

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและพัฒนาระบบช่วงล่างของรถยนต์ 4 ล้อเล็ก

DESIGN AND DEVELOPMENT OF SUSPENSION SYSTEM FOR A SMALL PASSENGER CAR

นาย เกื้อพงศ์ เจนวิทยา

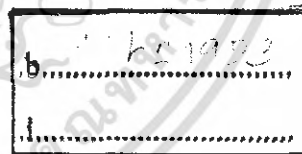
นาย วสิน บุญเรืองกิจ

นาย วัชรพล ขุนหอม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ ทิมสาร

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62380  
วัน,เดือน,ปี..... 16 ส.ค. 2548



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาระบบช่วงล่างของรถยนต์ 4 ล้อเล็ก

(DESIGN AND DEVELOPMENT OF SUSPENSION SYSTEM FOR A SMALL PASSENGER CAR)

ผู้จัดทำ

1. นาย เกื้อพงศ์ เจนวิทยา รหัสประจำตัว 45010070
2. นาย วศิน บุญยเรืองกิจ รหัสประจำตัว 45010687
3. นาย วัชรพล ขุนหอม รหัสประจำตัว 45010691



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบและพัฒนาระบบช่วงล่างของรถยนต์ 4 ล้อเล็ก

นาย เกื้อพงษ์ เจริญวิทยา 45010070

นาย วศิน นุญญะเรืองกิจ 45010687

นาย วัชรพล ขุนหอม 45010691

ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมพ์สาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการออกแบบและพัฒนาระบบช่วงล่างของรถยนต์ขนาดเล็กที่ใช้ขับในเมือง ซึ่งชนิดของรถมี 2 แบบ คือ รถใช้เชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ (เอทานอล 20 เปอร์เซ็นต์, E-20) และรถใช้พลังงานไฟฟ้า (EV) ในการออกแบบระบบช่วงล่างของรถแก๊สโซฮอล์ ระบบช่วงล่างแบบปีกนกคู่จะถูกนำมาใช้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ส่วนรถพลังงานไฟฟ้าจะใช้ช่วงล่างแบบแม็คเฟอร์รสันสตรีทในด้านหน้า และส่วนด้านหลังใช้ช่วงล่างแบบเทรลิ่งอาร์ม ในการออกแบบระบบช่วงล่างได้ทำการออกแบบให้ระบบช่วงล่างมีความนุ่มนวลต่อการขับขี่ โดยการเลือกค่าสปริงที่เหมาะสม นอกจากนั้นให้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของระบบช่วงล่างด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการวิเคราะห์พบว่า ชิ้นงานที่เป็นปีกนกมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 5 และชิ้นส่วนสปริงมีค่าตัวประกอบความปลอดภัยประมาณ 2-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Design and Development of Suspension System for a Small Passenger Car****Kuepong Chenvidhya****Wasin Boonyaruangkit****Watcharapol Kunbom****Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn Advisor****Abstract**

The purpose of this project is to design and develop a suspension system which is used in a small city car. There are two types of a small city car in this project, namely, E-20 and EV. E-20 stands for the gasohol containing 20 percents of ethanol. EV stands for an electric vehicle. In the E-20, a double wishbone is used in the front and rear suspension. On the other hands, in the EV, a Mcpherson Strut is used in the front suspension and a Trailing arm is used in the rear suspension. For suspension design riding and structure analyses are carried out. In riding analysis, by using finite element method, the proper value of spring stiffness, yielding good ride comfort, is numerically calculated. For structure analysis, it is found that the safety factor for the control arms is 5 and the safety factor for spring is about 2-3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันที่เคารพอย่างยิ่ง ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าได้ประสบความสำเร็จในทุกๆด้าน ขอขอบพระคุณอาจารย์ มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขปัญหาทุกอย่าง และ อาจารย์ทุกท่านอื่นๆที่ให้ความรู้ทั้งในสถาบันการศึกษาแห่งนี้รวมทั้งอาจารย์ที่เคยให้ความรู้กับข้าพเจ้าในสถาบันอื่นๆที่ได้เคยศึกษามา

ขอขอบคุณคุณ พี่ฝ่ายวิศวกรรมของบริษัท บางกอกสปริง อินดัสเทรียล จำกัด ที่ให้คำปรึกษาและแนวทางแก้ไขเกี่ยวกับการออกแบบสปริง ขอขอบพระคุณบริษัท ไทเกอร์ ที่สนับสนุนในเรื่องของสปริง ขอขอบพระคุณบริษัท เอนโกและเลนโซ่ ที่สนับสนุนในเรื่องของกระทะล้อ ขอขอบพระคุณบริษัท มิชลิน ที่สนับสนุนในเรื่องของยางล้อรถ และขอขอบพระคุณบริษัทอื่นๆอีกหลายบริษัท ที่ทำให้การสร้างรถซีดีคาร์ ทั้ง 2 คันสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆในชมรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและสนับสนุนข้าพเจ้าในด้านต่างๆจนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณจากใจครับ

