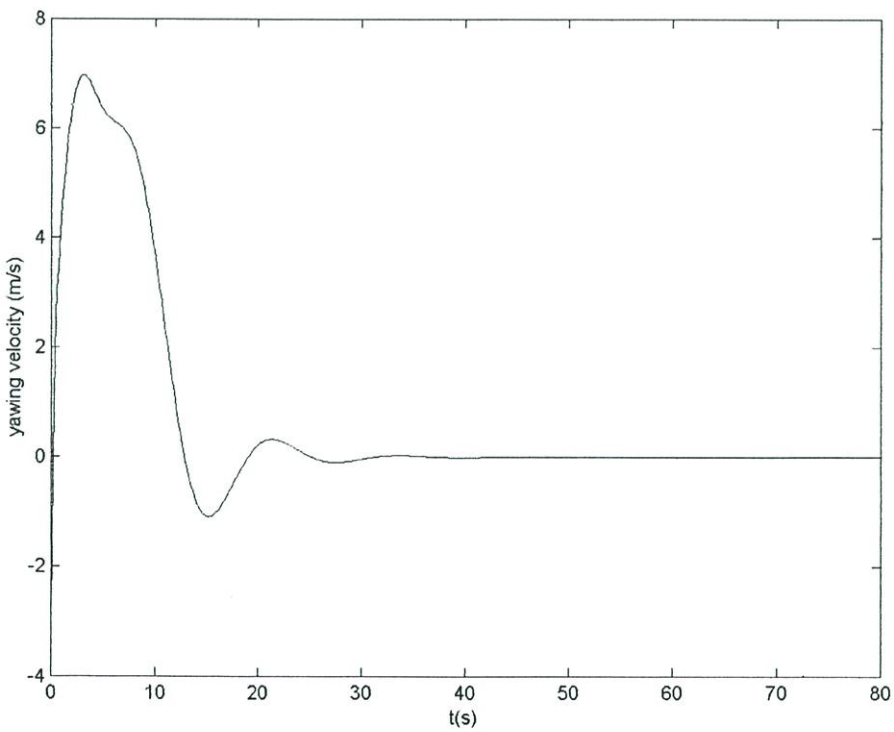
รูปที่ 5.33 แสดงค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง



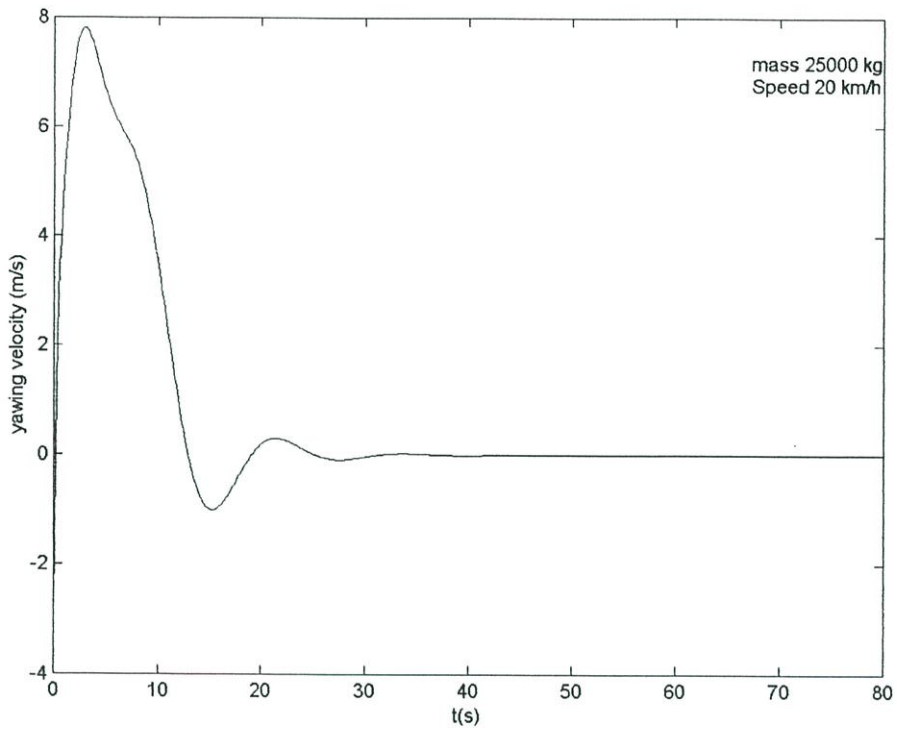
รูปที่ 5.34 แสดงค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง



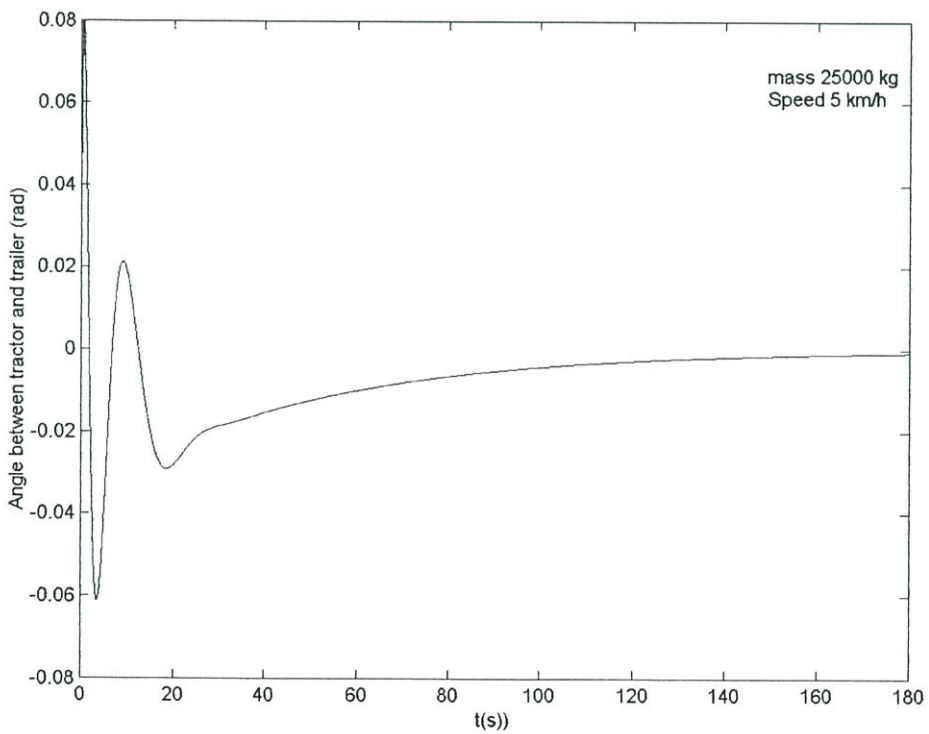
รูปที่ 5.35 แสดงค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง



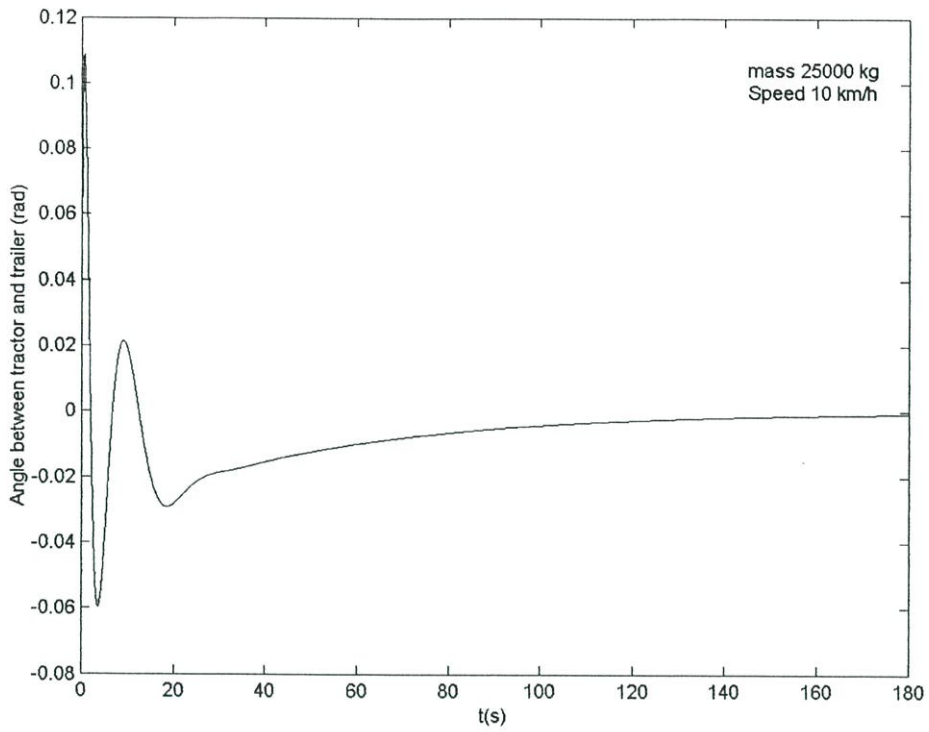
รูปที่ 5.36 แสดงค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง



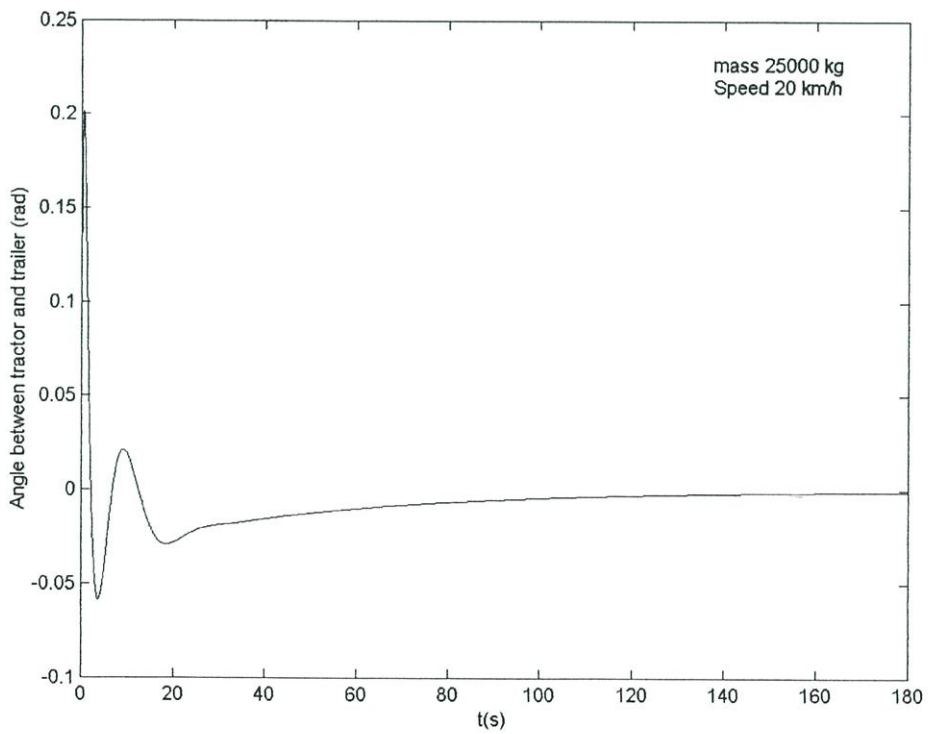
รูปที่ 5.37 แสดงค่าของ Yawing Velocity / Steer Angle ที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง



รูปที่ 5.38 แสดงค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง



รูปที่ 5.39 แสดงค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง



รูปที่ 5.40 แสดงค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง

รูปที่ 5.32 เป็นการหาค่าการลื่นไถลของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Side slip velocity (สมการ 5.8) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่มวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร จึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงกลับคืนสู่สถานะเสถียร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มขึ้นจะทำให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้เร็วขึ้น ค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมในการเลี้ยวที่ล้อหน้าของรถลากจูงในช่วง 2 วินาทีที่จะเกิดการสะบัดเกิดขึ้น เมื่อเลี้ยวแล้วสามารถกลับคืนสู่สถานะเดิมได้เมื่อเวลาผ่านไป 33 วินาทีรถจะเข้าสู่สถานะเสถียร

รูปที่ 5.33 เป็นการหาค่าการลื่นไถลของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Side slip velocity (สมการ 5.8) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมงที่มวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร จึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงกลับคืนสู่สถานะเสถียร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มขึ้นจะทำให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้เร็วขึ้น ค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมในการเลี้ยวที่ล้อหน้าของรถลากจูงในช่วง 2.4 วินาทีที่จะเกิดการสะบัดเกิดขึ้น เมื่อเลี้ยวแล้วสามารถกลับคืนสู่สถานะเดิมได้เมื่อเวลาผ่านไป 36 วินาทีรถจะเข้าสู่สถานะเสถียร

รูปที่ 5.34 เป็นการหาค่าการลื่นไถลของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Side slip velocity (สมการ 5.8) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมงที่มวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถ

ตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร จึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงกลับคืนเข้าสู่สภาวะเสถียร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มขึ้นจะทำให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้เร็วขึ้น ค่าของ Sideslip Velocity/ Steer Angle ที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมในการเลี้ยวที่ล้อหน้าของรถลากจูงในช่วง 2.4 วินาทีที่จะเกิดการสะบัดเกิดขึ้น เมื่อเลี้ยวแล้วสามารถกลับคืนสู่สภาวะเดิมได้เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาทีภายหลังจากนั้นรถจะอยู่ในสภาวะเสถียร

รูปที่ 5.35 เป็นการหาค่าการเหวี่ยงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Yawing Velocity / Steer Angle (สมการ 5.9) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่มีมวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มความเร็วขึ้นจะทำให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้เร็วขึ้น เมื่อเลี้ยวทำให้ค่า Yawing Velocity / Steer Angle เกิดขึ้นที่ความเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมการเลี้ยวที่ล้อหน้ารถลากจูงจะกลับคืนสู่สภาวะเสถียรเมื่อเวลาผ่านไป 38 วินาทีแต่ในระหว่างนั้นจะเกิดการสะบัดเกิดขึ้นในช่วงเวลา 13 วินาที

รูปที่ 5.36 เป็นการหาค่าการเหวี่ยงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Yawing Velocity / Steer Angle (สมการ 5. 9) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่มีมวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางกลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มความเร็วขึ้นจะทำให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถ

บรรทุกิ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้เร็วขึ้นเมื่อเลี้ยวทำให้ค่า Yawing Velocity / Steer Angle เกิดขึ้นที่ความเร็ว 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมการเลี้ยวที่ล้อหน้ารถลากจูงจะกลับคืนสู่สภาวะเสถียรเมื่อเวลาผ่านไป 42 วินาทีแต่ในระหว่างนั้นจะเกิดการสะบัดเกิดขึ้นในช่วงเวลา 15 วินาที

รูปที่ 5.37 เป็นการหาค่าการเหวี่ยงของรถบรรทุกิ่งพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Yawing Velocity / Steer Angle (สมการ 5.9) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่มีมวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มความเร็วขึ้นจะทำให้รถบรรทุกิ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกิ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้เร็วขึ้น เมื่อเลี้ยวทำให้ค่า Yawing Velocity / Steer Angle เกิดขึ้นที่ความเร็ว 15กิโลเมตร/ชั่วโมง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมการเลี้ยวที่ล้อหน้ารถลากจูงจะกลับคืนสู่สภาวะเสถียรเมื่อเวลาผ่านไป 48 วินาทีแต่ในระหว่างนั้นจะเกิดการสะบัดเกิดขึ้นในช่วงเวลา 17 วินาที

รูปที่ 5.38 เป็นการหาค่ามุมระหว่างรถลากจูงกับรถพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer (สมการ 5.10) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่มีมวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มความเร็วขึ้นจะทำให้รถบรรทุกิ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกิ่งพ่วงเข้าสู่สภาวะเสถียรได้เร็วขึ้น แสดงค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angleที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมงและในช่วงประมาณวินาทีที่ 3 จะเกิดการสะบัดและจะเริ่มกลับเข้าสู่การเสถียรที่เวลาประมาณ 58 วินาทีและจะกลับสู่สภาวะเดิม 150 วินาทีไปแล้วถึงกลับสู่สภาวะเสถียร

รูปที่ 5.39 เป็นการหาค่ามุมระหว่างรถลากจูงกับรถพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer (สมการ 5.10) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่มีมวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มความเร็วขึ้นจะทำให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้เร็วขึ้น แสดงค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ในช่วงประมาณวินาที 5 จะเกิดการสะบัดและจะเริ่มกลับเข้าสู่การเสถียรที่เวลาประมาณ 65 วินาทีและจะกลับสู่สถานะเดิม 163 วินาทีไปแล้วถึงกลับสู่สถานะเสถียร

รูปที่ 5.40 เป็นการหาค่ามุมระหว่างรถลากจูงกับรถพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Angle Between Tractor and Trailer / Steer (สมการ 5.10) สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่มีมวลรถลากจูง 6000 กิโลกรัมและมวลรถพ่วงที่ 19000 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก(a)ที่ 2.43 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก(b)ที่ 2.05 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง ที่(d) 0.623 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วงถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง(e)6.50 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง(h)3.50 เมตร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มความเร็วขึ้นจะทำให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้เร็วขึ้น แสดงค่าของ Angle Between Tractor and Trailer / Steer Angle ในช่วงประมาณวินาทีที่ 5 จะเกิดการสะบัดและจะเริ่มกลับเข้าสู่การเสถียรที่เวลาประมาณ 80 วินาทีและจะกลับสู่สถานะเดิม 175 วินาทีไปแล้วถึงกลับสู่สถานะเสถียร

จากรูปที่ 5.32 - 5.34 เป็นการหาค่าการลื่นไถลของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า Side slip velocity สมการ 5.8 เป็นสมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วรถบรรทุกกึ่งพ่วงจากจึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงกลับคืนสู่สถานะเสถียร โดยเมื่อค่าของสมการชุดนี้เพิ่มขึ้นจะทำให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้ช้า และเมื่อลดความเร็วลงจะทำให้ชุดสมการลดลงเป็นผลให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 5.35 - 5.37 เป็นการหาค่าการเหวี่ยงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยมาจากสมการหาค่า yawing velocity สมการที่ 5.9 เป็นสมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วรถบรรทุกกึ่งพ่วงจากการคำนวณ(มีความสัมพันธ์กับการความเร็วของรถบรรทุกกึ่งพ่วง มีความสัมพันธ์กับความเร็วของรถเมื่อเพิ่มหรือลดค่าของความเร็วรถบรรทุกกึ่งพ่วงจะทำให้สมการชุดนี้เพิ่มหรือลดลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลให้รถบรรทุกกึ่งพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรช้าหรือเร็ว โดยขึ้นอยู่กับค่าของความเร็วของรถบรรทุกกึ่งพ่วงนั้น

