

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การออกแบบระบบช่วงล่างสำหรับรถแข่งขนาดเล็ก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

b. 11946047  
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SUSPENSION DESIGN FOR 2008 SFAE STUDENT FORMULA



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

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบระบบช่วงล่างสำหรับรถแข่งขนาดเล็ก

(Suspension Design for 2008 SFAE Student Formula)

ผู้จัดทำ

1. นาย สุรชัย อามวารี รหัสประจำตัว 47010891
2. นาย จตุพร ปรรณนา รหัสประจำตัว 47010081



  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบระบบช่วงล่างสำหรับรถแข่งขนาดเล็ก

นาย สุรชัย อาบวารี 47010891

นาย จตุพร ประรณนา 47010081

ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

จากการศึกษาการทำงาน ข้อดีและข้อเสียของระบบช่วงล่างชนิดต่างๆในโครงการที่แล้ว ทำให้สามารถตัดสินใจเลือกใช้ระบบช่วงล่างแบบปีกนกคู่ ซึ่งนิยมใช้ในรถแข่งทั่วไป เนื่องจากระบบแบบปีกนกคู่นั้น สามารถออกแบบให้ล้อตั้งฉากกับพื้นถนน ซึ่งส่งผลให้ง่ายต่อการควบคุม และสามารถออกแบบมุมแคมเบอร์ได้หลากหลาย โดยปรับระยะของ A-Arm ในที่นี้มุมแคมเบอร์ที่ใช้กับระบบช่วงล่างมีค่าอยู่ที่ -2 องศา โดยมาตรฐานมุมแคมเบอร์ที่แนะนำให้ใช้ในรถแข่งมีค่าอยู่ระหว่าง -4 องศา ถึง -2 องศา และมีการเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ไม่เกิน 1 องศา ซึ่งอยู่ในช่วงของมาตรฐานที่แนะนำให้ใช้ซึ่งมีค่าระหว่าง -2 องศา ถึง +0.5 องศา และทำการจำลองสร้างปีกนกขึ้นมาโดยใช้การโปรแกรม ABAQUS ช่วยในการวิเคราะห์หาขนาดเพื่อให้ได้ Safety Factor ที่เหมาะสมกับรถแข่งขนาดเล็ก หลังจากทำการวิเคราะห์แล้วได้ขนาดของปีกนกที่เหมาะสมคือ ใช้เหล็กท่อขนาด 5/8 นิ้ว โดยปีกนกด้านหน้าหนา 1.2 มิลลิเมตร และด้านหลังหนา 1.5 มิลลิเมตร โดยค่า Safety Factor ที่ได้มีค่าประมาณ 3.75 นอกจากนี้ยังมีการใช้โปรแกรม ADAMS/Car ช่วยในการวิเคราะห์แบบ Full Model เพื่อทำการเปรียบเทียบมุมต่างๆ เช่น มุม Roll, มุม Yaw, มุม Pitch ซึ่งมุมต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบในโครงการครั้งนี้ส่งผลให้ รถแข่งมีสมรรถนะ และเสถียรภาพในการขับขี่ที่ดีกว่าโครงการปีที่แล้ว พิสูจน์ได้จากกราฟเปรียบเทียบของมุมแต่ละมุม และจากโครงการครั้งที่แล้วได้ทำการออกแบบสปริง หลังจากที่ได้สปริงที่สร้างขึ้นมาจริงแล้วจึงทำการทดสอบว่าได้ค่านิจของสปริง(k) ตรงกับที่ออกแบบไว้หรือไม่ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบผลระหว่าง โครงการครั้งนี้และ โครงการในปีที่แล้วในด้านต่างๆ เช่น ราคาที่ใช้ในการสร้าง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Suspension Design for 2008 SFAE Student Formula

Mr. Surachai Arbware

Mr. Jatuporn Prattana

Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsarn Advisor

### Abstract

In this project, we use double wishbone for the suspension system of this vehicle. It can make the vehicle easier to control and also camber angle can be varied by adjusting A-Arm. According to Society of Automotive Engineering of Japan, it sets the standard for camber angle from -4.0 to -2.0 degrees and the change of camber angle is set between -2.0 and +0.5 degrees. Therefore, we decided to use -2.0 degrees of camber angle and the change is not over than 1 degrees. By using ABAQUS program to analyze size of double wishbone, the result shows that the suitable diameter of stainless steel is 5/8 inches, thickness of front and back sides are 1.2 and 1.5 inches, respectively. Then, safety factor is 3.75. On the other hands, ADAMS/Car also employed to compare in several angles, such as Roll angle, Yaw angle and Pitch angle, by using Full model method. This analysis can prove that this project better than former project in ride performance. K value of spring is tested to approve that K value of built spring is identical to the designed spring. Finally compare the result between this project and the former project such as the cost, wheel angle.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ที่ช่วยให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในทุกๆ งานและขอขอบพระคุณอาจารย์ มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขปัญหาทุกอย่าง และอาจารย์ท่านอื่นๆ ที่ให้ความรู้ ข้อเสนอแนะในสถาบันการศึกษาแห่งนี้ และขอขอบคุณ พี่วิท พี่เอ พี่ปิก ทิณภพ น้องอ่ำ น้องโอม และสมาชิกชมรมยานยนต์ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือ สนับสนุนข้าพเจ้าในด้านต่างๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นาย สุรชัย อาบวารี 47010891

นาย จตุพร ปรารธนา 47010081



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญกราฟ	X
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง	
2.1 หน้าที่และความสำคัญของระบบช่วงล่าง	3
2.2 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง	3
2.3 ชนิดของระบบช่วงล่าง	4
2.3.1 ระบบช่วงล่างชนิดปีนกัน	5
2.3.2 ระบบช่วงล่างชนิดมัลติลิงค์	5
2.3.3 ระบบช่วงล่างชนิดแม็คเฟอร์สัน สตรีท	6
2.3.4 ระบบช่วงล่างชนิดเทรลิ่งอาร์ม	7
บทที่ 3 ทฤษฎีมุมล้อ	
3.1 มุมล้อ	
3.1.1 มุมแคมเบอร์	9
3.1.2 มุมเอียงลูกหมากปีนกัน	11
3.1.3 มุมแคสเตอร์	11
3.1.4 ระยะโท	13
บทที่ 4 ทฤษฎีรูปแบบของระบบช่วงล่าง	
4.1 รูปแบบการวางตัวของระบบช่วงล่าง	15
4.1.1 ปีนกันบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน	15
4.1.2 ปีนกันบนและล่างยาวไม่เท่ากันแต่ขนานกัน	16
4.1.3 ปีนกันบนและล่างยาวไม่เท่ากันและไม่ขนานกัน	16
4.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบระบบช่วงล่าง	17
4.2.1 จุดศูนย์กลางชั่วขณะ (Instant center, IC)	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 จุดศูนย์กลางการ โคลง (Roll Center, RC)	18
4.2.3 แนวแกนการ โคลง (Roll axis)	20
4.2.4 ทรัสไลน์ (Thrust line)	20
4.3 การออกแบบมุมล้อ	
4.3.1 การออกแบบมุมแคมเบอร์	21
4.3.2 การออกแบบมุมเอียงลูกหมากปีกนก (Steering axis inclination)	22
4.4 การออกแบบระบบกันสะเทือน	23
บทที่ 5 การวิเคราะห์สมรรถนะในการขับขี่	
5.1 แหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน (Excitation sources)	25
5.1.1 ความขรุขระของพื้นถนน	25
5.1.2 ล้อและยาง	26
5.1.3 ระบบส่งกำลัง	28
5.1.4 เครื่องยนต์	29
5.2 คุณสมบัติในการตอบสนองของรถยนต์ (Vehicle Response Properties)	30
5.3 การวิเคราะห์หาค่าความแข็งของสปริงโดยใช้โปรแกรมอติမ်ส์วิว	31
5.4 ขั้นตอนการออกแบบสปริง	36
บทที่ 6 การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบช่วงล่าง	
6.1 สร้างแบบจำลองของรถแข่ง	40
6.1.1 เพิ่มเพลท (Template)	40
6.1.2 ซับซิสเต็ม (Subsystem)	40
6.1.3 การประกอบ (Assembly)	43
6.2 การจำลองด้วยโปรแกรม อติမ်ส์คาร์	44
6.2.1 การจำลองทางไคเนติกส์	44
6.2.2 การจำลองทางพลศาสตร์	45
6.3 ผลการจำลองทางคิเนเมติกส์	47
6.3.1 การจำลองเพื่อหารูปแบบของ Template	47
6.3.2 การจำลองเพื่อหามุมการวางตัวของปีกนก	52
6.3.3 การจำลองเพื่อหามุมเอียงลูกหมากปีกนก	61
6.4 ผลการจำลองทางไดนามิกส์	66
6.4.1 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน (Single Lane Change)	67
6.4.2 การทดสอบแบบ Ramp Steer	70
6.4.3 การทดสอบการเบรกของรถ	72
6.5 การเปรียบเทียบผลของมุมต่างๆ ของโครงงานปีนี้และ โครงงานปีที่แล้ว	74
บทที่ 7 ไฟไนต์เอลิเมนต์	
7.1 การวิเคราะห์แบบจำลองใน โปรแกรม ABAQUS	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 การคัดเลือกวัสดุ	80
7.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์	81
7.4 การกำหนดคุณสมบัติ	83
7.5 การประกอบ	84
7.6 การกำหนดขั้นตอน	85
7.7 การกำหนดขอบเขต	85
7.8 การกำหนดโหลด	85
7.9 การแบ่งเม็ช	87
7.10 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม	89
7.11 การแสดงผล	89
บทที่ 8 ผลงานที่เสร็จสมบูรณ์	
8.1 ระบบช่วงล่าง	91
8.1.1 ปีกนกบนและปีกนกล่าง	91
8.1.2 ก้านค้ำ และสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง	92
8.1.3 โช้ค และ แคมเปอร์	92
8.1.4 การทดสอบสปริง	93
8.1.5 คอมี้า	95
8.1.6 ระบบช่วงล่างที่สมบูรณ์	95
8.2 การปรับตั้งค่านุมล้อ	98
8.3 ผลการทดสอบโดยการขับขีจริง	99
บทที่ 9 บทสรุปและวิจารณ์	
9.1 สรุปผล	100
9.2 วิจารณ์ผล	100
9.3 ปัญหาที่พบในการทำโครงการ	101
9.4 แนวทางแก้ไข	102
เอกสารอ้างอิง	103
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก ราคาของชิ้นส่วน	105
ภาคผนวก ข แบบชิ้นส่วน	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง	3
รูปที่ 2-2 ระบบช่วงล่างชนิดปีกนกคู่	5
รูปที่ 2-3 ระบบช่วงล่างแบบมัลติลิงค์	6
รูปที่ 2-4 ระบบช่วงล่างแบบ แม็คเฟอร์สัน สตรีท	7
รูปที่ 2-5 ระบบช่วงล่างชนิดเทรลิ่งอาร์ม	8
รูปที่ 3-1 ลักษณะของมุมแคมเบอร์	10
รูปที่ 3-2 มุมเอียงลูกหมากปีกนก	11
รูปที่ 3-3 มุมแคสเตอร์	12
รูปที่ 3-4 มุมโทอิน และ โทเอ้าท์	14
รูปที่ 4-1 ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน	15
รูปที่ 4-2 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันแต่ขนานกัน	16
รูปที่ 4-3 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันและไม่ขนานกัน	17
รูปที่ 4-4 โฟบาร์ลิงค์เกจ	18
รูปที่ 4-5 จุดศูนย์กลางช่วงขณะ	18
รูปที่ 4-6 จุดศูนย์กลางการ โคลง	19
รูปที่ 4-7 ผลของตำแหน่งการ โคลง	19
รูปที่ 4-8 แนวแกนการ โคลง	20
รูปที่ 4-9 ลักษณะของ Thrust line ในกรณีต่างๆ	21
รูปที่ 4-10 ผลของแรงบิดใจโรที่ส่งถึงพวงมาลัย	21
รูปที่ 4-11 มุมเอียงลูกหมากปีกนก	23
รูปที่ 4-12 รูปร่างของระบบช่วงล่างที่ใช้ในการวิเคราะห์	23
รูปที่ 5-1 เครื่องวัดความหยวบของพื้นผิว	26
รูปที่ 5-2 แสดงโมเดลยางที่มีลักษณะเป็นสปริงเรียงตัวในแนวรัศมี	27
รูปที่ 5-3 แสดงแรงที่กระทำกับล้อ	27
รูปที่ 5-4 แสดงรูประบบส่งกำลัง	28
รูปที่ 5-5 แสดงการบวกเวกเตอร์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นบนจุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล	29
รูปที่ 5-6 กราฟแสดงแรงบิดที่ส่งออกจากเพลลาข้อเหวี่ยง	30
รูปที่ 5-7 แสดงทิศทางที่เกิดการสั่น ในเครื่องยนต์	30
รูปที่ 5-8 แสดงรูปสี่เหลี่ยมที่เป็นตัวแทนของน้ำหนักเหนือสปริง	31
รูปที่ 5-9 แสดงพูลคาร์ โมเดลที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	32
รูปที่ 5-10 แสดงไดอะล็อกบ็อกซ์ โมดิไฟสปริง-แคมเปอร์	32
รูปที่ 5-11 แสดงไดอะล็อกบ็อกซ์เฟอร์ฟอร์ม ไวเบรชันอะนาไลซิส	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-12 แสดงหน้าจอ ADAMS/Postprocessor	34
รูปที่ 5-13 ลักษณะของสปริง	37
รูปที่ 6-1 Template	40
รูปที่ 6-2 Subsystem	40
รูปที่ 6-3 แสดงการปรับตั้งค่า ฮาร์ดพอยท์	41
รูปที่ 6-4 แสดงการปรับตั้งค่า Parameter	42
รูปที่ 6-5 แสดงการปรับตั้งค่าคุณสมบัติของมวล	42
รูปที่ 6-6 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของสปริงและแคมเปอร์	43
รูปที่ 6-7 ส่วนประกอบของฟูล โมเดล	43
รูปที่ 6-8 แสดงภาพจำลองล้อเคลื่อนที่ขึ้นลงพร้อมกัน	44
รูปที่ 6-9 แสดงภาพจำลอง ล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตรงกันข้าม	44
รูปที่ 6-10 แสดงภาพ การทดสอบระบบขับเคลื่อน	45
รูปที่ 6-11 แสดงภาพการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนช่องถนน	45
รูปที่ 6-12 แสดงภาพการขับเคลื่อนตามความเร็วเชิงมุมที่กำหนด	46
รูปที่ 6-13 แสดงภาพการเบรกของรถ	46
รูปที่ 6-14 แสดงรูปแบบของปีกนกในลักษณะต่างๆ	47
รูปที่ 6-15 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางช่วงอยู่ในแท่ง	52
รูปที่ 6-16 แสดงการตั้งค่าต่างๆ ในการทดสอบแบบเปลี่ยนช่องถนน	67
รูปที่ 6-17 แสดงการตั้งค่าต่างๆ ในการทดสอบแบบ Ramp Steer	70
รูปที่ 6-18 แสดงการตั้งค่าต่างๆ ในการทดสอบแบบเบรก	72
รูปที่ 6-19 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการวางตัวของปีกนก	74
รูปที่ 6-20 แสดงการเปรียบเทียบแบบฟูล โมเดลของรถปีก่อนและปีนี้	77
รูปที่ 7-1 รูปร่างของปีกนก	80
รูปที่ 7-2 แสดงวิธีเปิด ABAQUS Licensing	81
รูปที่ 7-3 หน้าจอเมื่อเปิด โปรแกรม	82
รูปที่ 7-4 ขั้นตอนการ Import ไฟล์	82
รูปที่ 7-5 ขั้นตอนการเปลี่ยนหน่วยจาก มิลลิเมตร เป็น เมตร	82
รูปที่ 7-6 แสดงภาพปีกนกที่ Import เข้ามาใน โปรแกรม	83
รูปที่ 7-7 แสดงภาพลูกหมากที่ Import	83
รูปที่ 7-8 แสดงการกำหนดค่า Modulus	83
รูปที่ 7-9 แสดงการกำหนดค่า Density	83
รูปที่ 7-10 ก่อนกำหนด Section	84
รูปที่ 7-11 หลังกำหนด Section	84
รูปที่ 7-12 แสดงรูปปีกนกที่ประกอบด้วยลูกหมากเรียบร้อยแล้ว	84
รูปที่ 7-13 การสร้าง Step	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7-14 การยึดติดปีกนกกับลูกหมาก	85
รูปที่ 7-15 แสดงการใส่ค่า Parameter ใน Create Boundary Condition Dialog box	86
รูปที่ 7-16 การใส่ค่า Parameter ใน Edit Boundary Condition Dialog box	87
รูปที่ 7-17 แสดงการสร้าง Concentrated Force	87
รูปที่ 7-18 แสดงการเลือกชนิดของ Mesh	88
รูปที่ 7-19 แสดงรูปของปีกนกและลูกหมากเมื่อ Mesh เสร็จแล้ว	88
รูปที่ 7-20 แสดงภาพระหว่างรัน โปรแกรม	89
รูปที่ 7-21 แสดงผลการทดสอบจากโปรแกรม ABAQUS	89
รูปที่ 8-1 แสดงภาพ ปีกนกด้านหลัง (ซ้าย) และ ปีกนกด้านหน้า (ขวา)	91
รูปที่ 8-2 แสดงภาพ ชุดสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง	92
รูปที่ 8-3 แสดงภาพ โช๊คและแด็มเปอร์	93
รูปที่ 8-4 แสดงภาพเครื่องกด Hydraulic	93
รูปที่ 8-5 แสดงกราฟข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสปริง	94
รูปที่ 8-6 แสดงภาพคอมม่า	95
รูปที่ 8-7 แสดงภาพปีกนกด้านหน้า	95
รูปที่ 8-8 แสดงภาพระบบช่วงล่างด้านหลัง	96
รูปที่ 8-9 แสดงภาพปีกนกทั้ง ด้านหน้าและด้านหลัง	97
รูปที่ 8-10 แสดงภาพการปรับตั้งมุมล้อ	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญกราฟ

	หน้าที่
กราฟที่ 6-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	48
กราฟที่ 6-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการหมุน	49
กราฟที่ 6-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมโท	50
กราฟที่ 6-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงแทรก	51
กราฟที่ 6-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	53
กราฟที่ 6-6 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการ โคลง	54
กราฟที่ 6-7 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุม โท	55
กราฟที่ 6-8 แสดงการเปลี่ยนแปลงฐานล้อ	56
กราฟที่ 6-9 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	58
กราฟที่ 6-10 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการ โคลง	59
กราฟที่ 6-11 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุม โท	60
กราฟที่ 6-12 แสดงการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ	61
กราฟที่ 6-13 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	62
กราฟที่ 6-14 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการ โคลง	63
กราฟที่ 6-15 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุม โท	64
กราฟที่ 6-16 แสดงการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ	65
กราฟที่ 6-17 การจำลองแบบ Single Lane Change	68
กราฟที่ 6-18 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุม แคสเตอร์	69
กราฟที่ 6-19 การจำลองแบบ Ramp Steer	71
กราฟที่ 6-19 การจำลองการเบรก	73
กราฟที่ 6-20 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์	75
กราฟที่ 6-21 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการ โคลง	75
กราฟที่ 6-22 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุม โท	76
กราฟที่ 6-23 แสดงการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ	77
กราฟที่ 6-24 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุม โรล	78
กราฟที่ 6-25 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมยอร์	79
กราฟที่ 6-26 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมพิต	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 5-1 แสดงค่าความแข็งของสปริงที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติ	33
ตารางที่ 5-2 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จากโปรแกรมอค์มส์วีว	35
ตารางที่ 5-3 แสดงคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ	36
ตารางที่ 6-1 ค่าคงที่สปริงของล้อยหน้าและหลัง	86
ตารางที่ 7-1 แรงกระทำที่เกิดขึ้น ล้อต่างๆ	73
ตารางที่ 8-1 แสดงค่าแรงกระทำ, ระยะขยับตัว และ ค่านิจสปริง	94
ตารางที่ 8-2 แสดงค่าของมุมล้อยต่างๆ	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากปัจจุบันการแข่งขันทางรถยนต์มีปัจจัยสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้น สมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย ได้ดำเนินการจัดการแข่งขันการพัฒนา วิจัย และออกแบบยานยนต์ 2008 SFAE Student Formula ขึ้น โดยในปีนี้ทางสมาคมได้รับการสนับสนุนจากมูลนิธิกองทุน สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ซึ่งในปีนี้มีทีม INITIAL จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับการคัดเลือกให้เข้าร่วมแข่งขันด้วย

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

##### 1.2.1 เพื่อศึกษาระบบกันสะเทือน (Suspension System) 4 ชนิด

- Double Wishbone
- Multi Link
- Trailing Arm
- McPherson Struts

เพื่อวิเคราะห์หา ข้อดี และ ข้อเสีย ของระบบกันสะเทือนในแบบต่างๆ รวมทั้ง ราคาที่เหมาะสมต่อการที่จะนำมาใช้ กับรถแข่งขนาดเล็ก เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพต่อการขับขี่ที่สูงที่สุด และจากการศึกษา

##### 1.2.2 เพื่อออกแบบรูปร่างและ ลักษณะการวางตัว ของระบบกันสะเทือน

##### 1.2.3 เพื่อศึกษาการนำเอา โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณและการออกแบบ

โดยโปรแกรมที่ใช้คำนวณ และออกแบบมีดังนี้

- โปรแกรม อัดัมส์ (ADAMS/Car) ใช้สำหรับออกแบบระบบไคเนติกส์และ ไดนามิกส์ของรถ
- โปรแกรมอะบาคัส (ABAQUS) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนของช่วงล่าง
- โปรแกรมโปรเอ็นจิเนีย (ProEngineer) ใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วน

##### 1.2.4 นำระบบกันสะเทือนที่ออกแบบมาสร้างเป็นรถแข่งขนาดเล็กเพื่อใช้ในการแข่งขัน 2008

SFAE Student Formula ที่ทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทยจัดขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการพัฒนาและปรับปรุงข้อเสียของระบบช่วงล่างของรถแข่งขนาดเล็กที่ทำการแข่งขัน SFAE 2007 Student Formula เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อ รถแข่งที่จะทำการสร้างเพื่อใช้ในการแข่งขัน SFAE 2008 Student Formula จากการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ และเลือกชิ้นส่วนต่างๆเพื่อนำมาใช้ในการสร้าง โดยการใช้โปรแกรมออดัมส์ ในการจำลองการเคลื่อนที่ เพื่อดูความสมดุลและเสถียรภาพของระบบ และใช้โปรแกรมอะบาตัส ในการวิเคราะห์หาความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่างๆ ก่อนทำการสร้างชิ้นงานจริงเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้าง

### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

ขั้นแรกทำการศึกษาหาข้อดี และข้อเสีย ของระบบช่วงล่างจากรถแข่งขนาดเล็ก และวิเคราะห์วิธีแก้ปัญหา หลังจากนั้นทำการศึกษาหาข้อดีและข้อเสียของระบบช่วงล่างแบบต่างๆ เพื่อหาความเหมาะสมต่อรถแข่งขนาดเล็กที่จะทำการสร้างเพื่อใช้แข่งขันใน SFAE 2008 Student Formula

เมื่อทำการศึกษาวิธีการใช้และ การทำงานของระบบช่วงล่างต่างๆเป็นอย่างดีแล้ว และทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับ โครงสร้าง โดยรวมด้วย หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วจึงเลือกใช้ ระบบช่วงล่างที่เหมาะสมต่อรถแข่งขนาดเล็ก

จากนั้นเราทำการสร้างระบบช่วงล่างที่ได้ออกแบบไว้ และทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อดูลักษณะการยุบตัวชิ้นส่วนต่างๆ ที่จะนำมาสร้างเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรง คงทนที่สุด และสุดท้ายเราจึงสร้างชิ้นงานจริงขึ้นมาเพื่อนำมาทดสอบกับสภาพถนนจริง เพื่อดูผลเปรียบเทียบกับที่ทดสอบในโปรแกรม

## บทที่ 2

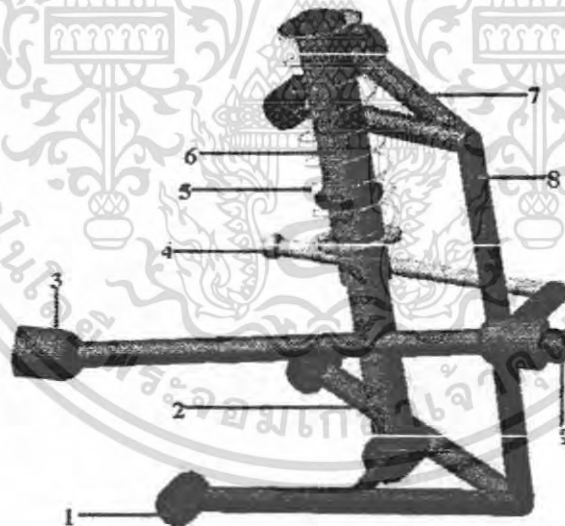
### ระบบช่วงล่าง

#### 2.1 หน้าที่และความสำคัญของระบบช่วงล่าง

เพื่อให้ได้การขับขี่ที่มีเสถียรภาพและสมคูล รถยนต์ทุกคันจำเป็นจะต้องมีระบบช่วงล่าง เพื่อลดการสั่นสะเทือนและเพื่อช่วยในการทรงตัวของรถ ในขณะที่รถทำการวิ่งในสภาวะต่างๆ เช่น ขณะเข้าโค้ง สภาพถนนไม่ราบเรียบ หรือแม้แต่ในขณะเบรก หากรถยนต์ไม่มีระบบช่วงล่าง นอกจากผู้โดยสารและคนขับ จะได้รับแรงกระแทกโดยตรงจากตัวรถแล้ว อาจทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ของรถยนต์เกิดความเสียหายมากและอาจมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนเร็วกว่าที่ควร นอกจากนี้หน้าที่รองลงมาของระบบช่วงล่างคือ เป็นตัวเชื่อมระหว่าง โครงรถยนต์(Chassis) กับ ล้อรถ (Wheel)

#### 2.2 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง

ระบบช่วง โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักๆ ตามรูปที่ 2-1 โดยหน้าที่แต่ละชิ้นส่วนมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง

1. บูช(Bush) เป็นยางรูปวงกลมมีรูตรงกลางไว้สำหรับใส่เหล็กที่มีลักษณะเดียวกัน สร้างขึ้นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างตัวปีกนกกับ นอตที่ยึดคิคปีกนก
2. ปีกนก(Control Arm) มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยม โดยปลายด้านหนึ่งจะทำหน้าที่ยึดกับตัว โครงรถยนต์ อีกด้านหนึ่งจะยึดคิคกับคอกม้าด้านล่าง (หมายเลข 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพลาขับ มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กยาว ด้านหนึ่งยึดติดกับแกนหมุนของล้อ (หมายเลข9) และคอหม้า มีหน้าที่รับแรงจากเพลาขับแล้วส่งกำลังต่อทำให้ล้อสามารถหมุนได้ โดยชุดรับแรงจากเพลาขับบนนี้จะติดตั้งที่ด้านหน้าหรือหลังขึ้นอยู่กับชนิดของรถที่เราออกแบบว่าจะให้เป็นระบบขับเคลื่อนล้อหน้าหรือหลัง หรือ ขับเคลื่อน 4 ล้อ
4. ชุดแกนบังคับเลี้ยว(Steering rack) มีลักษณะเป็นแท่งยาว ด้านหนึ่งยึดติดกับลิงค์ที่มาจากพวงมาลัย อีกด้านหนึ่งยึดติดกับคอหม้า มีหน้าที่บังคับล้อให้หมุน ไปตรงตามทิศทางที่พวงมาลัยหมุน โดยชุดแกนบังคับเลี้ยวนี้จะมีเฉพาะระบบช่วงล่างด้านหน้าเท่านั้น
5. สปริง(Spring) มีลักษณะเป็นเหล็กเส้นขดกันเป็นเกลียว ทั้ง 2 ด้านยึดติดกับเบ้ารองรับสปริงทำหน้าที่รับแรงกระแทก หรือ แรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่
6. แคมเปอร์(Damper) มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กมีน้ำมันหรือแก๊สอัดอยู่ภายใน (แล้วแต่ชนิดของแคมเปอร์) ติดอยู่ที่ด้านในหรือนอกของสปริง ทำหน้าที่ดูดซับแรงในขณะที่ยานวิ่งขึ้นตัวเนื่องจากแรงที่มากกระทำ
7. คอหม้า(Steering Knuckle) สร้างขึ้นจากอะลูมิเนียม มีหน้าที่ยึด ปีกนกบน ปีกนกล่าง คันส่งเพลาขับ เข้าด้วยกัน เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ระบบช่วงล่างชนิดอิสระต่อกัน (Independent suspension) จะขาดไม่ได้

### 2.3 ชนิดของระบบช่วงล่าง

ระบบช่วงล่างแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

ระบบช่วงล่างชนิดที่เป็นอิสระต่อกัน (Independent suspension)

- ระบบช่วงล่างชนิดนี้ ล้อทั้ง 4 ของระบบกันสะเทือนจะเดินเป็นอิสระต่อกัน ไม่ส่งผลไปยังล้อที่อยู่ตรงกันข้าม หรือถ้ามีบ้างก็น้อยมาก น้ำหนักได้สปริงของระบบรองรับแบบนี้มีน้อย แรงเฉื่อยจากการเดินของล้อจึงมีน้อยกว่า อาการเดินของล้อจึงกลับสู่สภาวะปกติได้อย่างรวดเร็ว และมีน้ำหนักได้สปริงน้อย

ระบบช่วงล่างชนิดที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน (Non-Independent)

- ระบบช่วงล่างลักษณะนี้ ล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวาจะอยู่บนเพลาเดียวกัน เป็นแบบดั้งเดิมที่ ที่ใช้กันมาและ ในปัจจุบันก็ยังมีใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรถบรรทุก รถยนต์นั่งมีเฉพาะล้อหลัง แต่ก็มีให้เห็นน้อยลงเรื่อยๆ ข้อดี คือ แข็งแรง ทนทาน ค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีข้อเสีย คือ มีน้ำหนักได้สปริงมาก เมื่อล้อใดล้อหนึ่งเอียงไป ล้อที่อยู่บนทานเดียวกันจะเอียงตามไปด้วย การควบคุมรถที่ความเร็วสูง

ในโครงการนี้ ระบบช่วงล่างที่เราจะนำมาพิจารณาใช้กับรถแข่งขนาดเล็กลักษณะเป็นระบบช่วงล่างชนิดที่เป็นอิสระต่อกัน เนื่องจาก สามารถทำให้การควบคุมรถ มีเสถียรภาพ และมีการขับขี่ที่นุ่มนวล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเหมาะต่อการขับขี่ในสภาวะต่าง ที่รถแข่งขนาดเล็กต้องทำการทดสอบในการแข่งขัน SFAE โดยระบบช่วงล่างแบบเป็นอิสระต่อกันนั้น มีหลายชนิดดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ระบบช่วงล่างชนิดปีกนกคู่ (Double Wishbone suspension)

ระบบช่วงล่างแบบปีกนกคู่นี้ สามารถติดตั้งได้ทั้งล้อหน้าและล้อหลังได้ ปัจจุบันสามารถออกแบบให้แข็งแรงมากพอและใช้อะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบา แทนโครงสร้างเดิมที่เป็นเหล็ก ระบบนี้เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในรถสปอร์ต รถแข่ง หรือแม้กระทั่งรถเนกประสงค์รุ่นใหม่ในปัจจุบัน

ระบบช่วงล่างแบบปีกนกคู่ประกอบไปด้วย ปีกนก (Control arm) 2 ชั้น ซึ่งจะมีความยาวเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้

ข้อดี

1. สามารถออกแบบให้แข็งแรง โดยใช้อะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบา
2. เนื่องจากมีความแข็งแรงมากจึงใช้กันอย่างแพร่หลายในรถสปอร์ต รถแข่ง

ข้อเสีย

1. การติดตั้งต้องใช้ความชำนาญสูง และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง



รูปที่ 2-2 ระบบช่วงล่างชนิดปีกนกคู่

### 2.3.2 ระบบช่วงล่างชนิด มัลติลิงค์ (Multi link)

สำหรับช่วงล่างที่มีแขนยึด(Link) หลายจุดเช่น โฟร์บาร์ลิงค์เกจ, ไฟว์ลิงค์ หรือแขนยึดแบบ 5 จุด ที่ออกแบบให้ใช้แขนยึดหลายจุดเพื่อต้องการควบคุมมุมล้อ และรักษาหน้ายางให้ตั้งฉากกับพื้นถนน ปัจจุบันนิยมใช้กับล้อคู่หลังในกลุ่มรถ Luxury เพราะ โดดเด่นเรื่องความนุ่มนวล ทั้งยังให้สมรรถนะในการยึดเกาะถนนที่ดี

#### ข้อดี

1. นิยมใช้กับล้อคู่หลังในกลุ่มรถที่ โดดเด่นเรื่องความนุ่มนวล
2. ทำให้มีสมรรถนะในการยึดเกาะที่ดี

#### ข้อเสีย

1. ระบบนี้โดดเด่นเรื่องสมรรถนะในการยึดเกาะ จึงไม่ได้เน้นถึงความสำคัญในการรองรับ Load เป็นเหตุให้ไม่สามารถรับแรงได้มาก



รูปที่ 2-3 ระบบช่วงล่างแบบมัลติลิงค์

### 2.3.3 ระบบช่วงล่างชนิด แม็คเฟอร์สัน สตรัท (Macpherson Strut)

การออกแบบคล้ายกับระบบปีกนกธรรมดา แต่ไม่มีปีกนกบน โช้คอัพและคอยล์สปริงจะรวมอยู่บนแกนเดียวกัน ทำให้ประหยัดเนื้อที่และลดชิ้นส่วนต่างๆ ลงได้มาก ตัวถังบริเวณที่รองรับชุดแม็คเฟอร์สันสตรัท ต้องแข็งแรงเป็นพิเศษ ข้อเสียของระบบกันสะเทือนชนิดนี้ คือ ไม่สามารถทำให้รถค้ำลงเท่าระบบกันสะเทือนแบบปีกนก จึงไม่นิยมใช้กับรถแข่งทางเรียบ (Racing Car) แต่ระบบช่วงล่างชนิดนี้เหมาะกับรถแข่งแบบทางฝุ่นมากกว่า (Rally race car)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อดี

1. เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงทำให้ประหยัดเนื้อที่และลดชิ้นส่วนต่างๆลงได้มาก
2. เหมาะกับรถแข่งแบบทางฝุ่น (Rally race car)

### ข้อเสีย

1. ไม่สามารถทำให้รถต่ำลงได้เท่ากับระบบกันสะเทือนแบบปีกนก จึงไม่นิยมใช้กับรถแข่ง ทางเรียบ



รูปที่ 2-4 ระบบช่วงล่างแบบ แม็คเฟอร์สัน สตรีท

#### 2.3.4 ระบบช่วงล่างชนิดเทรลิ่งอาร์ม (Trailing arm)

แขนเต้น (Trailing arm) อาจมีอยู่ 2 แขน หรือแขนเดี่ยวก็ได้ ถ้าเป็นแขนเดี่ยวจะเรียกว่า เซมิเทรลิ่งอาร์ม (Semi trailing arm) ถูกออกแบบให้ใช้ในล้อหลัง แขนเต้นมีใช้ทั้งแบบจุดหมุนอยู่ตามแนวขวางและจุดหมุนอยู่ตามแนวขวางกับตัวรถ ปัจจุบันมีให้เห็นมากในรถ MPV ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนล้อหน้า จุดเด่น คือ มีชิ้นส่วนในการเคลื่อนที่น้อย ห้องโดยสารจึงออกแบบได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

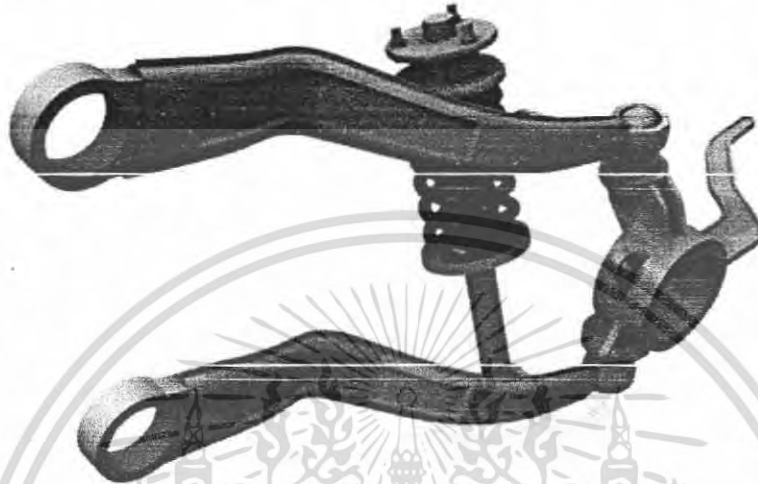
### ข้อดี

1. นิยมใช้กันมากในรถ MPV (Multiple Passenger Vehicle) ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนล้อหน้า เนื่องจากสามารถยืดเกาะได้ดี
2. มีชิ้นส่วนน้อย ทำให้ห้องโดยสารกว้างขวางมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อเสีย

1. ระบบช่วงล่างชนิดนี้ Load จะส่งผลโดยตรงต่อระบบบังคับเลี้ยว ทำให้เสียการควบคุมได้ง่าย
2. หากต้องการให้รองรับ Load ที่มากๆ ต้องออกแบบให้ Control Arm มีขนาดใหญ่



รูปที่ 2-5 ระบบช่วงล่างชนิดเทรลิ่งอาร์ม

จากการพิจารณาถึงข้อดี และ ข้อเสีย ของระบบช่วงล่างชนิดต่างๆ แล้ว ทำให้สามารถตัดสินใจเลือกใช้ ระบบช่วงล่าง ชนิด ปีกนกคู่(Double wishbone) เนื่องจากระบบช่วงล่างชนิดนี้มีความแข็งแรงที่เหมาะสมต่อการขับขี่ของรถแข่งขนาดเล็ก

## บทที่ 3

### ทฤษฎีมุมล้อ

#### 3.1 มุมล้อ

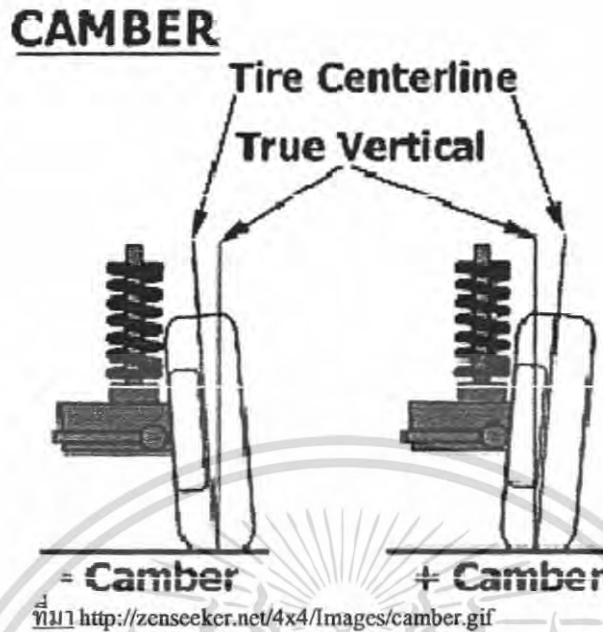
ในปัจจุบันผู้ขับรถโดยทั่วไปมักจะไม่ค่อยให้ความสำคัญกับการจัดตั้งมุมล้อ (Wheel alignment) เนื่องจากเข้าใจว่ารถยนต์ที่ผลิตจากโรงงานถูก ตั้งค่าต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น มุมแคมเบอร์, มุมแคสเตอร์, มุมโท และ มุมเอียงลูกหมาก เป็นต้น ทั้งนี้หากมุมเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป อาจทำให้เกิดทั้งผลดี หรือ ผลเสีย ก็เป็นไปได้ การจัดตั้งมุมล้อที่ถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญต่อการควบคุมรถยนต์ ไม่เพียงแต่ทำให้เกิดความปลอดภัยในการขับขี่ แต่ยังรวมไปถึง ความสะดวกสบายในการขับขี่ด้วย แต่หากเกิดการจัดตั้งมุมล้อที่ผิด ผลเสียอย่างน้อยที่สุดที่จะเกิดคือ ทำให้ส่วนประกอบของระบบช่วงล่างเกิดการเสียหาย, ยางรถยนต์เกิดการสึกหรอเร็วกว่าที่ควร และ ทำให้รถยนต์เลี้ยวได้ไม่ตรงกับที่ผู้ขับขี่ต้องการ แต่หากผู้ขับขี่ยังไม่จัดตั้งมุมล้อให้ถูกต้อง อาจทำให้เกิดผลเสียที่ร้ายแรงกว่าเช่น เกิดการบาดเจ็บและ ความเสียหายของทรัพย์สินก็เป็นได้

ในโครงการนี้เราจะทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อต่างๆ ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ และการควบคุม ที่เหมาะสมกับรถแข่งขนาดเล็ก โดยดูจากการเคลื่อนที่ของรถเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมล้อค่าต่างๆกัน

##### 3.1.1 มุมแคมเบอร์ (Camber Angle)

มุมแคมเบอร์คือ มุมการวางตำแหน่งล้อ เมื่อมองจากด้านหน้ารถ หรือหลังรถเข้าไปหาตัวรถ ถ้าระยะห่างระหว่างด้านล่างของล้อ )ติดพื้นถนน (มีระยะน้อยกว่า ระยะห่างด้านบนของล้อทั้ง 2ข้าง เรียกว่าแคมเบอร์มีค่าเป็นบวก Positive) เมื่อมองดูแล้วเหมือนกับล้อเอียงสอดเข้าหากัน คล้ายรูปกรวยในทางตรงข้าม ถ้าระยะห่างระหว่างด้านล่างของล้อ )ติดพื้นถนน (มีระยะมากกว่า ระยะห่างด้านบนของล้อทั้ง 2ข้าง เรียกว่า แคมเบอร์มีค่าเป็นลบ Negative) เมื่อมองดูแล้วเหมือนกับล้อ แเบะออกไป และหากระยะห่างระหว่างด้านล่างของล้อและด้านบนของล้อมีค่าเท่ากัน เรียกว่า แคมเบอร์ เป็นศูนย์

โดยทั่วไปแล้ว ในรถแข่ง Formula ทั่วไป นิยมให้ มุมแคมเบอร์มีค่าระหว่าง -4 องศา ถึง -2 องศา และมุมแคมเบอร์เปลี่ยนแปลงไม่เกิน -2 องศา ถึง +5 องศา



รูปที่ 3-1 ลักษณะของมุมแคมเบอร์

### 3.1.1.2 ผลของมุมแคมเบอร์ที่มีค่ามากหรือน้อยเกินไป

- พวงมาลัยดึงหรือรถแล่นเฉยจากทิศทางที่ต้องการ

การเอียงของล้อในขณะที่รถแล่นมีผลต่อการกลิ้งของล้อรถในขณะที่สัมผัสกับผิวถนน เพราะถ้าล้อเกิดการเอียงทำให้ยางรถอ่อนตัวมีผลให้ขนาดของยางมีรัศมีที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้ายาง จึงเกิดการกลิ้งไปในลักษณะของกรวย ดังนั้นทิศทางของรถยนต์จะไม่ตรงกับทิศทางที่ผู้ขับขี่ต้องการ ยิ่งล้อมีมุมแคมเบอร์มากขึ้นเท่าใดก็จะยิ่งทำให้ล้อเกิดการดึงออกจากทิศทางตรงมากขึ้น และหากล้อหน้าทั้ง 2 ของรถมีมุมแคมเบอร์ไม่เท่ากัน ล้อที่มีมุมแคมเบอร์มากกว่าจะดึงให้รถ โยก ไปทางล้อด้านนั้น ส่งผลให้ผู้ขับขี่ต้องคอยดึงพวงมาลัยเพื่อให้รถแล่นตรงอยู่ตลอดเวลา