เกื้อพงศ์ เจนวิทยา

วศิน บุญเรืองกิจ

วัชรพล ขุนหอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	IV
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	IV
สารบัญแสดงรูปภาพ	IV
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 หน้าที่และข้อดีข้อเสียของระบบช่วงล่าง	3
2.1 หน้าที่และความสำคัญของระบบช่วงล่าง (Suspension)	3
2.2 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง	3
2.3 ชนิดและข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบช่วงล่าง	4
2.4 ระบบช่วงล่างที่เลือกใช้	7
บทที่ 3 ทฤษฎี	8
3.1 มุมล้อหน้า	8
3.1.1 มุมแคมเบอร์ (Camber angle)	8
3.1.2 มุมเอียงแกนล้อเลี้ยว (Steering-axis inclination angle)	10
3.1.3 มุมแคสเตอร์ (Caster angle)	11
3.1.4 ระยะโทของล้อหน้า (Toe)	13
3.1.4.5 มุมล้อที่เลือก	15
3.2 การหาฐานล้อและ ระยะหน้าล้อ	17
3.3 การหาขนาดของปีกนก	18
3.4 การคำนวณหาค่าความยืดหยุ่นของสปริงในระบบช่วงล่างที่ออกแบบ	20
3.5 การหาขนาดของต่างๆของสปริงจากค่าความยืดหยุ่นที่คำนวณมา	24
บทที่ 4 การออกแบบและการวิเคราะห์	27
4.1 การออกแบบค่าความยืดหยุ่นของสปริงของรถไฟฟ้า	27
4.2 การออกแบบค่าความยืดหยุ่นของสปริงของรถ อี-20	44
4.3 ทฤษฎีความเสียหาย	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
4.4 การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของระบบช่วงล่าง	61
บทที่ 5 การคำนวณระบบช่วงล่างโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป	65
5.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม MSC ADAMS View ที่ใช้ในการทำงาน	65
5.1.1 เมนู (Menu Bar)	65
5.1.2 เครื่องมือคำสั่ง (Main Toolbox)	65
5.2 วิธีการวาดแบบจำลองวิเคราะห์ระบบช่วงล่างของรถ ไฟฟ้า ช่วงล่างด้านหน้า	66
5.3 วิธีการวาดแบบจำลองวิเคราะห์ระบบช่วงล่างของรถ ไฟฟ้า ด้านหลัง	72
5.4 วิธีการวาดแบบจำลองวิเคราะห์ระบบช่วงล่างของรถ อี-20 ช่วงล่างด้านหน้า	77
5.5 วิธีการวาดแบบจำลองวิเคราะห์ระบบช่วงล่างของรถ อี-20 ช่วงล่างด้านหลัง	83
5.6 การวาดระบบช่วงล่างลงในโปรแกรม ADAMS/Car Template builder	88
5.6.1 รถไฟฟ้า- ด้านหน้า	89
5.6.2 รถอี-20-ด้านหน้า	93
5.7 การวิเคราะห์แบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS	100
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์	110
6.1 สรุปผล	110
6.2 วิจารณ์ผล	112
6.3 ปัญหาที่พบ	112
6.4 แนวทางแก้ไข	114
ภาคผนวก	115
บรรณานุกรม	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญแสดงรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2-1 ชิ้นส่วนของระบบช่วงล่าง	3
รูปที่ 2-2 ตำแหน่งการวางของปีกนก	5
รูปที่ 2-3 ระบบช่วงล่างชนิดแมกเพอร์สันสตรีท	5
รูปที่ 2-4 ระบบช่วงล่างชนิดมัลติลิงค์	6
รูปที่ 2-5 ระบบช่วงล่างชนิดเทรลลิงอาร์ม	6
รูปที่ 3-1 มุมแคมเบอร์	9
รูปที่ 3-2 เส้นผ่านศูนย์กลางกลิ้ง (Rolling diameter)	9
รูปที่ 3-3 มุมเอียงแกนล้อเลี้ยว	11
รูปที่ 3-4 มุมรวม	11
รูปที่ 3-5 มุมแคสเตอร์	12
รูปที่ 3-6 จุดน้ำและจุดพ่วง	12
รูปที่ 3-7 มุมโท	14
รูปที่ 3-8 ชิ้นส่วนปรับมุมโท (รถไฟฟ้าและอี-20)	16
รูปที่ 3-9 ชิ้นส่วนปรับมุมแคสเตอร์ (รถไฟฟ้าและอี-20)	16
รูปที่ 3-10 ชิ้นส่วนปรับมุมแคมเบอร์ (รถไฟฟ้า)	16
รูปที่ 3-11 ชิ้นส่วนปรับมุมแคมเบอร์ (รถอี-20)	17
รูปที่ 3-12 ระยะเวลาล้อและระยะหน้าล้อ	18
รูปที่ 3-13 การหาระยะปีกนก	18
รูปที่ 3-14 การทดสอบความเสียหายของปีกนกจากโปรแกรม ABAQUS	19
รูปที่ 3-15 แบบจำลองของระบบช่วงล่าง	20
รูปที่ 3-16 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความยืดหยุ่น	23
รูปที่ 3-17 ชนิดของขดสปริง	24
รูปที่ 3-18 ชนิดของปลายสปริง	25
รูปที่ 3-19 สปริงด้านหน้ารถอี-20	25
รูปที่ 3-20 สปริงด้านหลังรถอี-20	25
รูปที่ 3-21 สปริงด้านหน้ารถไฟฟ้า	26
รูปที่ 3-22 สปริงด้านหลังรถไฟฟ้า	26
รูปที่ 4-1 ตำแหน่งการวางน้ำหนักของรถไฟฟ้า	27
รูปที่ 4-2 แบบจำลองการสันแบบระดับชั้นความเครียดเท่ากับ 4 ของรถไฟฟ้า	28
รูปที่ 4-3 แบบจำลองระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-4 แบบจำลองระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า	29
รูปที่ 4-5 มุมการวางตัวของสปริงของรถไฟฟ้า	30
รูปที่ 4-6 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1	33
รูปที่ 4-7 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1	33
รูปที่ 4-8 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1	34
รูปที่ 4-9 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1	34
รูปที่ 4-10 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 2	36
รูปที่ 4-11 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 2	36
รูปที่ 4-12 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 2	37
รูปที่ 4-13 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 2	37