จากรูปที่ 5.38 - 5.40 เป็นการหาค่ามุมระหว่างรถลากจูงกับรถพ่วงของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดย สมการที่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วรถบรรทุกกึ่งพ่วงในสมการ 5.10 มีความสัมพันธ์กับการความเร็วและการสิ้นเปลืองของรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยสมการทั้งหมดเกี่ยวข้องกับการสิ้นเปลืองของรถบรรทุกกึ่งพ่วงและสมการชุดการสิ้นเปลืองนั้นจะเกี่ยวกับการเพิ่มหรือลดความเร็ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นจะทำให้การสิ้นเปลืองเพิ่มมากขึ้นและทำให้มุมระหว่างรถลากจูงและรถพ่วงเข้าสู่สถานะเสถียรช้า

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 ขับเคลื่อน 4 ล้อ

ผลการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ โดยการจำลองทางไดนามิกซ์และผลของการเปลี่ยนแปลงระยะของฐานล้อ โดยให้มีช่วงความห่างของแกนเพลาล้อหน้ากับแกนเพลาล้อหลัง โดยการพิจารณาใช้สมการพิจารณาที่น้ำหนักรถยนต์ 1150 กิโลกรัม ได้พิจารณาที่ค่า Target yaw rate ระยะฐานล้อที่ 4.5 เมตรจะมี Target yaw ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับที่ระยะฐานล้อที่ 3.5 เมตร ที่ระยะแกนเพลาล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางที่ 1.88 เมตร และจากจุดศูนย์กลางรถจนถึงแกนเพลาล้อหลังคือ 2.61 เมตรลักษณะนี้ เมื่อระยะของฐานล้อที่ล้อหน้าและล้อหลังมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกันจะทำให้รถยนต์ยังมีความเสถียรน้อยลง โดยสังเกตจะพบว่าที่ระยะฐานล้อหน้าและล้อหลังที่มีระยะห่าง 2.02 / 2.46 และมีค่ามากกว่า ที่ 1.88 / 2.61 และยิ่งมากไปกว่านั้น เมื่อระยะแกนเพลาล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางรถและแกนเพลาล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางรถจนถึง 2.4/2.1 จะมีค่ามากที่สุดที่ฐานล้อที่ 4.5 เมตร ดังนั้น ระยะฐานล้อที่มีความยาวมากจะเกิดความเสถียรได้ดีกว่าระยะฐานล้อที่สั้นกว่าและระยะห่างของแกนเพลาล้อหน้าและแกนเพลาล้อหลังจะเกิดความเสถียรดีเมื่อระยะแกนเพลาล้อหน้าห่างจากจุดศูนย์กลางน้อยกว่าระยะแกนเพลาล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางของรถยนต์ และ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านน้ำหนักของรถยนต์ โดยจะพิจารณาที่ 1150 , 1250 , 1350 , 1450 กิโลกรัม ที่ระยะฐานล้อที่ 3.1 เมตร โดยที่ จะนำระยะห่างของแกนเพลาล้อหน้ากับแกนเพลาล้อหลังให้ระยะแกนเพลาล้อหน้าน้อยกว่าแกนเพลาล้อหลัง คือที่ 1.30 / 1.80 เมตร ที่น้ำหนักรถยนต์ที่มีน้ำหนักมากกว่านั้นจะมีความเสถียรมากกว่าที่น้ำหนักเบากว่า

เพราะฉะนั้น รถยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ ระยะฐานล้อมากจะทำให้ค่าความเสถียรดีกวารถยนต์ที่มีระยะฐานล้อย่อย และระยะของแกนเพลาล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางตัวรถยนต์จะน้อยกว่าระยะจากจุดศูนย์กลางถึงแกนเพลาล้อหลัง จะทำให้เมื่อรถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะเกิดความเสถียรมากแต่ถ้าระยะของแกนล้อหน้ามากกว่าแกนล้อหลัง เปรียบเหมือนรถยนต์ที่กำลังบรรทุกสิ่งของจะทำให้จุดศูนย์กลางของตัวรถยนต์เคลื่อนมาทางด้านหลังทำให้เกิดความไม่เสถียรเกิดขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอุบัติเหตุ

6.2 รถบรรทุกกึ่งพ่วง

การเปรียบเทียบกับความยาวระยะห่างของฐานล้อของรถบรรทุกพ่วงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนำมาเปรียบเทียบกัน โดยการพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น คือ การเลี้ยว การเบรกที่สภาวะคงที่ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างตัวลากและหางพ่วงที่สภาวะคงที่ ต่อมุมการเลี้ยว หาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ส่วนที่นำมาพิจารณาเป็นส่วนของตัวรถพ่วง คือระยะจากตัวจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของรถตัวพ่วง และจากจุดศูนย์กลางของรถตัวพ่วงถึงแกนเพลาท้ายของรถตัวพ่วง โดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่ได้มาจากการทดลอง 25000 , 26500 , 32000 , 38000 , 40000 , 43000 กิโลกรัม การพิจารณานี้จะนำความเร็วที่ 80 กิโลเมตร/ชั่วโมงมาพิจารณาเพราะเป็นไปตามที่กฎหมายกำหนดไว้ ระยะจากตัวจับยึดถึงจุดศูนย์กลางของรถตัวพ่วง e ระยะที่มีความเสถียรมากที่สุดคือที่ 6.50 เมตร จุดที่สองเป็นจุดที่ จากจุดศูนย์กลางของรถตัวพ่วงถึงแกนเพลาท้ายของรถตัวพ่วง (h) ที่ 3.5 เมตร เมื่อเพิ่มน้ำหนักของรถบรรทุกพ่วงขึ้นจะทำให้ค่าความเสถียรลดลง และการเพิ่มน้ำหนักของรถลากจึงจะทำให้ค่าความเสถียรลดลง เนื่องมาจากการกระจายน้ำหนักทำให้ด้านท้ายของตัวรถพ่วง เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอาจจะทำให้เกิดการลื่นไถลออกจากเส้นทางได้และจะทำให้เกิดการกลับคืนสภาวะเสถียรได้ช้า ในส่วนนี้ได้ น้ำหนักของรถลากจึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ เมื่อเทียบจากน้ำหนักบรรทุกพ่วงที่ 25000 กิโลกรัมจะมีค่าความเสถียรที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับที่น้ำหนักบรรทุกกึ่งพ่วงทั้งหมด การเปรียบเทียบพิกัดและขนาดที่ได้จากการคำนวณนำมาเปรียบเทียบกับขนาดและพิกัดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งในปัจจุบันโดยการคำนวณกำหนดให้เป็นรถยนต์ลากจูง ฮีโน่ รุ่น เอฟเอ็ม 211 โดยมีขนาดและพิกัดดังตารางที่ 6.1

จากการเปรียบเทียบผลของการคำนวณพิกัดและขนาดใหม่ที่ได้มานั้นจะมีความเสถียรที่ดีกว่าแบบเก่า จากรูปที่ 5.14 การลื่นไถลไปทางด้านข้างของตัวรถจะน้อยกว่าแบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และที่รูปที่ 5.15 จะพิจารณาว่าการเหวี่ยงของตัวรถแบบใหม่มีการเหวี่ยงของตัวรถน้อยกว่าแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นผลมาจากการลื่นไถลจากด้านข้างต่ำ และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่มีผลต่อการเลี้ยวมากคือการที่มุมระหว่างรถลากจูงทำกับรถพ่วง ซึ่งแบบใหม่นี้สามารถที่จะช่วยให้มุมเลี้ยวที่น้อยและกลับคืนสู่แนวการเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าแบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบขนาดและพิกัดแบบใหม่กับรถลากจูงที่ใช้ปัจจุบัน

ขนาดและ พิกัด	ระยะใหม่	ระยะรถยนต์ลากจูง ฮีโน่ รุ่น เอฟเอ็ม 211
a ระยะห่างระหว่าง แกนเพลาล้อหน้าของตัวลากถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถลาก	-	2.43
b หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรถตัวลากถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถลาก	-	2.05
d หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรถลากถึงจุดยึดตัวรถพ่วง	-	0.623
e หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดยึดของตัวรถพ่วง ถึงจุดศูนย์กลางของตัวรถตัวพ่วง	6.50	5.50
h หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวรถพ่วงถึงแกนเพลาล้อหลังของตัวรถพ่วง	3.50	3.25

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงการคำนวณและการจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปแบบพิกัดและขนาดยังไม่ได้นำไปทดลองกับรถยนต์บรรทุกกึ่งพ่วงจริง อาจจะต้องนำการศึกษาการเคลื่อนที่อีกหลายแบบเพื่อให้ เหมือนการใช้งานจริง

2. การเคลื่อนที่ของรถยนต์และรถบรรทุกกึ่งพ่วงยังมีเรื่องเกี่ยวกับระบบยางและพื้นของถนนจะยังไม่ได้นำมาคำนวณ

3. ในระบบการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกกึ่งพ่วงยังมีส่วนประกอบเกี่ยวกับขนาดและพิกัดอีกมากมายที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุ งานวิจัยนี้เป็นการเริ่มต้น เพื่อศึกษาเกี่ยวกับน้ำหนักรถบรรทุกพ่วงที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

- 1 Katsushi M , Hiroyuki S 1998 **A study on heavy duty truck stability control by braking force control** : JSAE Review 20 (1999)87-91
- 2 Masato A, 1998 **A theoretical analysis on vehicle behaviors in acceleration and braking** : Ikutoku Technical University Atsugi Japan
- 3 Pinhas B **Vehicle Dynamic** 1998 : Engineering and Management Institute ,1700 Third Avenue ,Flint Michigan U.S.A
- 4 D.J.M. Sampson 2002 **Active roll control of Articulated Heavy Vehicle** : Technical Report CUED/C-Mech/TR 82
- 5 รศ.ดร.เดช พุทธรเจริญทอง 1996 **การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน** : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ 431/5 ประชากรายภูมิร่ำเพ็ญ เขตห้วยขวาง กรุงเทพ 10320
- 6 William T.Thomson and Marie Dillon Dahleh 1998 **Theory of Vibration with Application** fifth Edition : by Prentice-Hall ,Inc
- 7 John C.Dixon 1996 **Tires , Suspension and Handling** : Second Edition Senior Lecturer in Engineering Mechaics The Open University , Great Britain
- 8 Fox R.L. **Optimization Methods for Engineering Design.** 2 nd ed. London: Addison-Wesley Publishing Company.1973.
- 9 ยรรยง ศรีสม และ สมโชติ รัตน์ผุสดีกล. **การวิจัยดำเนินงานเบื้องต้น.** กรุงเทพฯ: เอเชียปริ้นท์. 2529.
- 10 Rao S.S. **Engineering Optimization.** New York: John Wiley & Sons Inc. 1996.
- 11 Rekaitis G.V. et.al. **Engineering Optimization.** New York: John Wiley & Sons Inc.1983.
- 12 Pike R.W. **Optimization for Engineering Systems.** New York: Van Nostrand Reinhold Company. 1986.
- 13 วิจิตร ตันทุสุทธิ และคณะ. **การวิจัยดำเนินงาน.** กรุงเทพฯ: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด (มหาชน). 2539.
- 14 สมชาย วงศ์วิเศษ. **การออกแบบและการหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดทางความร้อน.** พิมพ์ครั้งที่2. กรุงเทพฯ: งานเอกสารและการพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2541.

- 15 Deb K. **Optimization for Engineering Design**. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited. 1995.
- 16 Onwubiko C. **Introduction to Engineering Design Optimization**. United States of America: Prentice-Hall Inc. 2000.
- 17 Nocedal J. and Wright S.J. **Numerical Optimization**. New York: Springer-Verlag New York Inc. 1999.
- 18 Vanderplaats G.N. **Numerical Optimization Technique for Engineering Design**. New York: McGraw-Hill. 1984.
- 19 กรมการขนส่งทางบก กระทรวงคมนาคม , 2541 รายงานโครงการศึกษาความเหมาะสมในการใช้รถพ่วง และรถกึ่งพ่วงเพื่อการขนส่งค่า ฉบับสมบูรณ์ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- 20 กฎกระทรวงคมนาคม 2524 ลักษณะรถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของ
- 21 อารมณี มณีจุฑาภรณ์ 2540 รถอีกปัจจัยหนึ่งของการพัฒนาประเทศ : ยานยนต์ ฉบับที่

ภาคผนวก ก.

ผนวก ก

กฎระเบียบ มาตรฐาน ข้อบังคับ

รถพ่วงได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการขนส่งสินค้าในประเทศไทย เพราะเนื่องจากความสามารถในการตอบสนองความต้องการในการขนส่ง ทั้งทางด้านน้ำหนักบรรทุก และปริมาณในการขนส่งเป็นอย่างดี โดยเริ่มมีการนำมาใช้ในประเทศไทยมานานกว่าหลายสิบปีมาแล้ว ในปัจจุบันแนวโน้มการใช้รถพ่วงในการขนส่งเพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากมีการนำรถพ่วงมาใช้มากขึ้นจึงเริ่มมีการสนใจในปัญหาที่เกิดขึ้นกับรถพ่วงและกึ่งพ่วง โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านกฎระเบียบและข้อบังคับต่างๆที่จะนำมาสู่ความปลอดภัยทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน

การพิจารณาในด้านความปลอดภัยได้กระทำใน การจำแนกประเภทประเภทและชนิด (class and type) ของรถพ่วง และรถกึ่งพ่วง ตลอดจนเข้าใจหลักการทำงานเชิงชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องอย่างถูกต้อง เพื่อศึกษา เกี่ยวกับ น้ำหนักบรรทุก และขนาด ของรถพ่วง และรถกึ่งพ่วง ที่ใช้กันอยู่ในกลุ่มประเทศประชาคมยุโรป อเมริกา และที่กำหนดในมาตรฐาน ไอ เอส โอ (ISO) เปรียบเทียบกับที่กำหนดใช้ในประเทศไทย

การพิจารณาในด้านความปลอดภัยได้กระทำใน ซึ่งเป็นการศึกษาจาก ข้อมูลทางสถิติของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากการใช้รถพ่วง และกึ่งพ่วง ในประเทศไทย จากนั้นนำไปเปรียบเทียบ ข้อมูลที่คล้ายกันกับที่เกิดขึ้นในต่างประเทศ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะชี้ให้เห็นถึงสาเหตุที่เป็นปัจจัยหลักของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้น จากนั้นนำเอาผลที่ได้ มาพิจารณาถึงแนวทางในการป้องกัน ที่จะช่วยลดและหรือป้องกัน อุบัติเหตุจากรถพ่วง และกึ่งพ่วง ส่วนสุดท้ายของบทนี้จะกล่าวสรุป ถึงผล

การศึกษาเปรียบเทียบ เพื่อเสนอแนะแนวนโยบายสำหรับเพิ่มเติม ปรับปรุง เปลี่ยนแปลง กฎระเบียบ เพื่อกำกับ และดูแลการใช้งานของรถพ่วง และรถกึ่งพ่วงในการขนส่งสินค้า

เราสามารถรถบรรทุกที่วิ่งตามท้องถนน สามารถแบ่งประเภทออกไปได้หลายอย่าง และหลายแบบ แล้วแต่ความประสงค์ของว่ารถบรรทุกนั้นจะนำมาใช้งานในงานประเภทใด แต่กรมการขนส่งทางบกได้แบ่งประเภทไว้ 3 ประเภทใหญ่ คือ

- 1 รถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร ซึ่งได้แก่ รถเมล์ รถขนส่ง รถทัวร์ ทั้งแบบปรับอากาศ และไม่ปรับอากาศ ซึ่งจะแบ่งตามจำนวนผู้โดยสาร
- 2 รถขนาดเล็ก หมายถึง รถนั่งส่วนบุคคล

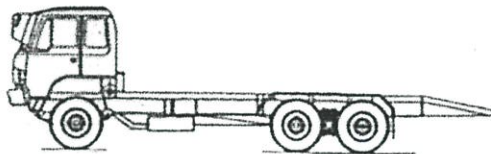
- 3 รถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์ และ สิ่งของ รถชนิดนี้จะไม่สามารถนำไปขนส่งคน หรือนำไปเป็นรถโดยสาร อนุญาตให้ใช้เฉพาะการขนส่งสัตว์และสิ่งของเท่านั้น เช่น สิบล้อ หกล้อ รถพ่วง เป็นต้น

นิยาม และลักษณะ ที่เกี่ยวกับ รถพ่วง รถกึ่งพ่วง และ ส่วนที่เกี่ยวข้อง

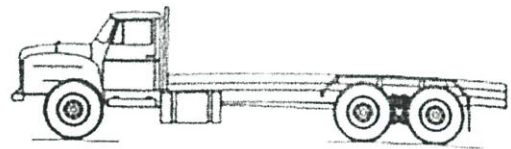
จากกฎกระทรวงคมนาคม ฉบับที่ 4 ข้อ 11 พ.ศ 2524 ที่ว่าด้วยเรื่อง “ ลักษณะรถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของ” ได้แบ่งลักษณะของรถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์ หรือ สิ่งของออกเป็น 9 ลักษณะ โดยรถพ่วง และ รถกึ่งพ่วง จัดอยู่ในลักษณะที่ 6-9 ซึ่งจำกัดความได้ดังนี้

ลักษณะที่ 1 คือ รถกระบะบรรทุก

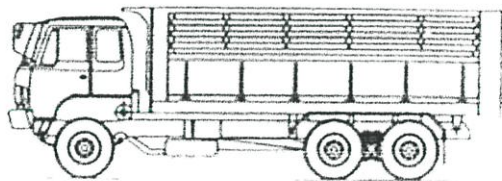
ลักษณะของรถกระบะบรรทุก รถซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการบรรทุกทั้งสิบล้อและหกล้อ ที่มีลักษณะเป็นกระบะ โดยอาจจะมีหลังคาหรือไม่มีก็ได้ รถที่มีเครื่องยนต์สำหรับยกของ จะเป็นบรรทุกในกระบะนั้น รถบรรทุกที่กระบะสามารถยกเทได้ และรวมถึงรถที่มีฝากระบะ ด้านข้างและด้านท้าย



รถกระบะบรรทุกท้ายเตี้ย



รถกระบะบรรทุกพื้นเรียบ



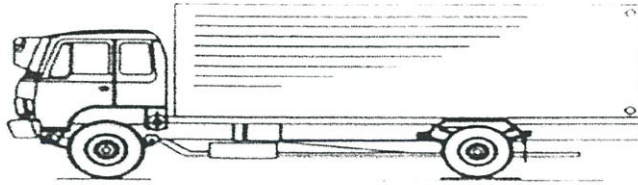
รถกระบะบรรทุกมีถังเสริม

รูปที่ ก.1 รถกระบะลักษณะ 1 (รถกระบะบรรทุก)

