

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวสำหรับรถแข่งขนาดเล็ก

SUSPENSION AND STEERING DESIGN FOR 2007 SFAE STUDENT FORMULA

นาย ชีร ลีทวีทรัพย์
นาย ศรวิฐ ทองคำ

มีที่
56819
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72883
วัน,เดือน,ปี..... 25 ส.ย. 2550

b. 11723972
i.....

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวสำหรับรถแข่งขนาดเล็ก
SUSPENSION AND STEERING DESIGN FOR 2007 SFAE STUDENT FORMULA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUSPENSION AND STEERING DESIGN FOR 2007 STUDENT FORMULA

TEERA LEETAWEESUP

SARAWUT TONGKUM



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบระบบกันสะเทือนและระบบบังคับล้อสำหรับรถแข่งขนาดเล็ก

(Suspension and Steering Design for 2007 SFAE Student Formula)

ผู้จัดทำ

1. นาย ชिर สิทวิทรัพย์ รหัสประจำตัว 46010311
2. นาย ศราวุธ ทองคำ รหัสประจำตัว 46010769



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบกันสะเทือนและระบบบังคับลิฟต์สำหรับรถแข่งขนาดเล็ก

นาย ชีร ลิทวิทย์ 46010311

นาย สราวุธ ทองคำ 46010769

ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบช่วงล่างจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น การสิ้นสะท้อนของตัวรถ การรับน้ำหนัก การเคลื่อนที่ของชิ้นต่อโยงต่างๆ เป็นต้น ซึ่งในการคำนวณนั้นมีความซับซ้อนมาก เราจึงนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เช่น โปรแกรมอดัมส์ (ADAMS) ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านกลศาสตร์พลศาสตร์ และ โปรแกรมอะบาคัส (ABAQUS) ใช้ในการคำนวณความแข็งแรงของโครงสร้าง เพื่อให้ผลการออกแบบมีความถูกต้อง และสามารถทดสอบได้โดยไม่ต้องสร้างแบบจำลอง ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และมีความถูกต้องมากขึ้น

Suspension and Steering Design for 2007 SFAE Student Formula

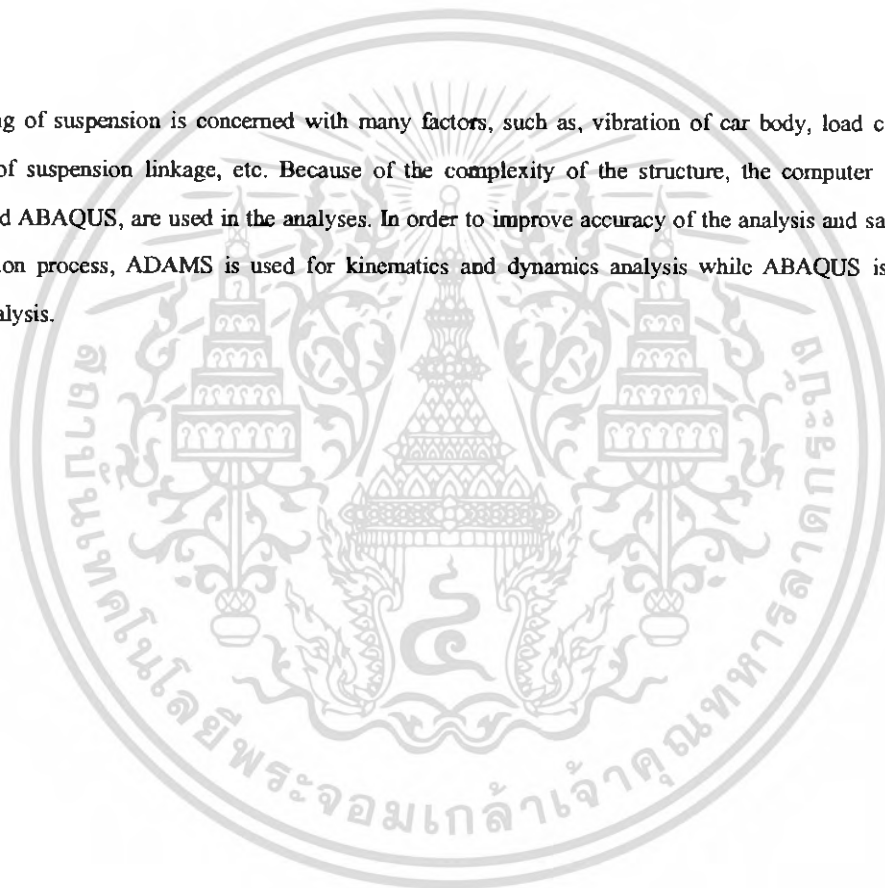
Teera Leetaweewsup

Sarawut Tongkome

Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsarn Advisor

Abstract

Designing of suspension is concerned with many factors, such as, vibration of car body, load carrier, the movement of suspension linkage, etc. Because of the complexity of the structure, the computer programs, ADAMS and ABAQUS, are used in the analyses. In order to improve accuracy of the analysis and save cost of the production process, ADAMS is used for kinematics and dynamics analysis while ABAQUS is used for structure analysis.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันที่เคารพรักยิ่ง ที่ช่วยให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในทุกๆด้าน และขอขอบพระคุณอาจารย์ มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขปัญหามากมาย และ อาจารย์ทุกท่านอื่นๆที่ให้ความรู้ทั้งในสถาบันการศึกษาแห่งนี้รวมทั้งอาจารย์ที่เคยให้ความรู้กับข้าพเจ้าในสถาบันอื่นๆที่ได้เคยศึกษามา และขอขอบคุณพี่เอ๋ พี่หนู๋ พี่โหน่ง วิทวัส และสมาชิกชมรมยานยนต์ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำและสนับสนุนข้าพเจ้าในด้านต่างๆให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญกราฟ	XII
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว	
2.1 หน้าที่และความสำคัญของระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว	3
2.2 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง	3
2.3 ส่วนประกอบของระบบบังคับเลี้ยว	4
2.4 ชนิดของระบบช่วงล่าง	6
2.4.1 ระบบช่วงล่างชนิดปีกนกคู่ (Double wishbone suspension)	6
2.4.2 ระบบช่วงล่างแบบ มัลติลิงก์ (Multi Link)	7
2.5 ชนิดของระบบบังคับเลี้ยว	8
2.5.1 แบบไม่ใช้กระดูกพวงมาลัย (Pitman arm)	8
2.5.2 แบบใช้กระดูกพวงมาลัย	8
2.6 ระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวที่เลือกใช้	8
บทที่ 3 ทฤษฎีมุมล้อ	
3.1 มุมล้อ	9
3.1.1 มุมแคมเบอร์	9
3.1.2 มุมเอียงลูกหมากปีกนก	10
3.1.3 มุมแคสเตอร์	11
3.1.4 ระยะโท	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ทฤษฎีรูปแบบของระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว	
4.1 รูปแบบการวางตัวของระบบช่วงล่าง	14
4.1.1 ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน	14
4.1.2 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันแต่ขนานกัน	14
4.1.3 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันและไม่ขนานกัน	15
4.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบระบบช่วงล่าง	16
4.2.1 จุดศูนย์กลางช่วงขณะ	16
4.2.2 จุดศูนย์กลางการโคลง	16
4.2.3 แนวแกนการโคลง	18
4.2.4 ทรัสไลน์(Thrust line)	18
4.3 การออกแบบมุมล้อ	19
4.3.1 การออกแบบมุมแคมเบอร์	19
4.3.2 การออกแบบมุมเอียงลูกหมากปีกนก	20
4.4 ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบระบบบังคับเลี้ยว	21
4.4.1 ระบบขับเลี้ยว	21
4.5 การวิเคราะห์ทางด้านไคเนติกส์ของระบบช่วงล่าง	22
4.5.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์	22
4.5.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความกว้างของฐานล้อ	29
4.5.3 การวิเคราะห์หาค่าแห่งจุดศูนย์กลางการโคลง	31
บทที่ 5 การวิเคราะห์สมรรถนะในการขับขี่	
5.1 แหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน	33
5.1.1 ความขรุขระของพื้นถนน	33
5.1.2 ล้อและยาง	34
5.1.3 ระบบส่งกำลัง	36
5.1.4 เครื่องยนต์	37
5.2 คุณสมบัติในการตอบสนองของรถยนต์	38
5.2.1 การสั่นสะเทือนของระบบช่วงล่าง	38
5.2.2 การวิเคราะห์หาค่าความแข็งของสปริงโดยใช้โปรแกรมอดัมส์วิว	41
5.2.3 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแข็งที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมอดัมส์คาร์	45
บทที่ 6 การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบช่วงล่าง	
6.1 สร้างแบบจำลองของรถแข่ง	47
6.1.1 เท็มเพลท (Template)	47
6.1.2 ซับซิสเท็ม (Subsystem)	47

6.1.3 เอสเอ็มบลี(Assembly)	50
6.2. การจำลองด้วยโปรแกรม อคัมส์คาร์	51
6.2.1 การจำลองทางคิเนเมติกส์	51
6.2.2 การจำลองทางพลศาสตร์	53
6.3 ผลการจำลองทางคิเนเมติกส์	54
6.3.1 การจำลองเพื่อหารูปแบบของ Template	54
6.3.2 การจำลองเพื่อหามุมการวางตัวของปีกนก	59
6.3.3 การจำลองเพื่อหามุมของปีกนกบน	63
6.3.4 การจำลองเพื่อหามุมเชิงลูกหมากปีกนก	68
6.4 ผลการจำลองทางพลศาสตร์	73
6.4.1. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน	73
6.4.2. การทดสอบการเบรกของรถ	76
6.4.3. การทดสอบแบบ Ramp Steer	79
บทที่ 7 ไฟไนต์เอลิเมนต์	
7.1 การวิเคราะห์แบบจำลองใน โปรแกรมอะบาคัส	81
7.2 ขั้นตอนการทำ	83
7.3 การกำหนดคุณสมบัติ	84
7.4 การประกอบ	84
7.5 การกำหนดขั้นตอน	85
7.6 การกำหนดขอบเขต	85
7.7 การกำหนดโหลด	
7.8 การวิเคราะห์เมท	
7.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม	88
7.10 การแสดงผล	88
7.11 สรุปผลการทดสอบ	89
บทที่ 8 ผลงานที่เสร็จสมบูรณ์และการปรับตั้งค่า	
8.1. ระบบช่วงล่าง	91
8.1.1 ปีกนกบนและปีกนกล่าง	91
8.1.2 ก้านค้ำ และ สามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง	92
8.1.3 โช้คและแฉิมเปอร์	93
8.1.4 คอมี้า	93
8.1.5. ระบบบังคับเลี้ยว	94
8.1.6. ระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวที่สมบูรณ์	95
8.2. การปรับตั้งค่านุมล้อและการทดสอบ	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 ผลการทดสอบโดยการจับชี้จริง	100
บทที่ 9 บทสรุปและวิจารณ์	
9.1 สรุปผล	101
9.2 วิจารณ์ผล	101
9.3 ปัญหาที่พบในการทำโครงการ	102
9.4 แนวทางแก้ไข	103
เอกสารอ้างอิง	104
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	106
ภาคผนวก ข	112



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2-1 แสดงชิ้นส่วนของระบบช่วงล่าง	3
รูปที่ 2-2 ส่วนประกอบของระบบบังคับเลี้ยว	4
รูปที่ 2-3 กระจุกพวงมาลัยแบบเฟืองตัวหนอน	5
รูปที่ 2-4 กระจุกพวงมาลัยแบบลูกปืนหมุนเวียน	5
รูปที่ 2-5 กระจุกพวงมาลัยแบบเฟืองสะพาน	6
รูปที่ 2-6 ระบบช่วงล่างแบบปีกนกคู่	7
รูปที่ 2-7 ระบบช่วงล่างชนิด มัลติลิงค์	7
รูปที่ 2-8 ระบบบังคับเลี้ยวแบบไม่ใช้กระจุกพวงมาลัย	8
รูปที่ 2-9 ระบบบังคับเลี้ยวแบบใช้กระจุกพวงมาลัย	8
รูปที่ 3-1 มุมแคมเบอร์	9
รูปที่ 3-2 การคลั่งของล้อเป็นกรวยเนื่องจากมุมแคมเบอร์มีค่าเป็นบวกมากเกินไป	10
รูปที่ 3-3 มุมเอียงลูกหมากปีกนก	11
รูปที่ 3-4 มุมแคสเตอร์	11
รูปที่ 3-5 ระยะโท	12
รูปที่ 4-1 ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน	14
รูปที่ 4-2 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันแต่ขนานกัน	15
รูปที่ 4-3 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันและไม่ขนานกัน	15
รูปที่ 4-4 โฟร์บาร์ลิงค์เกจ	16
รูปที่ 4-5 จุดศูนย์กลางช่วงขณะ	16
รูปที่ 4-6 จุดศูนย์กลางการ โคลง	17
รูปที่ 4-7 ผลของตำแหน่งการ โคลง	17
รูปที่ 4-8 แนวแกนการ โคลง	18
รูปที่ 4-9 Thrust line	18
รูปที่ 4-10 ผลของแรงบิดใจโรที่ส่งผลถึงพวงมาลัย	19
รูปที่ 4-11 รัศมีดู	20
รูปที่ 4-12. มุมเอียงลูกหมากปีกนก	21
รูปที่ 4-13 วิธีบังคับเลี้ยวตามทฤษฎีของแอกเคอร์มาน	21
รูปที่ 4-14 แบบจำลองของระบบช่วงล่างอย่างง่าย	22
รูปที่ 4-15 แบบจำลองระบบช่วงล่างอย่างง่ายที่มีระยะขยอก a	24
รูปที่ 4-16 แบบจำลองระบบช่วงล่างขณะล้อเคลื่อนที่ขึ้น	25
รูปที่ 4-17 แบบจำลองระบบช่วงล่างพิจารณาเฉพาะมุมแคมเบอร์	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-18 แสดงจุดศูนย์กลางการ โคลง	31
รูปที่ 5-1 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์สมรรถนะในการจับชีพ	33
รูปที่ 5-2 เครื่องวัดความหยาบของพื้นผิว (Profilometers)	34
รูปที่ 5-3 แสดงโมเดลยางที่มีลักษณะเป็นสปริงที่เรียงตัวในแนวรัศมี	35
รูปที่ 5-4 แสดงแรงที่กระทำกับล้อ	36
รูปที่ 5-5 แสดงรูประบบส่งกำลัง	36
รูปที่ 5-6 แสดงการบวกเวกเตอร์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นบนจุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล	37
รูปที่ 5-7 กราฟแสดงแรงบิดที่ส่งออกจากเพลาข้อเหวี่ยง	38
รูปที่ 5-8 แสดงถึงทิศทางที่เกิดการสั่นในเครื่องยนต์	38
รูปที่ 5-9 แสดงโมเดลแบบฮาฟคาร์(Half-car Model)	40
รูปที่ 5-10 แสดงรูปสี่เหลี่ยมที่เป็นตัวแทนของน้ำหนักเหนือสปริง	42
รูปที่ 5-11 แสดงฟูลคาร์โมเดลที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	42
รูปที่ 5-12 แสดงไดอะล็อกบ็อก โมดิไฟสปริง-แคมเปอร์	42
รูปที่ 5-13 แสดงไดอะล็อกบ็อกเทอร์พอร์มไวเบรชันอะนาลิซิส	43
รูปที่ 5-14 แสดงหน้าจอ ADAMS/PostProcessor	44
รูปที่ 5-15 แสดงไดอะล็อกบ็อก โมดิไฟสปริง	45
รูปที่ 5-16 แสดงหน้าจอของเคอร์รับเมเนเจอร์	46
รูปที่ 6-1 เพิ่มเทมเพลต(Template)	47
รูปที่ 6-2 ซับซิสเต็ม(Subsystem)	47
รูปที่ 6-3 การกำหนดค่าอาร์คพอยท์	
รูปที่ 6-4 การปรับค่าตัวแปร	49
รูปที่ 6-5 การกำหนดค่าคุณสมบัติ	49
รูปที่ 6-6 การกำหนดค่าคงที่ของสปริงในขั้นตอนการสร้างระบบขึ้นส่วนย่อย	50
รูปที่ 6-7 การสร้าง Assembly	50
รูปที่ 6-8 ส่วนประกอบใน Suspension Assembly	51
รูปที่ 6-9 การจำลองการเคลื่อนที่ของล้อแบบขึ้นหรือลงพร้อมกัน	51
รูปที่ 6-10 การจำลองที่ให้อล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตรงข้ามกัน	52
รูปที่ 6-11 การทดสอบระบบบังคับเลี้ยว	52
รูปที่ 6-12 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน	53
รูปที่ 6-13 การจำลองการเบรกของรถ	53
รูปที่ 6-14 การทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยให้รถเลี้ยวด้วยความเร็วเชิงมุมที่กำหนด	54
รูปที่ 6-15 สภาวะการจำลองการเบรก	76
รูปที่ 6-16 สภาวะการจำลองแบบ Ramp Steer	79
รูปที่ 7-1 แสดงทิศทางของแกนอ้างอิง	81

รูปที่ 7-2 แสดงวิธีเปิด ABAQUS Licensing	82
รูปที่ 7-3 หน้าจอเมื่อเปิดโปรแกรม ABAQUS	82
รูปที่ 7-4 ขั้นตอนการ Import files จากโปรแกรม Unigraphics Nx3	82
รูปที่ 7-5 ขั้นตอนการเปลี่ยนหน่วยจากมิลลิเมตร เป็น เมตร	82
รูปที่ 7-6 แสดงภาพลูกหมากที่ Import เข้ามาในโปรแกรม ABAQUS แล้ว	82
รูปที่ 7-7 แสดงภาพปีกนกที่ Import เข้ามาในโปรแกรม ABAQUS แล้ว	82
รูปที่ 7-8 แสดงการกำหนดค่า Elastic ในวัสดุ	83
รูปที่ 7-9 แสดงการกำหนดค่า Density ในวัสดุ	83
รูปที่ 7-10 แสดงการกำหนด Section ลงในปีกนก	83
รูปที่ 7-11 แสดงภาพหลังกำหนด Section เสร็จแล้ว	83
รูปที่ 7-12 แสดงรูปปีกนกและลูกหมากที่ประกอบกันเสร็จแล้ว	84
รูปที่ 7-13 แสดงการสร้าง Step	84
รูปที่ 7-14 แสดงการขีดปีกนกติดกับลูกหมาก	85
รูปที่ 7-15 แสดงการใส่ค่า Parameter ใน Create Boundary Condition Dialog box	85
รูปที่ 7-16 แสดงการใส่ค่า Parameter ใน Edit Boundary Condition	85
รูปที่ 7-17 แสดงการสร้าง Concentrated Force	86
รูปที่ 7-18 แสดงการเลือกชนิดของ Mesh	86
รูปที่ 7-19 แสดงภาพหลัง Assign mesh controls	87
รูปที่ 7-20 แสดงรูปของปีกนกและลูกหมากเมื่อ Mesh เสร็จแล้ว	87
รูปที่ 7-21 แสดงภาพระหว่างรันโปรแกรม	87
รูปที่ 7-22 แสดงผลการทดสอบจาก โปรแกรมอะบาคัส	88
รูปที่ 7-23 แสดงรูปของจุดขีดปีกนกกับลูกหมาก โดยใช้เน็ตตัวเมียเชื่อมต่อกับปีกนก	88
รูปที่ 7-24 แสดงผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับปีกนกเมื่อใช้ท่อขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว หนา 2 มม.	88
รูปที่ 7-25 แสดงผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับปีกนกเมื่อใช้ท่อขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว หนา 2 มม.	89
รูปที่ 7-26 แสดงผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับปีกนกเมื่อใช้ท่อขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว หนา 3 มม.	89
รูปที่ 7-27 แสดงรูปของจุดขีดปีกนกกับลูกหมาก โดยใช้เหล็กต้นทำเกลียวแล้วเชื่อมกับ ปีกนกตรงสล๊อตที่บากไว้	89
รูปที่ 7-28 แสดงผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับปีกนกเมื่อใช้ท่อขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว หนา 2 มม. แต่เชื่อมต่อ โดยใช้เหล็กต้นทำเกลียว	89
รูปที่ 8-1 ปีกนกด้านหน้า	91
รูปที่ 8-2 ปีกนกด้านหลัง	92
รูปที่ 8-3 ก้านต้นและสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง	92
รูปที่ 8-4 ไช้คและแคมเปอร์	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8-5 คอมา	94
รูปที่ 8-6 ระบบบังคับลิ้น	94
รูปที่ 8-7 ระบบช่วงล่างด้านหน้าที่สมบูรณ์	95
รูปที่ 8-8 ระบบช่วงล่างด้านหลังที่เสร็จสมบูรณ์	96
รูปที่ 8-9 ระบบช่วงล่างและระบบบังคับลิ้นที่เสร็จสมบูรณ์	97
รูปที่ 8-10 แสดงระยะที่ใช้สำหรับการตั้งค้ำมูล้อ	98
รูปที่ 8-11 แสดงการวัดระยะสำหรับตั้งค้ำมูแคมเบอร์	98
รูปที่ 8-12 แสดงการวัดระยะความกว้างล้อหน้า(Track)	99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญกราฟ

	หน้าที่
กราฟที่ 6-1 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	55
กราฟที่ 6-2 การเปลี่ยนแปลงมุมโท	56
กราฟที่ 6-3 การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ	57
กราฟที่ 6-4 การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลง	58
กราฟที่ 6-5 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	59
กราฟที่ 6-6 การเปลี่ยนแปลงมุมโท	60
กราฟที่ 6-7 การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ	61
กราฟที่ 6-8 จุดศูนย์กลางการโคลง	62
กราฟที่ 6-9 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	64
กราฟที่ 6-10 การเปลี่ยนแปลงมุมโท	65
กราฟที่ 6-11 การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ	66
กราฟที่ 6-12 จุดศูนย์กลางการโคลง	67
กราฟที่ 6-13 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	69
กราฟที่ 6-14 การเปลี่ยนแปลงมุมโท	70
กราฟที่ 6-15 การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ	71
กราฟที่ 6-16 การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลง	72
กราฟที่ 6-17 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน	75
กราฟที่ 6-18 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน	78
กราฟที่ 6-19 การจำลองแบบ Ramp Steer	80

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 5-1 แสดงค่าความแข็งของสปริงที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติ	43
ตารางที่ 5-2 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์	45
ตารางที่ 6-1 สภาวะในการห้ามมืองเชิงลูกหมากปีกนก	68
ตารางที่ 6-2 ค่าคงที่สปริงที่ใช้ในการทดสอบ	73
ตารางที่ 7-1 แสดงขนาดของแรงที่กระทำต่อปีกนกเมื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน	81
ตารางที่ 7-2 แสดงขนาดของแรงที่กระทำต่อปีกนกเมื่อทำการจำลองการเบรกของรถ	82
ตารางที่ 8-1 ตารางแสดงการตั้งค่ามุมแคมเบอร์เพื่อทดสอบจริง	99
ตารางที่ 8-2 ตารางแสดงการตั้งค่าระยะโทเพื่อทดสอบจริง	99



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

จากการที่ทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย ได้จัดการแข่งขันการวิจัย ออกแบบ และพัฒนาเยาวชน 2007 SFAE Student Formula ขึ้น โดยในปีนี้ทางสมาคมได้รับการสนับสนุนจากมูลนิธิกองทุน สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ซึ่งในปีนี้ ทีม INITIAL 3 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ก็เป็นอีกทีมหนึ่งที่ได้รับการคัดเลือกให้เข้าแข่งขันในรายการนี้ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาระบบกันสะเทือน (Suspension System) 2 ชนิด

- แบบปีกนกคู่ (Double Wishbone)
- แบบมัลติลิงก์ (Multi Link)

เพื่อหาข้อดีข้อเสีย รวมถึงศึกษาหาความเหมาะสมกับการที่จะนำมาใช้กับรถแข่งขนาดเล็ก

1.2.2 เพื่อออกแบบระบบกันสะเทือน และระบบบังคับเลี้ยว โดยให้ระบบที่ออกแบบมีความสามารถดังนี้

- มีเสถียรภาพตอบสนองต่อสภาพการขับขี่ที่ความเร็วสูงได้ดี
- สามารถควบคุมได้ดี ขณะขับขี่ที่ความเร็วสูง

1.2.3 เพื่อศึกษาการนำเอาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ และการออกแบบ โดยโปรแกรมที่ใช้คำนวณ และออกแบบมีดังนี้

- โปรแกรม อัดัมส์ (ADAMS) ใช้สำหรับออกแบบระบบไคเนติกส์และไดนามิกของรถ
- โปรแกรมอะบาคัส (ABAQUS) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนของช่วงล่าง
- โปรแกรมยูนิกราฟฟิก (Unigraphics) ใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วน

1.2.4 นำระบบกันสะเทือนและระบบบังคับเลี้ยวที่ออกแบบมาสร้างเป็นรถแข่งขนาดเล็กเพื่อใช้ในการแข่งขัน 2007 SFAE Student Formula ที่ทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทยจัดขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบกันสะเทือนและระบบบังคับเลี้ยวของรถแข่งขนาดเล็ก ให้ได้ระบบช่วงล่างรถยนต์ที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ โดยทำการออกแบบและทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเราจะใช้โปรแกรม อัดัมส์ในการจำลองการเคลื่อนที่ เพื่อดูเสถียรภาพของระบบและใช้โปรแกรมอะบาคัสวิเคราะห์หาความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ก่อนการสร้างเป็นชิ้นงานจริง

1.4 วิธีการดำเนินงาน

เริ่มต้นด้วยการศึกษาหาความรู้และทำความเข้าใจในระบบของรถยนต์แบบต่างๆเพื่อ ศึกษาว่าระบบช่วงล่างแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียอย่างไรและเราจะนำเอาข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบระบบช่วงล่างสำหรับรถแข่งขนาดเล็กได้อย่างไร

เมื่อทำการศึกษาเป็นอย่างดีแล้วจึงทำการออกแบบ และทดสอบระบบที่เราออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเราต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับโครงสร้างโดยรวมด้วย

สุดท้ายแล้วจึงทำการสร้างระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วจึงทำการทดสอบกับสภาพถนนจริงๆเพื่อผลเปรียบเทียบกับที่ทดสอบใน โปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว

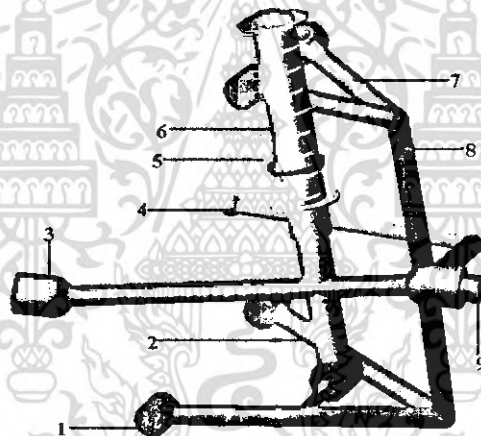
2.1 หน้าที่และความสำคัญของระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว

ระบบช่วงล่างเป็นสิ่งสำคัญที่รถยนต์ทุกคันจำเป็นต้องมีเพราะว่าระบบช่วงล่างถูกสร้างขึ้นมาเพื่อลดการสั่นสะเทือนและเพื่อช่วยในการทรงตัวของรถ เมื่อรถวิ่งอยู่บนถนนที่ขรุขระเป็นหลุม ขณะเข้าโค้งหรือแม้แต่ในขณะเบรก ถ้ารถไม่มีระบบช่วงล่างแล้วนอกจากผู้โดยสารและคนขับจะได้รับแรงกระแทกจากตัวรถมากแล้ว ชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนของรถอาจจะเสียหายเร็วเกินกว่าอายุการใช้งานด้วย นอกจากนี้หน้าที่รองของระบบกันสั่นสะเทือนคือ เป็นตัวเชื่อมระหว่าง โครงรถยนต์(Chassis) กับล้อรถ

ระบบบังคับเลี้ยวก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญ หากปราศจากระบบบังคับเลี้ยวแล้วเราก็คงไม่สามารถบังคับทิศทางหรือควบคุมรถได้

2.2 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง

ระบบช่วงล่าง โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักๆตามรูปที่ 2-1 โดยหน้าที่ของแต่ละชิ้นส่วนมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-1 แสดงชิ้นส่วนของระบบช่วงล่าง

1. บูช(Bush) เป็นขางรูปวงกลมมีรูตรงกลางไว้สำหรับใส่เหล็กที่มีลักษณะเดียวกัน สร้างขึ้นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างตัวปีกนกกับ นอตที่ยึดติดปีกนก
2. ปีกนก(Control arm) มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยม โดยปลายด้านหนึ่งจะทำหน้าที่ยึดกับตัวโครงรถยนต์ อีกด้านหนึ่งจะยึดติดกับคอก้ามด้านล่าง (หมายเลข 8)
3. เหลาะขับ มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กยาว ด้านหนึ่งยึดติดกับเหลาะขับ อีกด้านหนึ่งจะยึดติดกับแกนหมุนของล้อ(หมายเลข 9) และคอก้าม มีหน้ารับแรงจากเหลาะขับแล้วส่งกำลังต่อทำให้ล้อสามารถหมุนได้ โดยชุดรับแรงจากเหลาะขับนี้จะติดตั้งที่ด้านหน้าหรือด้านหลังขึ้นอยู่กับชนิดของรถที่เราออกแบบว่าจะให้เป็นระบบขับเคลื่อนล้อหน้าหรือหลัง หรือขับเคลื่อน 4 ล้อ

4. ชุดแกนบังคับเลี้ยว(Steering rack) มีลักษณะเป็นแท่งยาว ด้านหนึ่งยึดติดกับลิงค์ที่มาจากพวงมาลัย อีกด้านหนึ่งยึดติดกับคอม้า มีหน้าที่บังคับล้อให้หมุน ไปตรงตามทิศทางที่พวงมาลัยหมุน โดยชุดแกนบังคับเลี้ยวนี้จะมีเฉพาะระบบช่วงล่างด้านหน้าเท่านั้น
5. สปริง(Spring) มีลักษณะเป็นเหล็กเส้นขดกันเป็นเกลียว ทั้ง 2 ด้านยึดติดกับเบ้ารองรับสปริง ทำหน้าที่รับแรงกระแทก หรือ แรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่
6. แดมเปอร์(Damper) มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กมีน้ำมันหรือแก๊สอัดอยู่ภายใน (แล้วแต่ชนิดของแดมเปอร์) ติดอยู่ที่ด้านในหรือด้านนอกของขดสปริง ทำหน้าที่ดูดซับแรงในขณะคืนตัวของสปริงเนื่องจากแรงที่ได้รับ
7. คอม้า(Steering Knuckle) สร้างขึ้นจากอะลูมิเนียม มีหน้าที่ยึด ปีกนกบน ปีกนกล่าง คันส่ง เฟลาขับ เข้าด้วยกัน เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ระบบช่วงล่างชนิดอิสระต่อกัน (Independent suspension) จะขาดไม่ได้

2.3 ส่วนประกอบของระบบบังคับเลี้ยว

ระบบบังคับเลี้ยวโดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลักๆดังรูปที่ 2-2 โดยแต่ละส่วนประกอบจะมีหน้าที่ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-2. ส่วนประกอบของระบบบังคับเลี้ยว

1. คันชัก(Drag link) เป็นแขนต่อระหว่างกระดูกพวงมาลัยกับแกนบังคับเลี้ยว โดยปกติคันชักจะทำเป็นท่อนอนปลายมีสลัก และใส่สปริงกันสะเทือน สลักกลมทำหน้าที่เป็นลูกหมากต่อเข้ากับขาไก่พวงมาลัย
2. ลูกหมาก(Tie rod end or ball socket joint) ปลายคันส่งจะมีลูกหมากเป็นตัวแทนกับแกนบังคับเลี้ยว เนื่องจากต้องหมุนและเดินได้ จุดหมุนจึงต้องเป็นทรงกลม (ball joint) ส่วนใหญ่เข้าลูกหมากประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เป็นเหล็กจึงต้องมีการอัดจารบีเป็นระยะ แต่ในปัจจุบันหลายแบบใช้สารในลอนเป็นน้ำจึงไม่จำเป็นต้องอัดจารบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

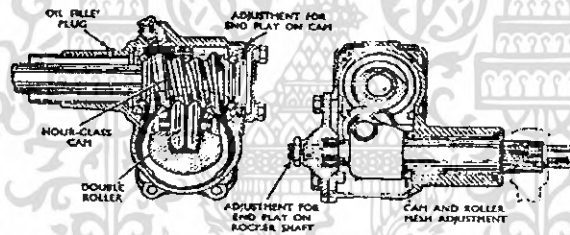
3. กระจุกพวงมาลัย(Steering gear) หน้าที่ของกระจุกพวงมาลัยมีดังนี้

เป็นกลไกสำหรับเปลี่ยนการหมุนของพวงมาลัยเป็นการเคลื่อนที่หันไปมาของล้อทั้งสองข้าง โดยอาศัยก้านต่อต่างๆเป็นตัวส่ง และในขณะเดียวกันกระจุกพวงมาลัยยังเป็นเครื่องผ่อนแรง กล่าวคือภายในกระจุกพวงมาลัยจะมีอัตราทดของเกียร์ เช่น อัตราทด 10: 1 หมายความว่า จะต้องหมุนพวงมาลัยไป 10 รอบจึงจะทำให้เพลาวางหมุนไป 1 รอบ (เพลาวางหมุนจากตำแหน่งสุดข้างหนึ่งไปสุดอีกข้างหนึ่ง) การออกแบบให้เกิดอัตราทดในกระจุกพวงมาลัยนี้ทำให้เกิดการได้เปรียบเชิงกล ทำให้เราออกแรงหมุนพวงมาลัยน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่รถอยู่นิ่ง

นอกจากนั้นกระจุกพวงมาลัยยังช่วยลดการสะเทือนกลับจากอาการบิดตัวของล้อเนื่องจากสภาพถนนที่เรียกว่า Road shock ขณะที่ล้อหน้าบิดตัวอย่างรวดเร็วนี้ก็ส่งแรงไปยังคันทรงและคันชักผ่านกระจุกพวงมาลัยไปยังมือที่ถือเพลายู่ ถ้าพวงมาลัยไม่ทรอบไว้ อาการสะเทือนจะส่งไปถึงมือผู้ขับมาก การทรอบยิ่งมากก็จะทำให้กระจุกพวงมาลัยลดอาการสะเทือนดีขึ้น แต่หากทรอบมากเกินไปการบังคับทิศทางก็จะทำได้ไม่ดี เพราะต้องหมุนพวงมาลัยมากขึ้นเพื่อให้รถเลี้ยวได้เท่าเดิม ทำให้เลี้ยวได้ช้าลง ซึ่งเป็นอันตรายในขณะขับขี่ที่ความเร็วสูง

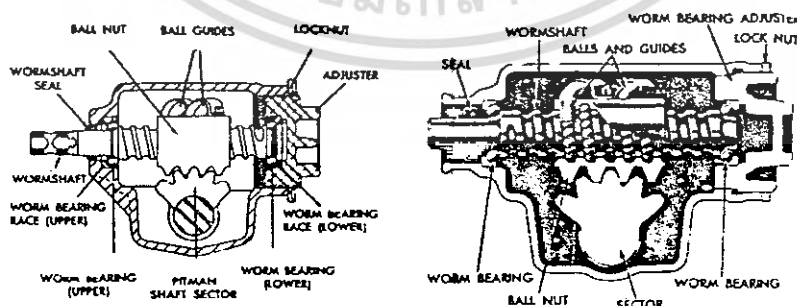
กระจุกพวงมาลัยแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้

3.1 เฟืองตัวหนอนและลูกกลิ้ง เป็นแบบที่ใช้เฟืองตัวหนอนและลูกกลิ้งเป็นตัวทดกำลัง



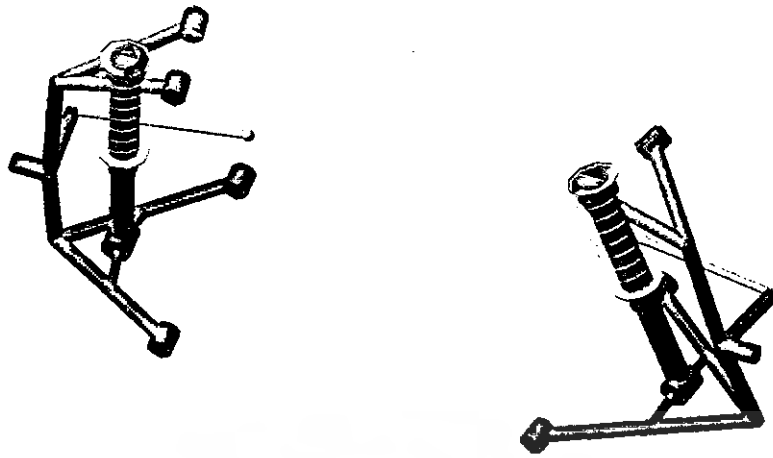
รูปที่ 2-3 กระจุกพวงมาลัยแบบเฟืองตัวหนอน

3.2 แบบลูกปืนหมุนเวียน แบบนี้จะมีลูกปืนหมุนเวียนอยู่ภายใน หลักการก็เป็นเช่นเดียวกับการหมุนสกรูดังรูปที่ ซึ่งลูกปืนแบบกลมนี้จะช่วยให้การหมุนง่ายขึ้น



รูปที่ 2-4 กระจุกพวงมาลัยแบบลูกปืนหมุนเวียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-6 ระบบช่วงล่างแบบปีกนกคู่

2.4.2 ระบบช่วงล่างชนิด มัลติลิงค์ (Multi link)

ระบบช่วงล่างแบบ มัลติลิงค์เป็นระบบที่ประกอบไปด้วยลิงค์ตั้งแต่ 3 ชิ้นขึ้นไป ซึ่งก็มีรูปแบบคล้ายกับแบบปีกนกคู่ แต่ต่างกันที่จำนวนลิงค์ที่เพิ่มมาเพื่อการออกแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถออกแบบได้อย่างหลากหลายตามจำนวนลิงค์ ทำให้เราสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ แต่ก็มีคามยุ่งยากในการออกแบบ และยังต้องใช้เนื้อที่ในการติดตั้งมากตามจำนวนลิงค์ที่เพิ่มขึ้น

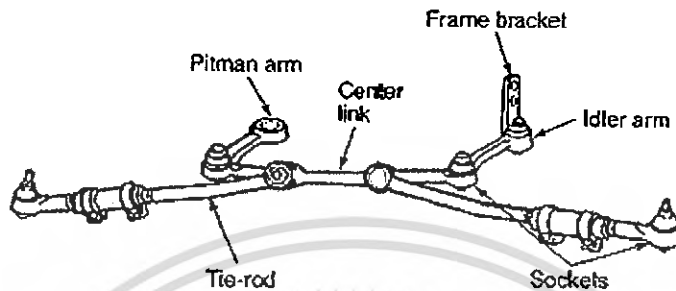


รูปที่ 2-7 ระบบช่วงล่างชนิด มัลติลิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

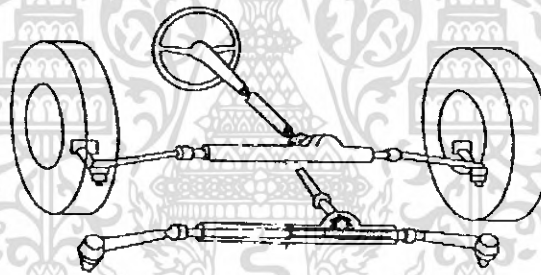
2.5 ชนิดของระบบบังคับเลี้ยว

2.5.1 แบบไม่ใช้กระดูกพวงมาลัย(Pitman arm) เป็นระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้กันต่อในการควบคุมทิศทางตามทฤษฎีวิธีบังคับเลี้ยวแบบ อ็คเคมาน โดยจะให้เพลาล้อหน้าอยู่กับที่แต่ปลายเพลามีจุดหมุน 2 จุด ต่อเข้ากับปลายคันชัก ซึ่งจะยึดเข้ากับคอม้าโดยจะไม่ใช้กระดูกพวงมาลัยช่วยทดแรง ดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 ระบบบังคับเลี้ยวแบบไม่ใช้กระดูกพวงมาลัย

2.5.2 แบบใช้กระดูกพวงมาลัย(Steering gear arm) มีหลักการทำงานตามแบบ pitman arm แต่ใช้กระดูกพวงมาลัยเข้ามาช่วยทดแรง ซึ่งเราสามารถเลือกรูปแบบของกระดูกพวงมาลัยได้ตามการใช้งาน ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 ระบบบังคับเลี้ยวแบบใช้กระดูกพวงมาลัย

2.6 ระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวที่เลือกใช้

ด้านหน้า : เลือกใช้ระบบปีกนกคู่ เพราะสามารถออกแบบจุดศูนย์กลางการ โคจรและมุมแคมเบอร์ได้ตามต้องการ และด้วยเนื้อที่ที่จำกัดทำให้ต้องเลือกระบบช่วงล่างที่สอดคล้องกับตัวโครงสร้างด้วย

ด้านหลัง : เลือกใช้ระบบระบบปีกนกคู่เหมือนกับด้านหน้า เหตุผลที่เลือกใช้ก็เพราะ โครงสร้างของตัวรถมีขนาดไม่ใหญ่และด้วยเนื้อที่ที่จำกัด ทำให้สามารถวางปีกนกได้ง่ายกว่าแบบอื่นๆ และที่ไม่ใช้แบบ มัลติลิงค์เพราะการออกแบบทำได้ยากและใช้เวลาในการทดสอบนานเนื่องจากมีตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงมากมาย

ระบบบังคับเลี้ยว : เลือกใช้แบบเฟืองสะพานเพื่อตอบสนองรูปแบบการขับขี่แบบรถแข่งและการใช้กระดูกพวงมาลัยแบบเฟืองสะพานยังช่วยให้เกิดเสถียรภาพในการควบคุมดีกว่าแบบพิตแมนอาร์ม

บทที่ 3 ทฤษฎีมุมล้อ

3.1 มุมล้อ

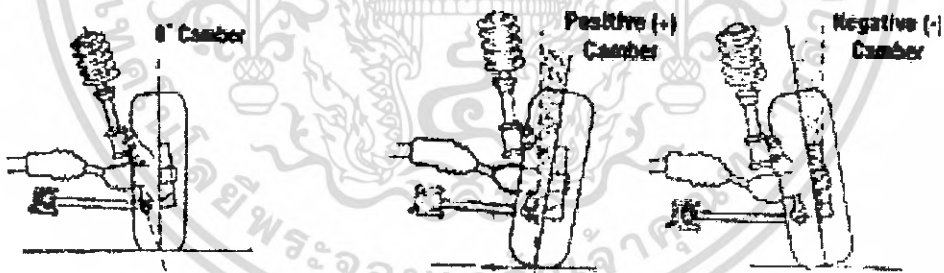
การจัดตั้งมุมล้อ (Wheel alignment) คือ การวางตัวของช่วงล่างตามความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆ ดังนี้ 1. มุมแคมเบอร์ 2. มุมแคสเตอร์ 3. มุมโท 4. มุมเอียงลูกหมากปีกนก ซึ่งมุมต่างๆเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพ และการควบคุมรถ มุมเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลง ตามการเคลื่อนที่ของรถ ไม่ว่าจะเป็น Pitch yaw หรือ roll ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แบบนี้มีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของรถ ซึ่งโครงการนี้จะทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อมุมต่างๆ ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ และการควบคุม โดยเราจะดูจากการเคลื่อนที่ของรถเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมล้อค่าต่างๆกัน

3.1.1 มุมแคมเบอร์ (Camber angle)

คือ มุมเอียงของเส้นแนวกึ่งกลางล้อเมื่อมองเข้าจากด้านหน้ารถ กล่าวคือ ถ้ามุมแคมเบอร์เป็นบวก แนวกลางล้อจะเอียงออกจากตัวรถ ดังรูปที่ 3-1 ในทางตรงข้ามกัน หากมุมแคมเบอร์เป็นลบแนวแกนกลางล้อก็จะเอียงเข้าทางด้านในตัวรถ