รูปที่ 4-14 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 3	39
รูปที่ 4-15 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 3	39
รูปที่ 4-16 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 3	40
รูปที่ 4-17 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลัง ทำการทำให้ Simulation ครั้งที่ 3	41
รูปที่ 4-18 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 4	42
รูปที่ 4-19 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลัง ทำการทำให้ Simulation ครั้งที่ 4	42
รูปที่ 4-20 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 4	43
รูปที่ 4-21 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลัง ทำการทำให้ Simulation ครั้งที่ 4	43
รูปที่ 4-22 ตำแหน่งการวางน้ำหนักของรถอี-20	44
รูปที่ 4-23 แบบจำลองการสั่นแบบระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 4 ของรถอี-20	45
รูปที่ 4-24 แบบจำลองระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20	46
รูปที่ 4-25 แบบจำลองระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20	46
รูปที่ 4-26 มุมการวางตัวของสปริงของรถอี-20	47
รูปที่ 4-27 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1	48
รูปที่ 4-28 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1	48
รูปที่ 4-29 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1	49
รูปที่ 4-30 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1	49
รูปที่ 4-31 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 2	51
รูปที่ 4-32 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 2	51
รูปที่ 4-33 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 2	52
รูปที่ 4-34 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 2	53
รูปที่ 4-35 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 3	54
รูปที่ 4-36 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 3	54
รูปที่ 4-37 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 3	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-38 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลัง ทำการทำให้ Simulation ครั้งที่ 3	55
รูปที่ 4-39 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 ก่อนทำการทำให้ Simulation ครั้งที่ 4	57
รูปที่ 4-40 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังทำการทำให้ Simulation ครั้งที่ 4	57
รูปที่ 4-41 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนทำการทำให้ Simulation ครั้งที่ 4	57
รูปที่ 4-42 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 หลังทำการทำให้ Simulation ครั้งที่ 4	57
รูปที่ 4-43 การหาแรงด้านหน้าและด้านหลังที่กระทำต่อระบบช่วงล่างของรถไฟฟ้า	60
รูปที่ 4-44 การหาแรงด้านหน้าและด้านหลังที่กระทำต่อระบบช่วงล่างของรถอี-20	60
รูปที่ 4-45 กราฟแสดงมุมแคมเบอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	61
รูปที่ 4-46 กราฟแสดงมุมแคสเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	62
รูปที่ 4-47 กราฟแสดงมุมโทที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า	62
รูปที่ 4-48 กราฟเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับมุมแคสเตอร์ของรถไฟฟ้า	63
รูปที่ 4-49 กราฟแสดงมุมแคมเบอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถอี-20	63
รูปที่ 4-50 กราฟแสดงมุมแคสเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถอี-20	64
รูปที่ 4-51 กราฟแสดงมุมโทที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถอี-20	64
รูปที่ 5-1 แถบคำสั่งข้อมูลการใช้โปรแกรม MSC.ADAMS/View	65
รูปที่ 5-2 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถ ไฟฟ้า ด้านหน้า	66
รูปที่ 5-3 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกบน	66
รูปที่ 5-4 ชิ้นส่วนของปีกนกบน	67
รูปที่ 5-5 การสร้างชิ้นส่วนของคอกม้า	67
รูปที่ 5-6 การสร้างชิ้นส่วนของล้อรถ	68
รูปที่ 5-7 การสร้างชิ้นส่วนของคุมล้อ	68
รูปที่ 5-8 การสร้างชิ้นส่วนของสปริงของรถ	69
รูปที่ 5-9 การยึดจุดคอกม้ากับปีกนกกลาง	69
รูปที่ 5-10 การยึดชิ้นส่วนของคอกม้ากับคุมล้อ	70
รูปที่ 5-11 การยึดชิ้นส่วนของคุมล้อกับล้อรถ	70
รูปที่ 5-12 การยึดจุดหมุนที่ปีกนกกลางกับ โครงรถ	71
รูปที่ 5-13 การใส่แรงที่ชิ้นส่วนของล้อ	71
รูปที่ 5-14 ระบบช่วงล่างของรถ ไฟฟ้า ด้านหลัง	72
รูปที่ 5-15 การสร้างชิ้นส่วนของเพลาส่งกำลัง	72
รูปที่ 5-16 การสร้าง joint ของเพลาส่งกำลัง	73
รูปที่ 5-17 การสร้างชิ้นส่วนของคานรับแรง	73
รูปที่ 5-18 การติดคานรับแรงกับ joint ของเพลาส่งกำลัง	74
รูปที่ 5-19 การตัดลออกระบบด้านล้อซ้ายแล้วมาสร้างระบบด้านล้อขวา	74