- ขางสึกหรือเร็วผิดปกติ

หากรถยนต์มีมุมแคมเบอร์ที่มากเกินไปจะทำให้หน้ายางด้านในสัมผัสกับพื้นถนนน้อยกว่าหน้ายางด้านนอก ส่งผลให้ดอกยางที่หน้ายางด้านนอกสึกหรือเร็วกว่าด้านใน เช่นเดียวกันหากมุมแคมเบอร์มีค่าเป็นลบมากเกินไป ก็จะทำให้หน้ายางด้านในสึกหรือเร็วกว่าด้านนอก

- ลูกปืนและลูกหมากคันส่งตีกหรือเร็วผิดปกติ

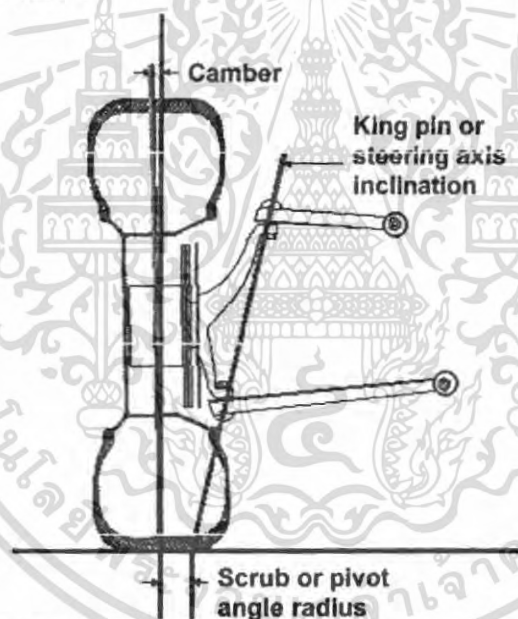
อย่างที่ทราบกันจากหัวข้อข้างต้นว่า หากรถยนต์มีมุมแคมเบอร์ที่มากเกินไปจะทำให้รถยนต์วิ่งไปในทิศทางที่โค้งออกจากแนวตรง ส่งผลให้ลูกหมากคันส่งต้องรับแรงที่จะต้องบังคับล้อให้ตรงมากกว่าปกติจึงทำให้ลูกหมากเกิดการสึกหรือ หรือเสียหายเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนั้นยังส่งผลให้ลูกปืนต้องรับแรงไม่ถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้จึงมีโอกาสสึกหรือเร็วขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 มุมเอียงลูกหมากปีกนก (Steering-axis inclination angle)

มุมล้อหน้าอีกมุมหนึ่งที่สัมพันธ์กับมุมแคมเบอร์ คือ มุมเอียงลูกหมากปีกนก ซึ่งเป็นมุมระหว่างเส้นแกนลูกหมากปีกนกกับเส้นแนวตั้งกลางล้อคังรูป ถ้าเป็นรถยนต์ที่ใช้ระบบช่วงล่างชนิดคานแข็งและรถยนต์ที่ใช้สลักล้อหน้า (King pins) จึงเรียกมุมนี้ว่ามุมเอียงสลักล้อหน้า (King pins inclination) ส่วนรถยนต์ที่ใช้ลูกหมากปีกนก ก็เรียกว่า มุมเอียงลูกหมากปีกนก (Ball joint inclination angle)

มุมเอียงลูกหมากปีกนกกมีประโยชน์เพื่อลดขนาดของมุมแคมเบอร์เพราะหากมุมแคมเบอร์มีค่ามากเกินไป จะมีผลเสียต่อการสึกหรอของดอกยางรถยนต์ และการหมุนในลักษณะกรวยของล้อส่งผลให้เกิดแรงดึงพวงมาลัย ทำให้การควบคุมเป็นไปได้ยาก แต่เมื่อมีมุมเอียงลูกหมากปีกนก เราก็สามารถลดขนาดมุมแคมเบอร์ได้ ในขณะที่ยังคงทำให้น้ำยางสัมผัสกับผิวถนน ได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้ตัวรถมีเสถียรภาพและควบคุมได้ดียิ่งขึ้น



ที่มา <http://www.mgf.ultimatemg.com>

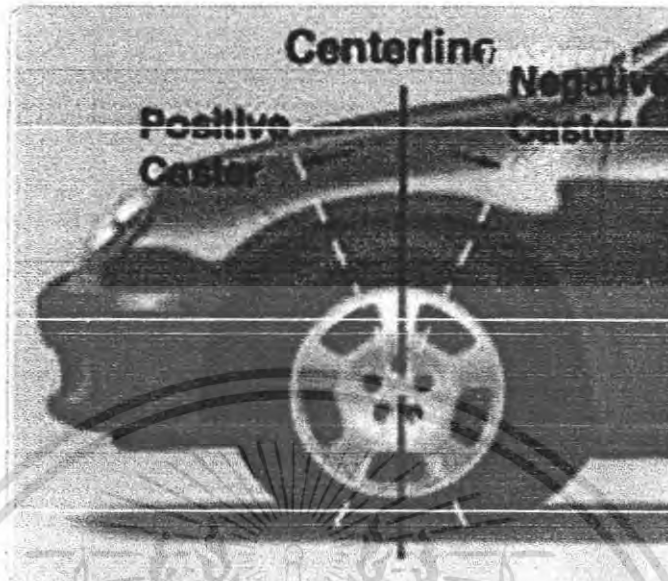
รูปที่ 3-2 มุมเอียงลูกหมากปีกนก

### 3.1.3 มุมแคสเตอร์ (Caster angle)

มุมแคสเตอร์ คือมุมการวางตำแหน่งล้อ เมื่อมองจากด้านข้างตัวรถ เข้าไปหาตัวรถ มุมแคสเตอร์ จะเป็นมุมของแกนหมุนเลี้ยว ที่เอียงจากแนวตั้ง ไปตามแนวยาวของรถ เมื่อแกนหมุนเลี้ยวส่วนบน เอียงไปทางด้านหลังรถ มุมแคสเตอร์ จะมีค่าเป็นบวก (Positive) ในทางตรงข้าม ถ้าแกนหมุนเลี้ยวส่วนบน เอียงไปทางด้านหน้ารถ มุมแคสเตอร์ จะมีค่าเป็นลบ (Negative)

โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้มีค่าประมาณ 4 องศา ในรถแข่ง Formula

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่มา [http:// www.hostilehobby.com](http://www.hostilehobby.com)

รูปที่ 3-3 มุมแคสเตอร์

### 3.1.3.2 ลักษณะของมุมแคสเตอร์

- มุมแคสเตอร์เป็นบวก(Positive caster)

เป็นมุมของแกนลูกหมากที่เอียงไปด้านหลังของรถ ขณะที่เลี้ยวออกจากแนวเส้นตรง จุดศูนย์นำ จะไม่อยู่บนเส้นทิศทางแล่นของรถ ทำให้เกิดแรงจากการเลี้ยว (Turing force) ขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดโมเมนต์ที่จะทำให้เกิดการจัดตั้งศูนย์ล้อด้วยตัวเอง (Self aligning torque) อันทำให้ล้อมีแนวโน้มที่จะรักษาล้อให้อยู่ตำแหน่งแล่นตรงไปข้างหน้า แต่ต้องใช้แรงในการหมุนพวงมาลัย เช่น ขณะรถแล่นทางโค้งจะต้องใช้แรงในการควบคุมพวงมาลัยมาก แต่ก็มีผลดีในกรณีที่รถยนต์แล่นที่ความเร็วสูงๆ เพราะจะไม่ทำให้ล้อหลุดหายไปมาทางด้านข้าง

- มุมแคสเตอร์เป็นลบ(Negative caster)

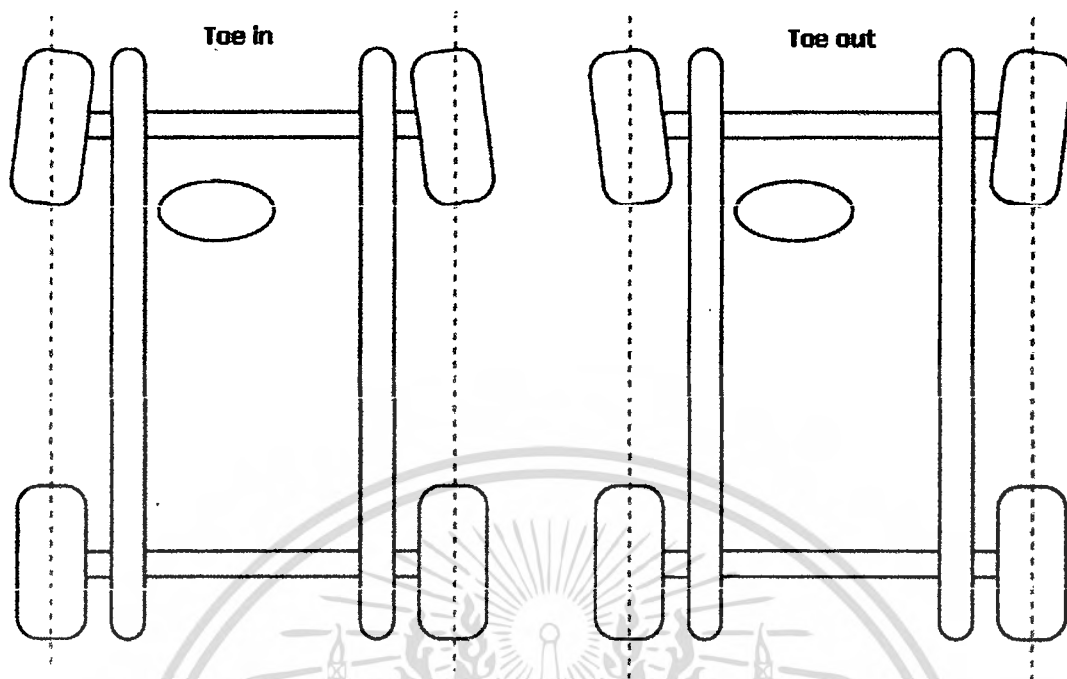
เป็นมุมของแกนลูกหมากที่เอียงไปทางด้านหน้าของรถ การที่รถยนต์มีมุมแคสเตอร์เป็นลบนี้จะทำให้แรงเลี้ยวล้อและจุดพ่วงอยู่นำหน้าจุดศูนย์นำ เป็นผลให้ล้อพยายามที่จะเลี้ยวอยู่ตลอดเวลา เพราะแรงเลี้ยวล้อที่เกิดขึ้นพยายามจะ ไปอยู่ด้านหลัง

### 3.1.3.3 ผลของมุมแคสเตอร์ที่ไม่ถูกต้อง

1. เมื่อมีค่าบวกมากเกินไป
  - พวงมาลัยหนัก
  - ล้อเดินมากขณะวิ่ง
2. เมื่อมีค่าเป็นลบมากเกินไป
  - ไม่มีเสถียรภาพ หรือ อาจกล่าวได้ว่า ไม่มีความมั่นคงในการควบคุมที่ความเร็วสูง
  - รถเลียบง่ายและหน้ารถ สายไปสายมา
3. เมื่อมุมแคสเตอร์สองข้างไม่เท่ากัน
  - รถจะกินไปทางด้านที่มีมุมแคสเตอร์เป็นบวกน้อยกว่า

### 3.1.4 ระยะเวลา (Toe)

1. โทอิน (Toe-in) คือระยะหน้ายางเอียงเข้าหากัน ตามทิศทางด้านหน้ารถ )เมื่อมองจากด้านบน ลงสู่พื้นถนน (โทอิน จะมีค่าเป็นบวก (Positive) เมื่อระยะห่างของยางด้านหน้า น้อยกว่าระยะห่างของยางด้านหลัง และ โทอิน จะมีค่าเป็นลบ (Negative) เมื่อระยะห่างของยางด้านหน้ามากกว่าระยะห่างของยางด้านหลัง
2. โทเอาท์ (Toe-out) คือผลต่างของมุมเลี้ยวล้อหน้า ที่อยู่ด้านนอกวงเลี้ยว และด้านในวงเลี้ยว หรือรัศมีการเลี้ยวนั่นเอง มุมโทเอาท์ จะทำให้ล้อหมุนเลี้ยวได้อย่างราบรื่น ทำให้จุดศูนย์กลางการหมุนเลี้ยว แต่ละล้อร่วมกัน ป้องกันการสึกหรอของยาง และอาการเสียดังขณะเลี้ยวได้ระดับหนึ่ง
3. โทเป็นศูนย์ (Toe Zero) หมายถึงระยะห่างของความห่างของล้อหน้าทั้งด้านหน้าและด้านหลังสุดมีค่าเท่ากัน ซึ่งความต้องการอันแท้จริงคือ รถยนต์จะต้องมีระยะ โทของล้อหน้าขณะแล่นเป็นศูนย์ เพื่อต้องการให้ล้อรถยนต์ทุกๆล้อขนานแก่กันและกัน แต่ในทางปฏิบัติจะทำการปรับตั้งระยะ โท ของล้อหน้าให้เป็น โทอินเมื่อรถหยุดอยู่กับที่ โดยปกติรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหน้าจะตั้งระยะ โทเป็นศูนย์ หรือ เป็น โทอินเพียงเล็กน้อย



ที่มา [www.dcsstrides.com](http://www.dcsstrides.com)

### รูปที่ 3-4 มุม โทอิน และ โทเอ้าท์

วัตถุประสงค์ของการตั้งค้ำระยะ โทของล้อหน้าให้เป็นโทอิน

“โทอินจะไม่ให้ล้อสั่น จากความต้านทานกลิ้ง ลดระยะหลวมของลูกหมากคันทันส่ง และทำให้ล้อรถ เคลื่อนที่ขนาน ไปอย่างคงที่” ข้อความข้างต้นที่กล่าวมาหมายความว่า การตั้งค้ำระยะ โทอินที่ล้อหน้านั้น เพื่อชดเชยการหมุนของล้อ (ความต้านทานกลิ้ง) ให้เป็นไปในทิศทางที่ขนานกัน และเพื่อเป็นการรักษาระยะ โทของล้อหน้าขณะแล่นให้เป็นศูนย์ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องตั้งให้ล้อเอียงเข้าหากันเล็กน้อยในขณะที่รถอยู่กับที่ อันเป็นการชดเชยการหันเหของล้อ (ทำให้ล้อสั่น) ที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานของล้อบนผิวถนนและ แรงที่เกิดจากการเบรก รวมไปถึงแรงดันที่เกิดจากการขับเคลื่อนที่ล้อหลัง

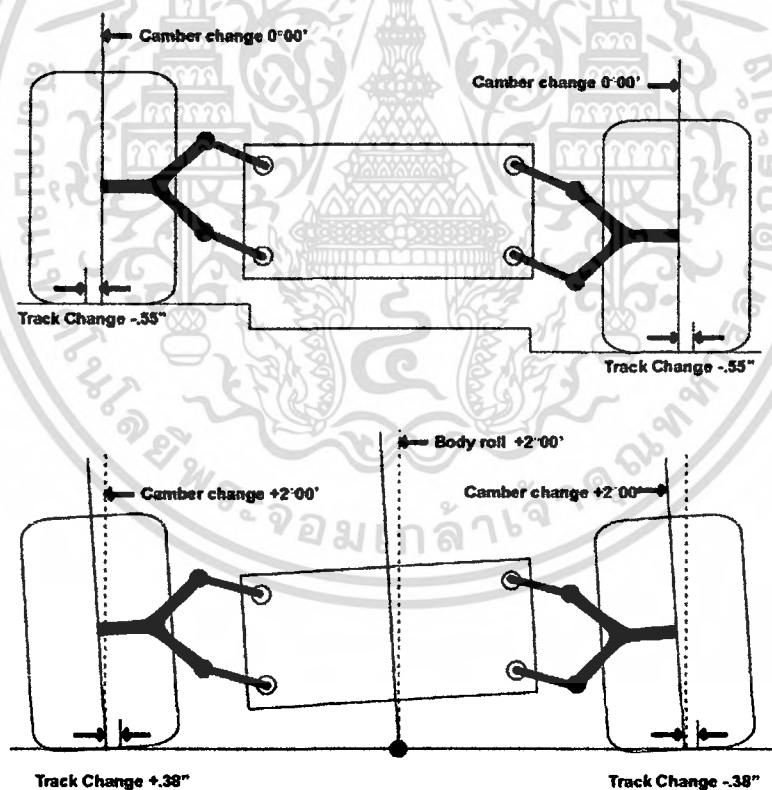
## บทที่ 4

### ทฤษฎีรูปแบบของระบบช่วงล่าง

#### 4.1 รูปแบบการวางตัวของระบบช่วงล่าง

ในการออกแบบระบบช่วงล่างเมื่อกำหนดคุณลักษณะที่ต้องการแล้วเราก็คงเลือกกว่าเราจะให้รูปแบบการวางตัวของระบบเป็นแบบไหน โดยเราเลือกให้เป็นแบบปีกนกคู่ ซึ่งรูปแบบการวางตัวของปีกนกคู่มีหลายรูปแบบดังนี้

4.1.1 ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน รูปแบบของปีกนกที่วางขนานกันจะช่วยให้ตำแหน่งการโคลงอยู่ต่ำ และช่วยรักษาค่าตำแหน่งการวางตัวของล้อให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นจึงทำให้มุมแคมเบอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อล้อกระทบกับสิ่งกีดขวาง แต่ก็ยังมีข้อเสียตรงที่มุมแคมเบอร์จะเปลี่ยนแปลงเท่ากับมุมการโคลง กล่าวคือ เมื่อรถโคลงไปเป็นมุม 2 องศา มุมแคมเบอร์ก็จะเปลี่ยนไป 2 องศาด้วยซึ่งจะทำให้เกิดการสึกหรอของยาง



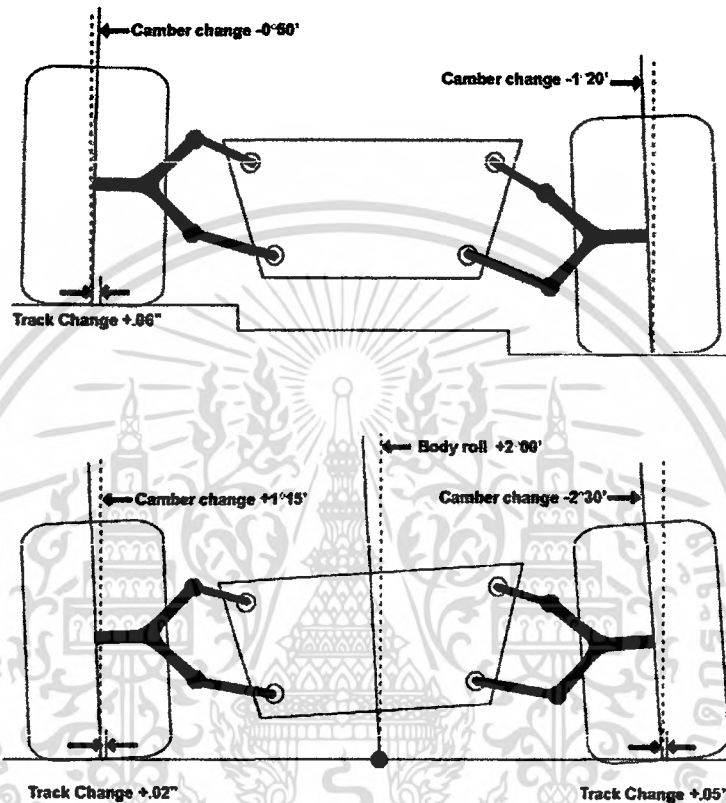
#### Equal length, parallel link double wishbones

ที่มา [www.desertrides.com](http://www.desertrides.com)

รูปที่ 4-1 ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันแต่ขนานกัน เป็นรูปแบบของปีกนกที่ออกแบบมาเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ขณะรถโคลง แต่การเปลี่ยนแปลงของมุมล้อขณะกระทะกึ่งก็คขวางจะมีมากกว่าที่ปีกนกบนและล่างยาวเท่ากันและขนานกัน

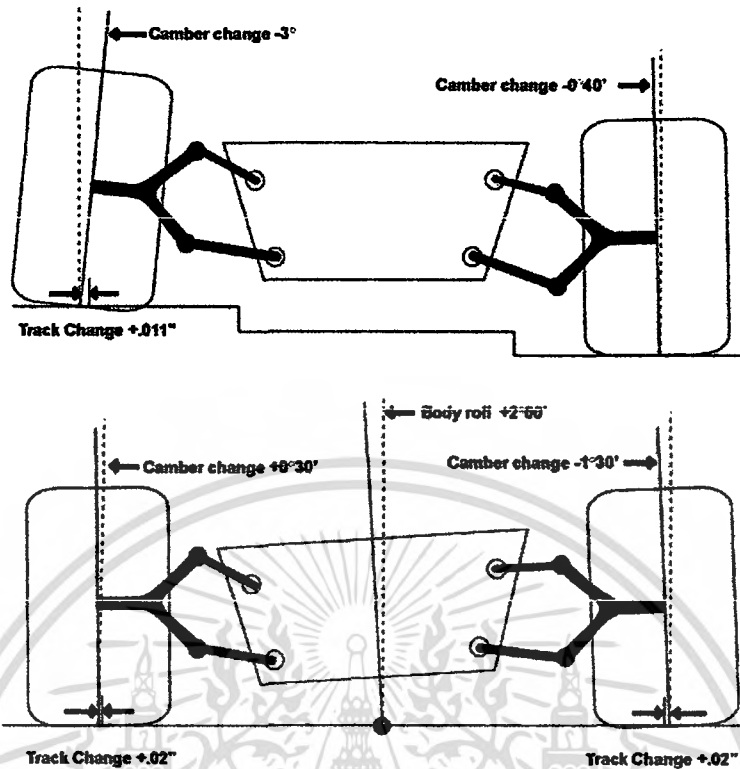


**Unequal length, parallel link double wishbones**

ที่มา [www.desctrides.com](http://www.desctrides.com)

รูปที่ 4-2 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันแต่ขนานกัน

4.1.3 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันและไม่ขนานกัน เป็นรูปแบบที่สามารถควบคุมมุมแคมเบอร์ได้ดีที่สุดและยังช่วยในเรื่องการควบคุมรวมไปถึงลดการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ขณะรถโคลง และเรายังสามารถออกแบบให้จุดศูนย์กลางการโคลงอยู่ ณ ตำแหน่งใดก็ได้



**Unequal length, non-parallel link double wishbones**

ที่มา [www.desertrides.com](http://www.desertrides.com)

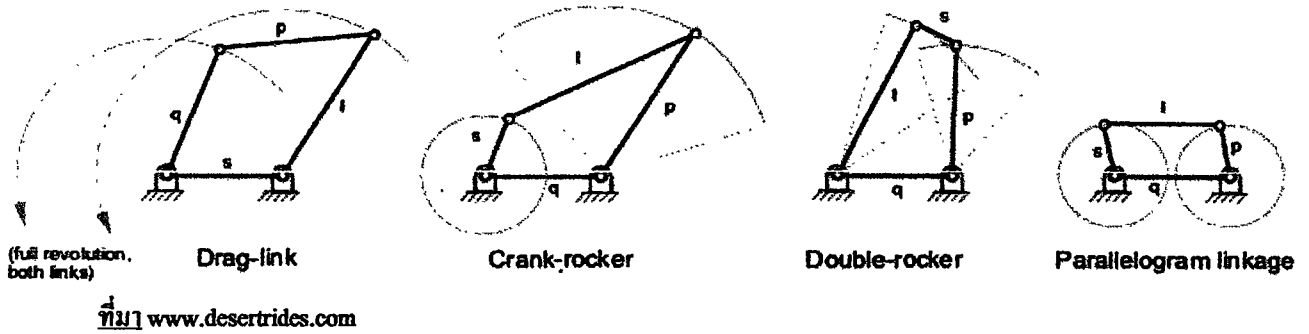
รูปที่ 4-3 ปีกนกบนและล่างยาวไม่เท่ากันและไม่ขนานกัน

#### 4.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบระบบช่วงล่าง

4.2.1 จุดศูนย์กลางชั่วขณะ (Instant center, IC) คือ จุดที่เปรียบเทียบเสมือนเป็นจุดศูนย์กลางร่วมในการเคลื่อนที่ร่วมกันอยู่ชั่วขณะหนึ่ง สามารถแสดงได้ด้วย ไฟร์บาร์ลิงค์เกดดังรูปที่ 4-4 ซึ่งเป็นการวางตัวของกลไก เมื่อการเคลื่อนที่ของก้านต่อไปเปลี่ยนไป จุดศูนย์กลางชั่วขณะก็จะเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย ซึ่งจำนวนลิงค์ของ ไฟร์บาร์ลิงค์เกด สามารถแทนส่วนประกอบของระบบปีกนกคู่ คือ

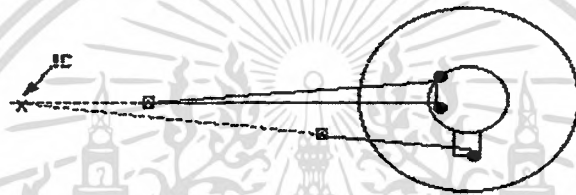
1. โครง
2. ปีกนกบน
3. คอมี้า
4. ปีกนกล่าง

82179



รูปที่4-4 ไฟร์บาลิงค์เกจ

ซึ่งการเคลื่อนที่ของลิงค์ที่ประกอบเป็นระบบช่วงล่างจะมีลักษณะของจุดศูนย์กลางช่วงขณะ ดังรูปที่

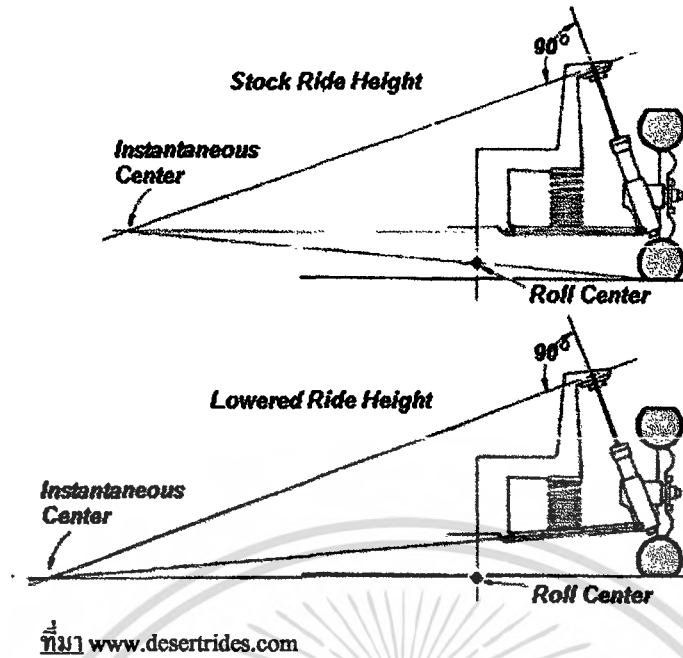


ที่มา www.desertrides.com

รูปที่4-5 จุดศูนย์กลางช่วงขณะ

รูปแบบของลิงค์จะส่งผล โดยตรงต่อตำแหน่งของจุดศูนย์กลางช่วงขณะ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางช่วงขณะมีผลต่อการเคลื่อนตัวของปีกนก ซึ่งมีผล โดยตรงต่อการควบคุมและเสถียรภาพของตัวรถ

4.2.2 จุดศูนย์กลางการ โคลง (Roll Center, RC) คือ จุดแทนตำแหน่งการ โคลงของตัวรถ ซึ่งล้อหน้าและหลังจะมีจุดศูนย์กลางการ โคลงต่างกัน การ โคลงของรถมีผลมาจากหลายๆสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นการวางตัวของปีกนก ตำแหน่งของหน้าสัมผัสยาง ในการออกแบบตำแหน่งของจุดศูนย์กลางการ โคลง มีความสำคัญมาก เพราะส่งผล โดยตรงต่อเสถียรภาพในการควบคุมรถ ซึ่งในการออกแบบเรากำหนดให้จุดศูนย์กลางการ โคลงอยู่ใกล้กับตำแหน่ง CG ของรถ ซึ่งส่งผลให้รถยนต์มีสมรรถนะ ในการเกาะยึดถนนมากขึ้นเมื่อทำการเข้าโค้ง

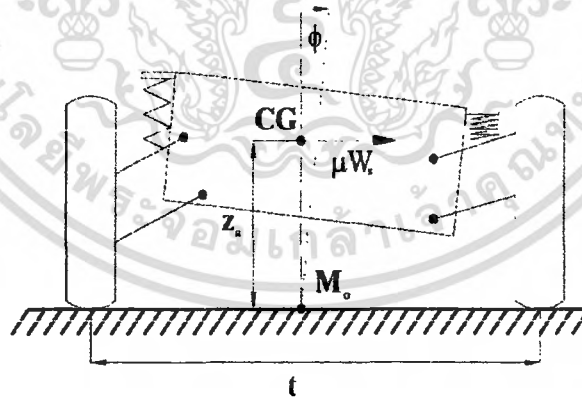


ที่มา [www.desertrides.com](http://www.desertrides.com)

รูปที่4-6 จุดศูนย์กลางการโคลง

การออกแบบให้ตำแหน่งการโคลงอยู่ต่ำส่งผลโดยตรงดังนี้

1. โมเมนต์ที่ทำให้รถโคลง (Rolling moment) มีค่าต่ำมาก
2. ลด Jacking affect ในขณะที่เลี้ยว
3. มุมแคมเบอร์เปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้น้ำยางสัมผัสกับถนนได้มาก การยึดเกาะถนนดีและช่วยยืดอายุการใช้งานของยางรถ



รูปที่4-7 ผลของตำแหน่งการโคลง

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

$$\text{โมเมนต์การโคลง} \quad M_R = FZ_R \quad \text{---- (4-2)}$$

โดยที่

$F$  = แรงที่เกิดขึ้นขณะรถกำลังเลี้ยว

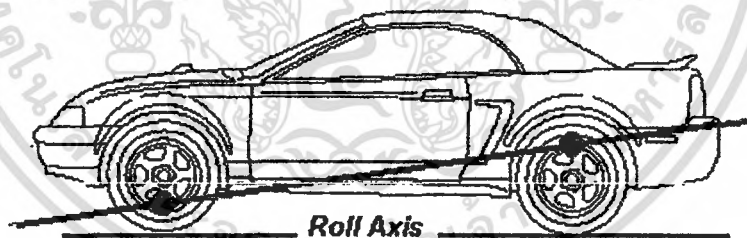
$m$  = มวลของรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. อนุญาตให้ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $v$  = ความเร็วของรถขณะเลี้ยว  
 $R$  = รัศมีความโค้งขณะที่รถเลี้ยว  
 $M_R$  = โมเมนต์การโคลง  
 $Z_R$  = ความสูงของจุดศูนย์กลางการโคลง

การออกแบบให้ตำแหน่งการโคลงอยู่ต่ำทำให้โมเมนต์การโคลงมีมาก เป็นข้อเสีย เพราะจะทำให้รถโคลงมากในขณะที่เข้าโค้ง แต่เราสามารถแก้ไขได้ด้วยการเสริมเหล็กกันโคลง แต่ถ้าเราออกแบบให้ตำแหน่งการโคลงอยู่สูง (ใกล้จุดศูนย์กลางความถ่วง (CG)) ถึงแม้จะลดโมเมนต์การโคลงลงได้ แต่ก็จะทำให้มุมแคมเบอร์เปลี่ยนแปลงมากแทน เพราะฉะนั้น ในการออกแบบเราจะพยายามให้ตำแหน่งการโคลงอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางความถ่วงที่สุด โดยที่มุมแคมเบอร์ต้องเปลี่ยนแปลงอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ แล้วใช้เหล็กกันโคลงเข้าช่วยลดการโคลงของตัวรถ แต่รถแข่งที่เราทำการออกแบบนั้นมีความเร็วไม่สูงมาก และมีการออกแบบให้จุด CG มีตำแหน่งที่ต่ำและใกล้เดียวกับจุด RC ของรถแข่ง จึงไม่จำเป็นที่ต้องมีเหล็กกันโคลง

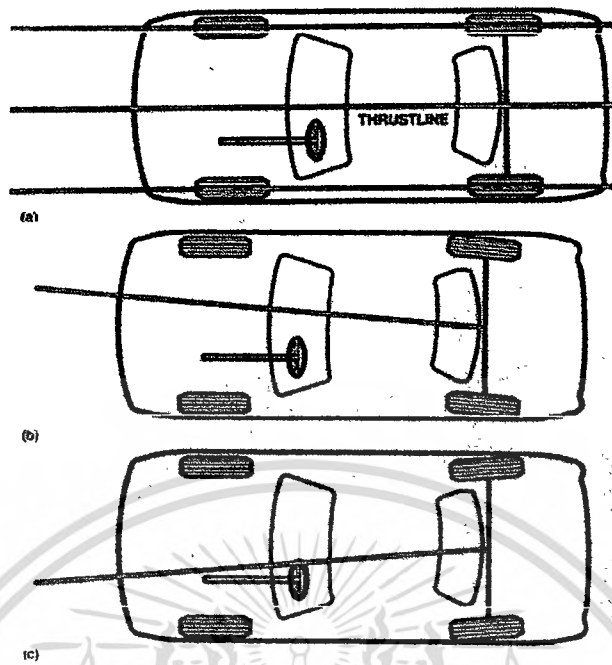
4.2.3 แนวแกนการโคลง (Roll axis) คือ แนวเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างจุดศูนย์กลางการโคลงล้อหน้ากับจุดศูนย์กลางการโคลงล้อหลัง ดังรูปที่ ซึ่งโดยทั่วไปแนวเส้นจะขนานกับผิวถนนเพื่อเสถียรภาพที่ดี และช่วยให้การกระจายตัวของแรงลงล้อเพื่อการยึดเกาะที่ดี



ที่มา [www.desertrides.com](http://www.desertrides.com)

รูปที่4-8 แนวแกนการโคลง

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



ที่มา [www.dcserttrides.com](http://www.dcserttrides.com)

รูปที่ 4-9 ลักษณะของ Thrust line ในกรณีต่างๆ

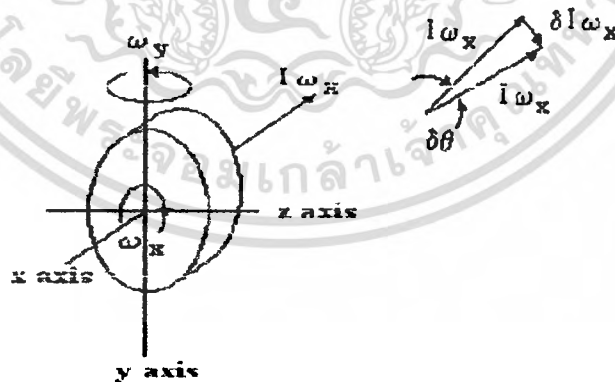
### 4.3 การออกแบบมุมล้อ

#### 4.3.1 การออกแบบมุมแคมเบอร์

เราออกแบบให้มุมแคมเบอร์เป็นลบ และเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 องศา เพราะเหตุผลดังนี้

1.ผลของแรงบิดใจโร (Gyroscopic Torque)

แรงบิดใจโรมีผลต่อพวงมาลัยดังรูปที่



ที่มา [www.dcserttrides.com](http://www.dcserttrides.com)

รูปที่ 4-10 ผลของแรงบิดใจโรที่ส่งถึงพวงมาลัย

Torque = rate of change of angular momentum

$$\begin{aligned} T &= I\omega_x\omega_y \frac{d\gamma}{dt} \\ &= I\omega_x\omega_y\omega_z \quad \text{----- (4-3)} \end{aligned}$$

ในขณะที่ทำการเลี้ยวจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โมเมนตัมเชิงมุมในแนวแกน y และแกน z ซึ่งในแกน y เป็นผลมาจากการเลี้ยวรอบจุดศูนย์กลางความโค้ง แกน z เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ขณะเลี้ยวจากสมการจะเห็นได้ชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์  $\frac{d\gamma}{dt}$  (ส่งผลต่อการเกิดแรงบิด ไจโร ซึ่งแรงบิด ไจโรนี้จะส่งต่อไปยังพวงมาลัย ทำให้เกิดปัญหาในการควบคุมรถ แต่การปรับแก้โดยในระบบขับเลี้ยวจะทำให้ Rack and Pinion มีความไวต่อการขับเลี้ยวทำให้การควบคุมรถแข่งดีขึ้น

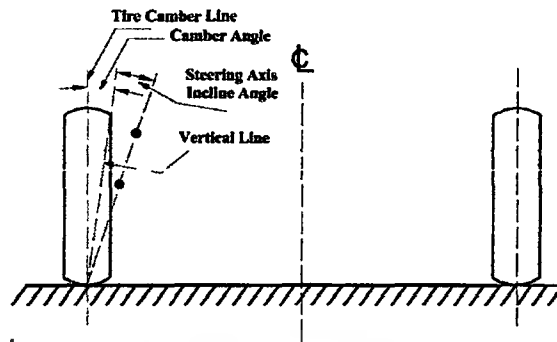
## 2. เพื่อให้รถแข่งเกาะถนน ได้ดีขึ้น

การที่มุมแคมเบอร์เป็นลบจะทำให้รถแข่งสามารถเกาะถนน ได้ดีขึ้นขณะเข้าโค้ง เนื่องจากการปรับมุมแคมเบอร์ให้เป็นลบนั้นจะส่งผลให้น้ำหนักของรถ ส่งไปที่ยางมากขึ้น จึงส่งผลให้รถมีการเกาะถนนที่ดีขึ้น แต่ก็มีข้อเสียคือ ขอบยางด้านในจะมีการสึกหรอเร็วกว่าปกติ และ ส่งผลให้ระบบช่วงล่างเสียหายได้มากกว่าปกติ แต่มีการปรับแก้ข้อเสียเหล่านั้น โดย เพิ่มค่านิจสปริง)k (เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักรถได้มากขึ้น

### 4.3.2 การออกแบบมุมเอียงลูกหมากปีกนก (Steering axis inclination)

เราออกแบบมุมเอียงลูกหมากปีกนกเพื่อ

1. ลดมุมแคมเบอร์ลงเพื่อ ไม่ให้เกิดผลเสียจากมุมแคมเบอร์ที่เป็นบวกมากเกินไป เพราะจะทำให้หน้ายางสัมผัสผิวถนน ไม่เต็มที่
2. เพื่อให้หน้าหนักของรถลงสู่จุดศูนย์กลางยางมากที่สุด
3. ทำให้พวงมาลัยเบาลงเนื่องจากรัศมีลูที่ลดลง
4. ทำให้พวงมาลัยคืนตัวขณะเลี้ยว



ที่มา [www.dcsctrtdcs.com](http://www.dcsctrtdcs.com)

รูปที่ 4-11 มุมเอียงลูกหมากปีกนก

4.4 การออกแบบระบบกันสะเทือน

1. การหามุมแคมเบอร์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์รูปร่าง (Geometry)



รูปที่ 4-12 รูปร่างของระบบช่วงล่างที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากรูปที่ จะวิเคราะห์หามุมแคมเบอร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อระยะยกของล้อเปลี่ยนแปลงโดยใช้สมการ

$$\gamma = \frac{0.5P_1z^2 + Q_1z}{h + V_1 + U_1z} \quad \text{--- (4-4)}$$

โดยที่

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงระยะยก(Ride camber) โดยหาค่าอนุพันธ์ของสมการที่ 1 เทียบกับระยะยก (z)

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{P_1 z + Q_1 - \gamma U_1}{h + v_1 + U_1 z} \quad \text{----- (4-5)}$$

2. การเปลี่ยนแปลงความกว้างของล้อ (Track change)

หาการเปลี่ยนแปลงความกว้างของล้อรถเมื่อระยะยกของล้อเปลี่ยนแปลงซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้สมการ

$$y_3 = \frac{1}{h} \left[ \frac{P_2 z^2}{2} + Q_2 z - \gamma (U_2 z + V_2) \right] \quad \text{----- (4-6)}$$

โดยที่

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

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

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

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

$$\frac{dy_3}{dz} = \frac{1}{h} \left[ zP_2 + Q_2 - \gamma U_2 - \frac{d\gamma}{dz} (U_2 z + V_2) \right] \quad \text{----- (4-7)}$$

โดยค่า

$y_3$  = ระยะยกตัวของรถ

$Z$  = ความกว้างของล้อ

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์สมรรถนะในการขับขี่ (Ride Analysis)

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

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นมีผลต่อพลศาสตร์ของรถยนต์เป็นอย่างมาก โดยจากการศึกษาพบว่า การสั่นสะเทือนในรถยนต์นั้นเกิดจะขึ้นจากหลายสาเหตุด้วยกัน ซึ่งการออกแบบระบบช่วงล่างที่ดีนั้นจะต้องทำให้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นน้อยที่สุดเพื่อให้ได้สมรรถนะในการขับขี่ที่ดีที่สุด

#### 5.1 แหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน (Excitation sources)

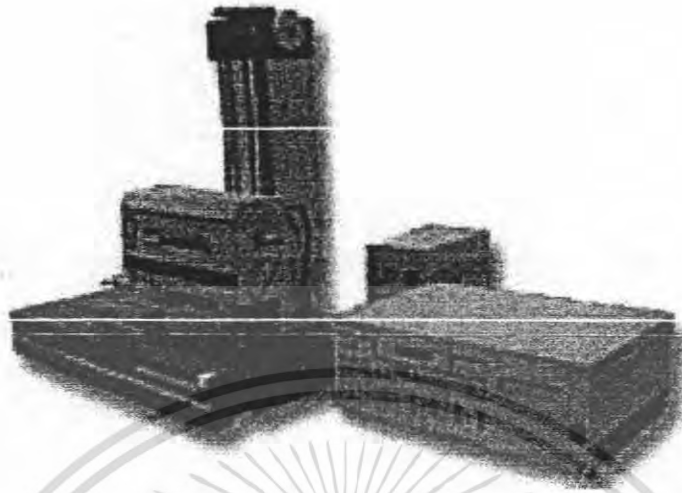
รถถูกทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ได้จากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งแต่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ความขรุขระของพื้นถนน และแหล่งกำเนิดแบบ ออน-บอร์ด (On-Board source) ซึ่งแหล่งกำเนิดแบบ ออน-บอร์ด นั้นจะเป็นแหล่งกำเนิดที่เกิดจากวัตถุหมุน ซึ่งรวมถึง ล้อ/ยาง, ระบบส่งกำลัง และ เครื่องยนต์

##### 5.1.1 ความขรุขระของพื้นถนน

ความขรุขระของพื้นถนนคือ ลักษณะความสูงต่ำของพื้นถนนที่รถเคลื่อนที่ไปโดยลักษณะของพื้นถนนจะอยู่ในประเภท “บรอด-แบนด์ แรนดอมซิกแนล (Broad-Band random signal)” ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ โดยที่ส่วนใหญ่จะใช้ “ฟังก์ชันเพาเวอร์สเปกตรอลแดนซิตี (Power Spectral Density, PSD)” ในการอธิบาย

ความขรุขระของถนนก็เหมือนกับสัญญาณแบบสุ่ม (Random signal) ที่ลักษณะความสูงต่ำที่วัดตามความยาวของพื้นถนน สามารถแยกออกเป็นอนุกรมไซน์ (series of sine wave) ที่แปรตามแอมพลิจูด (amplitude) และ เฟส (phase) โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Transform) ซึ่งการพล็อตกราฟระหว่างแอมพลิจูด กับช่วงของความถี่ ก็คือ PSD ซึ่งช่วงของความถี่จะแสดงเป็น “เวฟนัมเบอร์ (Wave number)” มีหน่วยเป็น จำนวนรอบ/เมตร

ความสูงต่ำของพื้นถนนสามารถวัดโดยใช้เครื่องวัดความหยาบของพื้นผิว (Profilometers) หรือ เครื่องตรวจสอบความสูงต่ำของพื้น (Level Surveys)