3.1.1.2 ลักษณะของมุมแคมเบอร์

มุมแคมเบอร์แบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ มุมแคมเบอร์เป็นบวก เป็นลบ และเป็นศูนย์ มุมแคมเบอร์ของรถยนต์ในไม่มีกฎเกณฑ์ในการปรับตั้งตายตัว ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบของวิศวกร ดังรูปที่ 3-1



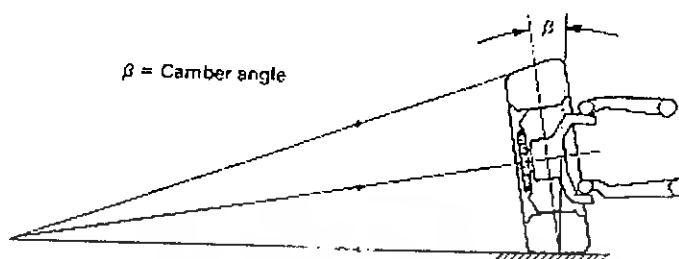
รูปที่ 3-1 มุมแคมเบอร์

3.1.1.3 ผลของมุมแคมเบอร์ที่มีค่ามากหรือน้อยเกินไป

- พวงมาลัยดึงหรือรถแล่นเฉจากทิศทางตรง

การเอียงของล้อในขณะที่รถแล่นจะมีผลต่อการกลิ้งของล้อรถในขณะที่สัมผัสกับผิวถนน เพราะถ้าล้อเกิดการเอียงทำให้ยางรถอ่อนตัวมีผลให้ขนาดของยางมีรัศมีที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้ายาง จึงเกิดการกลิ้งไปในลักษณะของกรวย กล่าวคือการเอียงของล้อจะทำให้ล้อหมุนกลิ้งไปในทิศทางที่ไม่ตรงกับทิศทางตรงของรถ ยิ่งล้อรถมีมุมแคมเบอร์มากขึ้นเท่าใดก็จะยิ่งทำให้ล้อเกิดการดึงออกจากทิศทางตรงมาก

ขึ้นและถ้าล้อหน้าทั้งสองของรถมีมุมแคมเบอร์ไม่เท่ากัน ล้อที่มีมุมแคมเบอร์มากกว่าจะดึงให้รถให้เฉไปทางด้านนั้น ทำให้คนขับจะต้องคอยดึงพวงมาลัยเพื่อให้รถแล่นตรงตลอดเวลา ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 การกึ่งของล้อเป็นกรวยเนื่องจากมุมแคมเบอร์มีค่าเป็นบวกมากเกินไป

- ยางสึกหรือเร็วผิดปกติ

ผลอีกอย่างหนึ่งจากการที่ล้อรถยนต์มีมุมแคมเบอร์โตเกินไป จะทำให้จุดที่ดอกยางสัมผัสกับผิวถนนแตกต่างกันมาก เช่น ถ้าล้อรถยนต์มีมุมแคมเบอร์บวกมากเกินไป ดอกยางด้านนอกจะสัมผัสกับผิวถนนมากกว่าด้านในจะทำให้ขอบดอกยางด้านนอกสึกเร็วกว่าด้านใน ในทางตรงกันข้ามถ้ามุมแคมเบอร์เป็นลบมากเกินไปขอบดอกยางด้านในจะสึกหรือเร็วกว่าด้านนอก

- ลูกปืนและลูกหมากคันสั่นสึกหรือเร็วผิดปกติ

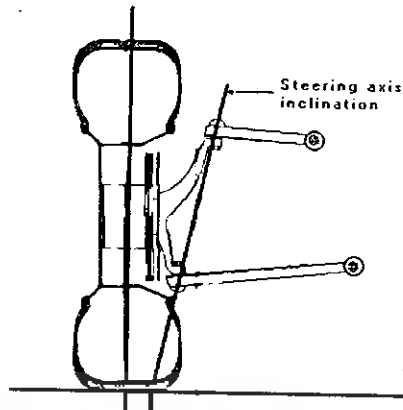
จากการที่ล้อรถยนต์ที่มีมุมแคมเบอร์โตเกินกว่าปกติทำให้ล้อกึ่งไปในทิศทางที่โค้งออกจากแนวตรง จึงมีผลให้ลูกหมากคันสั่นต้องรับแรงที่จะต้องบังคับล้อสูงกว่าปกติจึงทำให้ลูกหมากเกิดการสึกหรือเร็วยิ่งขึ้น พร้อมกันนั้นการที่ล้อเอียงเกินปกติทำให้ลูกปืนล้อต้องรับแรงไม่ถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้จึงมีโอกาสสึกหรือเร็วขึ้นด้วย

3.1.2 มุมเอียงลูกหมากปีกนก (Steering-axis inclination angle)

มุมล้อหน้าอีกมุมหนึ่งที่สัมพันธ์กับมุมแคมเบอร์ คือ มุมเอียงลูกหมากปีกนก ซึ่งเป็นมุมระหว่างเส้นแกนลูกหมากปีกนกกับเส้นแนวตั้งกลางล้อดังรูปที่ 3-3 ถ้าเป็นรถยนต์ที่ใช้ระบบช่วงล่างชนิดคานแข็งและรถยนต์ที่ใช้รถยนต์ที่ใช้สลักล้อหน้า (King pins) จึงเรียกมุมนี้ว่ามุมเอียงสลักล้อหน้า (king pin inclination) ส่วนรถยนต์ที่ใช้ลูกหมากปีกนก ก็เรียกว่า มุมเอียงลูกหมากปีกนก (Ball joint inclination angle)

มุมเอียงลูกหมากปีกนกมีประโยชน์เพื่อลดขนาดของมุมแคมเบอร์เพราะหากมุมแคมเบอร์มีค่ามากเกินไป จะมีผลเสียต่อการสึกหรอของดอกยางรถยนต์ และการหมุนในลักษณะกรวยของล้อทำให้แล่นไปในแนวทางโค้งซึ่งเป็นผลให้เกิดแรงดึงพวงมาลัย ทำให้การควบคุมเป็นไปได้ยาก เมื่อมีมุมเอียงลูกหมาก

ปีกนก เราก็สามารถลดขนาดมุมแคมเบอร์ลงได้ในขณะที่ยังคงทำให้หน้ายางสัมผัสกับผิวถนนได้อย่างเต็มที่ ทำให้ยางรถยนต์ตั้งอยู่ในแนวตั้ง ดอกยางก็จะสัมผัสกับผิวถนนอย่างเต็มที่ ส่งผลให้ตัวรถมีเสถียรภาพและควบคุมได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 3-3 มุมเอียงลูกหมากปีกนก

3.1.3 มุมแคสเตอร์ (Caster angle)

คือ มุมที่เกิดจากสลักล้อนำเอียงไปจากแนวตั้งเมื่อมองจากทางด้านข้างของรถ ในกรณีที่ใช้ลูกหมากปีกนกแทนสลักล้อนำ จะหมายถึงแนวของลูกหมากปีกนกที่เอียงไปจากแนวตั้ง ถ้าด้านบนของสลักล้อนำหรือลูกหมากปีกนกดัดบนเอียงไปทางด้านหลังรถ มุมที่กระทำกับแนวตั้งเรียกว่า มุมแคสเตอร์ที่มีค่าเป็นบวก และในทางตรงข้ามเรียกว่าค่าเป็นลบ ดังรูปที่ 3-4

3.1.3.2 ลักษณะของมุมแคสเตอร์



รูปที่ 3-4 มุมแคสเตอร์

- มุมแคสเตอร์บวก (Positive caster)

เป็นมุมของแกนลูกหมากปีกนกที่เอียงไปทางด้านหลังของรถ ขณะที่ล้อเลี้ยวออกจากแนวเส้นตรงจุดนำหรือจุดศูนย์นำจะไม่อยู่บนเส้นทิสทางเส้นของรถ ทำให้เกิดแรงจากการเลี้ยว (Turning force) ขึ้นซึ่งเป็นผลให้เกิดโมเมนต์ที่จะทำให้เกิดการจัดตั้งศูนย์ล้อด้วยตัวเอง (Self aligning torque) อันทำให้ล้อมีแนวโน้มที่จะรักษาล้อให้อยู่ในตำแหน่งเส้นตรงไปข้างหน้า แต่ต้องใช้แรงในการหมุนพวงมาลัย เช่น ขณะรถแล่นทางโค้งจะต้องใช้แรงในการควบคุมพวงมาลัยมาก แต่ก็มีผลดีในกรณีที่รถยนต์แล่นที่ความเร็วสูงๆ เพราะจะไม่ทำให้หัวรถส่ายไปมาทางด้านข้าง

- มุมแคสเตอร์ลบ (Negative caster)

เป็นมุมของแกนลูกหมากปีกนกที่เอียงไปทางด้านหน้าของรถ การที่รถยนต์มีมุมแคสเตอร์เป็นลบนี้ จะทำให้แรงเสียดล้อและจุดพ่วงอยู่หน้าหน้าจุนำ เป็นผลทำให้ล้อพยายามที่จะเลี้ยวอยู่ตลอดเวลาเพราะแรงเสียดล้อที่เกิดขึ้นจะพยายามไปอยู่ด้านหลัง

3.1.3.4 ผลของมุมแคสเตอร์ที่ไม่ถูกต้อง

1. เมื่อมีค่าเป็นบวกมากเกินไป

- พวงมาลัยหนัก
- ล้อเดินมากขณะวิ่ง

2. เมื่อมีค่าเป็นลบมากเกินไป

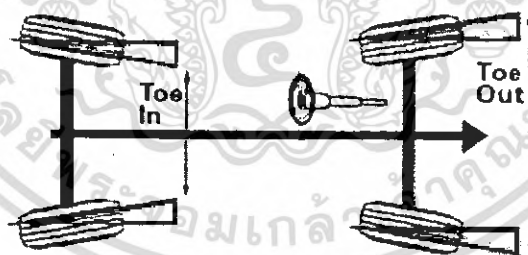
- ไม่มีเสถียรภาพ หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีความมั่นคงในการควบคุมที่ความเร็วสูง
- รถแลบง่ายและ หน้ารถส่ายไปมา

3. เมื่อค่ามุมแคสเตอร์ของล้อทั้งสองข้างไม่เท่ากัน

- มุมแคสเตอร์ที่ไม่เท่ากันเป็นสาเหตุให้รถกินไปทางที่มีมุมแคสเตอร์เป็นบวกน้อยกว่า เช่น ถ้ามุมแคสเตอร์ของล้อหน้าซ้ายน้อยกว่าล้อหน้าขวาขณะขับรถหน้ารถจะเอนออกด้านซ้ายตลอดเวลา

3.1.4 ระยะเวลา (Toe)

ระยะเวลา คือ ความแตกต่างของระยะระหว่างยางด้านหน้าและด้านหลังของล้อ เมื่อล้ออยู่ในตำแหน่งวิ่งทางตรง โดยระยะเวลาแบ่งออกเป็น โทอิน โทเอ้าท์ และ โทเป็นศูนย์ กล่าวคือ ถ้าระยะระหว่างยางด้านหน้ามีค่าน้อยกว่ายางด้านหลังเราจะเรียกว่า โทอิน แต่หากระยะระหว่างยางด้านหน้ามีค่ามากกว่าด้านหลังเราเรียกว่าโทเอ้าท์ ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 ระยะเวลา

ลักษณะระยะเวลา

โทอิน (Toe-in)

ระยะโทของล้อหน้าเป็นโทอินหมายถึงลักษณะของล้อหน้าทั้งสองที่มีระยะห่างด้านหน้าสุดน้อยกว่าระยะห่างหลังสุดของล้อหน้า

เป็นศูนย์ (Toe Zero)

หมายถึงระยะระหว่างความห่างของล้อหน้าทั้งด้านหน้าสุดและหลังสุดมีค่าเท่ากัน ซึ่งความต้องการอันแท้จริงคือรถยนต์จะต้องมีระยะโทของล้อหน้าขณะรถแล่นเป็นศูนย์ เพื่อต้องการให้ล้อรถยนต์ทุกๆ ล้อขนานแก่กันและกัน แต่ในทางปฏิบัติจะทำการปรับตั้งระยะโทของล้อหน้าให้เป็นโทอินเมื่อรถหยุดอยู่กับที่ โดยปรกติรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหน้าจะตั้งระยะโทเป็นศูนย์หรือเป็นโทอินเพียงเล็กน้อย

โทเอาท์ (Toe-out)

คือล้อหน้าของรถยนต์ที่มีระยะห่างของล้อหน้า ด้านหน้าสุดกว้างกว่าด้านหลังสุด ปรกติโทเอาท์จะเกิดขึ้นจากการเสียดทานของชิ้นส่วนของระบบขับเคลื่อนหรือระบบช่วงล่างด้านหน้า ซึ่งโทเอาท์นี้จะทำให้รถแล่นแล้วหัวรถส่ายไป-มาทำให้คนขับต้องคอยควบคุมพวงมาลัยเพื่อรักษาให้หน้ารถแล่นตรงตลอดเวลา

วัตถุประสงค์ของการตั้งค่าระยะโทของล้อหน้าให้เป็น โทอิน

เราตั้งค่าระยะโของล้อหน้าให้เป็น โทอินเพื่อชดเชยการหมุนของล้อให้เป็นไปในทิศทางที่ขนานกัน และเพื่อ เป็นการรักษาระยะ โทของล้อหน้าขณะรถแล่นให้เป็นศูนย์ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องตั้งให้ล้อเอียงเข้าหากันเล็กน้อยในขณะที่รถอยู่กับที่ อันเป็นการชดเชยการหันเหของล้อที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานของล้อบนผิวถนนและแรงที่เกิดจากการเบรก รวมไปถึงแรงดันที่เกิดจากการขับเคลื่อนที่ล้อหลัง ซึ่งแรงเสียดทานของล้อบนผิวถนนและแรงเบรคนี้อาจทำให้เกิดเป็น โมเมนต์ อันเป็นแนวโน้มที่ทำให้ล้อหน้าเกิดการเบนออกทางด้านข้างทำให้ล้อแล่นห่างออกจากกัน

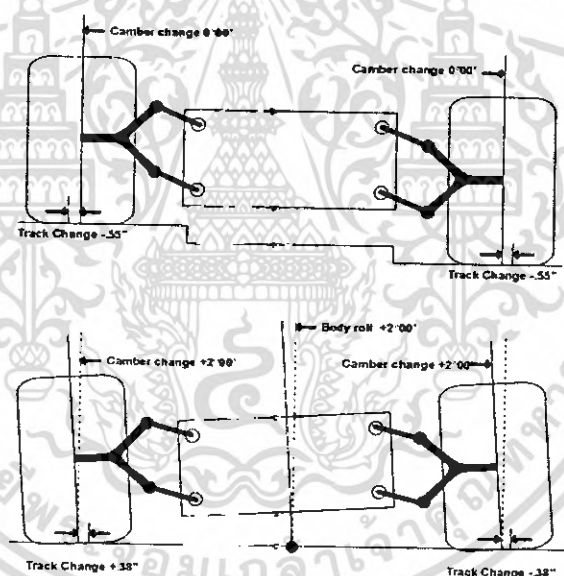
บทที่ 4

ทฤษฎีรูปแบบของระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว

4.1 รูปแบบการวางตัวของระบบช่วงล่าง

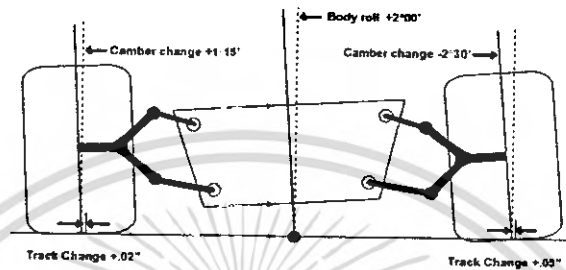
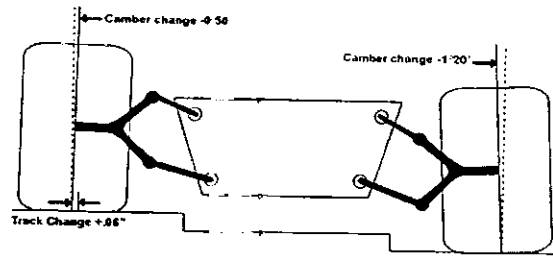
ในการออกแบบระบบช่วงล่างเมื่อกำหนดคุณลักษณะที่ต้องการแล้วเราก็ต้องเลือกว่าเราจะให้รูปแบบการวางตัวของระบบเป็นแบบไหน โดยเราเลือกให้เป็นแบบปีกนกคู่ ซึ่งรูปแบบการวางตัวของปีกนกคู่มีหลายรูปแบบดังนี้

4.1.1 ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน รูปแบบของปีกนกที่วางขนานกันจะช่วยให้ตำแหน่งการโคลงอยู่ต่ำ และช่วยรักษาตำแหน่งการวางตัวของล้อให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นจึงทำให้มุมแคมเบอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อล้อกระทบกับสิ่งกีดขวาง แต่ก็มีข้อเสียตรงที่มุมแคมเบอร์จะเปลี่ยนแปลงเท่ากับการมุม โคลง กล่าวคือ เมื่อรถโคลงไปเป็นมุม 2 องศา มุมแคมเบอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงไป 2 องศาด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดการสึกหรอของยาง ดังรูปที่ 4-1



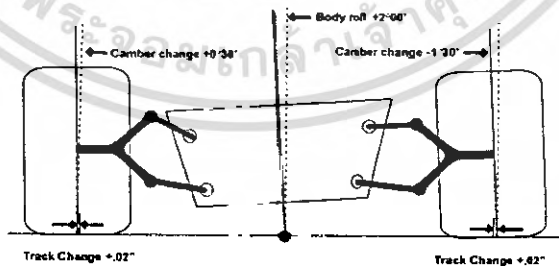
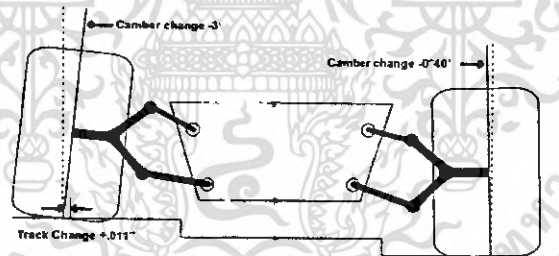
รูปที่ 4-1 ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน

4.1.2 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันแต่ขนานกัน เป็นรูปแบบของปีกนกที่ออกแบบมาเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ขณะรถ โคลง แต่การเปลี่ยนแปลงของมุมล้อขณะกระทบกับสิ่งกีดขวางจะมีมากกว่าแบบที่ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน ดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 ปีกนกบนและล่างขวาไม่เท่ากันแต่ขนานกัน

4.1.3 ปีกนกบนและล่างขวาไม่เท่ากันและไม่ขนานกัน เป็นรูปแบบที่สามารถควบคุมมุมแคมเบอร์ได้ดีที่สุดและยังช่วยในเรื่องการควบคุมรวมไปถึงลดการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ขณะรถโคลง และเรายังสามารถออกแบบให้จุดศูนย์กลางการโคลงอยู่ ณ ตำแหน่งใดก็ได้ดังรูปที่ 4-3.

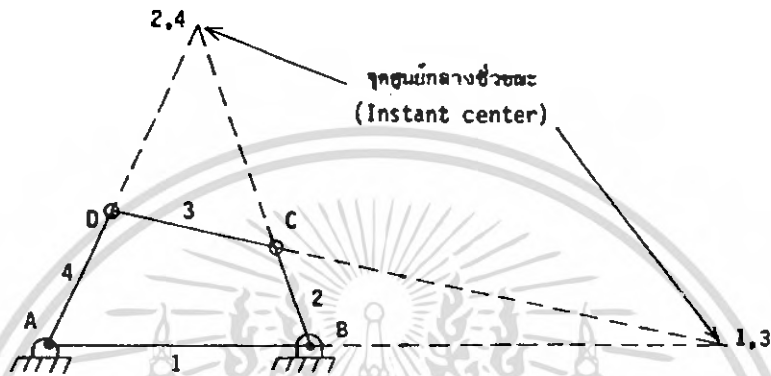


รูปที่ 4-3 ปีกนกบนและล่างขวาไม่เท่ากันและไม่ขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

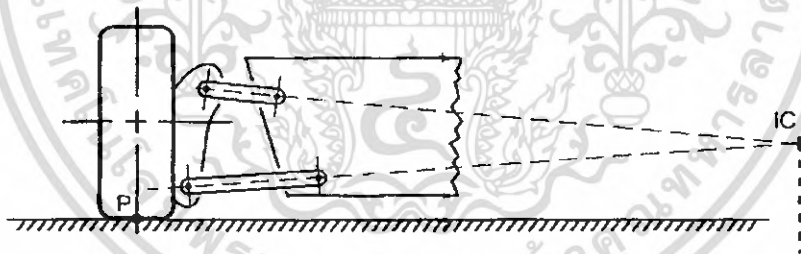
4.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบระบบช่วงล่าง

4.2.1 จุดศูนย์กลางชั่วขณะ (Instant center, IC) คือ จุดที่เปรียบเทียบเสมือนเป็นจุดศูนย์กลางร่วมในการเคลื่อนที่ร่วมกันอยู่ชั่วขณะหนึ่ง สามารถแสดงได้ด้วยโฟร์บาร์ลิงก์เกจดังรูปที่ 4-4 ซึ่งเป็นการวางตัวของกลไก เมื่อการเคลื่อนที่ของก้านค่อเปลี่ยนไป จุดศูนย์กลางชั่วขณะก็จะเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย ซึ่งจำนวนลิงค์ของโฟร์บาร์ลิงก์เกจสามารถแทนส่วนประกอบของระบบปีกนกลู่ คือ 1. โครง 2. ปีกนคอบน 3. คอมี้า 4. ปีกนกล่าง



รูปที่ 4-4 โฟร์บาร์ลิงก์เกจ

ซึ่งการเคลื่อนที่ของลิงค์ที่ประกอบเป็นระบบช่วงล่างจะมีลักษณะของจุดศูนย์กลางชั่วขณะ ดังรูปที่ 4-5



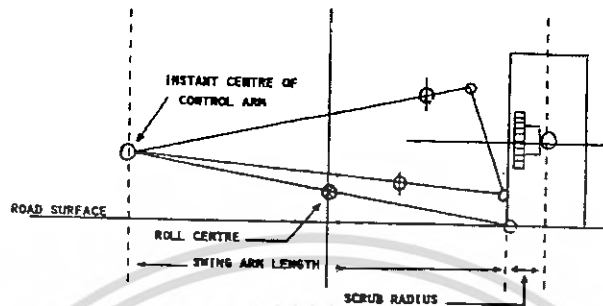
รูปที่ 4-5 จุดศูนย์กลางชั่วขณะ

รูปแบบของลิงค์จะส่งผลโดยตรงต่อตำแหน่งของจุดศูนย์กลางชั่วขณะ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางชั่วขณะมีผลต่อการเคลื่อนตัวของปีกนค ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมและเสถียรภาพของตัวรถ

4.2.2 จุดศูนย์กลางการโคลง (Roll Center, RC) คือ จุดแทนตำแหน่งการโคลงของตัวรถ ซึ่งล้อหน้าและหลังจะมีจุดศูนย์กลางการโคลงต่างกัน การโคลงของรถมีผลมาจากหลายๆสาเหตุไม่ว่าจะเป็นการวางตัวของปีกนค ตำแหน่งของหน้าสัมผัสยางในการออกแบบ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางการโคลงมีความสำคัญมาก เพราะส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพในการควบคุมรถ ซึ่งในการออกแบบเราต้องให้ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางการโคลงของล้อหน้าอยู่ต่ำเพื่อผลในด้านเสถียรภาพเพราะจะช่วยลด weight

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

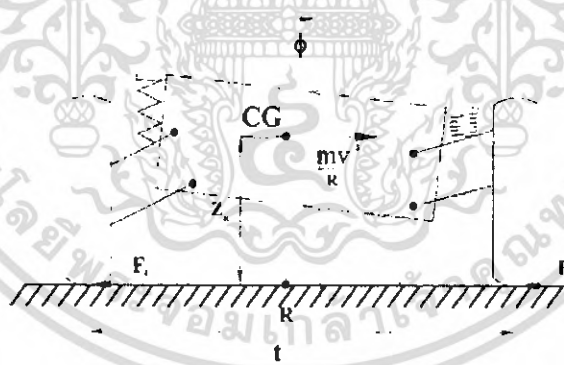
transfer คู่ล้อด้านนอก ซึ่งก็จะช่วยลด jacking affect ในขณะที่เลี้ยว และลดอาการ under steer ทำให้การควบคุมเป็นไปอย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4-6 จุดศูนย์กลางการโคลง

การออกแบบให้ตำแหน่งการโคลงอยู่ต่ำส่งผลโดยตรงดังนี้

- (1) โมเมนต์ที่ทำให้รถโคลง(Rolling moment) มีค่ามาก
- (2) ลด Jacking affect ในขณะที่เลี้ยว
- (2) มุมแคมเบอร์เปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้น้ำยางสัมผัสกับถนนได้มาก การยึดเกาะถนนดีขึ้น



รูปที่ 4-7 ผลของตำแหน่งการโคลง

แรงเหวี่ยงขณะเลี้ยว $F = m \frac{v^2}{R}$ (4-1)

โมเมนต์การโคลง $M_R = FZ$ (4-2)

โดยที่

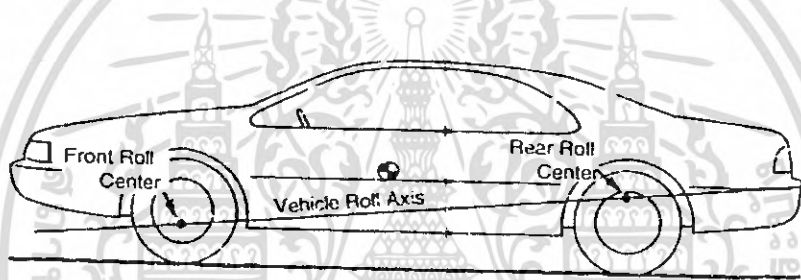
- F = แรงที่เกิดขึ้นขณะรถกำลังเลี้ยว
- m = มวลของรถ
- v = ความเร็วของรถขณะเลี้ยว
- R = รัศมีความโค้งขณะที่รถเลี้ยว

M_R = โมเมนต์การโคลง

Z_R = ความสูงของจุดศูนย์กลางการโคลง

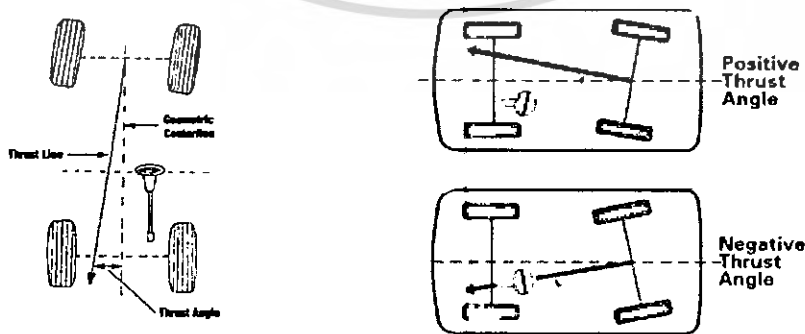
การออกแบบให้ตำแหน่งการโคลงอยู่ต่ำทำให้โมเมนต์การโคลงมีมาก เป็นข้อเสีย เพราะจะทำให้รถโคลงมากในขณะเข้าโค้ง แต่เราสามารถแก้ไขได้ด้วยการเสริมเหล็กกันโคลง แต่ถ้าเราออกแบบให้ตำแหน่งการโคลงอยู่สูง (ใกล้จุดศูนย์กลางความถ่วง (CG)) ถึงแม้จะลดโมเมนต์การโคลงลงได้ แต่ก็จะทำให้หม้อแคมเบอร์เปลี่ยนแปลงมากแทน เพราะฉะนั้น ในการออกแบบเราจะพยายามให้ตำแหน่งการโคลงอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางความถ่วงที่สุดโดยที่หม้อแคมเบอร์ต้องเปลี่ยนแปลงอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ แล้วใช้เหล็กกันโคลงเข้าช่วยลดการโคลงของตัวรถ

4.2.3 แนวแกนการโคลง(Roll axis) คือ แนวเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างจุดศูนย์กลางการโคลงล้อหน้ากับจุดศูนย์กลางการโคลงล้อหลัง ดังรูปที่ 4-8 ซึ่งโดยทั่วไปแนวเส้นจะขนานกับผิวดนเพื่อเสถียรภาพที่ดี และช่วยให้การกระจายตัวของแรงลงสู่ล้อเพื่อการยึดเกาะที่ดี



รูปที่ 4-8 แนวแกนการโคลง

4.2.4 ทรัสไลท์(Thrust line) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแนวปีกนกหลังกับเส้นแนวกึ่งกลางรถ thrust angle คือ มุมของล้อทั้งสี่ที่กระทำกับแนวเส้นกึ่งกลางรถ หากแนวเส้น thrust line อยู่ด้านขวาของเส้นกึ่งกลางรถ มุม thrust จะเป็นบวก ในทางตรงข้ามหากอยู่ด้านซ้ายของแนวเส้นกึ่งกลางรถ thrust ก็จะเป็นลบ ดังภาพที่ ซึ่งมุม thrust ที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่หน้ายาง และการบังคับเลี้ยวคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 4-9 Thrust line

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

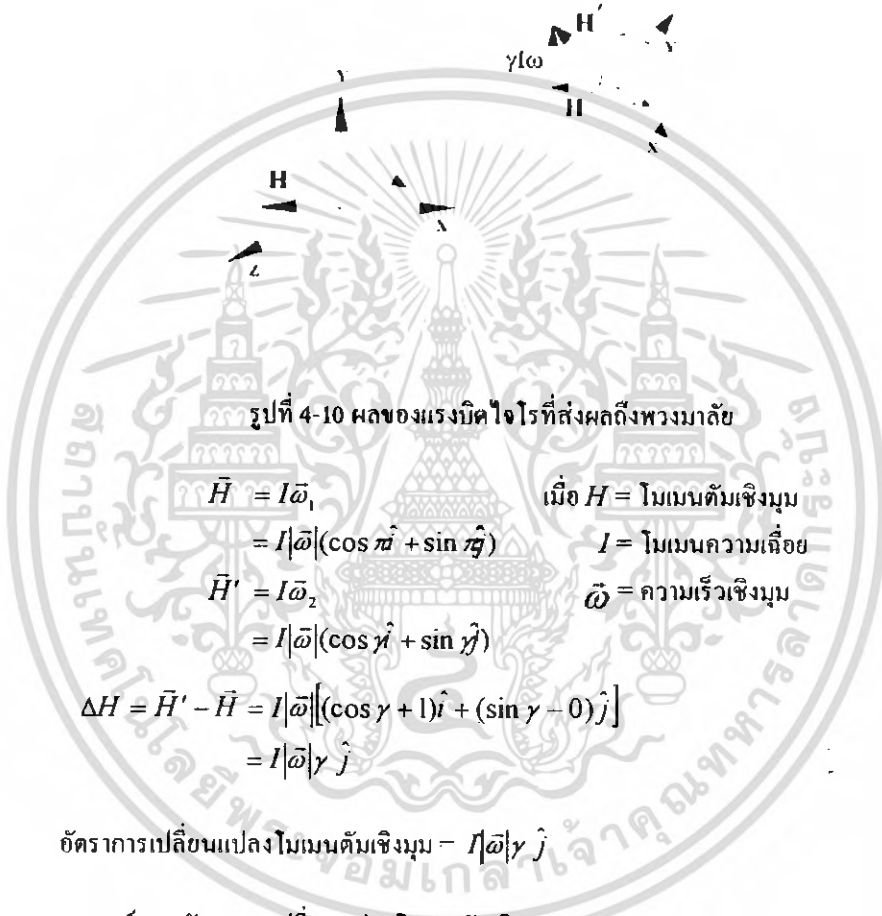
4.3 การออกแบบมุมล้อ

4.3.1 การออกแบบมุมแคมเบอร์

เราออกแบบให้มุมแคมเบอร์เป็นบวก และ เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 องศา เพราะเหตุผลดังนี้

(1) เพื่อลดผลของแรงบิดใจโร (Gyroscopic Torque)

แรงบิดใจโรมีผลต่อพวงมาลัยดังรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 ผลของแรงบิดใจโรที่ส่งผลถึงพวงมาลัย

$$\begin{aligned} \vec{H} &= I\vec{\omega}_1 \\ &= I|\vec{\omega}|(\cos \gamma \hat{i} + \sin \gamma \hat{j}) \\ \vec{H}' &= I\vec{\omega}_2 \\ &= I|\vec{\omega}|(\cos \gamma' \hat{i} + \sin \gamma' \hat{j}) \\ \Delta H &= \vec{H}' - \vec{H} = I|\vec{\omega}|[(\cos \gamma' - \cos \gamma)\hat{i} + (\sin \gamma' - \sin \gamma)\hat{j}] \\ &= I|\vec{\omega}|\gamma \hat{j} \end{aligned}$$

เมื่อ $H =$ โมเมนตัมเชิงมุม
 $I =$ โมเมนต์ความเฉื่อย
 $\vec{\omega} =$ ความเร็วเชิงมุม

อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงมุม = $I|\vec{\omega}|\gamma \hat{j}$

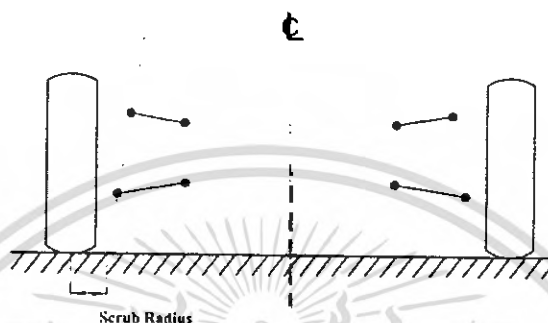
ทอร์ก = อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงมุม

$$= \frac{d\Delta \vec{H}}{dt} \tag{4-3}$$

ในขณะที่รถเริ่มเลี้ยวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์นี้จะทำให้โมเมนตัมเชิงมุมมีทิศทางเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงนี้ก่อให้เกิดเวกเตอร์ลัพท์ขึ้น ($\phi \vec{\omega}$) ดังรูปที่ 4-10 ซึ่งหากเราคิดอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงมุมที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาดังสมการที่ 4-3 ก็จะได้ทอร์กนั่นเอง ซึ่งทอร์กที่เกิดขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมรถ

(2) เพื่อให้พวงมาลัยเบาลง

การที่มุมแคมเบอร์เป็นบวกจะทำให้ระยะห่างระหว่างแนวแกนสลักล้อหน้ากับจุดสัมผัสตั้งกลางข้างลดลง ระยะนี้เราเรียกว่า รัศมีดู (Scrub radius) ดังรูปที่ 4-11 ถ้ารัศมีดูยาว แขนของแรงจะยาว ทำให้เกิดโมเมนต์กดที่สลักล้อหน้า ทำให้เกิดการเบียดค้ำที่สลักล้อขณะหมุนพวงมาลัย ซึ่งจะทำให้พวงมาลัยหนัก



รูปที่ 4-11 รัศมีดู

- (3) ให้จุดที่ยางสัมผัสกับพื้นผิวถนนอยู่ใกล้กับแนวที่น้ำหนักกดลง
 ทั้งนี้ก็เพื่อให้หน้ายางสัมผัสกับผิวถนนอย่างเต็มที่เพื่อผลในการยึดเกาะ และการควบคุมที่ดี
- (4) เพื่อลดปัญหาการปิดของล้อหน้าในขณะเบรก

กล่าวคือถ้ารัศมีดูยาว ขณะเบรกจะเกิดผลต่อการปิดของล้อหน้ามากขึ้น ถ้าเบรกล้อใดล้อหนึ่งจับไม่เท่ากันผลของการแฉลบก็จะมีมากขึ้น

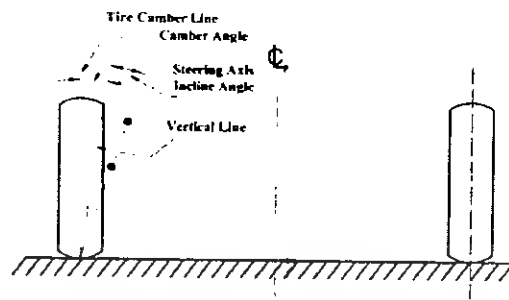
(5.) เพื่อลดอาการโอเวอร์สตีร์

เมื่อรถยนต์แล่นบนทางโค้งด้วยความเร็วสูง จุดศูนย์กลางของรถจะเลื่อนไปทางล้อด้านนอก ตัวรถด้านนอกของทางโค้งจะเอียงต่ำลง ทำให้ล้อด้านนอกมีมุมแคมเบอร์โดขึ้น (เมื่อเทียบกับตัวรถ) และขณะเดียวกันล้อด้านในก็จะเกิดมุมแคมเบอร์เป็นลบ (เมื่อเทียบกับตัวรถ) อันเป็นผลให้ล้อเบนออกนอกทางโค้ง หรือก็คืออาการโอเวอร์สตีร์นั่นเอง

4.3.2 การออกแบวมุมเอียงลูกหมากปีกนก(Steering axis inclination)

เราออกแบบมุมเอียงลูกหมากปีกนกเพื่อ

- (1) ลดมุมแคมเบอร์ลงเพื่อไม่ให้เกิดผลเสียจากมุมแคมเบอร์ที่เป็นบวกมากเกินไป เพราะจะทำให้หน้ายางสัมผัสผิวถนนไม่เต็มที่
- (2) เพื่อให้หน้าหนักของรถลงสู่จุดศูนย์กลางข้างมากที่สุด
- (3) ทำให้พวงมาลัยเบาลงเนื่องจากรัศมีดูที่ลดลง
- (4) ทำให้พวงมาลัยคืนตัวขณะเลี้ยว

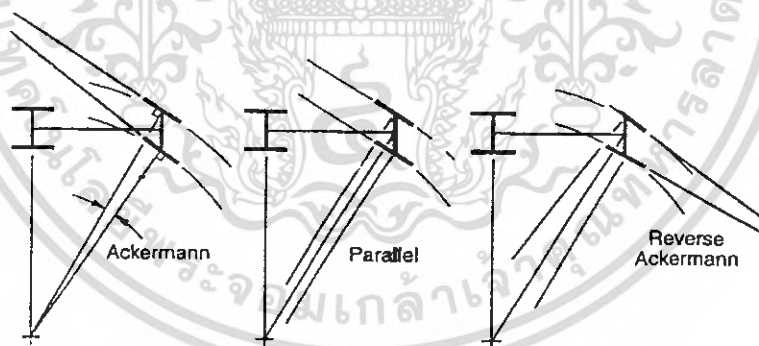


รูปที่ 4-12. มุมเอียงลูกหมากปีกนก

4.4 ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบระบบบังคับล้อ

4.4.1 Ackermann Steering Geometry

คือความแตกต่างของมุม Steer ของล้อหน้าซ้ายกับล้อหน้าขวาซึ่งจะแตกต่างจากระยะโทของล้อหน้า ซึ่งความแตกต่างของมุม Steer ล้อหน้านี้จะส่งผลคือ หากลักษณะการจับชี้เป็นแบบทั่วๆไปตามท้องถนน (มีค่าความเร่งในแนวด้านข้างน้อย) รูปแบบของแอกเคอร์มันก็จะมีความเหมาะสมดังรูปที่ 4-13 ซึ่งลักษณะการจับชี้แบบทั่วๆไปนี้จะไม่เกิดมุมสลับขึ้นจึงทำให้การเลี้ยวเกิดรอบจุดศูนย์กลางการเลี้ยว



รูปที่ 4-13 วิธีบังคับล้อคาทฤษฎีของแอกเคอร์มัน

แต่หากเป็นลักษณะของการจับชี้แบบที่ใช้ความเร็วสูงค่าความเร่งในแนวด้านข้างจะมีค่ามาก มุมสลับของล้อจึงมีผลโดยตรงต่อการวิเคราะห์ โดยมุมสลับที่เกิดกับล้อหน้าด้านนอกจะมีค่ามากกว่าล้อหน้าด้านใน สำหรับรถแข่งควรจะใช้แบบ Parallel หรือแบบ Reverse Ackermann

ดังภาพที่ เพราะรูปแบบทั้งสองจะทำให้เกิด “Toe-out on turning” ลักษณะของโท-เออร์ออน เทิน จะเกิดจากสองสาเหตุคือ

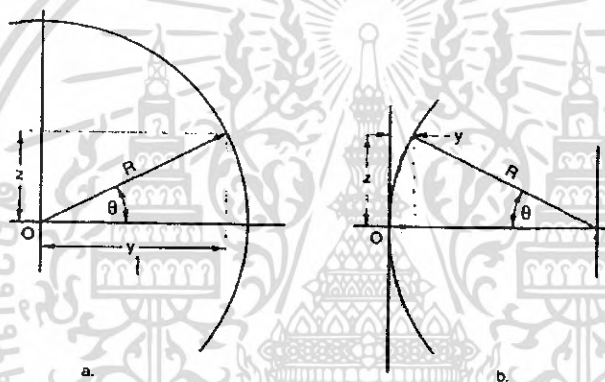
1. มุมเลี้ยวของล้อหน้าทั้งสองข้าง คือ หากมุมเลี้ยวของล้อหน้าด้านในมีค่ามากกว่าด้านนอกก็จะเกิด โท-เออร์ ออน เทิน ขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของ อັคเคอร์มานในอุดมคติ ซึ่งจะส่งผลดีต่อการควบคุมมากกว่าแบบ พิตแมนอาร์ม

2. ตำแหน่งการวางก้านคั่น คือ หากเราให้ตำแหน่งของก้านคั่นยึดอยู่กับคอม้าทางด้านหน้า ก็จะทำให้เกิดโท-เออร์ ออนเทิน เช่นกัน

ซึ่งลักษณะทั้งสองแบบของแอกเคอร์มานไม่ว่าจะเป็นแบบขนาน และแบบ Reverse ต่างก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการขับขี่ที่ความเร็วสูงเพื่อให้ผลในการควบคุมที่ดีกว่าแบบพิตแมนอาร์ม

4.5. การวิเคราะห์ทางด้านไคเนติกส์ของระบบช่วงล่าง

4.5.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ (Camber Change)



รูปที่ 4-14 แบบจำลองของระบบช่วงล่างอย่างง่าย

จากรูปที่ 4-14 ในกรณีที่เรารู้ค่า z จะได้ความสัมพันธ์

$$y_1^2 + z^2 = R^2 \tag{4-4}$$

แต่ $y = R - y$ (4-5)

แทนสมการที่ (4-5) ในสมการที่ (4-4) จะได้

$$(R - y)^2 + z^2 = R^2$$

$$- 2Ry + y^2 + z^2 = 0 \tag{4-6}$$

แต่ y มีค่าน้อยมาก ฉะนั้น $y^2 \approx 0$

ฉะนั้นจะได้สมการ

$$- 2Ry + z^2 = 0$$

$$y = \frac{z^2}{2R} \tag{4-7}$$

ในกรณีที่เรารู้ค่า θ จะได้

$$y = R - R \cos \theta \tag{4-8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4-6)

$$y^2 - 2Ry + z^2 = 0$$

หา y จาก

$$\begin{aligned} y &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ \therefore y &= \frac{-2R \pm \sqrt{4R^2 - 4z^2}}{2} \\ &= \frac{2R \pm 2\sqrt{R^2 - z^2}}{2} \\ &= R \pm \sqrt{R^2 - z^2} \\ \frac{y}{R} &= 1 \pm \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}} \end{aligned} \quad (4-9)$$

จากสมการไบนอมิอัล (Binomial Expansion)

$$(a \pm b)^n = a^n \pm na^{n-1}b \pm \frac{n(n-1)}{2!}a^{n-2}b^2 \pm \dots$$

ฉะนั้น $\sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}}$ จะได้ $a = 1$, $b = -\frac{z^2}{R^2}$ และ $n = 0.5$

$$\begin{aligned} \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}} &= 1 + 0.5(1)^{0.5-1} \left(\frac{-z^2}{R^2}\right) + \frac{0.5(0.5-1)}{2!} (1)^{0.5-2} \left(\frac{-z^2}{R^2}\right)^2 + \dots \\ &= 1 - \frac{z^2}{2R^2} - \frac{z^4}{8R^4} - \frac{z^6}{16R^6} - \dots \end{aligned} \quad (4-10)$$

จากสมการที่ (4-9)

$$\frac{y}{R} = 1 + \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}}, 1 - \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}}$$

แต่ $y < R$ เสมอ

นั่น $\frac{y}{R} < 1$

แต่ $1 + \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}}$ จะมากกว่า 1 เสมอ ฉะนั้นจึงใช้ไม่ได้เพราะค่า $\frac{y}{R}$ ต้องมีค่าน้อยกว่า 0 ดังนั้น $\frac{y}{R}$

จึงมีแค่คำตอบเดียว คือ

$$\frac{y}{R} = 1 - \sqrt{1 - \frac{z^2}{R^2}} \quad (4-11)$$

ฉะนั้น แทนค่าสมการที่ (4-10) ลงในสมการที่ (4-11) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{y}{R} &= 1 - \left[1 - \frac{z^2}{2R^2} - \frac{z^4}{8R^4} - \frac{z^6}{16R^6} - \dots\right] \\ &= \frac{z^2}{2R^2} + \frac{z^4}{8R^4} + \frac{z^6}{16R^6} + \dots \\ y &= \frac{z^2}{2R} + \frac{z^4}{8R^3} + \frac{z^6}{16R^5} + \dots \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{z^2}{2R} \left[1 + \frac{z^2}{8R^2} + \frac{z^4}{16R^4} + \dots \right] \quad (4-12)$$

ถ้าจะให้ค่าถูกต้องและแม่นยำต้องมีพจน์ในวงเล็บมากๆ

เทียบค่าที่ได้จากสมการที่ (4-12) ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้องกับค่าที่ได้จากสมการที่ (4-7) ซึ่งเป็นค่าประมาณ โดยให้ $z = 100$ มม. $R = 400$ มม.