รูปที่ 5-20 การสร้างชิ้นส่วนของสปริงทางด้านซ้ายและด้านขวา	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-21 การสร้างชิ้นส่วนของล้อด้านซ้ายและด้านขวา	75
รูปที่ 5-22 การสร้างจุดยึด ณ ตำแหน่งต่างๆและการใส่แรงที่ล้อ	76
รูปที่ 5-23 ระบบช่วงล่างของรถ อี-20 ด้านหน้า	77
รูปที่ 5-24 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกบน	77
รูปที่ 5-25 ชิ้นส่วนของปีกนกบน	78
รูปที่ 5-26 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกล่าง	78
รูปที่ 5-27 ชิ้นส่วนของปีกนกล่างและปีกนกบน	79
รูปที่ 5-28 การสร้างชิ้นส่วนของ Upper ball joint และ Lower ball joint	79
รูปที่ 5-29 การสร้างชิ้นส่วนของคอม้า	80
รูปที่ 5-30 การสร้างชิ้นส่วนของคุมล้อ	80
รูปที่ 5-31 การสร้างชิ้นส่วนของสปริง	81
รูปที่ 5-32 การสร้างชิ้นส่วนของล้อรถ	81
รูปที่ 5-33 การสร้างจุดยึด ณ ตำแหน่งต่างๆและการใส่แรงที่ล้อ	82
รูปที่ 5-34 ระบบช่วงล่างของรถ อี-20 ด้านหน้า	83
รูปที่ 5-35 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกบน	83
รูปที่ 5-36 ชิ้นส่วนของปีกนกบน	84
รูปที่ 5-37 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกล่าง	84
รูปที่ 5-38 ชิ้นส่วนของปีกนกบนและปีกนกล่าง	85
รูปที่ 5-39 การสร้างชิ้นส่วนของ Upper ball joint และ Lower ball joint	85
รูปที่ 5-40 การสร้างชิ้นส่วนของคอม้า	86
รูปที่ 5-41 การสร้างชิ้นส่วนของคุมล้อ	86
รูปที่ 5-42 การสร้างชิ้นส่วนของสปริง	87
รูปที่ 5-43 การสร้างชิ้นส่วนของล้อรถ	87
รูปที่ 5-44 การยึดชิ้นส่วนต่างและทำการใส่แรงที่ล้อ	88
รูปที่ 5-45 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถ ไฟฟ้า	89
รูปที่ 5-46 แสดงหน้าตาการสร้างพาร์ท ctr_arm และ hub	90
รูปที่ 5-47 แสดงหน้าตาการสร้างพาร์ท tierod และ strut	90
รูปที่ 5-48 แสดงหน้าตาการสร้างพาร์ท knuckle และ hub_bearing	91
รูปที่ 5-49 แสดงหน้าตาการสร้างพาร์ท arm_to_frame, tierod_steering, strut_to_frame และการกำหนดค่ามุมแคมเบอร์และโท	91
รูปที่ 5-50 แสดงหน้าตาการสร้างพาร์ทกำหนดค่าพารามิเตอร์	92
รูปที่ 5-51 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถ อี-20	93
รูปที่ 5-52 แสดงหน้าตาการสร้างพาร์ท tiepot และ spindle	94
รูปที่ 5-53 แสดงหน้าตาการสร้างพาร์ท lower_strut และ upper_control_arm	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5-54 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ต tierrod และ upper_strut	95
รูปที่ 5-55 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ต subframe และ upright	96
รูปที่ 5-56 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ต lower_control_arm	96
รูปที่ 5-57แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ต tiepot_to_differential, uca_to_body, strut_to_body, subframe_to_body, tierod_to_steering	97
รูปที่ 5-58 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ต ARB_pickup	97
รูปที่ 5-59 กำหนดมุมโทและแคมเบอร์	97
รูปที่ 5-60 แสดงหน้าต่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์	99
รูปที่ 5-61 แสดงทิศทางของแกนอ้างอิง	100
รูปที่ 5-62 หน้าต่าง ABAQUS Licensing	101
รูปที่ 5-63 แสดงหน้าจอขณะเปิดโปรแกรม ABAQUS	101
รูปที่ 5-64 ปีกนกที่วาดในโปรแกรม Solid Work 2005	101
รูปที่ 5-65 ขั้นตอนการ Import files จากโปรแกรม Solid work 2005	102
รูปที่ 5-66 แสดงภาพปีกนกที่ Import เข้ามาในโปรแกรม ABAQUS แล้ว	102
รูปที่ 5-67 แสดงการกำหนดค่า Elastic ในวัสดุ	102
รูปที่ 5-68 แสดงการกำหนดค่า Density ในวัสดุ	103
รูปที่ 5-69 แสดงการสร้าง Section	103
รูปที่ 5-70 แสดงการกำหนด Section ลงในปีกนก	103
รูปที่ 5-71 แสดงภาพหลังกำหนด Section เสร็จแล้ว	104
รูปที่ 5-72 แสดงการสร้าง Step	104
รูปที่ 5-73 แสดงการสร้างและตำแหน่งของ BC	104
รูปที่ 5-74 แสดงการสร้าง Concentrated Force	105
รูปที่ 5-75 แสดงรูปปีกนกก่อนเลือกชนิดของ Mesh 3 เหลี่ยม	105
รูปที่ 5-76 แสดงการ Assign mesh controls	106
รูปที่ 5-77 แสดงภาพหลัง Assign mesh controls	106
รูปที่ 5-78 แสดงการ Seed part instance	106
รูปที่ 5-79 แสดงการรูปหลังตี Mesh เสร็จแล้ว	107
รูปที่ 5-80 แสดงภาพระหว่างรัน โปรแกรม	107
รูปที่ 5-81 แสดงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น ของปีกนกล่างด้านหน้า	108
รูปที่ 5-82 แสดงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น ของปีกนกบนด้านหน้า	108
รูปที่ 5-83 แสดงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น ของปีกนกล่างด้านหลัง	109
รูปที่ 5-84 แสดงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น ของปีกนกบนด้านหลัง	109
รูปที่ 6-1 ปีกนกล่างด้านหน้าของรถอี-20	110
รูปที่ 6-2 ปีกนกบนด้านหน้าของรถอี-20	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6-3 ปีกนกกลางด้านหลังของรถอี-20