รูปที่ 5-1 เครื่องวัดความหยาบของพื้นผิว

### 5.1.2 ล้อและยาง

ล้อและยาง ในอุดมคติจะถือว่าเป็นลักษณะอ่อนและนุ่มสามารถรองรับแรงที่เกิดจากความขรุขระของถนนและการสั่นสะเทือนของตัวรถได้ดี แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของกระบวนการผลิตของล้อ, ยาง, แกนล้อ, เบรค และ ส่วนอื่นๆของระบบที่มีการหมุนซึ่งปัญหาส่วนหลักๆนั้นเกิดจาก 3 สิ่งนี้คือ

#### 1. ความไม่สมดุลของมวล (Mass imbalance)

ความไม่สมมาตรจะทำให้เกิดความ ไม่สมดุล ซึ่งผลที่เกิดขึ้นก็คือจะมีแรงที่ไม่สมดุล (Imbalance force) มากกระทำต่อล้อ ซึ่งแรงนี้แปรผันตรงกับมวล ไม่สมดุล, รัศมีจากศูนย์กลางการหมุน และ กำลังสองของความเร็วเชิงมุม ดังสมการที่ (1)

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

เมื่อ

$F_i$  = แรงที่ไม่สมดุล

$mr$  = ขนาดของความไม่สมดุล(มวลคูณรัศมี)

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุม(เรเดียนต่อวินาที)

ความไม่สมดุลของมวลจะทำให้แกนหมุนนั้น ไม่สมมาตรทำให้เกิดความ ไม่สมดุลทางพลศาสตร์และความไม่สมดุลทางพลศาสตร์ จะทำให้เกิดแรงซึ่งทำให้โมเมนต์ในแนวแกนขนานกับล้อ (Overturning moment) และ หมุนรอบแกนรัศมีของล้อ (Aligning Torque) เปลี่ยนแปลง

ความไม่สมดุลทางพลศาสตร์มีความสำคัญมากต่อพวงมาลัยเพราะถ้าขณะเลี้ยว แล้วเกิดมีการ สั่นเกิดขึ้นมากๆ อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้

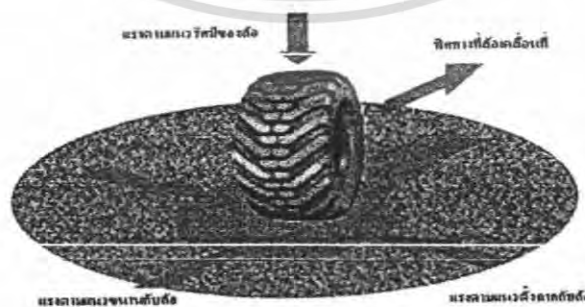
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ความผันแปรของขนาด (Dimensional variation)

ความผันแปรของขนาดที่ล้อและที่เพลจะทำให้เกิดความไม่สมมาตร ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุของการสั่น

## 3. ความผันแปรของความแข็ง (Stiffness variation)

ยางรถยนต์เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ดังนั้นเราจึงโมเดลให้ยางมีลักษณะสปริงที่เรียงตัวในรัศมี ดังรูปที่ 5-2 ฉะนั้นความผันแปรของความแข็งจึงเป็นผลให้เกิดการสั่น



รูปที่ 5-4 แสดงแรงที่กระทำกับล้อ

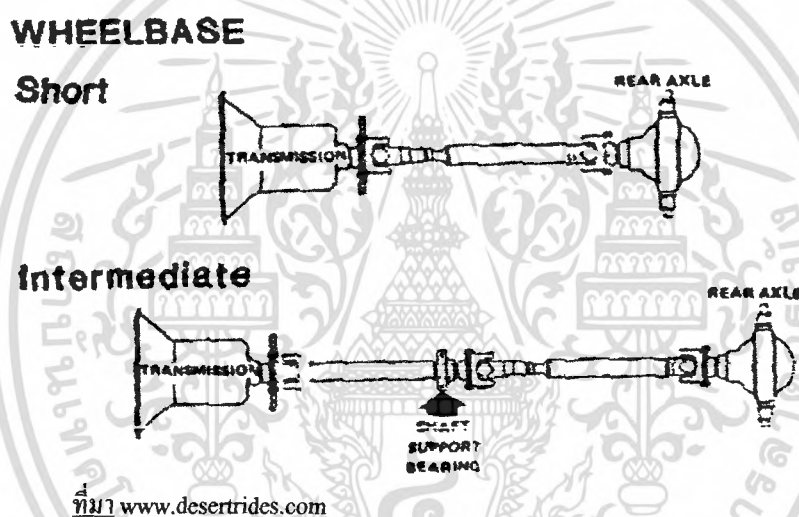
## รูปที่ 5-3 แสดงแรงที่กระทำกับล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 ระบบส่งกำลัง

แหล่งกำเนิดของการสั่นอย่างที 3 คือ ระบบส่งกำลัง ซึ่งการสั่นนี้เกิดมาจากการหมุนของตัวเอง ระบบส่งกำลังจะประกอบด้วย เพลากลาง (Drive shaft), เกียร์รีดักชัน (Reduction gear), เกียร์ดิฟเฟอเรนเชียล (Differential gear) และเพลาขับ (Axle shaft) ระบบส่งกำลังประกอบด้วยหลายส่วน ดังนั้นจึงต้องมีการยึดกันไว้ด้วย สปาย และจุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล ซึ่งอุปกรณ์เชื่อมต่อเหล่านี้เป็นต้นเหตุทำให้เกิดการสั่นสะเทือน

เพลากลางจะมีลักษณะดังรูปที่ 5-4 การสั่นที่ระบบส่งกำลังนี้จะเกิดขึ้นจาก 2 สาเหตุคือ ความไม่สมดุลของเพลากลาง และ แรงคู่ควบหรือ โมเมนต์ ที่เกิดขึ้นที่จุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล ที่เพลากลาง



รูปที่ 5-4 แสดงรูประบบส่งกำลัง

#### 1. ความไม่สมดุลของมวล

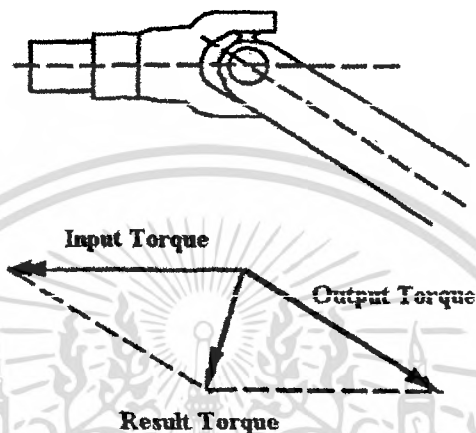
ความไม่สมดุลของเพลาเกิดจากปัจจัยทั้ง 5 ข้อต่อไปนี้มารวมกันคือ

- ความไม่สมมาตรของชิ้นส่วนที่มีการหมุน
- เพลาไม่อยู่ตรงกลางของหน้าแปลน
- เพลาที่มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง
- มีเคลียร์เรนซ์ (Clearance) อยู่ทำให้เพลาเกิดการเอียงศูนย์
- เพลาเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นจึงมีการ โกงเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. จุดเชื่อมต่อ

การใช้จุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล ในระบบส่งกำลัง ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น เนื่องจากจุดเชื่อมต่อมีการทำมุมกันทำให้มีแรงบิดลัพธ์เกิดขึ้น ซึ่งขนาดและทิศทางของแรงบิดลัพธ์นี้หาได้จากการบวกเวกเตอร์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นบนจุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซลดังรูปที่ 5-5



ที่มา [www.desertrides.com](http://www.desertrides.com)

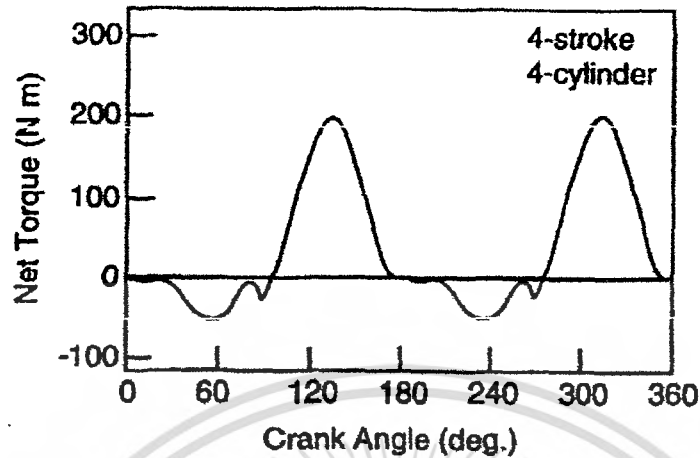
รูปที่ 5-5 แสดงการบวกเวกเตอร์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นบนจุดเชื่อมต่อแบบยูนิเวอร์แซล

ขนาดของแรงบิดลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับแรงบิดที่เกิดขึ้นบนจุดเชื่อมต่อ และมุมของจุดเชื่อมต่อ ดังนั้นถ้าแรงบิดที่เกิดขึ้นขณะที่มีการหมุนของระบบส่งกำลัง ไม่คงที่ก็จะทำให้ทั้งความเร็วของจุดเชื่อมต่อและแรงบิดลัพธ์ที่เกิดขึ้น ไม่คงที่เช่นกันจึงทำให้การสั่นเกิดขึ้น

### 5.1.4 เครื่องยนต์

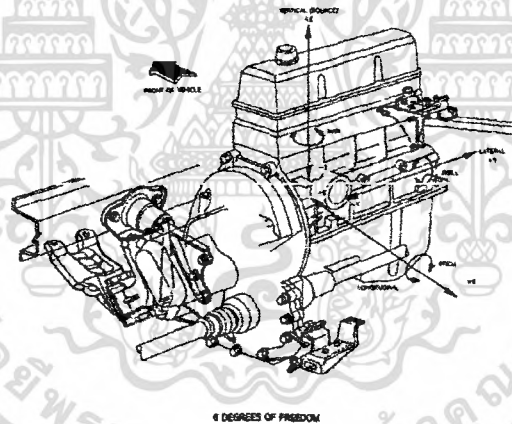
น้ำหนักของเครื่องยนต์ร่วมกับระบบขับเคลื่อนจะเป็นน้ำหนักส่วนใหญ่ของรถยนต์ดังนั้นเมื่อเครื่องยนต์มีการสั่นก็จะมีผลทำให้รถทั้งคันมีการสั่นไปด้วย

ลูกสูบจะส่งกำลังเป็นวัฏจักร (Cycle process) ดังนั้นแรงบิดที่ส่งไปที่เพลาข้อเหวี่ยง (crankshaft) ก็จะมีขนาดไม่คงที่ด้วยเช่นกัน โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลาข้อเหวี่ยงนั้นจะมีลักษณะเป็นจังหวะดังรูปที่ 5-6



ที่มา [www.carguru.com](http://www.carguru.com)

รูปที่ 5-6 กราฟแสดงแรงบิดที่ส่งออกจากเพลาช้อเหวี่ยง เครื่องยนต์จะมีการสั่นใน 6 ทิศทางคือ ตามแนวแกน 3 แกน และตามแนวแกนหมุนอีก 3 แกน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-7



ที่มา [www.carguru.com](http://www.carguru.com)

รูปที่ 5-7 แสดงทิศทางที่เกิดการสั่นในเครื่องยนต์

## 5.2 คุณสมบัติในการตอบสนองของรถยนต์ (Vehicle Response Properties)

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของรถยนต์ จะสนใจความสัมพันธ์ของอินพุต-เอาต์พุต (Input-Output) ซึ่งอินพุตในที่นี้หมายถึงการกระตุ้นที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนในหัวข้อที่แล้ว ส่วนเอาต์พุตก็คือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับตัวรถ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูด (amplitude) ของเอาต์พุตกับอินพุตจะเรียกว่า “เกน (gain)”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การวิเคราะห์หาค่าความแข็งของสปริงโดยใช้โปรแกรมคัมส่ว

เป็นการวิเคราะห์หาค่าความแข็งของสปริง โดยใช้ฟูลคาร์โมเดลซึ่งโมเดลนี้จะประกอบด้วย น้ำหนักเหนือสปริง น้ำหนักใต้สปริง ค่าความแข็งของยาง ซึ่งมีค่าดังนี้

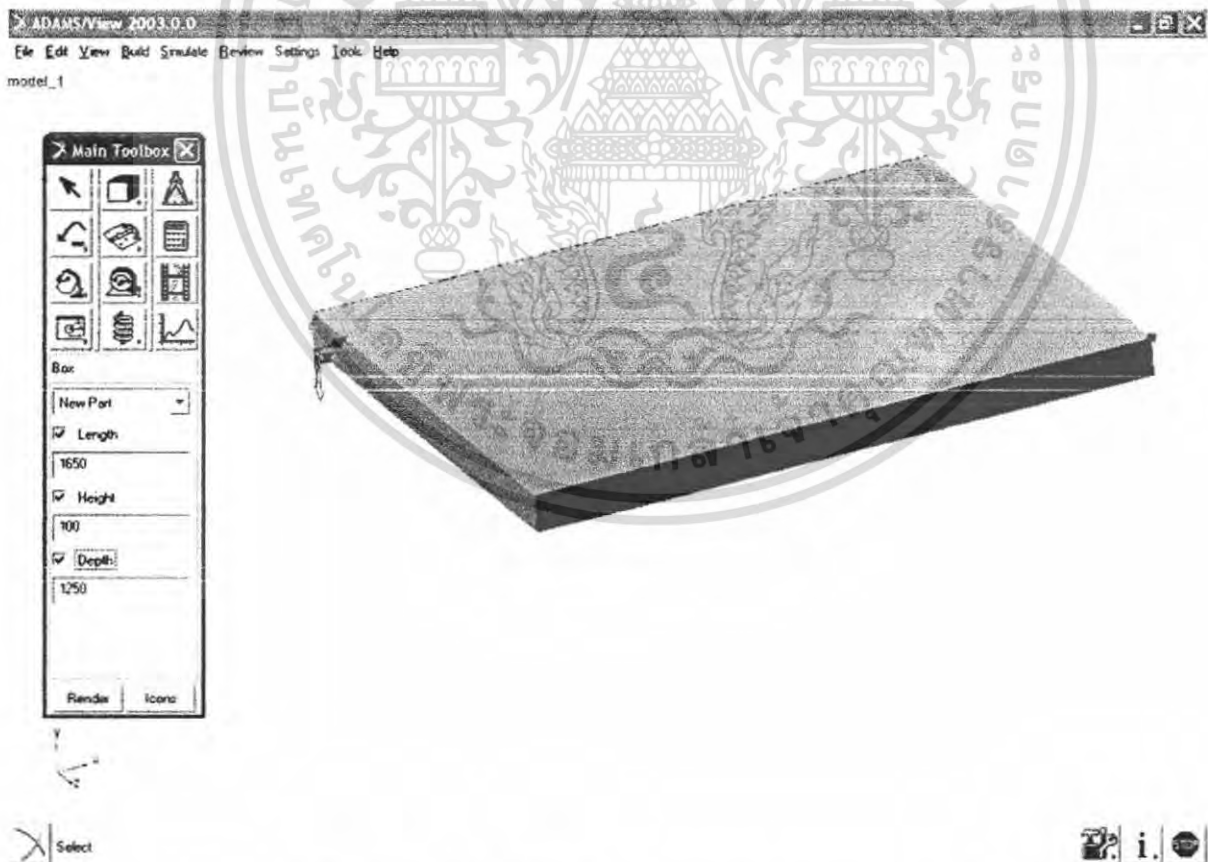
1. น้ำหนักเหนือสปริง 250 กิโลกรัม
2. น้ำหนักใต้สปริง 100 กิโลกรัม (ข้างละ 25 กิโลกรัม)
3. ค่าความแข็งของสปริงใส่ค่าตามตาราง
4. ค่าความแข็งของยาง 190 นิวตันต่อมิลลิเมตร

ขั้นตอนการสร้างฟูลโมเดลมีดังนี้

1) สร้างรูปกล่องขนาด  $1650 \times 100 \times 1250$  โดยมีความหมายดังนี้ ความยาวของรถ  $\times$  ความสูงของโครง  $\times$  ความกว้างของรถ ดังรูปที่ 5-8

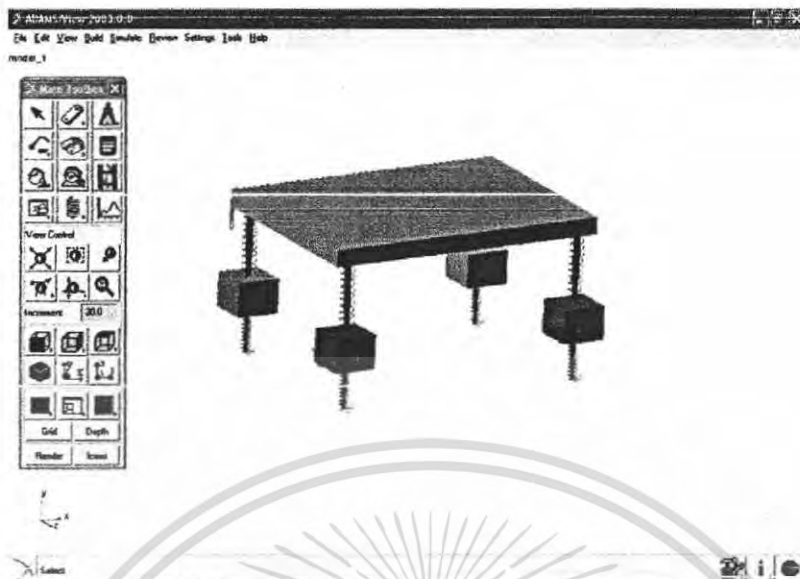
2) คลิกที่ Icon  เพื่อสร้างสปริงที่มุมของสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะได้ดังรูปที่ 5-9

3) คลิกขวาที่สปริงจะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์โมดิไฟสปริง – แคมเปอร์ (Modify spring – damper Dialog box) ดังรูปที่ 5-10

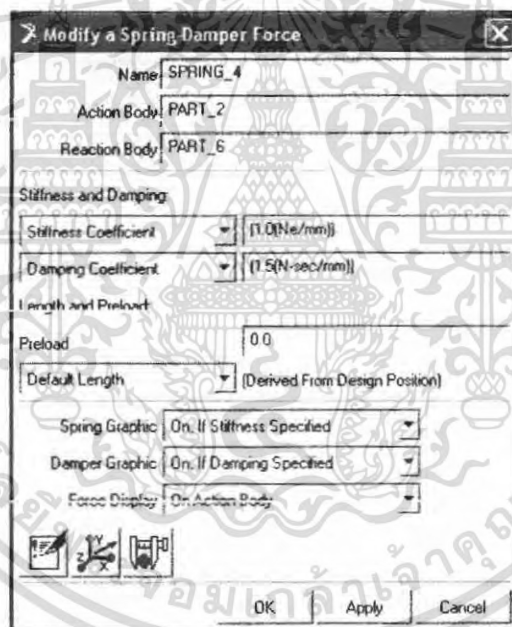


รูปที่ 5-8 แสดงรูปสี่เหลี่ยมที่เป็นตัวแทนของน้ำหนักเหนือสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-9 แสดงฟูลคาร์โมเดลที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 5-10 แสดงไดอะล็อกบ็อกซ์ โมดิฟายสปริง-แดมเปอร์

4) จากนั้นเปลี่ยนค่าความแข็งของสปริงดังตาราง เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติในแนวแกนพิท และแนวแกนโรล

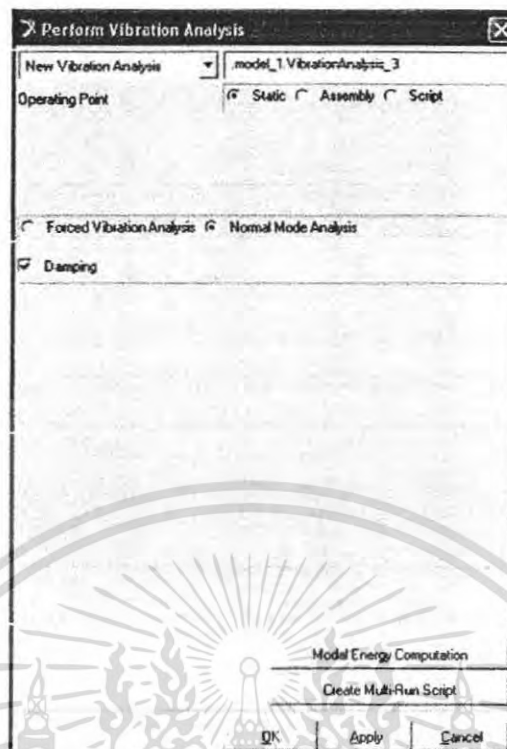
5) จากนั้นไปที่ Simulation < ADAM/Vibration < Vibration Analysis จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์เพอร์ฟอร์มไวเบรชันอะนาไลซิส (Perform Vibration Analysis Dialog box) ดังรูปที่ 5-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Front	Rear
K(N/mm)	K(N/mm)
32	38
36	38
38	38
32	39
36	39
39	39
32	40
36	40
40	40
32	41
36	41
40	41
32	42
36	42
40	42
32	43
36	43
40	43
32	44
36	44
40	44
32	45
36	45
40	45
44	45

ตารางที่ 5-1 แสดงค่าความแข็งของสปริงที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติ

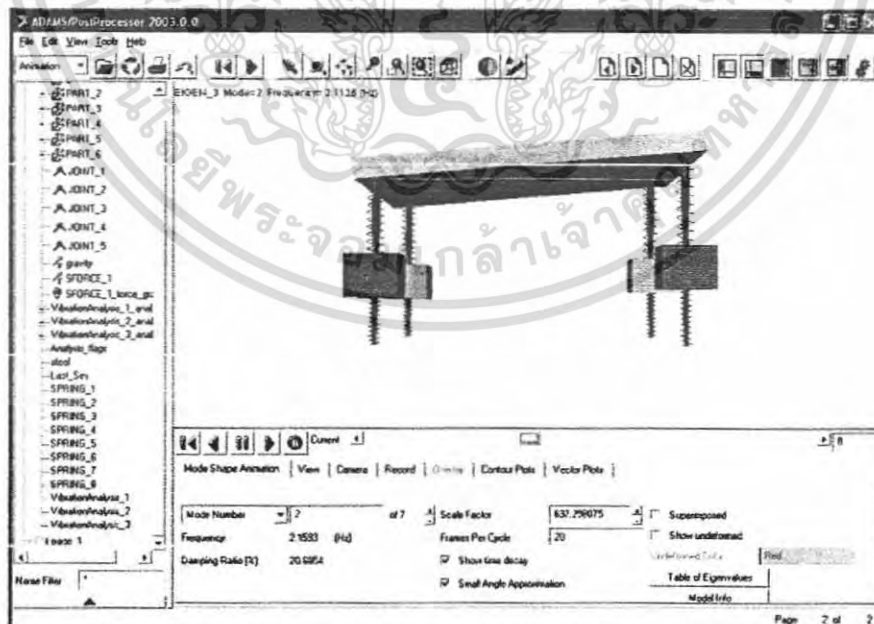
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-11 แสดงไอคอนเลือกบ็อกซ์เพอร์ฟอรั่มไวเบรชันอะนาไลซิส

6) จากนั้นเลือกที่ นอร์มอลโหมดอะนาไลซิส (Normal Mode Analysis) จากนั้นกดที่ OK แล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณ

7) จากนั้นเลือกที่ Review < Post processing จะปรากฏหน้าจอของ ADAMS/Post Processor ดังรูปที่ 5-12



รูปที่ 5-12 แสดงหน้าจอ ADAMS/Postprocessor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) ความถี่ที่เห็นอยู่บนหน้าจอคือความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีการหน่วง ( $\omega_d$ ) ส่วนความถี่ที่วางไว้คือค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่ไม่มีมีการหน่วง ( $\omega_n$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีการหน่วงกับความถี่ธรรมชาติของระบบที่ไม่มีมีการหน่วงเป็นไปดังสมการ

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{---- (5-1)}$$

9) จากนั้นบันทึกค่า  $\omega_n$  ลงไปในตารางจะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5-1

Front	Rear	พวเมธีธรรมชาติของ มุม Pitch	พวเมธีธรรมชาติ ของมุม Roll
K(N/mm)	K(N/mm)	$f_{nP}$ (Hz)	$f_{nR}$ (Hz)
32	38	2.0887	2.1529
36	38	2.1374	2.2148
38	38	2.1607	2.2442
32	39	2.1004	2.1625
36	39	2.1448	2.2241
39	39	2.1833	2.2677
32	40	2.1119	2.1713
36	40	2.16	2.2332
40	40	2.2054	2.2903
32	41	2.1233	2.1812
36	41	2.1711	2.2422
40	41	2.2162	2.2994
32	42	2.1345	2.1904
36	42	2.182	2.2511
40	42	2.2269	2.308
32	43	2.1455	2.1995
36	43	2.1928	2.2599
40	43	2.2374	2.3165
32	44	2.1564	2.2084
36	44	2.2034	2.2685

ตารางที่ 5-2 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 ขั้นตอนการออกแบบสปริง

##### 1. เลือกวัสดุที่ใช้ในการสร้างสปริง โดยพิจารณาจากตารางคุณสมบัติของวัสดุดังนี้

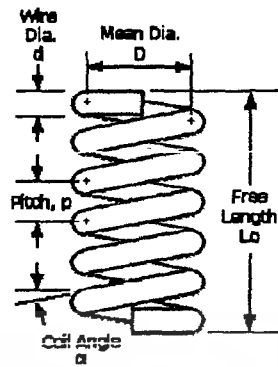
ชื่อวัสดุ	เกรด	คุณสมบัติ
Music wire	UNS 10850 AISI 1065 ASTM A228-51	โลหะชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด และเป็นวัสดุที่นิยมใช้สร้างสปริง โดยมี Tensile strength ที่สูงมาก และยังสามารถทนต่อสภาวะที่มีแรงกระทำซ้ำได้ดี
Oil Tempe rated wire	UNS G10650 AISI 1065 ASTM 229-41	วัสดุชนิดนี้ใช้ทำสปริงต่างๆ ไป โดยมักใช้ในกรณีที่ไม่สามารถใช้ Music wire ได้เนื่องจากมีขนาดใหญ่ ไม่เหมาะกับการใช้ทำ ไช้ค และรับแรงกระแทกอย่างกระทันหัน แต่เหมาะใช้กับการทำเป็น Coil spring
Hard- draw wire	UNS G10660 AISI 1066 ASTM 227-47	วัสดุชนิดนี้ราคาถูกที่สุด มักจะใช้งานที่ไม่ได้ให้ความสำคัญของ อายุการใช้งาน, ความแม่นยำ และ การเปลี่ยนทิศทาง
Chrome-vanadium	UNS G61500 AISI 6150 ASTM 231-41	สามารถใช้ในงานที่ต้องการความต่อต้านการล้าสูง ใช้ในงานที่ต้องการความคงทนสูงสามารถรองรับแรงกระแทกอย่างกระทันหัน (Impact Load) ได้เป็นอย่างดี
Chrome-silicon	UNS G92540 AISI 9254	วัสดุชนิดนี้นิยมใช้ทำสปริงที่ต้องทนต่อความเครียดสูง และต้องการให้มีอายุการใช้งานที่นาน และรองรับ Shock Loading

ตารางที่ 5-3 แสดงคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ

จากการพิจารณาวัสดุที่เลือกใช้เป็นโลหะอัลลอยด์ Chrome-vanadium wire A232 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถใช้ในงานที่ต้องการความต่อต้านการล้าสูง
- ใช้ในงานที่ต้องการความคงทนสูง
- สามารถรองรับแรงกระแทกอย่างกระทันหัน (Impact Load) ได้เป็นอย่างดี

ด้วยคุณสมบัติต่างๆของโลหะอัลลอยด์ชนิดนี้ ซึ่งตรงกับคุณสมบัติที่ต้องการใช้ในการสร้างสปริงเพื่อรองรับแรงกระแทกที่ถูกส่งมาจากล้อ ไปยังตัวรถ ทำให้เลือกใช้วัสดุชนิดนี้



รูปที่ 5-13 ลักษณะของสปริง  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสปริง

$$d = \left[ \frac{8KD^3 N_a}{G} \right]^{1/4} \text{----- (5-2)}$$

ความต้านแรงดึง  $S_u = \frac{A}{d^m}$

$S_y = 0.78S_u$  (เหล็กกล้าคาร์บอนดึงเย็น)

ความต้านการครากเนื่องจากการบิด

$$S_{sy} = 0.577S_y \text{----- (5-3)}$$

การหาระยะพิทช์

$$p = \frac{(L_0 - d)}{N_a} \text{----- (5-4)}$$

ระยะยุบมากที่สุด

$$\delta_{max} = L_0 - L_s \text{----- (5-5)}$$

$$L_s = (N_a + 1)d \text{----- (5-6)}$$

$$F_{max} = k \times \delta_{max} \text{----- (5-7)}$$

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} \text{----- (5-8)}$$

$$C = \frac{D}{d} \text{----- (5-9)}$$

$$\tau_{max} = \frac{8KF_{max}D}{\pi d^3} \text{----- (5-10)}$$

ค่าความปลอดภัย  $n_s = \frac{S_{ys}}{\tau} \text{----- (5-11)}$

$n_s \geq 1.2$  (สปริงจะไม่เกิดการโค้งงอ)

ตัวอย่างการคำนวณการออกแบบสปริง

$$d = \sqrt[4]{\frac{8 \times 36000 \times 0.055^3 \times 8.5}{77.2 \times 10^9}}$$

$$d = 8.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

จาก

$$S_{ut} = \frac{2005}{8.5^{0.188}}$$

ได้

$$S_{ut} = 1400 \text{ เมกะปาสคาล}$$

$$S_y = 0.78 \times 1400$$

$$S_y = 1092 \text{ เมกะปาสคาล}$$

$$S_{ys} = 0.577 \times 1092$$

$$S_{ys} = 630 \text{ เมกะปาสคาล}$$

Spring index

$$C = \frac{D}{d} = \frac{55}{8.5} = 6.47$$

ผลจากความโค้งของสปริง

ความเค้นเฉือนของวอฮล์ (Wahl correction factor)

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C}$$

$$K = \frac{4(6.47) - 1}{4(6.47) - 4} + \frac{0.615}{6.47}$$

$$K = 1.23$$

$$\text{Pitch } p = \frac{(120 - 8.5)}{8.5}$$

$$p = 13.1 \text{ มิลลิเมตร}$$

Maximum deflection

$$\delta_{\max} = L_o - L_s$$

$$L_s = (8.5 + 1)8.5 = 80$$

$$\delta_{\max} = 120 - 80$$

$$\delta_{\max} = 40 \text{ มิลลิเมตร}$$

Maximum force

$$F_{\max} = 36000 \times (40 \times 10^{-3})$$

$$F_{\max} = 1440 \text{ นิวตัน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Maximum shear stress in the wire

$$\tau_{\max} = 1.23 \frac{8 \times 1440 \times 55 \times 10^{-3}}{\pi \times (8.5 \times 10^{-3})^3}$$

$$\tau_{\max} = 404 \text{ เมกะปาสคาล}$$

ดังนั้น

$$n_s = \frac{630}{404} = 1.56$$

เมื่อพิจารณาแล้ว ค่า  $n_s$  ที่ได้ออกมา มีค่ามากกว่า 1.2 ทำให้สปริงไม่เกิดการโค้งงอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบช่วงล่าง

ในการออกแบบระบบช่วงล่างมีตัวแปรที่เราต้องคำนึงหลายตัวแปร เช่น มุมแคมเบอร์ มุมแคสเตอร์ มุมโทเป็นต้น ความเปลี่ยนแปลงของมุมต่างๆเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมและเสถียรภาพต่อการขับขี่ของรถแข่ง แต่ในการทดสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้ทำได้ยาก จึงนำโปรแกรมอดัมส์คาร์ (ADAMS/Car) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โดยเรามีวิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมดังนี้

#### 6.1.สร้างแบบจำลองของรถแข่ง

6.1.1. Template: เป็นการกำหนดรูปแบบของชิ้นส่วน จุดเชื่อมต่อ เช่น รูปแบบระบบช่วงล่างแบบ Double wishbone ซึ่งเป็นการกำหนดรูปแบบการวางตัวของชิ้นส่วน โดยที่ยังไม่ได้กำหนดคุณสมบัติต่างๆลงไป ดังรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 Template

6.1.2. Subsystem: เป็นการจำลองที่มีการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่งของชิ้นส่วน ขนาดของชิ้นส่วน ความแข็งของสปริง เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองที่มีการกำหนดค่าตัวแปรนี้เป็นส่วนสำคัญของขั้นตอนการสร้างรถแบบฟลูโอบีคัล ดังรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 Subsystem

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการสร้างระบบชิ้นส่วนย่อยนี้จะมีขั้นตอนดังนี้

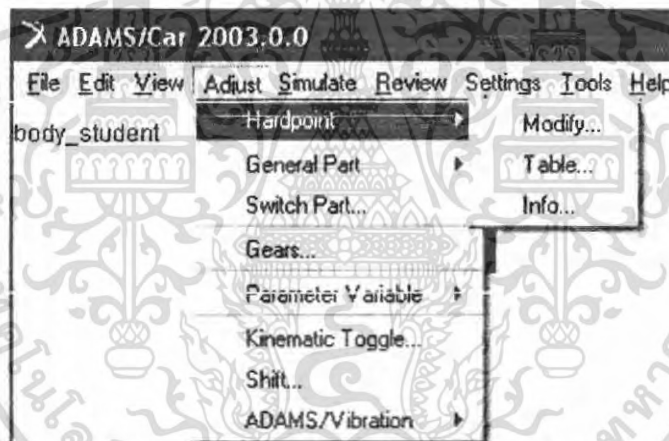
### 1. ปรับตั้งค่า ฮาร์ดพอยท์

ในระบบชิ้นส่วนย่อย ตำแหน่งของแต่ละจุดบนชิ้นส่วนย่อยเราจะแทนด้วย ฮาร์ดพอยท์ซึ่งตำแหน่งของฮาร์ดพอยท์นี้จะใช้เป็นตำแหน่งในการปรับตั้งค่าต่างๆบนชิ้นส่วนย่อย โดยการปรับค่าฮาร์ดพอยท์นี้เราสามารถทำได้ใน Standard interface โดยเลือกไปที่ adjust menu โดยเราสามารถปรับตั้งฮาร์ดพอยท์ได้ 3 วิธี คือ

Modify เป็นการแต่งค่าฮาร์ดพอยท์ จาก menu ที่ปรากฏ ซึ่งเราสามารถเลือกตำแหน่งที่เราจะปรับแก้ค่าฮาร์ดพอยท์ได้โดยตรง

Table เป็นการปรับตั้งค่าฮาร์ดพอยท์ จากตาราง ซึ่งในตารางจะมีจุดฮาร์ดพอยท์ทุกจุดของชิ้นส่วนย่อยปรากฏอยู่

Info เป็น dialog box ที่แสดงระบบชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเราสามารถแก้ไขค่าจุดฮาร์ดพอยท์ทุกจุดได้จาก dialog box นี้ดังรูปที่ 6-3



รูปที่ 6-3 แสดงภาพการปรับตั้งค่า ฮาร์ดพอยท์

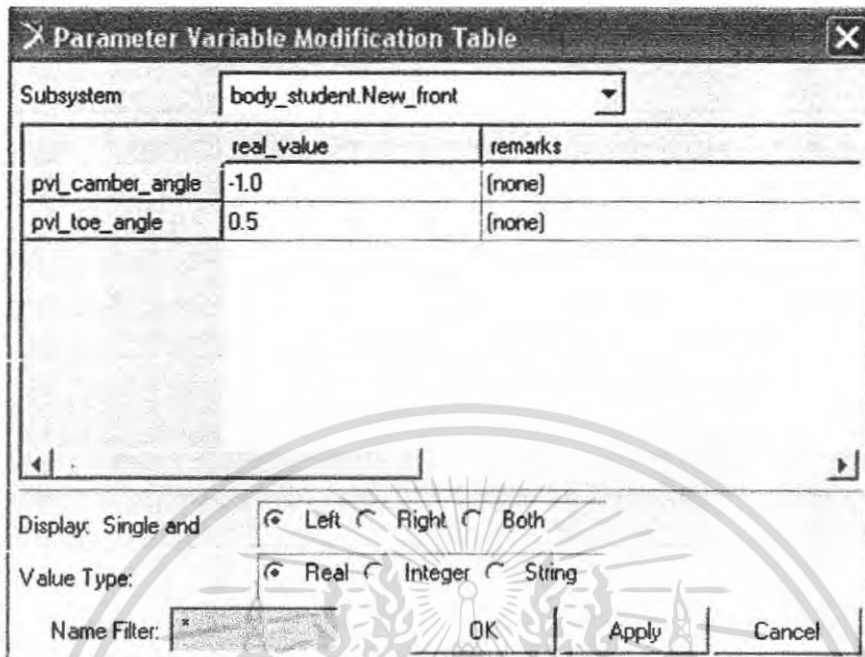
### 2. ปรับตั้งค่า Parameter variable

ในระบบชิ้นส่วนย่อยเราสามารถปรับแก้ค่าตัวแปรต่างๆที่สร้างขึ้นจากขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนต้นแบบ ซึ่งค่าตัวแปรบางค่า เช่น ระยะโท โปรแกรมออคัมส์คาร์จะทำการตั้งค่าพื้นฐานไว้โดยอัตโนมัติเพราะค่าเหล่านั้นมีความจำเป็นในขั้นตอนการวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามเราก็สามารถปรับแก้ค่าเหล่านี้ได้ โดยวิธีการปรับแก้เราสามารถทำได้โดยเข้าไปที่ Adjust menu แล้วเลือก parameter variable จะพบ

Modify เป็น dialog box ที่ให้เราเลือกตัวแปรที่ต้องการแก้ไข แล้วทำการแก้ไขค่าลงใน dialog box นั้น

Table คือตารางที่รวบรวมค่าตัวแปรทุกตัวของระบบชิ้นส่วนย่อยไว้ภายใน ซึ่งเราจะสามารถแก้ไขค่าของตัวแปรทุกตัวได้ในตารางนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



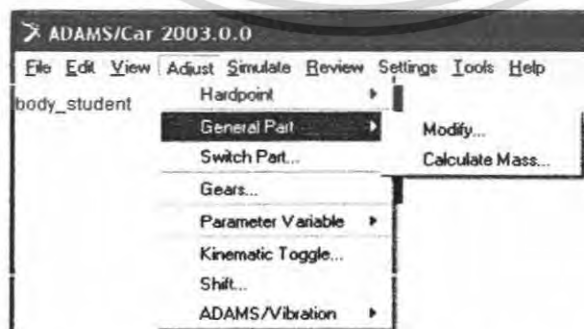
รูปที่ 6-4 แสดงการปรับตั้งค่า parameter

### 3. ปรับตั้งค่า Mass Properties

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

Modify จะปรากฏ dialog box ให้เราเลือกชิ้นส่วน เพื่อทำการกำหนดค่ามวลและคุณสมบัติซึ่งเราสามารถกดเมาส์ด้านขวาบนชิ้นส่วนที่ต้องการกำหนดหรือแก้ไขค่า เพื่อให้ dialog box นี้ปรากฏขึ้น

Calculate Mass โดยโปรแกรมอัตโนมัติจะทำการคำนวณค่ามวลของชิ้นส่วนตามค่าคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ถ้ารูปแบบถูกแก้ไขใน Standard interface จากค่าที่ถูกตั้งไว้เป็นพื้นฐานในขั้นตอนสร้างชิ้นส่วนต้นแบบ ค่ามวลของชิ้นส่วนนั้นจะไม่ถูกแก้ไขในทันที ซึ่งค่ามวลจะถูกแก้ไขในฟังก์ชัน Calculate mass

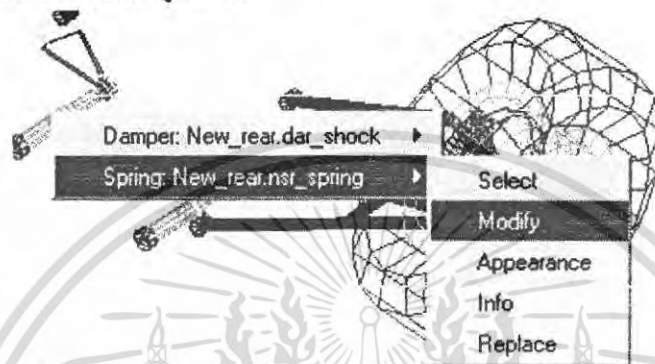


รูปที่ 6-5 แสดงการปรับตั้งค่าคุณสมบัติของมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

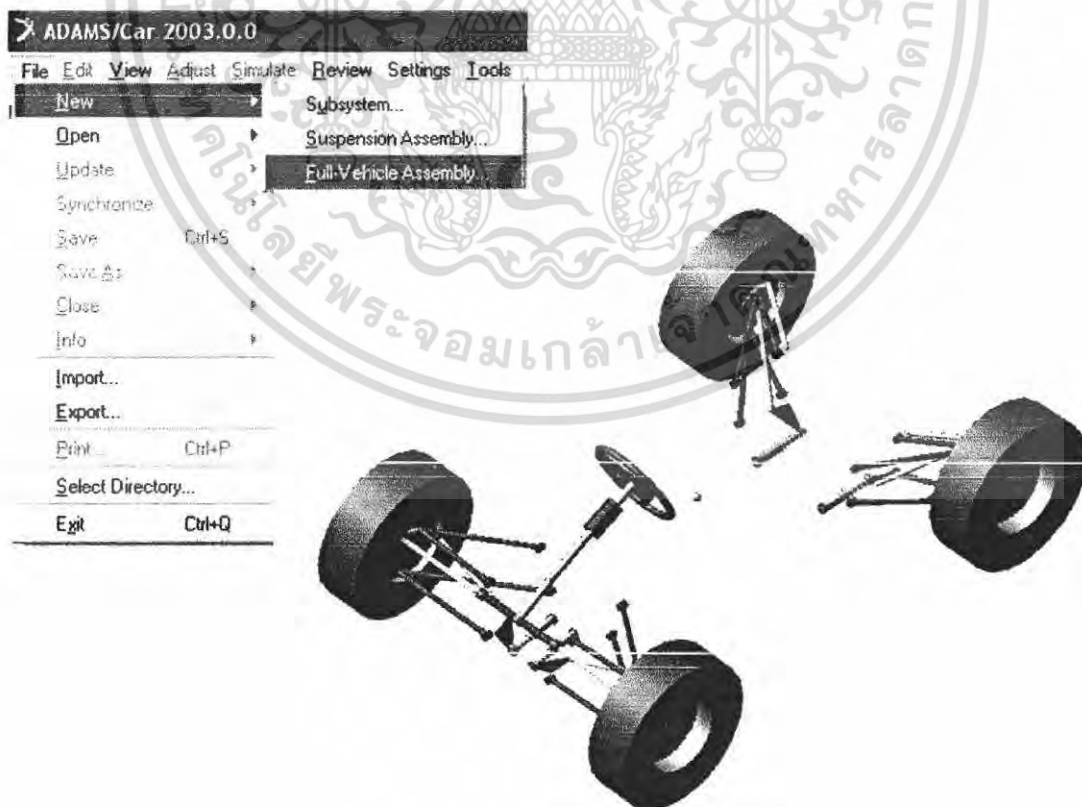
#### 4. กำหนดค่าสปริงและแคมเปอร์

สปริงกับแคมเปอร์ถูกสร้างขึ้นในขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนต้นแบบและใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆ จากตำแหน่งฐานข้อมูล (Database) ที่เรากำหนดโดยใน Standard interface เราสามารถกำหนดค่าคุณสมบัติให้สปริงและแคมเปอร์ได้ โดยการคลิกขวาที่สปริงหรือแคมเปอร์แล้วเลือกคำสั่ง modify ก็จะปรากฏ dialog box ให้เรากำหนดคั่งรูปที่ 6-6



รูปที่ 6-6 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติให้สปริงและแคมเปอร์