แทนค่า z, R ลงในสมการที่ (4-12) โดยให้พจน์ในวงเล็บมีแค่ 2 พจน์ จะได้

$$y = \frac{z^2}{2R} \left[1 + \frac{z^2}{8R^2} \right]$$

$$= \frac{(50)^2}{2(400)} \left[1 + \frac{(50)^2}{8(400)^2} \right]$$

$$= \frac{2500}{800} \left[1 + \frac{2500}{128 \times 10^4} \right]$$

$$= 3.13 \text{ มม.}$$

แทนค่า z, R ลงในสมการที่ (4-7) จะได้

$$y = \frac{z^2}{2R}$$

$$= \frac{(50)^2}{2(400)}$$

$$= \frac{2500}{800}$$

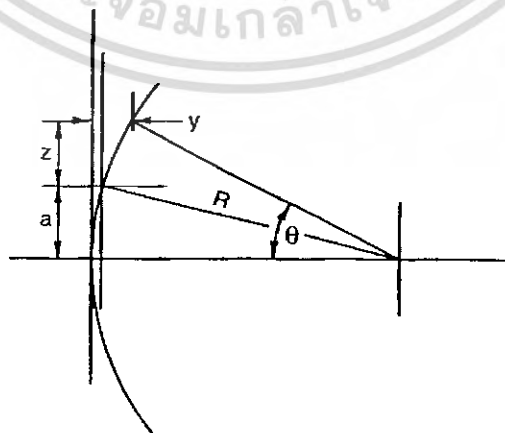
$$= 3.125 \text{ มม.}$$

ฉะนั้นจะได้ว่าถ้าเราใช้สมการที่ (4-7) จะมีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) เป็น

$$\frac{3.13 - 3.125}{3.13} \times 100 = 0.16 \%$$

แต่ในระบบช่วงล่าง ถ้าเริ่มต้นจะไม่ได้อยู่ในแนวอนดิงรูปที่ 4-14 แต่จะมีระยะยกเป็น a ดังรูปที่ 4-

15



รูปที่ 4-15 แบบจำลองระบบช่วงล่างอย่างง่ายที่มีระยะยก a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

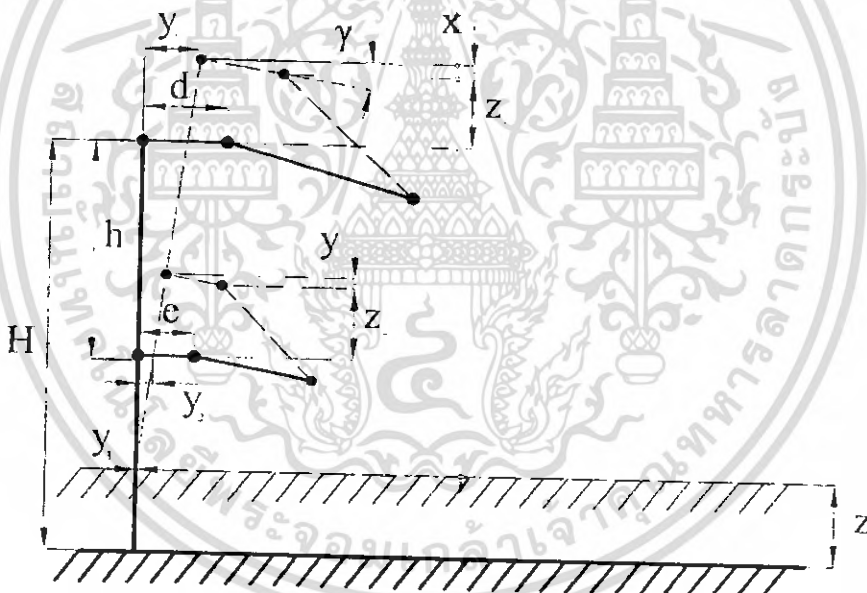
จากสมการที่ (4-7) และรูปที่ 4-15 จะหาค่า e และ y_2 จาก

$$e = \frac{a^2}{2R}$$

$$y_2 = \frac{(z+a)^2}{2R}$$

จากรูปที่ 4-15 หา y จาก

$$\begin{aligned} y &= y_2 - e \\ &= \frac{(z+a)^2}{2R} - \frac{a^2}{2R} \\ &= \frac{(z+a)^2 - a^2}{2R} \\ &= \frac{z^2 + za}{2R} + \frac{za}{R} \end{aligned} \quad (4-13)$$



รูปที่ 4-16 แบบจำลองระบบช่วงล่างขณะล้อเคลื่อนที่ขึ้น

ระยะ $d\gamma$ และ $e\gamma$ มาจาก

$$\begin{array}{l} \gamma \\ \searrow \\ d \end{array} \quad \begin{array}{l} d \cos \gamma \\ \\ d \sin \gamma \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \gamma \\ \searrow \\ c \end{array} \quad \begin{array}{l} c \cos \gamma \\ \\ c \sin \gamma \end{array}$$

แต่ γ เป็นมุมเล็กมาก ฉะนั้น $\sin \gamma \approx \gamma$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore d \sin \gamma = dy$$

$$\therefore e \sin \gamma = e\gamma$$

จากรูปที่ 4-14 จะได้ว่า

$$z_1 = z - dy \quad (4-14)$$

$$z_1^2 = z^2 - 2zdy + (dz)^2 \quad (4-15)$$

$$z_2 = z - e\gamma \quad (4-16)$$

$$z_2^2 = z^2 - 2zey + (ez)^2 \quad (4-17)$$

โดย d ไม่ใช่ตัวดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) แต่เป็นระยะห่างของปีกนกบนกับแนวแกนกลาง ล้อและ γ มีหน่วยเป็น radian

จากสมการที่ (4-15) และ (4-17) ค่า dy และ $e\gamma$ มีค่าน้อยมากฉะนั้น $(dy)^2 \approx 0, (e\gamma)^2 \approx 0$ ฉะนั้นจะได้สมการเป็น

$$z_1^2 \cong z^2 - 2dzy \quad (4-18)$$

$$z_2^2 \cong z^2 - 2zey \quad (4-19)$$

จากสมการที่ (4-13) จะได้

$$\begin{aligned} y_1 &\cong \frac{z_1^2}{2R_1} + \frac{z_1 a}{R_1} \\ &\cong \frac{z^2 - 2dzy}{2R_1} + \frac{za - dya}{R_1} \end{aligned} \quad (4-20)$$

$$\begin{aligned} y_2 &\cong \frac{z_2^2}{2R_2} + \frac{z_2 b}{R_2} \\ &\cong \frac{z^2 - 2zey}{2R_2} + \frac{zb - e\gamma b}{R_2} \end{aligned} \quad (4-21)$$

ฉะนั้น

$$\begin{aligned} y_1 - y_2 &\cong \frac{z^2 - 2dzy}{2R_1} + \frac{za - dya}{R_1} - \left[\frac{z^2 - 2zey}{2R_2} + \frac{zb - e\gamma b}{R_2} \right] \\ &\cong \frac{z^2}{2R_1} - \frac{dzy}{R_1} + \frac{za}{R_1} - \frac{dya}{R_1} - \frac{z^2}{2R_2} + \frac{zey}{R_2} - \frac{zb}{R_2} + \frac{e\gamma b}{R_2} \\ &\cong \left[\frac{z^2}{2R_1} - \frac{z^2}{2R_2} \right] + \left[\frac{za}{R_1} - \frac{zb}{R_2} \right] + \left[-\frac{dzy}{R_1} + \frac{zey}{R_2} \right] + \left[-\frac{dya}{R_1} + \frac{e\gamma b}{R_2} \right] \\ y_1 - y_2 &\cong \frac{z^2}{2} \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] + z \left[\frac{a}{R_1} - \frac{b}{R_2} \right] - zy \left[\frac{d}{R_1} - \frac{e}{R_2} \right] - \gamma \left[-\frac{da}{R_1} + \frac{eb}{R_2} \right] \end{aligned} \quad (4-22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติตัวแปรขึ้นมาใหม่ ดังนี้

$$P_1 = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}$$

$$Q_1 = \frac{a}{R_1} - \frac{b}{R_2}$$

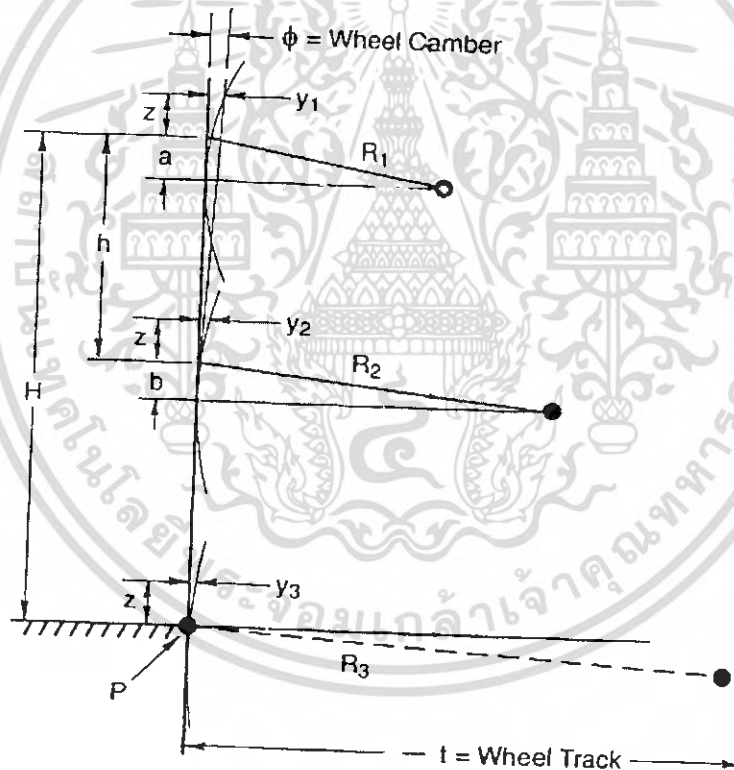
$$U_1 = \frac{d}{R_1} - \frac{e}{R_2}$$

$$V_1 = \frac{ad}{R_1} - \frac{be}{R_2}$$

จะนำแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการที่ (4-22) จะได้

$$y_1 - y_2 = \frac{P_1 z^2}{2} + Q_1 z - V_1 y - U_1 zy \quad (4-23)$$

นำรูปที่ 4-16 มาเขียนใหม่โดยดูเฉพาะมุมแคมเบอร์ (γ)



รูปที่ 4-17 แบบจำลองระบบช่วงล่างพิจารณาเฉพาะมุมแคมเบอร์

จากรูปที่ 4-17 จะได้มุมแคมเบอร์ (γ) จาก

$$\tan \gamma = \frac{y_1 - y_2}{h}$$

แต่ γ เล็กมากๆ ทำให้

$$\sin \gamma \approx \gamma$$

$$\cos \gamma \approx 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \tan \gamma = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} \approx \gamma$$

ฉะนั้นจะได้

$$\gamma = \frac{y_1 - y_2}{h} \quad (4-24)$$

แทนสมการที่ (4-23) ลงในสมการที่ (4-24) จะได้

$$\gamma = \frac{y_1 - y_2}{h} = \frac{1}{h} \left[\frac{P_1 z^2}{2} + Q_1 z - V_1 \gamma - U_1 z \gamma \right]$$

$$\gamma = \frac{P_1 z^2}{2h} + \frac{Q_1 z}{h} - \frac{V_1 \gamma}{h} - \frac{U_1 z \gamma}{h}$$

$$\gamma + \frac{V_1 \gamma}{h} + \frac{U_1 z \gamma}{h} = \frac{P_1 z^2}{2h} + \frac{Q_1 z}{h}$$

$$\gamma \left[1 + \frac{V_1 + U_1 z}{h} \right] = \frac{0.5 P_1 z^2 + Q_1 z}{h}$$

$$\gamma \left[\frac{h + V_1 + U_1 z}{h} \right] = \frac{0.5 P_1 z^2 + Q_1 z}{h}$$

$$\gamma = \frac{0.5 P_1 z^2 + Q_1 z}{h + V_1 + U_1 z} \quad (4-25)$$

หากการเปลี่ยนแปลงมุมแฉกเบอร์ดเมื่อเทียบกับระยะยกที่เปลี่ยนแปลงไป โดยดิฟเฟอเรนเชียล γ เทียบกับ z จะได้

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{d}{dz} \left[\frac{0.5 P_1 z^2 + Q_1 z}{h + V_1 + U_1 z} \right]$$

$$\text{Diff ผลหาร} = \frac{d}{dt} \left[\frac{u}{v} \right] = \frac{vu' - uv'}{v^2}$$

$$\therefore \frac{d\gamma}{dz} = \frac{(h + V_1 + U_1 z)(P_1 z + Q_1) - (0.5 P_1 z^2 + Q_1 z)(U_1)}{(h + V_1 + U_1 z)^2}$$

เอา $(h + V_1 + U_1 z)$ ทหารทั้งเศษและส่วน จะได้

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{(P_1 z + Q_1) - \frac{(0.5 P_1 z^2 + Q_1 z)(U_1)}{(h + V_1 + U_1 z)}}{(h + V_1 + U_1 z)}$$

แต่ $\gamma = \frac{0.5 P_1 z^2 + Q_1 z}{h + V_1 + U_1 z}$ ฉะนั้นจะได้ว่า

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{P_1 z + Q_1 - \gamma U_1}{h + V_1 + U_1 z} \quad (4-26)$$

4.5.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความกว้างของฐานล้อ (Track Change)

กรณีที่ 1 จากรูปที่ 4-17 จะได้ว่าระยะ $y_3 = 0$ แสดงว่าจุด P เป็นจุดหมุน

จากสามเหลี่ยมคล้าย PHy_1 และ $P(H-h)y_2$ จะได้อัตราส่วน

$$\frac{y_1}{H} = \frac{y_2}{H-h}$$

$$y_1(H-h) = y_2 H$$

เอา h หารตลอด จะได้

$$\frac{y_2 H}{h} - \frac{y_1(H-h)}{h} = 0 \quad (4-27)$$

กรณีที่ 2 จากรูปที่ 4-17 จะได้ว่าระยะ $y_2 = 0$ แสดงว่าจุด y_2 เป็นจุดหมุน

จากรูปที่ 4-17 จะได้สามเหลี่ยมคล้าย $y_3(H-h)y_2$ กับ $y_1 h y_2$ จะได้อัตราส่วน

$$\frac{-y_3^+}{H-h} = \frac{y_1}{h}$$

$$-y_3 h = y_1(H-h)$$

เอา h หารตลอด จะได้

$$-y_3 - \frac{y_1(H-h)}{h} = 0$$

$$y_3 = \frac{-y_1(H-h)}{h} \quad (4-28)$$

กรณีที่ 3 จากรูปที่ 4-17 จะได้ว่าระยะ $y_1 = 0$ แสดงว่าจุด y_1 เป็นจุดหมุน

จากรูปที่ 4-17 จะได้สามเหลี่ยมคล้าย $y_3 H y_1$ และ $y_2 h y_1$ จะได้อัตราส่วน

$$\frac{-y_3}{H} = \frac{-y_2}{h}$$

$$y_3 h = y_2 H$$

เอา h หารตลอด

$$y_3 = \frac{y_2 H}{h} \quad (4-29)$$

จากทฤษฎีซูเปอร์โพสิชัน (Superposition Theory) โดยนำสมการที่ได้จากทั้ง 3 กรณีคือ สมการที่ (4-27), (4-28), (4-29) มาบวกกัน จะได้สมการเป็นดังนี้

$$2y_3 = 2 \left[\frac{y_2 H}{h} - \frac{y_1(H-h)}{h} \right]$$

⁺ ที่มีเครื่องหมายเป็นลบเพราะอยู่ทางด้านซ้ายของแกนล้อ

$$y_3 = \frac{y_2 H}{h} - \frac{y_1 (H-h)}{h} \quad (4-30)$$

แทนค่าจากสมการที่ (4-20) และ (4-21) ลงในสมการที่ (4-30) จะได้

$$y_3 = \left[\frac{z^2 - 2ezy}{2R_2} + \frac{zb - e\gamma b}{R_2} \right] \left(\frac{H}{h} \right) - \left[\frac{z^2 - 2dzy}{2R_1} + \frac{za - d\gamma a}{R_1} \right] \left(\frac{H-h}{h} \right)$$

$$y_3 = \left(\frac{z^2 - 2ezy}{2R_2} \right) \left(\frac{H}{h} \right) + \left(\frac{zb - e\gamma b}{R_2} \right) \left(\frac{H}{h} \right) - \left(\frac{z^2 - 2dzy}{2R_1} \right) \left(\frac{H-h}{h} \right) - \left(\frac{za - d\gamma a}{R_1} \right) \left(\frac{H-h}{h} \right)$$

$$y_3 = \left(\frac{z^2}{2R_2} \right) \left(\frac{H}{h} \right) - \left(\frac{z^2}{2R_1} \right) \left(\frac{H-h}{h} \right) - \left(\frac{ezy}{R_2} \right) \left(\frac{H}{h} \right) + \left(\frac{dzy}{R_1} \right) \left(\frac{H-h}{h} \right) + \left(\frac{zb}{R_2} \right) \left(\frac{H}{h} \right) - \left(\frac{za}{R_1} \right) \left(\frac{H-h}{h} \right)$$

$$+ \left(\frac{d\gamma a}{R_1} \right) \left(\frac{H-h}{h} \right) - \left(\frac{e\gamma b}{R_2} \right) \left(\frac{H}{h} \right)$$

$$y_3 = \frac{z^2}{2h} \left[\left(\frac{H}{R_2} \right) - \left(\frac{H-h}{R_1} \right) \right] - \frac{zy}{h} \left[\frac{eH}{R_2} - \frac{d(H-h)}{R_1} \right] + \frac{z}{h} \left[\frac{bH}{R_2} - \frac{a(H-h)}{R_1} \right] - \frac{\gamma}{h} \left[\frac{ebH}{R_2} - \frac{da(H-h)}{R_1} \right] \quad (4-31)$$

สมมติตัวแปรขึ้นมาใหม่ ดังนี้

$$P_2 = \frac{H}{R_2} - \frac{H-h}{R_1}$$

$$Q_2 = \frac{Hb}{R_2} - \frac{(H-h)a}{R_1}$$

$$U_2 = \frac{He}{R_2} - \frac{(H-h)d}{R_1}$$

$$V_2 = \frac{Hbe}{R_2} - \frac{(H-h)ad}{R_1}$$

ฉะนั้นแทนค่าตัวแปรต่างๆลงไปในสมการที่ (4-31) จะได้

$$y_3 = \frac{P_2 z^2}{2h} - \frac{\gamma U_2 z}{h} + \frac{Q_2 z}{h} + \frac{\gamma V_2}{h}$$

$$y_3 = \frac{1}{h} \left[\frac{P_2 z^2}{2} + Q_2 z - \gamma (U_2 z + V_2) \right] \quad (4-32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อเมื่อเทียบกับระยะยกที่เปลี่ยนแปลงไป โดยดิฟเฟอเรนเชียล y_3 เทียบกับ z จะได้

$$\frac{dy_3}{dz} = \frac{d}{dz} \left\{ \frac{1}{h} \left[\frac{P_2 z^2}{2} + Q_2 z - \gamma(U_2 z + V_2) \right] \right\}$$

$$\frac{dy_3}{dz} = \frac{1}{h} \left[\frac{d}{dz} \left(\frac{P_2 z^2}{2} \right) + \frac{d(Q_2 z)}{dz} - \frac{d[\gamma(U_2 z + V_2)]}{dz} \right]$$

$$\frac{dy_3}{dz} = \frac{1}{h} \left[P_2 z + Q_2 - \frac{d[\gamma(U_2 z + V_2)]}{dz} \right]$$

$$\text{Diff ผลคูณ} = \frac{d(u \cdot v)}{dt} = uv' + vu'$$

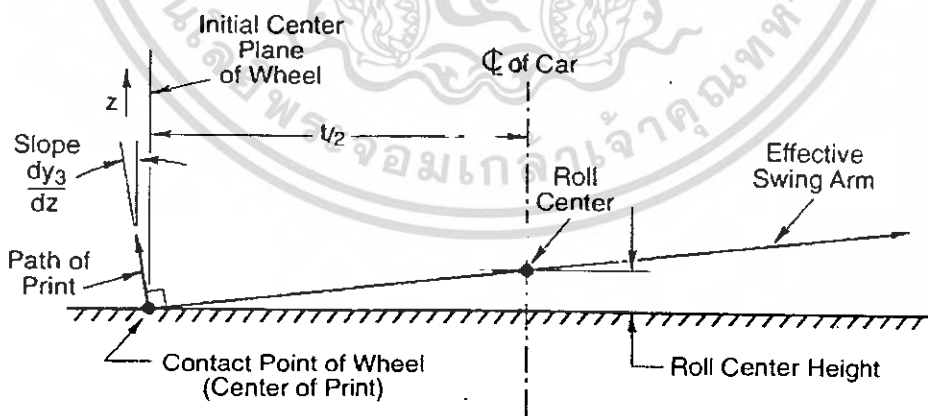
$$\therefore \frac{dy_3}{dz} = \frac{1}{h} \left\{ P_2 z + Q_2 - \left[\gamma U_2 + (U_2 z + V_2) \frac{d\gamma}{dz} \right] \right\}$$

$$\frac{dy_3}{dz} = \frac{1}{h} \left\{ P_2 z + Q_2 - \gamma U_2 - (U_2 z + V_2) \frac{d\gamma}{dz} \right\} \quad (4-33)$$

จากสมการที่ (4-33) ถ้าให้ $z = 0$ (ไม่มีระยะยก) และ $\gamma = 0$ จะได้สมการ

$$\frac{dy_3}{dz} = \frac{1}{h} \left(Q_2 - V_2 \frac{d\gamma}{dz} \right) \quad (4-34)$$

4.5.3 การวิเคราะห์หาตำแหน่งจุดศูนย์กลางการโคลง (Roll Center)



รูปที่ 4-18 แสดงจุดศูนย์กลางการโคลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-18 จะได้ว่า

$$\frac{z_R}{\left(\frac{t}{2}\right)} = \tan \theta$$

แต่

$$\frac{dy_3}{dz} = \tan \theta$$

$$\therefore \frac{z_R}{\left(\frac{t}{2}\right)} = \frac{dy_3}{dz}$$

$$z_R = \left(\frac{t}{2}\right) \frac{dy_3}{dz} \quad (4-35)$$

แทนสมการที่ (4-34) ลงในสมการที่ (4-35) จะได้สมการ

$$z_R = \frac{t}{2h} \left(Q_2 - \frac{d\gamma}{dz} V_2 \right) \quad (4-36)$$

จากสมการที่กล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อ 4.5 นี้เป็นการแสดงถึงสมการที่โปรแกรมอดัมส์ใช้ในการคำนวณและสมการเหล่านี้สามารถนำไปพัฒนาให้สามารถหาค่าที่ออปติไมซ์ (Optimize) โดยการเขียนโปรแกรม

บทที่ 5 การวิเคราะห์สมรรถนะในการขับขี่ (Ride Analysis)

ในการศึกษาด้านพลศาสตร์ของรถยนต์ (Dynamic of vehicle) สมรรถนะในการขับขี่ (ride) เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญในการที่จะบอกถึง ความมีเสถียรภาพในการขับขี่ ซึ่งสมรรถนะในการขับขี่นั้นจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรด้วยกันซึ่งหนึ่งในตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะในการขับขี่ ก็คือ การสั่นสะเทือน (vibration)

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นมีผลต่อพลศาสตร์ของรถยนต์เป็นอย่างมาก โดยจากการศึกษาพบว่า สั่นสะเทือนในรถยนต์นั้นเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 5-1 ซึ่งการออกแบบระบบช่วงล่างที่ดีนั้นจะต้องทำให้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นน้อยที่สุดเพื่อให้ได้สมรรถนะในการขับขี่ที่ดีที่สุด



รูปที่ 5-1 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์สมรรถนะในการขับขี่

5.1 แหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน (Excitation sources)

รถถูกทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้จากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งแต่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ความขรุขระของพื้นถนน และแหล่งกำเนิดแบบ ออน-บอร์ด (On-Board source) ซึ่งแหล่งกำเนิดแบบ ออน-บอร์ด นั้นจะเป็นแหล่งกำเนิดที่เกิดจากวัตถุหมุน ซึ่งรวมถึง ล้อ/ยาง, ระบบส่งกำลัง และเครื่องยนต์

5.1.1 ความขรุขระของพื้นถนน

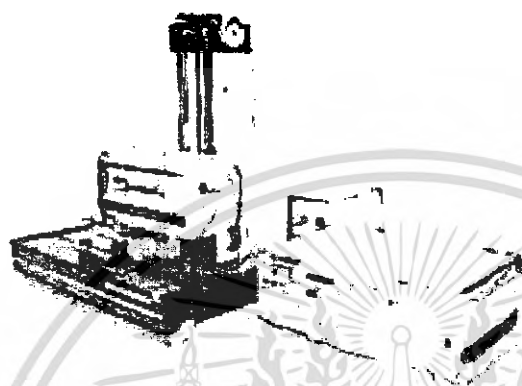
ความขรุขระบนพื้นถนนคือลักษณะความสูงต่ำของพื้นถนนที่รถเคลื่อนที่ไปโดยลักษณะของพื้นถนนจะอยู่ในประเภท “บรอด-แบน แรนดอมซิกนัล (Broad-Band random signals)” ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ โดยที่ส่วนใหญ่จะใช้ “ฟังก์ชันเพาเวอร์สเปกตรอลเดนซิตี (Power Spectral Density, PSD)” ในการอธิบาย

ความขรุขระของถนนก็เหมือนกับสัญญาณแบบสุ่ม (Random signal) อื่นที่ลักษณะความสูงต่ำที่วัดตามความยาวของถนนพื้นถนนสามารถแยกออกเป็นอนุกรมไซน์ (series of sine wave) ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรตามแอมพลิจูด (Amplitude) และ เฟส (Phase) โดยใช้สูตรฟูรีเยร์ (Fourier Transform) ซึ่งการพล็อตกราฟระหว่างแอมพลิจูด กับ ช่วงของความถี่ ก็คือ PSD ซึ่งช่วงของความถี่จะแสดงเป็น “เวฟนัมเบอร์ (Wavenumber)” มีหน่วยเป็น จำนวนรอบ/เมตร

ความสูงต่ำของพื้นถนนสามารถวัดโดยใช้เครื่องวัดความหยาบของพื้นผิว (Profilometers) หรือเครื่องตรวจสอบความความสูงต่ำของพื้น (Level surveys)



รูปที่ 5-2 เครื่องวัดความหยาบของพื้นผิว (Profilometers)

5.1.2 ล้อและยาง

ล้อและยางในอุดมคติจะถือว่าเป็นลักษณะอ่อนและนุ่มสามารถรองรับแรงที่เกิดจากความขรุขระของถนนและการสั่นสะเทือนของตัวรถได้ดีแต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของกระบวนการผลิตของล้อ,ยาง,แกนล้อ,เบรก และ ส่วนอื่นๆของระบบที่มีการหมุนซึ่งปัญหาส่วนหลักๆนั้นเกิดจาก 3 สิ่งนี้ คือ

1. ความไม่สมดุลของมวล (Mass imbalance)

ความไม่สมมาตรจะทำให้เกิดความไม่สมดุล ซึ่งผลที่เกิดขึ้นก็คือจะมีแรงที่ไม่สมดุล (Imbalance force) มากระทำต่อล้อ ซึ่งแรงนี้แปรผันตรงกับ มวลไม่สมดุล, รัศมีจากศูนย์กลางการหมุนและกำลังสองของความเร็วจึงมุม ดังสมการที่ (1)

$$F_i = (mr)\omega^2 \quad (5-1)$$

เมื่อ

$$F_i = \text{แรงที่ไม่สมดุล}$$

$$mr = \text{ขนาดของความไม่สมดุล (มวลคูณรัศมี)}$$

$$\omega = \text{ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)}$$

ความไม่สมดุลของมวลจะทำให้แกนการหมุนนั้นไม่สมมาตรทำให้เกิดความไม่สมดุลทางพลศาสตร์และความไม่สมดุลทางพลศาสตร์จะทำให้เกิดแรงบิดที่ล้อซึ่งทำให้โมเมนต์ใน

แนวแกนขนานกับล้อ (Overturning moment) และ แนวหมุนรอบแกนรัศมีของล้อ (Aligning Torque) เปลี่ยนแปลง

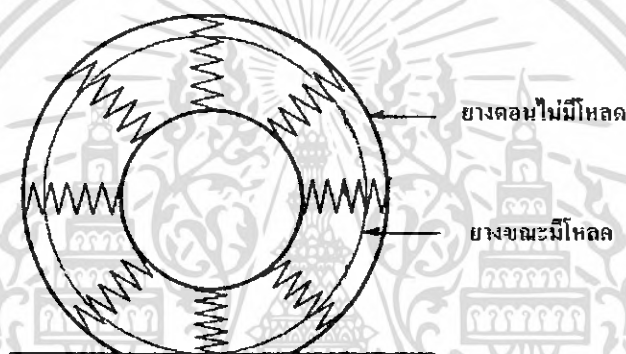
ความไม่สมดุลทางพลศาสตร์มีความสำคัญมากต่อพวงมาลัยเพราะถ้าขณะเลี้ยว แล้วเกิดการสั่นเกิดขึ้นมาก ๆ อาจจะทำให้เกิดอุบัติเหตุได้

2. ความผันแปรของขนาด (Dimensional variation)

ความผันแปรของขนาดที่ล้อและที่เพลจะทำให้เกิดความไม่สมมาตร ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุของการสั่น

3. ความผันแปรของความแข็ง (Stiffness variation)

ยางรถยนต์เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ดังนั้นเราจึงโมเดลให้ยางมีลักษณะสปริงที่เรียงตัวในแนวรัศมีดังรูปที่ 4-3 ฉะนั้นความผันแปรของความแข็งจึงเป็นผลให้เกิดการสั่น

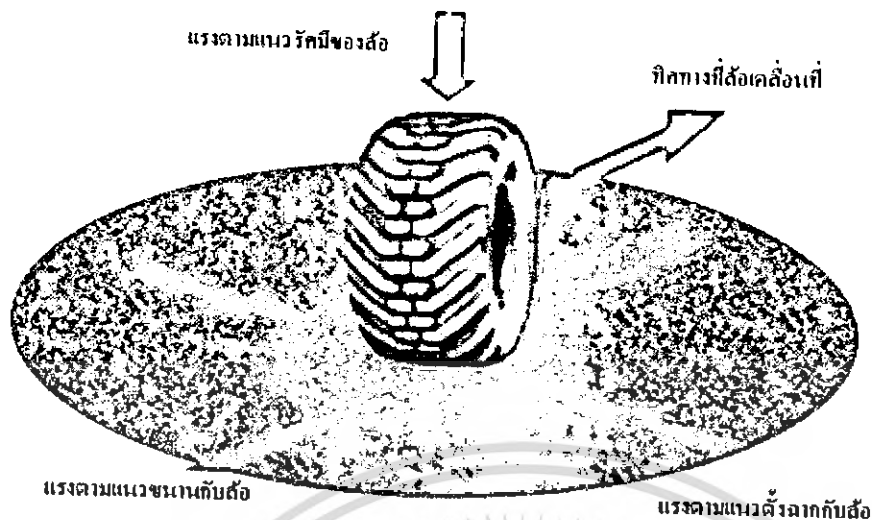


รูปที่ 5-3 แสดงโมเดลยางที่มีลักษณะเป็นสปริงที่เรียงตัวในแนวรัศมี

ปัญหาทั้ง 3 ข้อนี้จะทำให้เกิดความผันแปรของแรงและโมเมนต์ขึ้นกับล้อและยางขณะที่มี การหมุน

ความผันแปรของแรง นั้นจะเกิดขึ้นทั้งในแนวรัศมีของล้อ (Radial direction) แนวขนานกับ ล้อ (Tractive direction) และ แนวตั้งฉากกับล้อ (Lateral direction)

ความผันแปรของโมเมนต์ ก็จะเกิดทั้งในแนวหมุนรอบแกนขนานกับล้อ (Overturning moment), แนวหมุนรอบแกนรัศมีของล้อ (Aligning Torque) และ แนวหมุนรอบแกนเพลของ ล้อ (Rolling resistance moment)



รูปที่ 5-4 แสดงแรงที่กระทำกับล้อ

5.1.3 ระบบส่งกำลัง

แหล่งกำเนิดของการสั่นอย่างี่ 3 ก็คือ ระบบส่งกำลัง ซึ่งการสั่นนี้เกิดมาจากการหมุนของตัวมันเอง ระบบส่งกำลังจะประกอบด้วย เพลากลาง (Driveshaft), เกียร์รีดักชัน (Reduction gear), เกียร์ดิฟเฟอเรนเชียล (Differential gear) และ เพลาขับ (Axle shaft) ระบบส่งกำลังประกอบด้วยหลายส่วนดังนั้นจึงต้องมีการยึดกันไว้ด้วย สปาย และ จุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล ซึ่งอุปกรณ์เชื่อมต่อเหล่านี้ที่เป็นตัวทำให้เกิดการสั่นสะเทือน

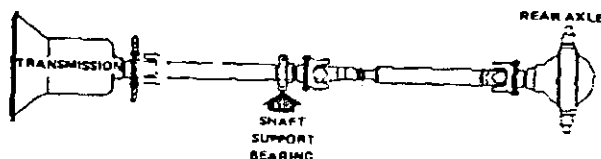
เพลากลางจะมีลักษณะดังรูปที่ 5-5 การสั่นที่ระบบส่งกำลังนั้นจะเกิดขึ้นจาก 2 สาเหตุคือ ความไม่สมดุลของเพลากลาง และ แรงคู่ควบหรือ โมเมนต์ ที่เกิดขึ้นที่จุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล ที่เพลากลาง

WHEELBASE

Short



Intermediate



รูปที่ 5-5 แสดงรูประบบส่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

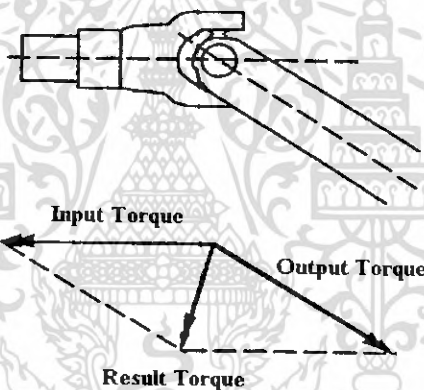
1. ความไม่สมดุลของมวล

ความไม่สมดุลของเพลากลึงเกิดจ อกเบี้ยจ้ยทั้ง 5 ข้อต่อไปนี้มารวมกัน คือ

- 1) ความไม่สมมาตรของชิ้นส่วนที่มีการหมุน
- 2) เพลานไม่อยู่ตรงกลางของหน้าแปลน
- 3) เพลามีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง
- 4) มีเคลียร์เรนซ์ (Clearance) อยู่ทำให้เพลามีการเอียงศูนย์
- 5) เพลาเป็นวัสดุที่บิดหยุ่นจึงมีการ โกงเกิดขึ้น

2. จุดเชื่อมต่อ

การใช้จุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล ในระบบส่งกำลัง ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น เนื่องจากจุดเชื่อมต่อมีการทำมุมกันทำให้มีแรงบิดลัพท์เกิดขึ้น ซึ่งขนาดและทิศทางของแรงบิดลัพท์นี้หาได้จากกรบวกเวกเตอร์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นบนจุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล ดังรูปที่ 5-6



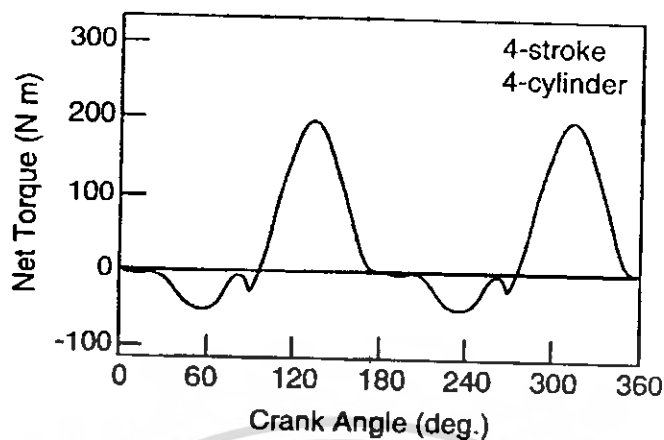
รูปที่ 5-6 แสดงการบวกเวกเตอร์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นบนจุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล

ขนาดของแรงบิดลัพท์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับแรงบิดที่เกิดขึ้นบนจุดเชื่อมต่อ และมุมของจุดเชื่อมต่อ ดังนั้นถ้าแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะที่มีการหมุนของระบบส่งกำลังไม่คงที่ก็จะทำให้ทั้งความเร็วของจุดเชื่อมต่อและแรงบิดลัพท์ที่เกิดขึ้น ไม่คงที่เช่นกันจึงทำให้การสั่นเกิดขึ้น

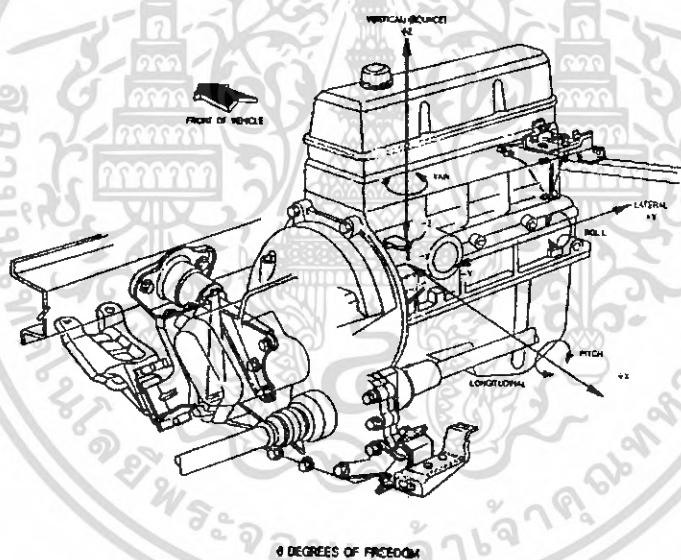
5.1.4 เครื่องยนต์

น้ำหนักของเครื่องยนต์รวมกับระบบขับเคลื่อนจะเป็นน้ำหนักส่วนใหญ่ของรถยนต์ดังนั้นเมื่อเครื่องยนต์มีการสั่นก็จะมีผลทำให้รถทั้งคันมีการสั่นไปด้วย

ลูกสูบจะส่งกำลังเป็นวัฏจักร(Cyclic process) ดังนั้นแรงบิดที่ส่งไปที่เพลาช้อเหวี่ยง (Crankshaft) ก็จะมีขนาดไม่คงที่ด้วยเช่นกัน โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลาช้อเหวี่ยงนั้นจะมีลักษณะเป็นจังหวะดังรูป 5-7



รูปที่ 5-7 กราฟแสดงแรงบิดที่ส่งออกจากเพลาคือเหวี่ยง
เครื่องยนต์จะมีการสั่นใน 6 ทิศทางคือ ตามแนวแกน 3 แกน และตามแนวแกนหมุนอีก 3 แกน
ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 5-8



รูปที่ 5-8 แสดงถึงทิศทางที่เกิดการสั่นในเครื่องยนต์

5.2 คุณสมบัติในการตอบสนองของรถยนต์ (Vehicle Response Properties)

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของรถยนต์ จะสนใจความสัมพันธ์ของอินพุต-เอาต์พุต (input-output) ซึ่งอินพุตในที่นี้หมายถึงการกระตุ้นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนในหัวข้อที่ แล้ว ส่วนเอาต์พุตก็คือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับตัวรถ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูด (amplitude) ของเอาต์พุตกับอินพุตจะเรียกว่า “เกน (gain)”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 การสั่นสะเทือนของระบบช่วงล่าง

คุณสมบัติที่สำคัญในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบช่วงล่างก็คือ “ไรด์ ไอโซเลชัน (Ride Isolation)” ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงการรองรับน้ำหนักเหนือสปริงด้วยระบบช่วงล่างของแต่ละล้อโดยพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของระบบนี้จะเป็นการรองรับการสั่นสะเทือนขั้นแรกจากความขรุขระของถนน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5-9

จากรูปที่ 5-9 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักเหนือสปริงจะถูกรองรับด้วยระบบช่วงล่างและน้ำหนักได้สปริงจะถูกรองรับโดยยาง ซึ่งระบบช่วงล่างจะมีสปริงและแดมเปอร์อยู่ ส่วนยางเราก็โมเดลให้เป็นสปริงดังในหัวข้อที่ 4.1.2 เพราะว่ายางจะมีคุณสมบัติแบบ”วิสโค-อีลาสติก (visco-elastic)”