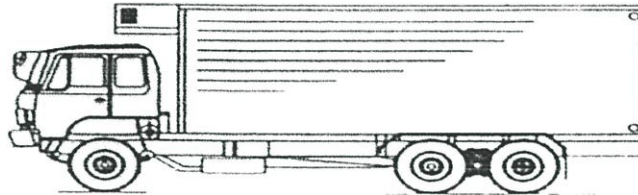
ลักษณะที่ 2 คือ รถตู้บรรทุก

ซึ่งเป็นรถที่มีลักษณะเป็นตู้ทึบ มีหลังคาถาวร ตัวตู้จะเป็นตอนเดียวกับห้องโดยสาร หรือแยกกันก็ได้ ตัวตู้บรรทุกก็มีแบบที่เป็นตู้สำหรับบรรจุสินค้าทั่วไป ซึ่งตู้ทึบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมธรรมดา เรียกว่า รถบรรทุกตู้แห้ง อีกแบบหนึ่งเป็นแบบสำหรับบรรจุอาหารทะเล

หรือสินค้าแช่เย็น จำเป็นจะต้องมีเครื่องทำความเย็น จึงเรียก รถบรรทุกตู้แช่เย็น รถบรรทุกจะมีประตู ปิด - เปิด ด้านใดก็ได้



รถบรรทุกตู้แช่เย็น



รถบรรทุกตู้แช่เย็น

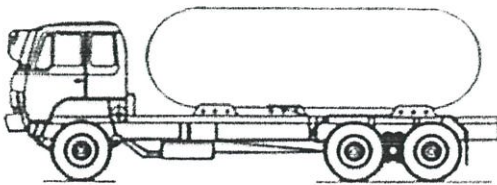
รูปที่ ก.2 รถกระบะลักษณะ 2 (รถตู้บรรทุก)

ลักษณะที่ 3 คือ รถบรรทุกของเหลว

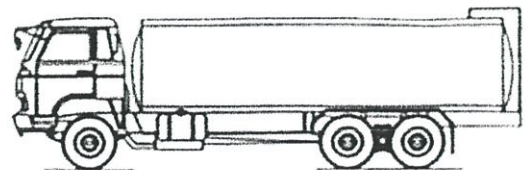
เป็นรถซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ เพื่อการบรรทุกที่มีลักษณะเป็นถังสำหรับบรรจุของเหลว เช่น น้ำ , นม หรือของเหลวอื่นๆ ที่ไม่ใช่เชื้อเพลิง วัสดุคืบ หรือ สารไวไฟ หรือวัสดุอันตราย

ลักษณะที่ 4 คือ รถบรรทุกวัสดุอันตราย

จะมีลักษณะที่ใช้ในการบรรทุกวัสดุที่เป็นอันตรายต่างๆ เช่น ก๊าซ สารเคมี น้ำมันเชื้อเพลิง และวัสดุไวไฟ เพราะฉะนั้นรถบรรทุกประเภทนี้จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อให้มีความเหมาะสม



รถบรรทุกก๊าซ

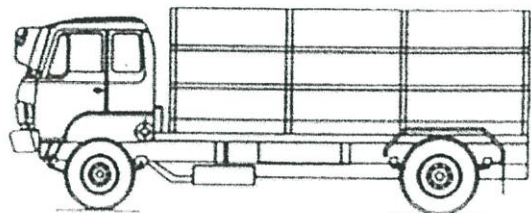


รถบรรทุกน้ำมัน

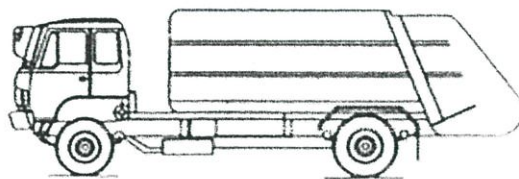
รูปที่ ก.3 รถกระบะลักษณะ 4 (รถบรรทุกวัสดุอันตราย)

ลักษณะที่ 5 คือ รถบรรทุกเฉพาะกิจ

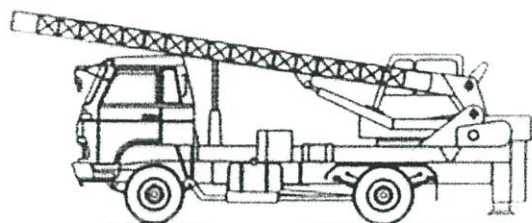
เป็นรถที่ใช้ในการบรรทุกสินค้าเป็นกรณีพิเศษ เป็นรถที่ใช้ในกิจการใดกิจการหนึ่งเท่านั้น เช่น รถผสมคอนกรีต รถบรรทุกเครื่องทุ่นแรง รถบรรทุกขยะมูลฝอย



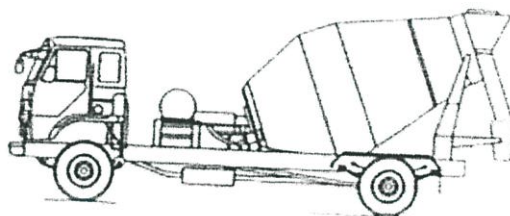
รถบรรทุกหจกเครื่องค้ำ



รถบรรทุกขยะมูลฝอย



รถกระบะรถบรรทุกเครื่องทุ่นแรง



รถผสมคอนกรีต

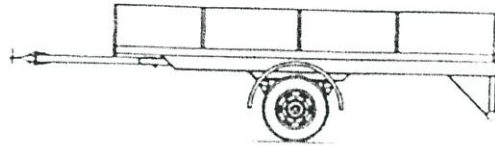
รูปที่ ก.4 รถกระบะลักษณะ 5 (รถบรรทุกเฉพาะกิจ)

ลักษณะที่ 6 คือ รถพ่วง

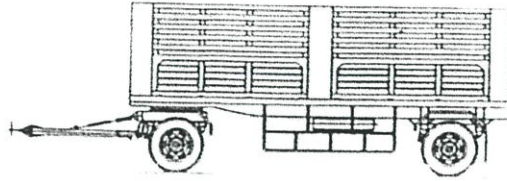
ซึ่งหมายถึงรถที่ไม่มีแรงขับเคลื่อนในตัวเอง จำเป็นต้องใช้รถอื่นลากจูง และนำหน้ารถ รวมนำหน้าบรรทุกทั้งหมดลงบนเพลาล้อสมบูรณ์ ในตัวเอง

ลักษณะที่ 7 คือ รถกึ่งพ่วง

ซึ่งหมายถึงรถที่ไม่มีแรงขับเคลื่อนในตัวเอง จำเป็นต้องใช้รถอื่นลากจูง และ นำหน้ารถ รวมนำหน้าบรรทุกบางส่วนเฉลี่ยลงบนเพลาล้อของรถคันลากจูง สัดส่วนของรถกึ่งพ่วงเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ออกแบบ ผู้สร้าง และผู้ใช้รถกึ่งพ่วงจะต้องเรียนรู้ เพราะว่า ถ้าไม่เรียนรู้ก่อนสร้าง เมื่อนำไปจดทะเบียน อาจจะไม่สามารถจดทะเบียนได้ หรืออาจจะต้องนำกลับมาแก้ไข เพื่อให้ตรงตามข้อกำหนดที่ทางราชการได้กำหนดไว้

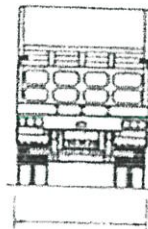
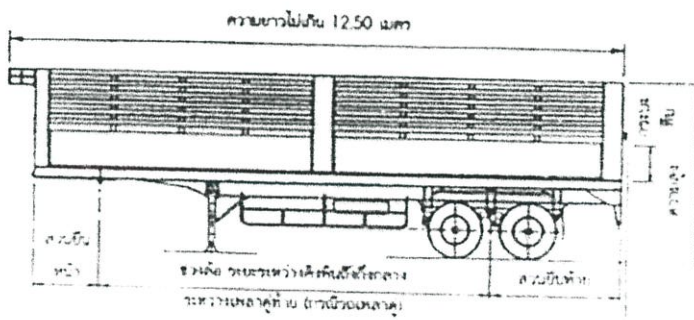


รถพ่วง 1 เพลา



รถพ่วง 2 เพลา

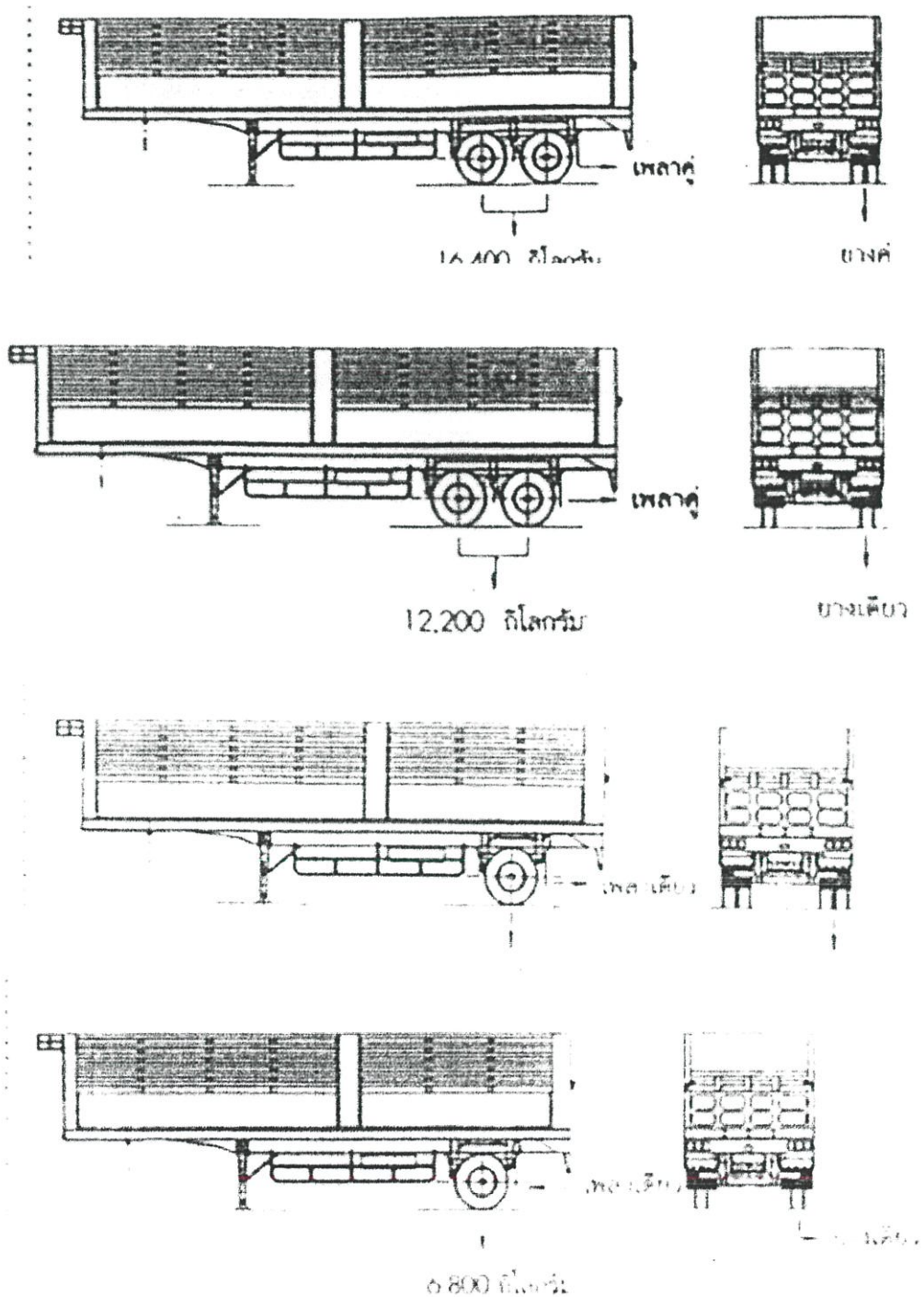
รูปที่ ก.6 รถกระบะลักษณะ 6 (รถบรรทุกพ่วง)



ตัวหรือรถกระบะจะ ยื่นเกิน
ส่วนยื่นค้ำของพ่วงที่ ยื่นได้
ไม่เกิน 15 เซนติเมตร

แสดงขนาดสัดส่วนของรถพ่วง

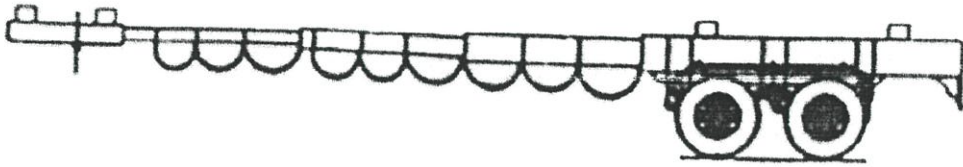
และรถกึ่งพ่วงนี้ พิกัดบรรทุกมากน้อยเพียงใด ก็ขึ้นอยู่กับการใช้เพลาล้อและยาง ซึ่งเมื่อเมื่อคำนวณการกระจายน้ำหนักที่กดลงบนเพลาล้อต้องตามข้อกำหนด ดังแสดงในรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 แสดงพิกัดน้ำหนักที่ลงเพลาล้อ

ลักษณะที่ 8 คือ รถกึ่งพ่วงบรรทุกวัสดุยาว

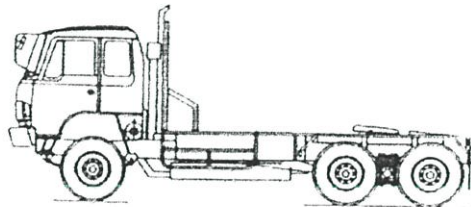
ซึ่งหมายถึง รถกึ่งพ่วงที่มีลักษณะเพื่อใช้บรรทุกสิ่งของที่มีความยาว โดยมีโครงโลหะสามารถปรับความยาวของช่วงล้อระหว่างรถลากจูงกับรถกึ่งพ่วงได้ รถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของ



รูปที่ ก.8 รถกระบะลักษณะ 8 (รถกึ่งพ่วงบรรทุกวัสดุยาว)

ลักษณะที่ 9 คือ รถลากจูง

ซึ่งหมายถึง รถที่มีลักษณะเป็นรถสำหรับลากจูง รถพ่วง รถกึ่งพ่วง และกึ่งพ่วงบรรทุกวัสดุยาว



รูปที่ ก.9 รถกระบะลักษณะ 9 (รถลากจูง)

ข้อกำหนดในส่วนอื่นๆ เช่น ช่วงล้อ ความสูง พิกัดน้ำหนัก ดูได้จากรูปที่ 3.1-3.7 ซึ่งจากนิยามในกฎกระทรวงดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า ความแตกต่างระหว่าง รถพ่วง และรถกึ่งพ่วง อยู่ที่การกระจายน้ำหนักรวม โดย รถพ่วงจะรับน้ำหนักทั้งหมดลงในตัวเอง ส่วน รถกึ่งพ่วง จะกระจายน้ำหนักระหว่างลงบนตัวเองและรถลากจูง

สำหรับมาตรฐาน เอส เอ อี (SAE standard) ที่ว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับนิยาม ของรถบรรทุกและรถบั๊ต (SAE J687 JUN88) ได้ให้คำจำกัดความเกี่ยวกับรถบรรทุกพ่วง (truck tractor)

รถบรรทุกพ่วง

คือรถที่มี หรือไม่มีแรงขับเคลื่อนที่ในตัวเอง (auxiliary motive power) โดยออกแบบให้ลากจูงโดย รถบรรทุก(motor truck) หรือ รถลากจูง (truck tractor) การต่อบรรทุกพ่วงตั้งรูปที่แสดงถึงการให้ระบบตัวเลขเป็นตัวกำหนดจำนวนเพลา (axle) โดยตัวเลขแต่ละตัวเลขจะแสดงถึงจำนวนเพลาของรถแต่ละคัน ตัวเลขตัวแรกจะแสดงถึงจำนวนเพลาของรถต้นกำลัง และตัวเลขตัวที่สองแสดงถึงจำนวนเพลาของรถพ่วง และในกรณีกึ่งพ่วง ก่อนตัวเลขทั้งสองจะมีอักษร S นำหน้าตัวเลข ดังตัวอย่างนี้

2-2S หมายถึง รถลากแบบ 2 เพลา และกึ่งพ่วงแบบ 2 เพลา

2-1 หมายถึง รถบรรทุกแบบ 2 เพลา และ รถพ่วงแบบเพลาเดียว

3-S2-2 หมายถึง รถลากจูงแบบ 3 เพลา รถกึ่งพ่วงแบบ 2 เพลา และรถพ่วงแบบ 2 เพลา

โดยมีรูปแบบพื้นฐาน ของรถบรรทุกพ่วงเป็นดังนี้ คือ

รถกึ่งพ่วง (Semitrailer) หมายถึงรถบรรทุกพ่วง ที่มีเพลาเดียว หรือมากกว่า โดยน้ำหนักของรถรวมน้ำหนักบรรทุกส่วนใหญ่ ตกอยู่ที่คันลากจูง (แบบ 2-S2)

รถพ่วง (full Trailer) หมายถึงรถบรรทุก ที่น้ำหนักรถ และน้ำหนักบรรทุก ตกอยู่ที่ ล้อของตัวเอง (แบบ 2-1 และ 3-S2-2)

รถพ่วงแบบสมดุลย์ (Balanced Full Trailer) หมายถึงรถบรรทุกพ่วง ที่เพลารับภาระ (load carrying axle) อยู่ในแนวกึ่งกลางของตัวรถสินค้า (centerline of the cargo body)

รถแบ่งภาระ (Load-Dividing Dolly) หมายถึงรถบรรทุกพ่วง ที่มีเพลาเดียว หรือมากกว่า ที่ประกอบไปด้วยจานพ่วง (fifth wheel) แขนพ่วง (drawbar) และอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่นๆ ที่จำเป็น โดยยึดอยู่ระหว่างรถลากจูงกับรถกึ่งพ่วง เพื่อลดภาระที่รถกึ่งพ่วงกดลงบนรถลากจูง

รถแปลงพ่วง (Trailer Converter Dolly) หมายถึงรถบรรทุกพ่วง ที่มีเพลาเดี่ยว หรือมากกว่า ที่ประกอบไปด้วยจานพ่วง (fifth wheel), แขนพ่วง (drawbar) และอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่นๆ ที่จำเป็นเพื่อให้สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นรถกึ่งพ่วงเป็นพ่วง

รถพ่วงบรรทุกวัสดุยาว (pole Trailer) หมายถึงรถบรรทุกพ่วง ที่ไม่มีแรงขับเคลื่อนในตัวเอง โดยออกแบบให้ลากจูงด้วย รถบรรทุก หรือรถลากจูง ที่ยึดติดกันโดยใช้ใช้อุปกรณ์ที่มีแรงมั่นคงรถแบบนี้ใช้ในการขนส่งสินค้า ที่มีรูปร่างยาว หรือรูปร่างพิเศษ เช่น เสาท่อ หรือ วัสดุในส่วนโครงสร้าง

จาก Official journal of the European Communities NO.L235/61 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับรถพ่วง

รถพ่วง (Trailer) หมายถึงรถใดๆ ที่ไม่ใช่รถกึ่งพ่วง (semi-trailer) ซึ่งใช้ต่อเชื่อมเข้ากับรถยนต์ (motor vehicle) และเป็นรถเพื่อใช้ในการขนส่งสินค้า

รถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) หมายถึงรถ ซึ่งใช้ต่อเชื่อมเข้ากับรถยนต์ (motor vehicle) ในลักษณะที่บางส่วนของรถกึ่งพ่วงวางอยู่บนรถยนต์ โดยน้ำหนักของรถกึ่งพ่วง และน้ำหนักบรรทุก ส่วนใหญ่ตกลงที่รถยนต์ และรถชนิดนี้เป็นรถเพื่อใช้ในการขนส่งสินค้า

โดยทั่วไปแล้ว คำว่า รถพ่วง และ รถกึ่งพ่วง มีความหมายใกล้เคียงกัน แต่ในรายละเอียดจะแตกต่างกัน ในกฎกระทรวง กล่าวคือ รถพ่วงและรถกึ่งพ่วง หมายถึงรถที่ไม่มีแรงขับเคลื่อนในตัวเอง สำหรับมาตรฐาน SAE และ EC ไม่ได้กำหนดไว้ ขณะเดียวกันกฎกระทรวง กล่าวเพียง น้ำหนักบางส่วน เฉลี่ยตกลงที่รถลากจูง

ข้อกำหนดเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุก และ ขนาดของรถพ่วงและรถกึ่งพ่วง

ข้อกำหนดพิกัดน้ำหนักรวม น้ำหนักบรรทุกสูงสุด สำหรับรถพ่วง และรถกึ่งพ่วง ที่ใช้ในประเทศไทย อยู่ภายใต้การดูแลของกระทรวงคมนาคม โดยกรมการขนส่งทางบก และกรมทางหลวง จากกฎกระทรวงคมนาคม ฉบับที่ 4 ข้อที่ 11 พ.ศ 2524 ด้วยเรื่อง ลักษณะรถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของและประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดิน และผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่อง ห้ามใช้ยานพาหนะโดยที่ยานพาหนะนั้นมีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุก หรือ น้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่กฎหมายกำหนด เดินทางทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดิน และทางหลวงสัมปทาน โดยสรุปในส่วนของพิกัดน้ำหนักรวม น้ำหนักบรรทุกสูงสุด และขนาดของรถพ่วง รถกึ่งพ่วง และ รถลากจูง ตามกฎหมาย[2] แสดงไว้ในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 รถกระบะบรรทุก (ลักษณะ 1 ตามกฎกระทรวง)

ข้อกำหนดของเพลา	น้ำหนักรวมรถ รวมน้ำหนักบรรทุก (ตัน)	น้ำหนักลงเพลาคู่ท้าย (ตัน)
1-1 เพลาใช้ยางเดี่ยว	8.50	6.80
1-1 เพลา ใช้ยางคู่	12.0	9.10
1-2 เพลาใช้ยางเดี่ยว	15.30	12.20
1-2 เพลา ใช้ยางคู่	21.00	16.40
2-1 เพลาใช้ยางเดี่ยว	10.50	6.80
2-1 เพลา ใช้ยางคู่	14.00	9.10
2-2 เพลาใช้ยางเดี่ยว	18.80	12.20
2-2 เพลา ใช้ยางคู่	25.20	16.40

ตารางที่ ก.2 รถพ่วง (Full Trailer) (ลักษณะ 6 ตามกฎกระทรวง)

ข้อกำหนดของเพลา	น้ำหนักรถ รวมน้ำหนักบรรทุก (ตัน)
1 เพลาใช้ยางเดี่ยว	6.80
1 เพลา ใช้ยางคู่	9.10
2 เพลาใช้ยางเดี่ยว	13.60
2 เพลา ใช้ยางคู่	18.20

ตารางที่ ก.3 รถลากจูง (ลักษณะ 9 ตามกฎกระทรวง)

ข้อกำหนดของเพลา	น้ำหนักรวมรถ รวมน้ำหนักบรรทุก (ตัน)	น้ำหนักลงเพลาคู่ท้าย (ตัน)
1-1 เพลาใช้ยางเดี่ยว	8.50	6.80
1-1 เพลา ใช้ยางคู่	12.0	9.10
1-2 เพลาใช้ยางเดี่ยว	15.30	12.20
1-2 เพลา ใช้ยางคู่	21.00	16.40

ตารางที่ ก.4 รถกึ่งพ่วง (Semi-Trailer) (ลักษณะ 7 , 8 ตามกฎกระทรวง)

ข้อกำหนดของเพลลา	น้ำหนักลงเพลลาตู้ท้าย (ตัน)
1 เพลลาใช้ยางเดี่ยว	6.80
1 เพลลา ใช้ยางคู่	9.10
2 เพลลาใช้ยางเดี่ยว	12.20
2 เพลลา ใช้ยางคู่	16.40

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่า รถลากจูง (ลักษณะ 9 ตามกฎกระทรวง) จะมีพิกัดน้ำหนักบรรทุกเท่ากับพิกัดน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดใน รถกระบะบรรทุก (ลักษณะ 1 ตามกฎกระทรวง) เมื่อมีจำนวน และการจัดเพลลาเหมือนกัน ส่วนรถพ่วง และรถกึ่งพ่วง จะเห็นได้ว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกของรถพ่วงจะมากกว่าพิกัดน้ำหนักบรรทุกของรถกึ่งพ่วง เมื่อมีจำนวนเพลลาเท่ากับสองเพลลา

การประกอบรถลากจูงและรถพ่วงในประกาศดังกล่าวกำหนดยานพาหนะชนิดลากจูง และ พ่วง จะประกอบไปด้วยรถลากจูงและตัวพ่วง 1 คัน จะมีพาหนะอื่น ๆ อีกมิได้ จากกฎกระทรวง ฉบับที่ 9 (พ.ศ 2524) ส่วนที่ 3 ขนาดของรถที่ใช้ในการขนส่งหรือสิ่งของกำหนดไว้ดังนี้ [20]

ความกว้าง

เมื่อวัดจากส่วนที่กว้างที่สุดของตัวถังและส่วนประกอบที่ยื่นออกจากตัวถัง แต่ไม่รวมกระจกสำหรับมองด้านข้าง จะต้องไม่เกิน 2.50 เมตร และตัวถังหรือส่วนประกอบตัวถังจะยื่นไม่เกินขอบทางด้านนอกของเพลลาท้ายไม่เกิน 12 เซนติเมตร

ความสูง

เมื่อวัดจากพื้นราบถึงส่วนที่สูงที่สุดของตัวรถ จะไม่เกิน 3.80 เมตร เว้นแต่รถกระบะบรรทุก หรือรถตู้บรรทุกที่มีความกว้างไม่เกิน 2.30 เมตร ให้มีความสูงไม่เกิน 3.0 เมตร

ความยาว

รถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของลักษณะที่ 1 ,ลักษณะ2 ,ลักษณะ 3 ลักษณะ 4 , ลักษณะ 5 , และ ลักษณะ 9 เมื่อวัดจากกันชนส่วนหน้าจนถึงส่วนท้ายสุดของตัวรถ ไม่เกิน 10 เมตร

รถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของลักษณะที่ 6 เมื่อวัดจากกันชนส่วนหน้าไม่รวมแขนพวงถึงสุดท้ายของรถ ต้องไม่เกิน 8 เมตร

รถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของลักษณะที่ 7 ลักษณะที่ 8 เมื่อวัดจากกันชนส่วนหน้าถึงสุดท้ายของรถ ต้องไม่เกิน 12.50 เมตร

ส่วนยื่นหน้า

รถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของลักษณะ 1 ,ลักษณะ 2 ,ลักษณะ 3 ลักษณะ 4 , ลักษณะ 5 , ลักษณะ 6 และ ลักษณะ 9 เมื่อวัดจากส่วนหน้าสุดไม่รวมกันชนถึงศูนย์กลางเพลาล้อหน้า จะต้องไม่เกินกึ่งหนึ่งของช่วงล้อ

ส่วนยื่นหน้าของรถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของลักษณะที่ 7 ลักษณะที่ 8 เมื่อวัดจากส่วนหน้าสุดของรถไม่รวมกันชนถึงศูนย์กลางสลักพวง จะต้องไม่เกินกึ่งหนึ่งของช่วงล้อ

ช่วงล้อ

หมายความว่า ระยะระหว่างศูนย์กลางเพลาล้อหน้าสุดของรถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของลักษณะที่ 1 ,ลักษณะ 2 ,ลักษณะ 3 ลักษณะ 4 ,ลักษณะ 5 , ลักษณะ 6 และลักษณะ 9 หรือศูนย์กลางสลักพวงของรถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของ ลักษณะที่ 7 ลักษณะที่ 8 ถึงศูนย์กลางระหว่างเพลาล้อท้าย ในกรณีที่เป็นเพลาล้อ

ส่วนยื่นท้าย

รถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของลักษณะที่ 1 ,ลักษณะ 2 ,ลักษณะ 3 ลักษณะ 4 ,ลักษณะ 5 , ลักษณะ 6 และ ลักษณะ 9 เมื่อวัดจากส่วนท้ายของตัวถึงส่วนบรรทุกไม่รวมกันชน ถึงศูนย์กลางเพลาล้อท้าย หรือศูนย์กลางเพลาล้อท้าย ในกรณีที่เพลาล้อท้ายคู่ จะต้องมีความยาวไม่เกินกึ่งหนึ่งของช่วงล้อ เว้นแต่รถที่บรรทุกสัตว์หรือสิ่งของเป็นคู่ที่บ และรถที่มีทางขึ้นลงหรือติดตั้งอุปกรณ์ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของ ที่ส่วนท้ายบรรทุกมีความยาวไม่เกินสองในสามของช่วงล้อ

ส่วนยื่นท้ายรถที่ใช้ในการขนส่งสัตว์หรือสิ่งของ ลักษณะที่ 7 ลักษณะที่ 8 เมื่อวัดจากส่วนท้ายสุดของตัวถึงส่วนบรรทุกไม่รวมกันชน ถึงศูนย์กลางเพลาล้อท้าย ในกรณีที่เป็นเพลาล้อจะต้องมีความยาวไม่เกินสองในห้าของช่วงล้อ

ภาคผนวก ข.

ผลงานทางวิชาการที่เกี่ยวกับงานวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

การวิเคราะห์พฤติกรรมการทางไดนามิกซ์ของรถขณะเลี้ยวโค้ง

Dynamic Analysis of Vehicle Cornering Behavior

มงคล มงคลวงษ์โรจน์ และ ปิยวิทย์ มหาโพธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2326-9987 ต่อ 113, โทรสาร 0-2326-9053

Mongkol Mongkolwongrojn and Piyawit Mahapho

Department of Mechanical Engineer, Faculty of Engineer, King Mongkut's institute of Technology Ladkrabang

Tel: (662) 0-2326-9987 ext 113, fax : 0-2326-9053

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการทรงตัวของรถขับเคลื่อนสี่ล้อ ซึ่งในปัจจุบันการขนส่งจำเป็นต้องใช้รถประเภทนี้ และอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นของรถนี้คือการพลิกคว่ำ อันเนื่องมาจากการลื่นไถล โดยการจำลองโมเดลคณิตศาสตร์ทางไดนามิกซ์และแก้ปัญหา โดยวิธี รุนเง-คุตา และ การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถ และผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่สปริงในระบบรองรับมีผลต่อการเคลื่อนที่และการเคลื่อนที่ของรถผ่านสิ่งกีดขวาง รวมทั้งการวิเคราะห์ความเสถียร

Abstract

This paper deals with the study on drive ability of a four wheel vehicles which are mainly used for transportation. The mathematical model of dynamic system has been formulated. In this study, the forth order Runge-Kutta method has been solved numerically for the vehicle. The stability was analysed to obtain optimal design variables.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก จึงได้มีแนวความคิดที่จะศึกษาเพื่อหาว่าตัวแปรใดบ้างเป็นเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุ เนื่องมาจากความไม่เสถียรของตัวรถ โดยปกติขอบเขตของการเถียร ที่มีผลมาจากวิธีทางตัวเลขคำนวณสมการการเคลื่อนที่ และการหาขอบเขตความเสถียรโดยวิธีการแทนตัวแปรต่างๆ Khan (ปี 1992) ได้ศึกษาการเปลี่ยนช่องทางการจราจรของรถ โดยใช้เทคนิคการคำนวณเปรียบเทียบ

การพลิกคว่ำ เป็นปรากฏการณ์ความไม่เสถียรทางพลวัตอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุ มีการศึกษาความเสถียรจากพื้นเอียง โดย Winkler (ปี ค.ศ. 1992) ส่วน George (ปี ค.ศ. 1992)

ซึ่งได้ศึกษาการพลิกคว่ำเช่นกัน ก็พบว่า สาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการพลิกคว่ำเกิดจากห้องขับที่มีระบบกันสะเทือนอิสระ จึงทำให้ผู้ขับที่ไม่ทราบถึงสภาวะของตัวรถที่แท้จริง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถ จะพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของรถในระนาบของถนน ไม่มีการนำการถ่ายเทมวลมาพิจารณา การศึกษานี้ ใช้กรวิธีทางตัวเลขมาคำนวณหาค่าตอบของการเคลื่อนที่ของรถ โดยการใช้ตัวแปรที่เหมือนกัน เช่นการบังคับเลี้ยวเดียวกันเพื่อให้รถทั้งขับเคลื่อนสองล้อ และ สี่ล้อ อยู่ในสภาวะเดียวกันจึงจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ต่างๆ ของการบังคับเลี้ยวจนได้รัศมีความโค้ง เนื่องจากเงื่อนไขของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังมีข้อจำกัด ด้วยสภาพขอบเขตของการตรวจสอบ ดังนั้นการนำตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์หุ่นจำลองทางคณิตศาสตร์ มาปั่งซึ่งโดยตรงนั้นจะทำให้เกิดความไม่เสถียรจึงเกิดความคลาดเคลื่อนกับสภาพความเป็นจริง อย่างไรก็ตามค่าที่สามารถหาได้นั้นจะนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางซึ่งพฤติกรรมเชิงเปรียบเทียบ

2. แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ล้อรถยนต์

ให้ R_{if} และ R_{ir} เป็นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับพื้นถนนที่ล้อหน้าด้านในและล้อทางด้านหลังตามลำดับ R_{of} และ R_{or} เป็นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับพื้นถนนที่ล้อหน้าด้านนอกและที่ล้อหลังด้านนอกตามลำดับ ดังนั้น

$$R_{if} + R_{of} = Wl/b$$

$$R_{ir} + R_{or} = W(1-l/b)$$

เนื่องจาก $R_{if} = R_{of}$ และ $R_{ir} = R_{or}$

$$R_{if} = R_{of} = Wl/2b \quad (1)$$

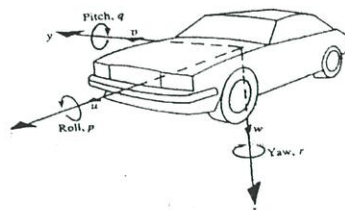
$$R_{ir} = R_{or}$$

$$= W/2(1-l/b) \quad (2)$$

2.1 แรงปฏิกิริยาที่ล้อซึ่งเกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางของรถยนต์ มีทิศทางออกไปออกไปด้านนอกโค้งด้วยมีขนาดเท่ากับ $WV^2/(gC)$ แรงนี้จะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาในแนวระดับ ซึ่งทำให้เกิดแรงคู่ควบที่มีค่าเท่ากับ $WV^2h / (gC)$ และมีแนวโน้มที่จะทำให้รถเกิดการพลิกออกจากโค้ง แรงคู่ควบนี้จะสมดุลโดยแรงคู่ควบที่เกิดจากแรงปฏิกิริยาในด้านแนวดิ่ง ด้านในของทั้ง 2 ล้อ และล้อด้านนอกทั้ง 2 ล้อ

ถ้าแรง P_{IF} และ P_{OF} เป็นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากที่ล้อหน้าด้านในและล้อหน้าด้านนอก ส่วน P_{IR} และ P_{OR} เป็นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากที่ล้อหลังด้านในและล้อหลังด้านนอก



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของรถ

$$(P_{IF} + P_{IR}) = (P_{OF} + P_{OR})a = \frac{W V^2}{g C} h$$

$$P_{IF} = P_{OF} = \frac{W V^2 h I}{g C a 2b} \tag{3}$$

$$P_{IR} = P_{OR} = \frac{W V^2 h (1 - I/b)}{g C a 2} \tag{4}$$

ในขณะที่รถยนต์เลี้ยว การวิเคราะห์จะแสดงผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะเพิ่มรวมเข้าไปด้วยและกระทำลงบนล้อในทิศทางตรงกันข้ามกับการกระจายน้ำหนักลงบนล้อในขณะที่รถยนต์อยู่กับที่ล้อหน้าด้านในและมีแนวโน้มที่จะทำให้รถยนต์เกิดการพลิกออกจากโค้งโดยการพิจารณาผลรวมทั้งหมดของแรงปฏิกิริยาบนล้อด้านในและล้อด้านนอกสามารถกล่าวได้ว่าที่มีผลต่อการพลิกของรถยนต์

- รถยนต์เลี้ยวด้วยความเร็วสูง
- รถยนต์ที่รับภาระบรรทุกที่จุดศูนย์กลางถ่วงอยู่สูง
- รถยนต์รับภาระเกินพิกัด

ระหว่างตัวรถกับล้อจะมีอุปกรณ์อย่างหนึ่ง คือ สปริง ติดตั้งอยู่เพื่อให้ตัวรถกับล้อรถสามารถยืดหยุ่นแก่กันและกัน บางครั้งเรียกระบบนี้ว่า ระบบรองรับหรือระบบสปริง

2.2 การเคลื่อนที่ของตัวรถ

การให้ความสบายแก่ผู้ใช้ นั้นหมายถึงว่าในขณะที่รถเล่นไปนั้นตัวรถที่เคลื่อนที่ไปในระดับเดียวและที่หนึ่งไม่เต็นกระดอนขึ้นลงตลอกทางที่รถเล่นไป แต่ความจริงแล้ว ในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปนั้นจะต้องมีการเร่งและการเบรคเลี้ยวรถ หรือแล่นผ่านถนนขรุขระ ผลจากการทำเช่นนั้นทำให้เคลื่อนที่ในแนวแกนทั้งสามแกนการเคลื่อนที่ คือ ขณะรถยนต์เบรค หรือเร่ง หัวรถจะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลง (pitch) เป็นการเคลื่อนที่ และการในขณะรถแล่นบนถนนขรุขระทำให้รถเดิน (yaw) เป็นการเหวี่ยงซ้ายขวา เป็นการเคลื่อนที่ไปรอบแนวแกนดิ่งของตัวรถ และในขณะรถเลี้ยวจะเกิดแรงเหวี่ยงให้เกิดรถโคลง (roll) เอียงไปมา เป็นเกิดการเคลื่อนไหวรอบแนวแกนขนานตามแกนยาวรถ