6.1.3. Assembly: เป็นการนำชิ้นส่วนย่อยมาประกอบเข้าอย่างสมบูรณ์ ในการสร้าง Full-Vehicle Assembly เราจะสร้างใน Standard Interface โดยเข้าไปที่ File menu > New > Full-Vehicle Assembly ดังรูปที่ 6-7



รูปที่ 6-7 ส่วนประกอบฟูล โมเดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 การจำลองด้วยโปรแกรม อัดัมส์คาร์

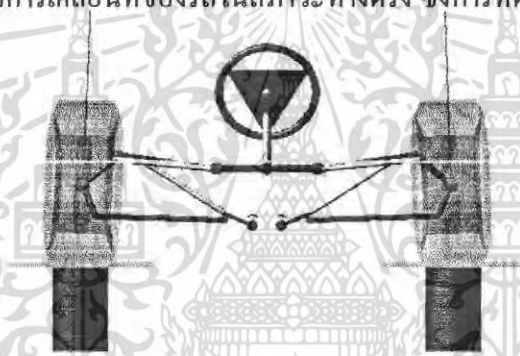
ในโปรแกรม อัดัมส์คาร์ (ADAMS/Car) สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของรถในสภาวะต่างๆ เพื่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจ ซึ่งเราสามารถแบ่งการจำลองการเคลื่อนที่ในโปรแกรมได้ 2 แบบคือ

### 6.2.1. การจำลองทางโคเนติกส์

เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ โดยใช้แทนทดสอบ เพื่อคุณลักษณะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมข้อต่อต่างๆ โดยการจำลองทางโคเนติกส์นี้จะแบ่งออกเป็น

#### 1.การจำลองโดยให้ล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงพร้อมกัน(Parallel Wheel Travel)

เป็นการทดสอบในกรณีที่รถเคลื่อนที่ขึ้นเนิน ขึ้นสะพาน ล้อทั้งสองจะพยายามยกตัวขึ้นหรือลงพร้อมกัน ซึ่งเป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถในสภาวะทางตรง ซึ่งการทดสอบจะมีลักษณะดังรูป 6-8

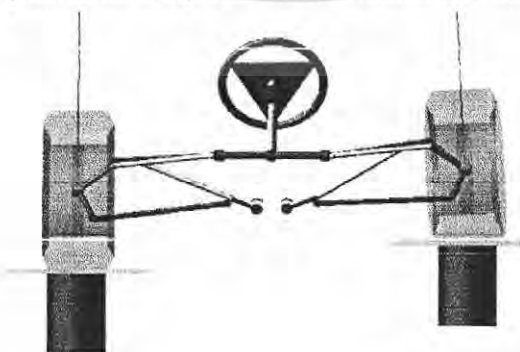


รูปที่ 6-8 แสดงภาพจำลอง ล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงพร้อมกัน

#### 2.การจำลองให้ล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตรงกันข้าม (Opposite Wheel Test)

เป็นการทดสอบในกรณีที่รถเข้าโค้ง การตกหลุม ล้อจะเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตรงกันข้าม โดยการทดสอบจะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงมุม

ล้อต่างๆ เช่น มุมแคมเบอร์ มุมแคสเตอร์ ซึ่งมุมเหล่านี้ส่งผลต่อเสถียรภาพและการควบคุมรถโดยตรง ดังรูปที่ 6-9

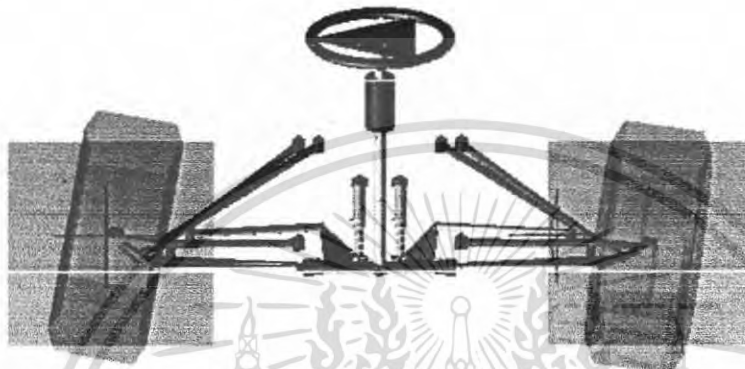


รูปที่ 6-9 แสดงภาพจำลอง ล้อเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตรงกันข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การทดสอบระบบขับเดียว (Steering test)

เป็นการทดสอบที่จำลองสภาพการเลี้ยวของรถ โดย โปรแกรมจะทำการหมุนพวงมาลัยจาก ระยะเริ่มต้น ไปจนถึงระยะสุดท้ายตามที่กำหนดและเรายังสามารถทดสอบการเลี้ยวขณะที่ระบบช่วงล่าง กำลังขยับตัวอยู่ก็ได้ซึ่งทำให้สถานะที่เราทดสอบใกล้เคียงกับสถานะจริงมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 6-10

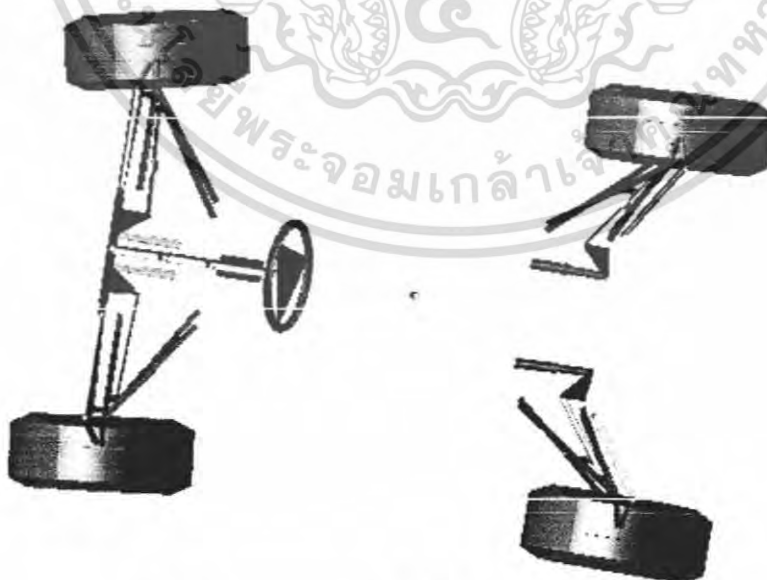


รูปที่ 6-10 แสดงภาพ การทดสอบระบบขับเดียว

#### 6.2.2. การจำลองทางพลศาสตร์

##### 1. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน (Single Lane Change)

เป็นการทดสอบที่จำลองการเลี้ยวของรถในการเปลี่ยนช่องถนน ซึ่งการทดสอบนี้จะบอกถึง การเปลี่ยนแปลงของมุมแคสเตอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของมุมดัดนี้ส่งผลต่อการคืนตัวของล้อ ดังรูปที่ 6-11



รูปที่ 6-11 แสดงภาพการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนช่องถนน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การจำลองระบบขับเคลื่อนโดยให้รถเลี้ยวตามความเร็วเชิงมุมที่กำหนด (Ramp Steer)

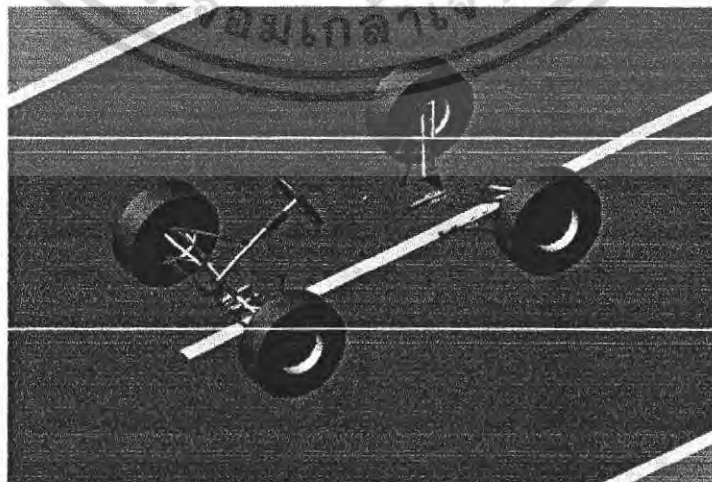
เป็นการทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยให้รถเลี้ยวด้วยความเร็วเชิงมุมที่เรากำหนด เพื่อดูเสถียรภาพของรถในขณะที่รถเลี้ยว ดังรูปที่ 6-12



รูปที่ 6-12 แสดงภาพการขับเคลื่อนตามความเร็วเชิงมุมที่กำหนด

## 3. การจำลองการเบรกของรถ (Braking Test)

เป็นการทดสอบการเบรกของรถในสภาวะที่กำหนด ซึ่งการทดสอบนี้จะบอกถึงแรงที่กระทำในขณะที่เบรก เพื่อนำค่าแรงกระทำนี้ไปวิเคราะห์หาความเสียหายด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ต่อไป รวมถึงไปถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อต่างๆด้วย ดังรูปที่ 6-13



รูปที่ 6-13 แสดงภาพการเบรกของรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

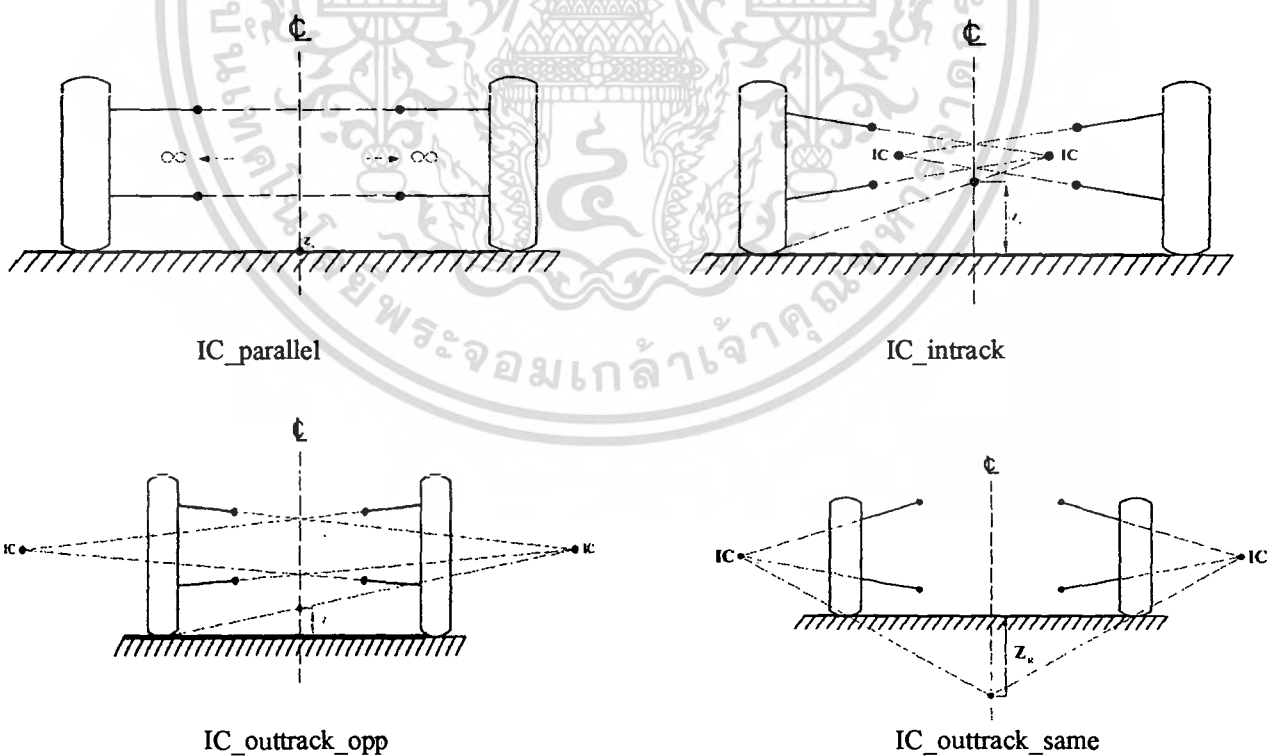
### 6.3 ผลการจำลองทางคิเนเมติกส์

การออกแบบระบบช่วงล่างให้มีเสถียรภาพตอบสนองการขับขี่ที่ความเร็วสูงได้อย่างดี จากการศึกษาพบว่า มีตัวแปรที่ส่งผลต่อเสถียรภาพและการควบคุมอยู่หลายตัวแปร เช่น มุมแคมเบอร์ มุมแคสเตอร์ มุมโท จุดศูนย์กลางการโคลง เป็นต้น ซึ่งผลของตัวแปรแต่ละตัวก็แตกต่างกันไป โดยเราจะทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ โดยวิธีการจำลองทางคิเนเมติกส์และวิธีการจำลองทางพลศาสตร์ ดังนี้

#### 1. การจำลองเพื่อหารูปแบบของ Template

ในขั้นตอนแรกนี้เป็นการหารูปแบบของปีกนกโดยเรากำหนดรูปแบบของปีกนกที่จะทำการทดสอบตามตำแหน่งของศูนย์กลางช่วงขณะ ดังนี้

- IC\_parallel คือ รูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงขณะอยู่ที่อนันต์
- IC\_intrack คือ รูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงขณะอยู่ภายใน แทร็ก
- IC\_outtrack\_opp คือ รูปแบบปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงขณะอยู่นอก แทร็ก ในฝั่งตรงข้ามกับปีกนก
- IC\_outtrack\_same คือ รูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงขณะอยู่นอก แทร็ก ในฝั่งเดียวกับปีกนก

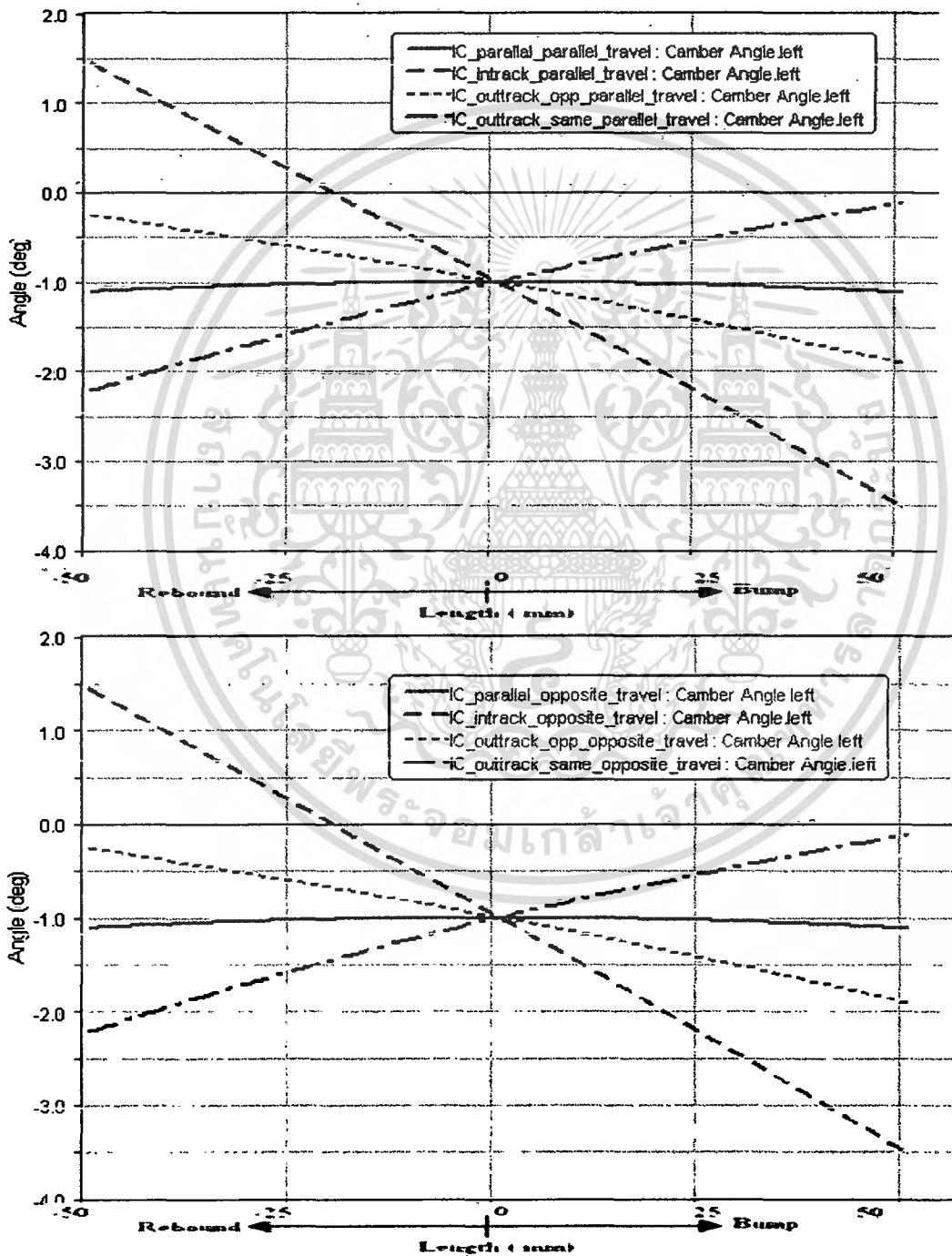


รูปที่ 6-14 แสดงรูปแบบของปีกนกในลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการจำลองเพื่อหารูปแบบของปีกนกนี้เราจะใช้การจำลองทางคิเนแมติกส์ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ จุดศูนย์กลางการ โคจร ระยะ โทและการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ ซึ่งในการทดสอบเราจะใช้แบบจำลองการเคลื่อนของล้อแบบที่ล้อเคลื่อนที่ขึ้นลงพร้อมกัน และแบบจำลองการเคลื่อนที่ขึ้นลงไม่พร้อมกัน ตามลำดับดังนี้

1. มุมแคมเบอร์

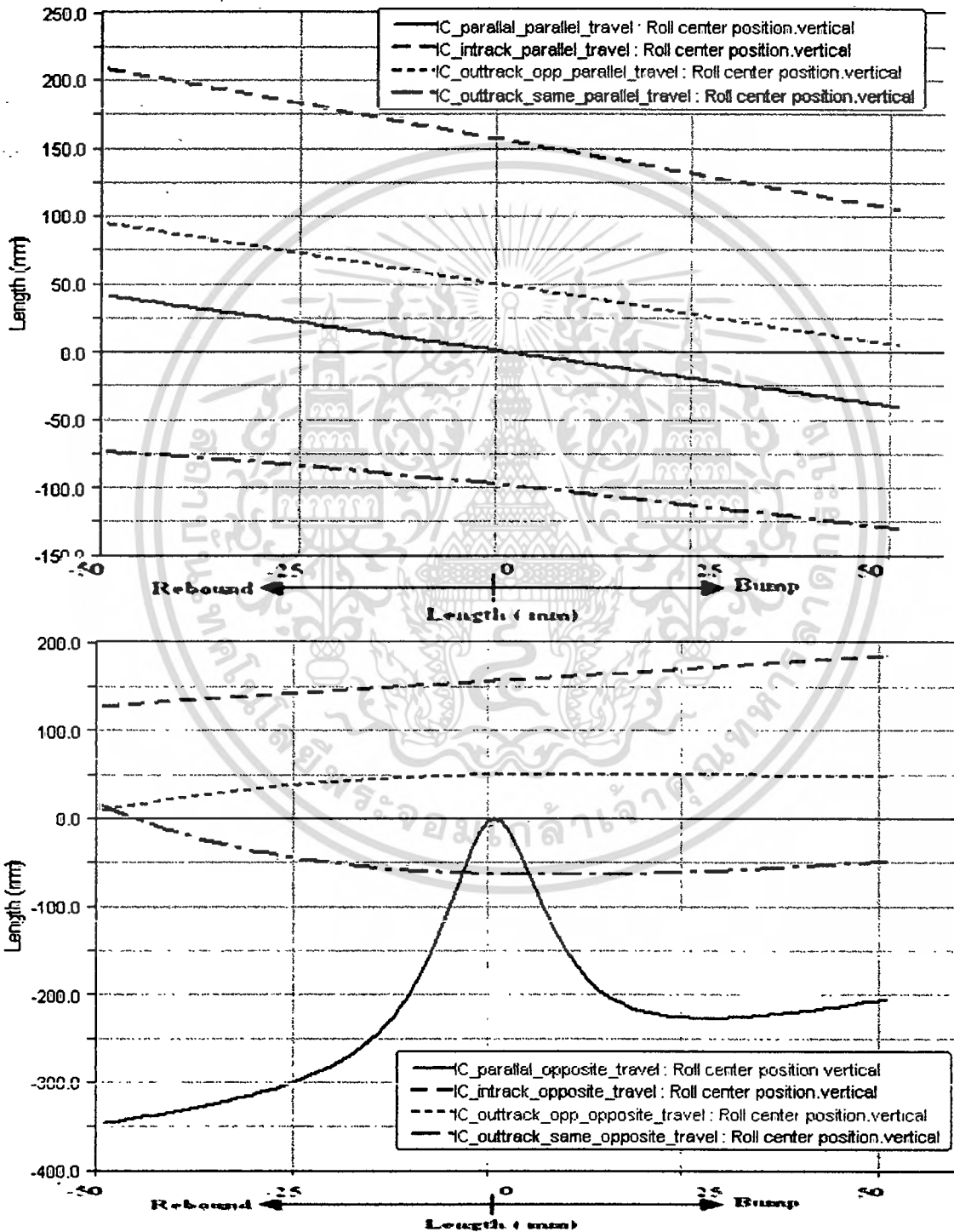


กราฟที่ 6-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-1 ผลการทดสอบในขณะที่ล้อยกตัวสูงขึ้นมุมแคมเบอร์จะเปลี่ยนแปลงเป็นลบมากขึ้นและในขณะที่ล้อลดต่ำลงมุมแคมเบอร์จะเปลี่ยนแปลงเป็นบวกมากขึ้น ซึ่งจะเห็นว่ารูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางช่วงขณะอยู่ในแทรคให้เสถียรภาพต่อรถแข่ง

2. จุดศูนย์กลางการโคลง

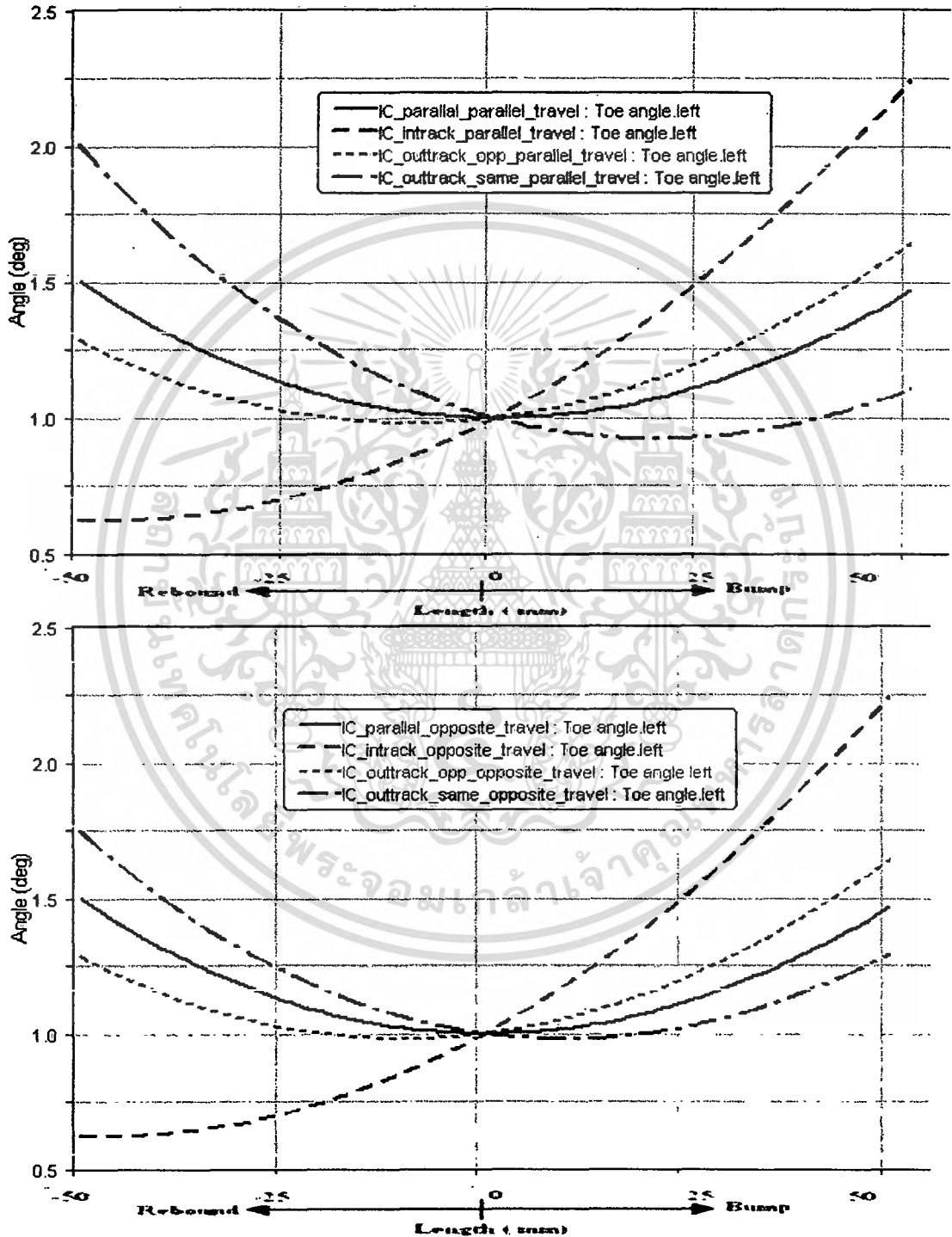


กราฟที่ 6-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-2 จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่ารูปแบบของปีกนกที่จุดศูนย์กลางชั่วขณะอยู่ในแนวกึ่ง มีจุดศูนย์กลางการ โคกลงสูงสุดซึ่งอยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางรถทำให้เกิดการ โคกลงน้อยที่สุด

3. มุมโท

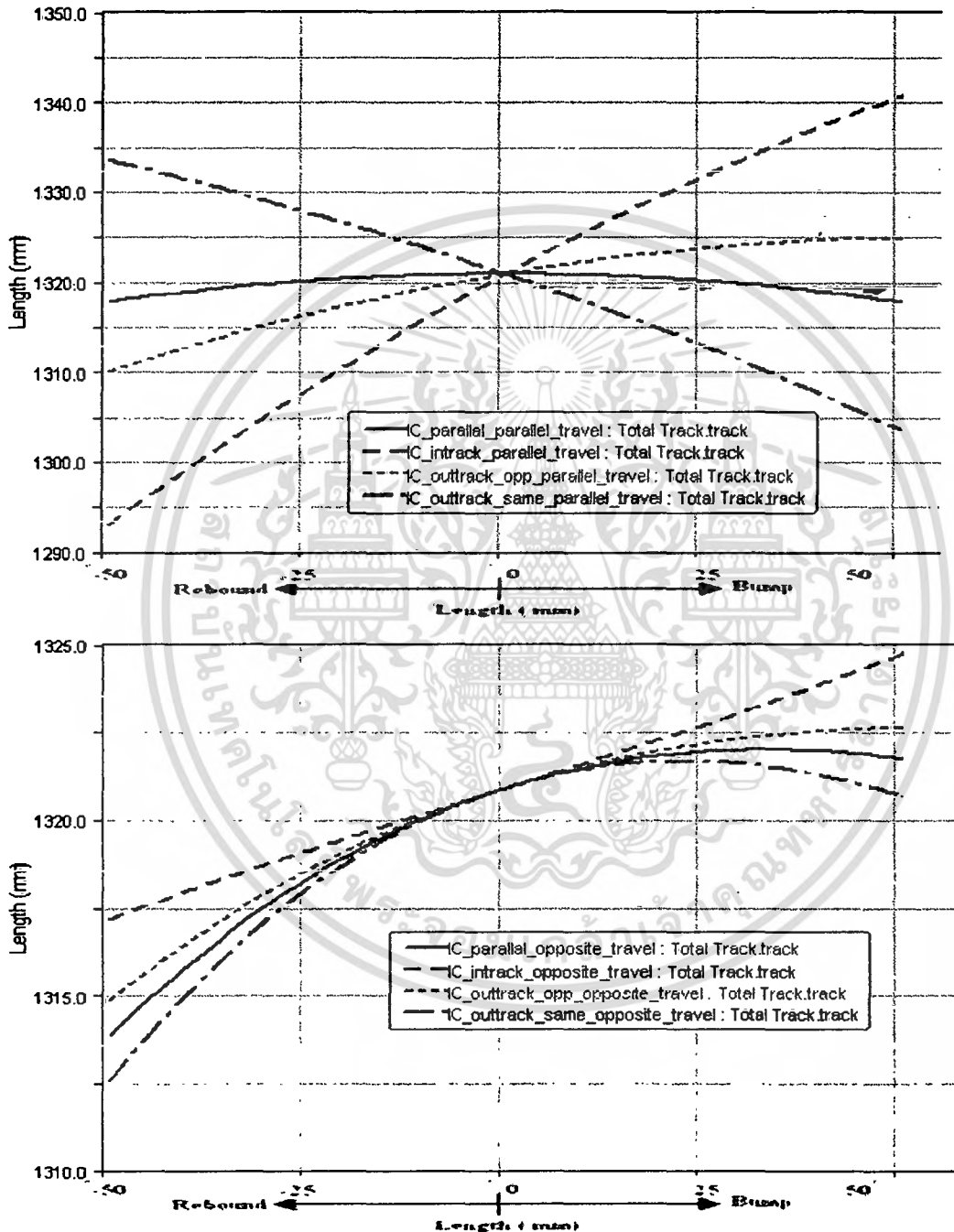


กราฟที่ 6-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-3 จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า รูปแบบของปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางช่วงขณะ  
อยู่นอกแอ่งค้ำตรงข้าม มีการเปลี่ยนแปลงมุมโทน้อยสุด

#### 4. แทร็ก



กราฟที่ 6-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงแทร็ก

จากกราฟที่ 6-4 จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า รูปแบบปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางช่วงขณะอยู่ที่  
อนันต์ มีการเปลี่ยนแปลงแทร็ก น้อยที่สุด

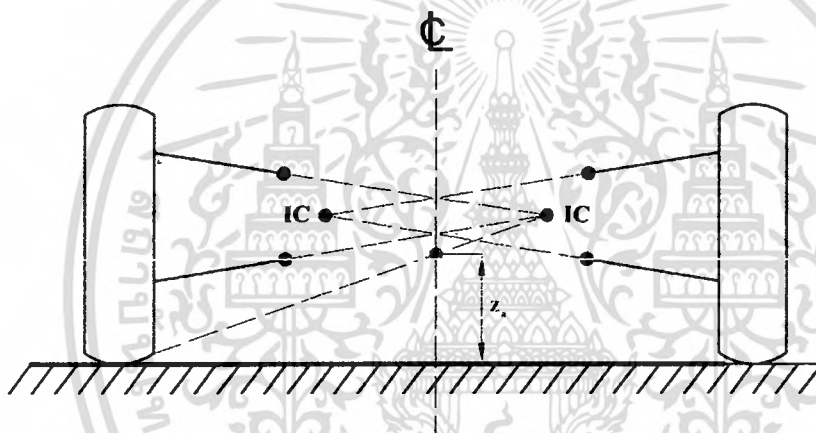
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการจำลองเพื่อหาการวางตัวของปีกนก

จากผลการเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ จุดศูนย์กลางการ โค้ง ระยะ โทและการเปลี่ยนแปลง ความกว้างฐานล้อตัวแปรที่เราสนใจ ทำให้สรุปได้ว่า รูปแบบของปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางชั่วขณะอยู่ในแอโรค มีเสถียรภาพต่อรบกวนแรงค้ำที่สุด

การจำลองเพื่อหามุมการวางตัวของปีกนก

จากขั้นตอนการจำลองแรก เราได้รูปแบบการวางตัวของปีกนกที่มีจุดศูนย์กลางชั่วขณะอยู่ในแอโรค แต่ยังไม่รู้ว่าการวางตัวของปีกนกบนและปีกนกล่างหันไปด้านไหน ซึ่งในขั้นตอนนี้เราจะทำการจำลอง โดยกำหนดตัวแปรดังนี้

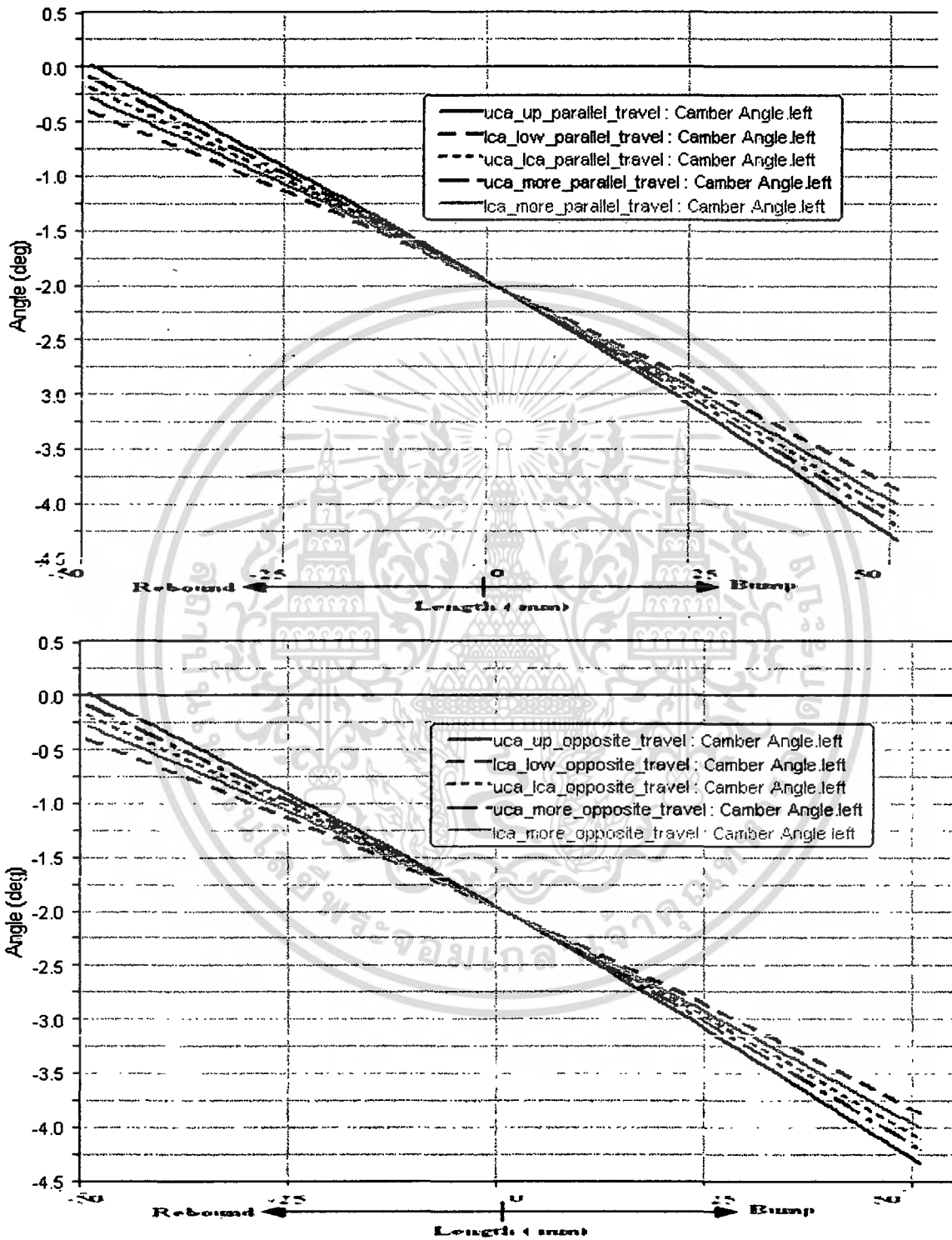


รูปที่ 6-15 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางชั่วขณะอยู่ในแอโรค

- uca\_up คือ ปีกนกบนวางตัวขึ้นด้านบน ปีกนกล่างวางขนาน
- lca\_low คือ ปีกนกล่างวางตัวลงด้านล่าง ปีกนกบนวางขนาน
- uca\_lca คือ ปีกนกบนวางตัวขึ้นด้านบนเท่ากับปีกนกล่างวางตัวลงด้านล่าง
- uca\_more คือ ปีกนกบนวางตัวขึ้นด้านบนมากกว่าปีกนกล่างวางตัวลงด้านล่าง
- lca\_more คือ ปีกนกล่างวางตัวลงด้านล่างมากกว่าปีกนกบนวางตัวขึ้นด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. มุมแคมเบอร์



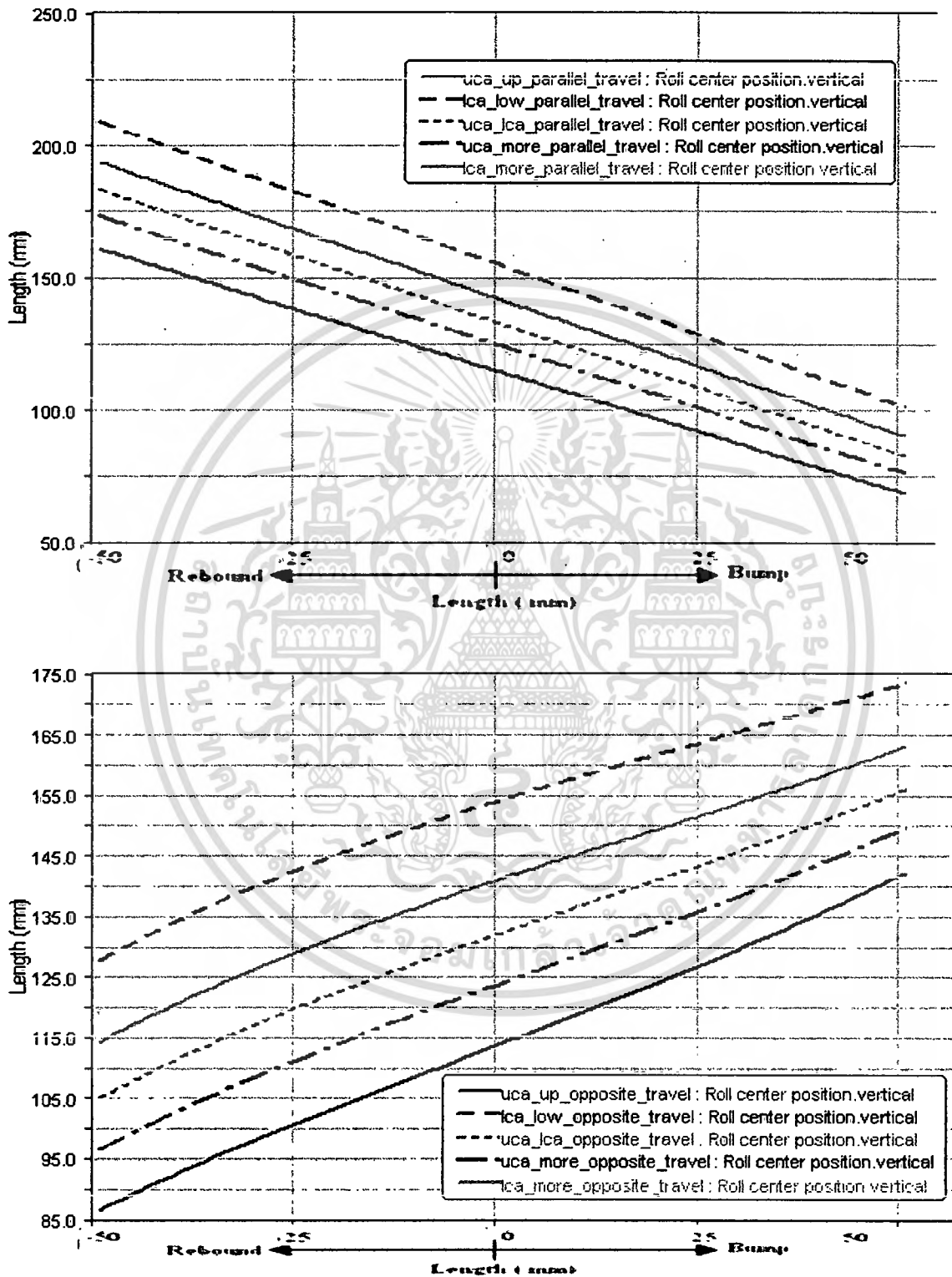
กราฟที่ 6-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์

จากกราฟที่ 6-5 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ไม่แตกต่างกันมาก

นัก เพราะฉะนั้นเราจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นเป็นสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. จุดศูนย์กลางการโคลง

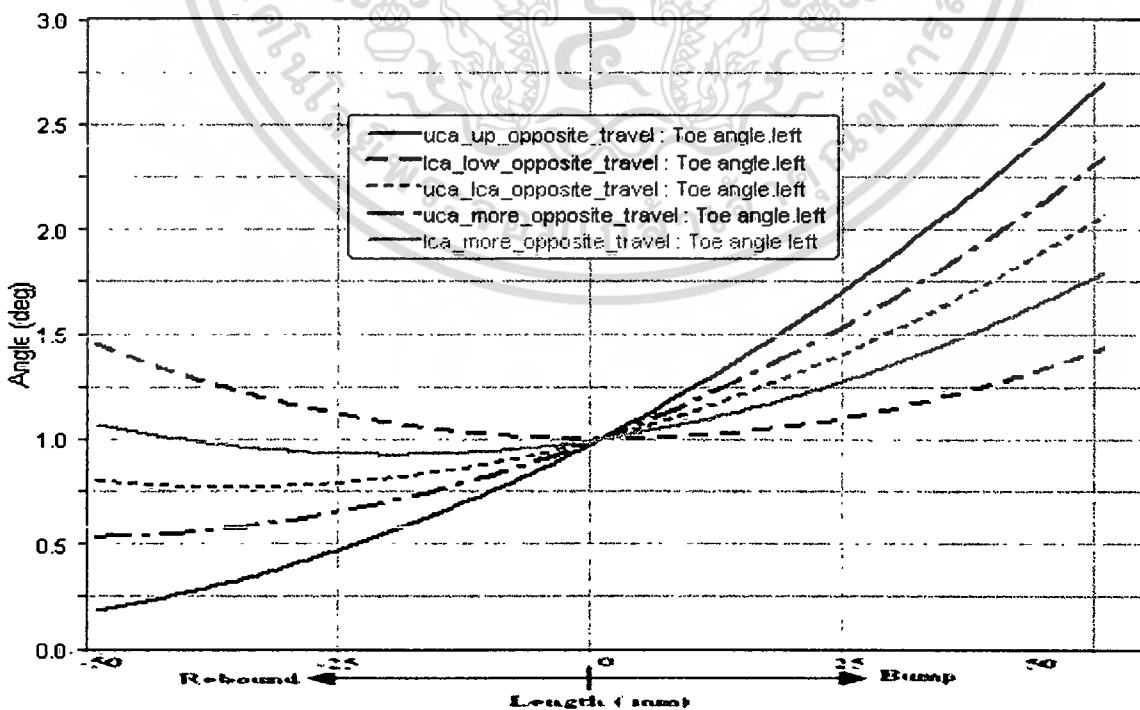
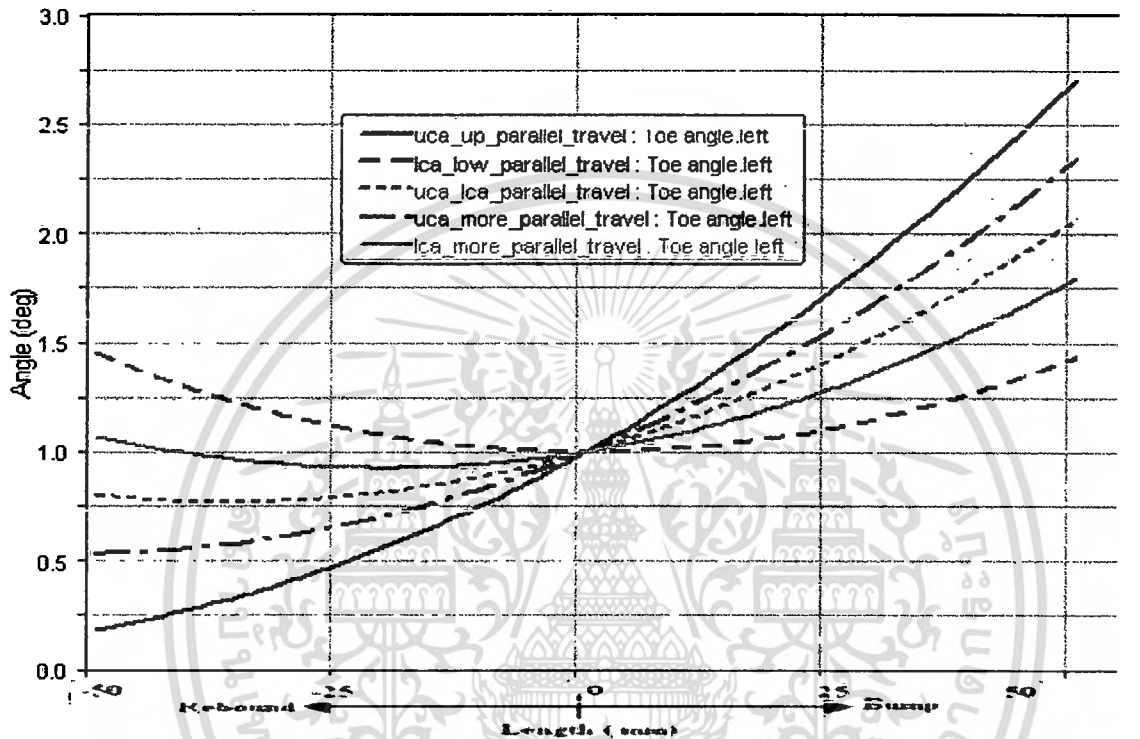