น้ำหนักเหนือสปริงจะถูกรองรับด้วยระบบช่วงล่างและล้อทำให้เวลาล้อเคลื่อนที่ในแนวตั้งเราต้องคิดผลที่เกิดจากค่าความแข็งของสปริงของระบบช่วงล่างและค่าความแข็งของยางโดยเราจะเรียกว่า “ไรด์ เรท (ride rate)” ดังสมการ

$$RR = \frac{K_s K_t}{K_s + K_t} \quad (5-2)$$

โดย

$RR =$ ไรด์ เรท

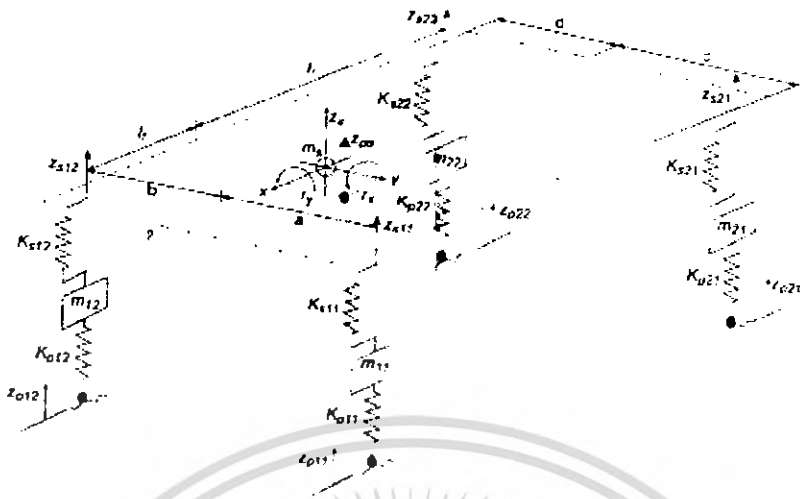
$K_s =$ ค่าความแข็งของสปริง

$K_t =$ ค่าความแข็งของยาง

ในการคำนวณหาค่า k ของสปริงเราจะใช้แบบจำลองของระบบช่วงล่างให้เป็นแบบ “ระบบการสั่นสะเทือนแบบแปดดีกรีอิสระเบื้องต้น(Introduction to Four Degree of Freedom Systems)”

ระบบการสั่นสะเทือนที่ต้องการแกนอิสระเจ็ดแกน เพื่อบอกตำแหน่งของมวลในระบบที่เรียกว่า “ระบบเจ็ดดีกรีอิสระและจะมีความถี่ธรรมชาติของการสั่นเจ็ดค่า” ความถี่ธรรมชาติแต่ละค่าจะขึ้นอยู่กับสถานะตามธรรมชาติของการสั่นสะเทือนกับ ลักษณะการเคลื่อนที่ซึ่งเรียกว่า “นอร์มอลโหมด(Normal Mode)” ฉะนั้นระบบก็จะมีนอร์มอลโหมดเจ็ดค่าด้วย โดย ระบบช่วงล่างที่ออกแบบนั้นจะเป็นแบบการสั่นแบบอิสระ(Free Vibration) ซึ่งขึ้นอยู่กับมวลของระบบและค่าคงที่ของสปริงในระบบ

โดยแบบจำลองของระบบช่วงล่างเป็นดังนี้



รูปที่ 5-9 แสดงโมเดลแบบฟูลคาร์ (Full-car Model)

จากรูปด้านบน คือ ระบบต้องการแกนอิสระ 7 แกน

โดยสมการที่นำหนักเหนือสปริงจะมีค่าดังนี้

$$M_c \ddot{X}_c + RK_c R^T X_c - RK_c X_u = 0 \quad (5-3)$$

และสมการที่นำหนักใต้สปริงจะมีค่าดังนี้

$$M_u \ddot{X}_u + K_u X_u - K_u R^T X_c + K_u X_u - X_s X_r = 0 \quad (5-4)$$

โดย

$$X_c = RX_s \quad (5-5)$$

$$X_c = [z \quad \phi \quad \theta]^T \quad (5-6)$$

$$X_s = [x_{s_1} \quad x_{s_2} \quad x_{s_3} \quad x_{s_4}]^T \quad (5-7)$$

$$X_u = [x_{u_1} \quad x_{u_2} \quad x_{u_3} \quad x_{u_4}]^T \quad (5-8)$$

$$X_r = [x_{r_1} \quad x_{r_2} \quad x_{r_3} \quad x_{r_4}]^T \quad (5-9)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{l_f}{2} & \frac{l_f}{2} & -\frac{l_r}{2} & \frac{l_r}{2} \\ -l_f & -l_f & l_r & l_r \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_s = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & I_x & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_{s_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{s_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{s_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{s_4} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

$$M_u = \begin{bmatrix} m_{u_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{u_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{u_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{u_4} \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

$$K_r = \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_r \end{bmatrix} \quad (5-14)$$


5.2.2 การวิเคราะห์หาค่าความแข็งของสปริงโดยใช้โปรแกรมอค์มส์วีว

เป็นการวิเคราะห์หาค่าความแข็งของสปริงโดยใช้ฟูลคาร์โมเดลซึ่งโมเดลนี้จะประกอบด้วย น้ำหนักเหนือสปริง น้ำหนักใต้สปริง ค่าความแข็งของสปริง ค่าความแข็งของยาง ซึ่งมีค่าดังนี้

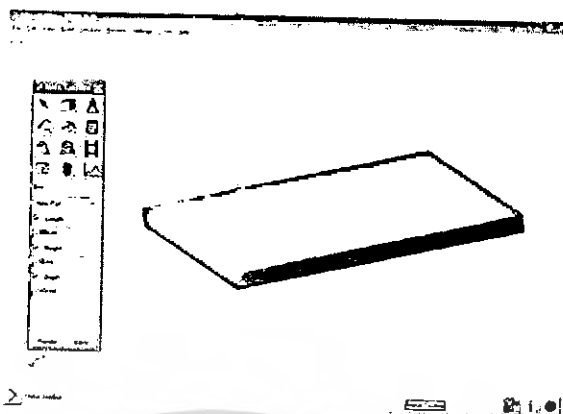
1. น้ำหนักเหนือสปริง 250 กิโลกรัม
2. น้ำหนักใต้สปริง 100 กิโลกรัม (ข้างละ 25 กิโลกรัม)
3. ค่าความแข็งของสปริงใส่ค่าดังตารางที่ 5-1
4. ค่าความแข็งของยาง 190 นิวตันต่อมิลลิเมตร

ขั้นตอนการสร้างฟูลคาร์โมเดลมีดังนี้

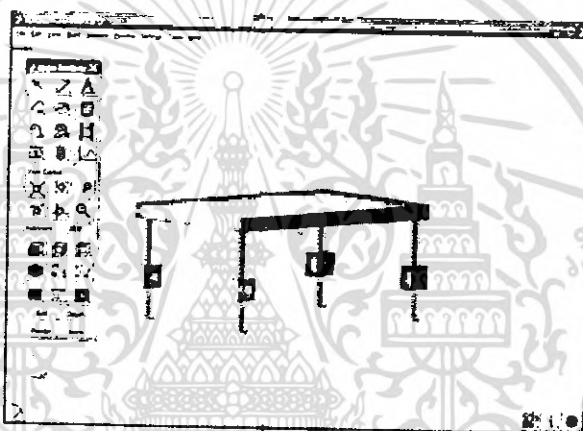
(1) วาดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดดังนี้ 1400 x 1650 โดยมีความหมายดังนี้ ความกว้างของรถ x ความยาวของตัวรถ ดังรูปที่ 5-10

(2) คลิกที่ Icon  เพื่อสร้างสปริงที่มุมของสี่เหลี่ยมผืนผ้าในหัวข้อที่แล้ว จะได้ดังรูปที่ 5-11

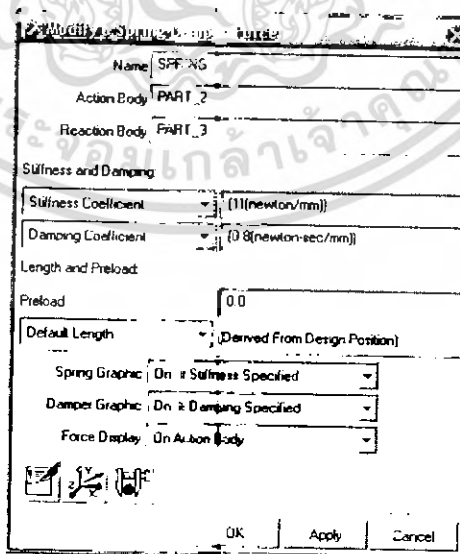
(3) ดับเบิลคลิกที่สปริงจะปรากฏไดอะล็อกบ็อกโคมด็ไฟสปริง-แดมเปอร์(Modify spring-damper Dialog box) ดังรูปที่ 5-12



รูปที่ 5-10 แสดงรูปสี่เหลี่ยมที่เป็นตัวแทนของน้ำหนักเหนือสปริง



รูปที่ 5-11 แสดงฟูลคาร์โมเดลที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 5-12 แสดงไดอะล็อกบ็อก โมดิไฟสปริง-แดมเปอร์

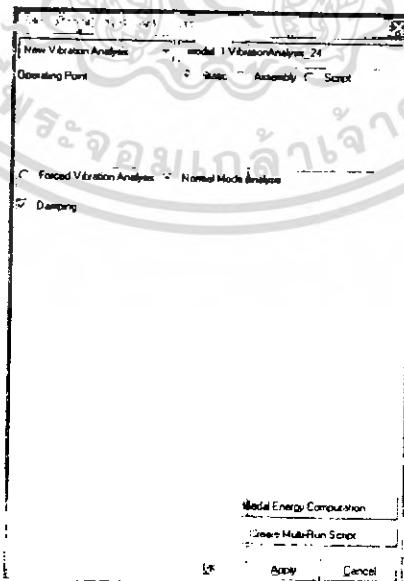
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) จากนั้นเปลี่ยนค่าความแข็งของสปริงดังตารางที่ 5-13 เพื่อที่จะหาค่าความถี่ธรรมชาติในแนวแกนพิท (f_{nP}) และแนวแกนโรล (f_{nR})

(5) จากนั้นไปที่ Simulation < ADAMS/Vibration < Vibration Analysis จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์เพอร์ฟอร์มไวเบรชันอะนาไลซิส (Perform Vibration Analysis Dialog box) ดังรูปที่ 5-13

Front	Rear	f_{nP}	f_{nR}
K	K		
20	29		
23	29		
26	29		
20	30		
23	30		
26	30		
29	30		
20	31		
23	31		
26	31		
29	31		
20	32		
23	32		
26	32		
29	32		
20	33		
23	33		
26	33		
29	33		
20	34		
23	34		
26	34		
29	34		
31	34		

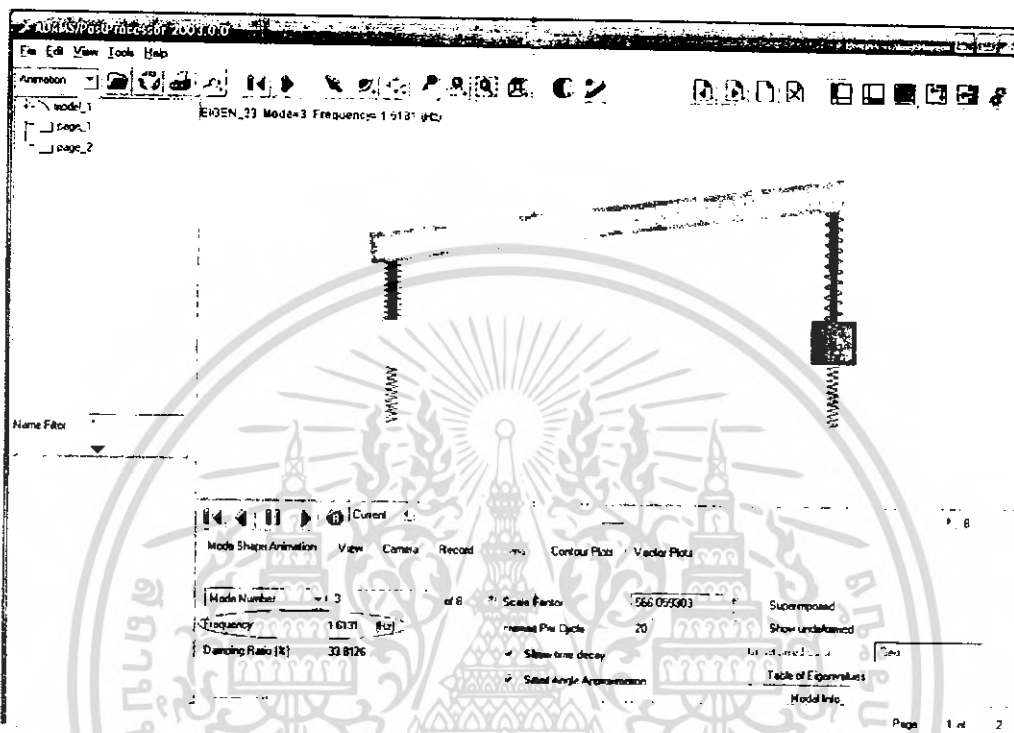
ตารางที่ 5-1 แสดงค่าความแข็งของสปริงที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติ



รูปที่ 5-13 แสดงไดอะล็อกบ็อกซ์เพอร์ฟอร์มไวเบรชันอะนาไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (6) จากนั้นเลือกที่ นอร์มอลโหมดอะนาลิซิส (Normal Mode Analysis) จากนั้นกดที่ OK แล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณ
- (7) จากนั้นเลือกที่ Review < Postprocessing จะปรากฏหน้าจอของ ADAMS/PostProcessor ดังรูปที่ 5-14



รูปที่ 5-14 แสดงหน้าจอ ADAMS/Postprocessor

(8) ความถี่ที่เห็นอยู่บนหน้าจอคือความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีการหน่วง (ω_d) ส่วนความถี่ที่วงไว้คือค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่ไม่มีการหน่วง (ω_n) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีการหน่วงกับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่ไม่มีการหน่วง เป็นไปดังสมการ

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{5-15}$$

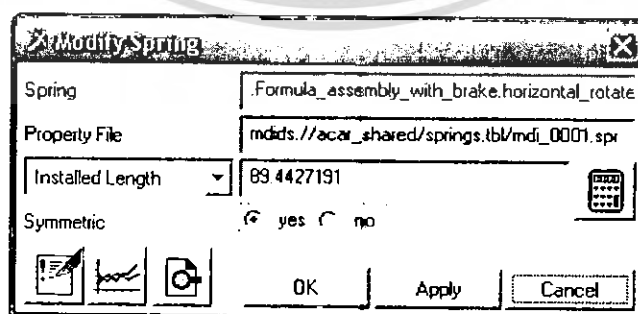
(9) จากนั้นบันทึกค่า ω_n ลงไปในตารางจะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5-2

Front	Rear	f_{nP}	f_{nR}
K	K		
20	29	2.1144	2.1229
23	29	2.2057	2.1833
26	29	2.2919	2.2409
20	30	2.1264	2.1422
23	30	2.2172	2.202
26	30	2.3029	2.2592
29	30	2.384	2.314
20	31	2.1383	2.1612
23	31	2.2286	2.2205
26	31	2.3139	2.2773
29	31	2.3946	2.3316
20	32	2.15	2.18
23	32	2.2399	2.2388
26	32	2.3247	2.295
29	32	2.4051	2.3489
20	33	2.1616	2.1985
23	33	2.251	2.2568
26	33	2.3355	2.3126
29	33	2.4155	2.3661
20	34	2.1731	2.2167
23	34	2.2621	2.2745
26	34	2.3461	2.3299
29	34	2.4257	2.383
31	34	2.4766	2.4172

ตารางที่ 5-2 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จากโปรแกรมอดัมส์วิว


5.2.3 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแข็งที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมอดัมส์คาร์

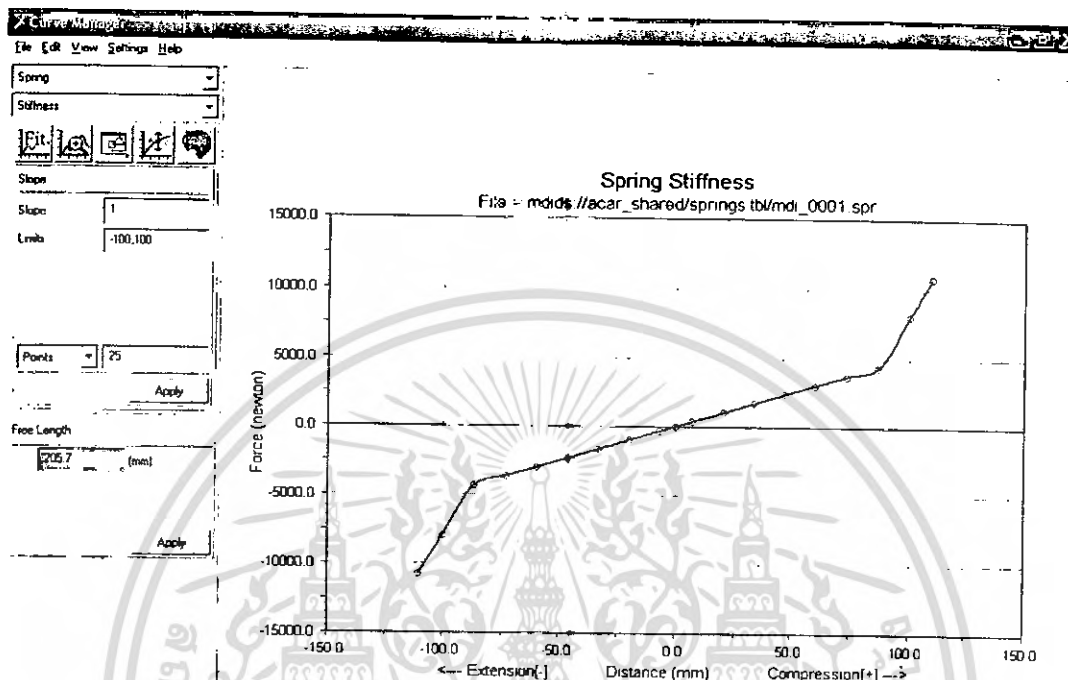
- (1) คลิกขวาที่สปริงของโมเดลรถที่สร้างขึ้นในโปรแกรมอดัมส์คาร์แล้วเลือก Modify จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกโมดิไฟสปริง (Modify Spring Dialog box) ดังรูปที่ 5-15



รูปที่ 5-15 แสดงไดอะล็อกบ็อกโมดิไฟสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) จากนั้นเลือกที่ไอคอน  จะปรากฏหน้าจอของเคอร์รับเมนเจอร์ (Curve manager) ดังรูปที่ 5-16



รูปที่ 5-16 แสดงหน้าจอของเคอร์รับเมนเจอร์

- (3) จากนั้นเปลี่ยนค่ากราฟจนทำให้ค่าความแข็งของสปริงตามค่าในตารางที่ 4-2
- (4) จากนั้นทำการจำลองทางพลศาสตร์ (ดูที่บทที่ 6) ว่าค่าความแข็งของสปริงที่เหมาะสมกับรถของเราเป็นเท่าใด โดยดูจากกราฟของมุมการโคลง มุมพิต มุมขย

บทที่ 6

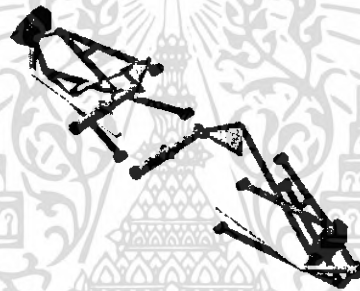
การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบช่วงล่าง

ในการออกแบบระบบช่วงล่างมีตัวแปรมากมายที่เราต้องคำนึงถึง ไม่ว่าจะเป็น มุมแคมเบอร์ มุมแคสเตอร์ มุมโคลง เป็นต้น ความเปลี่ยนแปลงของมุมต่างๆ เหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมและเสถียรภาพในการขับขี่ แต่ในการทดสอบเพื่อหาความเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านั้นทำได้ยาก เราจึงนำโปรแกรม อัดัมส์คาร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โดยเรามีวิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม อัดัมส์คาร์ดังนี้

6.1 สร้างแบบจำลองของรถแข่ง

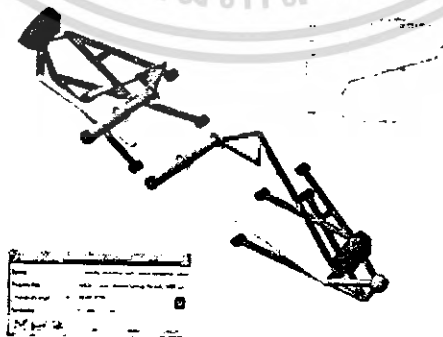
ในการสร้างแบบจำลองของรถแข่งมีขั้นตอนดังนี้

6.1.1 Template: เป็นการกำหนดรูปแบบของชิ้นส่วน จุดเชื่อมต่อ (joint) ของแบบจำลอง เช่น รูปแบบระบบช่วงล่างแบบแมคเฟอร์สันสตรัท ซึ่งเป็นการกำหนดรูปแบบการวางตัวของชิ้นส่วน โดยที่ยังไม่ได้กำหนดคุณสมบัติต่างๆ าลงไป ดังรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 Template

6.1.2 Subsystem: เป็นแบบจำลองที่มีการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่งของชิ้นส่วน ขนาดของชิ้นส่วน ความแข็งของสปริง เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองที่มีการกำหนดค่าตัวแปรนี้เป็นส่วนสำคัญของขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง เช่น ช่วงล่างด้านหน้า ระบบบังคับเลี้ยว subsystem คือ ระยะห่างของจุด hard point ของ template และคุณสมบัติของชิ้นส่วน ดังรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 Subsystem

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการสร้างระบบชิ้นส่วนย่อยนี้จะมีขั้นตอนดังนี้

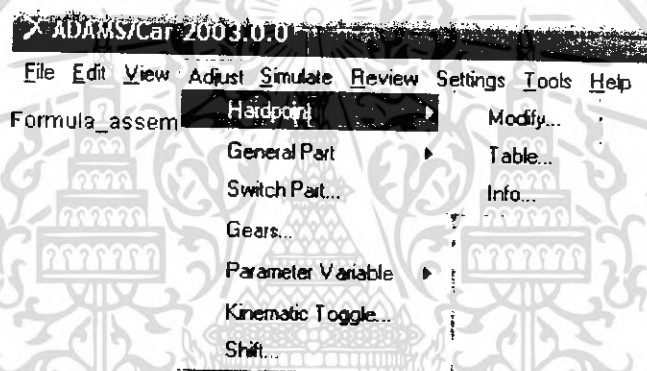
1. ปรับตั้งค่า Hard point

ในระบบชิ้นส่วนย่อย ตำแหน่งของแต่ละจุดบนชิ้นส่วนย่อยเราจะแทนด้วย ฮาร์ดพอยท์ซึ่งตำแหน่งของฮาร์ดพอยท์นี้จะใช้เป็นตำแหน่งในการปรับแต่งค่าต่างๆบนชิ้นส่วนย่อย โดยในการปรับค่าฮาร์ดพอยท์นี้เราสามารถทำได้ใน standard interface โดยเลือกไปที่ adjust menu โดยเราสามารถปรับแต่งฮาร์ดพอยท์ได้ 3 วิธี คือ

Modify เป็นการปรับแต่งค่าฮาร์ดพอยท์ จาก menu ที่ปรากฏ ซึ่งเราสามารถเลือกตำแหน่งที่เราจะปรับแก้ค่าฮาร์ดพอยท์ได้โดยตรง

Table เป็นการปรับแต่งค่าฮาร์ดพอยท์ จากตาราง ซึ่งในตารางจะมีค่าจุด ฮาร์ดพอยท์ ทุกจุดของชิ้นส่วนย่อยปรากฏอยู่

Info เป็น dialog box ที่แสดงระบบชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเราสามารถแก้ไขค่าจุด ฮาร์ดพอยท์ ทุกจุดได้จาก Dialog box นี้ดังรูปที่ 6-3



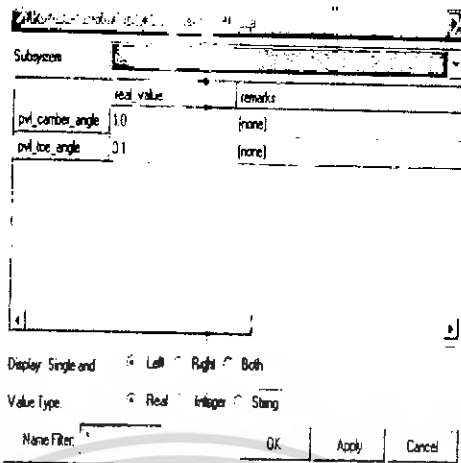
รูปที่ 6-3 การกำหนดค่าฮาร์ดพอยท์

2. Adjusting parameter variable

ในระบบชิ้นส่วนย่อยเราสามารถปรับแก้ค่าตัวแปรต่างๆที่สร้างขึ้นจากขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนต้นแบบ ซึ่งค่าตัวแปรบางค่า เช่น ระยะ โท โปรแกรม อคิมส์คาร์จะทำการตั้งค่าพื้นฐานไว้โดยอัตโนมัติ เพราะค่าเหล่านั้นมีความจำเป็นในขั้นตอนการวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามเราก็สามารถปรับแก้ค่าเหล่านั้นได้ โดยวิธีการปรับแก้เราสามารถทำได้โดยเข้าไปที่ Adjust menu แล้วเลือก Parameter variable จะพบ

Modify เป็น dialog box ที่ให้เราเลือกตัวแปรที่ต้องการแก้ไข แล้วทำการแก้ไขค่าลงใน dialog box นั้น

Table คือตารางที่รวบรวมค่าตัวแปรทุกตัวของระบบชิ้นส่วนย่อยไว้ภายใน ซึ่งเราจะสามารถแก้ไขค่าของตัวแปรทุกตัวได้ในตาราง



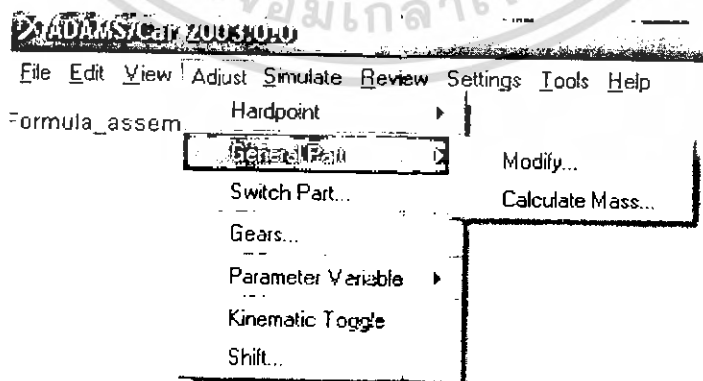
รูปที่ 6-4 การปรับค่าตัวแปร

3. Adjusting Mass Properties

หลังจากที่เราสร้างชิ้นส่วนต้นแบบแล้ว ค่าคุณสมบัติของมวลจะถูกกำหนดโดยโปรแกรม แต่เราก็สามารถปรับแก้ได้ใน Standard interface โดยการเข้าไปที่ Adjust menu แล้วเลือกที่ General Part จะปรากฏตัวเลือกสองตัวคือ

Modify จะปรากฏ dialog box ให้เราเลือกชิ้นส่วน เพื่อทำการกำหนดค่ามวลและคุณสมบัติ ซึ่งเราสามารถกดเมาส์ด้านขวาบนชิ้นส่วนที่ต้องการกำหนดหรือแก้ไขค่าเพื่อให้ dialog box นี้ปรากฏขึ้น

Calculate Mass โปรแกรมอัตโนมัติจะทำการคำนวณค่ามวลของชิ้นส่วนตามค่าคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ถ้ารูปแบบถูกแก้ไขใน Standard interface จากค่าที่ถูกตั้งไว้เป็นพื้นฐานในขั้นตอนสร้างชิ้นส่วนต้นแบบ ค่ามวลของชิ้นส่วนนั้นจะไม่ถูกแก้ไขในทันที ซึ่งค่าจะมวลจะถูกแก้ไขในฟังก์ชัน Calculate mass แต่หากชิ้นส่วนของเรถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมด้าน CAD จะต้องทำการกำหนดค่าคุณสมบัติของชิ้นส่วนด้วยตัวเอง

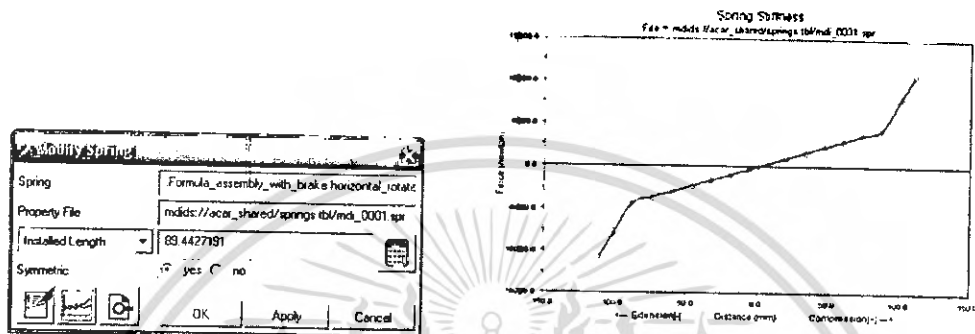


รูปที่ 6-5 การกำหนดค่าคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

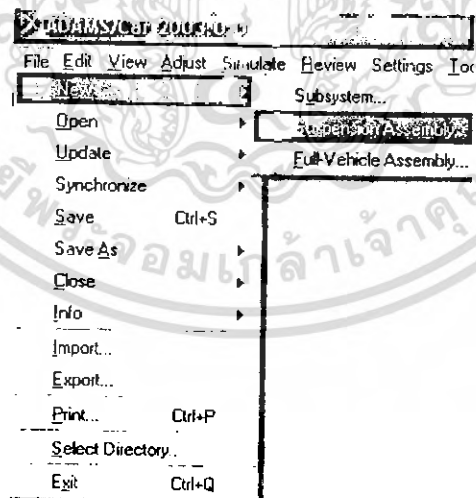
4. กำหนดค่าสปริงและแดมเปอร์

สปริงกับแดมเปอร์ถูกสร้างขึ้นในขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนต้นแบบและใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆจากตำแหน่งฐานข้อมูล (Database) ที่เรากำหนด โดยใน Standard interface เราสามารถกำหนดค่าคุณสมบัติให้สปริงและแดมเปอร์ได้ โดยการคลิกขวาที่สปริงหรือแดมเปอร์แล้วเลือกคำสั่ง modify ก็จะปรากฏ dialog box ให้เรากำหนด ดังรูปที่ 6-6



รูปที่ 6-6 การกำหนดค่าคงที่ของสปริงในขั้นตอนการสร้างระบบชิ้นส่วนย่อย

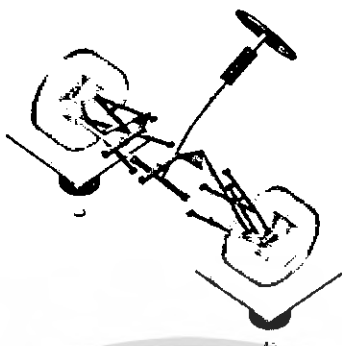
6.1.3 Assembly: คือการนำชิ้นส่วนย่อยมาประกอบเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ ในการสร้าง Suspension assembly เราจะสร้างใน Standard Interface โดยเข้าไปที่ File menu > New > Suspension assembly ดังรูปที่ 6-7



รูปที่ 6-7 การสร้าง Assembly

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งใน Suspension assembly นี้จะมีส่วนประกอบดังรูปที่ 6-8



รูปที่ 6-8 ส่วนประกอบใน Suspension Assembly

6.2 การจำลองด้วยโปรแกรม อดัมส์คาร์

ในโปรแกรม อดัมส์คาร์เราสามารถจำลองการเคลื่อนที่ของรถในสภาวะต่างๆเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจ ซึ่งเราสามารถแบ่งการจำลองการเคลื่อนที่ในโปรแกรม ได้ 2 แบบคือ

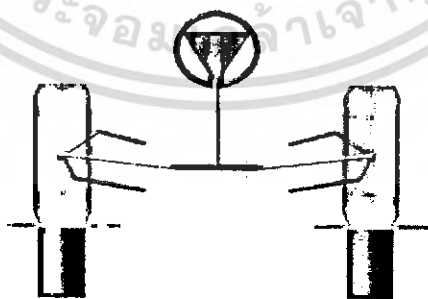
- การจำลองทางไคเนติกส์
- การจำลองทางพลศาสตร์

6.2.1 การจำลองทางไคเนติกส์

เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆโดยใช้แทนทดสอบ เพื่อดูลักษณะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อต่างๆ โดยในการจำลองทาง คิเนมาติกนี้จะแบ่งออกเป็น

1.การจำลอง โดยให้ล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงพร้อมกัน(Parallel Wheel Travel)

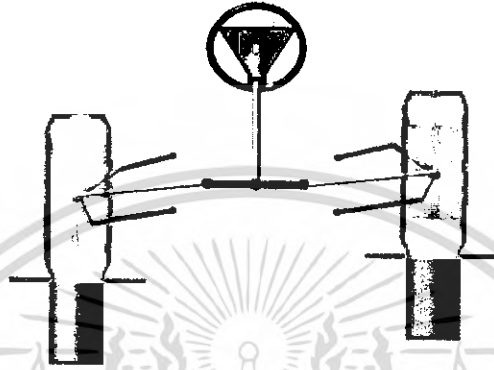
เป็นการทดสอบที่จำลองสภาพการเคลื่อนที่ของล้อในลักษณะที่เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงพร้อมๆกัน ซึ่งเป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถในสภาวะทางตรง ซึ่งการทดสอบจะมีลักษณะดังรูปที่ 6-9



รูปที่ 6-9 การจำลองการเคลื่อนที่ของล้อแบบขึ้นหรือลงพร้อมกัน

2. การจำลองที่ให้ล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตรงกันข้ามกัน(Opposite Wheel Test)

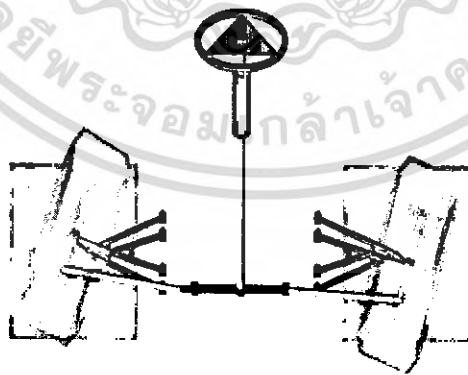
เป็นการทดสอบที่จำลองสภาพการเคลื่อนที่ของล้อในลักษณะตรงข้ามกัน ซึ่งเป็นรูปแบบของการเคลื่อนที่ของรถขณะขับขึ้นในเส้นทางที่มีมุมเอียง โดยในการทดสอบแบบล้อเคลื่อนที่ตรงข้ามกันนี้จะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ มุมแคสเตอร์ มุมเอียงลูกหมากปีกนก ซึ่งมุมเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความเสถียร และการควบคุมรถโดยตรง ดังรูปที่ 6-10



รูปที่ 6-10 การจำลองที่ให้ล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตรงข้ามกัน

3. การทดสอบระบบบังคับเลี้ยว (Steering Test)

เป็นการทดสอบที่จำลองสภาพการเลี้ยวของรถยนต์ ซึ่งโปรแกรมจะทำการหมุนพวงมาลัยจากระยะเริ่มต้น ไปจนถึงระยะสุดท้ายตามที่เรากำหนดไว้และเรายังสามารถทดสอบการเลี้ยวขณะที่ระบบช่วงล่างกำลังควบคุมอยู่ก็ได้ซึ่งทำให้สภาวะที่เราทดสอบใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 6-11



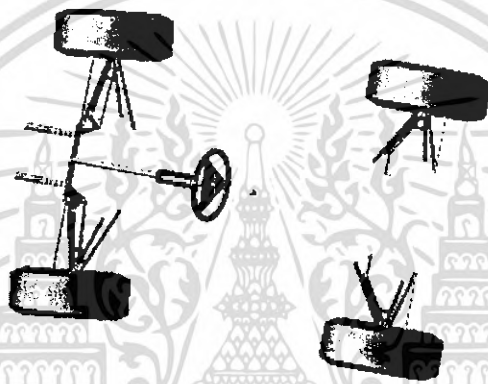
รูปที่ 6-11 การทดสอบระบบบังคับเลี้ยว

6.2.2 การจำลองทางพลศาสตร์

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการทดสอบระบบช่วงล่างและระบบขับเคลื่อนที่เราได้ทำการออกแบบไว้ โดยเราจะทำการทดสอบโดยดูจากลักษณะการขับเคลื่อนที่เป็นไปได้เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจ ในขณะที่ขับเคลื่อนจริง ซึ่งเราจะทำการทดสอบด้วยวิธีการดังนี้

1. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน (Single lane Change)

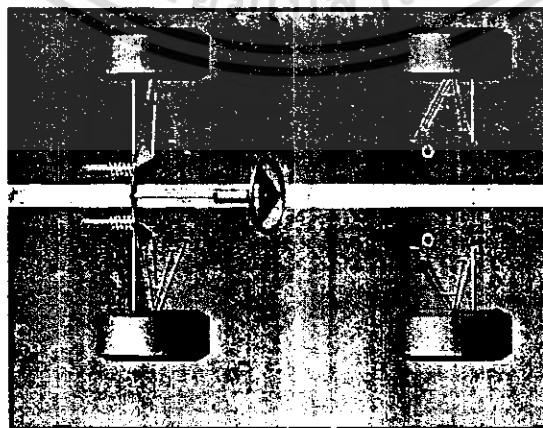
เป็นการทดสอบที่จำลองการเคลื่อนที่ของรถในการเปลี่ยนช่องถนน ซึ่งการทดสอบนี้จะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ มุมแคสเตอร์ มุมเอียงลูกหมากปีกนก รัศมีนูน ระยะโย ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อเหล่านี้จะส่งผลต่อความเสถียร และการควบคุมรถโดยตรง ดังรูปที่ 6-12



รูปที่ 6-12 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน

2. การจำลองการเบรกของรถ (Braking Test)

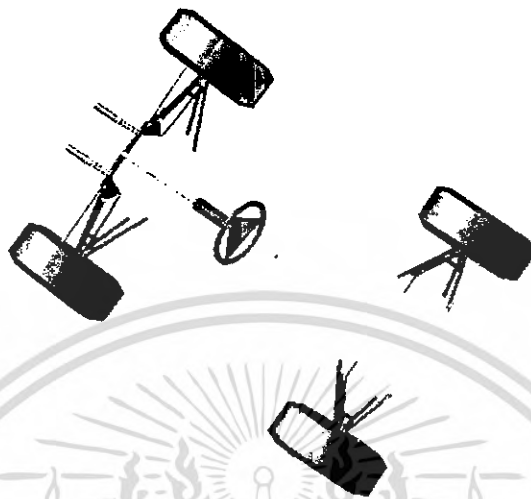
เป็นการทดสอบการเบรกของรถในสภาวะที่กำหนด ซึ่งการทดสอบแบบนี้จะบอกเราถึงแรงที่เกิดขึ้น ณ จุดที่เราต้องการทราบค่า เพื่อนำค่าแรงที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite ต่อไปรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อต่างๆด้วย ดังรูปที่ 6-13



รูปที่ 6-13 การจำลองการเบรกของรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบระบบขับเลี้ยวโดยให้รถเลี้ยวตามความเร็วเชิงมุมที่กำหนด (Ramp Steer)
เป็นการทดสอบระบบขับเลี้ยวโดยให้รถเลี้ยวด้วยความเร็วเชิงมุม 30 องศาต่อวินาที เพื่อที่จะดู
เสถียรภาพของรถในขณะที่ทำการเลี้ยว ดังรูปที่ 6-14



รูปที่ 6-14 การทดสอบระบบขับเลี้ยวโดยให้รถเลี้ยวด้วยความเร็วเชิงมุมที่กำหนด

6.3. ผลการจำลองทางคิเนแมติกส์

จากจุดประสงค์ของโครงการนี้เป็นการออกแบบระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวที่มีเสถียรภาพ
ตอบสนองต่อการขับขี่ที่ความเร็วสูงได้ดี จากการศึกษาเราพบว่ามีความแปรที่เกี่ยวกับเสถียรภาพและการ
ควบคุมอยู่หลายตัวแปร เช่น มุมแคมเบอร์ มุมแคสเตอร์ ระยะโท ฯลฯ ซึ่งผลของตัวแปรแต่ละตัวก็จะ
แตกต่างกันไป โดยเราจะทำการศึกษาผลของตัวแปร โดยวิธีการจำลองทาง คิเนมาติก และ วิธีการจำลอง
ทางพลศาสตร์ ดังนี้

6.3.1 การจำลองเพื่อหารูปแบบของ Template

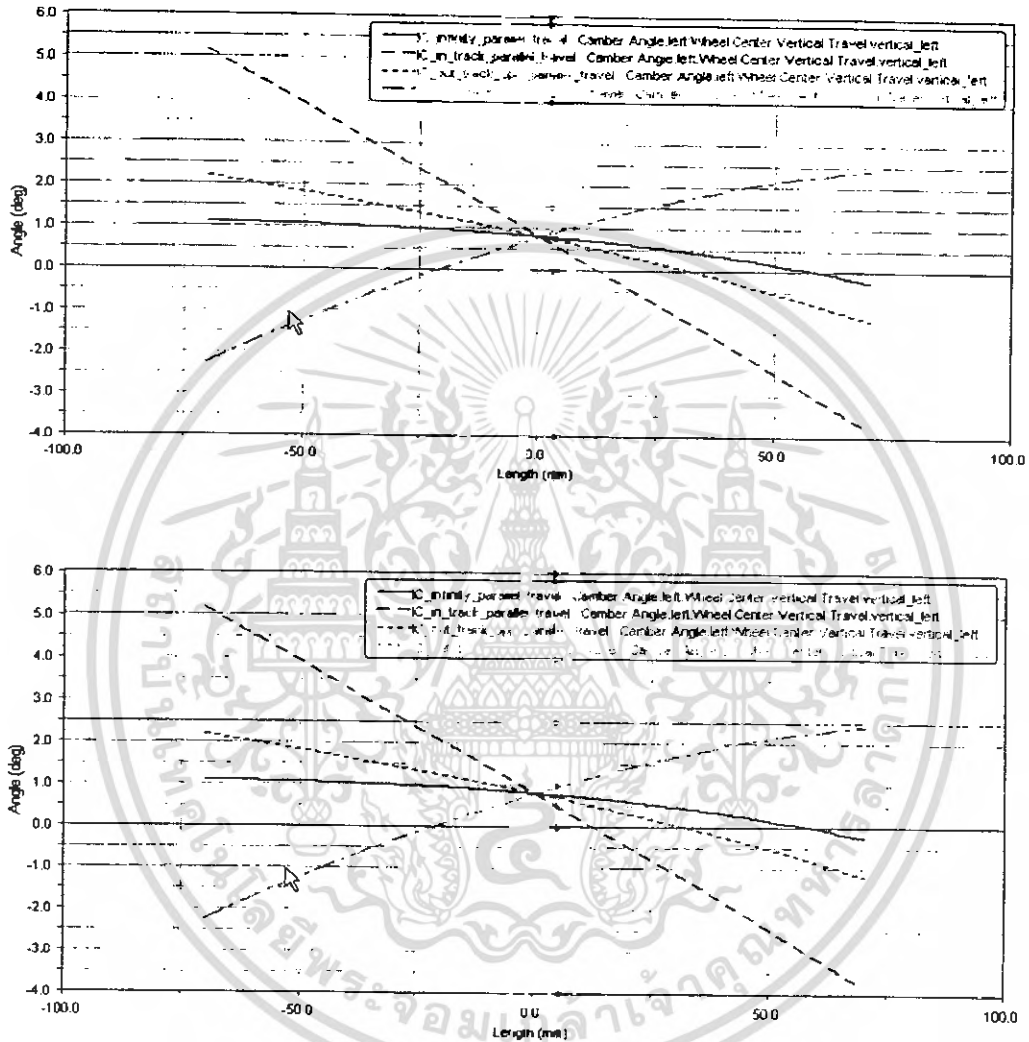
ในขั้นตอนแรกนี้เป็นการหารูปแบบของปีกนกโดยเราจะกำหนดรูปแบบของปีกนกที่จะทำการ
ทดสอบตามตำแหน่งของจุดศูนย์กลางช่วงล่าง ดังนี้