111

รูปที่ 6-4 ปีกนกบนด้านหลังของรถอี-20

112



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 3-1 มุมล้อยที่ติดตั้ง	15
ตารางที่ 3-2 ระยะฐานล้อยและระยะหน้าล้อยที่เลือก	18
ตารางที่ 3-3 ระยะปีกนก	19
ตารางที่ 3-4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปีกนก	19
ตารางที่ 3-4 ค่าต่างๆในการหาค่าความยืดหยุ่น	26
ตารางที่ 4-1 ผลของการ Simulation ค่าความยืดหยุ่นในรถไฟฟ้า	44
ตารางที่ 4-2 ผลของการ Simulation ค่าความยืดหยุ่นในรถไฟอี-20	59
ตารางที่ 4-3 ค่าต่างๆในการคำนวณความเสียหาย	61
ตารางที่ 5-1 แสดงพิกัดของฮาร์ดพอยท์	89
ตารางที่ 5-2 แสดงชนิดของพาร์ท	90
ตารางที่ 5-3 แสดงรายละเอียดรูปทรงของพาร์ท	91
ตารางที่ 5-4 แสดงรายละเอียดของจอยท์และบุชซิ่ง	92
ตารางที่ 5-5 แสดงพิกัดของฮาร์ดพอยท์	93
ตารางที่ 5-6 แสดงชนิดของพาร์ท	94
ตารางที่ 5-7 แสดงรายละเอียดรูปทรงของพาร์ท	98
ตารางที่ 5-8 แสดงรายละเอียดของจอยท์และบุชซิ่ง	98
ตารางที่ 5-9 แสดงรายละเอียดของแรง	99
ตารางที่ 5-10 แสดงขนาดของแรงที่กระทำต่อปีกนก	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ระบบช่วงล่างที่ทำการออกแบบนี้เป็นส่วนหนึ่งของการสร้างรถยนต์ขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการแข่งขัน TSAE Auto Challenge 2006 โดยระบบช่วงล่างนั้นต้องมีความเหมาะสมกับลักษณะของตัวรถด้วย และคำนึงถึงควมมีเสถียรภาพของรถ โดยรถที่สร้างในการแข่งขันนั้นมี 2 คัน ดังนี้

1. รถ อีวี หรือ รถไฟฟ้า คือ รถที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนโดยระบบช่วงล่างด้านหน้านั้นใช้ระบบช่วงล่างแบบ แมคเฟอร์สันสตรัท และช่วงล่างด้านหลังใช้ระบบ เทรลลิงอาร์ม

2. รถ อี-20 คือ รถที่ใช้แกสโซลีนที่ผสมด้วยเอทานอล 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน โดยระบบช่วงล่างทั้งด้านหน้าและช่วงล่างด้านหลังใช้ระบบ ปีแกนคู่

โดยในการออกแบบระบบช่วงล่างนั้นใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ ทำให้สามารถออกแบบได้ตามวัตถุประสงค์ของผู้ออกแบบได้ โดยคอมพิวเตอร์จะเป็นตัวสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่การเคลื่อนที่ในสถานการณ์ต่างๆเพื่อดูเสถียรภาพของระบบช่วงล่างที่ได้ทำการออกแบบไว้