กราฟที่ 6-6 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-6 จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่ารูปแบบของปีกนกวางตัวลงด้านล่าง ปีกนกบนวางตัวขนานให้จุดศูนย์กลางการโคลงสูงที่สุดซึ่งอยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางรถทำให้เกิดการโคลงน้อยที่สุด

### 3. มุมโท

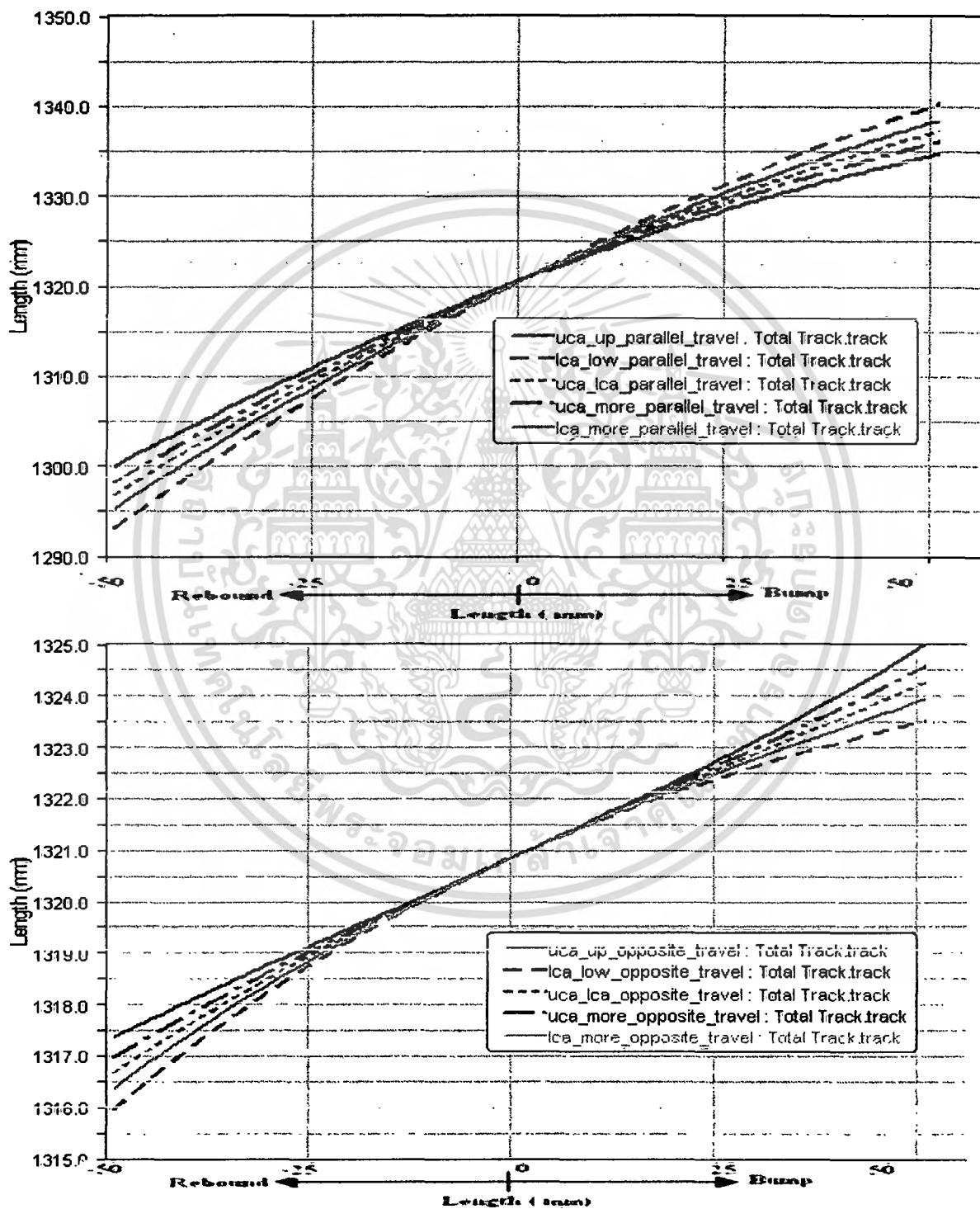


กราฟที่ 6-7 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ 6-7 จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า รูปแบบของปีกนกกลางวางตัวลงด้านล่าง ปีกนกบนวางขนานมีการเปลี่ยนแปลงมุม โทน้อยสุด

4. แทร์ริก



กราฟที่ 6-8 แสดงการเปลี่ยนแปลงฐานล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-8 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงฐานล้อ ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะฉะนั้นเราจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นเป็นสำคัญ คือ จุดศูนย์กลางกัน โคลงและระยะ โทสรุป

จากผลการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางกัน โคลงและระยะ โท การวางตัวของปีกล่างวางตัวลง ด้านล่าง ปีกนกบนวางตัวขนานการตอบสนองดีที่สุดต่อรถแข่ง

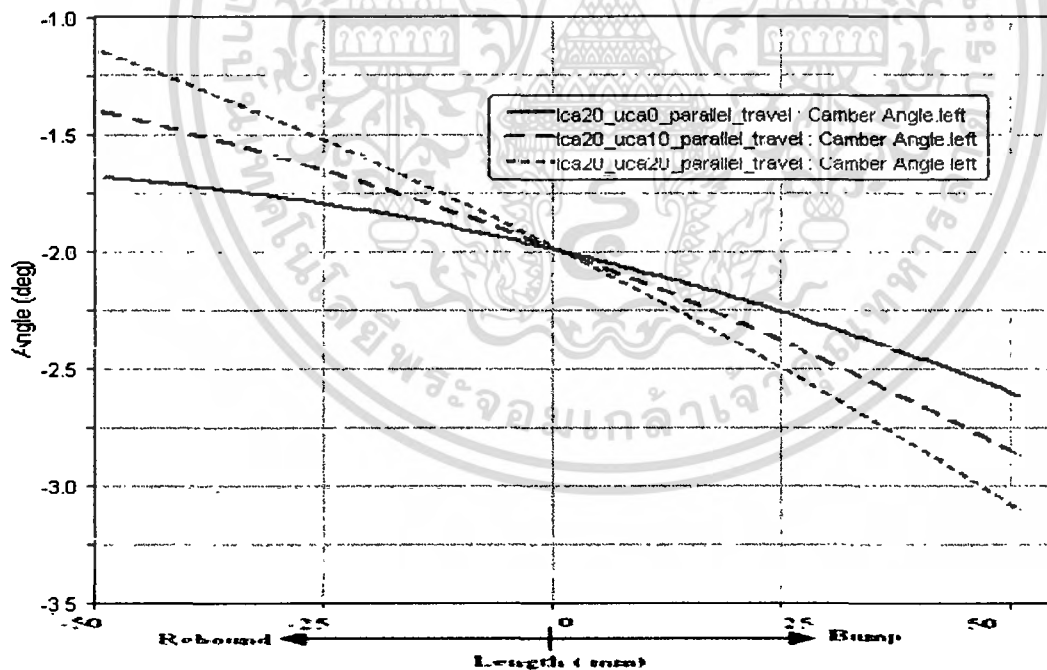
ข้อกำหนดของการออกแบบระบบช่วงล่าง

1. ใ้แกนกันกับแกนกลางที่ติดตั้งกับ โครงค้ำห่างกัน 180 มิลลิเมตร
2. ใช้ล้อขอบ 13 นิ้ว ระยะของปลายปีกนกบนกับปลายปีกนกกลางต้องห่างกันไม่เกิน 220 มิลลิเมตร (ปีกนกบนวางตัวขึ้น ไม่เกิน 20 องศาปีกนกกลางวางตัวลง ไม่เกิน 20 องศา)

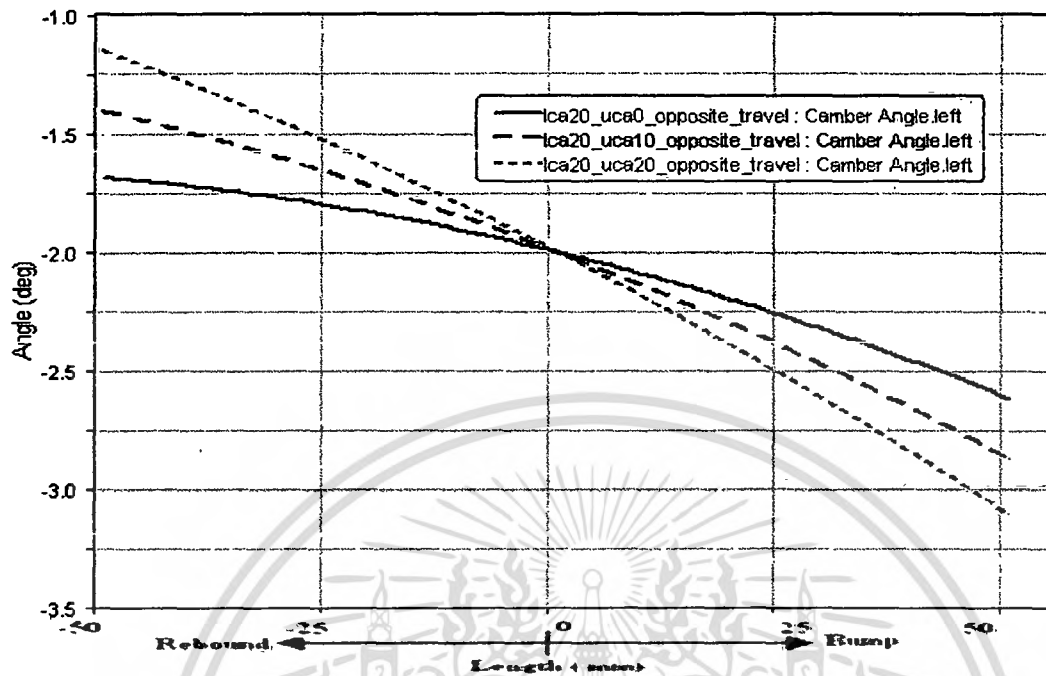
จากข้อกำหนดของการออกแบบทำให้ต้องพิจารณาเปรียบเทียบดังนี้

1. ปีกนกกลางวางตัวลง 20 องศาปีกนกบนวางขนาน (lca 20\_uca 0)
2. ปีกนกกลางวางตัวลง 20 องศาปีกนกบนวางตัวขึ้น 10 องศา (lca 20\_uca 10)
3. ปีกนกกลางวางตัวลง 20 องศาปีกนกบนวางตัวขึ้น 20 องศา (lca 20\_uca 20)

#### 1. มุมแคมเบอร์



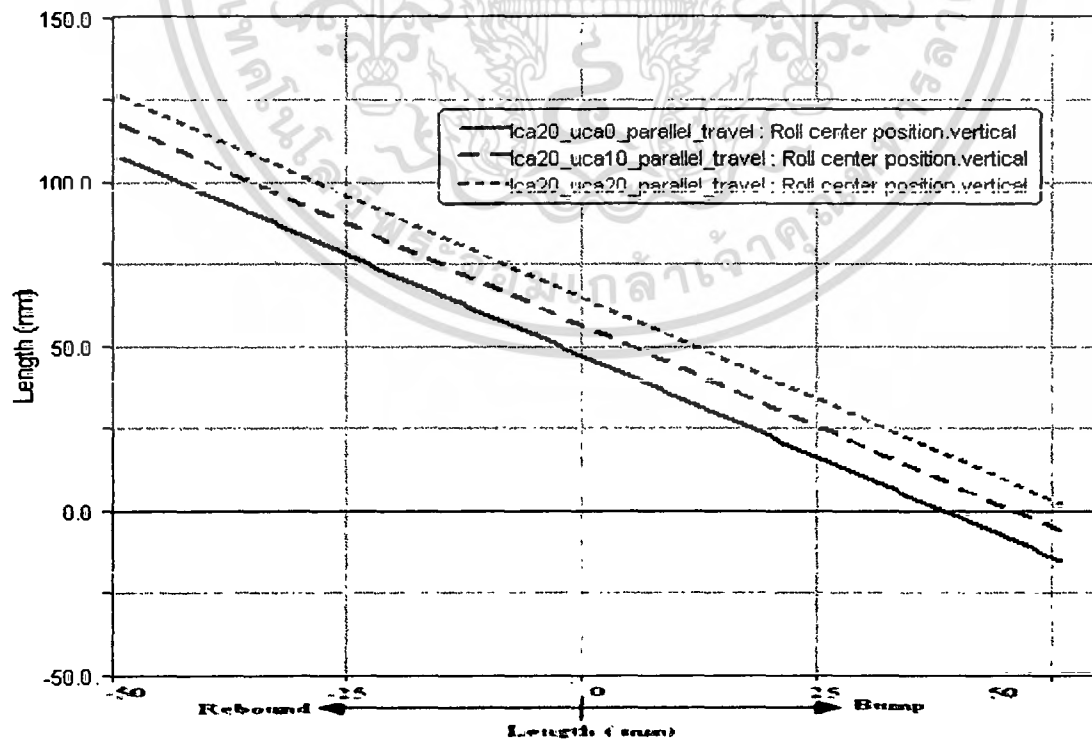
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



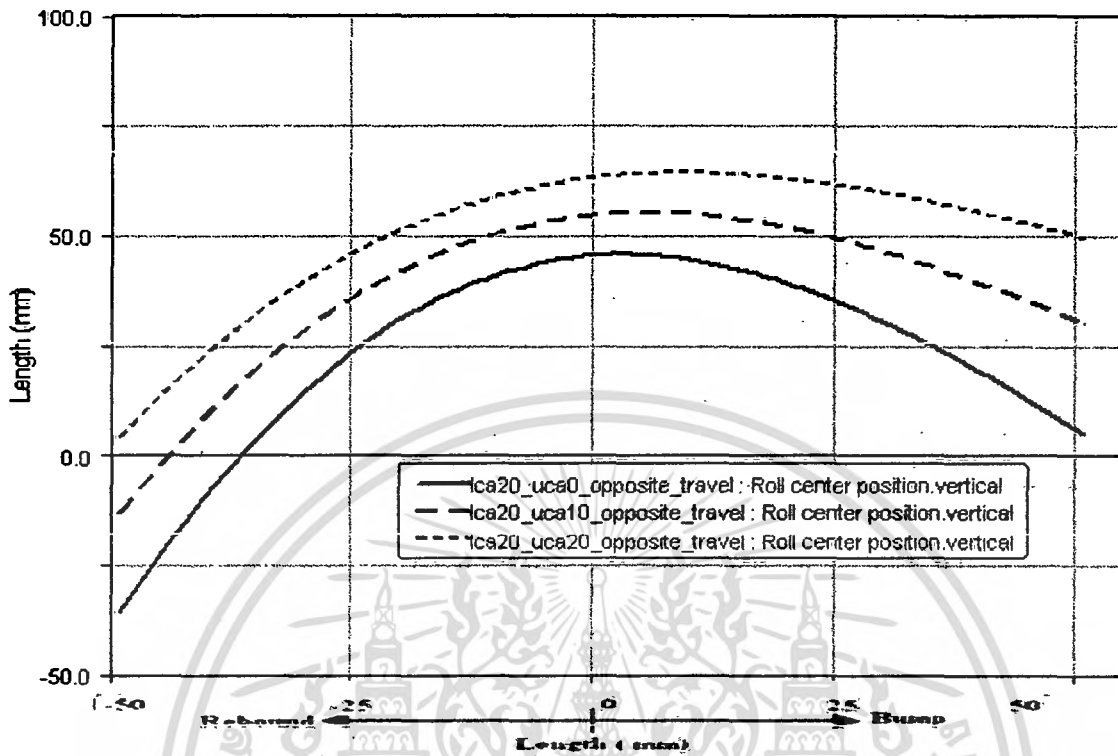
กราฟที่ 6-9 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์

จากกราฟที่ 6-9 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ของปีกนกกลาง วางตัวลง 20 มิลลิเมตร ปีกนกบนวางตัวขึ้น 20 มิลลิเมตร ให้การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ที่คิดต่อรถแข่ง

## 2. จุดศูนย์กลางการโคลง



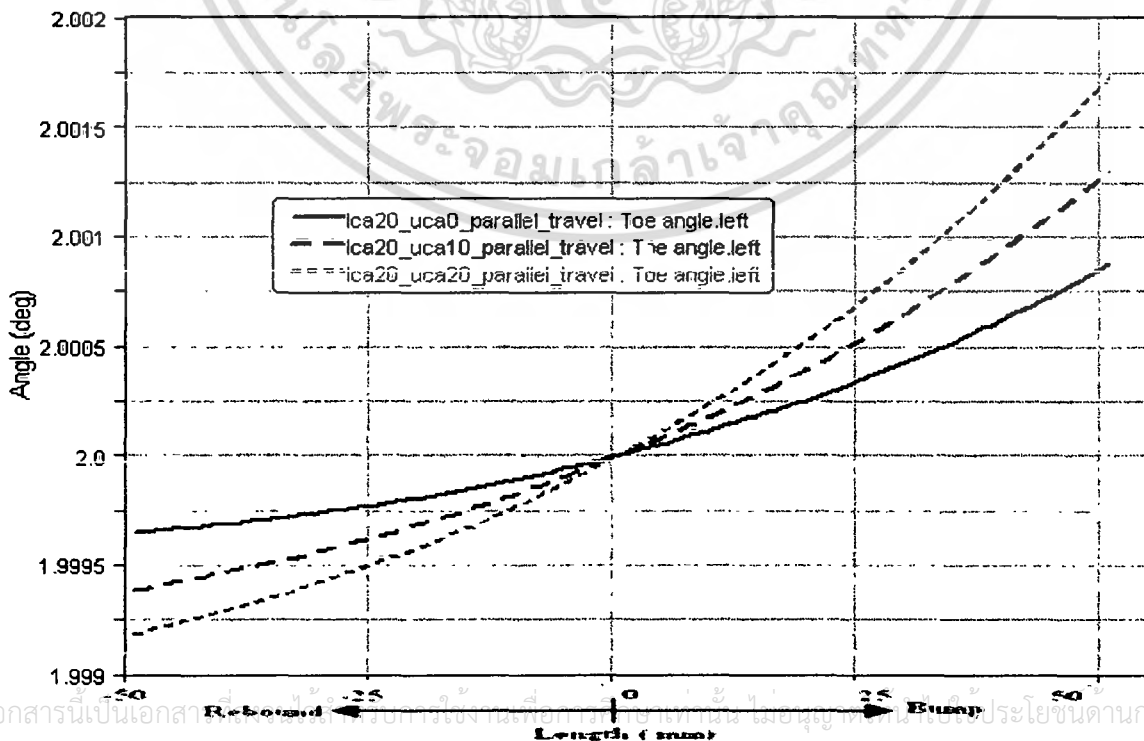
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

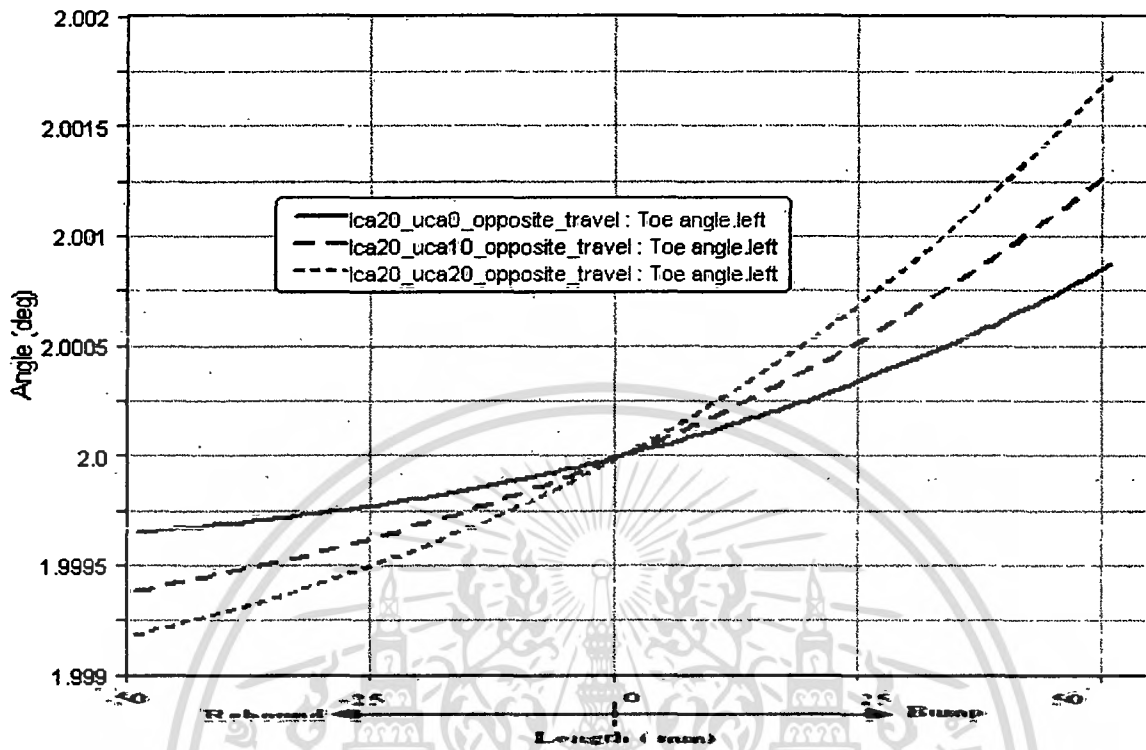


กราฟที่ 6-10 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลง

จากกราฟที่ 6-10 จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่ารูปแบบของปีกนกวางตัวลงด้านล่าง 20 ปีก นกบนวางตัวขึ้น 20 มิลลิเมตร ให้จุดศูนย์กลางการโคลงสูงที่สุดซึ่งอยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางรถทำให้เกิด การโคลงน้อยที่สุด

3. ระยะโท

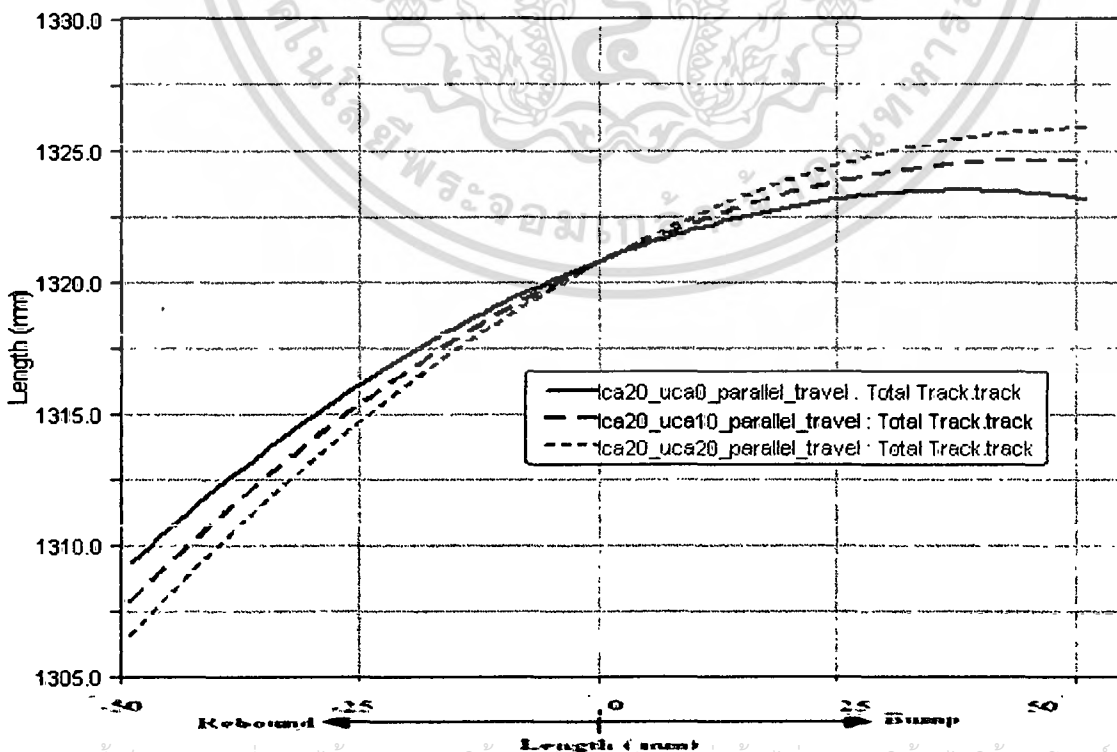




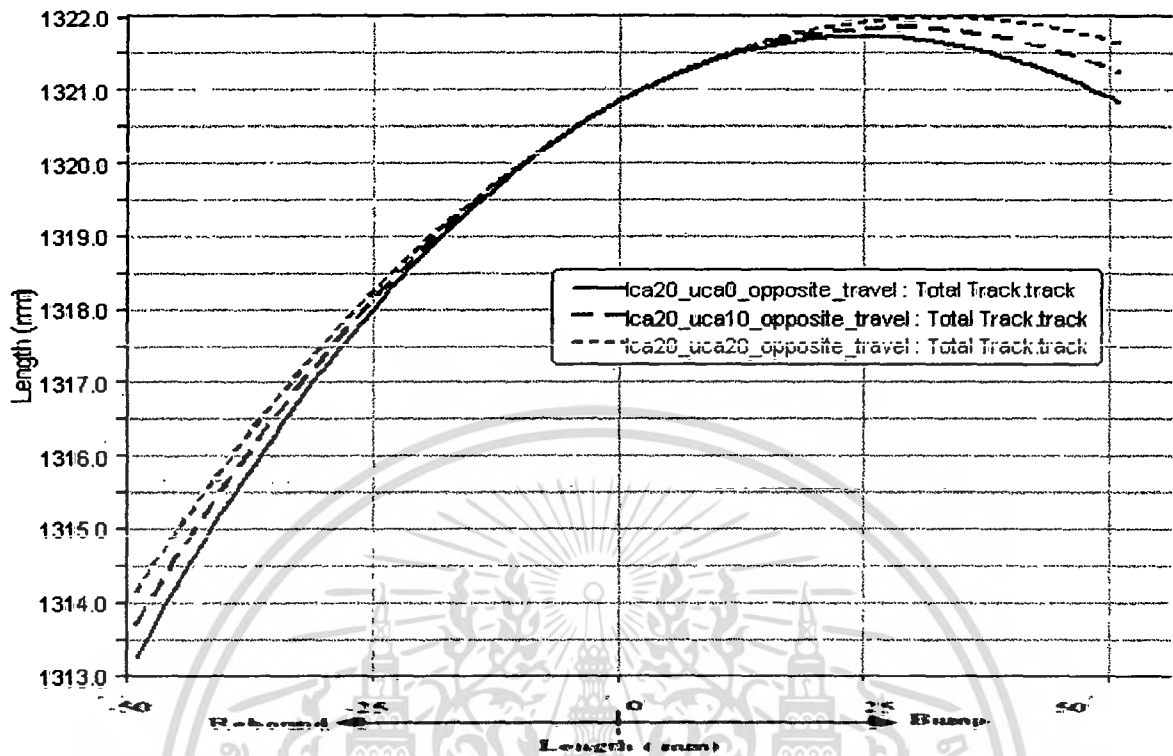
กราฟที่ 6-11 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมโท

จากกราฟที่ 6-11 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงมุมโท ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะฉะนั้นเราจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นเป็นสำคัญคือมุมแคมเบอร์ จุดศูนย์กลางการ โคลง

#### 4. แทร็ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 6-12 แสดงการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

จากกราฟที่ 6-12 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะฉะนั้นเราจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นเป็นสำคัญ คือ มุมแคมเบอร์ จุดศูนย์กลางการโคลงสรุป

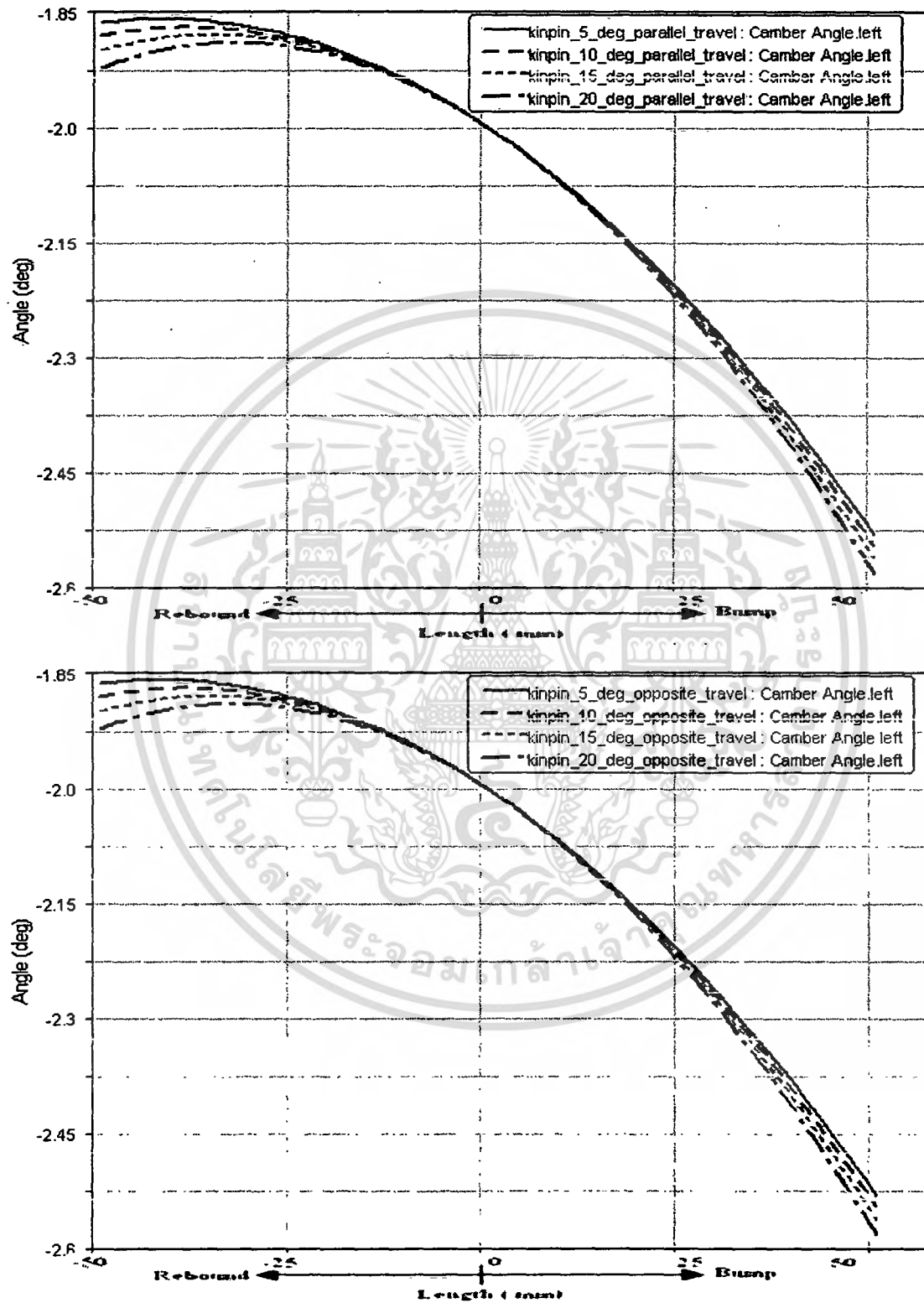
จากผลการเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ จุดศูนย์กลางการโคลง ระยะ โทและการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ การวางตัวของปีกล่างวางตัวลงด้านล่าง 20 มิลลิเมตร ปีกบนกบนวางตัวขึ้น 20 มิลลิเมตร ให้ การตอบสนองดีที่สุดที่สูตรต่อรถแข่ง

#### การจำลองเพื่อหามุมเอียงลูกหมากปีกนก

ในการจำลองตามขั้นที่ผ่านมาทำให้ทราบลักษณะการวางตัวของปีกนก ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหา มุมเอียงลูกหมากปีกนกกว่ามีค่าเท่าไร โดยกำหนดการพิจารณาดังนี้

1. Kinpin\_5\_deg ลูกหมากปีกนกบนเอียงทำมุม 5 องศาจากแนวปีกนกกลาง
2. Kinpin\_10\_deg ลูกหมากปีกนกบนเอียงทำมุม 10 องศาจากแนวปีกนกกลาง
3. Kinpin\_15\_deg ลูกหมากปีกนกบนเอียงทำมุม 15 องศาจากแนวปีกนกกลาง
4. Kinpin\_20\_deg ลูกหมากปีกนกบนเอียงทำมุม 20 องศาจากแนวปีกนกกลาง

### 1. มุมแคมเบอร์

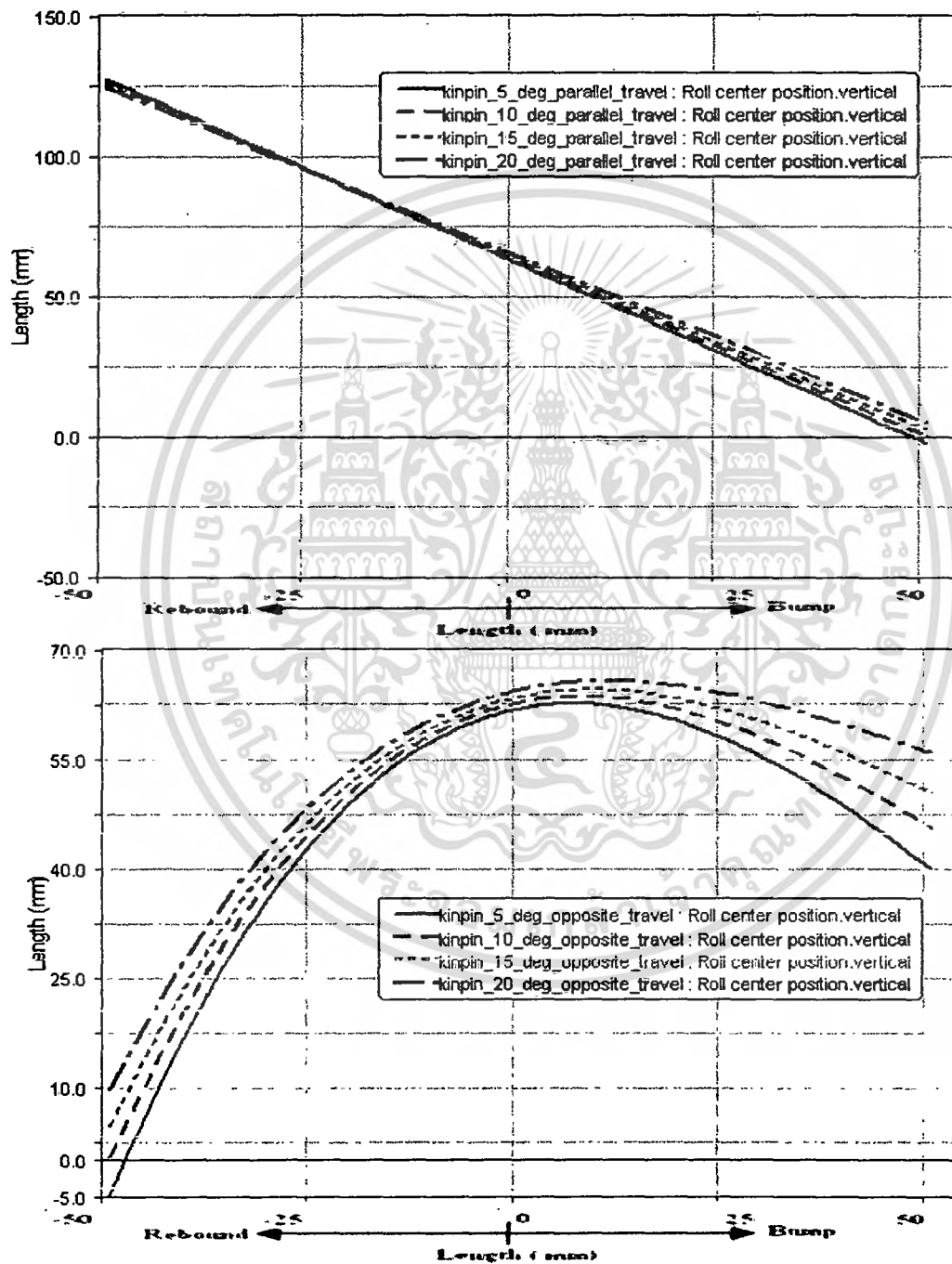


กราฟที่ 6-13 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-13 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแคมเบอร์ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะฉะนั้นเราจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นที่สำคัญคือ จุดศูนย์กลางการ โค้ง ระยะ โทและการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

2. จุดศูนย์กลางการ โค้ง

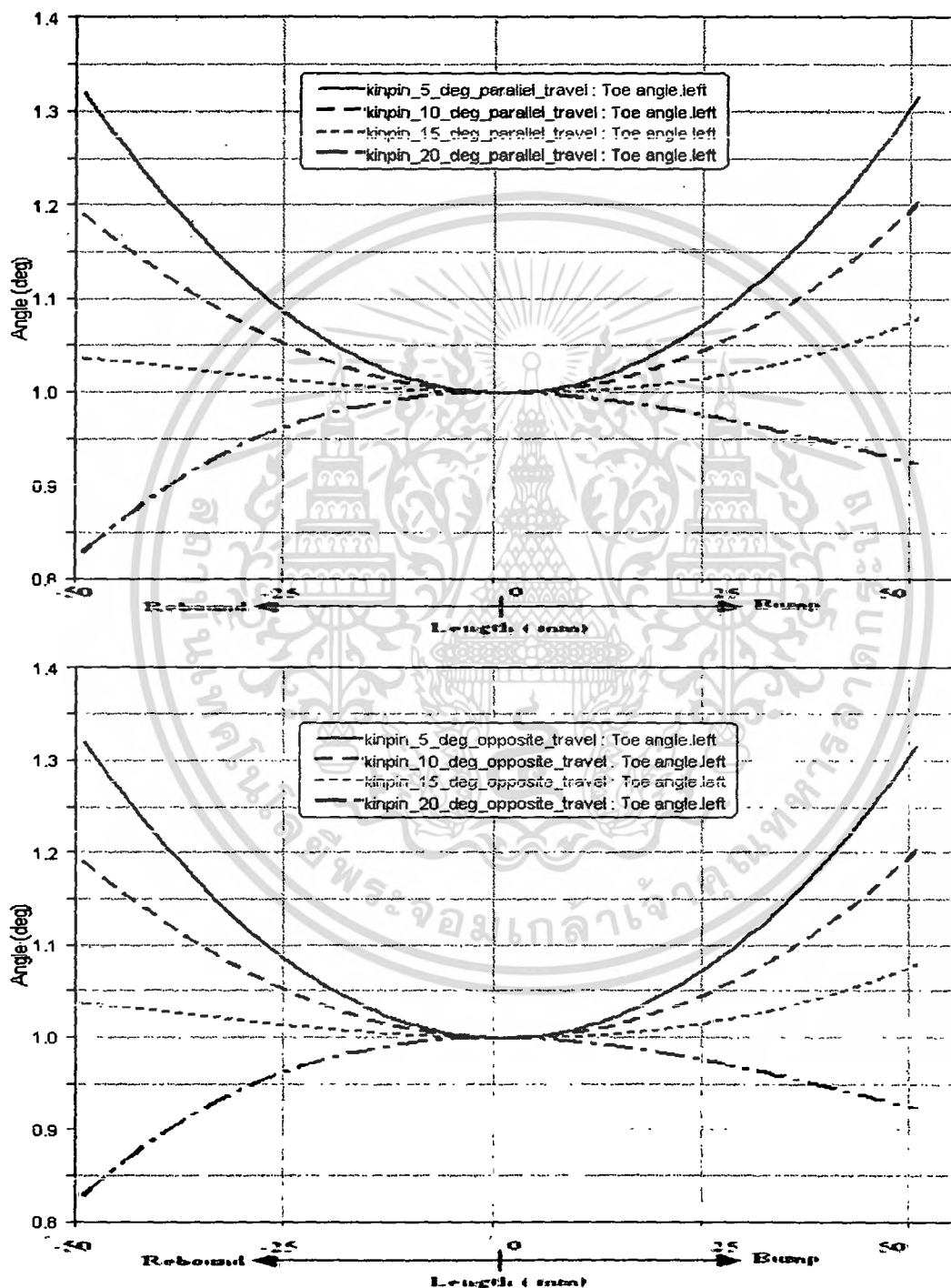


กราฟที่ 6-14 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการ โค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-14 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลงไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะฉะนั้นเราจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นเป็นสำคัญคือ ระยะ โท และการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