- IC_infini_horizontal คือ รูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงล่างอยู่ที่อนันต์ (สีแดง)
- IC_intrack_horizontal คือ รูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงล่างอยู่ภายใน track (สีน้ำเงิน)
- IC_outtrack_opp_horizontal คือ รูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงล่างอยู่นอก track ในฝั่งตรงข้ามกับปีกนก (สีชมพู)
- IC_outtrack_same_horizontal คือ รูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงล่างอยู่นอก track ในฝั่งเดียวกับปีกนก (สีเขียว)

โดยในการจำลองเพื่อหารูปแบบของปีกนกนี้เราจะใช้การจำลองทาง คิเนมาติก เพื่อดูการ
เปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจ ซึ่งในการทดสอบ เราจะใช้แบบจำลองการเคลื่อนของล้อ

แบบที่ล้อเคลื่อนที่ขึ้นลงไม่พร้อมกัน และ แบบจำลองการเคลื่อนที่ของล้อที่เคลื่อนที่ขึ้นลงพร้อมกัน ตามลำดับ ดังนี้

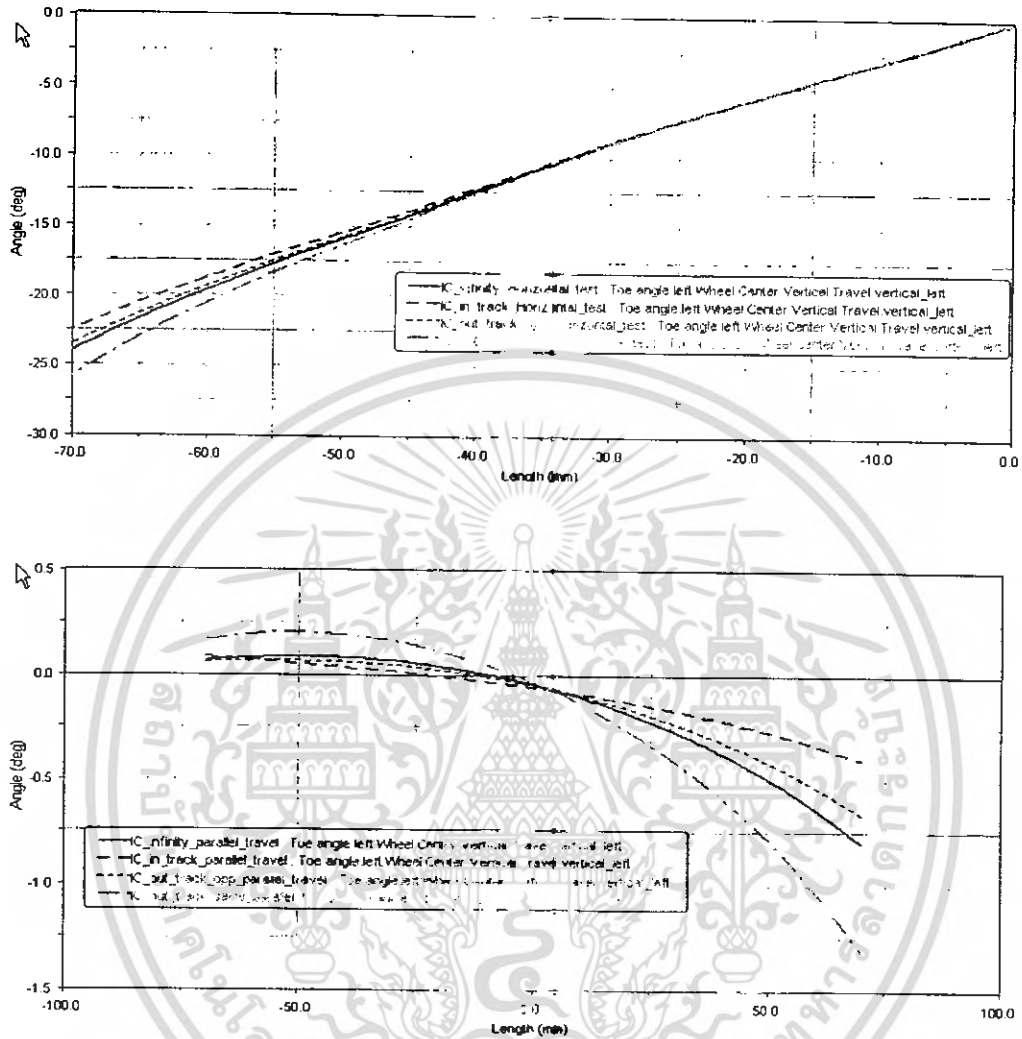
1. นูนแคมเบอร์



กราฟที่ 6-1 การเปลี่ยนแปลงนูนแคมเบอร์

จากกราฟ : จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่ารูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลาง ช่วงขณะอยู่ที่อนันต์ นูนแคมเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

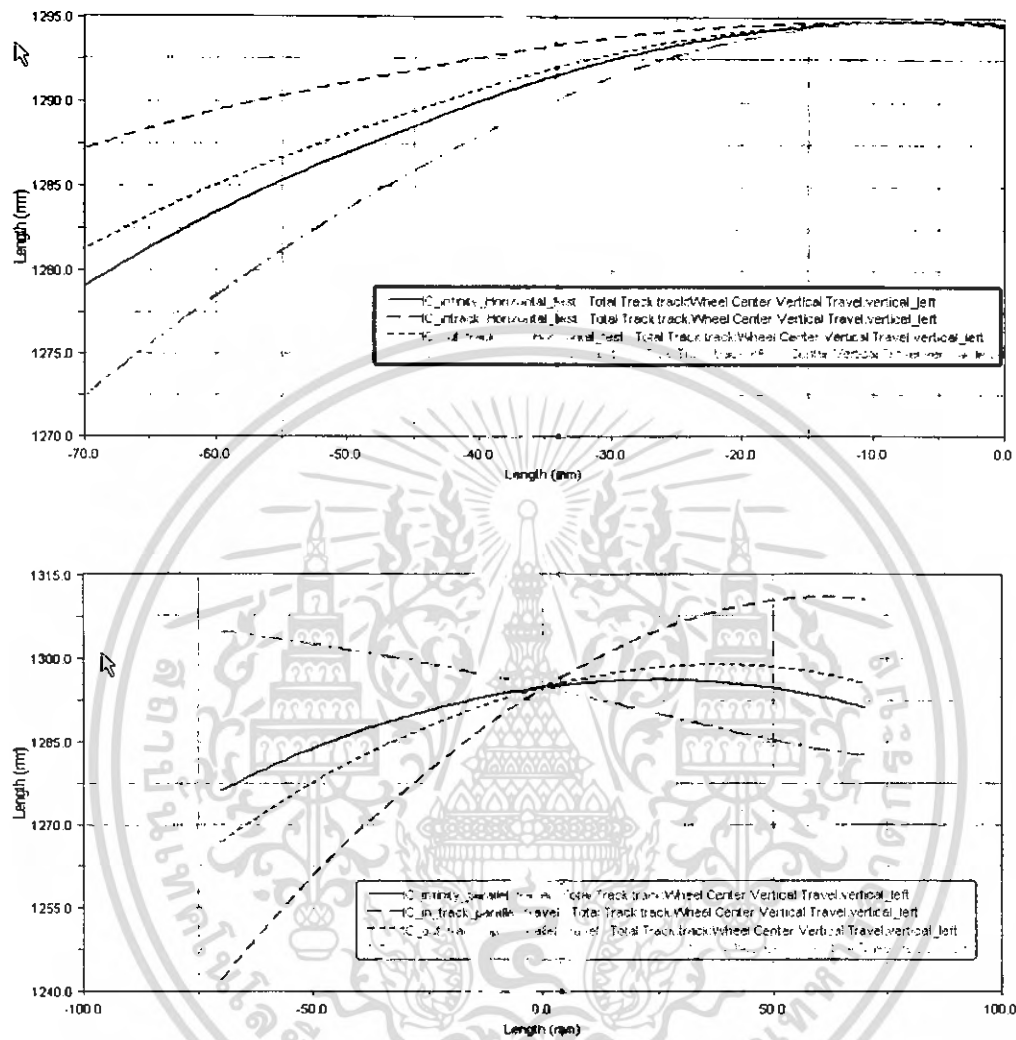
1. มุมโท



กราฟที่ 6-2 การเปลี่ยนแปลงมุมโท

จากกราฟ : จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า รูปแบบของปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางช่วงจะอยู่ภายใน track มีการเปลี่ยนแปลงมุมโทน้อยที่สุด

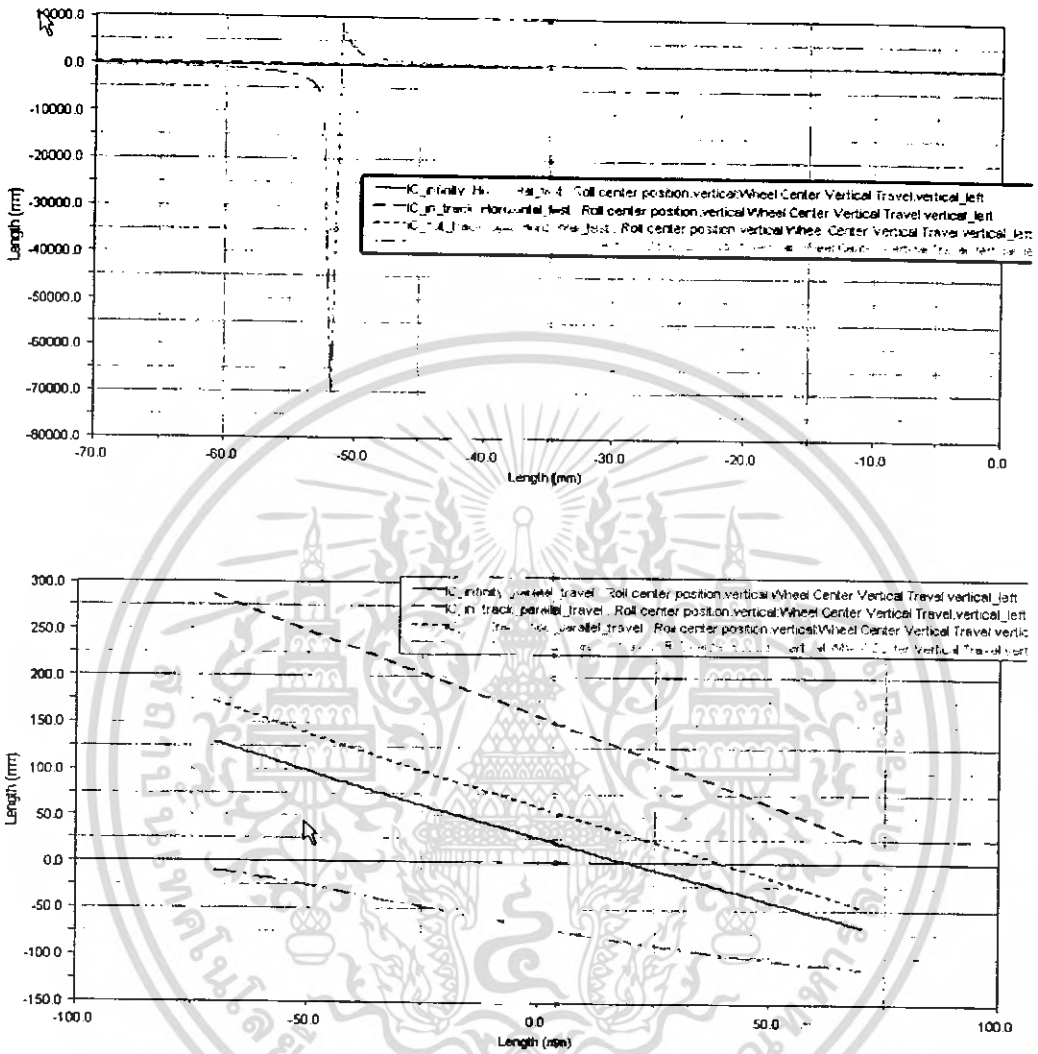
2. Track Change



กราฟที่ 6-3 Track Change

จากกราฟ : จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า รูปแบบของปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางช่วงอะ อยู่บนนอกแทรคฝั่งเดียวกับปีกนก มีการเปลี่ยนแปลงค่า Track น้อยที่สุด

3. จุดศูนย์กลางการโคลง



กราฟที่ 6-4 การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลง

จากกราฟ : จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า รูปแบบของปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางช่วงขณะ อยู่นอกแทรกฝั่งเดียวกับปีกนก มีการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการ โคลงน้อยที่สุด

สรุปผลการจำลองเพื่อหาการวางตัวของปีกนก

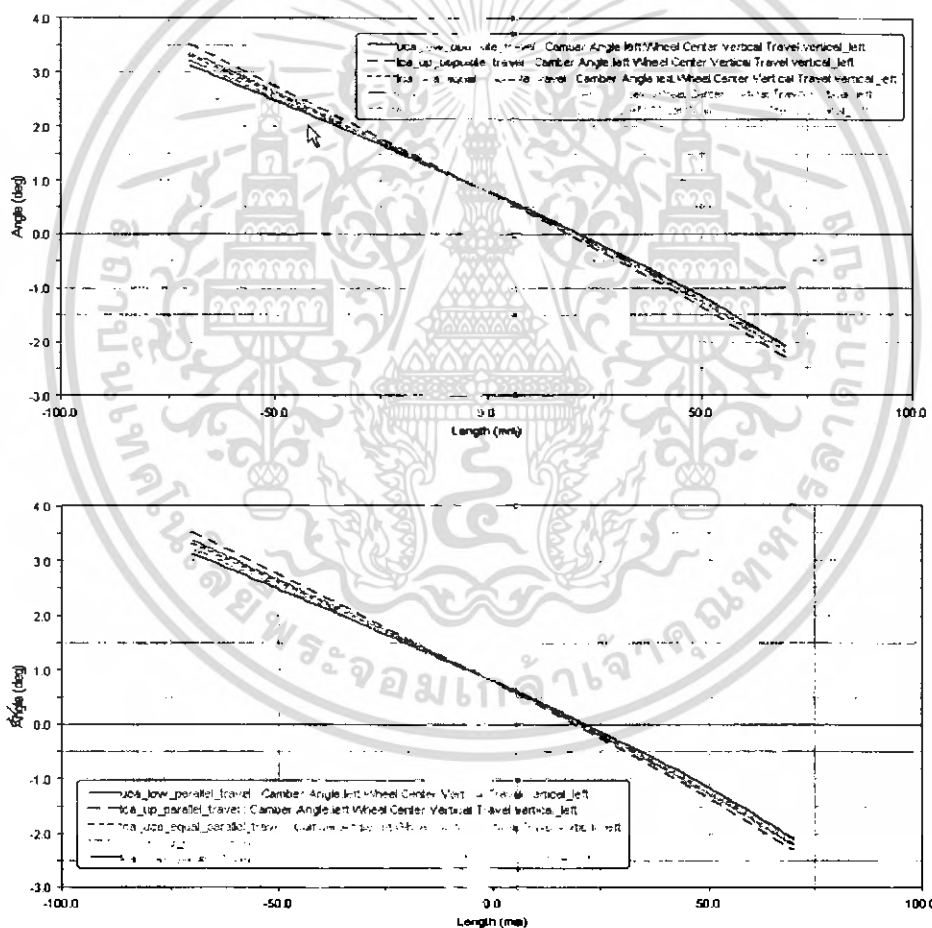
จากผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจ ทำให้เรสรุปได้ว่า รูปแบบของปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางช่วงขณะอยู่นอกแทรกฝั่งตรงข้ามกับปีกนก มีเสถียรภาพดีที่สุด เนื่องจาก การเปลี่ยนของตัวแปรทุกตัวที่เราสนใจค่อนข้างคงที่

6.3.2 การจำลองเพื่อหามุมการวางตัวของปีกนก

จากขั้นตอนการจำลองแรก เราได้รูปแบบการวางตัวของปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางช่วงขณะอยู่นอกแทรกฝั่งเดียวกับปีกนก แต่เรายังไม่รู้ว่าการวางตัวของปีกนกบนและปีกนกล่างหันไปด้านไหน ซึ่งในขั้นตอนนี้เราจะทำการจำลองโดยกำหนดตัวแปรดังนี้

- Uca_low : คือ ปีกนกบนวางตัวหันลงด้านล่าง ปีกนกบนวางแนวขนาน (สีแดง)
- Lca_up : คือ ปีกนกล่างวางตัวหันขึ้นด้านบน ปีกนกบนวางแนวขนาน (สีน้ำเงิน)
- Lca_uca_equal : คือ ปีกนกบนและปีกนกล่างวางในแนวขนานเหมือนกัน (สีเขียว)
- Uca_more : คือ ปีกนกบนวางตัวหันลงมาด้านล่างมากกว่าปีกนกบน (สีเขียว)
- Lca_more : คือ ปีกนกล่างหันขึ้นด้านบนมากกว่า (สีฟ้า)

1. มุมแคมเบอร์

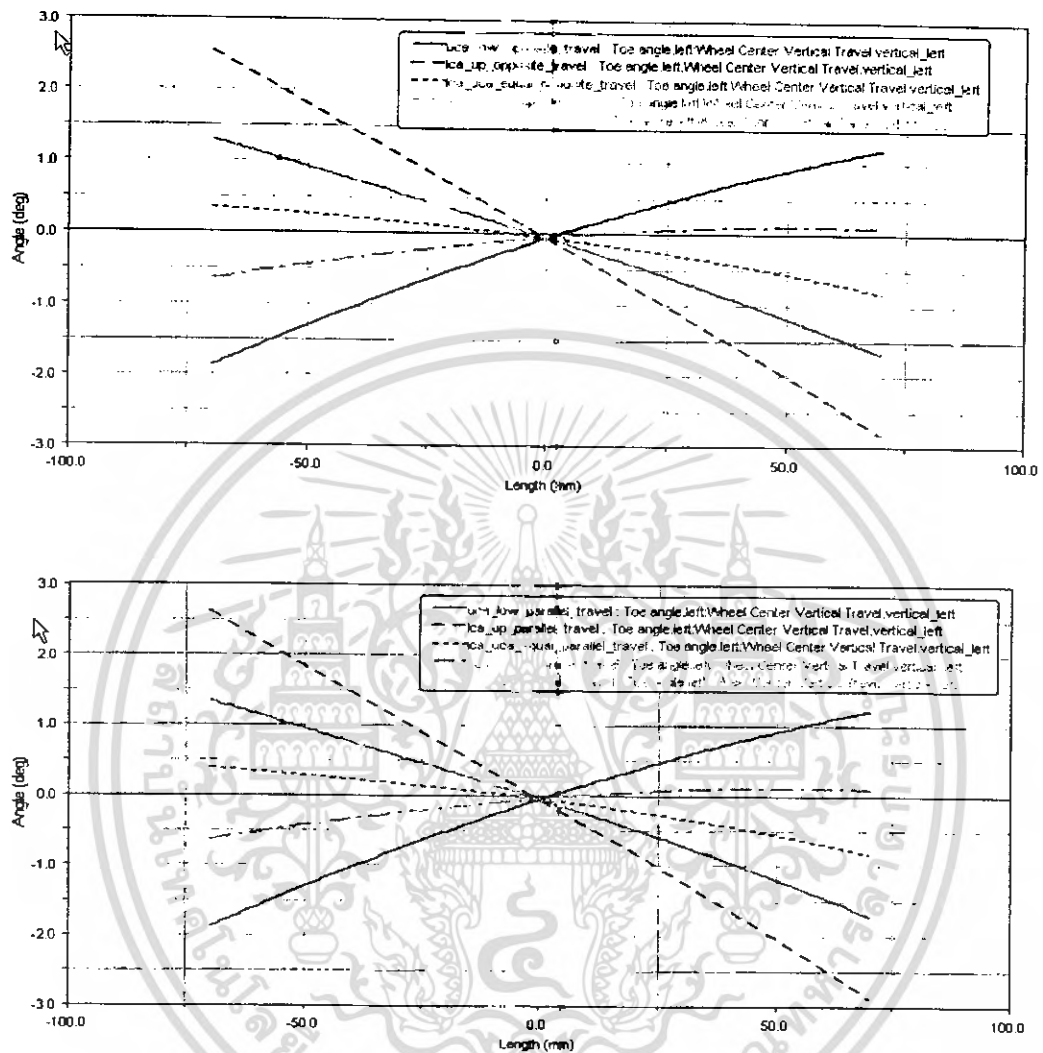


กราฟที่ 6-5 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์

จากกราฟ : จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าปีกนกทุกแบบมีการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะฉะนั้น เราจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นเป็นสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. มุมโท

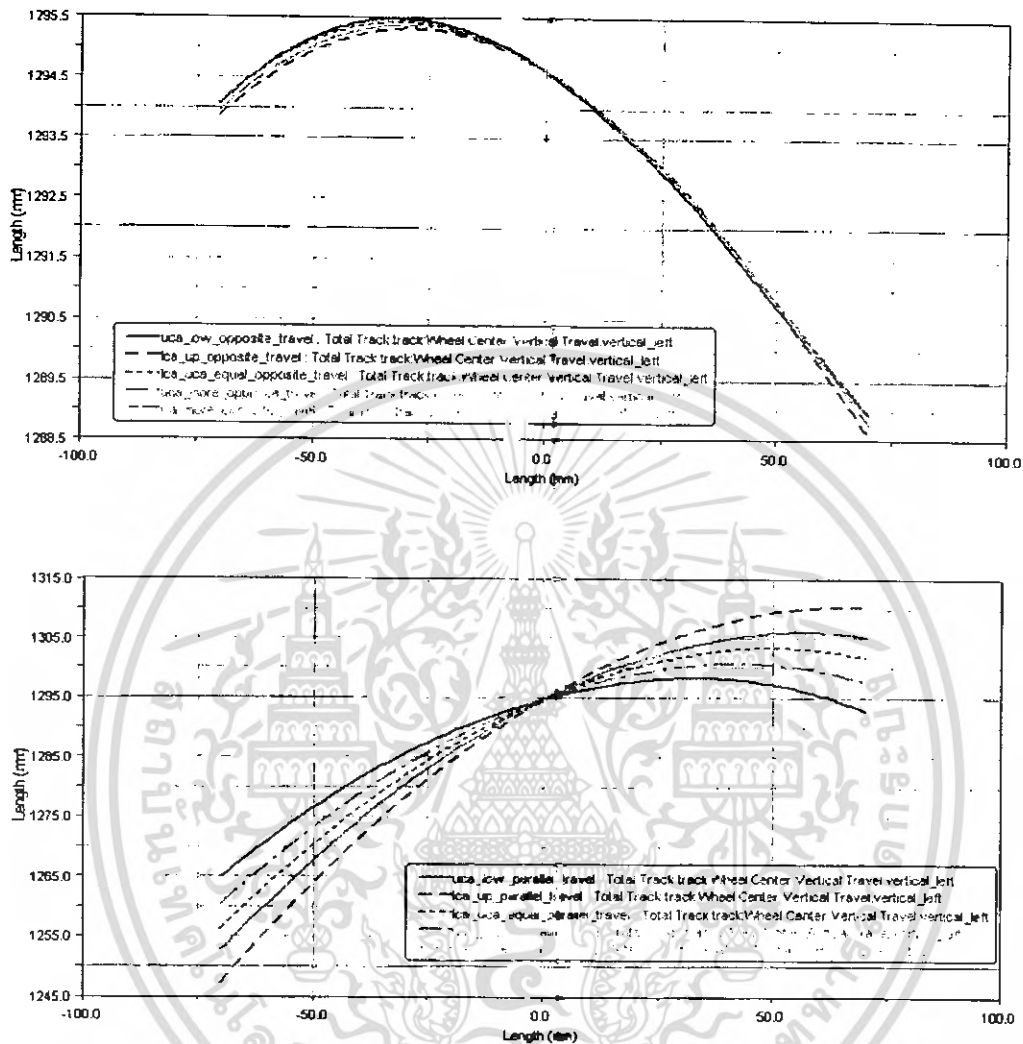


กราฟที่ 6-6 การเปลี่ยนแปลงมุมโท

จากกราฟ : จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า ปีกนกบนหันลงมาข้างล่างมีค่ามากกว่าปีกนกกลาง มีการเปลี่ยนแปลงมุมโทน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

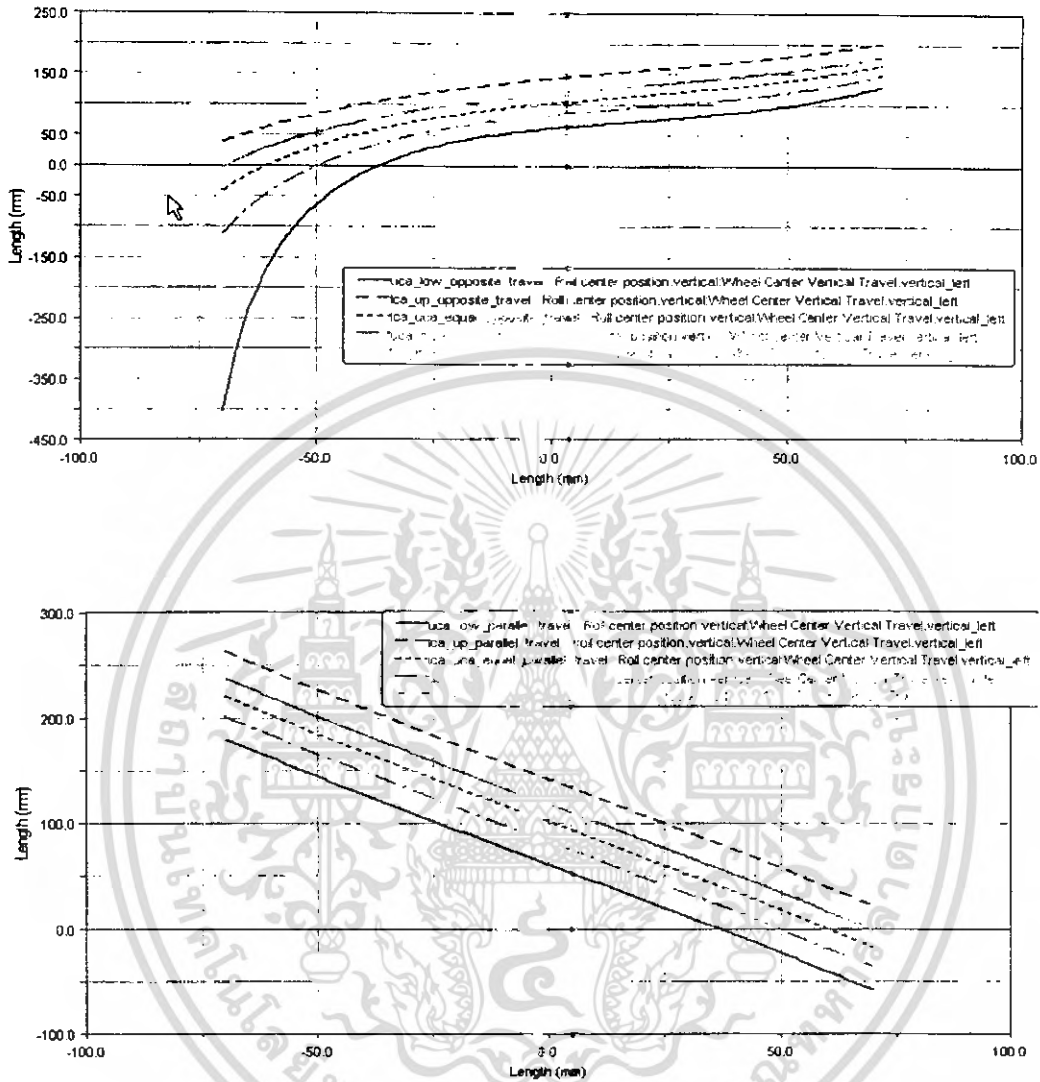
3. การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ



กราฟที่ 6-7 การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

จากกราฟ : จากผลการทดสอบแบบล้อซ้ายและขวาขึ้นลงไม่พร้อมกันจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อของปีกนกแต่ละแบบไม่แตกต่างกันมากนัก เช่นเดียวกับการทดสอบแบบล้อทั้งสองเคลื่อนที่ขึ้นลงพร้อมกัน

4. จุดศูนย์กลางการโคลง



กราฟที่ 6-8 จุดศูนย์กลางการโคลง

จากกราฟ : จากผลการทดสอบจะเห็นว่าปีกนกแบบที่ปีกนกบนหันลงด้านล่าง กรฟมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงการเคลื่อนที่ของล้อที่ -50 ถึง 50mm ซึ่งเป็นช่วงที่เราวิเคราะห์ส่วนที่เปลี่ยนแปลงมากนั้นเพราะเป็นช่วงที่อยู่เลขช่วงที่ปีกนกให้ตัวได้

สรุปผลการจำลองเพื่อหาการเอียงตัวของปีกนก

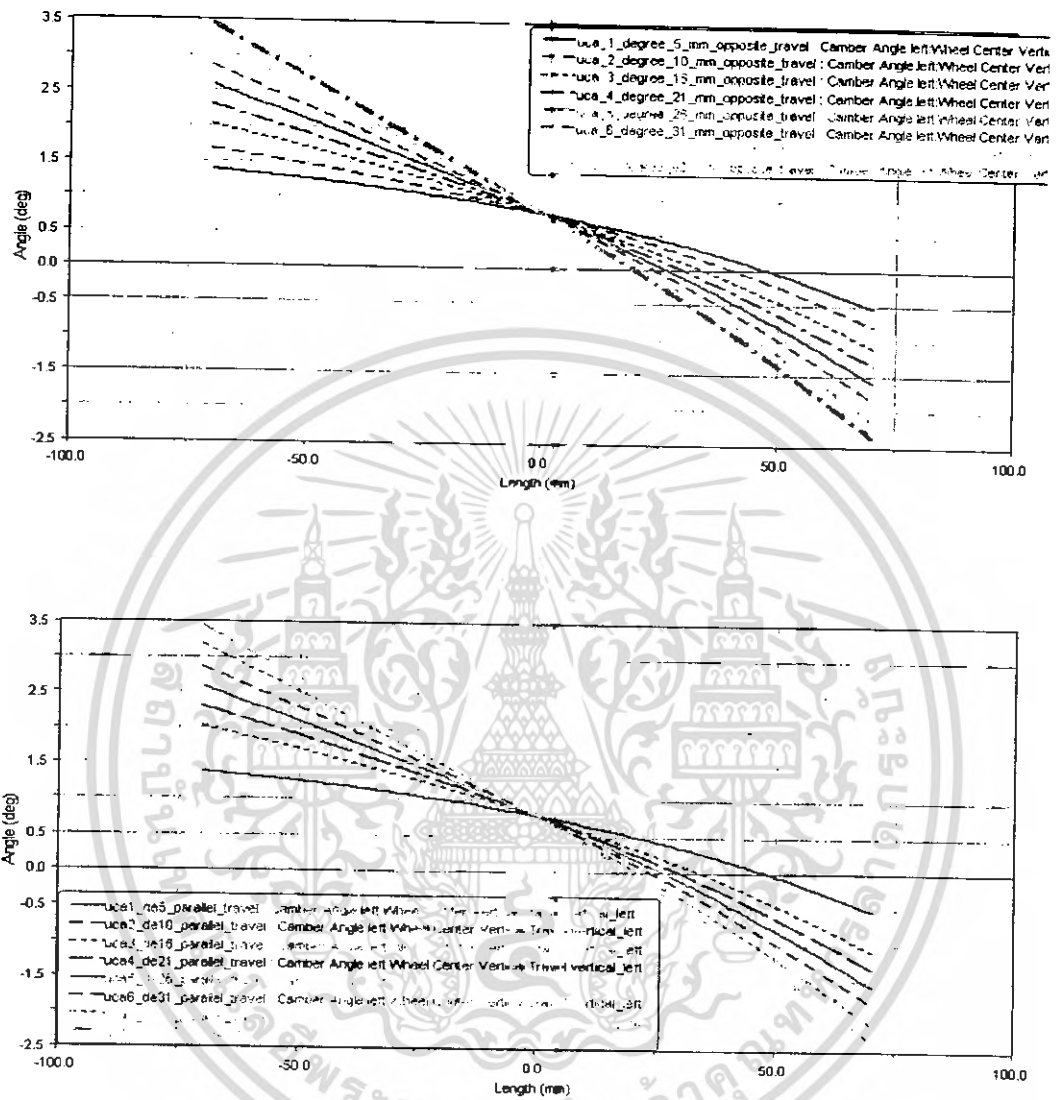
จากผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจ ทำให้เรสรุปได้ว่า ปีกนกบนหันลงด้านล่าง ส่วนปีกนกล่างอยู่ขนานกับพื้น ทั้งนี้ก็เพราะการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลงมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงการเคลื่อนที่ของล้อที่ -50 ถึง 50mm ซึ่งเป็นช่วงที่เราวิเคราะห์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางการโคลงที่ค่อนข้างคงที่นี้บอกให้เราทราบถึงเสถียรภาพที่ดี อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ก็มีค่าไม่มากเราจึงสรุปเลือกแบบปีกนกบนหันลงด้านล่าง ปีกนกล่างขนานกับพื้น

6.3.3 การจำลองเพื่อหามุมของปีกนกบน

จากการจำลองในขั้นตอนที่แล้ว เราสามารถสรุปได้แล้วว่าปีกนกบนหันลงด้านล่าง แต่ยังไม่รู้ว่าต้องหันลงเท่าไร ในขั้นตอนนี้เราจึงกำหนดช่วงในการทดสอบขึ้นเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจเมื่อหันปีกนกลงมาที่ระยะต่างๆกัน ดังนี้

- Uca_1_degree_5mm : ปีกนกบนลดลง 5mm
- Uca_2_degree_10mm : ปีกนกบนลดลง 10mm
- Uca_3_degree_16mm : ปีกนกบนลดลง 16mm
- Uca_4_degree_21mm : ปีกนกบนลดลง 21mm
- Uca_5_degree_26mm : ปีกนกบนลดลง 26mm
- Uca_6_degree_31mm : ปีกนกบนลดลง 31mm
- Uca_7_degree_37mm : ปีกนกบนลดลง 37mm
- Uca_8_degree_42mm : ปีกนกบนลดลง 42mm

1. มุมแคมเบอร์

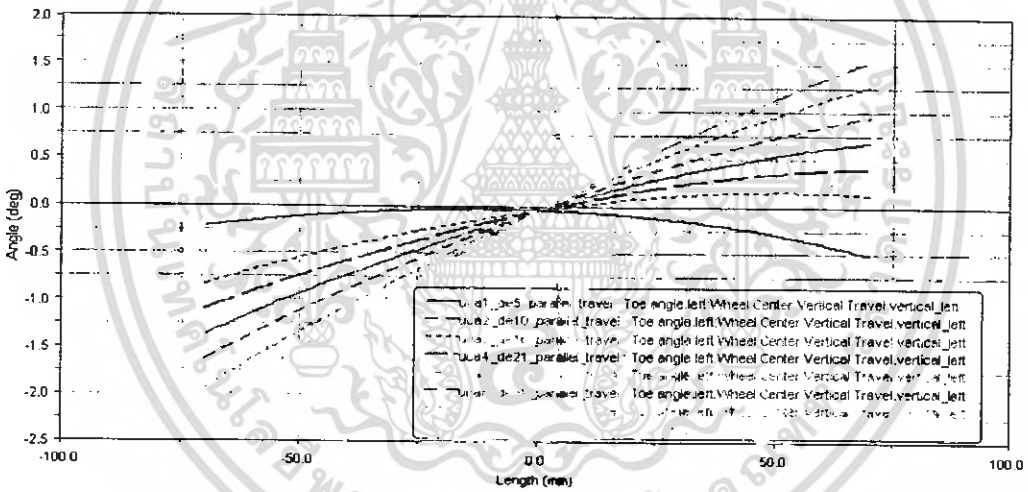
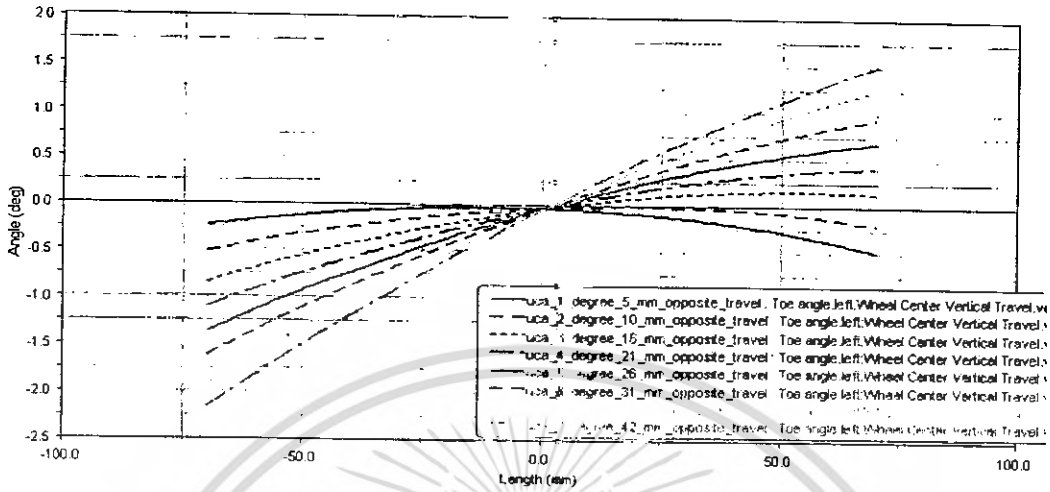


กราฟที่ 6-9 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์

จากกราฟ : จากผลการจำลอง เมื่อลดปีกนกบนลงมา มุมแคมเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่เราก็ต้องพิจารณาตัวแปรอื่นประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. มุมโท

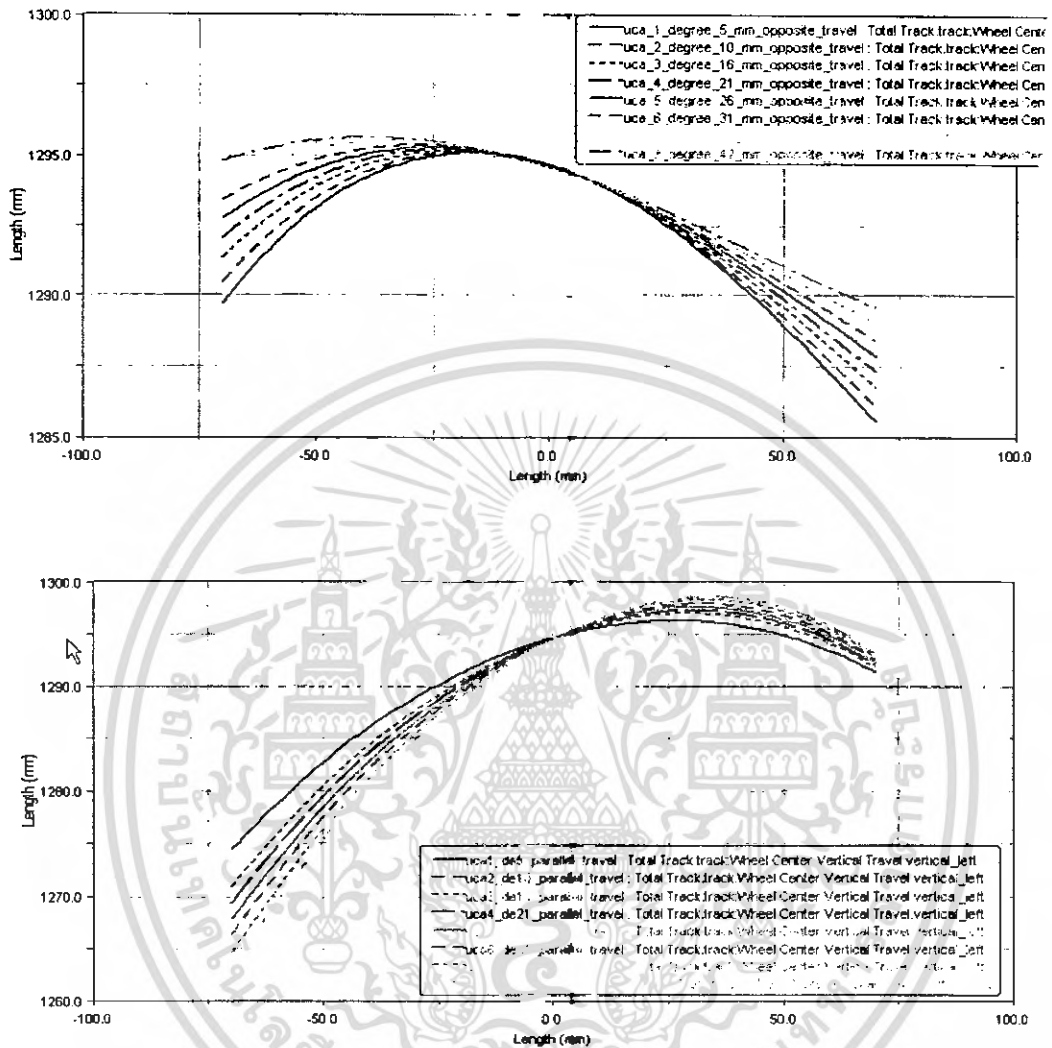


กราฟที่ 6-10 การเปลี่ยนแปลงมุมโท

จากกราฟ : เมื่อเราลดปีกนกบนลงมา 10mm การเปลี่ยนแปลงมุมโทค่อนข้างน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

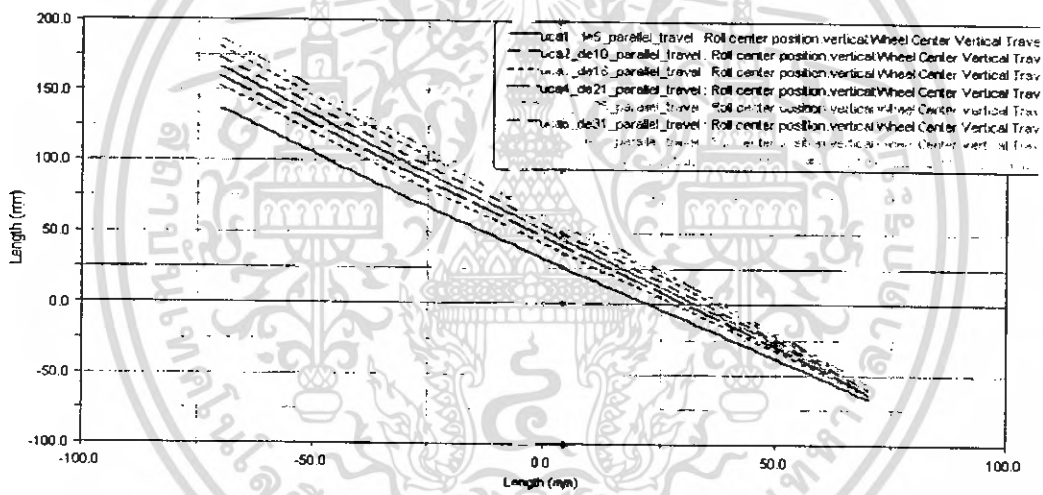
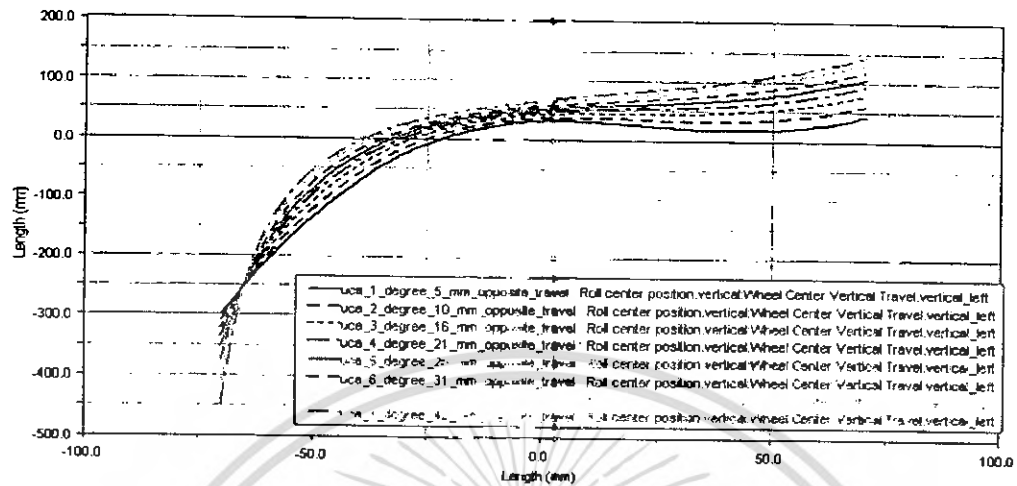