2.3 สปริงชนิด

สปริงส่วนใหญ่มักจะได้รับภาระการบิด การเสียหายของสปริงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเฉือน ความเค้นเฉือนจะแปรผันอย่างสมำเสมอจากค่าสูงสุดตรงผิวนอกสุดจนมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดศูนย์กลางของเส้นลวดสปริงจากการวิเคราะห์ภายใต้แรงในแนวแกน การยืดและหดตัวของสปริงสามารถหาได้จากสมการที่ 5

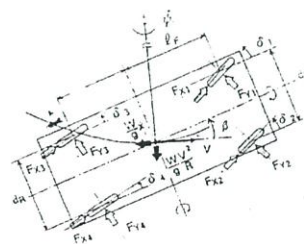
- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสปริงลวด
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดสปริง
- n คือจำนวนขดที่ทำงานของสปริง
- G คือโมดูลัสความแกร่งของวัสดุทำสปริง 73573 N/mm²
- δ คือ การยืดและหดของสปริง

จากการวิเคราะห์ภายใต้แรงในแนวแกน การยืดและการหดของสปริง

$$\delta = \frac{\pi D^2 \pi}{Gd} \tag{5}$$

3. การวิเคราะห์

รูปแสดงพฤติกรรมของการเลี้ยวโค้งของรถยนต์ ภายใต้มุมในการเลี้ยวคงที่ ในขณะที่รถยนต์เร่งและเบรคจะแสดงดังรูปที่ 2 จะใช้เป็นเครื่องมือแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆในส่วนของการเคลื่อนที่ของรถยนต์ และแสดงสมการการเคลื่อนที่ของรถยนต์



รูปที่ 2 free body

Vehicle weight	1150 kg
Vehicle sprung body Weight	1050 kg
Wheel base	3.1 m
Front tread	1.42 m
Rear tread	1.42 m
Height of sprung body c.g. above rotation	0.40 m
Axle load distribution front / rear vehicle	59/41

สมการการเคลื่อนที่ของรถยนต์

$$\frac{W_s}{g} \left(-\ddot{X} \sin \beta + \frac{V^2}{R} \cos \beta \right) h_s + \frac{d_F}{2} (F_{z1} - F_{z2}) + \frac{d_F}{2} (F_{z3} - F_{z4}) + h_F (F_{y1} + F_{y2}) + h_F (F_{y3} + F_{y4}) = 0$$

$$\frac{W_s}{g} \left(-\ddot{X} \cos \beta - \frac{V^2}{R} \sin \beta \right) h_s + I_F (F_{z1} - F_{z2}) + I_R (F_{z3} - F_{z4}) = 0$$

$$\begin{aligned} & I_F \left(\begin{matrix} F_{x1} \sin \delta_1 + F_{y1} \cos \delta_1 \\ + F_{x2} \sin \delta_1 + F_{y2} \cos \delta_1 \end{matrix} \right) \\ & - I_R \left(\begin{matrix} F_{x3} \sin \delta_3 + F_{y3} \cos \delta_3 \\ + F_{x4} \sin \delta_4 + F_{y4} \cos \delta_4 \end{matrix} \right) \\ & + \frac{d_F}{2} \left(\begin{matrix} -F_{x1} \cos \delta_1 + F_{y1} \sin \delta_1 \\ + F_{x2} \cos \delta_1 - F_{y2} \sin \delta_1 \end{matrix} \right) \\ & + \frac{d_F}{2} \left(\begin{matrix} -F_{x3} \cos \delta_3 + F_{y3} \sin \delta_3 \\ + F_{x4} \cos \delta_4 + F_{y4} \sin \delta_4 \end{matrix} \right) = 0 \end{aligned}$$

แรงกระทันหันกระทำในแนวตั้งกับยาง F_{zi}

$$F_{xi} = C + F_{zi}$$

$$F_{yi} = C + F_{zi}$$

$$F_{zi} = F_{z0i} + K_{zi} \zeta_i$$

3.1 สมการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง

$$\begin{aligned} m \ddot{x} + k_1(x - l_1\theta) + k_2(x + l_2\theta) &= K_1 y(t) \\ j \ddot{\theta} + k_1(x - l_1\theta) + k_2(x + l_2\theta) &= k_1 y(t) / l_1' \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} m \ddot{x} + k_1(x - l_1\theta) + k_2(x + l_2\theta) &= k_2 y(t) \\ j \ddot{\theta} + k_1(x - l_1\theta) + k_2(x + l_2\theta) &= k_2 y(t) / l_2' \end{aligned} \tag{8}$$

$$\gamma_T = \left(\frac{1}{1 + AV^2} \right) \frac{V}{L} \delta \tag{9}$$

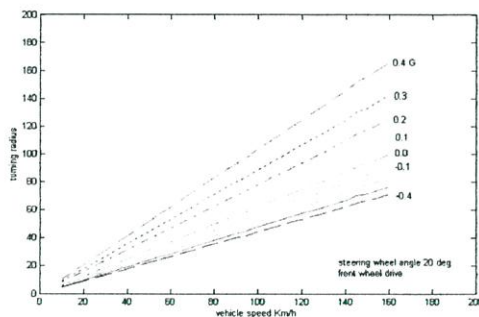
$$A = - \frac{m}{2L^2} \frac{K_f L_f - K_r L_r}{K_f K_r} \tag{10}$$

3.2 การควบคุม target yaw control

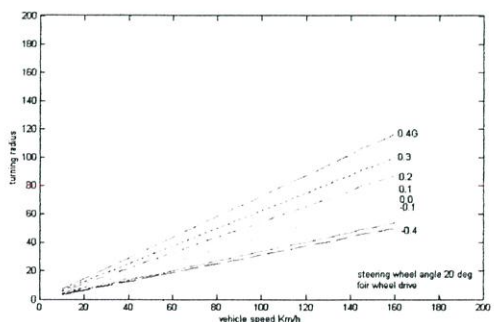
จากการควบคุม yaw moment ระบบต้องใช้ computer ในการหาความเสถียรหรือ[2] ไม่เสถียรของพฤติกรรมของรถ ที่แท้จริงมาจากการคำนวณจากสมการที่ 9, 10 โดยการกำหนดการสรุปจากผลที่แสดงหัวข้อที่ 6

4. ผลการวิเคราะห์

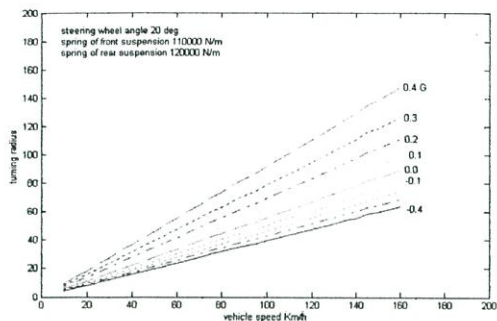
4.1 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ขณะเลี้ยว



รูปที่ 4 แสดงรัศมีการเลี้ยวโค้งรถขับเคลื่อนล้อหน้า



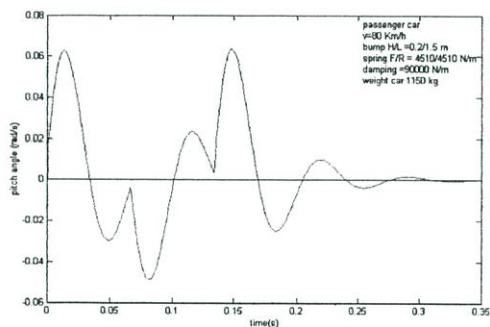
รูปที่ 5 แสดงรัศมีการเลี้ยวโค้งรถขับเคลื่อนล้อหลัง



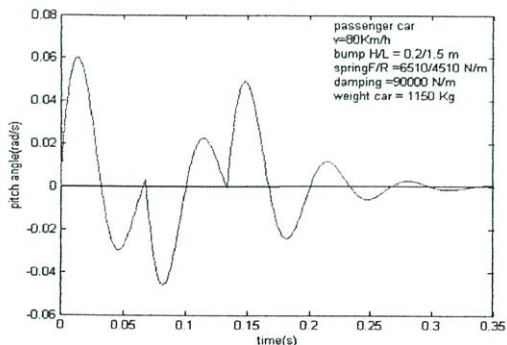
รูปที่ 6 แสดงรัศมีการเลี้ยวเมื่อเปลี่ยนค่าสปริง

รูปที่ 4 เป็นการแสดงรัศมีการเลี้ยวของรถยนต์ที่บังคับเลี้ยว 2 ล้อ ส่วนรูปที่ 5 แสดงรัศมีการเลี้ยวของรถบังคับเลี้ยว 4 ล้อทั้งสองแบบ ใช้มุมในการเลี้ยวล้อที่ 20 องศา, รูปที่ 6 แสดงกราฟแสดงรัศมีการเลี้ยวของรถยนต์ที่เลี้ยว 2 ล้อหน้า โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าของสปริงที่ใช้ เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนของรัศมีการเลี้ยว

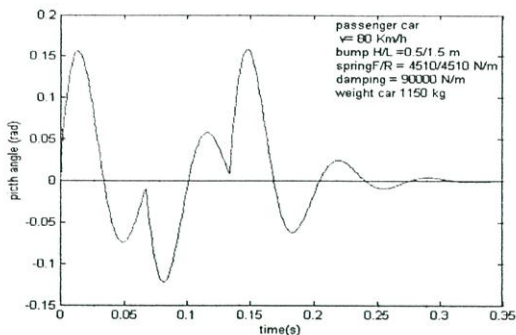
5 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง



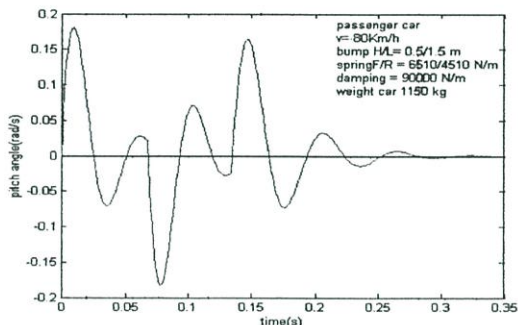
รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางสูง 0.2 เมตร



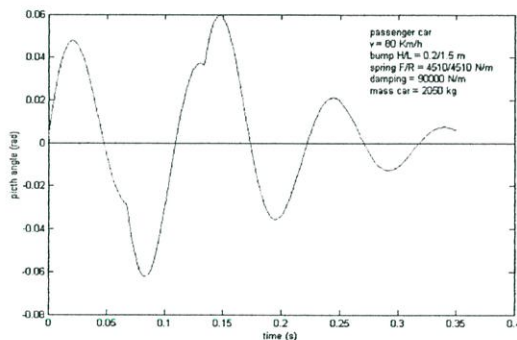
รูปที่ 8 เมื่อเพิ่มค่าของสปริงส่วนของล้อหน้า



รูปที่ 9 เมื่อเพิ่มความสูงของสิ่งกีดขวางเป็น 0.5 เมตร



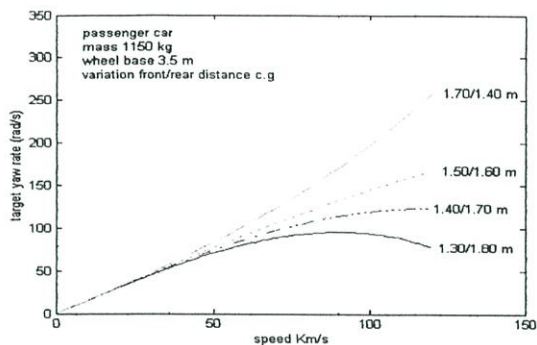
รูปที่ 10 เมื่อเพิ่มค่าความแข็งของสปริง



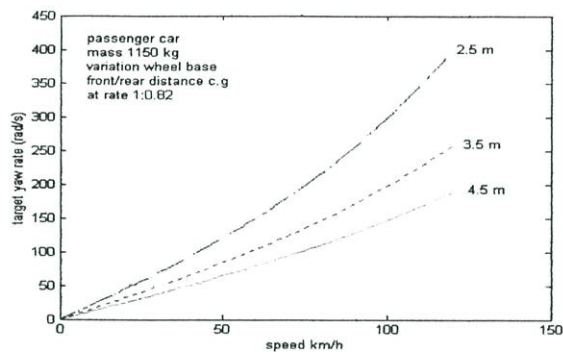
รูปที่ 11 เพิ่มน้ำหนักของรถยนต์

รูปที่ 7 แสดงการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางสูง 0.2 เมตร กราฟจะแสดงมุมที่เกิดขึ้นกับตัวรถเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง, รูปที่ 8 เมื่อเพิ่มค่าความแข็งของสปริงในส่วนของล้อหน้าเพื่อดูความแตกต่างที่เกิดขึ้น, รูปที่ 9 เมื่อเพิ่มความสูงของสิ่งกีดขวางเป็น 0.5 เมตร และรูปที่ 10 เป็นการเพิ่มค่าความแข็งของสปริงในส่วนของล้อหน้า, รูปที่ 11 แสดงการเปลี่ยนของมุมที่เกิดขึ้นเมื่อรถมีมวลเพิ่มขึ้นเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง

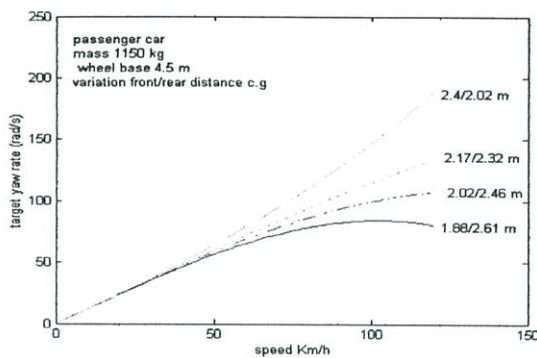
6. ผลแสดงการหาความเสถียร



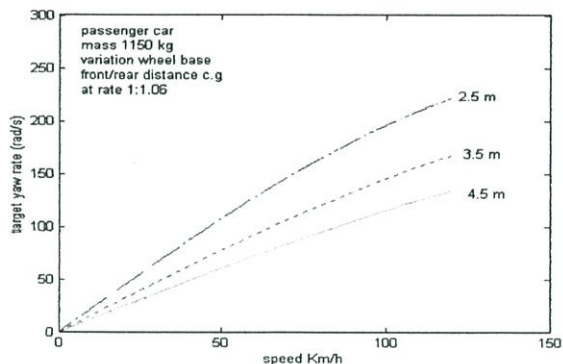
รูปที่ 12 แสดงค่า target yaw ที่ระยะฐานล้อ 3.5 เมตร



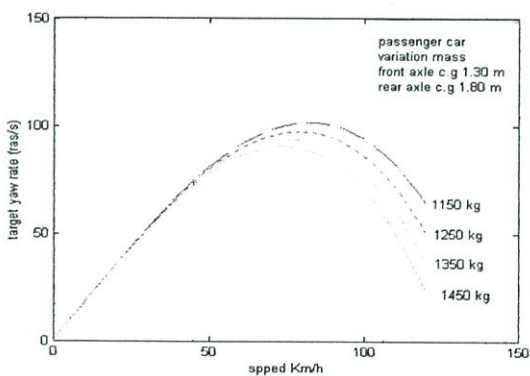
รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างล้อหน้าและหลังที่อัตราส่วน 1:0.82



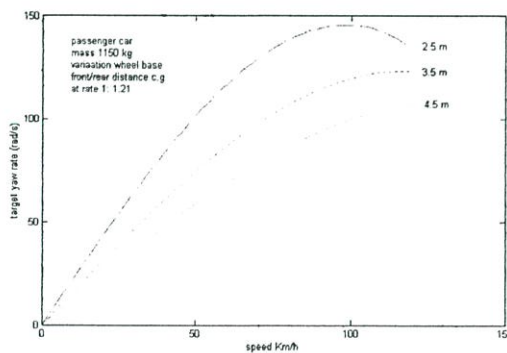
รูปที่ 13 แสดงค่า target yaw ที่ระยะฐานล้อ 4.5 เมตร



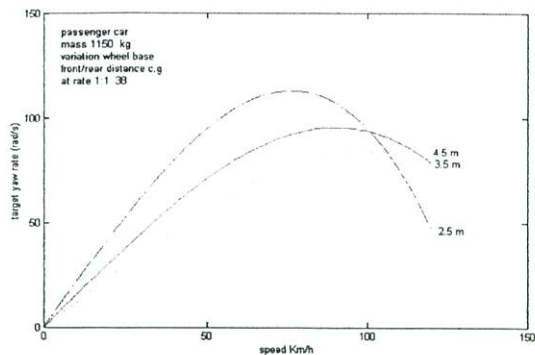
รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างล้อหน้าและหลังที่อัตราส่วน 1:1.06



รูปที่ 14 เมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถ



รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างล้อหน้าและหลังที่อัตราส่วน 1:1.21



รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างล้อหน้าและล้อหลังที่อัตราส่วน 1:1.38

F_{zi}	Tire vertical force	W	Vehicle weight
γ_T	Target yaw rate	L	Wheel base
F_{xi}	Tire longitudinal force	d_R	Rear tread

เอกสารอ้างอิง

- (1) Improvement of vehicle handling by nonlinear integrated control of four wheel steered and four wheel torque, Shinichiro Horiuchi, Kazuyuki Okada; Department of Mechanical Engineering, 1-chome, chiyoda-ku, Tokyo, 101-8308
- [2] A study on heavy duty truck stability control by braking force control ; Katsushi Matsuda, Hiroyuki Shinyo, Masaharu Harada, Kouji Ohata, Kunio Sakata, Mitsubichi moter Corporation, 10 Ohkudara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211, japan
- [3] A theoretical analysis on vehicle cornering behaviors in acceleration and in braking; Masato Abe, Ikutoku Technical University, Atsugi, japan

แสดงค่าการหมุนที่เกิดขึ้นกับตัวรถที่มุมการเลี้ยวที่ 20 องศาที่ ยานความเร็วต่างๆ รูปที่ 12 เป็นการเปลี่ยนแปลงทางด้านความยาวของฐานล้อรถที่ 3.5 เมตรและกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างล้อหน้าและล้อหลังกับจุดศูนย์กลางของตัวรถ , รูปที่ 13 เปลี่ยนแปลงความยาวของฐานล้อเป็น 4.5 เมตร , รูปที่ 14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถยนต์, รูปที่ 15, 16, 17, 18 เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนระยะห่างระหว่างล้อหน้าและล้อหลังกับจุดศูนย์กลางตัวรถที่ความยาวฐานล้อต่างๆ

7. สรุป

การเคลื่อนที่ของรถยนต์ขณะเลี้ยวโค้งจะเป็นการรัศมีของการเลี้ยวของรถยนต์จะพบว่ามีรัศมีการเลี้ยวของรถยนต์แบบขับเคลื่อนสี่ล้อมีรัศมีในการเลี้ยวโค้งที่ความเร็วต่างๆ ได้ดีกว่ารถยนต์แบบขับเคลื่อนสองล้อหน้าขณะของรถยนต์ที่เคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางสิ่งจะกราฟที่แสดงจะพบได้ เมื่อการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางที่สูงการยกตัวของรถจะสูงและจะไปสัมพันธ์กับขนาดค่าของสปริงจะมีส่วนในการยกตัวและยุบตัว การหาความเสถียรของรถในการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของฐานล้อจะมีผลต่อการบิดตัวของรถในขนาดเลี้ยวโค้งจะพบว่าขนาดรถที่มีระยะห่างฐานล้อที่ 3.5 เมตรและระยะห่างล้อหน้าและล้อหลังจากจุดศูนย์กลางของรถที่ 1.30/1.80 ตามลำดับจะมีการเสถียรที่ดีกว่า หรือที่อัตราส่วนระยะห่างที่ 1:1.38 จะมีความเสถียรได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และจะทราบได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของสปริงและฐานล้อจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลง ซึ่งระบบรองรับอื่นๆ จะมีการวิจัยในขั้นต่อไป .