ในการพัฒนาระบบช่วงล่าง สิ่งที่เป็นอุปสรรคสำคัญของระบบช่วงล่างคือ

1. เลือกระบบช่วงล่างที่เหมาะสมกับรูปทรงของรถที่สร้างขึ้น
2. ระบบช่วงล่างที่ได้ออกแบบนั้นต้องมีเสถียรภาพสูง
3. ระบบช่วงล่างต้องมีความแข็งแรงสามารถรับแรงจากการกระแทกได้

การออกแบบและสร้างระบบช่วงล่างให้สมบูรณ์แบบได้ทั้ง 3 ประการนั้น เป็นไปด้วยความยากลำบากแต่ถ้าได้ปรับปรุงประการใดประการหนึ่งให้ดีขึ้นได้นั้น ระบบช่วงล่างจะสามารถรองรับได้ทั้งในเรื่องของขนาดและความสามารถในการรับภาระ ตลอดจนควมมีเสถียรภาพซึ่งส่งผลต่อความสบายของผู้ขับขี่

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของระบบช่วงล่างแบบต่างๆที่มีอยู่
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบช่วงล่างสำหรับรถยนต์ 4 ล้อเล็ก
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบช่วงล่างให้มีความนุ่มนวล แข็งแรง และประหยัดต้นทุนในการสร้าง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
- 1.2.4 สร้างระบบช่วงล่างเพื่อใช้ในการแข่งขัน TSAE Auto Challenge 2006

#### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ระบบช่วงล่างที่นำมาพิจารณาใช้ในโครงการนี้มี 3 ระบบ คือ ระบบปีแกนคู่ ระบบแมคเฟอร์สันสตรัท และระบบเทรลลิงอาร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 ระบบช่วงล่างของรถที่ได้ออกแบบนั้นได้นำไปใช้ในการแข่งขัน TSAE Auto Challenge 2006 ซึ่งเป็นรถยนต์ 4 ล้อขนาดเล็ก บรรทุกผู้โดยสาร 2 คน ความเร็วทางราบสูงสุดไม่ต่ำกว่า 50 กม./ชม. ภาระแบกรับ (Load) 600-1000 กก.

1.3.3 ระบบช่วงล่างถูกจำกัดโดยมิติของรถที่ถูกออกแบบจากขนาดของระบบเฟรม ดังนี้ มีฐานล้อ (Tread width on the front) ยาว 1300 มม. ระยะจากล้อหน้าถึงล้อหลัง (Wheel base) ยาว 1900 มม. ขนาดยาง R14 165 / 65 หน้ายาง 170 มม. รัศมีขอบยาง (Outer diameter) 570 มม. ความยาวแกนพวงมาลัย 690 มม.

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาหาความรู้และทำความเข้าใจในส่วนต่างๆเกี่ยวกับระบบช่วงล่าง และศึกษาทางด้าน การออกแบบระบบช่วงล่างและทำความเข้าใจ เมื่อทำการศึกษาเป็นอย่างดีแล้วทำการออกแบบและทำการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบช่วงล่าง และดูผลต่างๆที่ออกมาเทียบกับค่าที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการเขียนโปรแกรม MSC.ADAMS เพื่อทำการจำลอง ระบบช่วงล่างที่ได้ออกแบบเพื่อดูค่าต่างๆที่มีผลต่อเสถียรภาพของรถและใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายของระบบช่วงล่างที่ออกแบบไว้

เมื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์เสร็จเรียบร้อยแล้วจึงลงมือสร้างระบบช่วงล่างตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะระบบช่วงล่างว่าเป็นไปตามจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้หรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามจุดมุ่งหมายก็ให้ปรับแก้ระบบช่วงล่างให้ใช้ได้ตามจุดมุ่งหมาย เมื่อสร้างระบบช่วงล่างเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำรถเข้าแข่งขัน TSAE Auto Challenge 2006

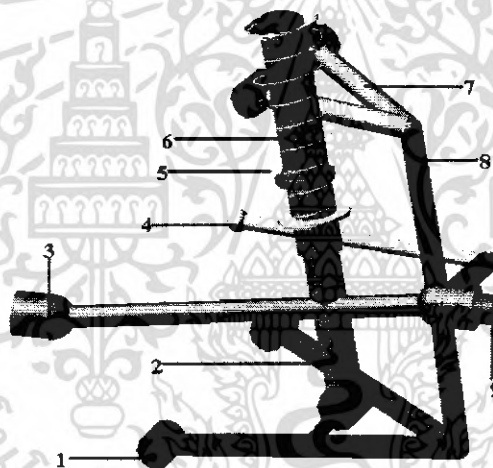
## บทที่ 2 ระบบช่วงล่าง

### 2.1 หน้าที่และความสำคัญของระบบช่วงล่าง

ระบบช่วงล่างเป็นสิ่งสำคัญที่รถยนต์ทุกคันจำเป็นต้องมีเพราะว่าระบบช่วงล่างสร้างขึ้นมาเพื่อลดการสั่นสะเทือนและเพิ่มการทรงตัวของตัวรถ เมื่อรถวิ่งอยู่บนถนนที่ขรุขระเป็นหลุมหรือขนะเข้าโค้งถ้ารถไม่มีระบบช่วงล่างแล้วนอกจากผู้โดยสารและคนขับจะได้รับแรงกระแทกจากตัวรถมากแล้ว ชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนของรถอาจจะเสียหายเร็วเกินกว่าอายุการใช้งานด้วย นอกจากนี้หน้าที่รองของระบบกันสั่นสะเทือนคือ เป็นตัวเชื่อมระหว่าง โครงรถยนต์(Chassis) กับล้อรถ