กราฟที่ 6-11 การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

จากกราฟ : การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อของปีกนกแต่ละแบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จุดศูนย์กลางการโคลง



กราฟที่ 6-12 จุดศูนย์กลางการโคลง

จากกราฟ : การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลงของปีกนกแต่ละแบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก
สรุปผลการจำลองเพื่อหามุมของปีกนกบน

จากการจำลองเราพบว่าหากเราให้ปีกนกบนหันลงมาเป็นระยะ 10mm การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆในช่วงการเคลื่อนที่ของปีกนก มีค่าน้อย แสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.4 การจำลองเพื่อหามุมเอียงลูกหมากปีกนก

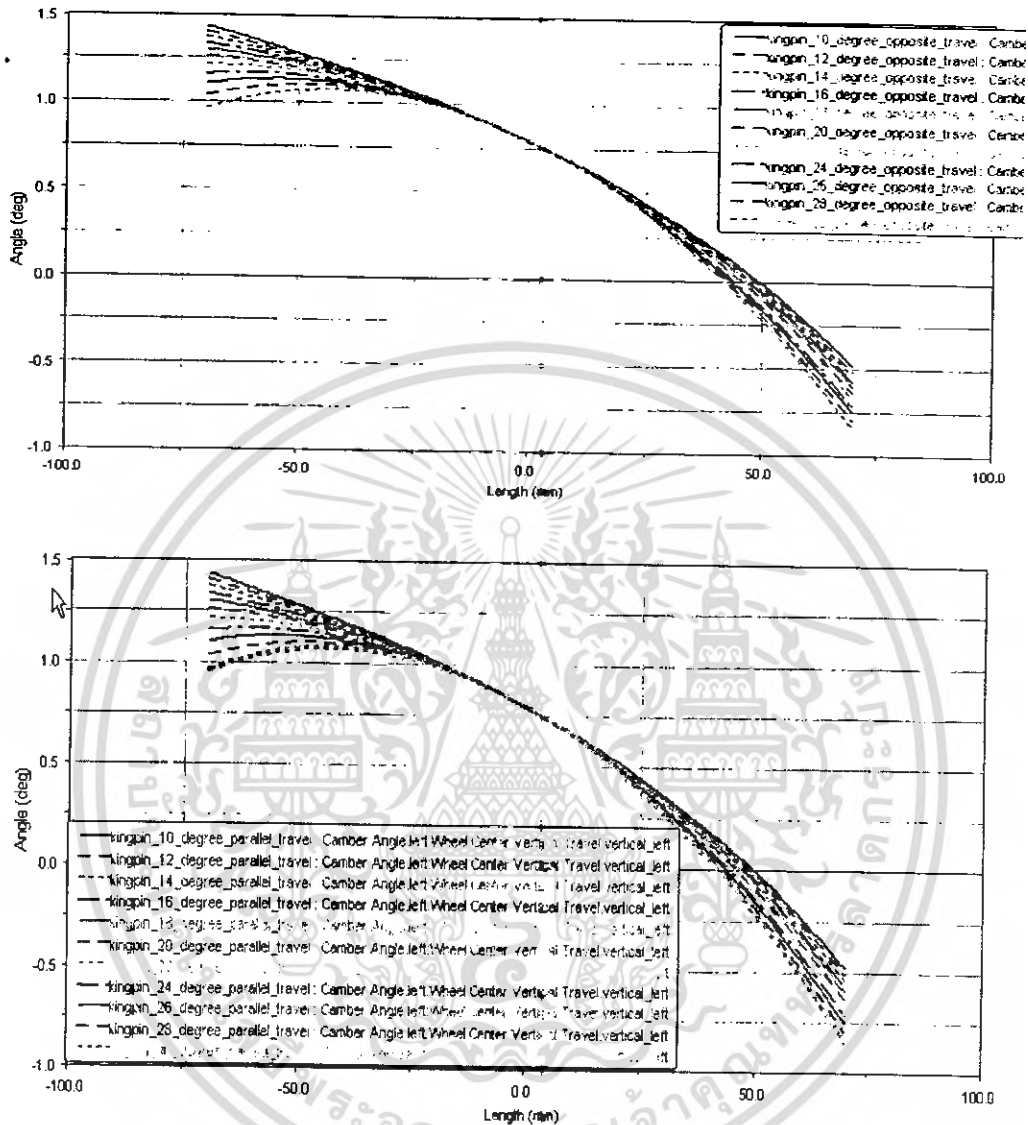
ในการจำลองตามขั้นตอนที่ผ่านมาทำให้เราทราบลักษณะการวางตัวของปีกนก และมุมเอียงของปีกนก ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหามุมเอียงลูกหมากปีกนกว่ามีค่าเท่าไร โดยเรากำหนดช่วงการพิจารณาดังตารางที่ 6-1

	kingpin degree	มุมเอียงลูกหมากปีกนก
1	10	10
2	12	12
3	14	14
4	16	16
5	18	18
6	20	20
7	22	22
8	24	24
9	26	26
10	28	28
11	30	30

ตารางที่ 6-1 สภาวะในการหามุมเอียงลูกหมากปีกนก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มุมแคมเบอร์

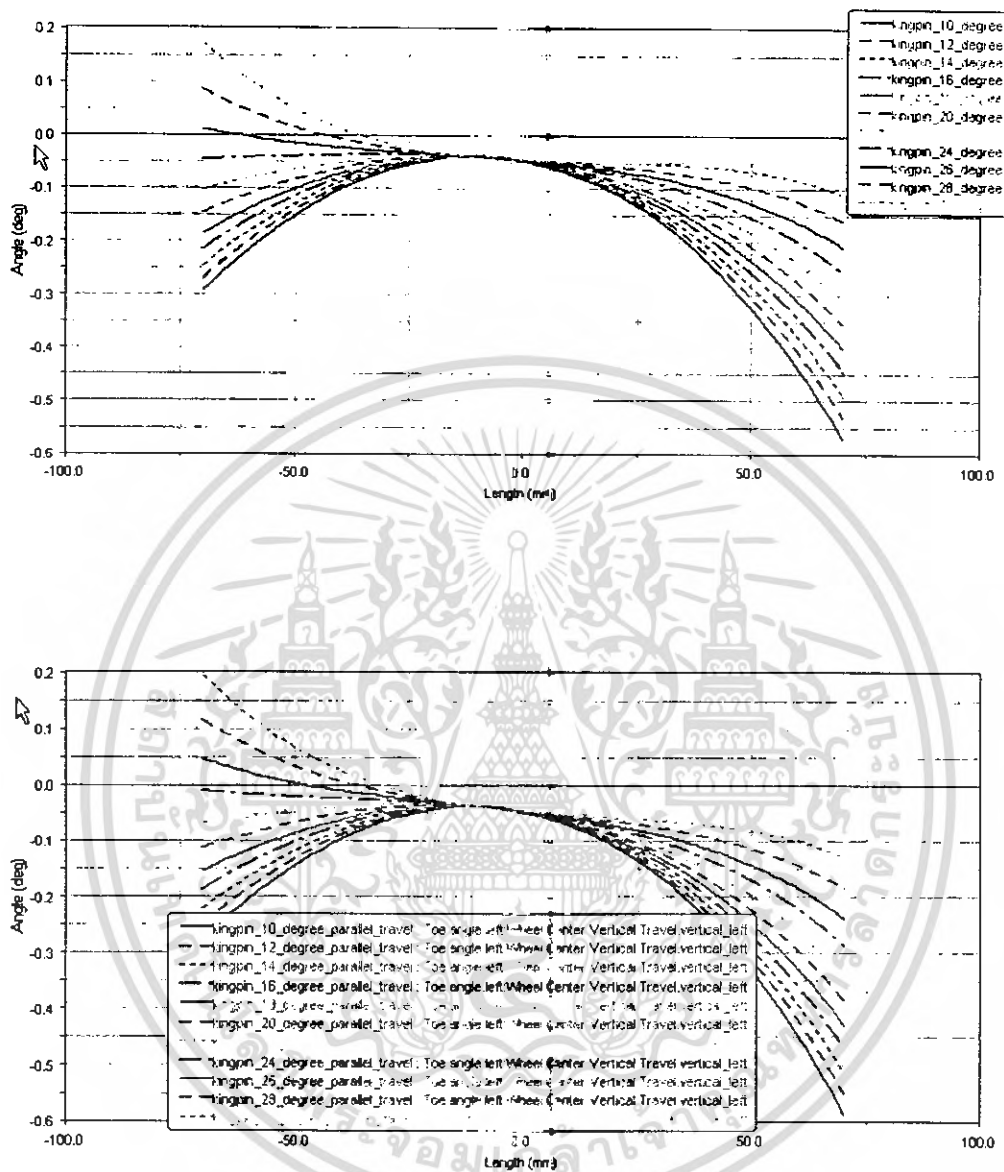


กราฟที่ 6-13 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์

จากกราฟ : การเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ที่มุมเอียงลูกหมากปีกนกค่าต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. มุมโท

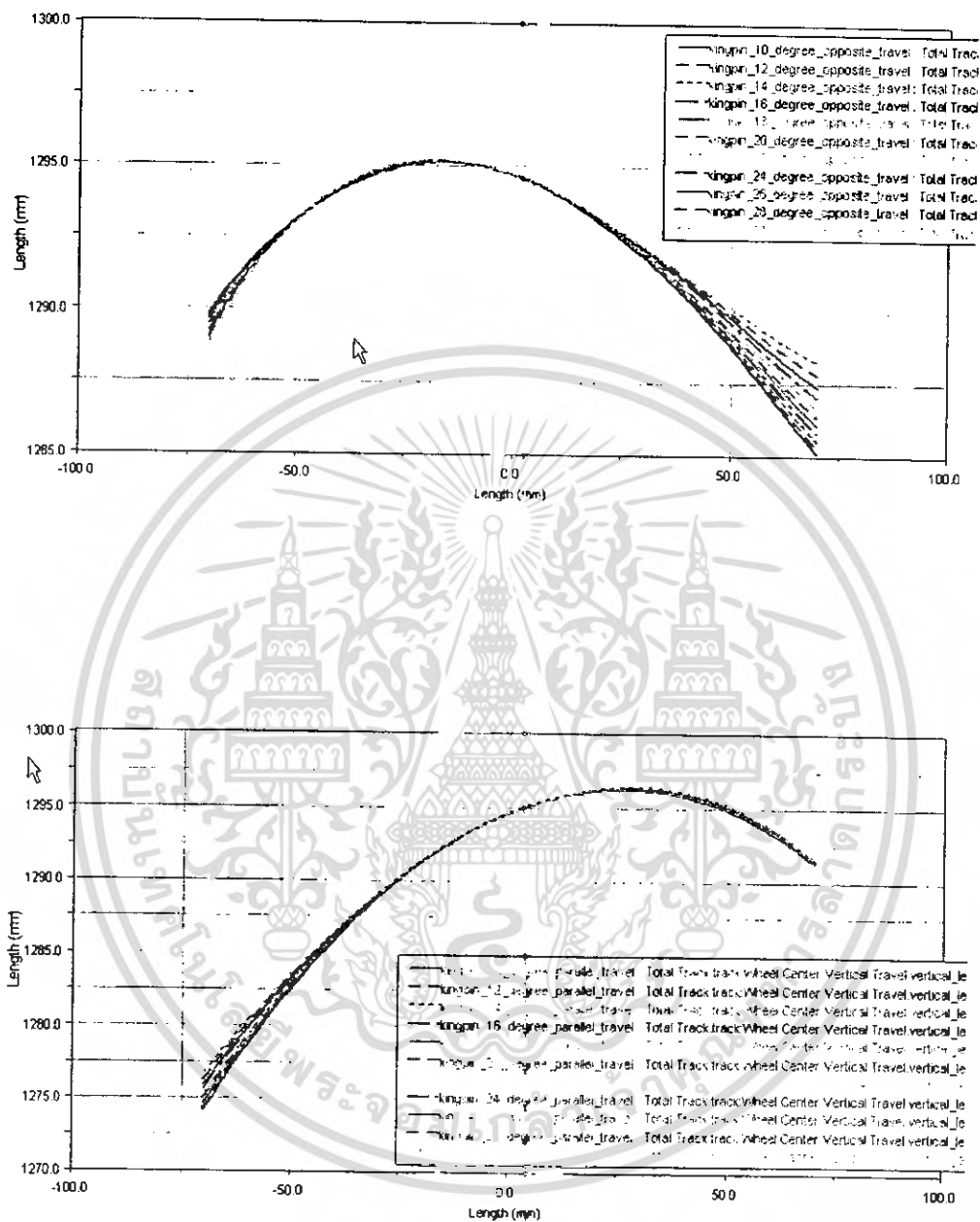


กราฟที่ 6-14 การเปลี่ยนแปลงมุมโท

จากกราฟ : ที่มุมเอียงลูกหมากปีกนก 14 องศา ค่าการเปลี่ยนแปลงมุมโทมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงการเคลื่อนที่ของล้อที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

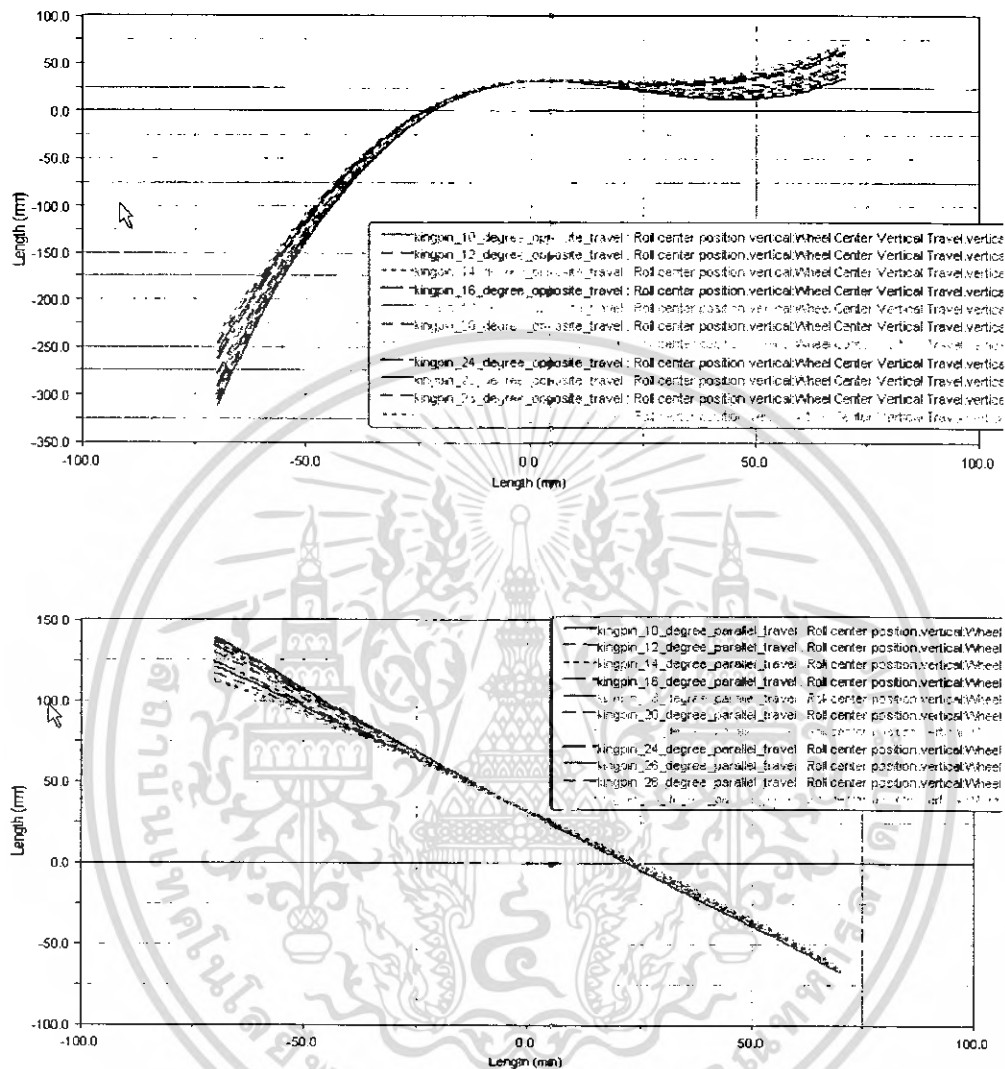


กราฟที่ 6-15 การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

จากกราฟ : ที่มุมเอียงลูกหมากปีกนกค่าต่างๆ การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อไม่แตกต่างกันมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จุดศูนย์กลางการโคลง



กราฟที่ 6-16 การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลง

สรุปผลการจำลองเพื่อหารูปแบบการวางตัวของปีกนก และ มุมเอียงลูกหมากปีกนก

จากการจำลองเราพบว่า ที่มุมเอียงลูกหมากปีกนก 14 องศา การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ มีค่าค่อนข้างน้อย และคงที่ ในช่วงการเคลื่อนที่ของล้อที่เรากำหนดในการจำลอง จากการจำลองในทุกขั้นตอนที่ผ่านมา เราสามารถสรุปรูปแบบการวางตัวของปีกนกและมุมเอียงลูกหมากปีกนกได้คือ

1. จุดศูนย์กลางการโคลงของปีกนกลอยอยู่นอกแตรกฝั่งตรงข้ามกับปีกนก
2. ปีกนกบนหันลงด้านล่าง ส่วนปีกนกล่างขนานกับพื้น
3. ปีกนกบนหันลงด้านล่างเป็นระยะ 10mm
4. มุมเอียงลูกหมากปีกนกมีค่า 14 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 ผลการจำลองทางพลศาสตร์

การจำลองทาง คิเนมาติก บอกรให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อย่างที่เราสนใจ แต่ก็เป็น การเปลี่ยนแปลงในขณะที่รถไม่ได้เคลื่อนที่ ซึ่งผลการจำลองที่ได้บอกรให้เราทราบถึงลักษณะการวางตัวของ ปีกนก แต่เราก้ยังไม่ทราบว่าขณะที่รถเคลื่อนที่จริงการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นจะเป็นอย่างไร ในบทนี้เราก้ จะทำการจำลองทางพลศาสตร์ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจในขณะที่รถเคลื่อนที่จริง โดย กำหนดรูปแบบการจำลองดังนี้

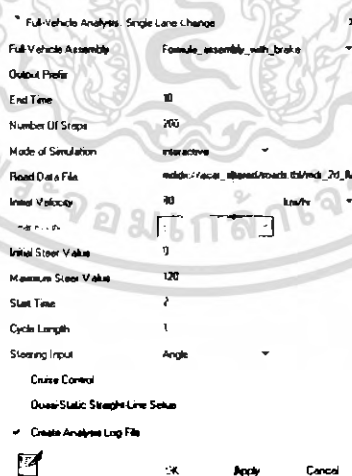
6.4.1 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน (Single lane Change)

เป็นการทดสอบที่จำลองการเลี้ยวของรถในขณะที่เปลี่ยนช่องถนน ซึ่งการทดสอบนี้จะบอกรถึงการ เปลี่ยนแปลงของมุม Yaw, มุม Pitch, มุมโคลง การเปลี่ยนแปลงของมุมล้อยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความ เสถียร และการควบคุมรถโดยตรง โดยในการทดสอบ เราจะทำการทดสอบโดยเปลี่ยนค่าคงที่สปริงล้อ หน้า และ ล้อหลัง ตามตารางที่ 6-2

	ค่าคงที่สปริง ล้อหน้า	ค่าคงที่สปริงล้อหลัง
1	20	32
2	23	32
3	26	32
4	29	32

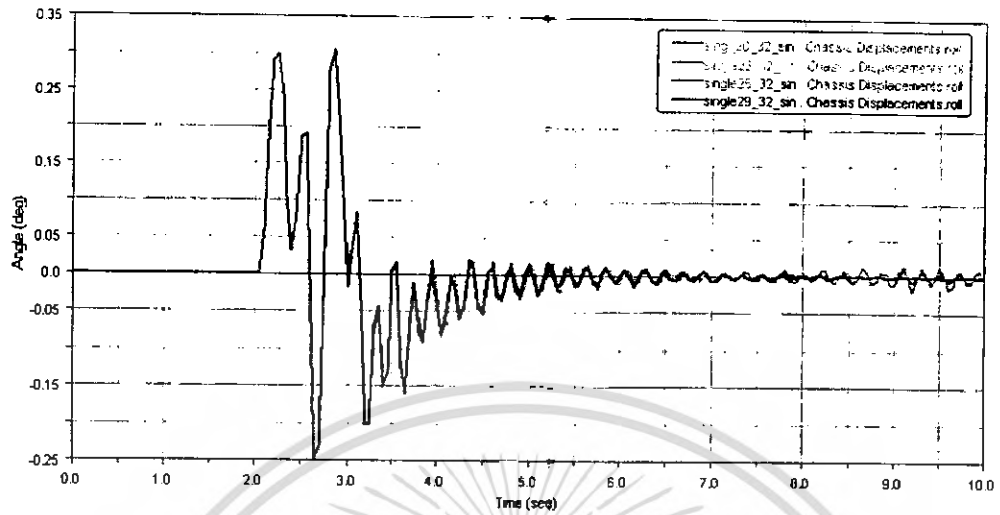
ตารางที่ 6-2 ค่าคงที่สปริงที่ใช้ในการทดสอบ

โดยเราจะกำหนดสภาวะในการจำลอง คือ ให้ความเร็วเริ่มต้นก่อนการเลี้ยวเป็น 80 Km/hr เลี้ยวด้วย มุม 120 องศา ที่วินาทีที่ 2 สิ้นสุดที่วินาทีที่ 10

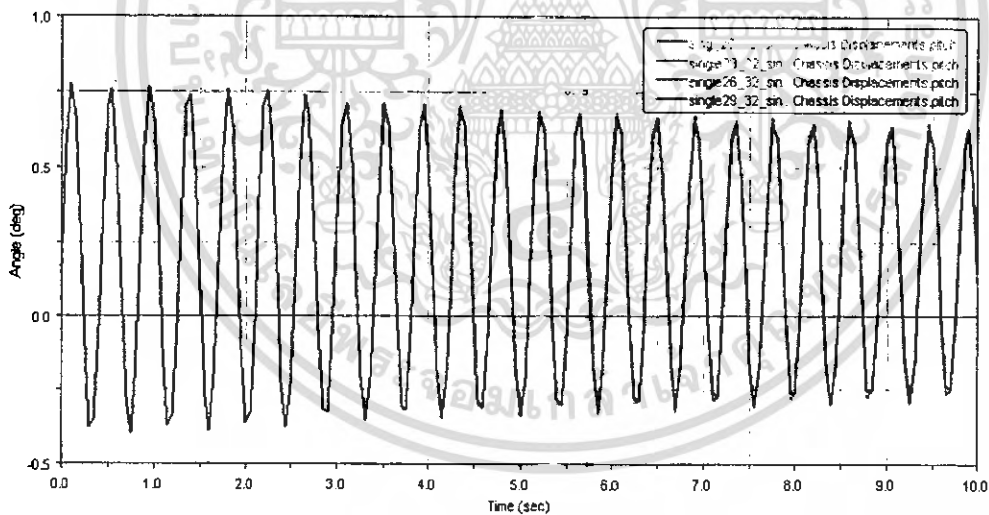


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มุมโคลง

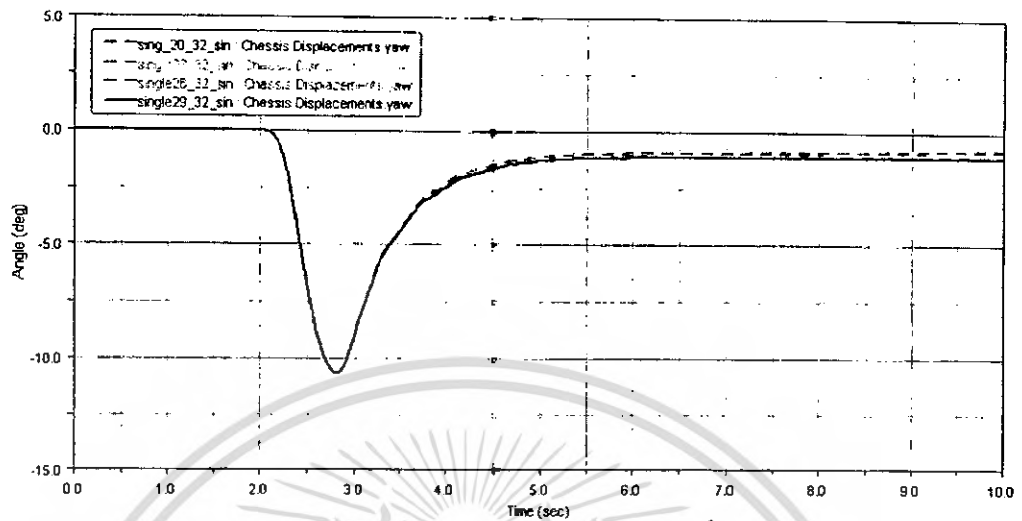


- มุม pitch



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มุมขยัว

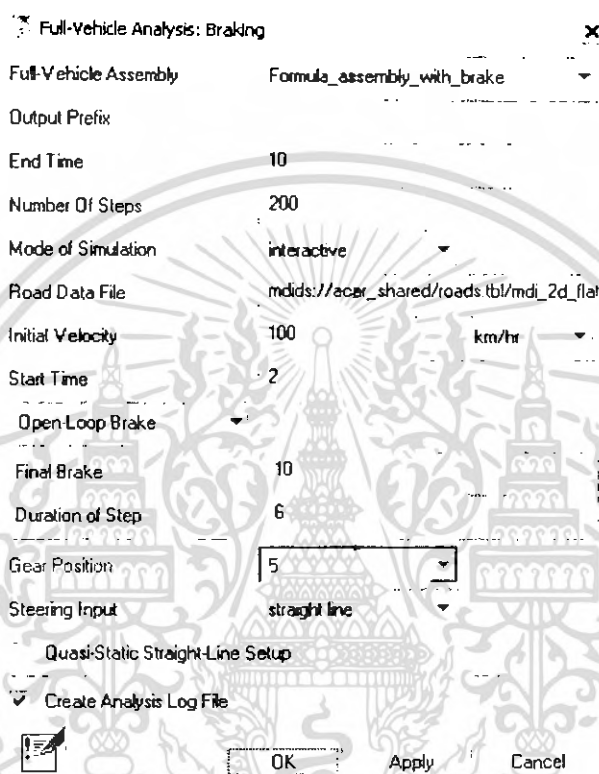


กราฟที่ 6-17 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน

สรุปจากกราฟ : ในขั้นตอนนี้การจำลองจะถูกแบ่งตามค่าคงที่สปริงล้อหน้าและล้อหลังที่กำหนด โดยในการจำลองทางพลศาสตร์นี้ เราจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจ 3 ตัวคือ มุมโคลง มุมพิต มุมขยัว การเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้จะส่งผลต่อเสถียรภาพในการควบคุมในลักษณะที่ต่างกัน กล่าวคือ ในการจำลองที่แตกต่างกัน มุมที่เราให้ความสำคัญในการพิจารณาก็จะแตกต่างกัน ซึ่งในการจำลองการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนช่องถนนนี้ เราจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงมุมโคลงและมุมขยัว เป็นหลัก ซึ่งจากการจำลอง เมื่อให้ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 29 N/mm ล้อหลังเป็น 32 N/mm เส้นกราฟจะเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วที่สุด

6.4.2 การทดสอบการเบรกของรถ

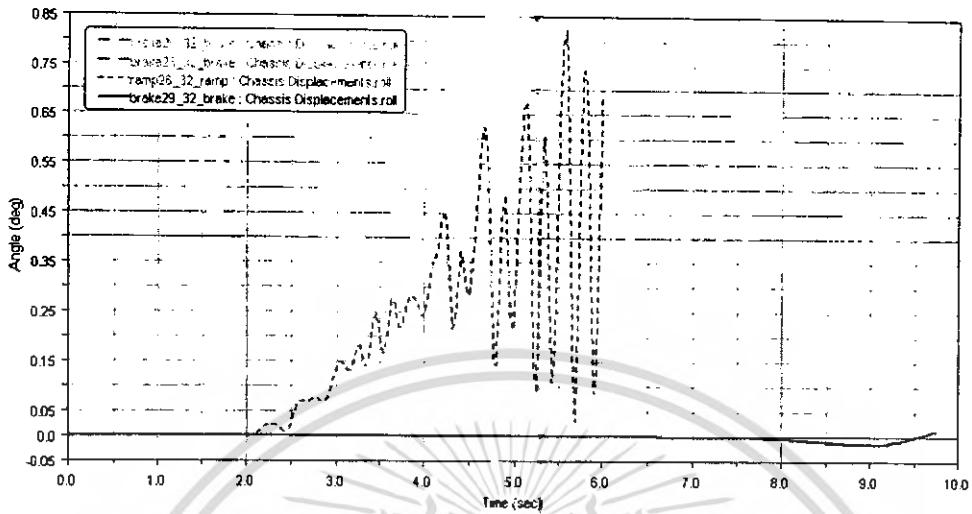
เป็นการจำลองการเบรกของรถที่ความเร็วที่กำหนด โดยในการจำลองการเบรก เราจะกำหนดสภาวะตั้งรูปที่ โดยในการจำลองเราจะเปลี่ยนค่าคงที่สปริงของล้อหน้าและล้อหลังตามการจำลองการเลียของรถ ในขณะที่เปลี่ยนช่องถนน



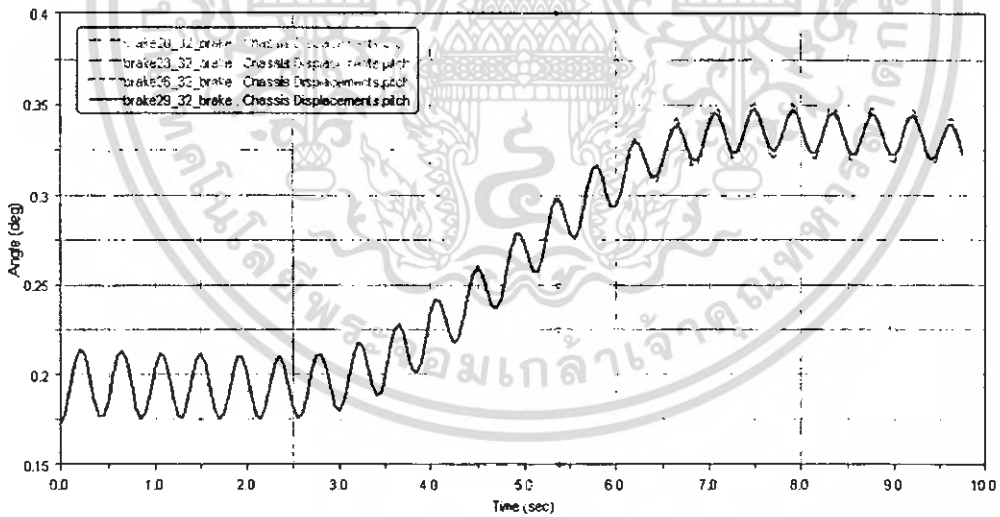
รูปที่ 6-15 สภาวะการจำลองการเบรก

ภาวะ การจำลองการเบรกคือ ให้ความเร็วเริ่มต้นก่อนทำการเบรกเป็น 100 Km/hr แล้วกำหนดช่วงเวลาในการเบรกสิ้นสุดที่วินาทีที่ 10 ซึ่งรถจะเริ่มทำการที่เวลา 2 วินาที จนได้ความเร็วสุดท้ายเป็น 10 km/hr

- มุมโคลง

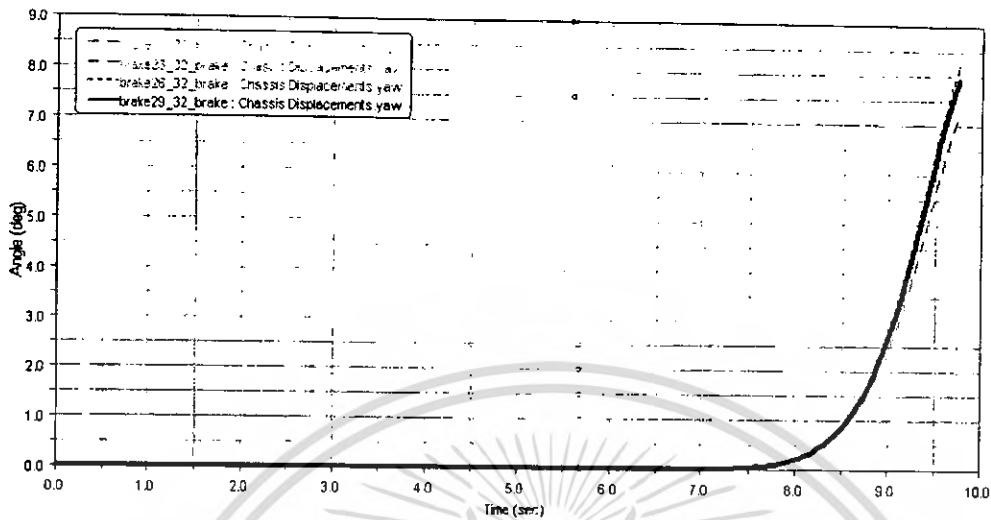


- มุมพิท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มุม ย่อ



กราฟที่ 6-18 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่วงถนน

สรุปจากกราฟ : ในขณะที่เกิดการเบรก รถจะมีอาการหน้าทิ่มเกิดเป็นมุมพิทช์ขึ้น ซึ่งในการจำลองเราต้องการทราบค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้ จากกราฟเราจะเห็นว่า เมื่อให้ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 29 N/mm ล้อหลังเป็น 32 N/mm การเปลี่ยนแปลงของมุมพิทช์มีค่าน้อยที่สุด ส่วนมุมโคลงนั้น ที่ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 26 N/mm จะมีการเปลี่ยนแปลงมุมโคลงค่อนข้างมาก

6.4.3. การทดสอบแบบ Ramp Steer

การทดสอบแบบ Ramp Steer นี้จะเป็นการจำลองการเลี้ยวของรถ ที่การหมุนพวงมาลัยด้วยความเร็วเชิงมุมค่าหนึ่ง โดยเราจะกำหนดสถานะการจำลอง ดังรูปที่

Full-Vehicle Analysis: Ramp Steer

Full-Vehicle Assembly: Formula_assembly_with_brake

Output Prefix:

End Time: 6

Number Of Steps: 200

Mode of Simulation: interactive

Road Data File: mds://aear_shared/roads.tbl/mdt_2d_flat

Initial Velocity: 70 km/hr

Gear Position: 5

Initial Steer Value: 0

Ramp: 40

Start Time: 2

Steering Input: Angle

Cruise Control:

Quasi-Static Straight-Line Setup:

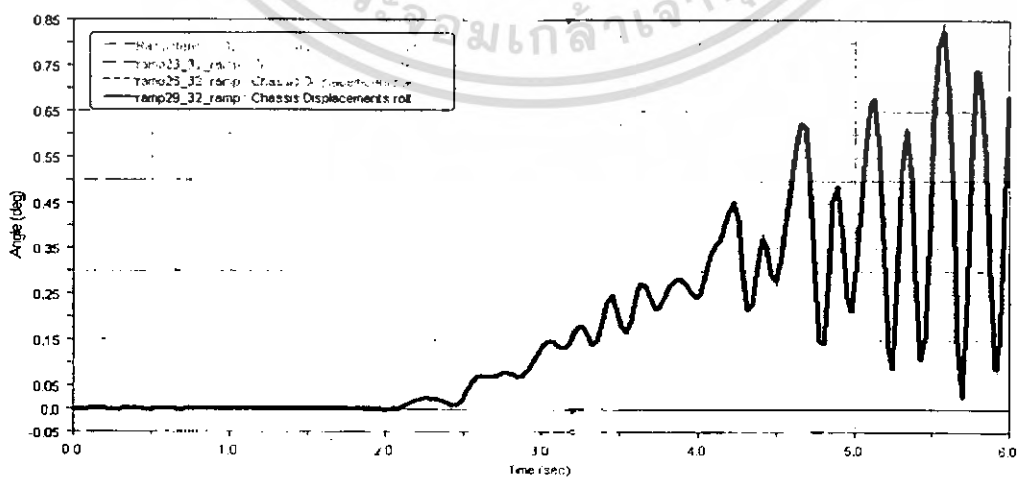
Create Analysis Log File

OK Apply Cancel

รูปที่ 6-16 สถานะการจำลองแบบ Ramp Steer

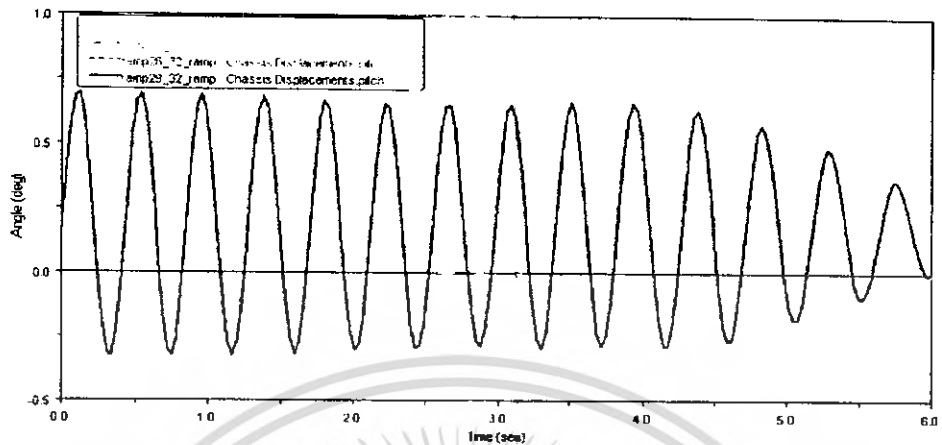
จากรูปที่ 6-16 สถานะการจำลองแบบ Ramp Steer คือ ให้ความเร็วเริ่มต้นเป็น 70 Km/hr ทำการเลี้ยวที่วินาทีที่ 2 สิ้นสุดที่วินาทีที่ 6 โดยให้ความเร็วเชิงมุมในการหมุนพวงมาลัยเป็น 40 rad/s

- มุมโคลง

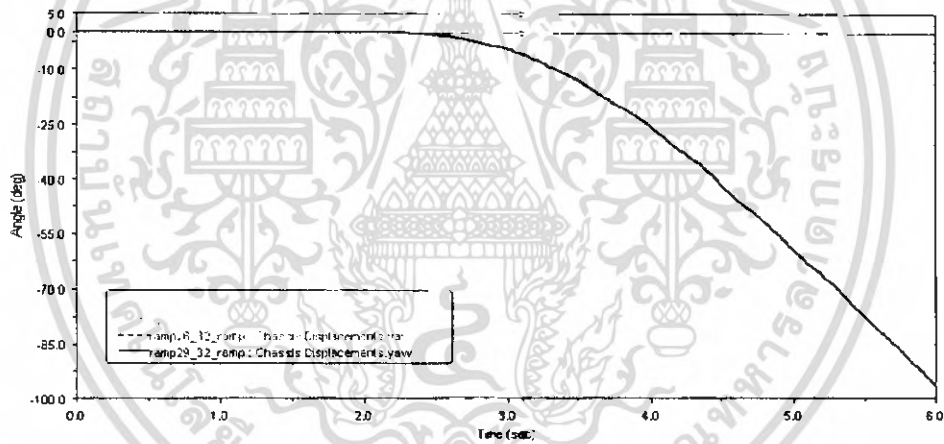


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• มุมพิต



• มุมขยอ



กราฟที่ 6-19 การจำลองแบบ Ramp Steer

สรุปจากกราฟ : ในขณะที่เกิดการเลี้ยว รถจะมีอาการโคลงขึ้น ซึ่งในการจำลองเราต้องการทราบค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้ จากกราฟเราจะเห็นว่า เมื่อให้ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 29 N/mm ล้อหลังเป็น 32 N/mm การเปลี่ยนแปลงของมุมโคลงมีค่าน้อยที่สุด ที่ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 26 N/mm จะมีการเปลี่ยนแปลงมุมโคลงค่อนข้างมาก

บทที่ 7 ไฟไนต์เอลิเมนต์

7.1 การวิเคราะห์แบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS

หัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายของปีกนกโดยวัดขนาดแรงจากโปรแกรม MSC.ADAMS/Car ซึ่งมีขนาดและทิศทางตามตารางที่ 7-1, 7-2 และรูปที่ 7-1



รูปที่ 7-1 แสดงทิศทางของแกนอ้างอิง

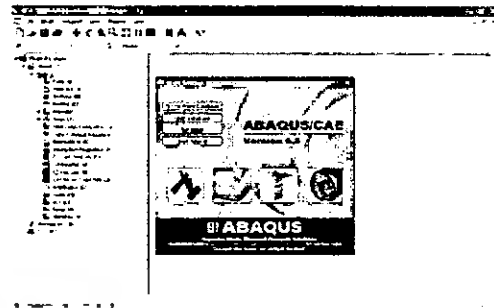
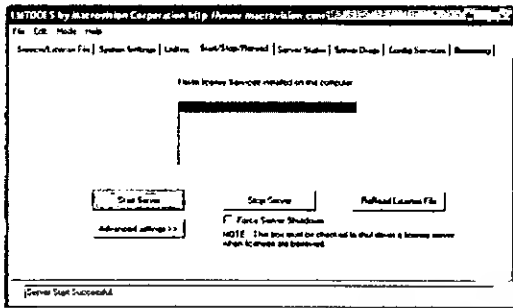
	ขนาดของแรง		
	แกน X (นิวตัน)	แกน Y (นิวตัน)	แกน Z (นิวตัน)
ปีกนกล่างด้านหน้า	-1452	21777	1177.71
ปีกนกล่างด้านหลัง	-487.37	4487.19	-506.12
ปีกนกบนด้านหน้า	-969.6	23945.8	-578.79
ปีกนกบนด้านหลัง	-2736.94	-2828.93	-618.51

ตารางที่ 7-1 แสดงขนาดของแรงที่กระทำต่อปีกนกเมื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องทางบน

	ขนาดของแรง		
	แกน X (นิวตัน)	แกน Y (นิวตัน)	แกน Z (นิวตัน)
ปีกนกล่างด้านหน้า	--363.92	2171.92	-524.48
ปีกนกล่างด้านหลัง	-344.49	762.12	-149.59
ปีกนกบนด้านหน้า	-45.84	-1242.61	305.97
ปีกนกบนด้านหลัง	-589.31	-2279.63	-134.49

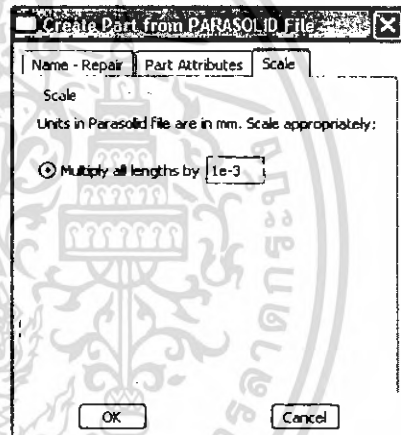
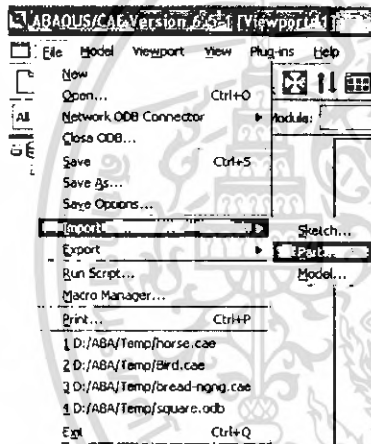
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7-2 แสดงขนาดของแรงที่กระทำต่อปีกนกเมื่อทำการจำลองการเบรกของรถ