สัญลักษณ์

l_R	Distance from front axle	h_R	rear roll center height
	$c.g$		road surface
l_F	Distance from front axle	h_f	Front roll center
	$c.g$		height road surface
ζ	Tire vertical deflection	\ddot{X}	Longitudinal acceleration
F_{yi}	Tire lateral force	V	Vehicle speed

ภาคผนวก ค.

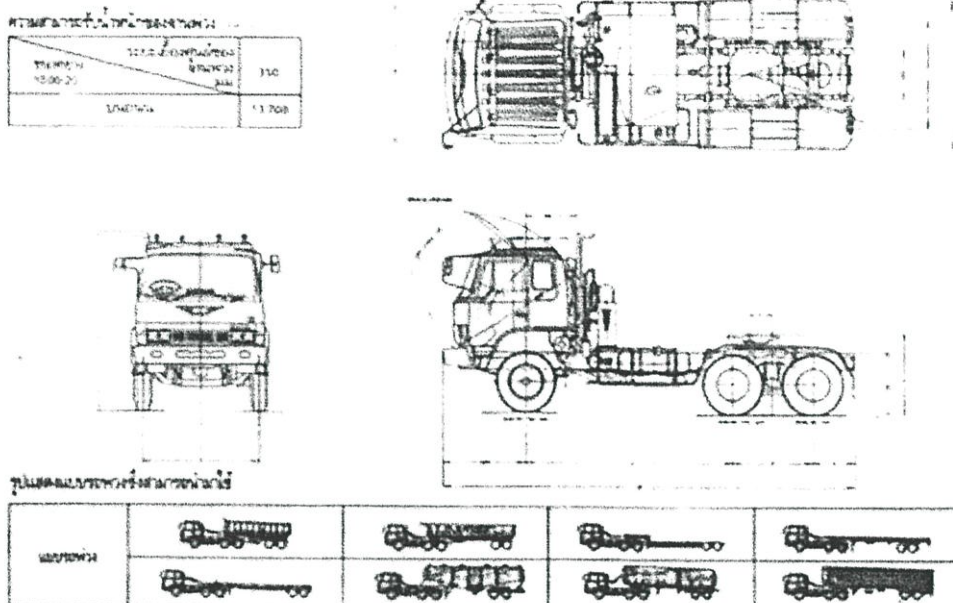
ภาพถ่ายการทดลองและรายละเอียดครบทุก

รถยนต์ลากจูง

(รถยนต์ลากจูงฮิโน่ รุ่น เอฟเอ็ม 211 แบบ 6×4)



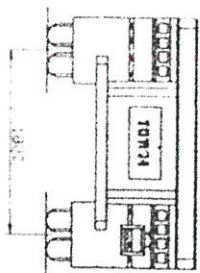
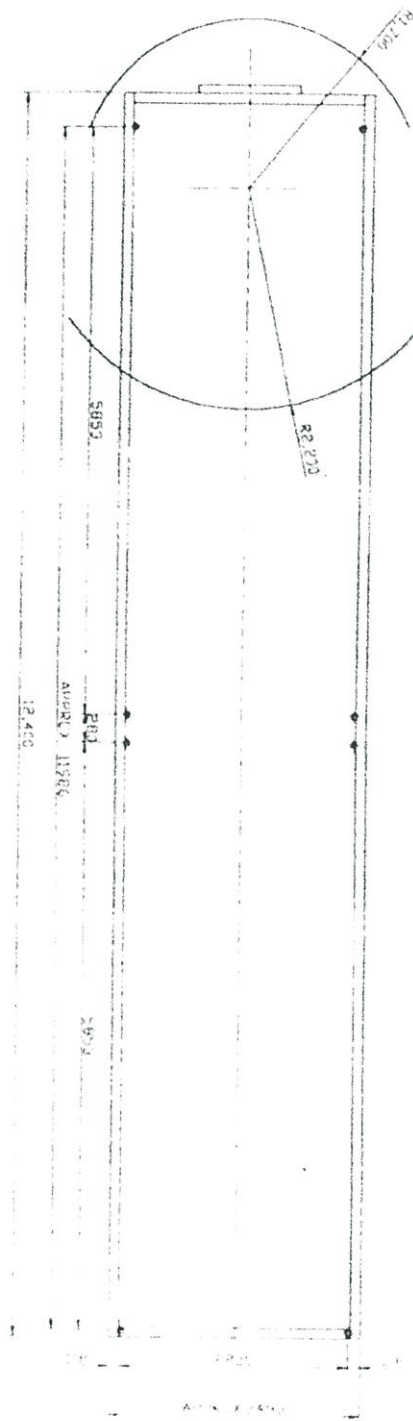
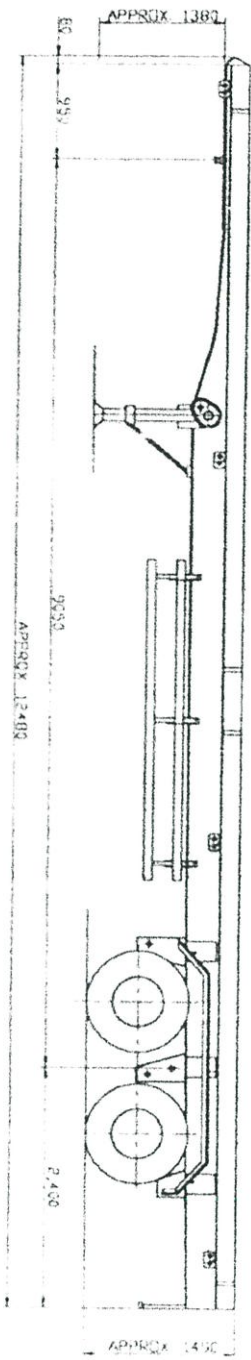
เครื่องยนต์	
ความเร็วสูงสุด	95
ความสามารถขึ้นทางชัน %	14.2
รุ่น	(ฮิโน่ รุ่น เอฟเอ็ม 211 แบบ 6×4)
แรงม้า	220
แรงบิดสูงสุด	62 กิโลกรัมเมตร
แบบเครื่องยนต์	เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ 6 สูบ ระบายความร้อนด้วยน้ำ
ความจุกระบอกสูบ	9419 ซีซี
อัตราส่วนอัด	18.0
เพลาหน้า	แกนเหล็กตัว I รับน้ำหนัก 6500 กก.
เพลาหลัง	ขับเคลื่อนเพลาคู่ รับน้ำหนักได้ 21000 กก.
จานพวง	แกนเดี่ยว มาตรฐาน SAE ผ่านศูนย์กลาง 50.8 มม.



รูปแสดงสัดส่วนของรถลากจูง

ตารางแสดงสัดส่วนและน้ำหนักรถยนต์ลากจูง(รถยนต์ลากจูงฮีโน่ รุ่น เอฟเอ็ม 211 แบบ 6X4)

รุ่น		เอฟเอ็ม 211
น้ำหนักแชลชีด	หน้า	3340 กก.
	หลัง	4000 กก.
	รวม	7340 กก.
รัศมีวงเลี้ยวแคบสุด		74 00 มม.0
ช่วงล้อ		3400 +1300 มม.
ความยาวทั้งหมด		6745 มม.
ความกว้างทั้งหมด		2490 มม.
ความสูงทั้งหมด		2985 มม.
ความกว้างฐานล้อ	หน้า	1875 มม.
	หลัง	1820 มม.
ช่วงท้าย		680 มม.



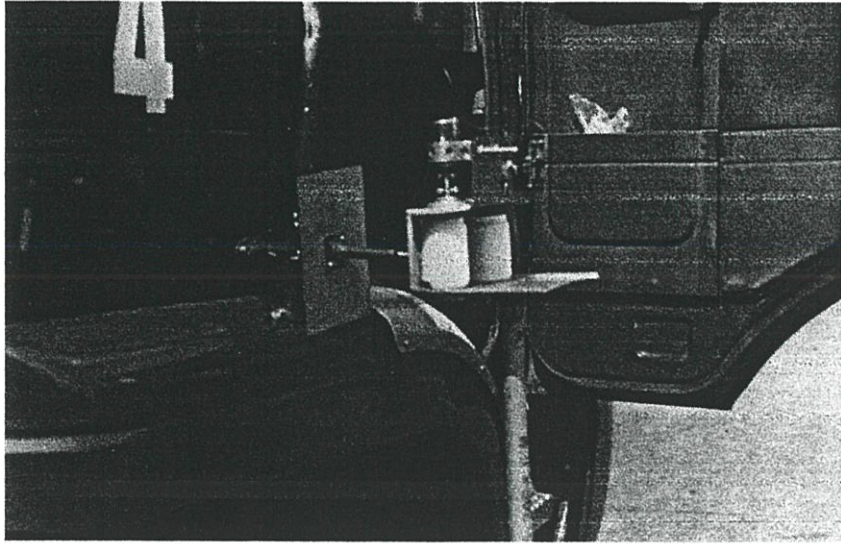
ขนาดและน้ำหนัก	กระบะ ความยาว	12400 มม.
	ความกว้าง	2495 มม.
	ความสูงจากพื้นท้าย รถขณะต่อพ่วง	1490 มม.
	น้ำหนักเปล่า	7500 กิโลกรัม
	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด	60000 กิโลกรัม (น้ำหนักกระจาย)
โครงสร้าง	เมนเฟรมเหล็ก	แบบเชื่อมรูปตัว I 530×195×6×14 มม.
	คานขวางกลาง	เหล็กพับรูปตัว C 350×80×4.5 มม.
	คานริม	เหล็กพับรูปตัว C 150×50×70×8 มม.
	ขอบพื้น	H-BEAM 200×100×5.5×8 มม.
	แผ่นพื้น	เหล็กแผ่น หนา 4.5 มม.
	คานยึด หน้า	H-BEAM 175×90×5×8 มม.
	คานยึด กลาง-หลัง	H-BEAM 175×90×5×8 มม.
	Twist - Lock	TWIST LOCK 8 ตัว

ตารางที่ ค.1 ขนาดและพิกัดรถบรรทุกกึ่งพ่วง

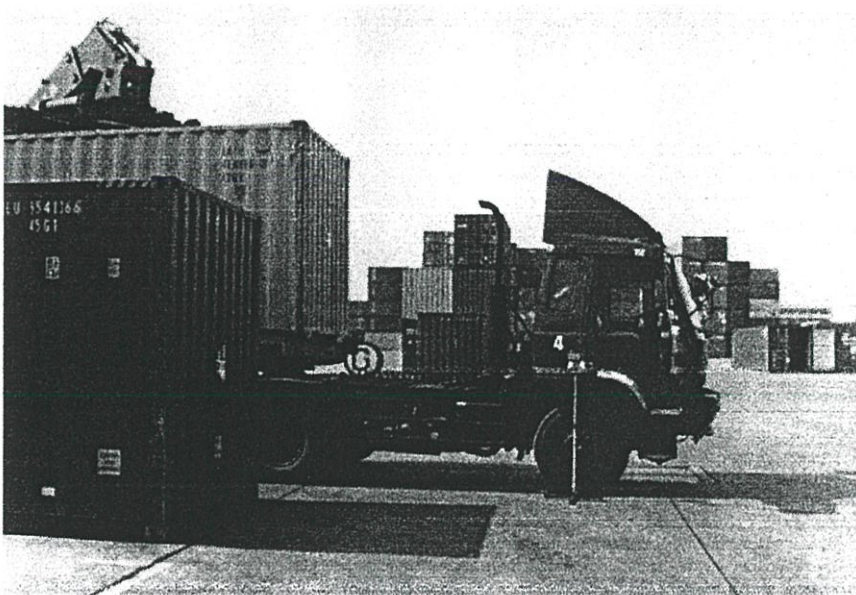
ภาพถ่ายการทดลอง



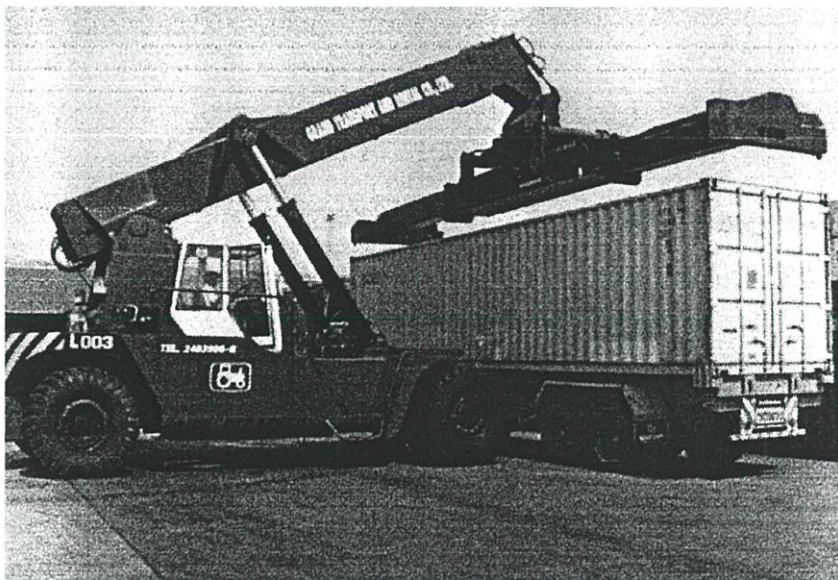
รูปที่ ค.1 ติดตั้งอุปกรณ์



รูปที่ .ค.2 ติดตั้งอุปกรณ์พร้อมการทดลอง



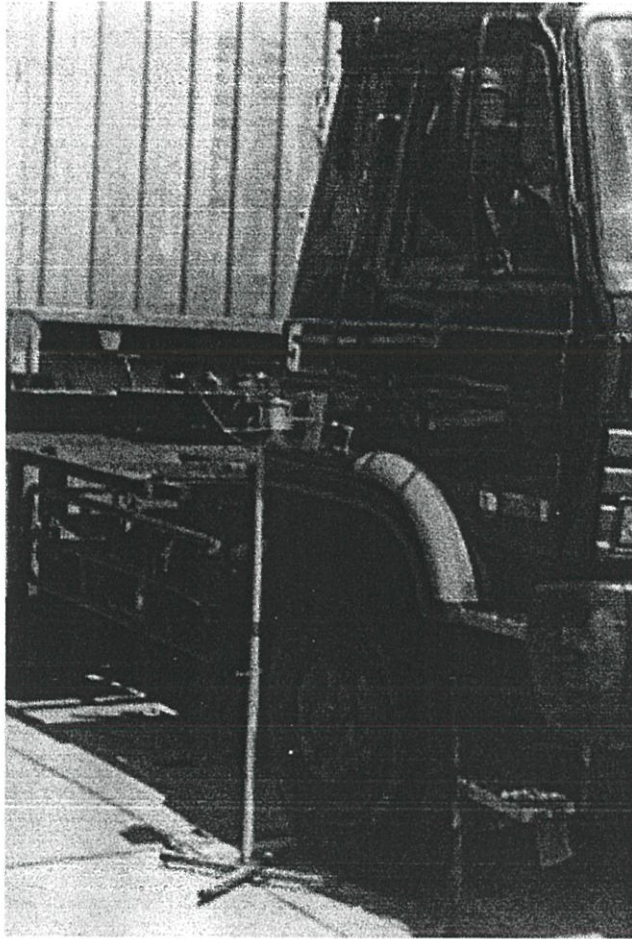
รูปที่ ค.3 ติดตั้งอุปกรณ์พร้อมการทดลอง



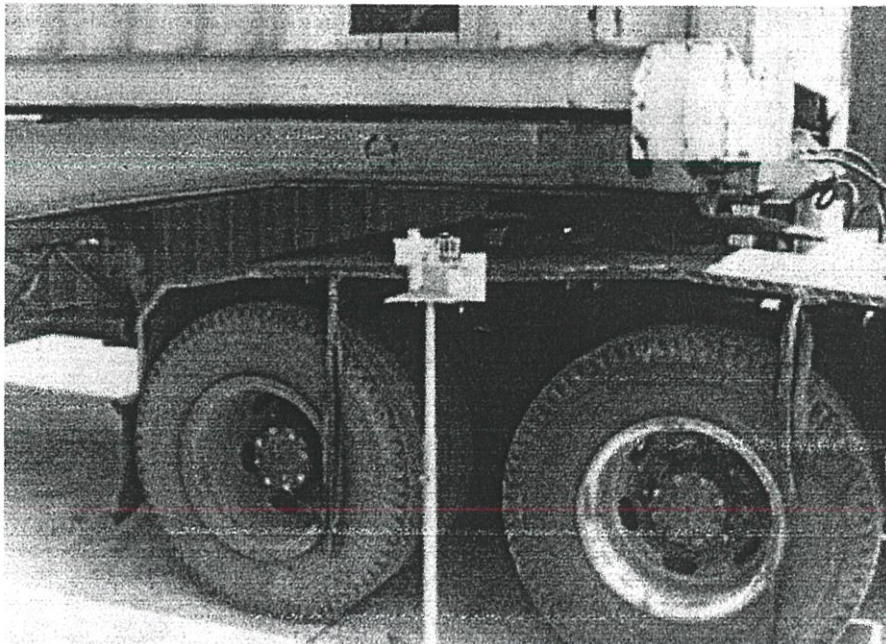
รูปที่ ค.4 ทดลอง



รูปที่ ค.5 ชั่งน้ำหนัก



รูปที่ ค.6 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดที่ 1

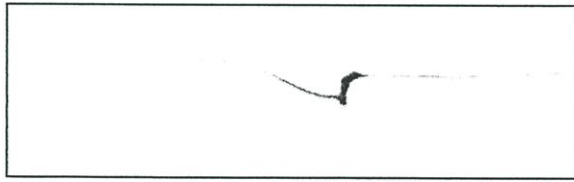


รูปที่ ค.7 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดที่ 2

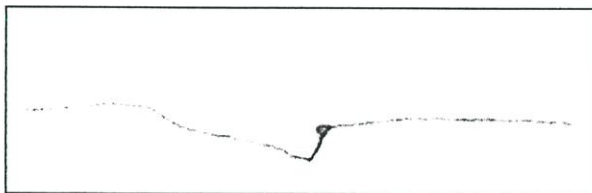


รูปที่ ค.8 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดที่ 3

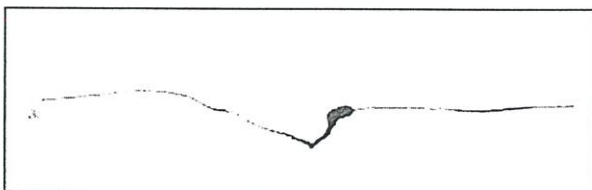
ภาพเส้นกราฟที่ได้จากการทดลอง



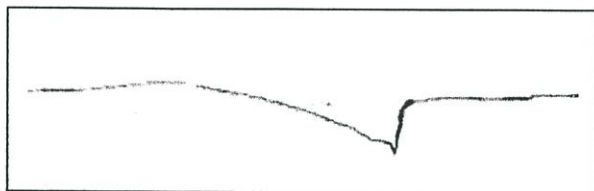
รูปที่ ค.9 ที่ 25000 กิโลกรัม



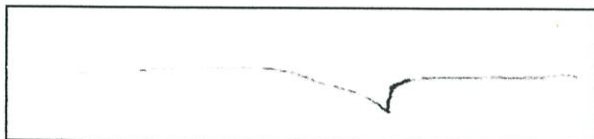
รูปที่ ค.10 ที่ 26500 กิโลกรัม



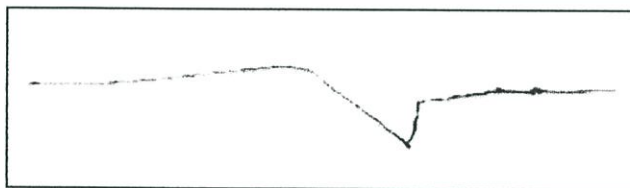
รูปที่ ค.11 ที่ 27000 กิโลกรัม



รูปที่ ค.12 ที่ 32000 กิโลกรัม



รูปที่ ค.13 ที่ 40000 กิโลกรัม



รูปที่ ค.14 ที่ 43000 กิโลกรัม

ภาคผนวก ง.