### 3. ระยะ โท

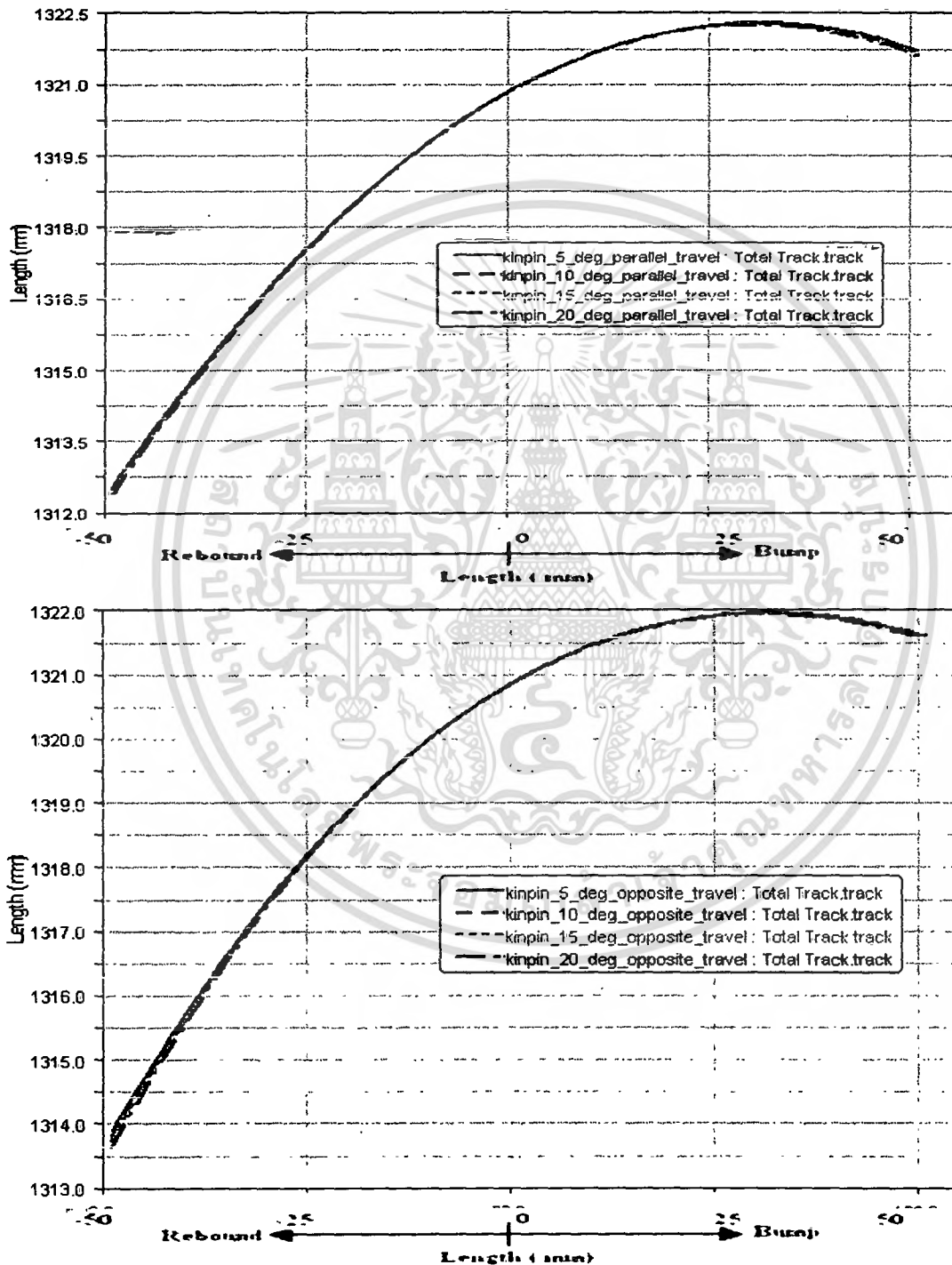


กราฟที่ 6-15 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-15 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงมุมโทของ Kingpin\_15\_deg ลูกหมากปีกนกบนเอียงทำมุม 15 องศาจากแนวปีกนกกลาง ให้การเปลี่ยนแปลงมุมโทที่ค่อนข้างน้อยที่สุด ซึ่งเหมาะสมต่อรถแข่ง

#### 4. แทริค



กราฟที่ 6-16 แสดงการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 6-16 ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะฉะนั้นเราจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นที่สำคัญคือ ระยะ โท  
สรุปผลการจำลองมุมเอียงลูกหมากปีกนก

จากผลการเปลี่ยนแปลงของมุมแคมเบอร์ จุดศูนย์กลางการ โค้ง ระยะ โทและการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ การวางตัวของลูกหมากปีกนกบนทำมุม 15 องศา กับลูกหมากปีกนกลาง ให้การตอบสนองดีที่สุดในคู่รถแข่ง

สรุปรูปแบบการวางตัวของปีกนก

จากการจำลองรูปแบบต่างๆแล้วพิจารณาถึงผลของมุมแคมเบอร์ จุดศูนย์กลางการ โค้ง ระยะ โทและการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ ในทุกขั้นตอนเราสามารถสรุปการวางตัวของปีกนกได้คือ

1. จุดศูนย์กลางการ โค้งของปีกนกอยู่ในแทรก
2. ปีกนกบนยกตัวสูงขึ้น 20 มิลลิเมตร ส่วนปีกนกล่างห็นลง 20 มิลลิเมตร
3. มุมเอียงลูกหมากปีกนกมีค่า 15 องศา

#### 6.4 ผลการจำลองทางไดนามิกส์

การจำลองทาง ดินมาติก บอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อต่างๆที่เราสนใจ แต่ก็เป็นการเปลี่ยนแปลงในขณะทีรถ ไม่ได้เคลื่อนที่ ซึ่งผลการจำลองที่ได้บอกถึงลักษณะการวางตัวของปีกนก แต่เราก้ยังไม่ทราบว่าขณะที่รถเคลื่อนที่จริงการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นจะเป็นอย่างไร ในบทนี้เราจึงทำการจำลองทางพลศาสตร์ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจในขณะทีรถเคลื่อนที่จริง ดังนี้

โดยในการทดสอบเราจะทำการทดสอบ โดยเปลี่ยนค่าคงที่สปริงของล้อหน้าและล้อหลัง ตามตารางที่ 6-3

	ค่าคงที่สปริงล้อหน้า ( นิวตัน /มิลลิเมตร)	ค่าคงที่สปริง ล้อหลัง ( นิวตัน/มิลลิเมตร)
1	29	32
2	32	36
3	36	40

ตารางที่ 6-1 ค่าคงที่สปริงของล้อหน้าและหลัง

ซึ่งกติกการแข่งขันมีดังนี้

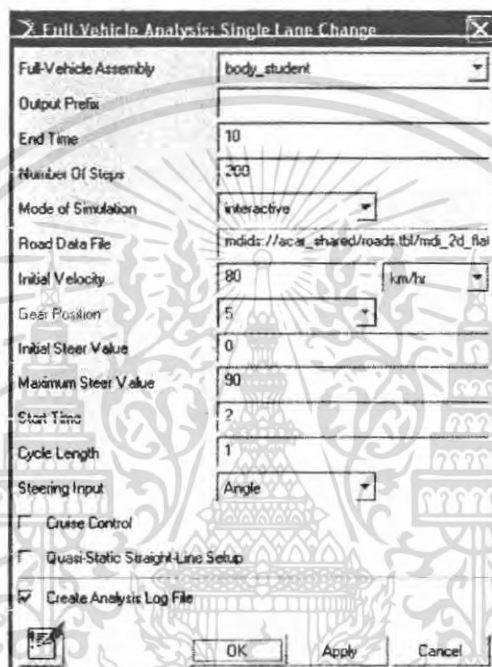
1. การแข่งขัน Autocross เป็นการวิ่งเพื่อจับเวลาครบหนึ่งรอบสนาม โดยจะมีกรวยวางไว้ตามจุดต่างๆ โดยมีทั้งทางตรง การเปลี่ยนช่องช่องถนนและการเข้า โค้ง
2. การแข่งขัน Endurance เป็นการวิ่งเพื่อจับเวลาทั้งหมด 6 รอบสนาม โดยจะวิ่งเหมือนกับ Autocross
3. การแข่งขัน Skid pad เป็นการวิ่งเป็นวงกลมแล้วจับเวลาทั้งหมด 2 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

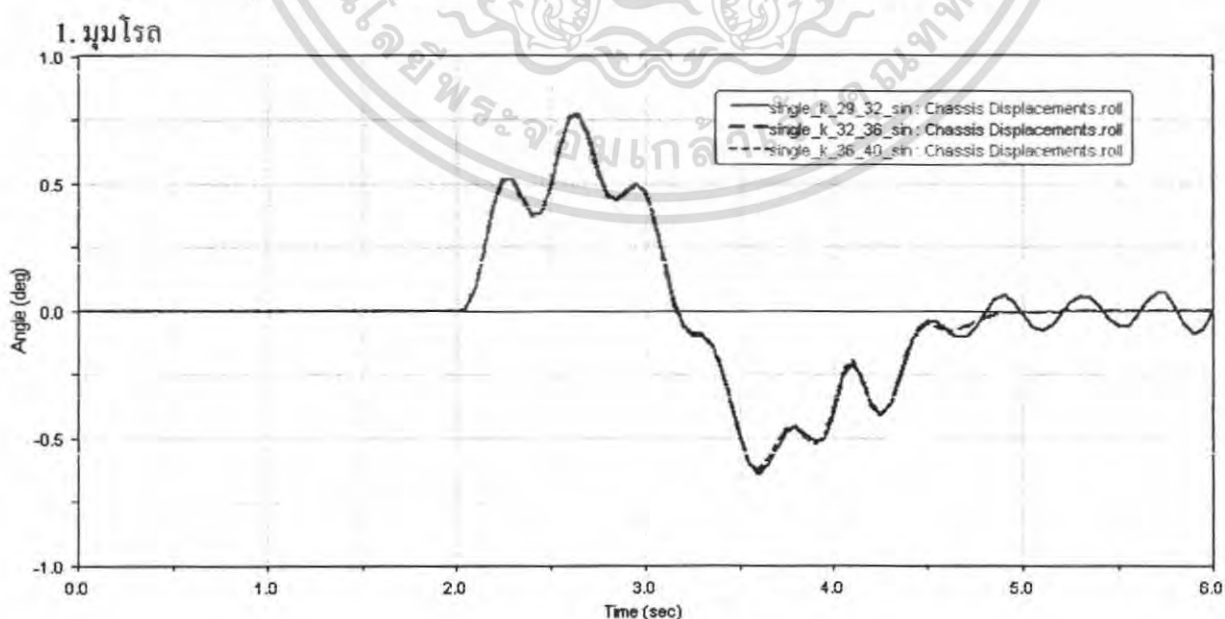
จากกติกาของการแข่งขันจึงได้จำลองสภาวะต่างๆดังนี้

### 1. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบเปลี่ยนช่องถนน (Single Lane Change)

เป็นการทดสอบที่จำลองการเลี้ยวของรถในขณะที่เปลี่ยนช่องถนน ซึ่งการทดสอบนี้จะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงมุมแคสเตอร์ แรงที่กระทำกับล้อ โดยเราจะกำหนดสภาวะในการจำลอง คือ ให้ความเร็วเริ่มต้นก่อนการเลี้ยวเป็น 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง เลี้ยวด้วยมุม 90 องศา ที่วินาทีที่ 2 สิ้นสุดที่วินาทีที่ 10

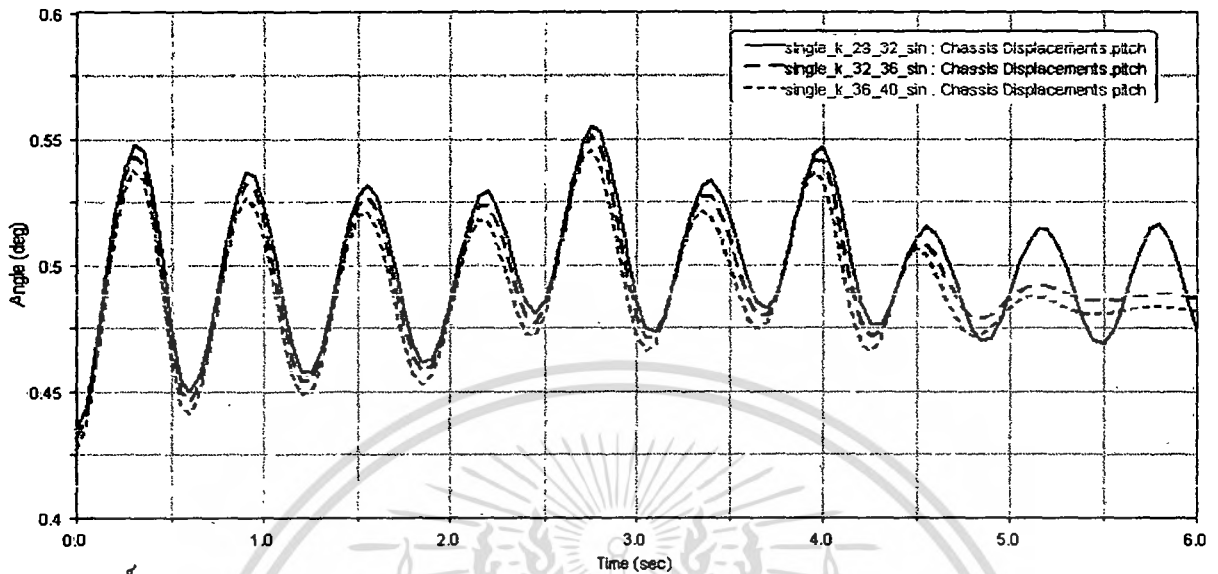


รูปที่ 6-16 แสดงการตั้งค่าต่างๆ ในการทดสอบแบบเปลี่ยนช่องถนน

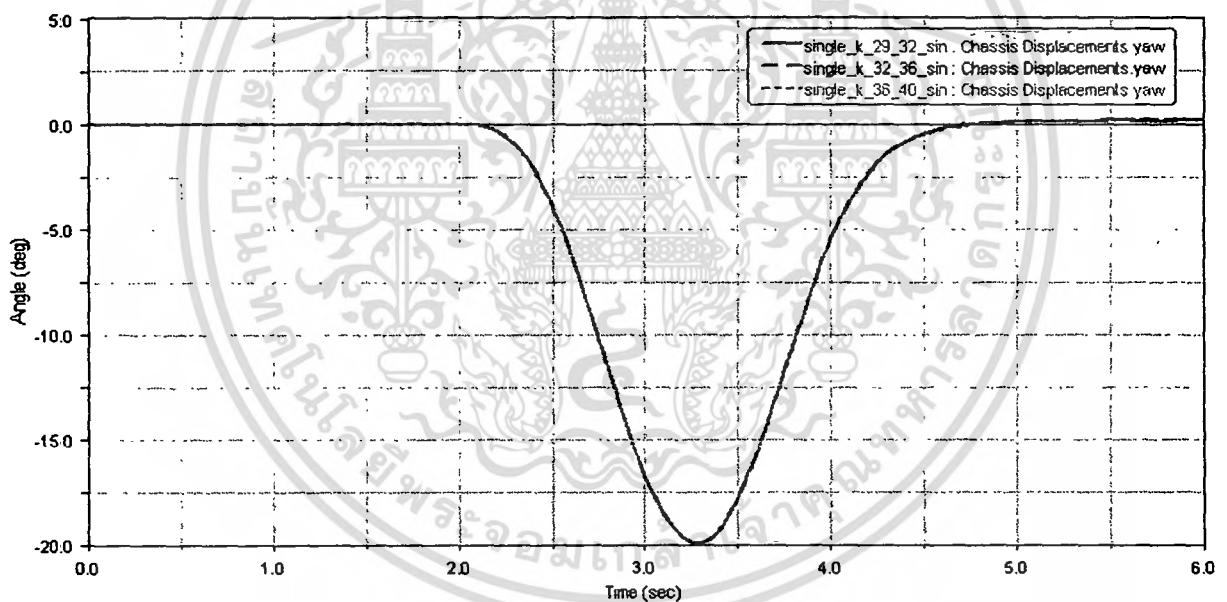


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. มุมพิต



## 3. มุมยอร์



กราฟที่ 6-17 การจำลองแบบ Single Lane Change

สรุปจากกราฟที่ 6-17 ในขั้นตอนี่การจำลองจะถูกแบ่งตามค่าคงที่สปริงล้อหน้าและล้อหลังที่กำหนด โดยในการจำลองทางพลศาสตร์นี้เราจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เราสนใจ 4 ตัว คือ มุม โคลง มุมพิต มุมยอร์ การเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพในการควบคุมรถ ซึ่งการจำลองการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนช่องถนนนี้ ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 36 นิวตัน/มิลลิเมตร ล้อหลังเป็น 40 นิวตัน/มิลลิเมตร เส้นกราฟจะเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

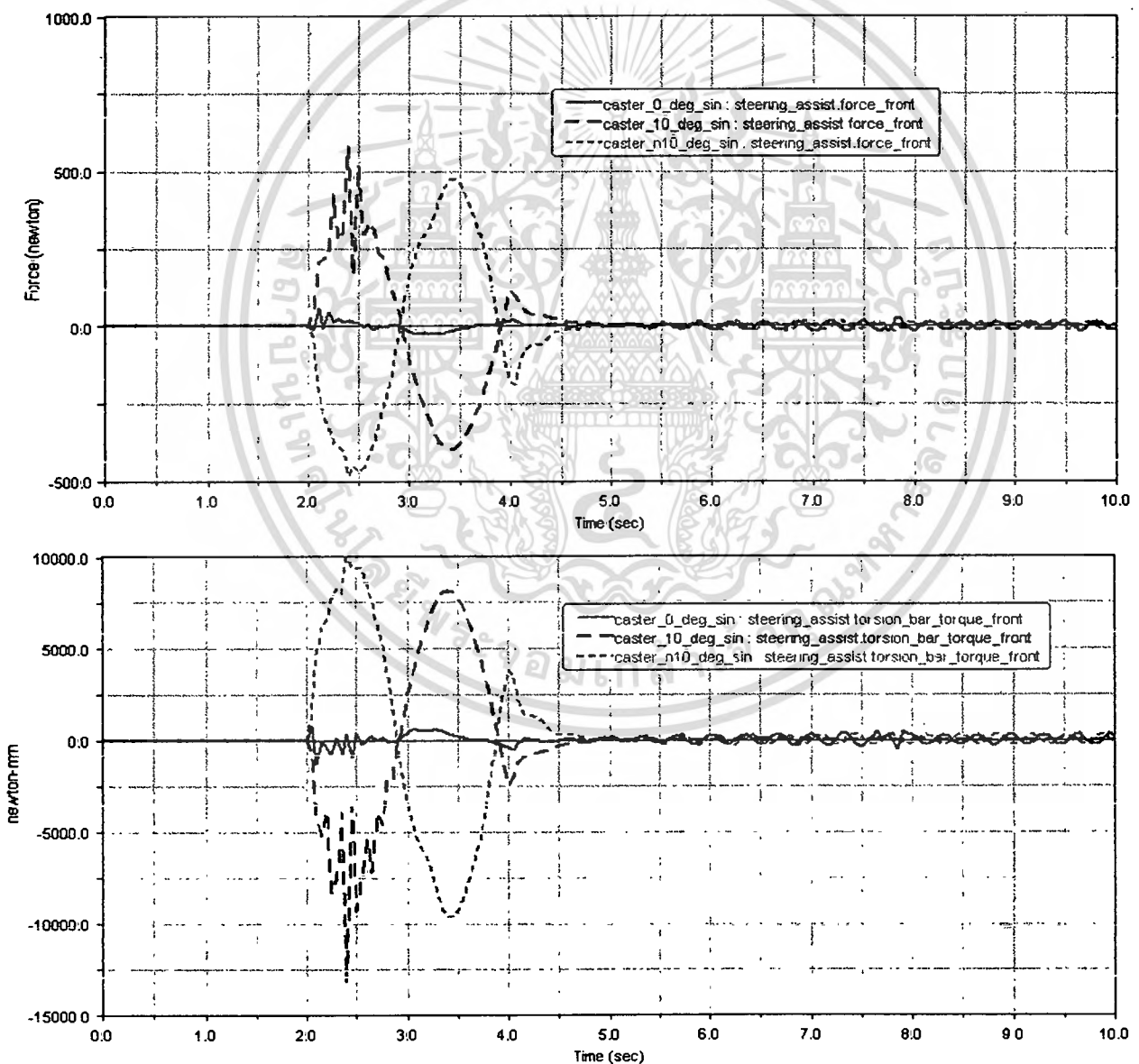
### ผลทดสอบของมุมแคสเตอร์

การทดสอบผลของมุมแคสเตอร์ในขณะที่เปลี่ยนช่องถนน โดยรถจะหักพวงมาลัยไปทางขวาแล้วหักพวงมาลัยกลับแล้ววิ่งทางตรงต่อไป ซึ่งเราจะพิจารณาถึงมุมแคสเตอร์ที่ต่างกันเพราะว่ามุมแคสเตอร์ส่งผลถึงการคืนพวงมาลัยในการเลี้ยวโค้ง ซึ่งเราสนใจดังนี้

ตั้งมุมแคสเตอร์เป็น 0 องศา คือ `caster_0_deg`

ตั้งมุมแคสเตอร์เป็น +10 องศา คือ `caster_10_deg`

ตั้งมุมแคสเตอร์เป็น -10 องศา คือ `caster_n10_deg`



กราฟที่ 6-18 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุม แคสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดสอบแบบ Ramp Steer

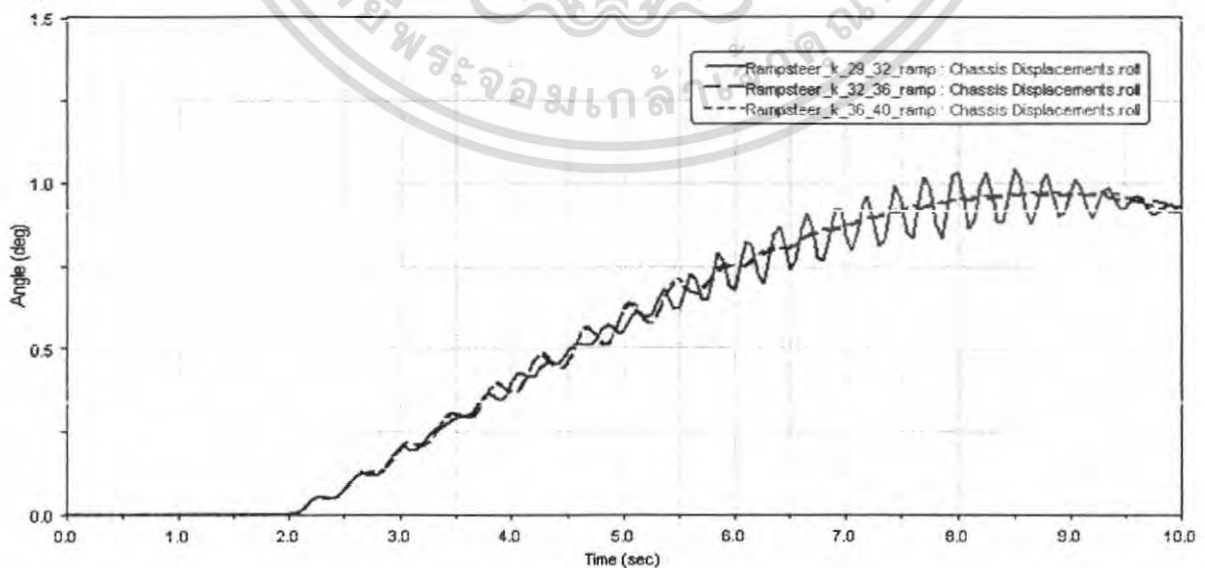
เป็นการจำลองการเลี้ยวของรถ โดยการหมุนพวงมาลัยด้วยความเร็วเชิงมุมค่าหนึ่ง เพื่อดูแรงกระทำกับล้อในขณะที่รถเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยกำหนดสภาวะการจำลองดังรูปที่ 6-17

Parameter	Value
Full-Vehicle Assembly	body_student
Output Prefix	
End Time	10
Number Of Steps	200
Mode of Simulation	interactive
Road Data File	mddis://acer_shared/roads.tbl/mdc_2d_flat
Initial Velocity	60 km/hr
Gear Position	5
Initial Steer Value	0
Ramp	30
Start Time	2
Steering Input	Angle
<input type="checkbox"/> Cruise Control	
<input type="checkbox"/> Quasi-Static Straight-Line Setup	
<input checked="" type="checkbox"/> Create Analysis Log File	

รูปที่ 6-17 แสดงการตั้งค่าต่างๆ ในการทดสอบแบบ Ramp Steer

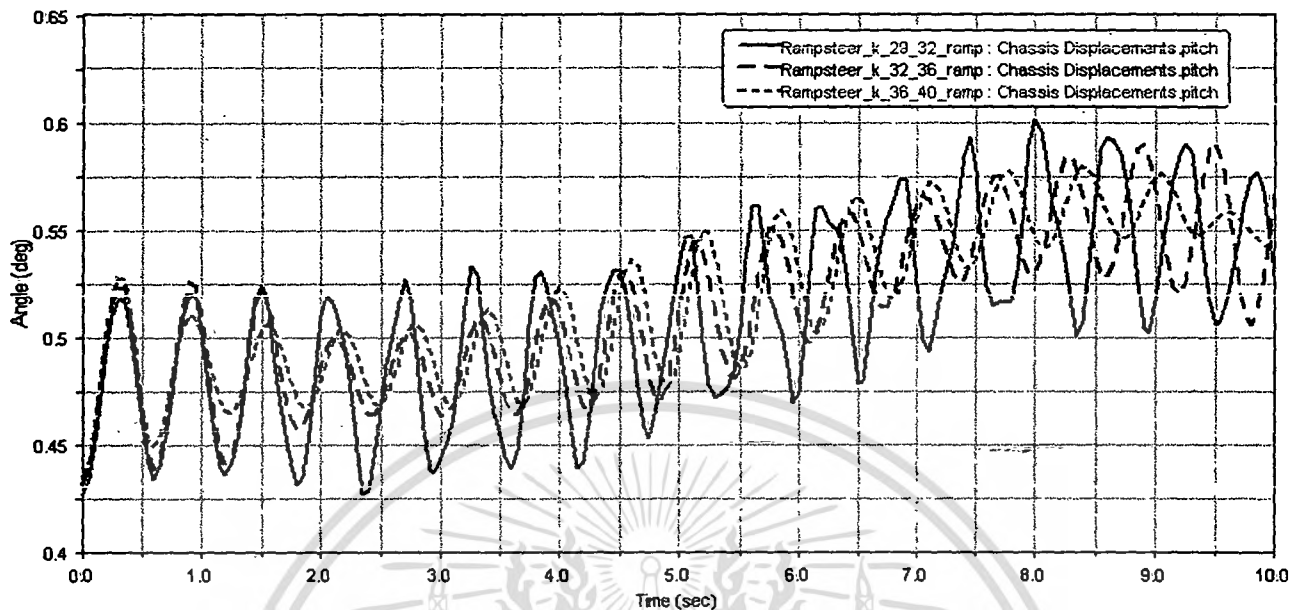
จากรูปที่ 6-17 สภาวะการจำลองแบบ Ramp Steer คือ ให้ความเร็วเริ่มต้นเป็น 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง ทำการเลี้ยวที่วินาทีที่ 2 สิ้นสุดที่วินาทีที่ 6 โดยให้ความเร็วเชิงมุมในการหมุนพวงมาลัยเป็น 30 เรเดียน/วินาที

### 1. มุมโรล

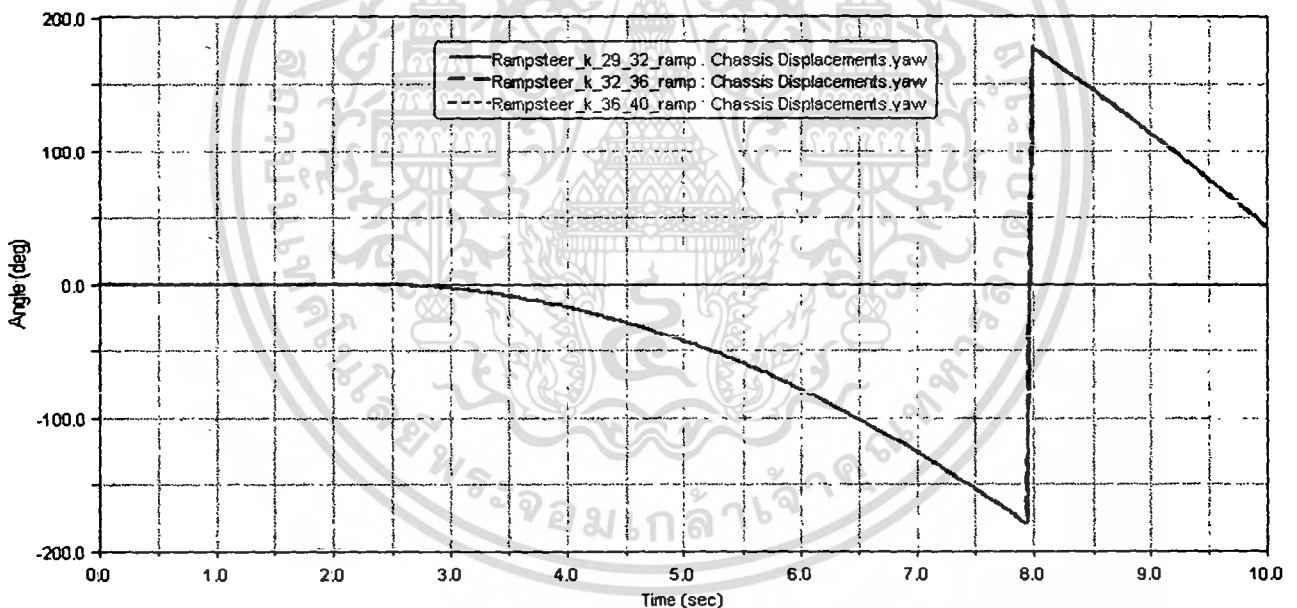


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. มุมพิต



## 3. มุมยอร์



กราฟที่ 6-19 การจำลองแบบ Ramp Steer

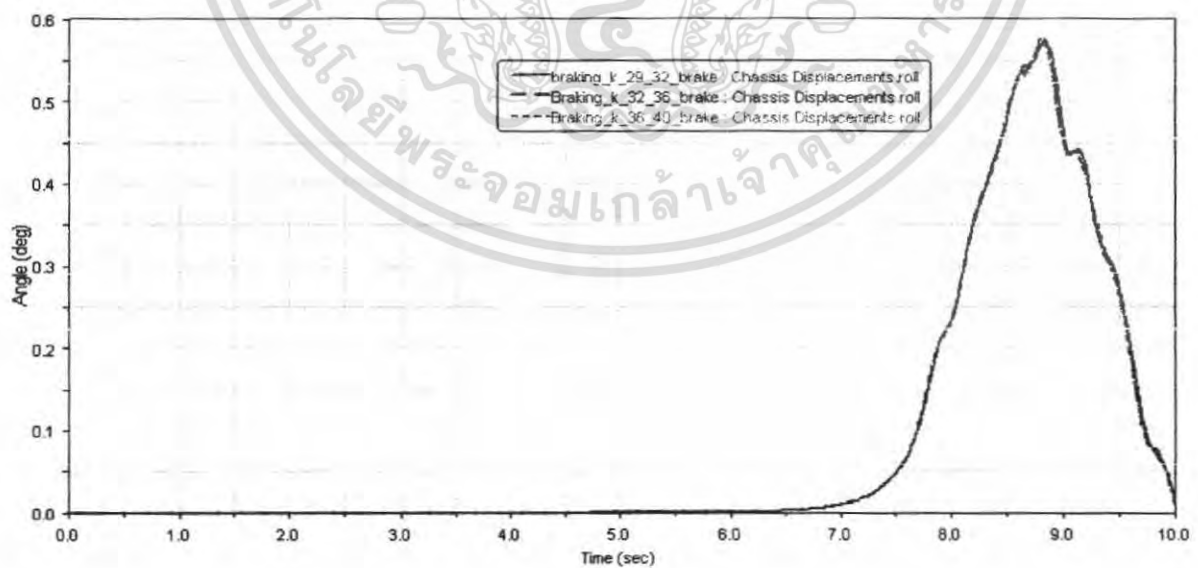
สรุปจากกราฟที่ 6-19 ในขณะที่เกิดการเลี้ยว รถจะมีการโคลงเกิดขึ้น ซึ่งในการจำลองเราต้องการทราบค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้ จากกราฟเราจะเห็นว่า เมื่อให้ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 36 นิวตัน/มิลลิเมตร ล้อหลังเป็น 40 นิวตัน/มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงของมุม โคลงมีค่าน้อยที่สุด และที่ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 29 นิวตัน/มิลลิเมตร ล้อหลังเป็น 32 นิวตัน/มิลลิเมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงมุมโคลงค่อนข้างมาก

การทดสอบการเบรกของรถ

เป็นการจำลองการเบรกของรถที่ความเร็วที่กำหนด โดยในการจำลองการเบรก เราจะกำหนดสภาวะ  
 ดังรูปที่ 6-18

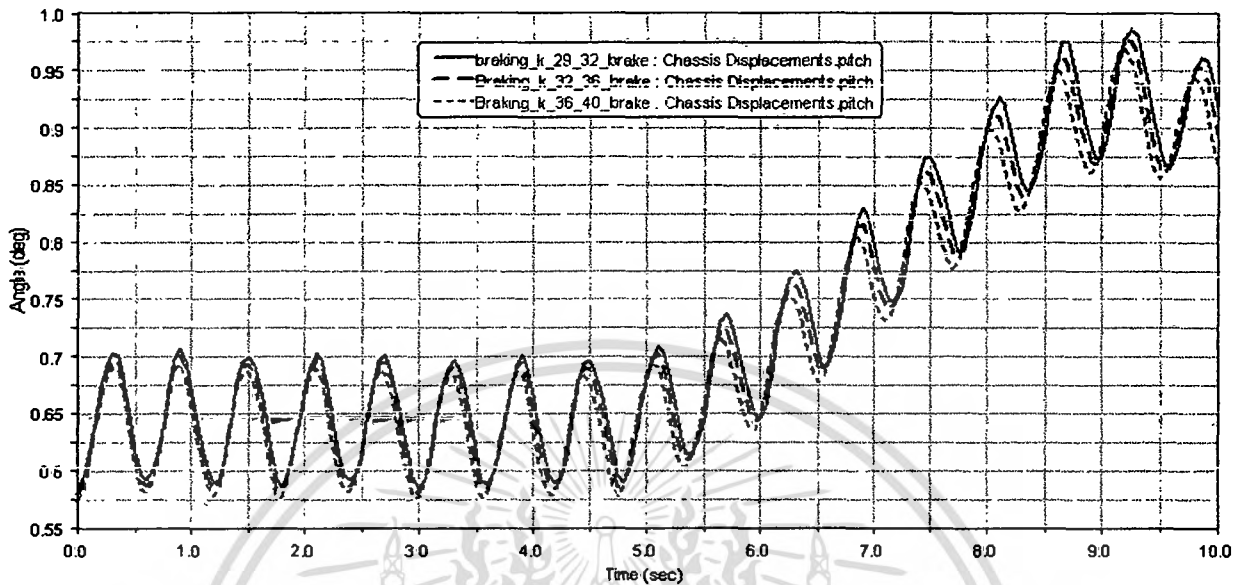
รูปที่ 6-18 แสดงการตั้งค่าต่างๆ ในการทดสอบแบบเบรก

### 1. มุมโรล

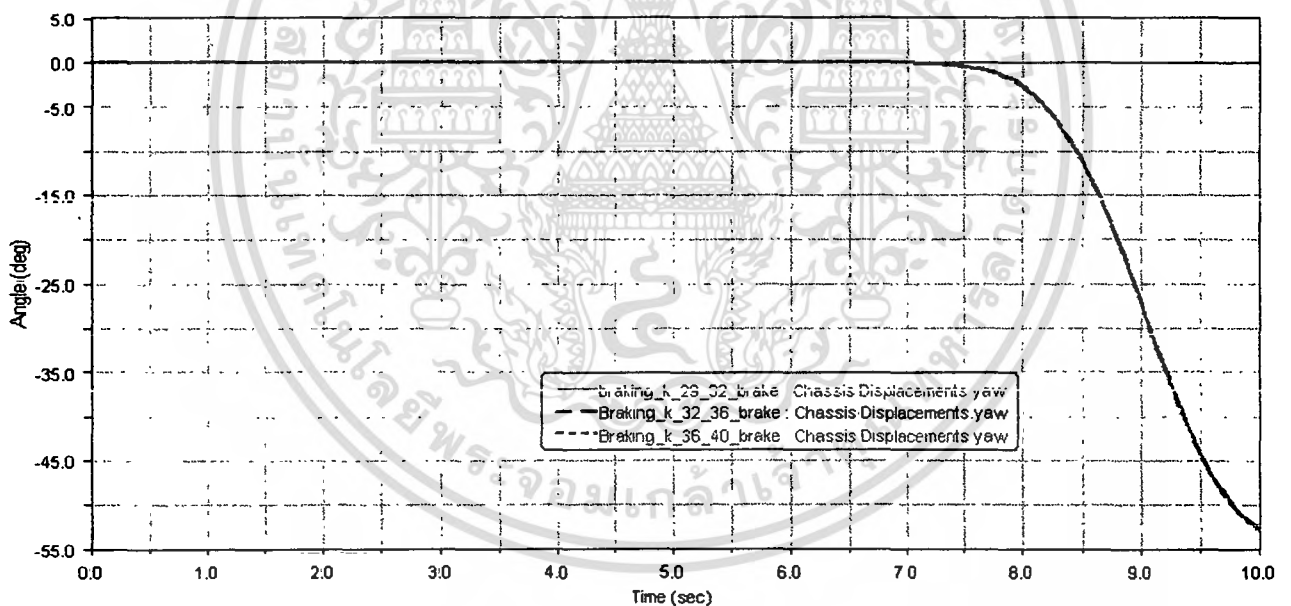


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. มุมพิต



## 3. มุมขอร



กราฟที่ 6-19 การจำลองการเบรก

สรุปจากกราฟที่ 6-19 ในขณะที่เกิดการเบรก รถจะมีอาการหน้าทิ่มซึ่งก็คือมุมพิต ซึ่งในการจำลองเราต้องการทราบค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้ จากกราฟจะเห็นว่า เมื่อให้ค่าคงที่สปริงล้อหน้าเป็น 36 นิวตัน/มิลลิเมตร ล้อหลังเป็น 40 นิวตัน/มิลลิเมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงมุมพิตน้อยที่สุด

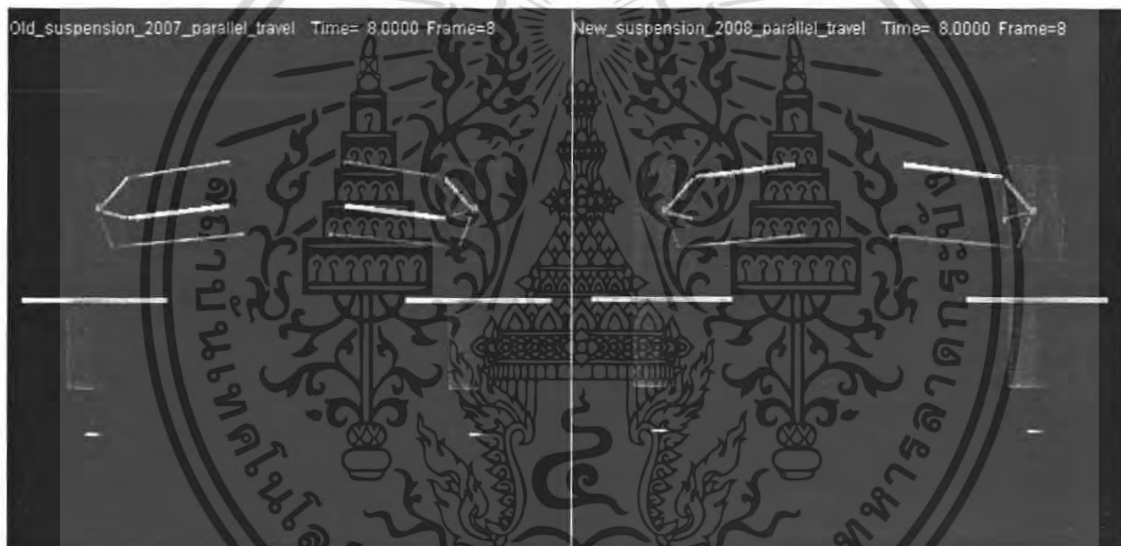
## 6.5 การเปรียบเทียบผลของมุมต่างๆ ของโครงงานปีนี้และโครงงานปีที่แล้ว

### รูปแบบการวางตัวของปีกนกปีเก่า (Old\_suspension\_2007)

1. จุดศูนย์กลางการ โคลงของปีกนกอยู่นอกแทรกคั้งตรงกันข้ามกับปีกนก
2. ปีกนกหันลงด้านล่าง ส่วนปีกนกล่างขนานกับพื้น
3. ปีกนกบนหันลงด้านล่างเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร
4. มุมเอียงลูกหมากปีกนกมีค่า 14 องศา

### รูปแบบการวางตัวของปีกนกปีนี้ (New\_suspension\_2008)

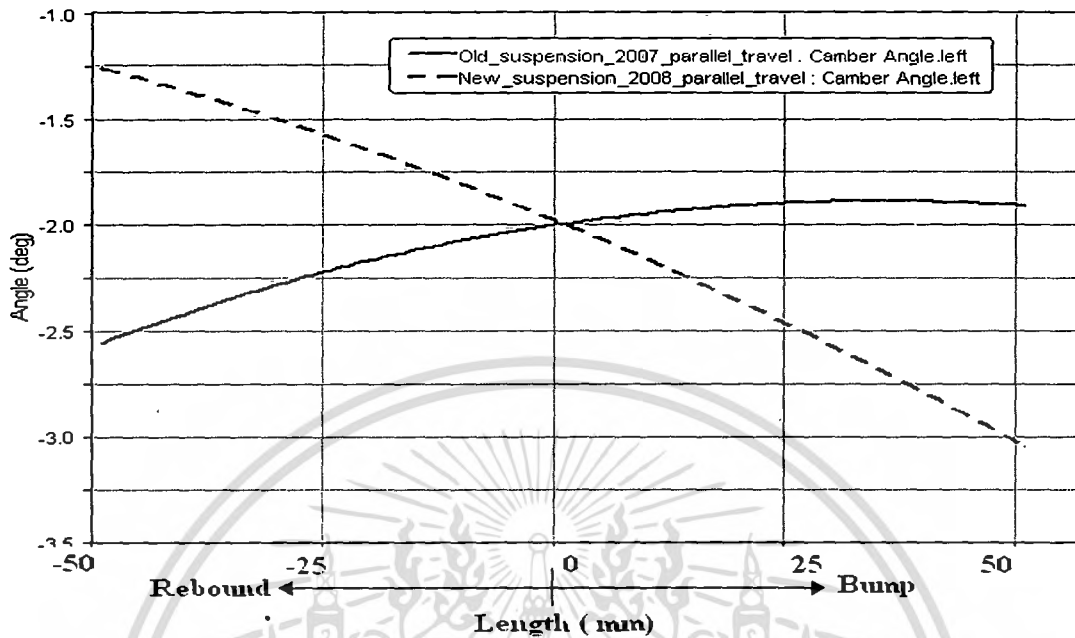
1. จุดศูนย์กลางการ โคลงของปีกนกอยู่ในแทรก
2. ปีกนกบนยกตัวสูงขึ้น 20 มิลลิเมตร ส่วนปีกนกล่างหันลง 20 มิลลิเมตร
3. มุมเอียงลูกหมากปีกนกมีค่า 15 องศา



รูปที่ 6-19 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการวางตัวของปีกนก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

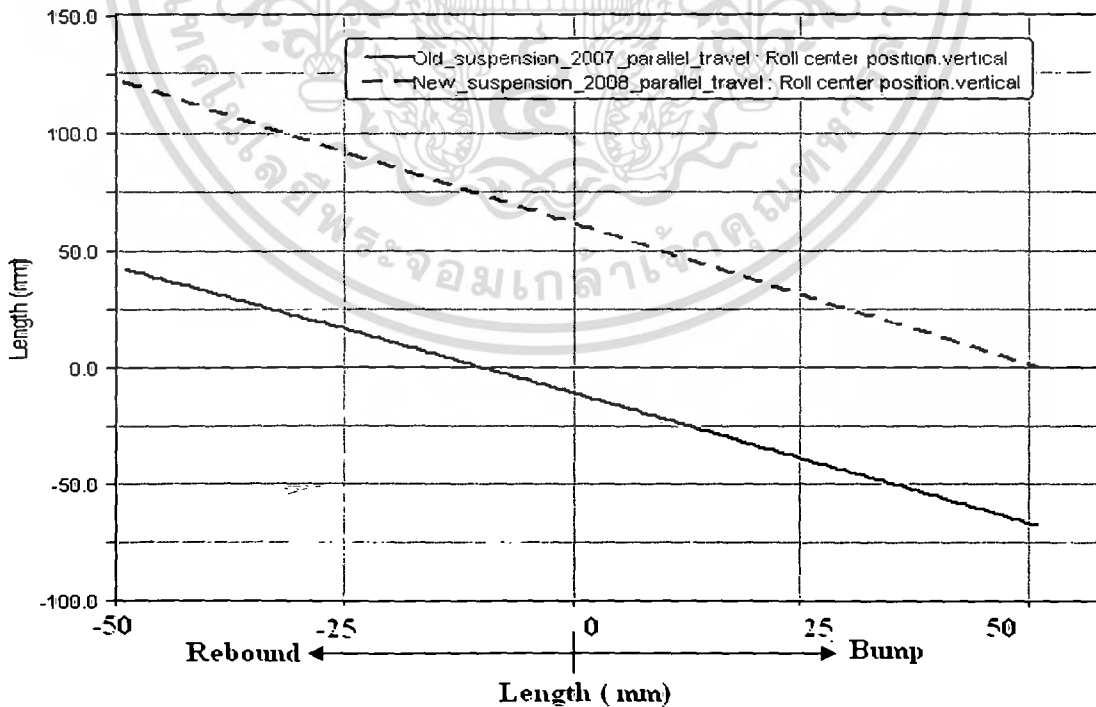
• มุมแคมเบอร์



กราฟที่ 6-20 การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์

จากกราฟที่ 6-20 เปรียบเทียบมุมแคมเบอร์ ผลของโครงการนี้ มีมุมแคมเบอร์เป็นลบมากขึ้นเมื่อเกิดการ Bound ซึ่งส่งผลให้รถเกาะถนนได้ดีกว่าเมื่อเข้าโค้ง