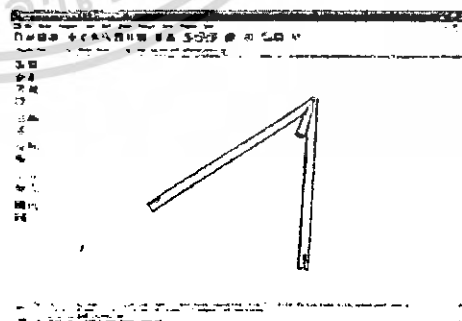
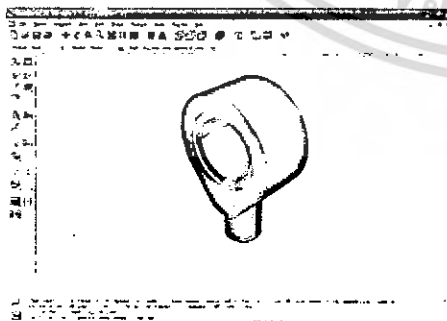
รูปที่ 7-2 แสดงวิธีเปิด ABAQUS Licensing

รูปที่ 7-3 หน้าจอเมื่อเปิด โปรแกรม ABAQUS



รูปที่ 7-4 ขั้นตอนการ Import files จาก โปรแกรม Unigraphic Nx3

รูปที่ 7-5 ขั้นตอนการเปลี่ยนหน่วยจาก มิลลิเมตร เป็น เมตร



รูปที่ 7-6 แสดงภาพลูกหมากที่ Import เข้ามาใน โปรแกรม ABAQUS แล้ว

รูปที่ 7-7 แสดงภาพปีกนกที่ Import เข้ามาใน โปรแกรม ABAQUS แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ขั้นตอนการทำ

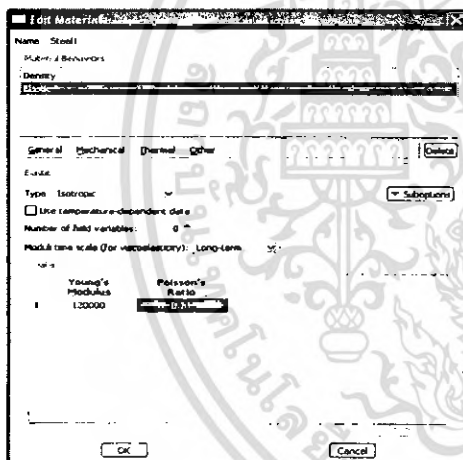
7.2.1. การอิมพอร์ต (Import) ไฟล์เข้ามาในโปรแกรมอะบาคัส

1.1 เปิดโปรแกรม ABAQUS โดยเปิดที่ตัว ABAQUS Licensing และเลือก Start/Stop/Reread แล้วเลือก ABAQUS แล้วกด Start Sever ตามรูปที่ 7-2

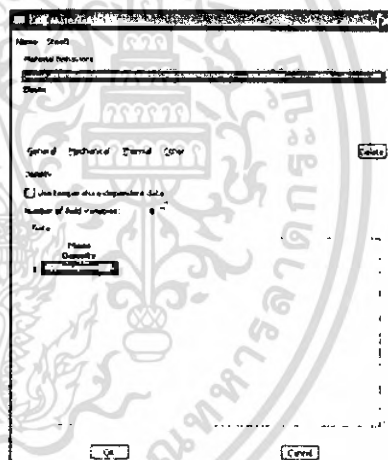
1.2 เปิดโปรแกรม ABAQUS CAE หน้าจอแสดงดังรูปที่ 7-3

1.3 สร้าง Part ขึ้นมาหรือ Import เข้ามาจากโปรแกรมวาดรูปอื่นๆก็ได้ ในที่นี้จะ Import เข้ามาจากโปรแกรม Unigraphics Nx3 โดยการ Import File Parasolid เข้ามาใน ABAQUS ทำได้โดยเข้าไปที่ File > Import > Part ดังรูปที่ 7-4 จะปรากฏ Import Part Dialog box ขึ้นมาดังรูปที่ 7-4 จากนั้น Browse ไปที่ File ที่เรา Export มา จากนั้นก็จะปรากฏ Create Part from PARASOLID File แล้วให้เลือกที่ Scale กำหนดค่า Parameter ดังรูปที่ 7-5 เพื่อแปลงหน่วยของ Model จากมิลลิเมตร เป็น เมตร

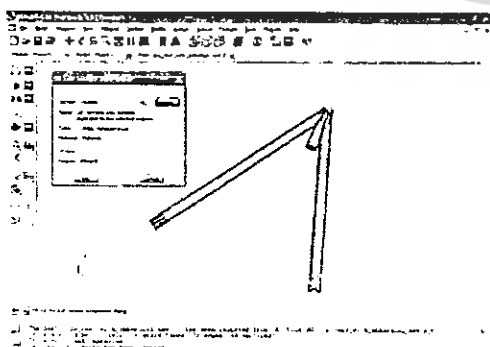
1.4 เราทำการ Import มา 2 ชิ้น คือตัวลูกหมากกับตัวปีกนก ดังรูปที่ 7-6 และ 7-7



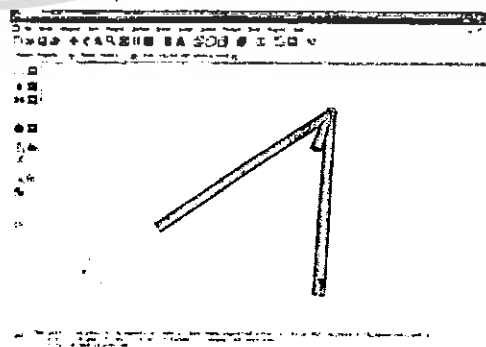
รูปที่ 7-8 แสดงการกำหนดค่า Elastic ในวัสดุ



รูปที่ 7-9 แสดงการกำหนดค่า Density ในวัสดุ



รูปที่ 7-10 แสดงการกำหนด Section ลงใน




รูปที่ 7-11 แสดงภาพหลังกำหนด Section


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีกนก

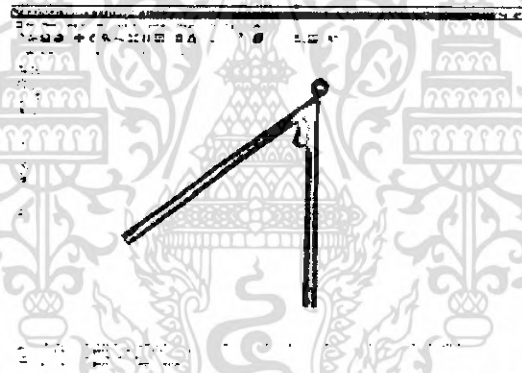
เสร็จแล้ว

7.3. การกำหนดคุณสมบัติ

7.3.1 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยกดที่ Icon Create Material  จะปรากฏ Edit Material Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ต่างๆดังนี้คือ Name คือ Steel ASTM A53 Stream pipe, ค่า Density เท่ากับ $0.00785 \frac{g}{mm^3}$, ค่า Young's Modulus เท่ากับ $209000 \frac{N}{mm^2}$ และค่า Poisson Ratio เท่ากับ 0.31 ดังรูปที่ 7-8 และ 7-9


7.3.2 ต่อจากนั้นสร้าง Section โดยกดที่ Icon Create Section  จะปรากฏ Create Section Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ดังนี้คือ Name คือ SteelSec, Category คือ Solid, Type คือ Homogenous จากนั้นกด Continue จะปรากฏ Edit Section Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ดังนี้คือ Materials คือ Plastic, Plane stress/strain thickness คือ 1

7.3.3 กำหนด Section ให้วัสดุโดยกดที่ Icon Assign Section  จากนั้น คลิกเลือกที่ Model ทั้งสอง ทำให้สีของ Model เปลี่ยนเป็นสีเขียว ดังรูปที่ 7-10 และ 7-11

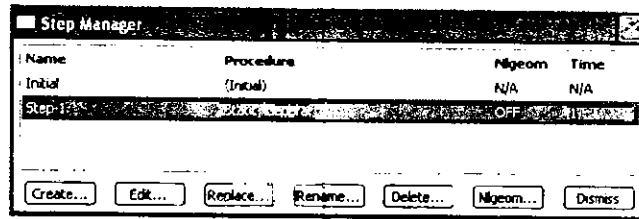


รูปที่ 7-12 แสดงรูปปีกนกและลูกหมากที่ประกอบกันเสร็จแล้ว

7.4. การประกอบ

7.4.1 การกำหนดชิ้นส่วนอินสแตนซ์ (Instance part) โดยกดที่ Icon Instance Part  จะปรากฏ Create Instance Dialog box ขึ้นมา จากนั้นเลือกค่า Parameter ต่างๆดังนี้คือ Parts: เลือกทุก Part และที่ Instance Type เลือกที่ Independent

7.4.2 จัดวางตำแหน่งของปีกนกและลูกหมากให้เป็นดังรูปที่ 7-12



รูปที่ 7-13 แสดงการสร้าง Step

7.5. การกำหนดขั้นตอน

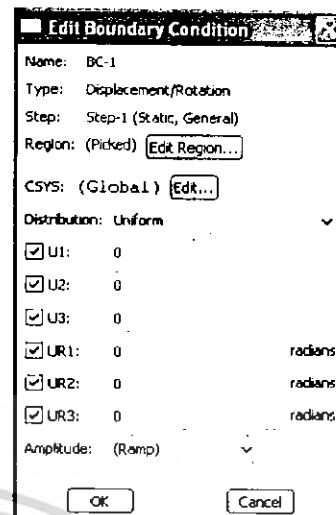
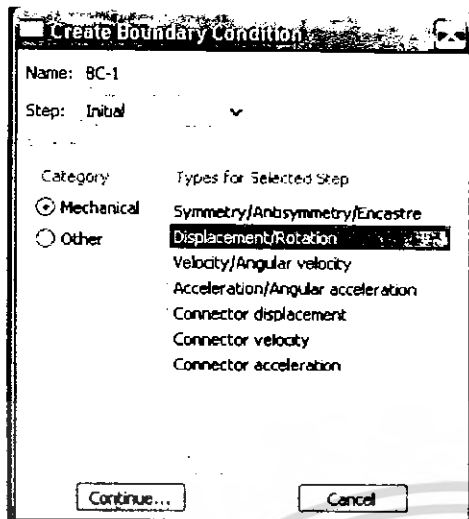
7.5.1 กำหนด Step การทำงานโดยไปที่ Module Step แล้วเลือก Create step โดยกำหนด Step เป็น Static, General และมีเพียง 1 step (ชิ้นงานจะไม่เคลื่อนที่) แล้วกด OK ดังรูปที่ 7-13



รูปที่ 7-14 แสดงการยึดปีกนกติดกับลูกหมาก

7.6 การกำหนดขอบเขต

7.6.1 ยึดทุกชิ้นเข้าด้วยกันโดยกดที่ Icon Create Constrain จะปรากฏ Create Constrain Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ต่างๆดังนี้ คือ Name : lca_sph , Type : Tie กด Continue แล้วเลือก Surface ดังรูปที่ 7-14



รูปที่ 7-15 แสดงการใส่ค่า Parameter ใน Create Boundary Condition Dialog box

รูปที่ 7-16 แสดงการใส่ค่า Parameter ใน Edit Boundary Condition

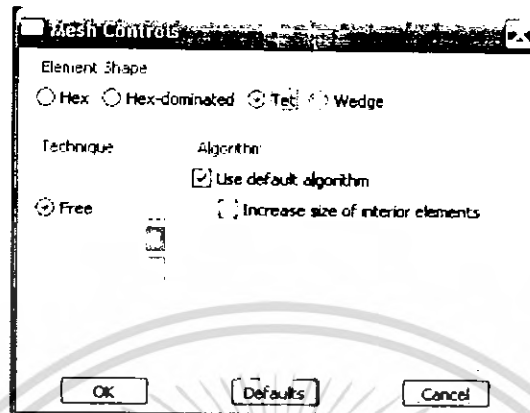


รูปที่ 7-17 แสดงการสร้าง Concentrated Force

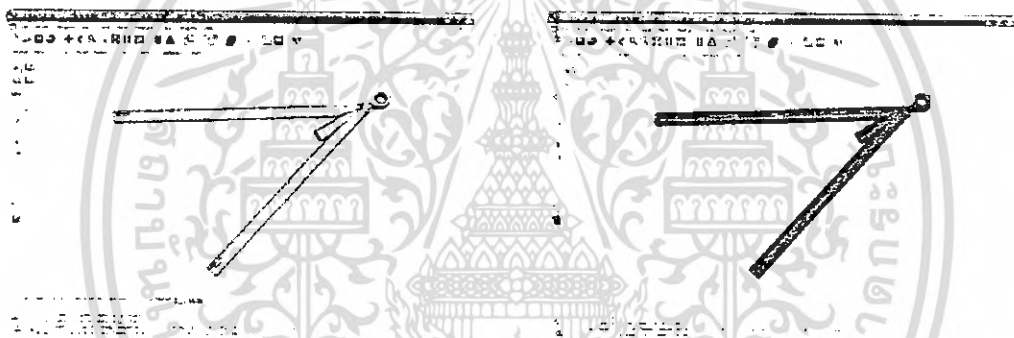
7.7. การกำหนดโหลด

7.7.1 กำหนด Boundary Condition โดยกด Icon Create Boundary Condition จะปรากฏ Create Boundary Condition Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ดังรูป 7-15 แล้วกด Continue จากนั้นเลือกที่ปลายทั้ง 2 ข้างของปีกนกจากนั้นจะปรากฏ Edit Boundary Condition จากนั้นใส่ค่า Parameter ดังรูป 7-16 เพื่อทำการยึดหูยึด 2 ข้าง ไม่ให้เคลื่อนที่และหมุนในแกนใดๆ

7.7.2 กำหนด Load ที่ถูกหมากซึ่งจะต่อกับคอกม้า โดยเลือกชนิดของโหลดเป็น Concentrated Force คลิกที่จุดเชื่อมต่อกับคอกม้า (ตรงข้ามหูขีด ทั้ง 2 ข้าง) แล้วใส่แรงตามแกนที่ได้ระบุไว้แล้วตามตารางที่ 7-1 และ 7-2 ดังรูป 7-17



รูปที่ 7-18 แสดงการเลือกชนิดของ Mesh



รูปที่ 7-19 แสดงภาพหลัง Assign mesh controls

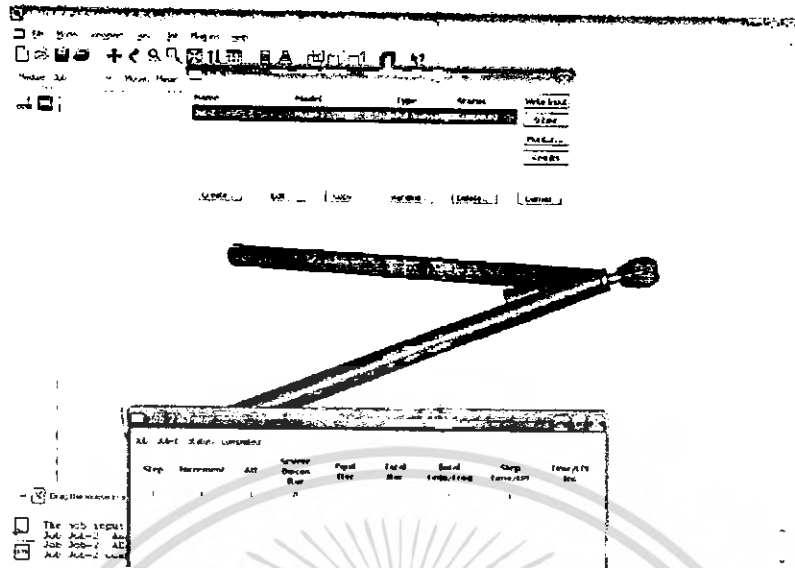
รูปที่ 7-20 แสดงรูปของปีกนกและลูกหมากเมื่อตี Mesh เสร็จแล้ว

7.8 การวิเคราะห์เมท

7.8.1 ที่ Module Mesh เป็นขั้นตอนการตี mesh แต่เนื่องจากรูปพื้นที่ส่วนมากเป็นผิวโค้งจึงทำให้ตี mesh ยาก จึงแก้ปัญหาโดยกำหนดใช้ mesh 3 เหลี่ยมในการตีแทน mesh 4 เหลี่ยมเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว เลือกชนิดของ Mesh โดยการกดที่ Icon Assign Mesh Control แล้วเลือกชนิดของ Mesh เป็นสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 7-18 แล้วทำการเลือกชิ้นที่ต้องการ แล้วกด OK แล้ว ปีกนกจะเปลี่ยนจากสี่เหลี่ยมเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 7-19

7.8.2 วาง Seed โดยกด Icon Seed Part Instant แล้วเลือกที่ Model

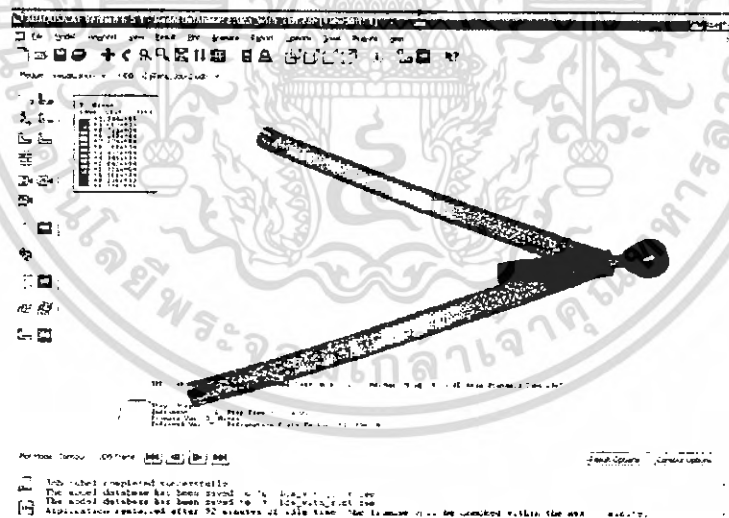
7.8.3 ตี Mesh โดยกดที่ Icon Mesh Part Instance แล้วเลือกที่ Model ก็จะได้ Mesh ดังรูปที่ 7-20



รูปที่ 7-21 แสดงภาพระหว่างรันโปรแกรม

7.9. ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

7.9.1 Create job โดยเลือกที่ Icon Create Job  ก็จะปรากฏ Create Job Dialog box ให้ใส่ Parameter ดังนี้คือ Name: job-2 จากนั้นกด Continue ก็จะปรากฏ Edit Job Dialog box ขึ้นมา ให้กด OK จากนั้นโปรแกรมก็จะทำการคำนวณดังรูปที่ 7-21

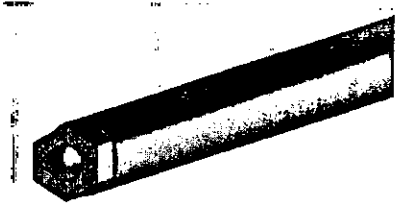


รูปที่ 7-22 แสดงผลการทดสอบจากโปรแกรมอะบาดัส

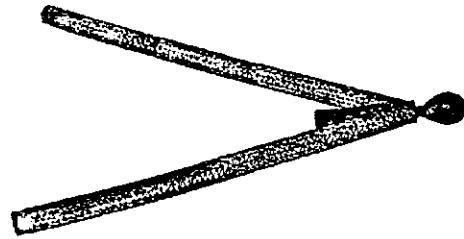
7.10. การแสดงผล

7.10.1 กดที่ Icon Plot Contours  เพื่อดูผลที่เกิดขึ้นจะได้ดังรูปที่ 7-22

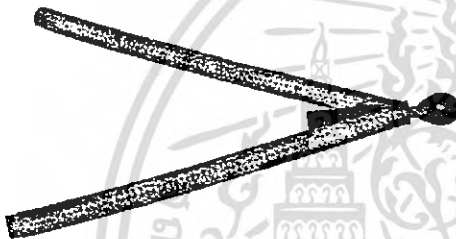
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-23 แสดงรูปของจุดยึดปีกนกกับลูกหมาก
โดยใช้น็อตตัวเมียเชื่อมต่อกับปีกนก
นิ้ว



รูปที่ 7-24 แสดงผลของความเสียหายที่
เกิดขึ้นกับปีกนกเมื่อใช้ท่อขนาด $\frac{1}{2}$
หนา 2 มม.



รูปที่ 7-25 แสดงผลของความเสียหายที่
เกิดขึ้นกับปีกนกเมื่อใช้ท่อขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว
หนา 2 มม.



รูปที่ 7-26 แสดงผลของความเสียหายที่
เกิดขึ้นกับปีกนกเมื่อใช้ท่อขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว
หนา 3 มม.



รูปที่ 7-27 แสดงรูปของจุดยึดปีกนกกับลูกหมาก
โดยใช้เหล็กตันทำเกลียวแล้วเชื่อมกับปีกนกตรง
สลีตที่บากไว้

7.11. สรุปผลการทดสอบ

จากรูปที่ 7-23 เป็นการแสดงจุดยึดปีกนกกับลูกหมากโดยใช้น็อตตัวเมียเชื่อมต่อกับปีกนกจากนั้นก็ทำการทดสอบความแข็งแรงซึ่งเหล็กท่อที่เราใช้เป็น ASTM A53 Stream pipe ซึ่งมีค่า Yield Stress



รูปที่ 7-28 แสดงผลของความเสียหายที่
เกิดขึ้นกับปีกนกเมื่อใช้ท่อขนาด
 $\frac{3}{4}$ นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 230 MPa ซึ่งในการออกแบบเราใช้ค่า Safety factor เป็น 5 เพราะปีกนกเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงกระแทกอย่างหนักอยู่ตลอดเวลา

จากรูปที่ 7-24 ถึง 7-26 จะใช้ จุดยึดปีกนกกับลูกหมากใช้น็อตตัวเมียเชื่อมต่อกับปีกนก ซึ่งเมื่อทดสอบความแข็งแรงแล้วจะได้ค่าดังนี้

จากรูปที่ 7-24 ใช้เหล็กท่อขนาดขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้วหนา 2 มม. จะได้ความเค้นวอนมีสูงสุดเป็น 202.82 MPa ดังนั้นจะได้ว่า

$$SF = \frac{230 \times 10^6}{202.82 \times 10^6} = 1.13$$

จะเห็นว่าค่า Safety factor เป็น 1.13 แสดงว่า ใช้เหล็กท่อขนาดขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้วหนา 2 มม. ไม่ได้

จากรูปที่ 7-25 ใช้เหล็กท่อขนาดขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วหนา 2 มม. จะได้ความเค้นวอนมีสูงสุดเป็น 59.43 MPa ดังนั้นจะได้ว่า

$$SF = \frac{230 \times 10^6}{59.43 \times 10^6} = 3.87$$

จะเห็นว่าค่า Safety factor เป็น 3.87 แสดงว่า ใช้เหล็กท่อขนาดขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วหนา 2 มม. ไม่ได้

จากรูปที่ 7-26 ใช้เหล็กท่อขนาดขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วหนา 3 มม. จะได้ความเค้นวอนมีสูงสุดเป็น 50.77 MPa ดังนั้นจะได้ว่า

$$SF = \frac{230 \times 10^6}{50.77 \times 10^6} = 4.53$$

จะเห็นว่าค่า Safety factor เป็น 4.53 แสดงว่า ใช้เหล็กท่อขนาดขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วหนา 3 มม. ไม่ได้

จากรูปที่ 7-27 ถึง 7-28 จะใช้จุดยึดปีกนกกับลูกหมากโดยใช้เหล็กตันทำเกลียวแล้วเชื่อมกับปีกนกตรง สล็อตที่บากไว้ ซึ่งเมื่อทดสอบความแข็งแรงแล้วจะได้ค่าดังนี้

จากรูปที่ 7-28 ใช้เหล็กท่อขนาดขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วหนา 3 มม. จะได้ความเค้นวอนมีสูงสุดเป็น 41.97 MPa ดังนั้นจะได้ว่า

$$SF = \frac{230 \times 10^6}{41.97 \times 10^6} = 5.48$$

จะเห็นว่าค่า Safety factor เป็น 5.48 แสดงว่า ใช้เหล็กท่อขนาดขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วหนา 3 มม. ได้

ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าจะต้องใช้เหล็กขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วหนา 3 มม. ในการทำปีกนกและใช้จุดจุดยึด ปีกนกกับลูกหมากดังรูปที่ 7-27

บทที่ 8

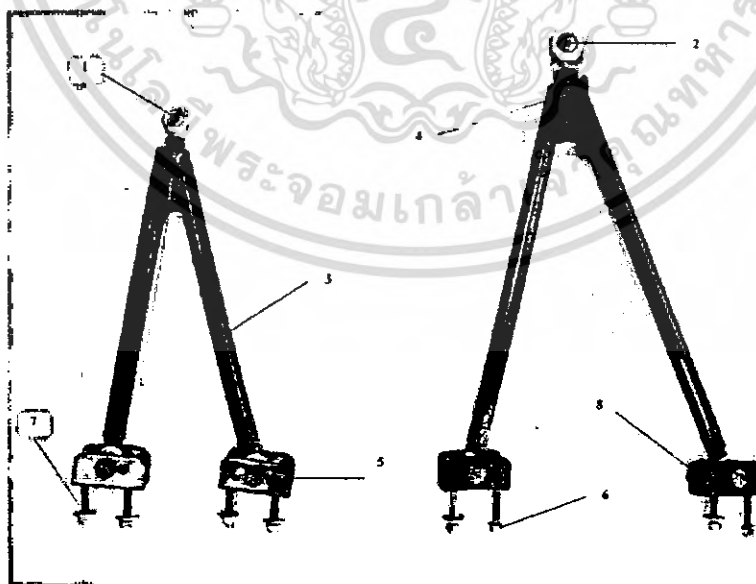
ผลงานที่เสร็จสมบูรณ์และการปรับตั้งค่า

8.1. ระบบช่วงล่าง

8.1.1 ปีกนกบนและปีกนกล่าง

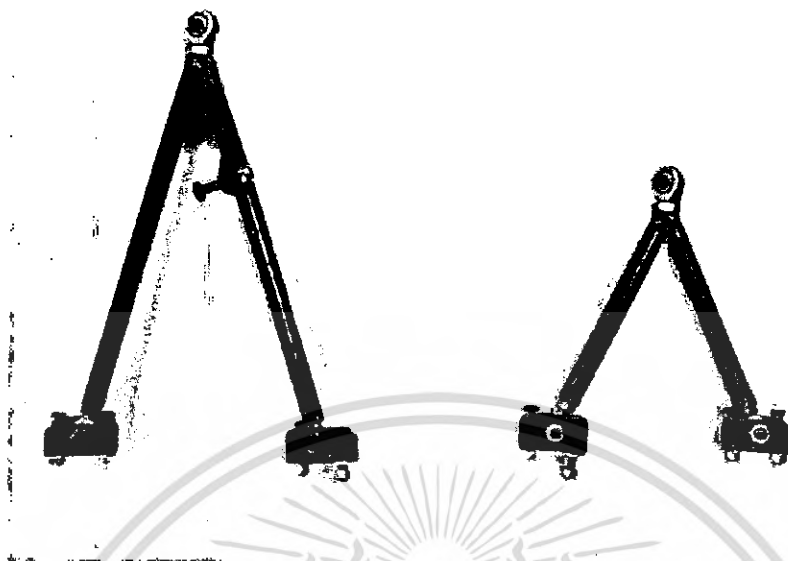
ในการสร้างปีกนกบนและปีกนกล่างทั้งด้านหน้าและด้านหลัง มีวิธีการเลือกวัสดุและกรรมวิธีการสร้างดังนี้

1. ลูกหมากตัวเมีย : ลูกหมากตัวเมียของปีกนกบนด้านหน้าเราเลือกใช้ขนาด M10
2. ลูกหมากตัวเมีย : ลูกหมากตัวเมียของปีกนกกลางด้านหน้าเราเลือกใช้ขนาด M14 เพราะรับแรงมากกว่าลูกหมากปีกนกบน
3. ท่อ : ท่อที่ใช้ทำปีกนก เป็นเหล็ก มีค่าเป็น เราเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.2mm หนา 3mm
4. ทุ๊ตก้านดัน : เราเลือกใช้เหล็ก หนา 4mm
5. นอตยึดปีกนก : เราเลือกใช้ขนาดเกลียวตลอดขนาด M10
6. นอตตัวเมีย : นอตตัวเมียที่ใช้ยึดทุ๊ตปีกนกเข้ากับโคลงใช้เป็นแบบนอตกันคลาย เพื่อป้องกันการคลายตัวในขณะขับขี่
7. นอตยึดทุ๊ตปีกนก : เราเลือกใช้ขนาด M10 เกลียวไม่ตลอด
8. ทุ๊ตปีกนก : ทำจากเหล็กกล่องขนาด 1.5 นิ้ว
9. กรรมวิธีการเชื่อม : เราใช้การเชื่อมอาร์กอนในการเชื่อมชิ้นส่วนของปีกนกเข้าด้วยกัน เนื่องจากกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กอนสามารถควบคุมแนวรอยเชื่อมได้ดี



รูปที่ 8-1 ปีกนกด้านหน้า

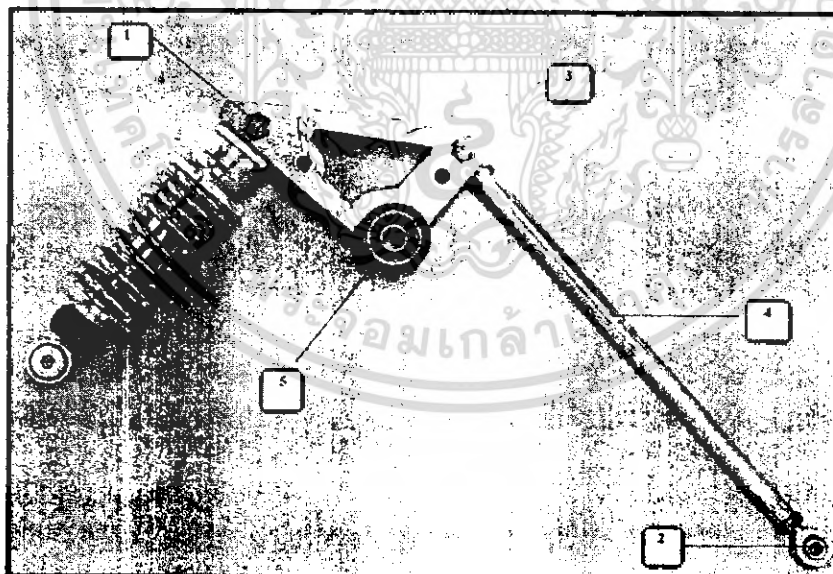
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-2 ปีกนกด้านหลัง

8.1.2 ก้านคั่น และ สามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง

ก้านคั่นและสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรงเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงจากล้อมายัง โช๊ค ซึ่งวัสดุที่ใช้และกรรมวิธีในการสร้างมีดังนี้



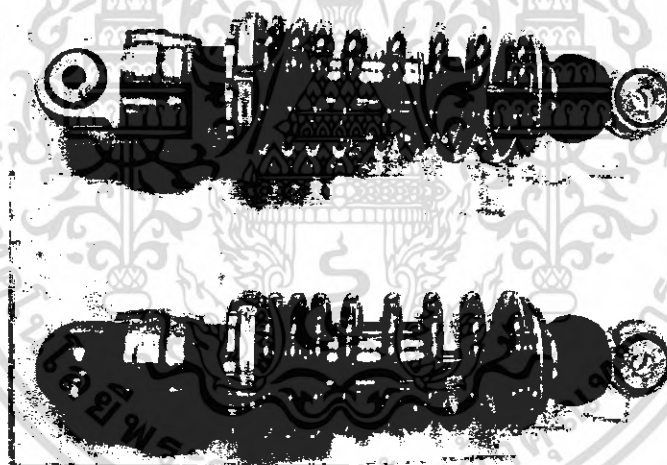
รูปที่ 8-3 ก้านคั่นและสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. นอตยึดหูโซ้ค : นอตยึดหูโซ้คเราเลือกใช้นอตค่าขนาด M10
2. ลูกหมากตัวเมีย : ใช้ลูกหมากตัวเมียขนาด M10 ยึดที่ปลายของก้านคัน
3. สามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง : ทำจากเหล็กแผ่นหนา 4mm ตัดด้วยแก๊สอะเซทิลีน
4. ก้านคัน : เราใช้ลูมิเนียม 6061 T6 ในการสร้างก้านคัน เพื่อต้องการลดน้ำหนักเหนือสปริง
5. บุช : เราใช้บุชที่ใช้ยึดหูโซ้ครถยนต์เพราะขนาดความกว้างและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูยึดนอต อีกทั้งบุชยังเป็นมุมเอียงเพื่อให้เราสามารถสวมอัดเข้าไปในสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรงได้ด้วยไฮดรอลิก
6. กรรมวิธีการเชื่อม : ในการเชื่อมสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง เราใช้กรรมวิธีลวดเชื่อมอาร์กอน เพื่อต้องการควบคุมแนวรอยเชื่อมให้สม่ำเสมอ

8.1.3 โซ้คและแฉิมเปอร์

โซ้คและแฉิมเปอร์ที่ใช้ เราเลือกค่าคงที่สปริงจากการทดสอบในบท Ride analysis ซึ่งทางทีม Initial 3 ของเราได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท YSS ประเทศไทย จำกัด โดยได้รับความอนุเคราะห์จัดหาโซ้คและแฉิมเปอร์ที่มีค่าคงที่สปริงในช่วงที่เราต้องการ โดยมีค่าคงที่สปริงทั้งด้านหน้าและด้านหลังอยู่ในช่วง 30-50 N/mm ดังรูปที่ 8-4

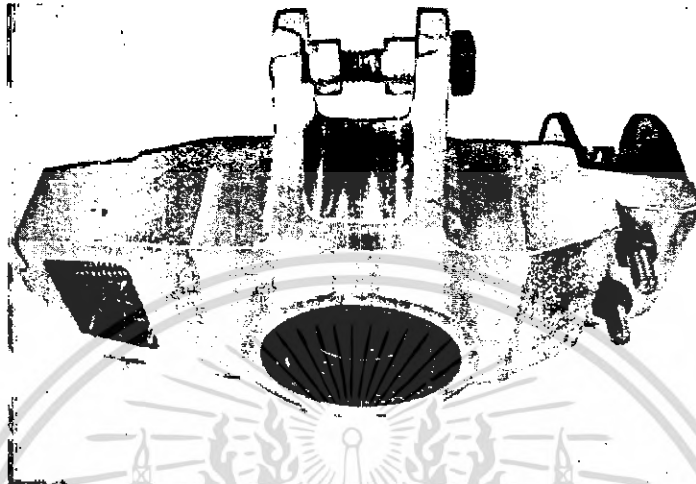


รูปที่ 8-4 โซ้คและแฉิมเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1.4 คอม่้า

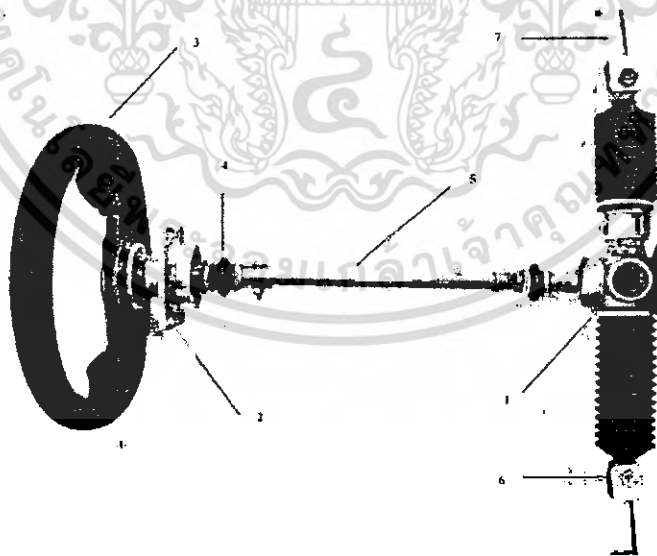
คอม่้าทำจากอลูมิเนียมเกรด 5083 ผลิตด้วยกรรมวิธี การกัด(Milling) ดังแบบที่ ในภาคผนวก



รูปที่ 8-5 คอม่้า

8.1.5 ระบบบังคับลิ้ว

ระบบบังคับลิ้วที่เลือกใช้เป็นแบบใช้กระดูกงูมาลัย ดังนี้



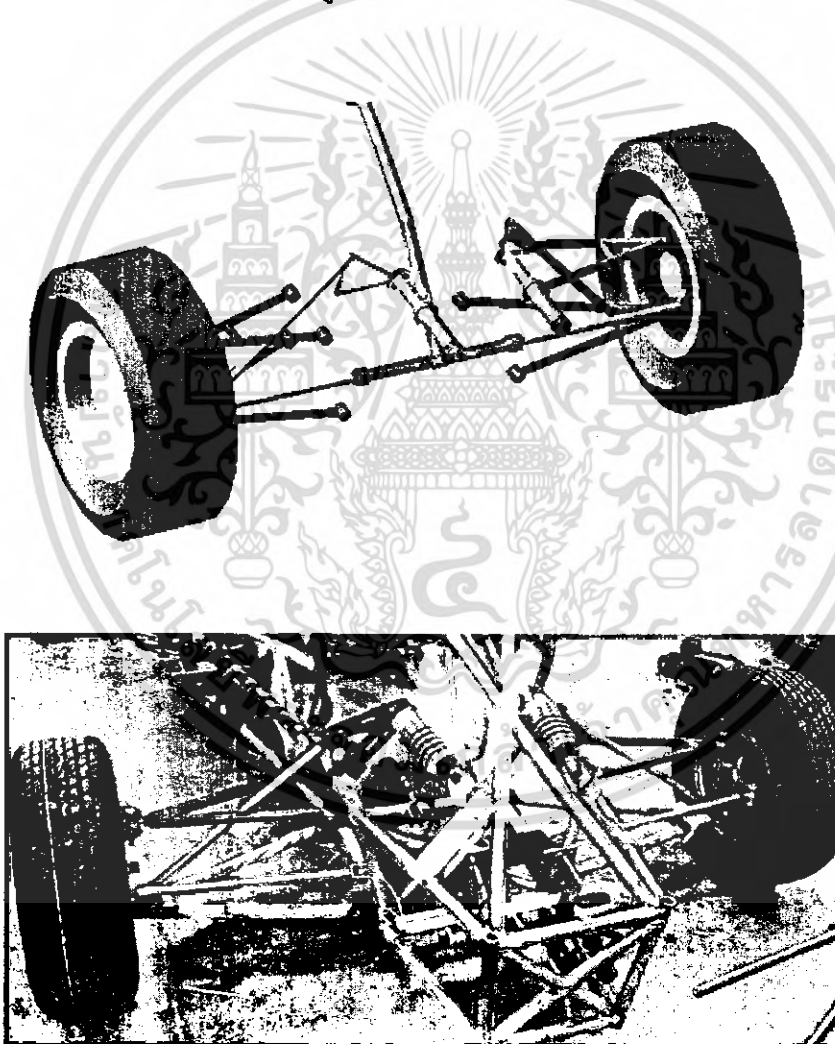
รูปที่ 8-6 ระบบบังคับลิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระปุกพวงมาลัย : เลือกใช้แบบ Rack and Pinion อัตราทด
2. หน้าแปลนพวงมาลัย : ทำจากอลูมิเนียมแผ่น เกรด 6061 T6
3. พวงมาลัย : เป็นแบบ 3 ก้าน
4. ซ้ออ่อน :
5. ก้านต่อพวงมาลัย : ทำจากอลูมิเนียม เกรด 6061 T6 เพื่อลดน้ำหนัก
6. ลูกหมากตัวเมีย : เลือกใช้ขนาด M10
7. คันชัก : ทำจากอลูมิเนียม เกรด 6061 T6 เพื่อลดน้ำหนัก

8.1.6 ระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวที่สมบูรณ์

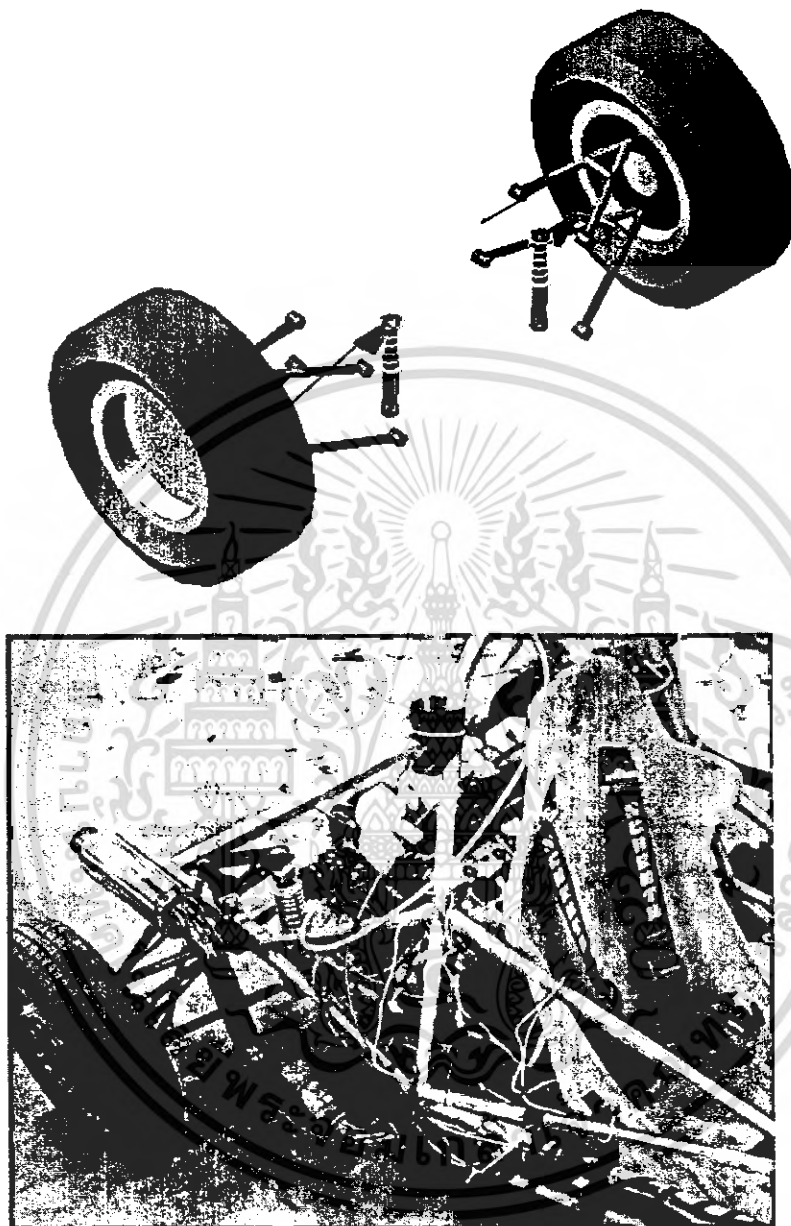
- ระบบช่วงล่างด้านหน้าที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 8-7 ระบบช่วงล่างด้านหน้าที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