รายละเอียดวิธีการคำนวณและโปรแกรม

$ \begin{aligned} & (m_1 + m_2) D \\ & - C_3 \left[\frac{(d\theta - v) \sin \psi + 0.5(h + e)\beta \sin^2 \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & - (m_1 + m_2) \beta \\ & - C_3 \left[\frac{U \sin \psi - (h + e)\beta \sin^2 \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & - m_2 \sin \psi D - (m_1 + m_2) V + 2m_2 d\theta + 2m_2 e \cos \psi \theta \\ & + C_3 \left[\frac{Ud + U(h + e) \cos \psi - (V - d\theta)(h + e) \sin \psi - (h + e)\beta \theta \sin \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \sin \psi \\ & - m_2 e \cos \psi D\theta - m_2 e \sin \psi \theta^2 - X_3 \sin \psi - C_3 \alpha_3 \cos \psi \\ & - C_3 \left[\frac{U^2 + (V - d\theta)^2 - (h + e)\beta U \sin \psi - (h + e)\beta (V - d\theta) \cos \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \sin \psi \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & (m_1 + m_2) \beta + C_1 \left(\frac{V + a\theta}{U^2} \right) + C_2 \left(\frac{V - b\theta}{U^2} \right) \\ & - C_3 \cos \psi \left[\frac{(d\theta - V) + (h + e)\beta \cos \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & (m_1 + m_2) D - \frac{C_1}{U} - \frac{C_2}{U} \\ & C_3 \cos \psi \left[\frac{U - (h + e)\beta \sin \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & - m_2 dD - \frac{aC_1}{U} + \frac{bC_2}{U} \\ & - dC_3 \cos \psi \left[\frac{U - (h + e)\beta \sin \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & - m_2 e \cos \psi D + m_2 e \sin \psi \theta \\ & - (h + e) C_3 \psi \left[\frac{(d\theta - V) + (h + e)\beta \cos \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & - m_2 \sin \psi D - m_2 e \cos \psi \theta \\ & - (h + e) C_3 \psi \left[\frac{(d\theta - V) + (h + e)\beta \cos \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & - m_2 e \cos \psi D + (I_2 + m_2 e^2) D - m_2 e \cos \psi U \\ & + m_2 e \sin \psi V + 2m_2 e d \sin \psi \theta \\ & - (h + e) C_3 \left[\frac{-Ud + U(h + e) \cos \psi + (V - d\theta)(h + e) \sin \psi + (h + e)\beta \theta \sin \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & (I + m_2 d^2) D + m_2 e d \cos \psi D - m_2 dU + 2m_2 e d \sin \psi \theta - \frac{a^2 C_1}{U} - \frac{b^2 C_2}{U} \\ & + dC_3 \cos \psi \left[\frac{-Ud + U(h + e) \cos \psi + (V - d\theta)(h + e) \sin \psi + (h + e)\beta \theta \sin \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & m_2 e d \sin \psi \theta + m_2 e d \cos \psi \theta^2 - dC_3 \alpha_3 \sin \psi + dX_3 \cos \psi \\ & + dC_3 \cos \psi \left[\frac{U^2 + (V - d\theta)^2 - (h + e)\beta U \sin \psi - (h + e)\beta (V - d\theta) \cos \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \\ & - m_2 e \cos \psi DU + m_2 e \sin \psi DV - m_2 e d \sin \psi D\theta + m_2 e \cos \psi \\ & V\theta + m_2 e \cos \psi V\theta - m_2 e d \cos \psi \theta^2 \\ & - (h + e) C_3 \left[\frac{U^2 + (V - d\theta)^2 - (h + e)\beta U \sin \psi - (h + e)\beta (V - d\theta) \cos \psi}{(U \cos \psi - (V - d\theta) \sin \psi)^2} \right] \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & 0 \\ & U \\ & V \\ & - C_1 \\ & - C_2 \\ & = \\ & \delta \\ & - aC_1 \\ & 0 \end{aligned} $
---	--	---	---

ค่า F ดูจาก(ภาคผนวก ง.) แทนค่า F ลงในสมการด้านล่าง แล้วแยก PARTIAL-FRACTION ,

$$U = \frac{F_{300}D^{14} + F_{301}D^{13} + F_{302}D^{12} + F_{303}D^{11} + F_{304}D^{10} + F_{305}D^9 + F_{306}D^8 + F_{307}D^7 + F_{308}D^6 + F_{309}D^5 + F_{310}D^4 + F_{311}D^3 + F_{312}D^2 + F_{313}D + F_{314}}{F_{178}D^{15} + F_{179}D^{14} + F_{180}D^{13} + F_{181}D^{12} + F_{182}D^{11} + F_{183}D^{10} + F_{184}D^9 + F_{185}D^8 + F_{186}D^7 + F_{187}D^6 + F_{188}D^5 + F_{189}D^4 + F_{190}D^3 + F_{191}D^2 + F_{192}D + F_{193}}$$

$$V = \frac{F_{149}D^{13} + F_{150}D^{12} + F_{151}D^{11} + F_{152}D^{10} + F_{153}D^9 + F_{154}D^8 + F_{155}D^7 + F_{156}D^6 + F_{157}D^5 + F_{158}D^4 + F_{159}D^3 + F_{160}D^2 + F_{161}D + F_{162}}{F_{81}D^{14} + F_{82}D^{13} + F_{83}D^{12} + F_{84}D^{11} + F_{85}D^{10} + F_{86}D^9 + F_{87}D^8 + F_{88}D^7 + F_{89}D^6 + F_{90}D^5 + F_{91}D^4 + F_{92}D^3 + F_{93}D^2 + F_{94}D + F_{95}}$$

$$\theta = \frac{F_{500}D^{11} + F_{501}D^{10} + F_{502}D^9 + F_{503}D^8 + F_{504}D^7 + F_{505}D^6 + F_{506}D^5 + F_{507}D^4 + F_{508}D^3 + F_{509}D^2 + F_{510}D + F_{511}}{F_{41}D^{12} + F_{42}D^{11} + F_{43}D^{10} + F_{44}D^9 + F_{45}D^8 + F_{46}D^7 + F_{47}D^6 + F_{48}D^5 + F_{49}D^4 + F_{50}D^3 + F_{51}D^2 + F_{52}D + F_{53}}$$

$$\psi = \frac{F_1D^7 + F_2D^6 + F_3D^5 + F_4D^4 + F_5D^3 + F_6D^2 + F_7D + F_8}{F_9D^8 + F_{10}D^7 + F_{11}D^6 + F_{12}D^5 + F_{13}D^4 + F_{14}D^3 + F_{15}D^2 + F_{16}D + F_{17}}$$

แทนค่า F ในสมการที่ได้มาจาก แยก PARTIAL-FRACTION แล้วใช้วิธี Laplace และ Inverse Laplace

$$V = 2.24e^{-2.67154t} - 9.0166e^{-0.633t} + 4.5435e^{-0.4876t} \cos 0.42t + 3.2342e^{-0.1938t} \cos 1.73t - 11.25e^{-0.48t} \sin 0.42t + 6.0031e^{-0.193875t} \sin 1.73t$$

$$\theta = 0.0007272 - 17.818e^{-2.67154t} + 169.525e^{-0.633t} - 165.052e^{-0.4876t} \cos 0.41957t + 14.337e^{-0.1938t} \cos 0.5142t + 43.3155e^{-0.4876t} \sin 0.41957t - 27.984e^{-0.93875t} \sin 0.5142t$$

$$\psi = -0.55678e^{-2.669t} - 0.0366e^{-0.0216t} + 0.9376e^{-0.48t} - 0.3443e^{-0.2325t} [\sin 0.34t + \cos 0.34t]$$

ใช้โปรแกรม matlab

```

R11=(m1+m2);
R13=-m2*e*Fee;
R14=-m2*e*Theta;
R22=(m2+m1);
R23=-m2*e-m2*d;
R24=m2*e*Fee*Theta;
R32=-m2*d;
R33=(I2+m2*d*d)+(m2*e*d);
R34=-m2*e*d*Fee*Theta;
R41=-m2*e*Fee;
R42=-m2*e;
R43=m2*e*d+(I2+m2*e*c);
R44=-m2*e*U+m2*e*Fee*V-m2*e*d*Fee*Theta;
% Calculate S Value
S11=-C3*Fee*(d*Theta-V+(h+e)*Theta)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S13=-
(m1+m2)*V+2*m2*d*Theta+2*m2*e*Theta+C3*Fee*
(U*d+U*(h+e)-(V-d*Theta)*(h+e)*Fee-
(h+e)*d*Theta*Fee)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S14=-m2*e*Fee*Theta^2-X3*Fee-C3*Fee*(U*U+(V-d*Theta)^2-(h+e)*Theta*U*Fee-(h+e)*Theta*(V*d*Theta))/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S22=-C1/U-C2/U-C3*(U-(h+e)*Theta*Fee)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S23=(m2+m1)*U^2*m2*e*Theta*Fee-C1*a/U+C2*b/U-C3*(-U*d-U*(h+e)+(V-d*Theta)*(h+e)*Fee+(h+e)*d*Theta*Fee)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S24=-m2*e*Theta^2-X3-C3*(U*U+(V-d*Theta)^2-(h+e)*U*Theta*Fee-(h+e)*Theta*(V-d*Theta))/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S32=-a*C1/U+b*C2/U+d*C3*(U-(h+e)*Fee*Theta)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S33=-m2*d*U+2*m2*e*d*Fee*Theta-a*a*C1/U-b*b*C2/U+d*C3*(-U*d-U*(h+e)+(V-d*Theta)*(h+e)*Fee+(h+e)*Fee*d*Theta)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S34=m2*e*d*Theta^2+d*X3+d*C3*(U*U+(V-d*Theta)^2-(h+e)*U*Theta*Fee-(h+e)*Theta*(V-d*Theta))/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S41=-m2*e*Theta-(h+e)*C3*((d*Theta-V)+(h+e)*Theta)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;

```

```

S42=-m2*e*Fee*Theta-(h+e)*C3*(U-(h+e)*Theta*Fee)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S43=-m2*e*U+m2*e*Fee*V+2*m2*e*d*Fee*Theta-(h+e)*C3/(-U*d-U*(h+e)+(V-d*Theta)*(h+e)*Fee+(h+e)*Fee*d*Theta)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
S44=m2*e*d*Fee*U*Theta+m2*e*V*Theta-m2*e*d*Theta^2+(h+e)*C3*(U*U+(V-d*Theta)^2-(h+e)*U*Theta*Fee-(h+e)*Theta*(V-d*Theta))/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
% Calculate a12,a21 and a31
a12=-(m2+m1)*Theta-C3*Fee*(U-(h+e)*Theta*Fee)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
a21=(m1+m2)*Theta+C1*(V+a*Theta)/U^2+C2*(V-b*Theta)/U^2-C3*((d*Theta-V)+(h+e)*Theta)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
a31=-m2*d*Theta+a*C1*(V+a*Theta)/U^2-b*C2*(V-d*Theta)/U^2+d*C3*((d*Theta-V)+(h+e)*Theta)/(U-(V-d*Theta)*Fee)^2;
% Calculate B1 to B4
B1=0;
B2=-C1;
B3=-a*C1;
B4=0;
% Calculate W Value
W1=R11*R22;
W2=R22*S11;
W3=R11*S22;
W4=S22*S11;
W5=a12*a21;
W6=R23*R11;
W7=R23*S11;
W8=R11*S23;
W9=S23*S11;
W10=a21*R13;
W11=a21*S13;
W12=R24*R11;
W13=R24*S11;
W14=R11*S24;
W15=S24*S11;
W16=a21*R14;
W17=a21*S14;
W18=R32*R11;
W19=R32*S11;

```

$W20=R11*S32;$
 $W21=S32*S11;$
 $W215=a12*a31;$
 $W22=R33*R11;$
 $W23=R33*S11;$
 $W24=R11*S33;$
 $W25=S11*S33;$
 $W26=R13*a31;$
 $W27=a31*S13;$
 $W28=R34*R11;$
 $W29=R34*S11;$
 $W30=R11*S34;$
 $W31=S11*S34;$
 $W32=R14*a31;$
 $W33=a31*S14;$
 $W34=R42*R11;$
 $W35=R42*S11;$
 $W36=R11*S42;$
 $W37=S42*S11;$
 $W38=R41*a12;$
 $W39=a12*R41;$
 $W40=R43*R11;$
 $W41=R43*S11;$
 $W42=R11*S43;$
 $W43=S43*S11;$
 $W44=R13*R41;$
 $W45=R13*S41;$
 $W46=R41*S13;$
 $W47=S13*S41;$
 $W48=R44*R11;$
 $W49=R44*S11;$
 $W50=R11*S44;$
 $W51=S11*S44;$
 $W52=R14*R41;$
 $W53=R14*S14;$
 $W54=R41*S14;$
 $W55=S14*S41;$
 % Calculate F value
 $G1=X1*R11^2*R42-C1*R42*R11^2;$
 $G2=-C1*R11*R42*S11+C1*R11*a12*R41-$
 $C1*S11*R42*R11-X1*R11*R42*S11+X1*R11^2*S42-$
 $X1*R11*a12*R41+X1*S11*R42*R11-C1*R11^2*S42;$
 $G3=-C1*R11*S42*S11+C1*R11*S41*a12-$
 $C1*S11^2*R42-$
 $C1*S11*R42*R11+C1*S11*a12*R41+X1*R11*S42*S11-$
 $X1*R11*S41*a12+X1*S11^2*R42+X1*S11*S42*R11-$
 $X1*S11*a12*R41;$
 $G4=C1*S11*S41*a12+X1*S11*S42*S11-$
 $X1*S11*S42*a12;$
 $G5=W22*W1-W6*W18;$
 $G6=W22*W2+W22*W3+W23*W1+W24*W1-W26*W1-$
 $W6*W19-W6*W20-W7*W18-W8*W18+W10*W18;$
 $G7=W22*W4-$
 $W22*W5+W23*W2+W23*W3+W24*W2+W24*W3+W2$
 $5*W1-W26*W2-W26*W3-W27*W1-$
 $W6*W21+W6*W215-W7*W19-W7*W21-W8*W19-$
 $W8*W20-W9*W18+W10*W19+W10*W20+W11*W18;$
 $G8=W4*W23-W23*W5+W24*W4-$
 $W24*W5+W25*W2+W25*W3-W26*W4+W26*W5-$
 $W27*W2-W27*W3-W7*W21+W7*W215-$
 $W8*W21+W8*W215-W9*W19-W9*W20+W10*W21-$
 $W10*W215+W11*W19+W11*W20;$
 $G9=W25*W4-W25*W5-W27*W4+W27*W5-$
 $W9*W21+W9*W215+W11*W21-W11*W215;$
 $G10=(W40-W44)*W1-W6*W34;$
 $G11=((W40-W44)*W2+(W40-W44)*W3+(W41-$
 $W45)*W1+(W42-W46)*W1)-(W6*W29+W6*W30-$
 $W6*W32+W6*W33+W7*W34+W8*W34-W10*W34);$
 $G12=((W40-W44)*W4-(W40-W44)*W5+(W41-$
 $W45)*W2+(W41-W45)*W3+(W42-W46)*W2+(W42-$
 $W46)*W3)-$
 $(W6*W31+W7*W29+W7*W30+W7*W32+W8*W29+W$
 $8*W30-W8*W32+W9*W34-W10*W29-$
 $W10*W30+W32*W10+W11*W34);$
 $G13=((W41-W45)*W4-(W41-W45)*W5+(W42-$
 $W46)*W4+(W43-W47)*W2+(W43-W47)*W3)-$
 $(W7*W31+W7*W33+W8*W31+W8*W33+W9*W29+W$
 $9*W30-W9*W32-W10*W31-$
 $W10*W33+W11*W29+W11*W30-W11*W32);$
 $G14=((W42-W46)*W5-(W43-W47)*W4+(W43-$
 $W47)*W5)-$
 $(W9*W31+W9*W33+W11*W31+W11*W33);$
 $G15=W28*W1-W12*W18;$
 $G16=(W28*W2+W28*W3+W29*W1+W30*W1-$
 $W32*W1)-$