### 2.2 ส่วนประกอบของระบบช่วงล่าง

ระบบช่วงล่างโดยทั่วไปประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักๆตามรูปที่ 2-1 โดยหน้าที่ของแต่ละชิ้นส่วนมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-1 ชิ้นส่วนของระบบช่วงล่าง

1. บุชชิ่ง(Bushing) เป็นยางรูปวงกลมมีรูตรงกลางไว้สำหรับใส่เหล็กที่มีลักษณะเดียวกัน สร้างขึ้นเพื่อป้องกันแรงเสียดทานระหว่างตัวปีกนกกับน็อตที่ยึดติดปีกนก
2. ปีกนกล่าง(Lower control arm) มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กสามเหลี่ยม โดยปลายด้านหนึ่งทำหน้าที่ยึดกับตัวโครงรถยนต์ อีกด้านหนึ่งยึดติดกับคอก้าม้านล่าง (หมายเลข 8)
3. ชูดูดรับแรงจากเพลาขับ มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กยาว ด้านหนึ่งยึดติดกับเพลาขับ อีกด้านหนึ่งยึดติดกับแกนหมุนของล้อ(หมายเลข 9) และคอก้าม มีหน้ารับแรงจากเพลาขับแล้วส่งกำลังต่อทำให้ล้อสามารถหมุนได้ โดยชูดูดรับแรงจากเพลาขับนี้ติดตั้งทั้งด้านหน้าหรือด้านหลังหรือติดตั้งทั้งหน้าและหลังก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของรถที่ทำการออกแบบว่าจะให้เป็นระบบขับเคลื่อนด้านหรือหลัง หรือขับเคลื่อน 4 ล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ชุดแกนบังคับเลี้ยว(Steering rack) มีลักษณะเป็นแท่งยาว ด้านหนึ่งยึดติดกับลิงค์ที่มาจากพวงมาลัย อีกด้านหนึ่งยึดติดกับคอม้า มีหน้าที่บังคับล้อให้หมุนไปตรงตามทิศทางที่พวงมาลัยหมุน โดยชุดแกนบังคับเลี้ยวนี้จะมีเฉพาะระบบช่วงล่างด้านหน้าเท่านั้น
5. สปริง(Spring) มีลักษณะเป็นเหล็กเส้นขดกันเป็นเกลียว ทั้ง 2 ด้านยึดติดกับแป้ารองรับสปริง ทำหน้าที่รับแรงกระแทกจากโครงรถยนต์
6. แคมเปอร์(Damper) มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กมีน้ำมันหรือแก๊สอัดอยู่ภายใน (แล้วแต่ชนิดของแคมเปอร์) ติดอยู่ด้านในของขดสปริง ทำหน้าที่ชะลอการตีกลับของสปริงเนื่องจากแรงกระแทกที่ได้รับ
7. ปีกนกบน (Upper control arm) มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กรูปทรงสามเหลี่ยม โดยปลายด้านหนึ่งทำหน้าที่ยึดกับตัวโครงรถยนต์ อีกด้านหนึ่งยึดติดกับคอม้าด้านบน
8. คอม้า(Knuckle) เป็นเหล็กหล่อมีรูสำหรับยึดติดกับชิ้นส่วนต่างๆ 4 ชิ้นคือ 1.ปีกนกกลาง 2.ปีกนกบน 3. ชุดแกนบังคับเลี้ยว 4.ชุดรับแรงส่งจากเพลาขับ เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ระบบช่วงล่างชนิดอิสระต่อกัน (Independent suspension) จะขาดไม่ได้
9. แกนหมุนของล้อ เป็นชุดลูกปืนทำให้ล้อสามารถหมุนได้

### 2.3 ชนิดและข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบช่วงล่าง

ระบบช่วงล่างแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือระบบช่วงล่างชนิดที่เป็นอิสระต่อกัน (Independent suspension) กับ ระบบช่วงล่างชนิดที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน (Non-Independent) แต่เนื่องจากระบบช่วงล่างที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด โครงการนี้จึงทำการศึกษาระบบช่วงล่างชนิดที่เป็นที่นิยมแพร่หลายในปัจจุบันเท่านั้น โดยทำการศึกษาระบบช่วงล่างชนิดอิสระต่อกัน 3 ชนิด และระบบช่วงล่างชนิดไม่เป็นอิสระต่อกัน 1 ชนิด