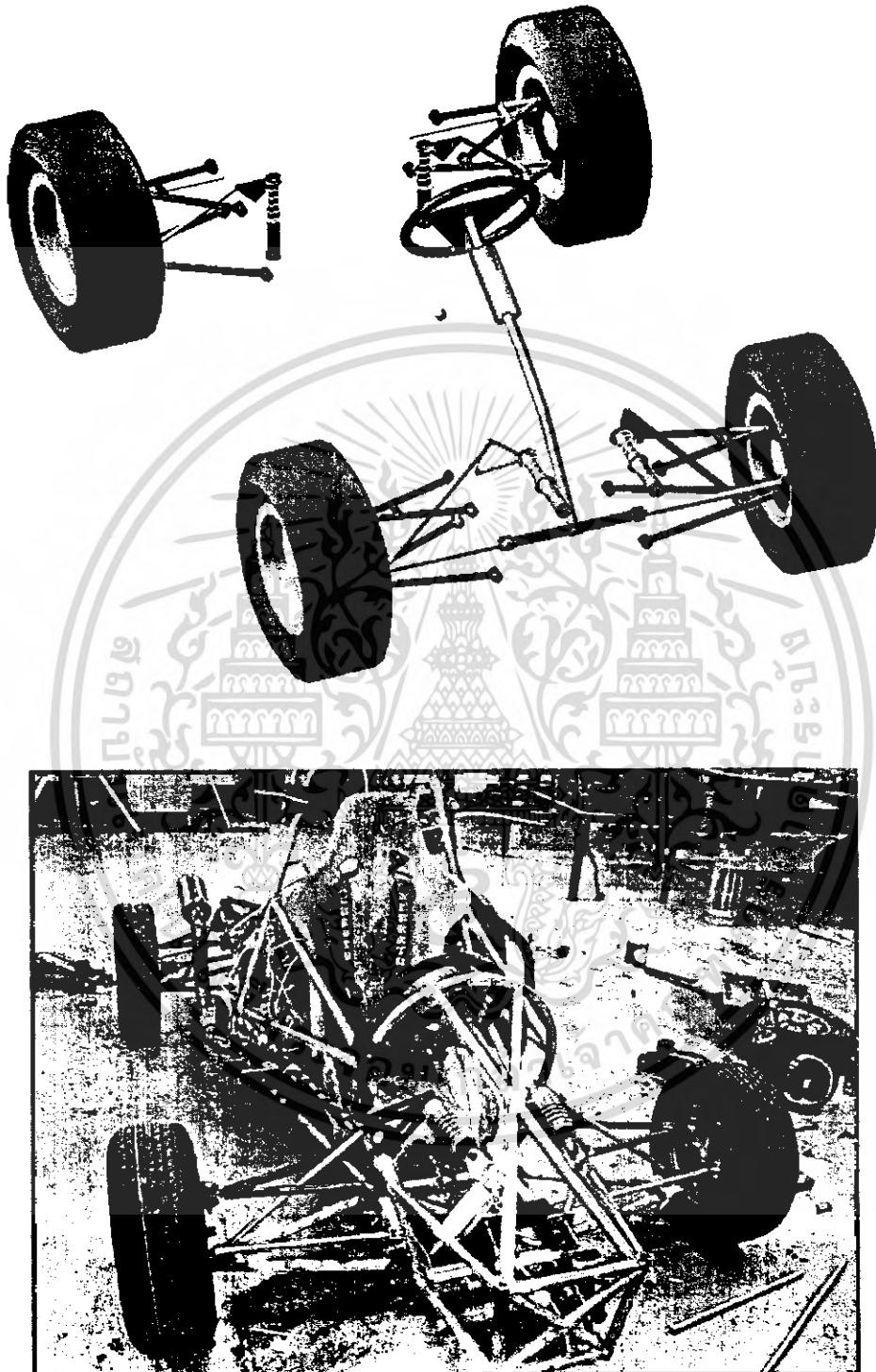
- ระบบช่วงล่างด้านหลังที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 8-8 ระบบช่วงล่างด้านหลังที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวที่เสร็จสมบูรณ์

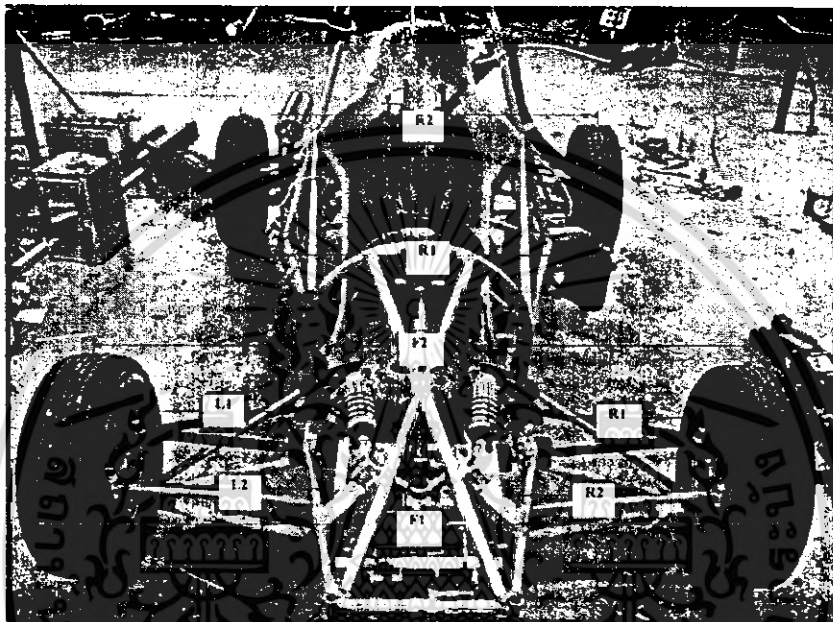


รูปที่ 8-9 ระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวที่เสร็จสมบูรณ์

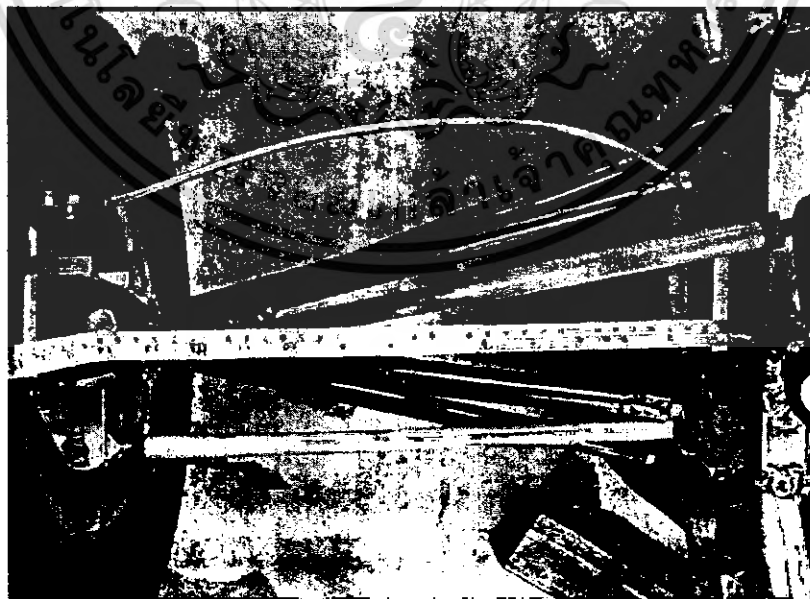
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 การปรับตั้งค่ามุมล้อและการทดสอบ

หลังจากที่เราสร้างชิ้นส่วนตามที่เราได้ออกแบบไว้ เราก็จะทำการตั้งค่ามุมล้อตามที่เราได้ออกแบบไว้ และทำการทดสอบผลของมุมล้อค่าต่างๆว่ามีผลต่อการจับขี้นและการควบคุมตามผลที่ได้จากโปรแกรม อัดัมส์หรือไม่อย่างไร โดยเราได้กำหนดค่ามุมล้อไว้ที่ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 8-1 และ 8-2 แล้วทำการทดสอบจับจริง ดังนี้

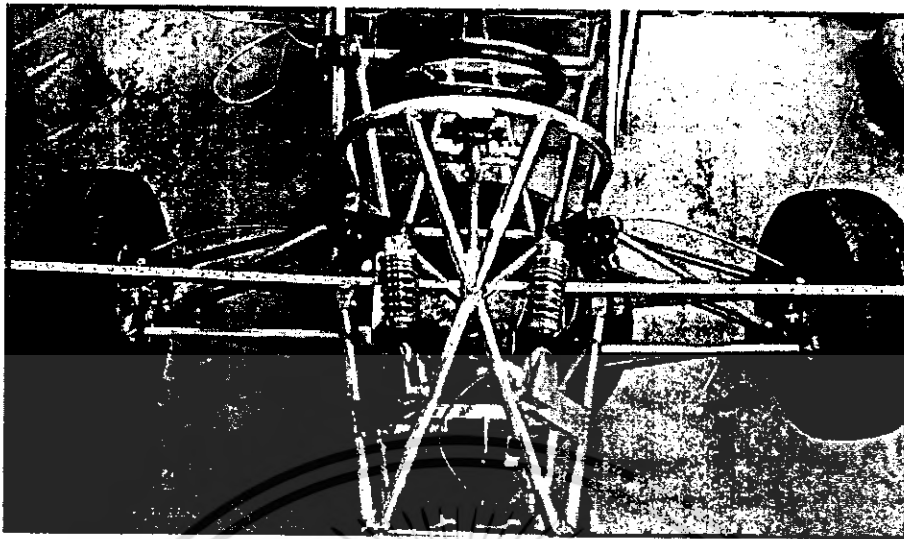


รูปที่ 8-10 แสดงระยะที่ใช้สำหรับการตั้งค่ามุมล้อ



รูปที่ 8-11 แสดงการวัดระยะสำหรับตั้งค่ามุมแคมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-12 แสดงการวัดระยะความกว้างล้อหน้า(Track)

โดยในการตั้งค่านุมล้อเพื่อทดสอบผลโดยการขับซึ่งจริง เราได้ทำการทดสอบตามตารางทดสอบ ดังนี้

Camber Angle

	L1	L2	R1	R2	CL	CR
1	360	460	360	460	0	0
2	362	460	362	460	0.57	0.57
3	364	460	364	460	1.14	1.14
4	368	460	368	460	2.29	2.29

ตารางที่ 8-1 ตารางแสดงการตั้งค่านุมแคมเบอร์เพื่อทดสอบจริง

Toe

	F1	F2	R1	R2	Front		Rear	
					Toe in	Toe out	Toe in	Toe out
1	1400	1400	1350	1350	-	-	-	-
2	1400	1405	1350	1350	5	-	-	-
3	1400	1410	1350	1350	10	-	-	-
4	1405	1400	1350	1350	-	5	-	-
5	1410	1400	1350	1350	-	10	-	-
6	1400	1400	1350	1355	-	-	5	-
7	1400	1400	1350	1360	-	-	10	-
8	1400	1405	1350	1360	5	-	10	-

ตารางที่ 8-2 ตารางแสดงการตั้งค่าระยะโทเพื่อทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 ผลการทดสอบโดยการจับจริง

ในการทดสอบผลของมุมล้อยค่าต่างๆที่มีผลต่อการจับซี่ เราจะทำการทดสอบ โดยการจับซี่ในสภาวะเดิม แต่มีการตั้งค่ามุมล้อยตามที่ได้แสดงไว้ในตาราง เพื่อหาค่ามุมล้อยที่ให้เสถียรภาพในการควบคุมที่ดีที่สุดและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม อคัมส์ ซึ่งจากการทดสอบจับซี่เราพบว่า

1. ที่มุมแคมเบอร์ +0.57 ทั้งด้านซ้ายและขวาของล้อหน้าให้ความรู้สึกการควบคุมที่ดีที่สุด และพวงมาลัยค่อนข้างนิ่งในขณะขับทางตรง และในขณะเข้าโค้งที่ความเร็วสูงขึ้นพวงมาลัยก็ยังตอบสนองได้ค่อนข้างดี ทั้งนี้ก็เพราะ มุมแคมเบอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มาก ส่วนที่ในการทดสอบที่มุมแคมเบอร์เป็น 1.14 องศา ทั้งสองข้างพบว่าในขณะวิ่งทางตรงล้อวิ่งเบนออกนอกทิศทางมากขึ้น

2. ระยะโทของล้อหน้ามีค่าเป็น โท-อิน 5mm และระยะโทล้อหลังเป็นโท-อิน 10mm เพราะหากเราตั้งค่าโทเป็นบวกมากกว่านี้จะทำให้เกิดการเบียดตัวของยางจนรู้สึกได้ในขณะจับซี่ และหากเราตั้งค่าโทล้อหน้าเป็นโทเอท ก็จะทำให้ยางวิ่งออกจากแนวเส้นตรง ซึ่งจะรู้สึกได้อย่างชัดเจนในขณะวิ่งทางตรง เนื่องจากผลของแรงขับจากล้อหลัง ส่วนระยะโทของล้อหลังมีค่าเป็น โท-อิน 10mm เพื่อชดเชยแรงขับของล้อหลังที่จะดันให้ล้อเคลื่อนตัวออกจากกัน



บทที่ 9 บทสรุปและวิจารณ์

9.1 สรุปผล

9.1.1 ในการออกแบบระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวของรถแข่ง ผู้ออกแบบได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวทั้งในด้านความมีเสถียรภาพและความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่างๆ โดยความมีเสถียรภาพและความง่ายต่อการควบคุมมีผลมาจากตัวแปรเหล่านี้คือ มุมแคมเบอร์, จุดศูนย์กลางการโคลง, การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ และระยะโท โดยเราได้ทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรเหล่านี้และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยการจำลองการเคลื่อนที่ในสภาวะต่างๆ

9.1.2 โปรแกรม MSC. ADAMS เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว เป็นโปรแกรมที่ใช้งานได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับลักษณะในการออกแบบและการควบคุมตัวแปรของผู้ออกแบบ ซึ่งวิธีการใช้โปรแกรมในการออกแบบและการจำลองการเคลื่อนที่ได้ทำการศึกษาไว้แล้วในบท Suspension simulation

9.1.3 โปรแกรม ABAQUS เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่าง โดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมอะบาคัสได้แสดงไว้ในบท

9.1.4 การหาค่า k ของสปริงสามารถทำได้โดยวิธีจำลองการสั่นของระบบช่วงล่างเป็นการสั่นแบบอิสระ โดยใช้ทฤษฎีของวิชา Vibration โดยให้ความถี่ธรรมชาติของการสั่นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับรถแข่งแล้วจึงใช้โปรแกรม MSC.ADAMS ช่วยในการหาค่า k เมื่อได้ค่า k ของสปริงแล้วจึงนำมาคำนวณต่อโดยใช้ทฤษฎีความเสียหายตรวจสอบว่าสปริงที่ออกแบบนั้นรับแรงได้เพียงพอต่อความต้องการหรือไม่ โดยค่า k ที่ใช้กับระบบช่วงล่างได้แสดงไว้แล้วตามตารางที่

9.1.5 จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของระบบช่วงล่างในหัวข้อ 4.4 นั้นทำให้สามารถพิสูจน์ได้ว่าระบบช่วงล่างชนิดปีกนกคู่สามารถควบคุมมุมแคมเบอร์ ได้ดีกว่าระบบช่วงล่างชนิดแมคเฟอร์สันสตรัท ซึ่งตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

9.2 วิจารณ์ผล

กรรมวิธีในการออกแบบระบบช่วงล่างด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น อาจเกิดความคลาดเคลื่อน (Error) ในการออกแบบได้ เพราะในการกำหนดพิกัดต่างๆ, ชนิดของวัสดุที่ใช้ หรือ แรงที่เกิดขึ้นอาจจะผิดพลาดไปจากความจริง ทำให้ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม MSC.ADAMS และ ABAQUS นั้นอาจจะคลาดเคลื่อนได้ หรือ อาจต้องมีการปรับเปลี่ยนแบบที่ได้สร้างไว้ เพราะอาจจะเกิดการติดขัดในขณะติดตั้งหรือไม่เข้ากันกับระบบอื่น เช่น ระบบขับเคลื่อน เป็นต้น ซึ่งเราก็ได้ทำการทดสอบด้วยการขับซึ่งจริง เพื่อผลเปรียบเทียบกับที่จำลองในโปรแกรม

9.3 ปัญหาที่พบในการทำโครงการ

ปัญหาที่พบในการทำโครงการ การออกแบบระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว มีดังนี้

9.3.1. ปัญหาที่เกิดจากน้ำหนักได้สปริง(Spring Mass)ที่กระทำตรงตำแหน่งของช่วงล่างด้านหน้าและด้านหลังเพราะในการคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง ของ Spring Mass นั้นตำแหน่งของ cg อาจมีการคลาดเคลื่อนได้เพราะว่าการออกแบบการวางตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆบนรถ ตัวอย่างเช่น ตำแหน่งเครื่องยนต์ คนนั่ง เป็นต้น อาจจะมีการคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริงเพราะว่าในการติดตั้งชิ้นส่วนต่างๆบนรถนั้นย่อมมีปัญหาในด้านพื้นที่ ที่มีค่อนข้างจำกัด เพราะต้องการลดน้ำหนัก และแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ให้ได้มากที่สุด ทำให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงอาจมีการเคลื่อนจากตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ จึงส่งผลแรงของน้ำหนักได้สปริง(Spring mass) ที่กระทำตรงตำแหน่งของช่วงล่างด้านหน้าและด้านหลังนั้นอาจคลาดเคลื่อนไปจากที่ได้ออกแบบไว้ได้ ซึ่งอาจทำให้ผลการทดสอบจริงไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่วิเคราะห์จากการจำลองใน โปรแกรม

9.3.2. ปัญหาของแบบจำลองระบบช่วงล่างในโปรแกรม MSC.ADAMS เกิดความคลาดเคลื่อนจากระบบที่สร้างจริงไปเล็กน้อย เนื่องมาจากรูปแบบชิ้นส่วนของจริงที่สร้างขึ้นกับรูปแบบชิ้นส่วนของระบบช่วงล่างที่จำลองในโปรแกรม MSC.ADAMS นั้นอาจจะมีข้อแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งอาจส่งผลต่อผลตัวแปรที่เราสนใจ ทั้งในด้านการวิเคราะห์ด้าน คินเนมาติก และ พลศาสตร์

9.3.3. ปัญหาจากการทำงานร่วมกันกับกลุ่มเฟรม กลุ่มเครื่องยนต์ โดยปัญหาที่พบมีดังนี้

กลุ่มโครงการเฟรม : ทีมงานเฟรมเป็นกลุ่มที่ริเริ่มการออกแบบขนาดของรถ ซึ่งในการออกแบบเฟรมจะเน้นไปทางด้านความปลอดภัย เมื่อรถถูกแรงกระทำในกรณีต่างๆ ในขณะเดียวกันก็ต้องออกแบบโครงสร้างให้มีขนาดเล็กเพื่อลดน้ำหนัก จึงทำให้เนื้อที่ในการติดตั้งระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว มีค่อนข้างจำกัด เราจึงไม่สามารถออกแบบรูปแบบของระบบได้อย่างหลากหลาย และในการสร้างชิ้นงานบางครั้งต้องเสียเวลาปรับแก้เป็นสัปดาห์เนื่องจากติดปัญหาเรื่องโครงสร้าง

กลุ่มเครื่องยนต์ : การวางตัวของเครื่องยนต์และชุดส่งกำลังก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวางตัวของระบบช่วงล่าง ซึ่งในการติดตั้ง โช้คและแคมเปอร์เร ก็ต้องพิจารณาให้ดี ในตอนที่กลุ่มเครื่องยนต์ออกแบบท่อไอเสีย เพื่อระยะให้กับแกว่งโช้คไม่มากนัก ซึ่งก็ทำให้มีข้อจำกัดในการวางโช้คอยู่พอสมควร อีกทั้งระบบส่งกำลังทางด้านท้าย ก็เป็นอุปสรรคในการออกแบบตัวกันดั้มค่อนข้างมาก

9.3.4 ปัญหาเรื่องอุปกรณ์ในการทำเวิร์คช็อปสูญหายบ่อยครั้ง : การใช้งานอุปกรณ์ใน ช้อปบางครั้งต้องใช้กันหลายคน แล้วในขณะที่นำมาเก็บไม่นำไปวางไว้ที่เดิมทำให้เกิดการสูญหายขึ้น

9.3.5 ปัญหาเรื่องวัสดุและอุปกรณ์ในท้องตลาดไม่ตรงกับความต้องการ : เช่น ต้องการกระปุกพวงมาลัยอัตราทดไม่มาก และมีขนาดเล็กสามารถใส่กับรถขนาดนี้ได้ ก็ค่อนข้างหาได้ยาก ถึงหาที่ขนาดต้องการได้ แต่อัตราทอก็อาจจะไม่ใช่ที่เราต้องการ

9.3.6 ปัญหาเรื่องเวลา และจำนวนคน : กลุ่มโครงการระบบช่วงล่างและบังคับเลี้ยวมีสมาชิกอยู่เพียงสองคนทำให้การทำงานต้องดำเนินการเองทั้งหมด กล่าวคือ ต้องทำการออกแบบและจัดสร้างชิ้นงานในเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นงานที่หนักและต้องใช้เวลาทำให้งานเดินไปด้วยความล่าช้า

9.4 แนวทางแก้ไข

เรียงตามปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

9.4.1. ในขั้นตอนการกำหนดขนาดรถและตำแหน่งการวางอุปกรณ์ต่างๆควรมีการประชุมให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกัน ไม่เช่นนั้นจะเป็นการทำงานที่ไปกันคนละทิศทางต้องคอยแก้ปัญหาอยู่บ่อยๆ

9.4.2. ในการออกแบบระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่มีความละเอียดอ่อนค่อนข้างมาก ทำให้การศึกษาย่างละเอียดถี่ถ้วนเป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยเวลาที่มีน้อย และพื้นฐานความรู้ด้านนี้ก็มีไม่มาก จึงต้องใช้เวลาในการศึกษาพร้อมไปกับการสร้างชิ้นงาน ซึ่งก็อาจเกิดการผิดพลาดได้

9.4.3 ควรจัดการประชุมทุกสัปดาห์ เพื่อจะได้ทราบถึงรายละเอียดปลีกย่อยของแต่ละฝ่ายต้องการและทำการปรับแก้ให้เข้ากัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael Blundell, Damain Harty Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics . ELSEVIER 2004
- [2] Maurice Olley Chassis Design Principle and Analysis. Professional Engineering Publishing
- [3] Thomas D. Gillespie Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers Inc.
- [4] William F. Milliken, Douglas L. Milliken Race Car Vehicle Dynamics Society of Automotive Engineers
- [5] Donald Bastow, Geoffrey Howard, John P. Whitehead Car Suspension and Handling. Professional Engineering Publishing
- [6] Prof.Dipl.-Ing.Jornsen Reimpell The Automotive Chassis Engineering Principle. ARNOLD
- [7] อัมพร ภักดีชาติ, เกษม ประพฤทธิ์ธรรม,คำเนิง สาขากร บุญทัน สมนึก เครื่องล่างรถยนต์. อมรินทร์พริ้นติ้ง
- [8] James D.halderman,Automotive Technology Principle and Service 2ndEdition,2003
- [9] J Reimpell & H Stoll,The Automotive Chasis Engineerig Principles,English Edition,1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

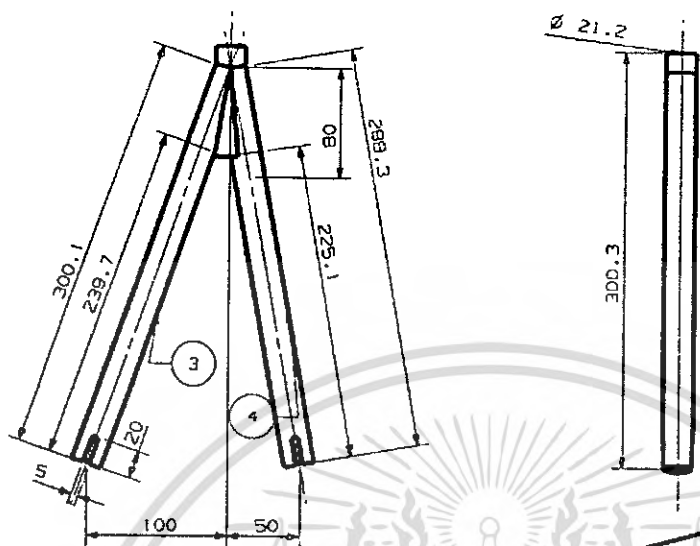


ภาคผนวก ก

แบบชิ้นส่วนต่างๆ

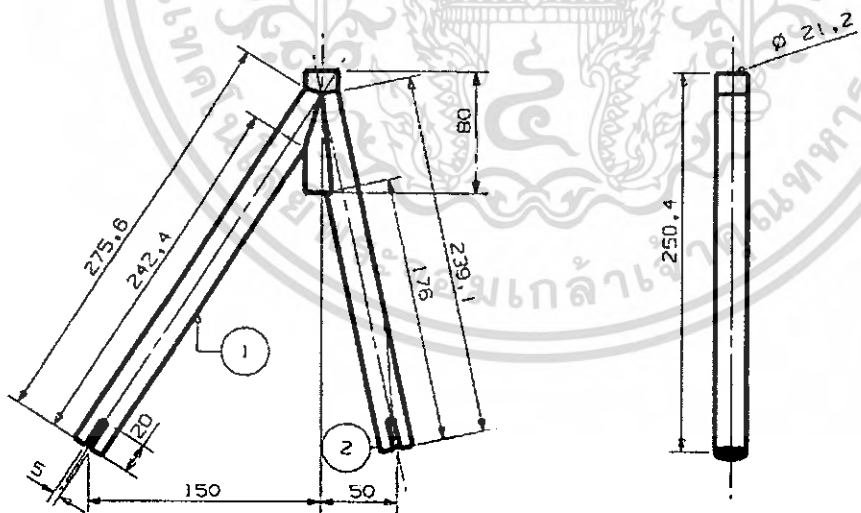
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปีกนกบนด้านหน้า



Front Upper control arm
2 Pieces

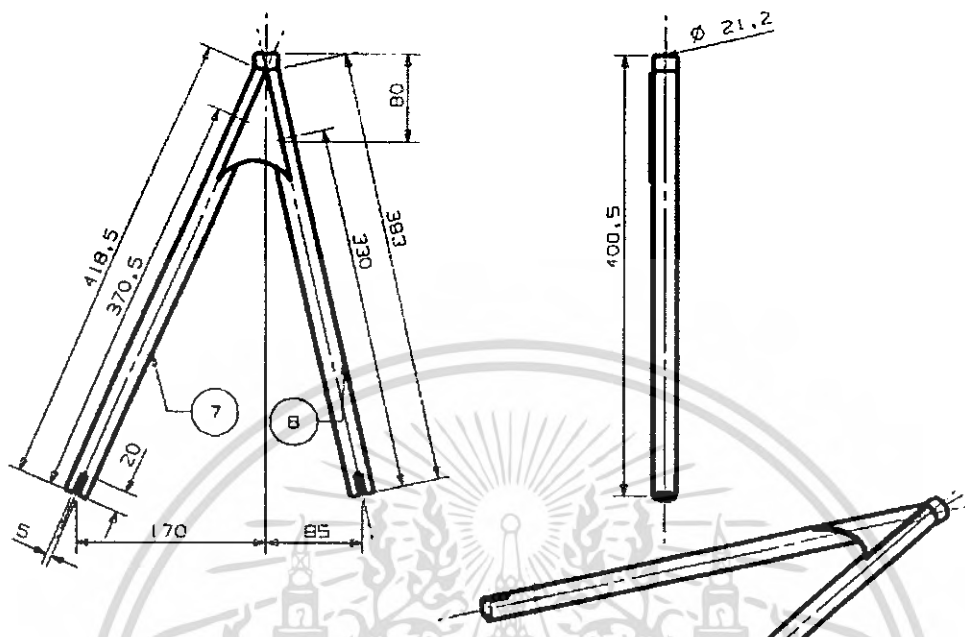
2. ปีกนกบนด้านหลัง



Rear Upper control arm
2 Pieces

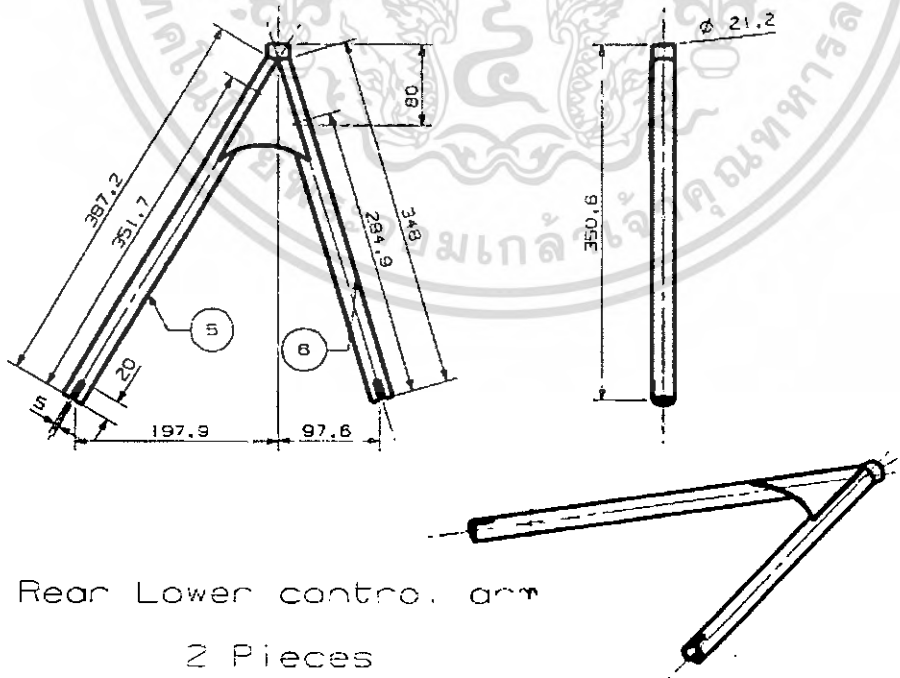
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปีกนกลางด้านหน้า



Front Lower control arm
2 Pieces

4. ปีกนกลางด้านหลัง



Rear Lower control arm
2 Pieces

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เพลตรองปีกนกข้างหน้า

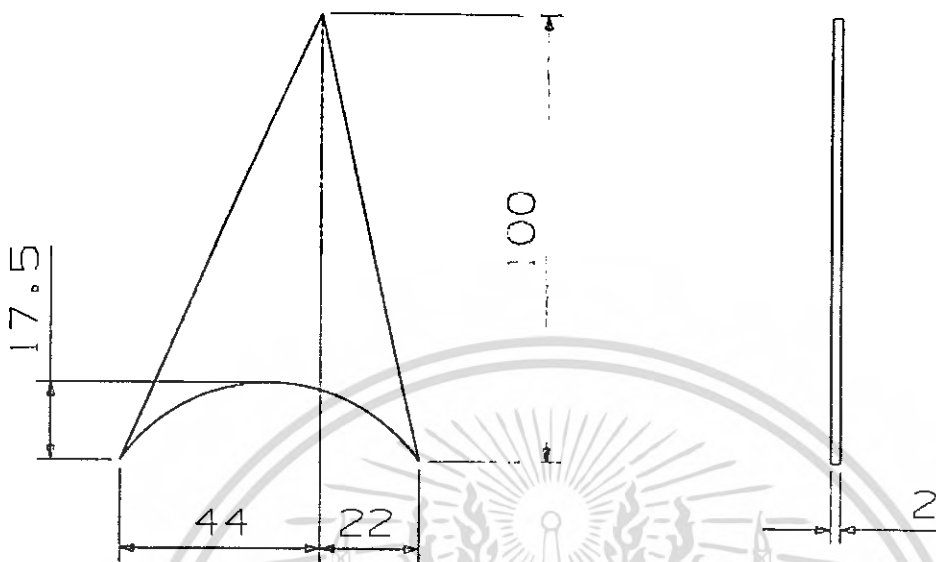


Plate of Front Lower control arm

6. เพลตรองปีกนกหลัง

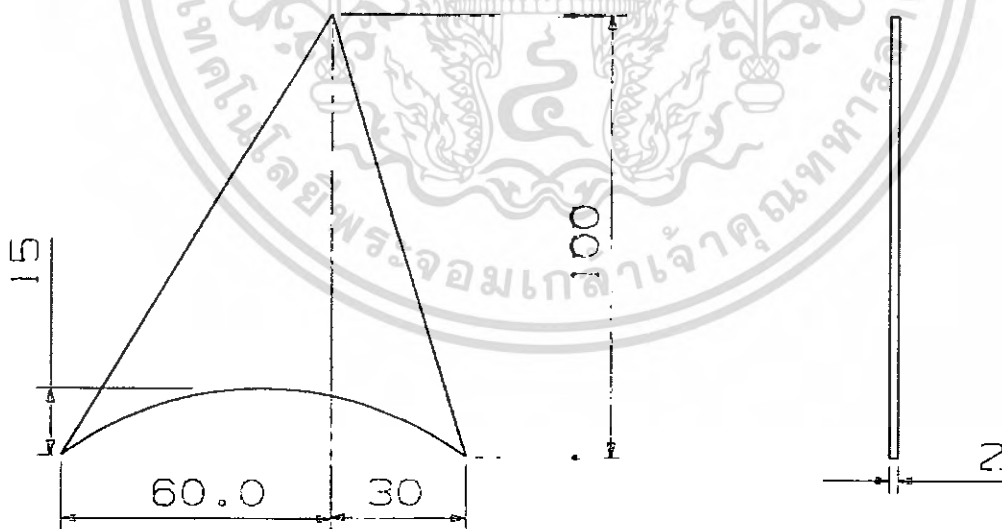
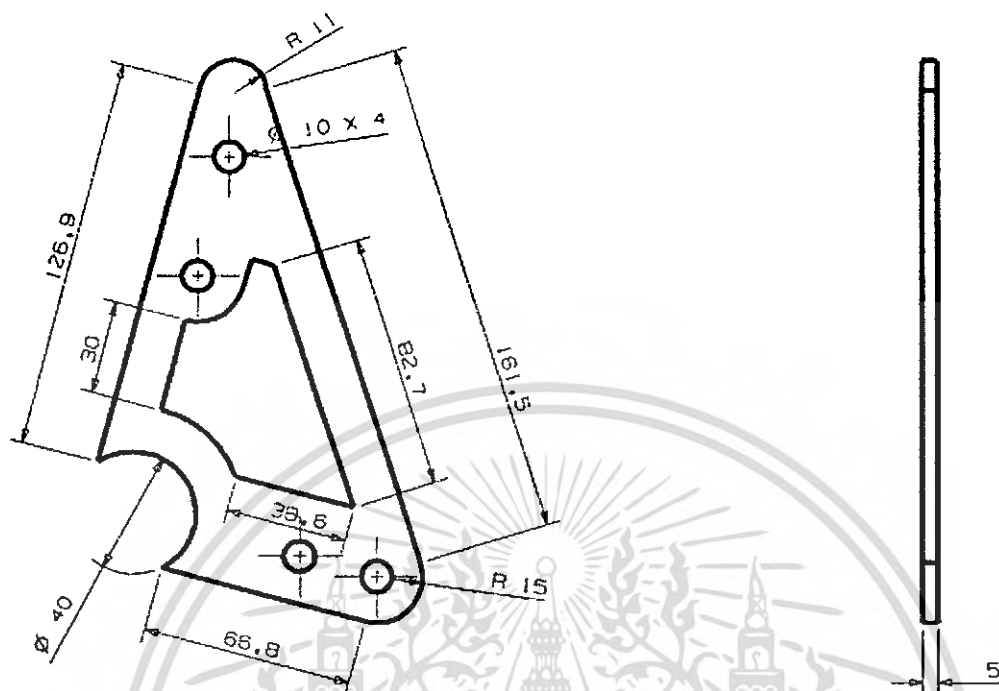


Plate of Rear Lower control arm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ตัวเปลี่ยนแกน



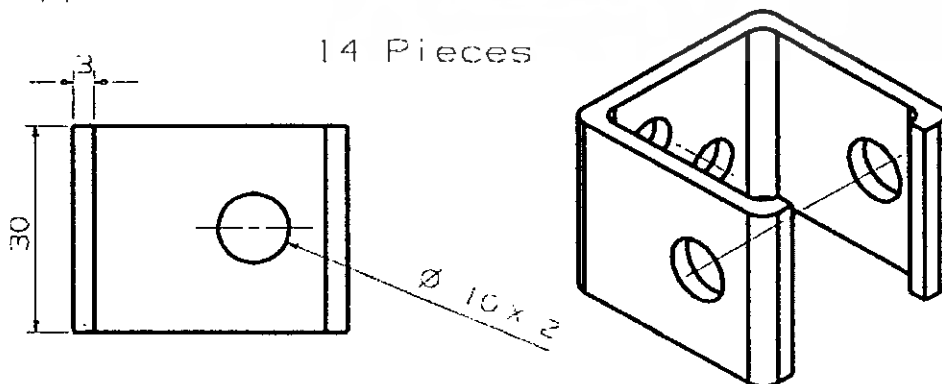
Rocker arm
8 Pieces

8. ตัวเชื่อมปีกนกกับเฟรมด้านหน้า



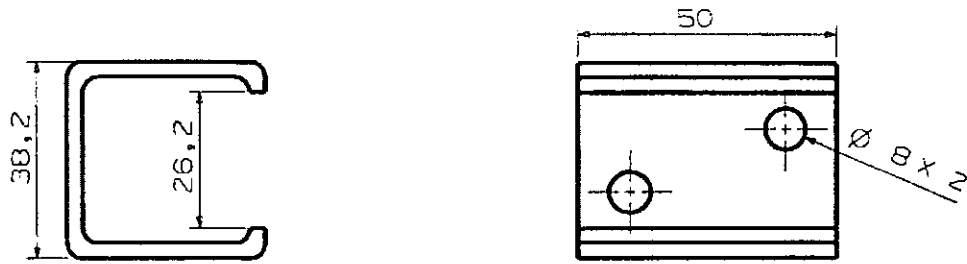
Upper & Lower Front Control Arm connecting

14 Pieces

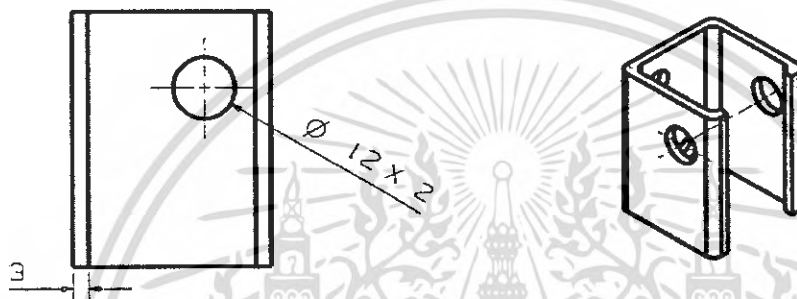


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ตัวเชื่อมปีกนกกับเฟรมด้านหลัง



Lower Rear Control Arm connecting
2 Pieces





ภาคผนวก ข

ราคาของชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ราคาของชิ้นส่วนต่างๆ

1.1 ปีกนกบนด้านหน้า

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา(บาท)	หมายเหตุ
1	เหล็กท่อ	$\phi 3/4$ " หน้า 3 mm	1.176 เมตร	55 บาท/เมตร	66	
2	เหล็กเพลลา	$\Phi 22$ mm	0.16 เมตร	135 บาท/เมตร	22	
3	เหล็กเพลลา	$\Phi 16$ mm	0.12 เมตร	67 บาท/เมตร	8	
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ mm	6 ตัว	170/ตัว	1020	
5	เหล็กกล่อง	$1\frac{1}{2}$ " หน้า 3 mm	0.12 เมตร	184 บาท/เมตร	23	
				รวม	1139	

1.2 ปีกนกบนด้านหลัง

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา(บาท)	หมายเหตุ
1	เหล็กท่อ	$\phi 3/4$ " หน้า 3 mm	1.03 เมตร	55 บาท/เมตร	58	
2	เหล็กเพลลา	$\Phi 22$ mm	0.16 เมตร	135 บาท/เมตร	22	
3	เหล็กเพลลา	$\Phi 16$ mm	0.12 เมตร	67 บาท/เมตร	8	
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ mm	6 ตัว	170/ตัว	1020	
5	เหล็กกล่อง	$1\frac{1}{2}$ " หน้า 3 mm	0.12 เมตร	184 บาท/เมตร	23	
				รวม	1131	

1.3 ปีกนกกลางด้านหน้า

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา(บาท)	หมายเหตุ
1	เหล็กท่อ	$\phi 3/4$ " หน้า 3 mm	1.622 เมตร	55 บาท/เมตร	90	
2	เหล็กเพลลา	$\Phi 22$ mm	0.16 เมตร	135 บาท/เมตร	22	
3	เหล็กเพลลา	$\Phi 16$ mm	0.12 เมตร	67 บาท/เมตร	8	
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ mm	4 ตัว	170/ตัว	680	
5	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 14$ mm	2 ตัว	250/ตัว	500	
6	เหล็กแผ่นสังัดตัดทำแผ่นเพลต	หน้า 3 mm	2 แผ่น	80/แผ่น	160	
7	เหล็กกล่อง	$1\frac{1}{2}$ " หน้า 3 mm	0.12 เมตร	184 บาท/เมตร	23	
				รวม	1483	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ปีกนกลางด้านหลัง

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	เหล็กท่อน	$\phi 3/4$ " ขนาด 3 mm	1.47 เมตร	55 บาท/เมตร	81	
2	เหล็กเพลลา	$\Phi 22$ mm	0.16 เมตร	135 บาท/เมตร	22	
3	เหล็กเพลลา	$\Phi 16$ mm	0.12 เมตร	67 บาท/เมตร	8	
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ mm	2 ตัว	170/ตัว	680	
5	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 14$ mm	2 ตัว	250/ตัว	500	
6	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 12$ mm	2 ตัว	220/ตัว	440	
7	เหล็กแผ่นสังัดตัดทำ แผ่นเพลต	หนา 3 mm	2 แผ่น	80/แผ่น	160	
8	เหล็กกล่อง	$1\frac{1}{2}$ " ขนาด 3 mm	0.16 เมตร	184 บาท/เมตร	30	
				รวม	1921	

1.5 ระบบเปลี่ยนแกน โช๊ค

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	อะลูมิเนียมท่อน	$1/2$ " ขนาด 2 mm	1.47 เมตร	55 บาท/เมตร	81	
2	บูช	$\Phi 16$ mm	4 ตัว	100 บาท/ตัว	400	
3	น็อต + ตัวเมีย	$\Phi 16$ mm	4 ชุด	20 บาท/ตัว	80	
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ mm	8 ตัว	170/ตัว	1360	
5	เหล็กแผ่นสังัดตัดทำ ตัวเปลี่ยนแกน	หนา 5 mm	8 แผ่น	70/แผ่น	560	
6	เหล็กแผ่นสังัดตัดทำ ตัวเปลี่ยนแกน	หนา 3 mm	8 แผ่น	20/แผ่น	160	
7	เหล็กแผ่นสังัดตัดทำ หุ้ยัด Rod	หนา 3 mm	8 แผ่น	20/แผ่น	160	
8	โช๊ค YSS MX302	-	-	4 ตัว	8400	Sponsor
				รวม	11201	

1.6 คอมม่า

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	อะลูมิเนียมตัน	250 x 250 x 100	4 ก้อน	3800/ก้อน	15200	
2	ค้ำจ้ำงมีลตึง	-	-	2500/ก้อน	10000	
				รวม	25200	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ราคาแบ่งแยกระบบ

2.1 ระบบช่วงล่างด้านหน้า

	รายการ	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ปีกนกบน	1139	
2	ปีกนกล่าง	1483	
3	ระบบเปลี่ยนแกนโช้ค	5601	
4	คอม้า	6300	
	รวม	14523	

2.2 ระบบช่วงล่างด้านหลัง

	รายการ	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ปีกนกบน	1131	
2	ปีกนกล่าง	1921	
3	ระบบเปลี่ยนแกนโช้ค	5601	
4	คอม้า	6300	
	รวม	14953	

3. ราคารวมทั้งหมด

	รายการ	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ระบบช่วงล่างด้านหน้า	14523	
2	ระบบช่วงล่างด้านหลัง	14523	
	รวม	29046	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้