$$\begin{aligned}
& (W12*W19+W12*W20+W13*W18+W14*W18- \\
& W16*W18); \\
G17= & (W28*W4- \\
& W28*W5+W29*W2+W29*W3+W30*W2+W30*W3+W3 \\
& 1*W1-W32*W2-W32*W3+W33*W1)- \\
& (W12*W21+W12*W215+W13*W19+W13*W20+W14* \\
& W19+W14*W20+W15*W18- \\
& W16*W19+W16*W20+W18*W17); \\
G18= & (W29*W4+W29*W5+W30*W4- \\
& W30*W5+W31*W2+W31*W3+W32*W4- \\
& W32*W5+W33*W2+W33*W3)-(W13*W21- \\
& W13*W215+W14*W21- \\
& W14*W215+W15*W19+W15*W20+W16*W215+W17* \\
& W19+W17*W20); \\
G19= & (W31*W4-W31*W5+W33*W4-W33*W5)- \\
& (W15*W21-W15*W215+W17*W21+W17*W215); \\
G20= & B3*R11*W1-B2*R11*W18; \\
G21= & B3*R11*W2+B3*R11*W3+B3*S11*W1- \\
& B2*R11*W19+B2*R11*W20+B2*S11*W18; \\
G22= & B3*R11*W4- \\
& B3*R11*W5+B3*S11*W2+B3*S11*W3-B2*R11*W21- \\
& B2*R11*W215+B2*S11*W19+B2*S11*W20; \\
G225= & B3*S11*W4-B3*S11*W5-B2*S11*W21- \\
& B2*S11*W215; \\
G23= & (W48-W52)*W1-W12*W34; \\
G24= & (W48-W52)*(W2+W3)+(W49+W50-W53- \\
& W54)*W1-W12*(W35+W36-W38)-W34*(W13+W14- \\
& W16); \\
G25= & (W48-W52)*(W4-W5)+(W49+W50-W53-W54)* \\
& (W2+W3)+(W51-W55)-W2*(W37+W39)-(W13+W14- \\
& W16)*(W35+W36-W38)-(W15-W17)*W34; \\
G26= & (W49+W50-W53-W54)*(W4-W5)+(W51-W55)* \\
& (W2+W3)-(W13+W14-W16)*(W34+W39)-(W15-W17)* \\
& (W35+W36-W38); \\
G27= & (W51-W55)*(W4-W5)-(W37+W39)*(W15-W17); \\
F1= & G1*G5-G20*G10; \\
F2= & G1*G6+G2*G5-G20*G11-G21*G10; \\
F3= & G1*G7+G2*G6+G3*G5-G20*G12-G21*G10; \\
F4= & G1*G8+G2*G7+G3*G6+G4*G5-G20*G13- \\
& G21*G12-G22*G10-G225*G10; \\
F5= & G1*G9+G2*G8+G3*G7+G4*G6-G20*G14- \\
& G21*G13-G22*G12-G225*G11; \\
F6= & G2*G9+G3*G8+G4*G7-G21*G14-G22*G13- \\
& G225*G12; \\
F7= & G3*G9+G4*G8-G22*G14-G23*G13; \\
F8= & G4*G9-G225*G14; \\
F9= & G23*G5-G15*G10; \\
F10= & G23*G6+G24*G5-G15*G11-G16*G10; \\
F11= & G23*G7+G24*G6+G25*G5-G15*G12-G16*G11- \\
& G17*G10; \\
F12= & G23*G8+G24*G7+G26*G6-G15*G13-G16*G12- \\
& G17*G11-G18*G10; \\
F13= & G23*G9+G24*G8+G25*G7+G26*G6+G27*G5- \\
& G15*G14-G16*G13-G17*G12-G18*G11-G19*G10; \\
F14= & G24*G9+G25*G8+G26*G7+G27*G6-G16*G14- \\
& G17*G13-G18*G12-G19*G11; \\
F15= & G25*G9+G26*G8+G27*G7-G17*G14-G18*G13- \\
& G19*G12; \\
F16= & G26*G9+G27*G8-G18*G14-G19*G13; \\
F17= & G27*G9-G19*G14; \\
F18= & F9*G20; \\
F19= & F9*G21+F10*G20; \\
F20= & F9*G22+F10*G21+F11*G20; \\
F21= & F9*G225+F10*G22+F11*G21+F12*G20; \\
F22= & F10*G225+F11*G22+F12*G21+F13*G20; \\
F23= & F11*G225+F12*G22+F13*G21+F14*G20; \\
F24= & F12*G225+F13*G22+F14*G21+F15*G20; \\
F25= & F13*G225+F14*G22+F15*G21+F16*G20; \\
\% & \text{ O THETA} \\
F26= & F14*G225+F15*G22+F16*G21+F17*G20; \\
F27= & F15*G225+F16*G22+F17*G21; \\
F28= & F16*G225+F7*G22; \\
F285= & F17*G225; \\
F29= & G15*F1; \\
F30= & G15*F2+G16*F1; \\
F31= & G15*F3+G16*F2+G17*F1; \\
F32= & G15*F4+G16*F3+G17*F2+G18*F1; \\
F33= & G15*F5+G16*F4+G17*F3+G18*F2+G19*F1; \\
F34= & G15*F6+G16*F5+G17*F4+G18*F3+G19*F2; \\
F35= & G15*F7+G16*F6+G17*F5+G18*F4+G19*F3; \\
F36= & G15*F8+G16*F7+G17*F6+G18*F5+G19*F4; \\
F37= & G16*F8+G17*F7+G18*F6+G19*F5; \\
F38= & G17*F8+G18*F7+G19*F6; \\
F39= & G18*F8-G19*F7; \\
F40= & G19*F8;
\end{aligned}$$

$F41=G5*F9;$
 $F42=G5*F10+G6*F9;$
 $F43=G5*F11+G6*F10+G7*F9;$
 $F44=G5*F12+G6*F11+G7*F10+G8*F9;$
 $F45=G5*F13+G6*F12+G7*F11+G8*F10+G9*F9;$
 $F46=G5*F14+G6*F13+G7*F12+G8*F11+G9*F10;$
 $F47=G5*F13+G6*F14+G7*F13+G8*F12+G9*F11;$
 $F48=G5*F16+G6*F15+G7*F14+G8*F13+G9*F12;$
 $F49=G5*F17+G6*F16+G7*F15+G8*F14+G9*F13;$
 $F50=G6*F17+G7*F16+G8*F15+G9*F14;$
 $F51=G7*F17+G8*F16+G9*F15;$
 $F52=G8*F17+G9*F16;$
 $F53=G9*F17;$
 $F54=W6*F29;$
 $F55=W6*F30+W7*F29+W8*F29-W10*F29;$
 $F56=W6*F31+W7*F30+W8*F30+W9*F29-W10*F30-W11*F29;$
 $F57=W6*F32+W7*F31+W8*F31+W9*F30-W10*F31-W11*F30;$
 $F58=W6*F33+W7*F32+W8*F32+W9*F31-W10*F32-W11*F31;$
 $F59=W6*F34+W7*F33+W8*F33+W9*F32-W10*F33-W11*F32;$
 $F60=W6*F35+W7*F34+W8*F34+W9*F33-W10*F34-W11*F33;$
 $F61=W6*F36+W7*F35+W8*F35+W9*F34-W10*F35-W11*F36;$
 $F508=F26-F37;$
 $F509=F27-F38;$
 $F510=F28-F39;$
 $F511=F285-F40;$
 % VV
 $F62=W6*F37+W7*F36+W8*F36+W9*F35-W10*F36-W11*F35;$
 $F63=W6*F38+W7*F37+W8*F37+W9*F36-W10*F34-W11*F36;$
 $F64=W6*F39+W7*F38+W8*F38+W9*F37-W10*F38-W11*F38;$
 $F65=W6*F40+W7*F39+W8*F39+W9*F38-W10*F39-W11*F38;$
 $F66=W7*F40+W8*F40+W9*F40-W10*F40-W11*F40;$
 $F67=W11*F40;$
 $F68=W6*F18;$
 $F68=W6*F19+W7*F18+W8*F18-W10*F18;$
 $F69=W6*F20+W7*F19+W8*F19+W9*F18-W10*F19-W11*F18;$
 $F70=W6*F21+W7*F20+W8*F20+W9*F19-W10*F20-W11*F19;$
 $F71=W6*F22+W7*F21+W8*F21+W9*F20-W10*F21-W11*F20;$
 $F72=W6*F23+W7*F22+W8*F22+W9*F21-W10*F22-W11*F21;$
 $F73=W6*F24+W7*F23+W8*F23+W9*F22-W10*F23-W11*F21;$
 $F74=W6*F25+W7*F24+W8*F24+W9*F23-W10*F24-W11*F23;$
 $F75=W6*F26+W7*F25+W8*F25+W9*F24-W10*F25-W11*F24;$
 $F76=W6*F27+W7*F26+W8*F26+W9*F25-W10*F26-W11*F25;$
 $F77=W6*F28+W7*F27+W8*F27+W9*F26-W10*F27-W11*F26;$
 $F78=W6*F285+W7*F28+W8*F28+W9*F27-W10*F28-W11*F27;$
 $F79=W7*F285+W8*F285+W9*F285-W10*F285-W11*F28;$
 $F80=W9*F285+W11*F285;$
 $F81=W1*F41;$
 $F82=W1*F42+W2*F41+W3*F41;$
 $F83=W1*F43+W2*F42+W3*F42+W4*F41-W5*F41;$
 $F84=W1*F44+W2*F43+W3*F43+W4*F42-W5*F42;$
 $F85=W1*F45+W2*F44+W3*F44+W4*F43-W5*F43;$
 $F86=W1*F46+W2*F45+W3*F45+W4*F44-W5*F44;$
 $F87=W1*F47+W2*F46+W3*F46+W4*F45-W5*F45;$
 $F88=W1*F48+W2*F47+W3*F47+W4*F46-W5*F46;$
 $F89=W1*F49+W2*F48+W3*F48+W4*F47-W5*F47;$
 $F90=W1*F50+W2*F49+W3*F49+W4*F48-W5*F48;$
 $F91=W1*F51+W2*F50+W3*F50+W4*F49-W5*F49;$
 $F92=W1*F52+W2*F51+W3*F51+W4*F50-W5*F50;$
 $F93=W1*F53+W2*F52+W3*F52+W4*F51-W5*F51;$
 $F94=W2*F53+W3*F53;$
 $F95=W4*F53-W5*F53;$
 $F955=B2*R11*F41;$
 $F96=B2*R11*F42+B2*S11*F41;$
 $F97=B2*R11*F43+B2*S11*F42;$

$F98=B2*R11*F44+B2*S11*F43;$
 $F99=B2*R11*F45+B2*S11*F44;$
 $F100=B2*R11*F46+B2*S11*F45;$
 $F101=B2*R11*F47+B2*S11*F46;$
 $F102=B2*R11*F48+B2*S11*F47;$
 $F103=B2*R11*F49+B2*S11*F48;$
 $F104=B2*R11*F50+B2*S11*F49;$
 $F105=B2*R11*F51+B2*S11*F50;$
 $F106=B2*R11*F52+B2*S11*F51;$
 $F107=B2*R11*F53+B2*S11*F52;$
 $F108=B2*S11*F53;$
 $F109=G5*F1;$
 $F110=G5*F2+G6*F1;$
 $F111=G5*F3+G6*F2+G7*F1;$
 $F112=G5*F4+G6*F3+G7*F2+G8*F1;$
 $F113=G5*F5+G6*F4+G7*F3+G8*F2+G9*F1;$
 $F114=G5*F6+G6*F5+G7*F4+G8*F3+G9*F2;$
 $F115=G5*F7+G6*F6+G7*F5+G8*F4+G9*F3;$
 $F116=G5*F8+G6*F7+G7*F6+G8*F5+G9*F4;$
 $F117=G6*F8+G7*F7+G8*F6+G9*F5;$
 $F118=G7*F8+G8*F7+G9*F6;$
 $F119=G8*F8+G9*F7;$
 $F120=G9*F8;$
 $F121=W12*F109;$
 $F122=W12*F110+W13*F109+W14*F109-W16*F109;$
 $F123=W12*F111+W13*F110+W14*F110+W15*F109-$
 $W16*F110-W17*F109;$
 $F124=W12*F112+W13*F111+W14*F111+W15*F110-$
 $W16*F111-W17*F110;$
 $F125=W12*F113+W13*F112+W14*F112+W15*F111-$
 $W16*F112-W17*F111;$
 $F126=W12*F114+W13*F113+W14*F113+W15*F112-$
 $W16*F113-W17*F112;$
 $F127=W12*F115+W13*F114+W14*F114+W15*F113-$
 $W16*F114-W17*F113;$
 $F128=W12*F116+W13*F115+W14*F115+W15*F114-$
 $W16*F115-W17*F114;$
 $F129=W12*F117+W13*F116+W14*F116+W15*F115-$
 $W16*F116-W17*F115;$
 $F130=W12*F118+W13*F117+W14*F117+W15*F116-$
 $W16*F117-W17*F116;$
 $F131=W12*F119+W13*F118+W14*F118+W15*F117-$
 $W16*F118-W17*F117;$

$F132=W12*F120+W13*F119+W14*F119+W15*F118-$
 $W16*F119-W17*F118;$
 $F133=W13*F120+W14*F120+W15*F119-W16*F120-$
 $W17*F119;$
 $F134=W15*F120-W17*F120;$
 $F135=W1*F109;$
 $F136=W1*F110+W2*F109+W3*F109;$
 $F137=W1*F111+W2*F110+W3*F110+(W4-W5)*F109;$
 $F138=W1*F112+W2*F111+W3*F111+(W4-W5)*F110;$
 $F139=W1*F113+W2*F112+W3*F112+(W4-W5)*F111;$
 $F140=W1*F114+W2*F113+W3*F113+(W4-W5)*F112;$
 $F141=W1*F115+W2*F114+W3*F114+(W4-W5)*F113;$
 $F142=W1*F116+W2*F115+W3*F115+(W4-W5)*F114;$
 $F143=W1*F117+W2*F116+W3*F116+(W4-W5)*F115;$
 $F144=W1*F118+W2*F117+W3*F117+(W4-W5)*F116;$
 $F145=W1*F119+W2*F118+W3*F118+(W4-W5)*F117;$
 $F146=W1*F120+W2*F119+W3*F119+(W4-W5)*F118;$
 $F147=W2*F120+W3*F120+(W4-W5)*F119;$
 $F148=(W4-W5)*F120;$
 $F149=-F121+F54;$
 $F150=F96-F122-F68-F55;$
 $F151=F97-F123-F69-F56;$
 $F152=F98-F124-F70-F57;$
 $F153=F99-F125-F71-F58;$
 $F154=F100-F126-F72-F59;$
 $F155=F101-F127-F73-F60;$
 $F156=F102-F128-F74-F61;$
 $F157=F103-F129-F75-F62;$
 $F158=F104-F130-F76-F63;$
 $F159=F105-F131-F77-F64;$
 $F160=F106-F132-F78-F65;$
 $F161=F108-F133-F79-F65;$
 $F162=F108-F134-F80-F67;$
 % UUUU
 $F163=R14*F135;$
 $F164=R14*F136+S14*F135;$
 $F165=R14*F137+S14*F136;$
 $F166=R14*F138+S14*F137;$
 $F167=R14*F139+S14*F138;$
 $F168=R14*F140+S14*F139;$
 $F169=R14*F141+S14*F140;$
 $F170=R14*F142+S14*F141;$
 $F171=R14*F143+S14*F142;$

$F172=R14*F144+S14*F143;$
 $F173=R14*F145+S14*F144;$
 $F174=R14*F146+S14*F145;$
 $F175=R14*F147+S14*F146;$
 $F176=R14*F148+S14*F147;$
 $F177=S14*F147;$
 $F178=R11*F81;$
 $F179=R11*F82+S11*F81;$
 $F180=R11*F83+S11*F82;$
 $F181=R11*F84+S11*F83;$
 $F182=R11*F85+S11*F84;$
 $F183=R11*F86+S11*F85;$
 $F184=R11*F87+S11*F86;$
 $F185=R11*F88+S11*F87;$
 $F186=R11*F89+S11*F88;$
 $F187=R11*F90+S11*F89;$
 $F188=R11*F91+S11*F90;$
 $F189=R11*F92+S11*F91;$
 $F190=R11*F93+S11*F92;$
 $F191=R11*F94+S11*F93;$
 $F192=R11*F95+S11*F94;$
 $F193=S11*F95;$
 $F194=R13*W1*F54;$
 $F195=R13*(W2*F54+W3*F54)+S13*W1*F54;$
 $F196=R13*(W1*F56+W2*F55+W3*F55+W4*F54-
W5*F54)+S13*(W2*F54+W3*F54);$
 $F197=R13*(W1*F57+W2*F56+W3*F56+W4*F55-
W5*F55)+S13*(W1*F56+W2*F55+W3*F55+W4*F54-
W5*F54);$
 $F198=R13*(W1*F58+W2*F57+W3*F57+W4*F56-
W5*F56)+S13*(W1*F57+W2*F56+W3*F56+W4*F55-
W5*F55);$
 $F199=R13*(W1*F59+W2*F58+W3*F58+W4*F57-
W5*F57)+S13*(W1*F58+W2*F57+W3*F57+W4*F56-
W5*F56);$
 $F200=R13*(W1*F60+W2*F59+W3*F59+W4*F58-
W5*F58)+S13*(W1*F59+W2*F58+W3*F58+W4*F57-
W5*F57);$
 $F201=R13*(W1*F61+W2*F60+W3*F60+W4*F59-
W5*F59)+S13*(W1*F60+W2*F59+W3*F59+W4*F58-
W5*F58);$
 $F202=R13*(W1*F62+W2*F61+W3*F61+W4*F60-
W5*F60)+S13*(W1*F61+W2*F60+W3*F60+W4*F59-
W5*F59);$
 $F203=R13*(W1*F63+W2*F62+W3*F62+W4*F61-
W5*F61)+S13*(W1*F62+W2*F61+W3*F61+W4*F60-
W5*F60);$
 $F204=R13*(W1*F64+W2*F63+W3*F63+W4*F62-
W5*F62)+S13*(W1*F63+W2*F62+W3*F62+W4*F61-
W5*F61);$
 $F205=R13*(W1*F65+W2*F64+W3*F64+W4*F63-
W5*F63)+S13*(W1*F64+W2*F63+W3*F63+W4*F62-
W5*F62);$
 $F206=R13*(W2*F65+W3*F65+W4*F64-W5*F64)+S13*
(W1*F65+W2*F64+W3*F64+W4*F63-W5*F63);$
 $F207=R13*(W4*F65-W5*F65)+S13*
(W2*F65+W3*F65+W4*F64-W5*F64);$
 $F208=S13*(W4*F65-W5*F65);$
 $F300=-F163-F194;$
 $F301=-F164-F195-a12*F149;$
 $F302=-F165-F196-a12*F150;$
 $F303=-F166-F197-a12*F151;$
 $F304=-F167-F198-a12*F152;$
 $F305=-F168-F199-a12*F153;$
 $F306=-F169-F200-a12*F154;$
 $F307=-F170-F201-a12*F155;$
 $F308=-F171-F202-a12*F156;$
 $F309=-F172-F203-a12*F157;$
 $F310=-F173-F204-a12*F158;$
 $F311=-F174-F205-a12*F159;$
 $F312=-F175-F206-a12*F160;$
 $F313=-F176-F207-a12*F161;$
 $F314=-F177-F208-a12*F162;$
 $F500=F18-F29;$
 $F501=F19-F30;$
 $F502=F20-F31;$
 $F503=F21-F32;$
 $F504=F22-F33;$
 $F505=F23-F34;$
 $F506=F24-F35;$
 $F507=F25-F36;$
 $F508=F26-F37;$
 $F509=F27-F38;$
 $F510=F28-F39;$

ประวัติผู้เขียน

นายปิยวิทย์ มหาโพธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2518 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์

1. "Dynamic Analysis of Vehicle Cornering Behavior" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15, ปีที่ 15, 2544.