• ศูนย์กลางการโคลง

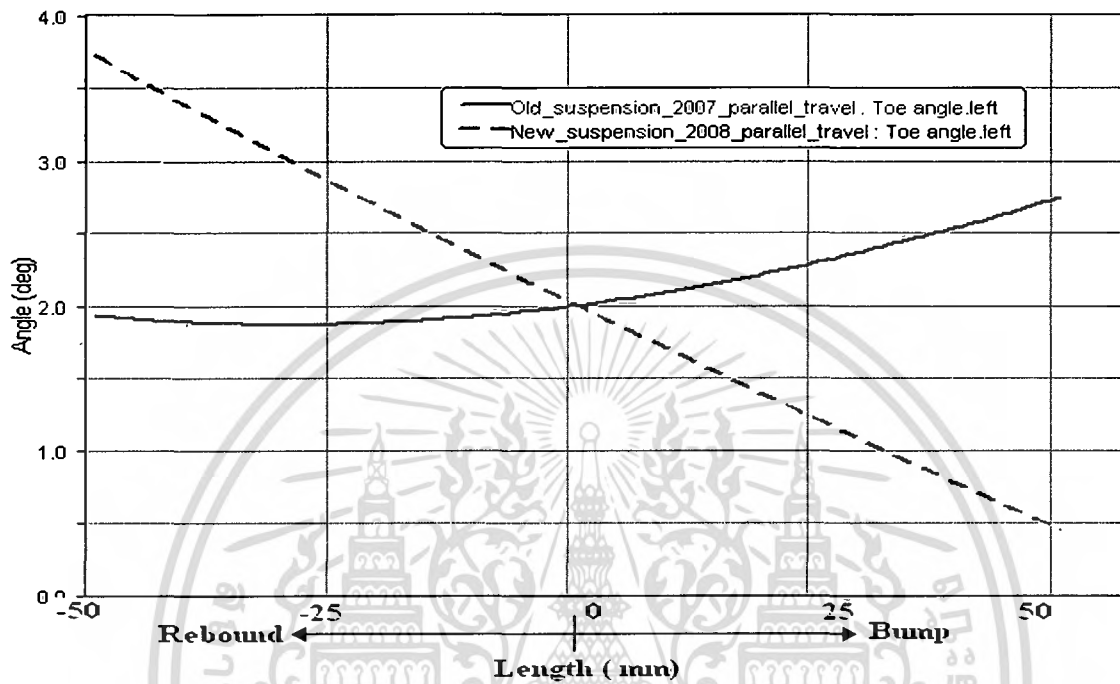


กราฟที่ 6-21 แสดงการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางการโคลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

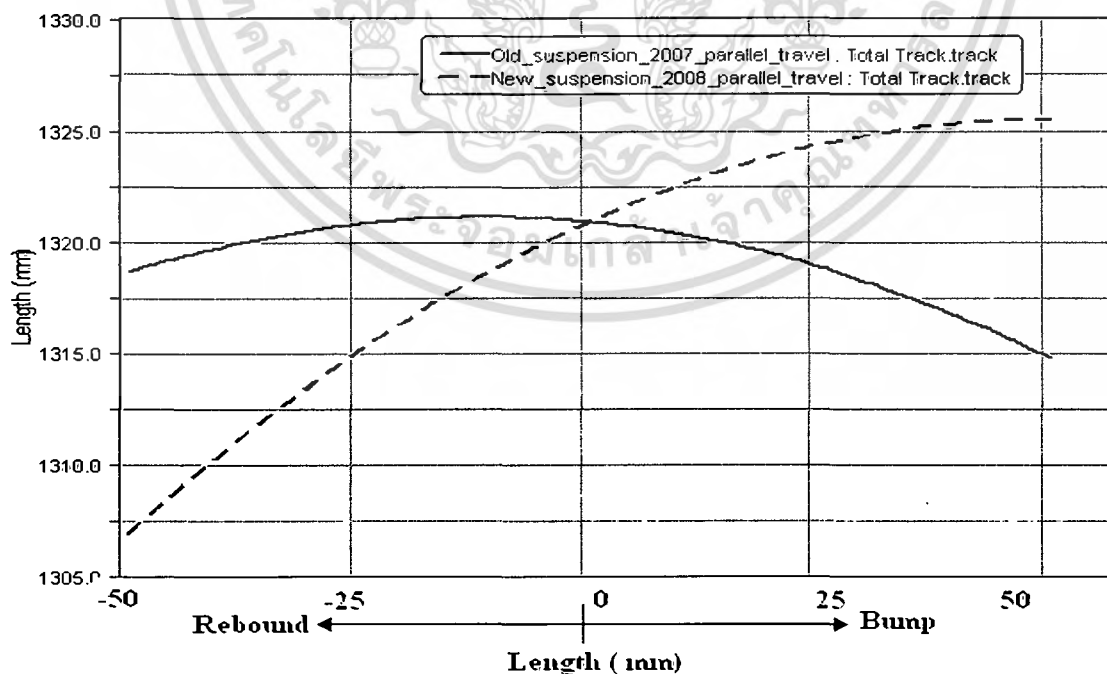
กราฟที่ 6-21 แสดง RC ของ โครงงานในปีนี้มีระดับที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่า สามารถรองรับ การโคลงได้ดีกว่าใน โครงงานปีที่แล้ว

● มุมโท



กราฟที่ 6-22 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมโท

● แทร็ก

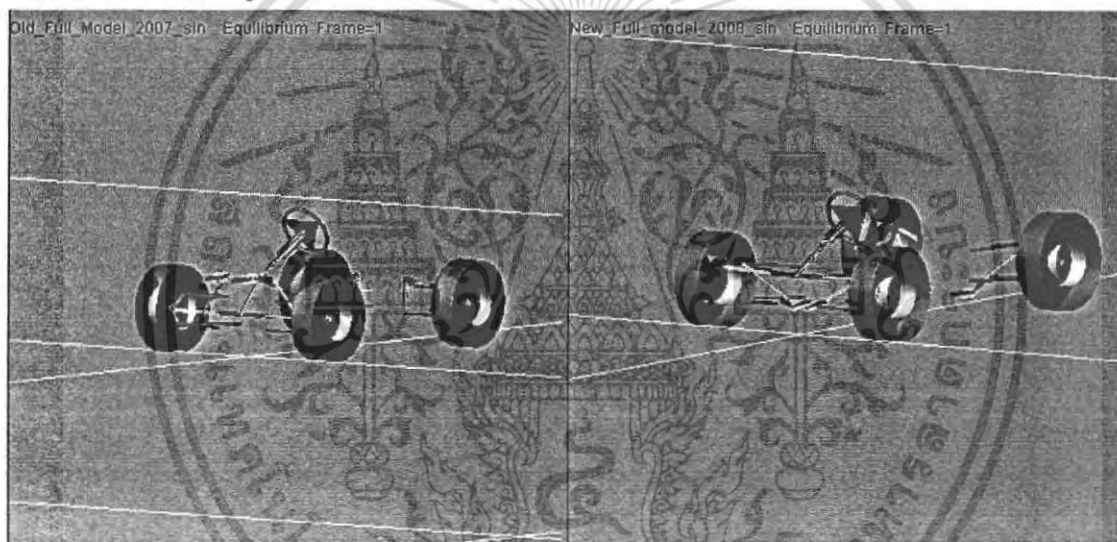


กราฟที่ 6-23 แสดงการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุป

รถของปีก่อนลักษณะการวางตัวของปีกนกจะทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ จุดศูนย์กลางการโคลง ระยะโทและการเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ ให้การเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด แต่รถที่ออกแบบปีนี้ได้พิจารณาถึงเสถียรภาพของรถที่ต้องใช้ความเร็ว ซึ่งในขณะที่รถเข้าโค้งจะมีการเปลี่ยนแปลงมุมล้อ ซึ่งส่งผลต่อความเร็วจึงได้พิจารณาออกแบบให้การวางตัวของปีกนกมีการเปลี่ยนแปลงมุมแคมเบอร์ในขณะที่ล้อยกตัวสูงขึ้น โดยในขณะที่ล้อยกตัวสูงขึ้นให้มุมแคมเบอร์เป็นลบมากขึ้นเพื่อหน้าสัมผัสของยางกับพื้นถนนสัมผัสกันมากที่สุดให้เกิดการยึดเกาะถนนที่ดียิ่งขึ้นทำให้ได้ความเร็วที่สูง ออกแบบให้ตำแหน่งการ โคลงอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางความถ่วงที่สุดทำให้ช่วยลดการโคลงของรถ ออกแบบให้การเปลี่ยนแปลงมุมโทมีน้อยที่สุด ซึ่งทำให้รถมีเสถียรภาพต่อรถแข่งดีมากยิ่งขึ้น การเปรียบเทียบแบบฟูลโมเดลของปีก่อนกับปีนี้



รูปที่ 6-20 แสดงการเปรียบเทียบแบบฟูลโมเดลของรถปีก่อนและปีนี้

## รูปแบบของรถปีก่อน

1. ปีกนกเป็นแบบดับเบิลวิส โบนหน้า หลัง

2. แกนค้ำโช๊คเป็นแบบแกนคัน

ข้อดี 1. มีความแข็งแรง และออกแบบง่าย

2. โช้ควางด้านบนซึ่งจะมีพื้นที่ค่อนข้างมากในการติดตั้ง

ข้อเสีย 1. แกนค้ำโช๊คเป็นแบบแกนคันซึ่งสามารถโก่งงอได้

2. จุดศูนย์กลางการถ่วงจะอยู่สูง

## รูปแบบของรถปีนี้

1. ปีกนกเป็นแบบดับเบิลวิส โบนหน้า หลัง

2. แกนค้ำโช๊คเป็นแบบแกนดิ่ง

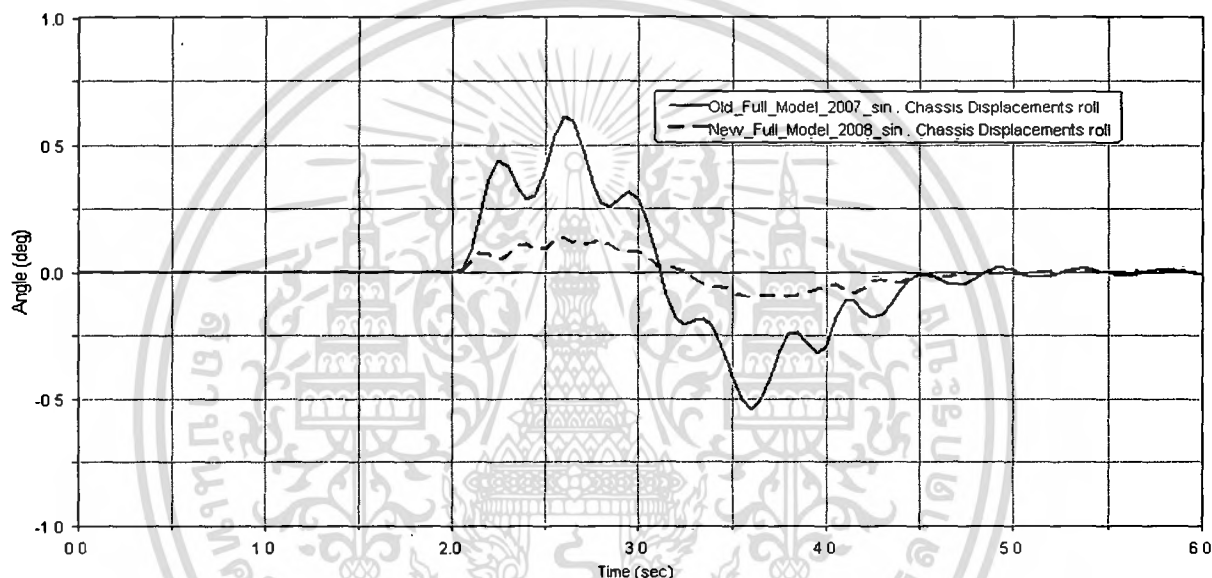
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ข้อดี
1. มีความแข็งแรงและออกแบบง่าย
  2. แกนค้ำโช๊คเป็นแบบแกนค้ำซึ่งจะไม่เกิดการโก่งงอ
  3. จุดศูนย์กลางการถ่วงจะอยู่ต่ำ

ข้อเสีย 1. การติดตั้ง โช้ควางไว้ด้านล่างจะมีพื้นที่น้อยมากทำให้ติดตั้งยาก

การเปรียบเทียบพูลโมเดลของปีก่อนกับปีนี้ โดยจะพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพในการขับขี่ ซึ่งจะพิจารณามุมโคลง มุมพิต มุมยอร์ การเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้จะส่งผลต่อเสถียรภาพในการควบคุมรถ

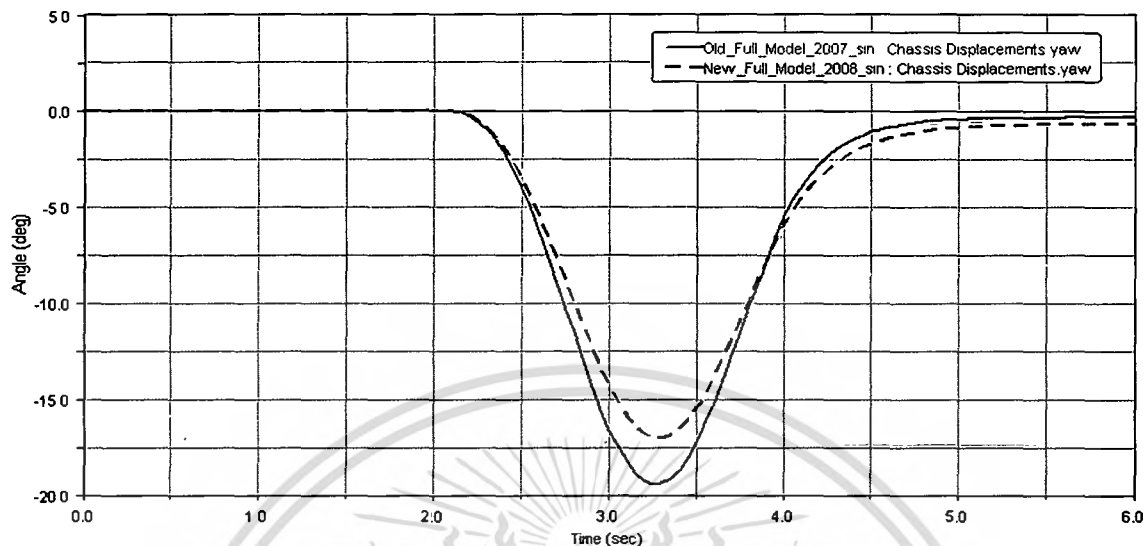
#### 6.4.5. มุมโรล



กราฟที่ 6-24 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมโรล

จากกราฟ 6-24 มุมโรล มีค่าไม่มาก เท่ากับของโครงการในปีที่แล้ว จึงส่งผลให้รถยนต์โคลงน้อยกว่า ของโครงการปีที่แล้ว

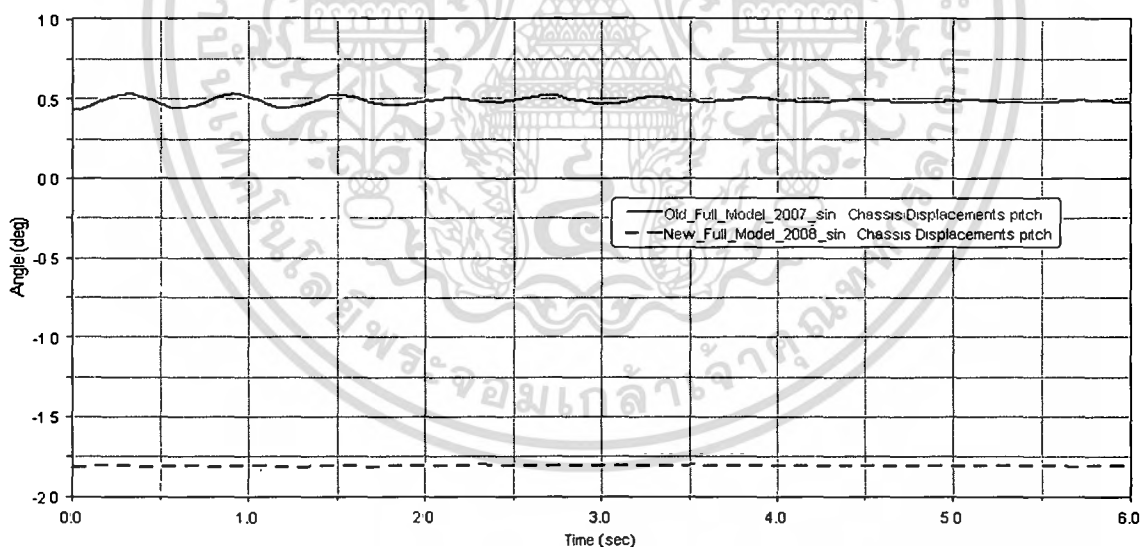
### 6.4.6 มุมยอร์



กราฟที่ 6-25 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมยอร์

จากกราฟที่ 6-25 มุมยอร์ ของ โครงงานปี นี้ก็เข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วกว่าของ โครงงาน ในปี ที่  
แล้ว

### 6.4.7 มุมพิท



กราฟที่ 6-26 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมพิท

จากกราฟที่ 6-26 มุมพิทของ โครงงานปี นี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยน้อยกว่า โครงงานปี ก่อน

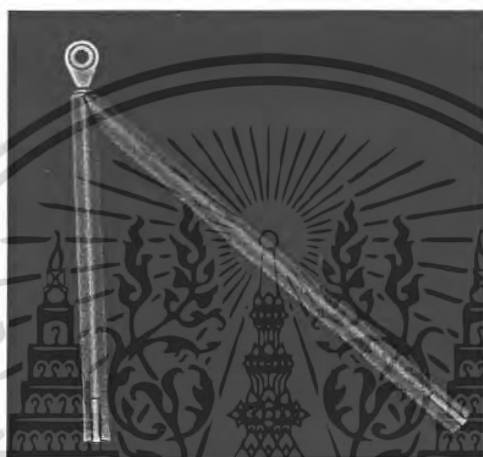
สรุป จากการพิจารณามุม โคลง มุมพิท มุมยอร์ การเปลี่ยนแปลงของมุมเหล่านี้จะส่งผลต่อ  
เสถียรภาพในการควบคุมรถ จะเห็นว่ารถของปี นี้กราฟจะเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วกว่าปี ก่อน ซึ่งส่งผลให้รถ  
มีการ โคลงน้อยกว่าปี ก่อน เมื่อทำการเบรก หรือเข้าโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7 ไฟไนต์เอลิเมนต์

### 7.1 การวิเคราะห์แบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS

หัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายของปีกนกโดยวัดขนาดแรงจากโปรแกรม MSC.ADAMS/Car ซึ่งมีขนาดดังรูปที่ 7-1



รูปที่ 7-1 รูปร่างของปีกนก

### 7.2 การคัดเลือกวัสดุ

เราได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการสร้างปีกนก โดยมีวัสดุต่างๆ ดังนี้

สแตนเลส (ASTM A53 Steam pipe) มีคุณสมบัติดังนี้

Density	7.75 g/cc
Tensile Strength, Ultimate	515MPa
Tensile Strength, Yield	230 MPa
Modulus of Elasticity	189 GPa
Poisson's Ratio	0.3

ตารางที่ 7-1 แสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ของ สแตนเลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็ก (AISI 1022) มีคุณสมบัติดังนี้

Density	7.858g/cc
Tensile Strength, Ultimate	550MPa
Tensile Strength, Yield	360MPa
Modulus of Elasticity	205GPa
Poisson's Ratio	0.29
Shear Modulus	80 GPa

ตารางที่ 7-2 แสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็ก

อะลูมิเนียม (Aluminum 6061) มีคุณสมบัติดังนี้

Density	2.7g/cc
Tensile Strength, Ultimate	124MPa
Tensile Strength, Yield	55.2MPa
Modulus of Elasticity	69GPa
Poisson's Ratio	0.33

ตารางที่ 7-3 แสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ของอะลูมิเนียม

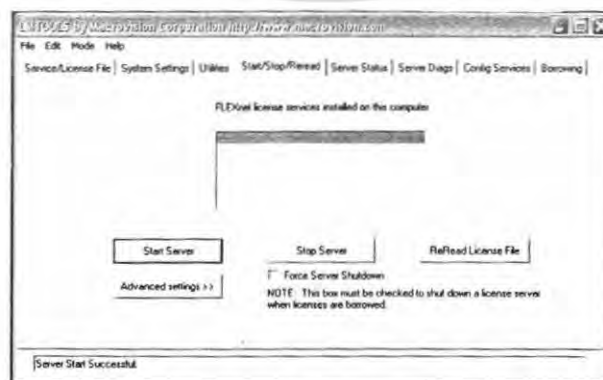
ที่มา [www.matweb.com](http://www.matweb.com)

จากการพิจารณาค่าคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่เลือกมานี้ เลือกใช้ สแตนเลส เนื่องจากมีราคาที่ไม่แพงมากนัก น้ำหนักเบา

### 7.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

#### 7.3.1 การอิมพอร์ต (Import) ไฟล์เข้ามาในโปรแกรม ABAQUS

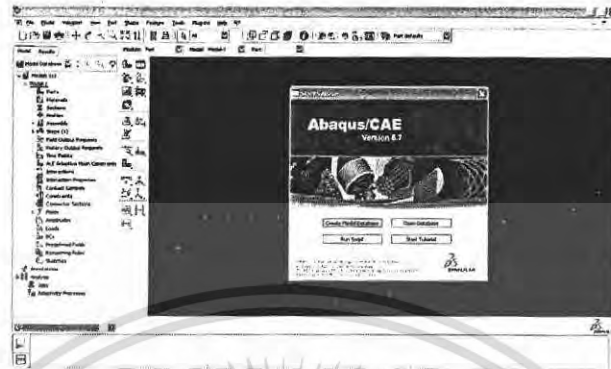
1.1 เปิด โปรแกรม ABAQUS โดยเปิดที่ตัว licensing และเลือก Start/Stop/Reread แล้วกด Start Server ตามรูปที่ 7-2



รูปที่ 7-2 แสดงวิธีเปิด ABAQUS Licensing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

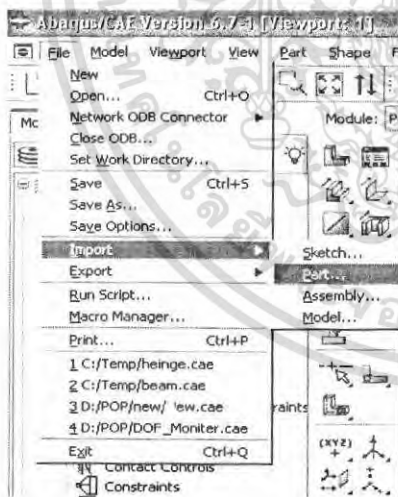
## 1.2 เปิดโปรแกรม ABAQUS CAE หน้าจอแสดงดังรูปที่ 7-3



รูปที่ 7-3 หน้าจอเมื่อเปิดโปรแกรม

1.3 Import part หรือ สร้างขึ้นมา แต่ในที่นี้ Import เข้ามาจากโปรแกรม โดยการ Import File Parasolid เข้ามาใน ABAQUS ได้โดย เข้าไปที่ File > Import > Part ดังรูปที่ 7-4 จะปรากฏ Import Part Dialog Box ขึ้นมาดังในรูปที่ 7-4 จากนั้น Browse ไปที่ File ที่เรา Export มา จากนั้นก็ปรากฏ Create Part from PARASOLID File แล้วให้เลือกที่ Scale กำหนดค่า Parameter ดังรูปที่ 7-5 เพื่อแปลงหน่วยของ Model จาก มิลลิเมตร เป็น เมตร

## 1.4 เราทำการ Import มา 2 ชิ้น คือ ปีกนก และ ลูกหมาก ดังรูปที่ 7-6 และ 7-7



รูปที่ 7-4 ขั้นตอนการ Import ไฟล์

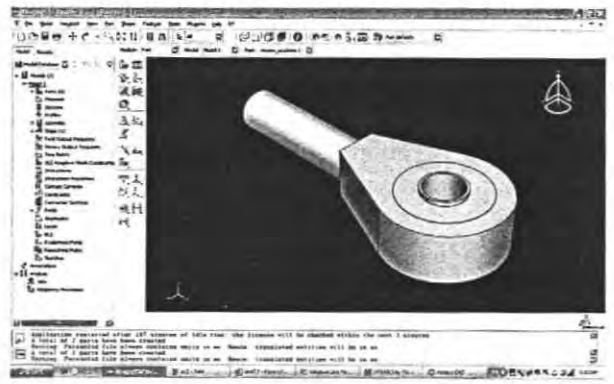


รูปที่ 7-5 ขั้นตอนการเปลี่ยนหน่วยจาก มิลลิเมตร เป็น เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



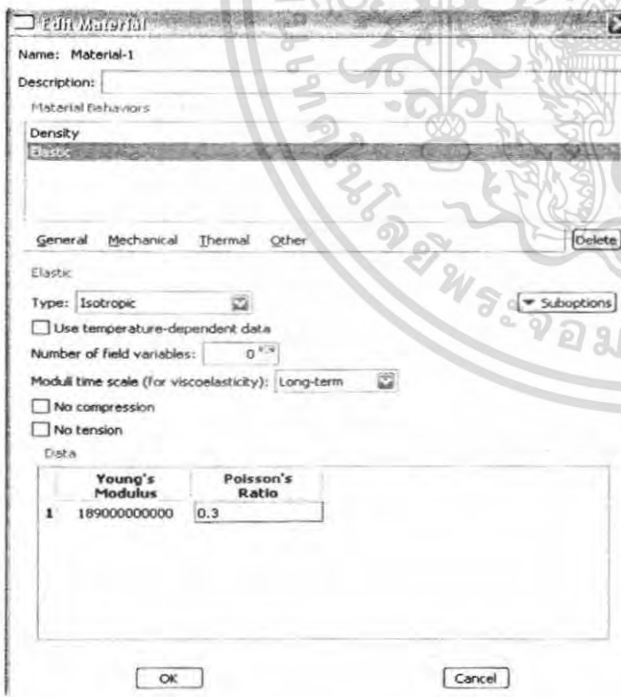
รูปที่ 7-6 แสดงภาพปีกนกที่ Import เข้ามาใน โปรแกรม Import



รูปที่ 7-7 แสดงภาพลูกหมากที่

### 7.4 การกำหนดคุณสมบัติ

7.4.1 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยกดที่ Icon Create Material จะปรากฏ Edit Material Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ต่างๆ ดังนี้คือ Name คือ Steel, ค่า Density เท่ากับ  $0.00775 \text{ g/mm}^3$ , ค่า Young's Modulus เท่ากับ  $189 \times 10^9 \text{ N/mm}^2$  และค่า Poisson Ratio เท่ากับ 0.3 ดังรูปที่ 7-8 และ 7-9





รูปที่ 7-8 แสดงการกำหนดค่า Elastic

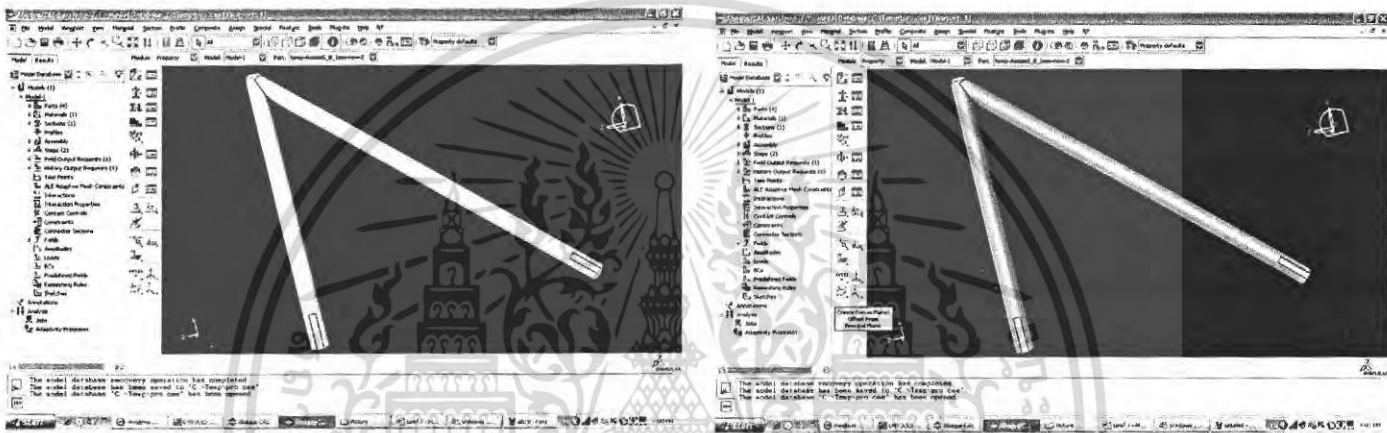


รูปที่ 7-9 แสดงการกำหนดค่า Density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.2 ต่อจากนั้นสร้าง Section โดยกดที่ Icon Create Section  จะปรากฏ Create Section Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ดังนี้คือ Name คือ Steel Sec, Category คือ Solid, Type คือ Homogenous จากนั้นกด Continuous จะปรากฏ Edit Section Dialog box ขึ้นมา ใส่ค่า Parameter ดังนี้คือ Materials คือ Plastic, Plane stress/strain thickness คือ 1


7.4.3 กำหนด Section ให้วัสดุโดยกดที่ Icon Assign Section  จากนั้นคลิกเลือกที่ Model ทั้งสอง ทำให้สีของ Model เปลี่ยนเป็นสีเขียว ดังรูปที่ 7-10 และ 7-11



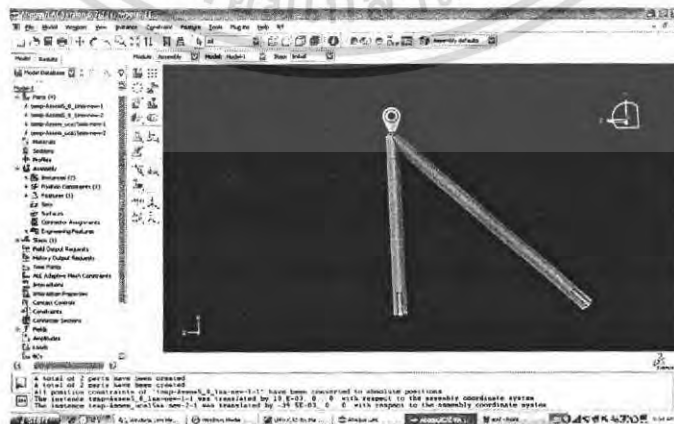
รูปที่ 7-10 ก่อนกำหนด Section

รูปที่ 7-11 หลังกำหนด Section

### 7.5 การประกอบ

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

7.5.2 จัดวางตำแหน่งของปีกนกและลูกหมากให้เป็นดังรูปที่ 7-12

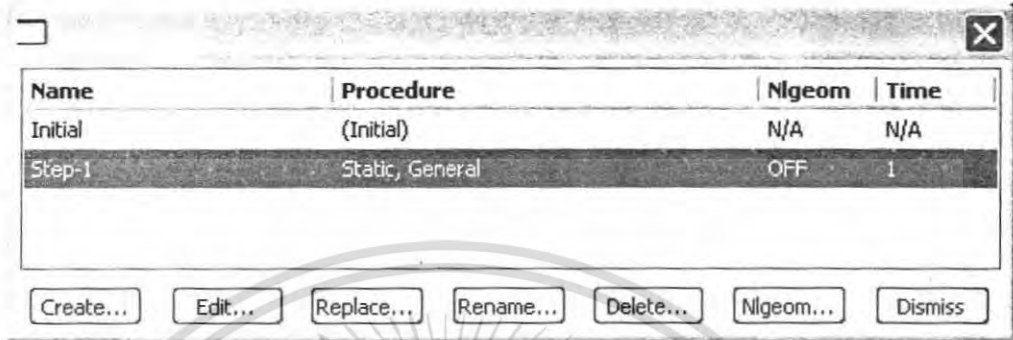


รูปที่ 7-12 แสดงรูปปีกนกที่ประกอบกับลูกหมากเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.6 การกำหนดขั้นตอน

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



รูปที่ 7-13 การสร้าง Step

## 7.7 การกำหนดขอบเขต

7.7.1 ยึดทุกชิ้นเข้าด้วยกันโดยกดที่ Icon Create Constrain จะปรากฏ Create Constrain Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ต่างๆดังนี้คือ Name:lca\_sph, Type : Tie กด Continue แล้วเลือก Surface ดังรูปที่ 7-14



รูปที่ 7-14 การยึดติดปีกนกกับลูกหมาก

## 7.8 การกำหนดโหลด

7.8.1 กำหนด Boundary Condition โดยกด Icon Create Boundary Condition จะปรากฏ Create Boundary Dialog box ขึ้นมา จากนั้นใส่ค่า Parameter ดังรูป 7-15 แล้วกด Continue จากนั้นเลือกที่ปลายทั้ง 2 ข้างของปีกนกจากนั้นจะปรากฏ Edit Boundary Condition จากนั้นใส่ค่า Parameter ดังรูป 7-16 เพื่อทำการยึดหูข้อ 2 ข้าง ไม่ให้เคลื่อนที่และหมุนในแกนใดๆ และใส่แรงกระทำตามตารางที่ 7-1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Single lane change	Longitudinal (N)	Lateral (N)	Normal (N)
ล้อหน้าซ้าย	-12.8	-1505.8	1404.5
ล้อหน้าขวา	-18.6	-1428.4	1805.4
ล้อหลังซ้าย	-13	1368.4	1301.3
ล้อหลังขวา	-17.8	876.7	1753.9

Ramp steer	Longitudinal (N)	Lateral (N)	Normal (N)
ล้อหน้าซ้าย	-14.9	-1577.9	1464.1
ล้อหน้าขวา	-7.2	-790.4	713.9
ล้อหลังขวา	-11.1	353	1109.3
ล้อหลังซ้าย	-21.3	-1869.2	2023.2

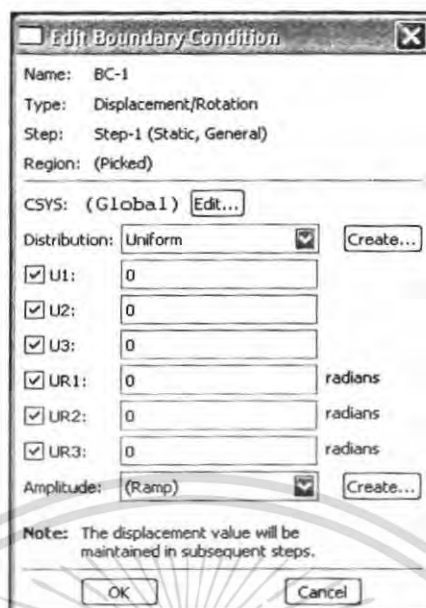
Braking (100 m/s)	Longitudinal (N)	Lateral (N)	Normal (N)
ล้อหน้าซ้าย	-1789.5	-20.6	1812.5
ล้อหน้าขวา	-1789.5	-20.5	1812.5
ล้อหลังซ้าย	-587	-5.2	750
ล้อหลังขวา	-587	-5.2	750

ตารางที่ 7-1 แรงกระทำที่เกิด ณ ล้อต่างๆ



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 7-16 การใส่ค่า Parameter ใน Edit Boundary Condition Dialog box

7.8.2 กำหนด Load ที่ลูกหมากซึ่งจะต่อกับคอกม้า โดยเลือกชนิดของโหลดเป็น Concentrated Forceคลิกที่จุดเชื่อมต่อกับคอกม้า (ตรงข้ามหูยึด ทั้ง 2 ข้าง) แล้วใส่แรงตามแกนที่ได้ระบุไว้แล้วตามตารางที่ 7-1 ตารางที่ 7-2 ดังรูปที่ 7-17



รูปที่ 7-17 แสดงการสร้าง Concentrated Force

## 7.9 การแบ่งเม็ช

7.9.1 ที่ Module Mesh เป็นขั้นตอนการแบ่งเม็ช แต่เนื่องจากรูปพื้นที่ส่วนมากเป็นผิวโค้งจึงทำให้แบ่งเม็ช ยาก จึงแก้ปัญหาโดยกำหนดใช้เม็ช 3 เหลี่ยม ในการตีแทนเม็ช 4 เหลี่ยมเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว เลือกชนิดของเม็ช โดยกดที่ Icon Assign Mesh Control  แล้วเลือกชนิดของเม็ช เป็นสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 7-18 แล้วทำการเลือกชิ้นที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

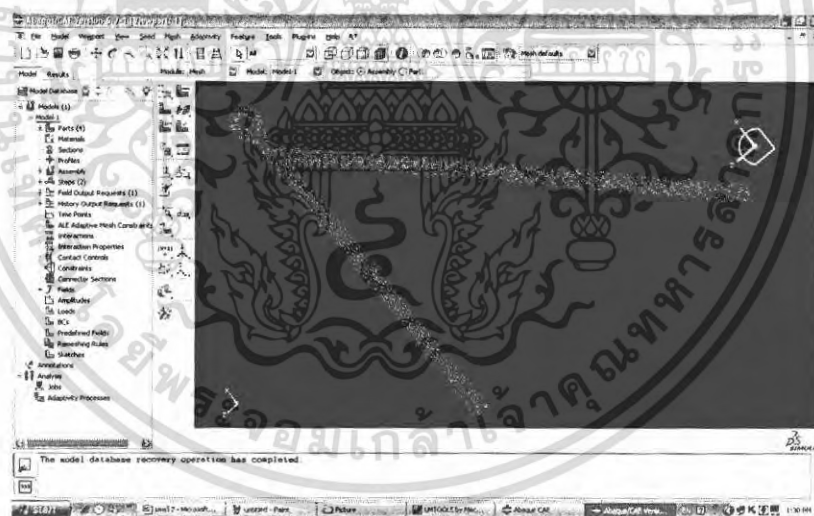


รูปที่ 7-18 แสดงการเลือกชนิดของ Mesh

7.9.2 วาง Seed โดยกด Icon Seed Part Instant แล้วเลือกที่ Model

7.9.3 แบ่งเม็ช โดยกดที่ Icon Mesh Part Instance แล้วเลือกที่ Model ก็จะได้เม็ช

คังรูปที่ 7-19

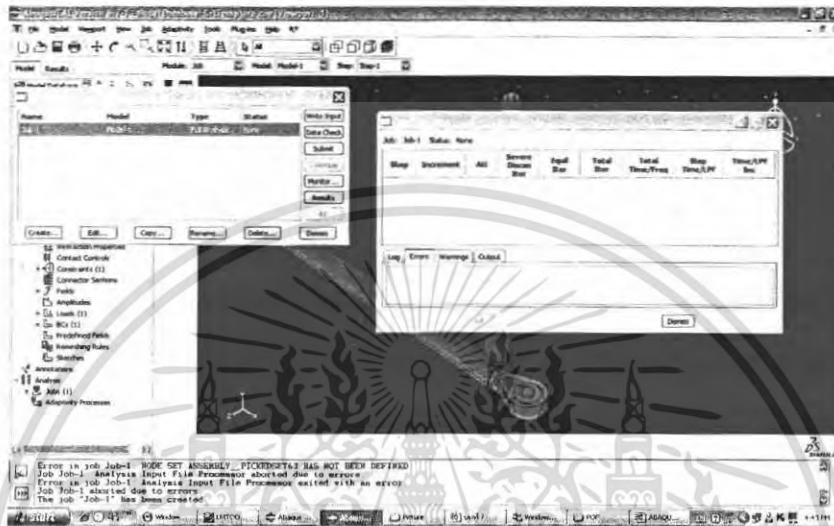


รูปที่ 7-19 แสดงรูปของปีกนกและลูกหมากเมื่อตี Mesh เสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.10 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

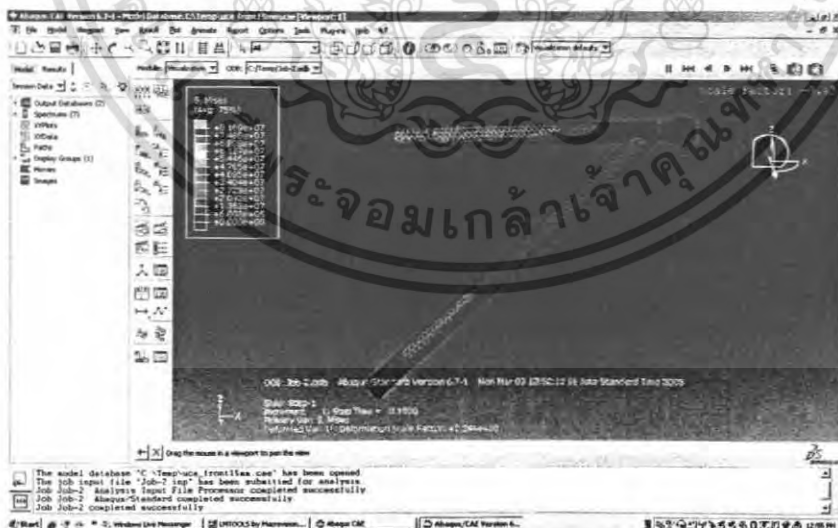
7.10.1 Create job โดยเลือกที่ Icon Create Job ก็จะปรากฏ Create Job Dialog box ให้ใส่ Parameter ดังนี้คือ Name: Job-1 จากนั้นกด Continue ก็จะปรากฏ Edit Job Dialog box ขึ้นมาให้กด OK จากนั้นโปรแกรมก็จะทำการคำนวณดังรูปที่ 7-21



รูปที่ 7-20 แสดงภาพระหว่างรันโปรแกรม

## 7.11 การแสดงผล

7.11.1 กดที่ Icon Plot Contours เพื่อดูผลที่เกิดขึ้นจะได้ดังรูปที่ 7-22



รูปที่ 7-21 แสดงผลการทดสอบจากโปรแกรมอะบาคัส

เหล็กท่อที่เราใช้เป็น ASTM A53 Stream Pipe ซึ่งมีค่า Yield Stress เป็น 230 MPa หลังจากทำการวิเคราะห์แล้วจะได้รับความเค้นวอนมิตเสสสูงสุดเป็น 61.27 MPa แล้วทำการคำนวณหา Safety Factor (SF) ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร  $SF = \left[ \frac{YieldStress}{S, Mises} \right]$

แทนค่า  $SF = \left[ \frac{230(10^6)}{6.127(10^7)} \right]$

$$= 3.75$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับปีกนกที่ถูกออกแบบไว้ในโครงงานปีที่แล้ว ซึ่งมีขนาด 3/4 นิ้ว 19) มิลลิเมตร (และมีความหนา 3 มิลลิเมตร ซึ่งผลจากการลดขนาดของปีกนกลงเป็น 5/8 นิ้ว 15.8) มิลลิเมตร (และมีความหนาของปีกนกด้านหน้าคือ 1.2 มิลลิเมตร และปีกนกด้านหลัง 1.5 มิลลิเมตร ส่งผลให้น้ำหนักของรถแข่งเบาขึ้น แต่ยังคงความแข็งแรงเช่นเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

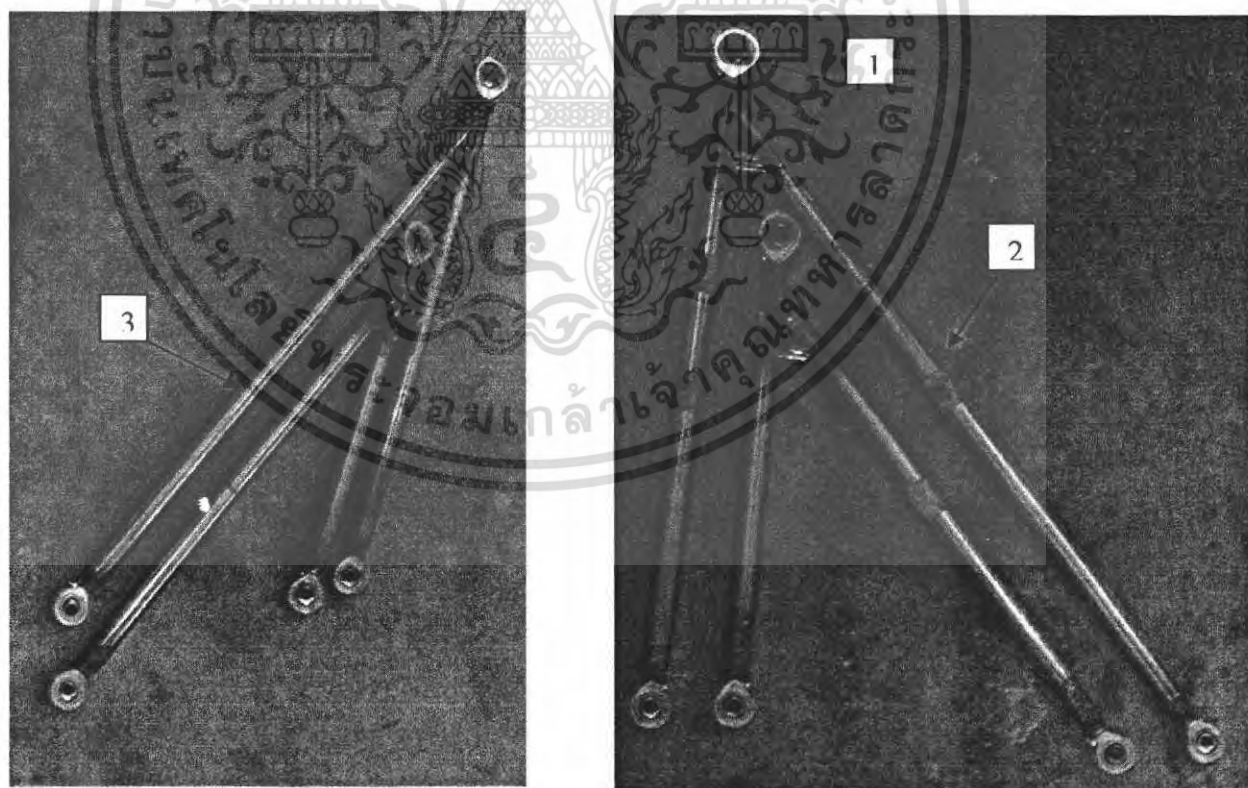
## บทที่ 8 ผลงานที่เสร็จสมบูรณ์

### 8.1 ระบบช่วงล่าง

#### 8.1.1 ปีกนกบนและปีกนกล่าง

ในการสร้างปีกนกบนและปีกนกล่าง ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง มีวิธีการเลือกวัสดุและกรรมวิธีการสร้างดังนี้

1. ลูกหมากตัวเมีย : ลูกหมากตัวเมียของปีกนกบนด้านหน้าและปีกนกล่างด้านหน้า เลือกใช้ขนาด M10
2. ท่อ : ท่อที่ใช้ทำปีกนกด้านหน้าเป็นท่อสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.2 มิลลิเมตร
3. ท่อ : ท่อที่ใช้ทำปีกนกด้านหลังเป็นท่อสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร
4. กรรมวิธีในการเชื่อม : ใช้การเชื่อมอาร์กอนในการเชื่อมชิ้นส่วนปีกนกเข้าด้วยกันเนื่องจากกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กอนสามารถควบคุมแนวรอยเชื่อมได้ดี



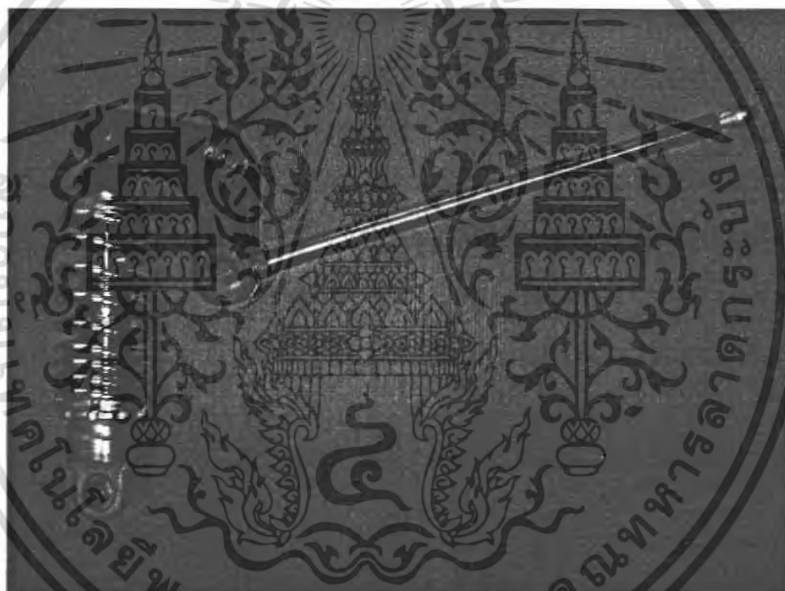
รูปที่ 8-1 แสดงภาพ ปีกนกด้านหลัง (ซ้าย) และ ปีกนกด้านหน้า (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.1.2 ก้านคั่น และสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง

ก้านคั่นและสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรงเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงจากล้อมายัง โช้ค ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการสร้างมีดังนี้

1. ก้านคั่น : สำหรับก้านคั่นใช้ท่อสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร ในการสร้าง
2. บูช : ใช้บูชที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร
3. ลูกหมากตัวเมีย : ใช้ลูกหมากตัวเมียขนาด M10
4. สามเหลี่ยมเปลี่ยนแนว : สร้างจากแผ่นเหล็กหนา 3 มิลลิเมตร
5. กรรมวิธีการเชื่อม : ในการเชื่อมสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง เราใช้กรรมวิธีลวดเชื่อมอาร์กอน เพื่อต้องการควบคุมแนวรอยเชื่อมให้สม่ำเสมอ

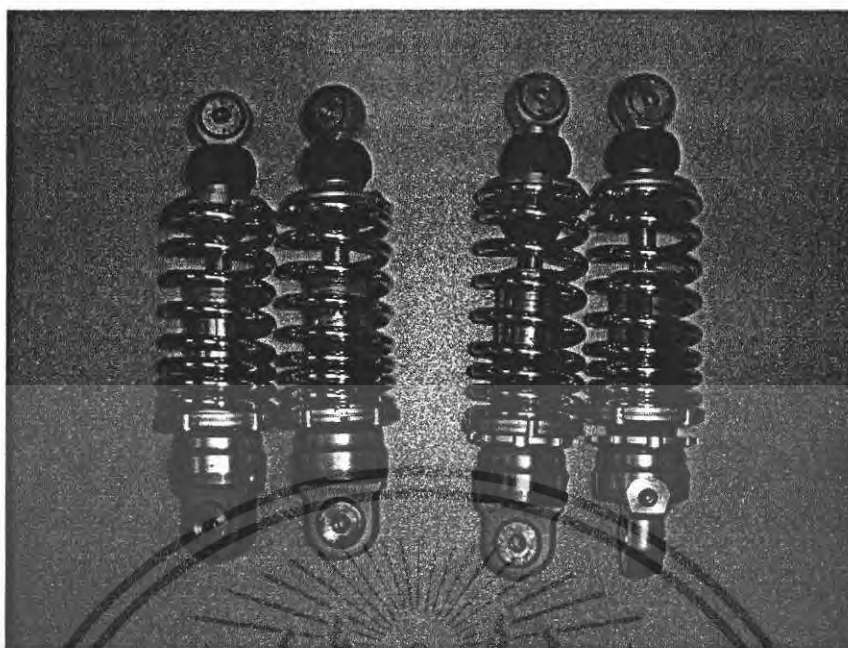


รูปที่ 8-2 แสดงภาพ ชุดสามเหลี่ยมเปลี่ยนแนวแรง

### 8.1.3 โช้ค และ แคมเปอร์

โช้คและแคมเปอร์ที่เลือกใช้ ได้ค่านิจของสปริงจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ADAM Car ซึ่งได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท YSS ประเทศไทย จำกัด โดยได้รับ โช้คและแคมเปอร์ที่มีค่าคงที่สปริงอยู่ในช่วงที่เราต้องการ โดยมีค่าคงที่สปริงทั้งด้านหน้าและหลังประมาณ 45-60 นิวตัน/มิลลิเมตร

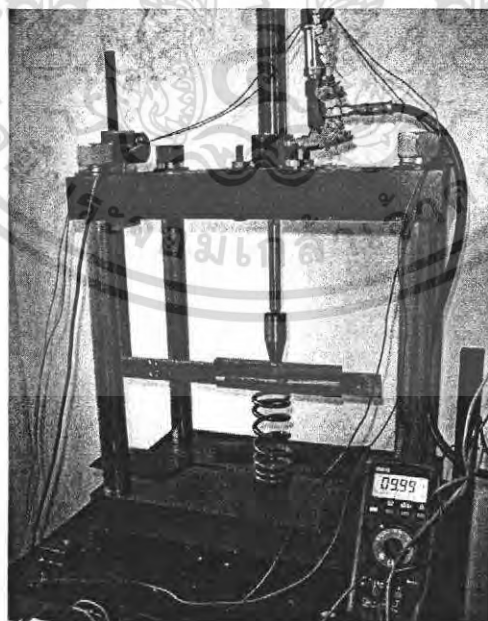
ดังรูปที่ 8-3



รูปที่ 8-3 แสดงภาพ โช้คและแฉิมเปอร์

#### 8.1.4 การทดสอบสปริง

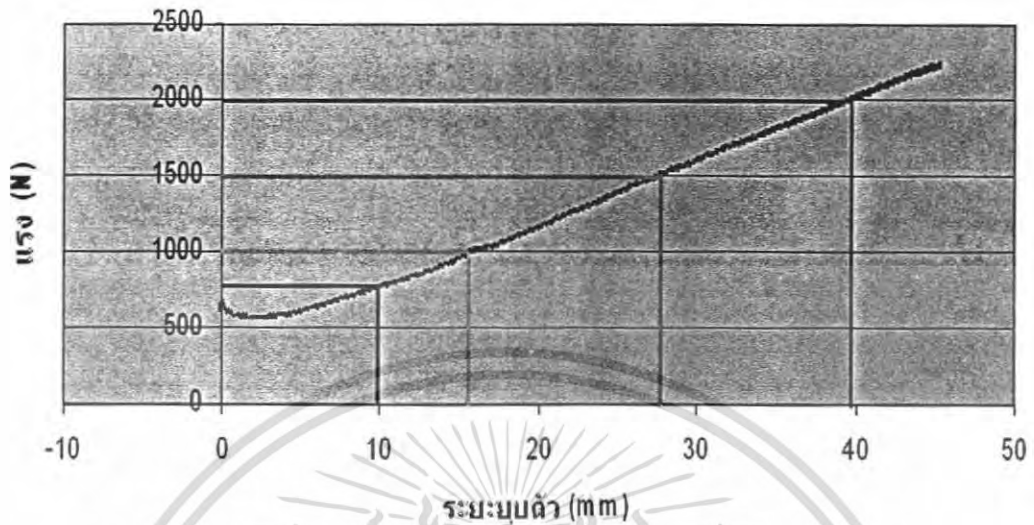
โช้คที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท YSS ประเทศไทยนั้น มีค่านิจของสปริงอยู่ที่ประมาณ 45-60 นิวตัน/มิลลิเมตร ซึ่งต้องทำการทดสอบก่อนที่จะนำมาใช้กับรถแข่ง โดยใช้เครื่องกด Hydraulic ในการทดสอบ แล้วทำการเก็บผล แล้วนำมาวาดกราฟ ดังรูปที่ 8-6



รูปที่ 8-4 แสดงภาพเครื่องกด Hydraulic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Spring Test



รูปที่ 8-5 แสดงกราฟข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสปริง

พิจารณาจุดที่มีแรงกระทำ 2000 นิวตัน ซึ่ง ณ จุดนั้น จะมีระยะขยับตัวประมาณ 40 มิลลิเมตร จึงทำการคำนวณหาค่าคงที่ของสปริงได้ดังนี้

จากสูตร  $F = ks$  ----- (8-1)

พิจารณา 4 จุดทั้ง 4 จุดดังตาราง

จุด	แรงกระทำ (นิวตัน)	ระยะขยับตัว (มิลลิเมตร)	ค่าคงที่สปริง (นิวตัน/มิลลิเมตร)
1	2000	40	50
2	1500	28	53.57142857
3	1000	15	66.66666667
4	550	10	55
		เฉลี่ย	56.30952381

ตารางที่ 8-1 แสดงค่าคงที่ของสปริงในแต่ละจุดที่พิจารณา

ตัวอย่างการคำนวณ

แทนค่า  $2000 = k(40)$

ดังนั้น  $k = 50$  นิวตัน/มิลลิเมตร

ซึ่งจากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยคงที่ของสปริง ซึ่งมีค่าประมาณ 56.3 นิวตัน/มิลลิเมตร ซึ่งอยู่

ในช่วง 45-60 นิวตัน/มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.1.5 คอม่้า

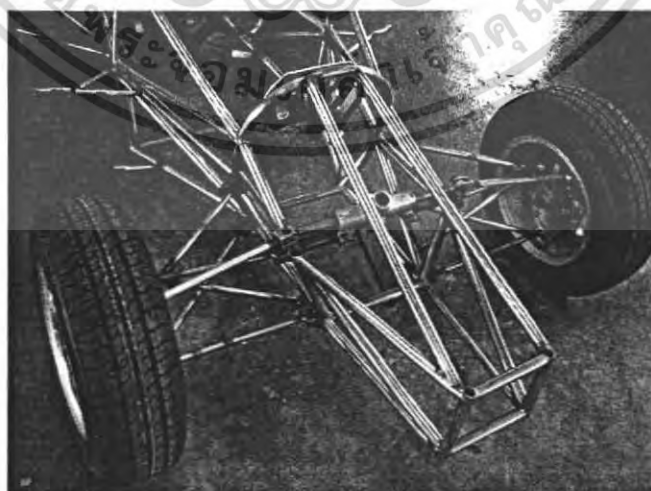
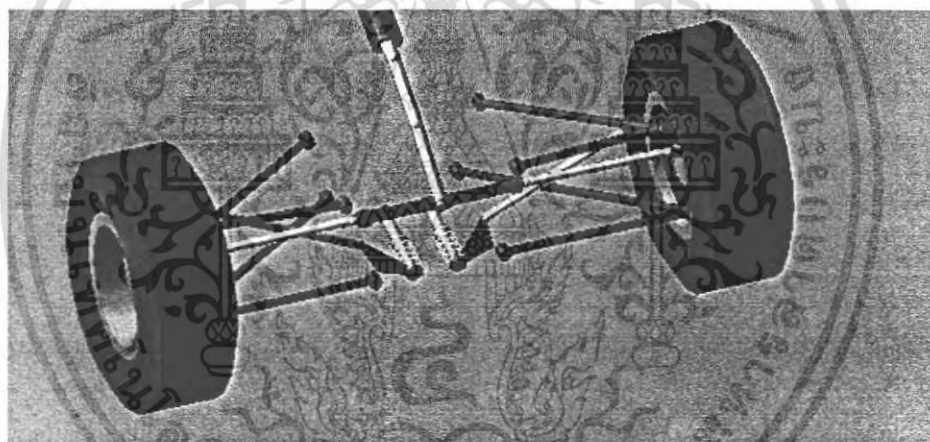
คอม่้าทำจากอะลูมิเนียมเกรด 5083 ผลิตด้วยกรรมวิธี การกัด (Milling)



รูปที่ 8-6 แสดงภาพคอม่้า

### 8.1.6 ระบบช่วงล่างที่สมบูรณ์

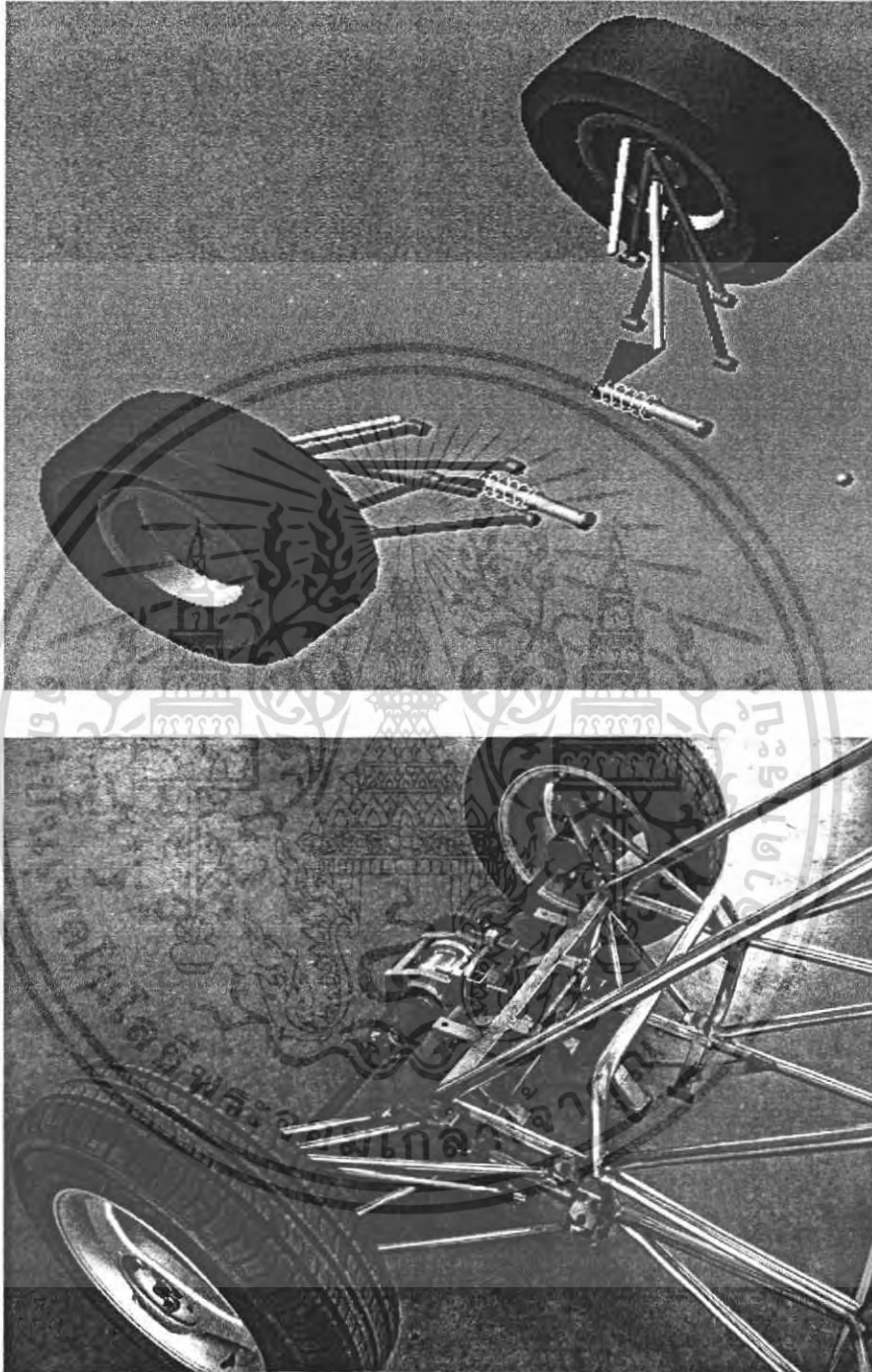
- ระบบช่วงล่างด้านหน้า



รูปที่ 8-7 แสดงภาพปีกนกด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

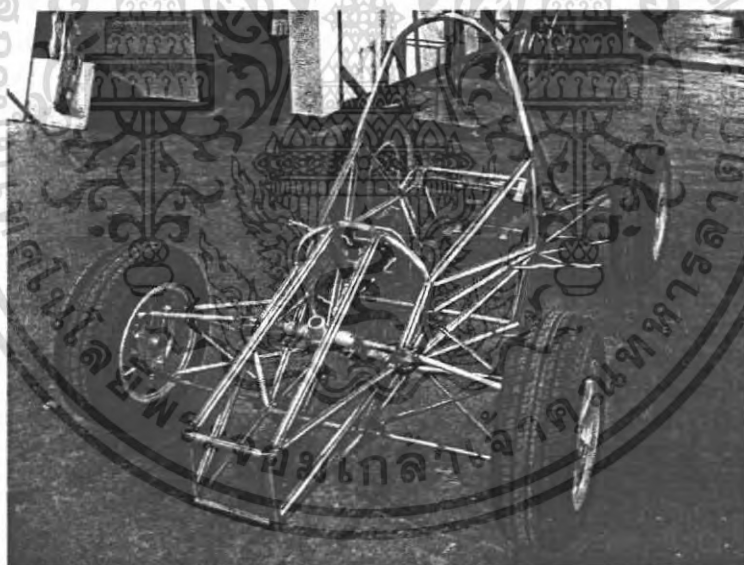
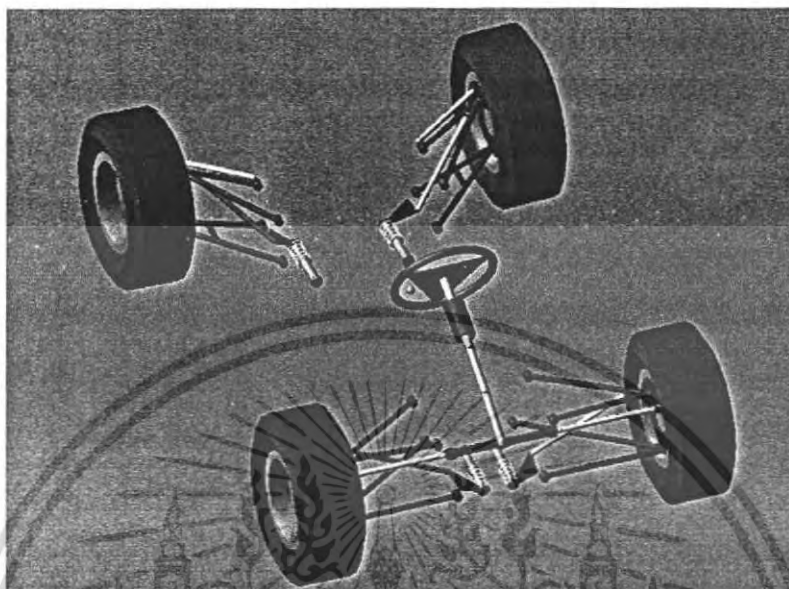
- ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 8-8 แสดงภาพระบบช่วงล่างด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบช่วงล่างที่สมบูรณ์



รูปที่ 8-9 แสดงภาพปีกนกทั้ง ด้านหน้าและด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8.2 การปรับตั้งค่ามุมล้อ

- ตารางคำแนะนำมุมล้อต่างๆ ที่นิยมใช้กับรถแข่ง

Wheel Angle	Angle( deg)	Angle Change (deg)
Camber	-4 ~ -2	(Camber degree to grand) -2 ~ +0.5 / 50 mm (Bound)
Toe	Front 0 ~ Toe out 0.5 Rear 0 ~ Toe in 0.5	-
Caster	3 ~ 10	-
Kingpin	5 ~ 15	-

ตารางที่ 8-2 แสดงค่ามุมล้อต่างๆ



รูปที่ 8-10 แสดงภาพการปรับตั้งมุมล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.3 ผลการทดสอบโดยการจับจีจริง

ในการทดสอบผลของมุมล้อย่างต่างๆที่มีผลต่อการจับจี เราจะทำการทดสอบโดยการจับจีในสถานะเดิม แต่มีการตั้งค่ามุมล้อยตามที่ได้แสดงไว้ เพื่อหาค่ามุมล้อยที่ให้เสถียรภาพในการควบคุมที่ดีที่สุด และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม อคัมส์ ซึ่งจากการทดสอบจับจีเราพบว่า

1. ที่มุมแคมเบอร์ -2 ทั้งด้านซ้ายและขวา ของล้อยหน้า ให้ความรู้สึกการควบคุมที่ดีที่สุด และพวงมาลัยค่อนข้างนิ่งในขณะที่ขับทางตรงและในขณะที่เข้าโค้งที่ความเร็วสูงพวงมาลัยก็ยังคงตอบสนองได้ค่อนข้างดี ทั้งนี้ก็เพราะมุมแคมเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก



## บทที่ 9 บทสรุปและวิจารณ์

### 9.1 สรุปผล

9.1.1 ในการออกแบบระบบช่วงล่างของรถแข่ง ผู้ออกแบบได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบช่วงล่าง ทั้งในด้านความมีเสถียรภาพและความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่างๆ โดยความมีเสถียรภาพและความง่ายต่อการควบคุมมีผลมาจากตัวแปรเหล่านี้คือ มุมแคมเบอร์, จุดศูนย์กลางการโคลง, การเปลี่ยนแปลงความกว้างฐานล้อ และ ระยะโท โดยเราได้ทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรเหล่านี้ และ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยการจำลองการเคลื่อนที่ในสภาวะต่างๆ

9.1.2 โปรแกรม MSC. ADAMS เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยว เป็นโปรแกรมที่ใช้งานได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับลักษณะในการออกแบบและการควบคุมตัวแปรของผู้ออกแบบ ซึ่งวิธีการใช้โปรแกรมในการออกแบบและการจำลองการเคลื่อนที่ได้ทำการอธิบายไว้แล้วในบท Suspension simulation

9.1.3 โปรแกรม ABAQUS เป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบช่วงล่าง ซึ่งทำให้สามารถหาขนาดของชิ้นส่วนปีกนก โดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมอะบาคัสได้แสดงไว้ในบทที่ 7

9.1.4 การหาค่า  $k$  ของสปริงสามารถทำได้โดยการจำลองการสั่นของระบบช่วงล่างเป็นการสั่นแบบอิสระโดยใช้ทฤษฎีของวิชา Vibration โดยให้ความถี่ธรรมชาติของระบบช่วงล่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับรถแข่ง แล้วจึงใช้โปรแกรม MSC.ADAMS/VIEW ช่วยในการหาค่า  $k$  เมื่อได้ค่า  $k$  ของสปริงแล้วจึงนำมาวิเคราะห์ตรวจสอบความเสียหายที่ออกแบบนั้นรับแรงได้เพียงพอกับความต้องการหรือไม่ โดยค่า  $k$  ที่ใช้กับระบบช่วงล่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-2

### 9.2 วิจารณ์ผล

9.2.1 ในการปรับตั้งมุมล้อ ต้องใช้คนขับเป็นคนบอกถึงอาการของรถในแต่ละมุมล้อซึ่งทำให้ไม่มีข้อมูลรองรับที่เพียงพอ และการตั้งมุมล้อก็ขึ้นกับการออกแบบของรถแต่ละคัน

9.2.2 กรรมวิธีในการออกแบบระบบช่วงล่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นพิถีพิถันต่างๆ ในโปรแกรม อาจผิดพลาดจากการสร้างจริงได้เพราะอาจจะเกิดการติดขัดในขณะติดตั้งหรือไม่เข้ากันกับระบบอื่นเช่น ระบบขับเคลื่อน ระบบบังคับเลี้ยว เป็นต้น

### 9.3 ปัญหาที่พบในการทำโครงการงาน

9.3.1 ปัญหาการติดต่อกับบริษัทที่ให้การสนับสนุน เนื่องจากบริษัทไม่สามารถผลิตตามที่ได้ ออกแบบไว้ให้ตรงกับความต้องการ แต่บริษัทได้ส่งผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้วจัดส่งมาให้ ซึ่งทำให้ส่งผลต่อ เสถียรภาพของระบบช่วงล่างต่อการขับขี่

9.3.2 ปัญหาที่เกิดจากน้ำหนักได้สปริง(Sprung Mass) ที่กระทำตรงตำแหน่งของช่วงล่าง ด้านหน้าและด้านหลังเพราะในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางถ่วงของ Sprung Mass นั้นตำแหน่งของจุด CG อาจมีความคลาดเคลื่อนได้เพราะว่าการออกแบบการวางตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆบนรถ ตัวอย่างเช่น ตำแหน่งเครื่องยนต์ คนขับ เป็นต้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริงเพราะว่าในการติดตั้ง ชิ้นส่วนต่างๆบนรถนั้นย่อมมีปัญหาในด้านพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้ตำแหน่ง CG อาจมีความ คลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่ออกแบบไว้จึงส่งผลกระทบต่อแรงของน้ำหนักได้สปริง (Sprung Mass) ที่กระทำ ตรงตำแหน่งของช่วงล่างด้านหน้าและด้านหลังนั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งอาจทำให้ผลการทดสอบจริงไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่วิเคราะห์จากการจำลองใน โปรแกรม

#### 9.3.3 ปัญหาจากการทำงานร่วมกับกลุ่มเฟรม กลุ่มเครื่องยนต์

กลุ่มเฟรม : เป็นกลุ่มที่ริเริ่มการออกแบบขนาดของรถ ซึ่งการออกแบบเฟรมจะเน้น โครงสร้าง ให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ซึ่ง โครงสร้างกลุ่มเฟรมได้ออกแบบแล้วให้กลุ่มช่วงล่างพิจารณาการวางตัว ของปีกนก การติดตั้ง โช้คและแคมเปอร์ จึงต้องพิจารณาดูอย่างละเอียดและพื้นที่ที่มีค่อนข้างจำกัด ทำให้ การออกแบบถูกจำกัดตามมาด้วยและต้องเสียเวลาเป็นสัปดาห์เนื่องจากติดปัญหาเรื่อง โครงสร้าง

กลุ่มเครื่องยนต์ : การวางตัวของเครื่องยนต์และชุดส่งกำลังมีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบช่วงล่าง ซึ่งการติดตั้ง โช้คและแคมเปอร์ก็ต้องพิจารณาดูโครงสร้างของเครื่องยนต์ว่ามีพื้นที่ต่อการติดตั้ง โช้ค

9.3.4 ปัญหาเรื่องอุปกรณ์ในการทำเวิร์คช็อปสูญหายบ่อยครั้ง การใช้อุปกรณ์ในช้อปบางครั้ง ต้องใช้กันหลายคน แล้วไม่เก็บให้ไว้ที่เดิมทำให้การหามาใช้งานค่อนข้างยาก เสียเวลา และสูญหายใน ที่สุด

9.3.5 ปัญหาเรื่องวัสดุและอุปกรณ์ในท้องตลาดไม่ตรงตามต้องการ เช่นการหาซื้อสแตนเลส ต้องไปซื้อจากแถวพระราม2 ซึ่งค่อนข้างไกล เสียค่าใช้จ่ายมาก และเกรดของสแตนเลสมีจำกัดซึ่ง ส่งผลต่อการคำนวณเป็นอย่างมาก

9.3.6 ปัญหาเรื่องเวลาและจำนวนคน กลุ่มโครงการระบบช่วงล่างมีสมาชิกเพียงสองคนทำให้ ต้องดำเนินการเองทั้งหมด กล่าวคือต้องทำการออกแบบและสร้างจริงในเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นงานที่หนัก และต้องใช้เวลาทำให้งานเดินไปได้ช้า

## 9.4 แนวทางแก้ไข

9.4.1 ในการออกแบบบรรด การกำหนดขนาดและการวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆควรมีการประชุมให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกัน ควรจัดการประชุมทุกสัปดาห์ เพื่อทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้น แนวทางการแก้ไขและระยะเวลาการทำงาน

9.4.2 ในการออกแบบระบบช่วงล่างจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่มีความละเอียดค่อนข้างมาก ทำให้การศึกษาย่างละเอียดเป็นไปได้ยาก เนื่องจากเวลาที่มีน้อยและพื้นฐานความรู้ด้านนี้มีไม่มาก จึงควรแบ่งความรับผิดชอบงานต่างๆ เช่น รุ่นน้องที่มีความสนใจการทำรถก็แบ่งงานที่รุ่นน้องสามารถรับผิดชอบได้ตามความเหมาะสมและก็ควรติดตามอย่างใกล้ชิดอีกทั้งเป็นการเพิ่มประสบการณ์ให้กับรุ่นน้องอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael Blundell, Damian Harty Multibody System Approach to Vehicle Dynamics. ELSEVIER, 2004
- [2] Thomas D Gillespie Fundamental of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc
- [3] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, Richard G. Budyns Mechanical Engineering Design 7<sup>th</sup> Ed.
- [4] Society of Automotive Engineers of Japan
- [5] www.matweb.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. ราคาของชิ้นส่วนต่างๆ

## 1.1 ปีกนกบนด้านหน้า

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ท่อสแตนเลส	$\phi 5/8$ " หนา 1.2 มิลลิเมตร	1.2 เมตร	132.5 บาท/เมตร	159	
2	เหล็กเพลลา	$\Phi 16$ มิลลิเมตร	0.16 เมตร	67 บาท/เมตร	10	
3	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ มิลลิเมตร	2 ตัว	1022 / ตัว	2044	Sponsor
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 8$ มิลลิเมตร	4 ตัว	826 / ตัว	3304	Sponsor
5	เหล็กกล่อง	1" x 2" หนา 2 มิลลิเมตร	0.12 เมตร	120 บาท/เมตร	15	
				รวม	5532	

## a. ปีกนกบนด้านหลัง

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ท่อสแตนเลส	$\phi 5/8$ " หนา 1.5 มิลลิเมตร	1 เมตร	165 บาท/เมตร	165	
2	เหล็กเพลลา	$\Phi 16$ มิลลิเมตร	0.16 เมตร	67 บาท/เมตร	10	
3	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ มิลลิเมตร	2 ตัว	1022/ตัว	2044	Sponsor
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 8$ มิลลิเมตร	4 ตัว	826/ตัว	3304	Sponsor
5	เหล็กกล่อง	1" x 2" หนา 2 มิลลิเมตร	0.12 เมตร	120 บาท/เมตร	15	
				รวม	5538	

## b. ปีกนกล่างด้านหน้า

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ท่อสแตนเลส	$\phi 5/8$ " หนา 1.2 มิลลิเมตร	1.6 เมตร	132.5 บาท/เมตร	212	
2	เหล็กเพลลา	$\Phi 16$ มิลลิเมตร	0.16 เมตร	67 บาท/เมตร	10	
3	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ มิลลิเมตร	2 ตัว	1022/ตัว	2044	Sponsor
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 8$ มิลลิเมตร	4 ตัว	826/ตัว	3304	Sponsor
5	เหล็กกล่อง	1" x 2" หนา 2 มิลลิเมตร	0.12 เมตร	120 บาท/เมตร	15	
				รวม	5585	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## c. ปีกนกลางด้านหลัง

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ท่อสแตนเลส	$\phi \frac{5}{8}$ " หน้า 1.5 มิลลิเมตร	1.4 เมตร	165 บาท/เมตร	231	
2	เหล็กเพลลา	$\Phi 16$ มิลลิเมตร	0.16 เมตร	67 บาท/เมตร	10	
3	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ มิลลิเมตร	2 ตัว	1022/ตัว	2044	Sponsor
4	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 8$ มิลลิเมตร	4 ตัว	826/ตัว	3304	Sponsor
5	เหล็กกล่อง	1" x 2" หน้า 2 มิลลิเมตร	0.12 เมตร	120 บาท/เมตร	15	
				รวม	5604	

## d. ระบบเปลี่ยนแกนโช๊ค

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ท่อสแตนเลส	$\phi \frac{5}{8}$ " หน้า 1.5 มิลลิเมตร	1.2 เมตร	165 บาท/เมตร	198	
2	บุช	$\Phi 12$ มิลลิเมตร	4 ตัว	60 บาท/ตัว	240	
3	ลูกหมากตัวเมีย	$\Phi 10$ มิลลิเมตร	8 ตัว	1022/ตัว	8176	Sponsor
4	เหล็กแผ่นสั่งตัดทำ	หน้า 3 มิลลิเมตร	8 แผ่น	40/แผ่น	320	
	ตัวเปลี่ยนแกน					
5	โช๊ค YSS MX302	-	-	4 ตัว	8400	Sponsor
				รวม	17334	

## e. คอมม่า

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)
1	อะลูมิเนียมตัน	250 x 250 x 100	4 ก้อน	3800/ก้อน	15200
				รวม	15200

## f. จิกยึดชิ้นงาน

	รายการ	ขนาด	จำนวน	ราคา/หน่วย	ราคา (บาท)
1	เหล็กกล่อง	หน้า 1.5 มิลลิเมตร	6 เมตร	95 บาท/เมตร	570
2	เหล็กฉาก	หน้า 2 มิลลิเมตร	1 เมตร	100 บาท/เมตร	100
				รวม	670

## 2.ราคาแบ่งแยกระบบ

### 2.1 ระบบช่วงล่างด้านหน้า

	รายการ	ราคา (บาท)
1	ปีกนกบน	5532
2	ปีกนกล่าง	5585
3	ระบบเปลี่ยนแกน โช๊ค	8667
4	คอม้า	7600
	รวม	27384

### a. ระบบช่วงล่างด้านหลัง

	รายการ	ราคา (บาท)
1	ปีกนกบน	5538
2	ปีกนกล่าง	5604
3	ระบบเปลี่ยนแกน โช๊ค	8667
4	คอม้า	7600
	รวม	27409

## 3.ราคารวมทั้งหมด

	รายการ	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	ระบบช่วงล่างด้านหน้า	27384	
2	ระบบช่วงล่างด้านหลัง	27409	
	รวม	54793	
	ได้รับการสนับสนุนรวม	37968	Sponsor
	รวม)หัก sponsor )	16825	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

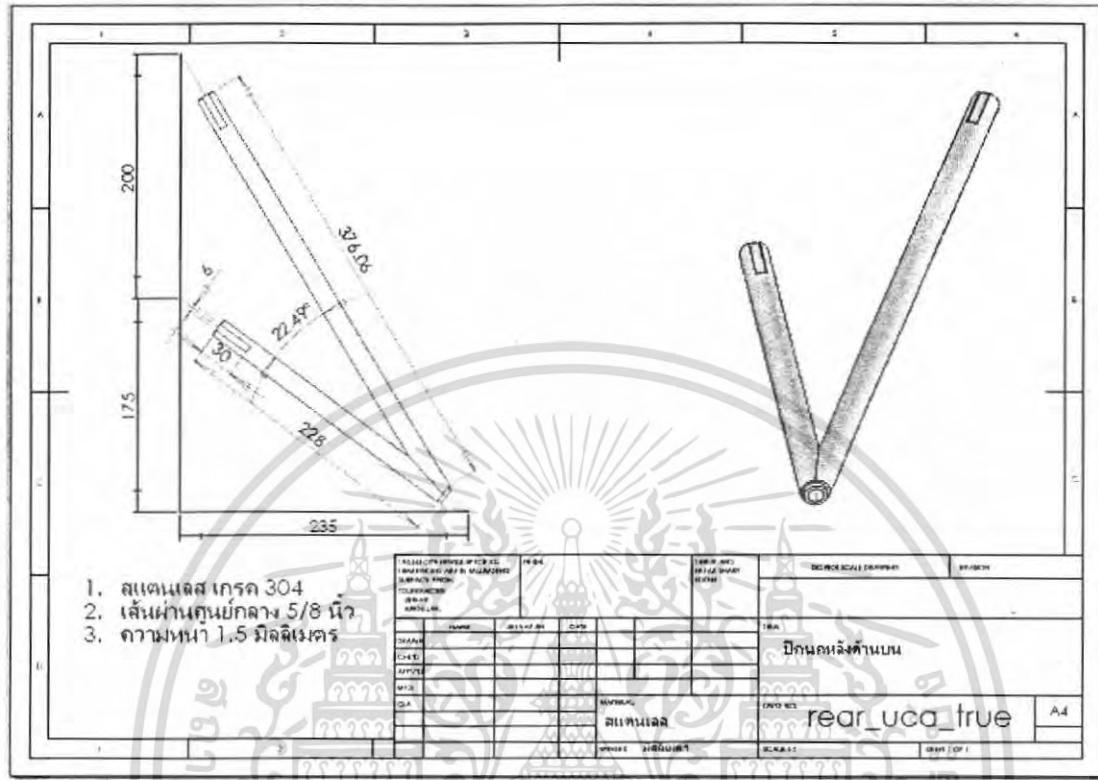


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

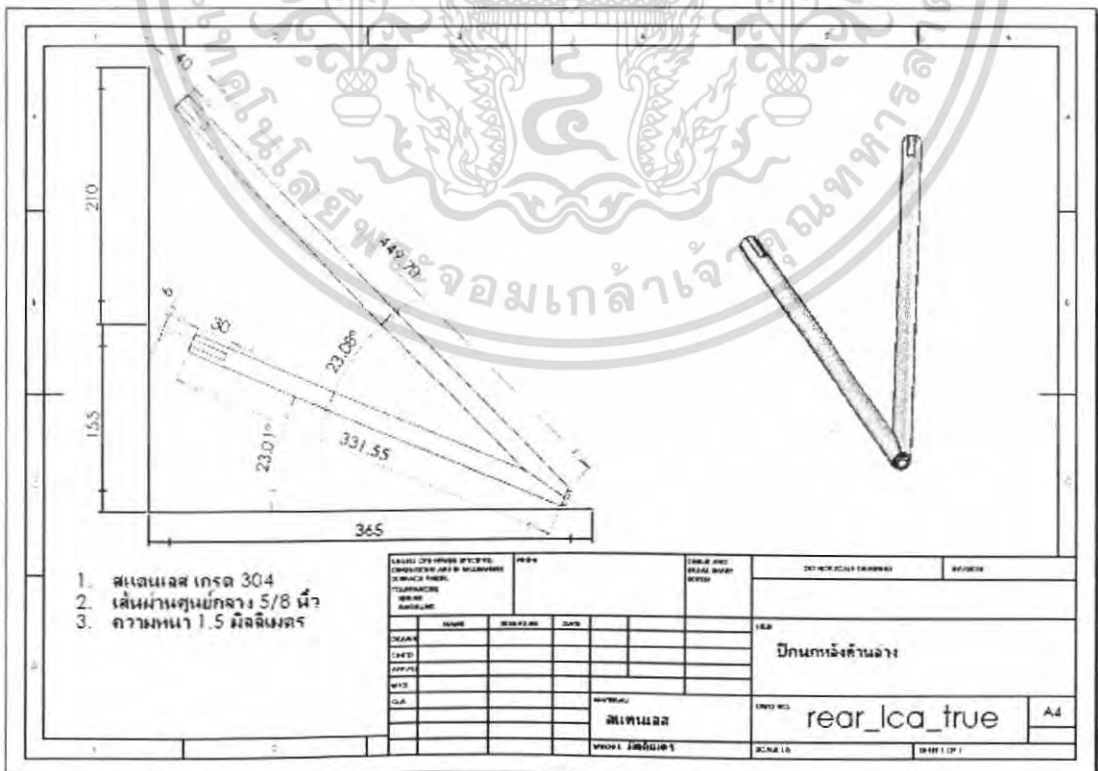




5. ปีกนกหลังด้านบน



6. ปีกนกหลังด้านล่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้