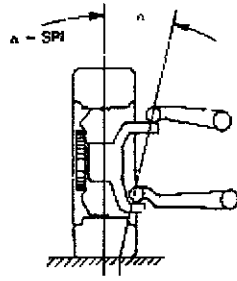
#### 2.3.1 ระบบช่วงล่างชนิดอิสระต่อกัน (Independent suspension)

- ระบบช่วงล่างชนิดปีกนกคู่ (Double wishbone suspension)

ระบบปีกนกคู่ นี้สามารถติดตั้งได้ทั้งล้อหน้าและล้อหลัง โดยระบบนี้เกือบจะเป็นระบบที่สมบูรณ์แบบที่สุดในด้านการควบคุมมุม แคมเบอร์ ตลอด 40 ปีที่ผ่านมา ระบบนี้เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในรถ สปอร์ตและรถแข่ง ยี่ห้อรถที่ใช้ระบบนี้ได้แก่ เฟอร์รารี ทวีอาร์ โลดัสและฮอนด้า

โดยส่วนประกอบจะประกอบไปด้วยแกน (Wishbone arms) 2 แขนหรือเรียกว่า เอ-อาร์ม (A-Arms) ซึ่งมีความยาวเท่ากันและวางขนาดกันอยู่ แต่จะมีปัญหาตรงที่จะเกิดการเสียดสีกันอย่างแรงตรงขอบยางทำให้วิศวกรพัฒนาระบบนี้ให้เออาร์มเปลี่ยนเป็นมีความยาวไม่เท่ากัน และวางไม่ขนานกันโดยจะทำให้แกนด้านบนเอียงดังรูปที่ 2-2

ระบบนี้เป็นที่นิยมอย่างมากในอเมริกา แต่ไม่นิยมในยุโรปเพราะว่าส่วนใหญ่รถยุโรปจะมีขนาดเล็กทำให้มีเนื้อที่ในการติดตั้งระบบนี้น้อย อีกทั้งยังมีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับระบบช่วงล่างชนิดแมคเฟอร์สันสตรัท (McPherson strut suspension)



รูปที่ 2-2 ตำแหน่งการวางของปีกนก

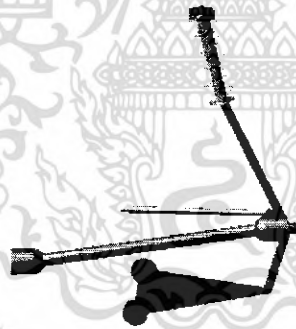
#### ข้อดีและข้อเสียของระบบช่วงล่างชนิดปีกนกคู่

ข้อดี : มีการควบคุมมุม แคมเบอร์ที่ดีมาก, ติดตั้งได้ทั้งล้อหน้าและล้อหลัง

ข้อเสีย : ราคาชิ้นส่วนต่างๆแพง ใช้กับรถเล็กๆ ไม่ได้ เมื่อรถขึ้นเนินระยะห่างล้อซ้าย-ขวาจะเปลี่ยน

- ระบบช่วงล่างชนิดแมคเฟอร์สันสตรัท (McPherson strut suspension)

ระบบนี้ถูกคิดขึ้นในปี ค.ศ. 1940 โดย เอิร์ล แมคเฟอร์สัน (Earl S. McPherson) โดยระบบนี้เริ่มใช้กันแพร่หลายมากขึ้นหลังจากฟอร์ดเริ่มใช้ระบบนี้ ในปี 1950 โดยระบบนี้ต่างกับระบบอื่นๆตรงที่ช็อกอัพ (Shock absorber) ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่รองรับแรงสั่นสะเทือนแล้ว ยังเป็นตัวที่สามารถควบคุมมุมของล้อ (Wheel alignments) ที่จะติดตั้งได้ด้วย ทำให้ไม่ต้องมี ปีกนกบนเหมือนกับระบบช่วงล่างชนิดปีกนกคู่ ดังรูปที่ 2-3 โดยยี่ห้อรถที่ใช้ระบบนี้ได้แก่ ฮุนได เพียช และรถขนาดเล็กที่ขับเคลื่อนล้อหน้า



รูปที่ 2-3 ระบบช่วงล่างชนิดแมคเฟอร์สันสตรัท

#### ข้อดีและข้อเสียของระบบช่วงล่างแมคเฟอร์สันสตรัท

ข้อดี : ใช้น้อยชิ้นในการติดตั้งน้อย ซ่อมแซมได้ง่าย ใช้กับรถขนาดเล็กได้ และปรับมุมล้อได้ง่าย

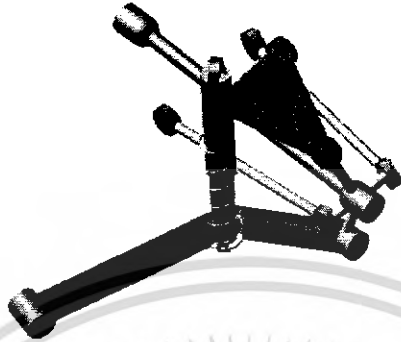
ข้อเสีย : นิยมติดตั้งเฉพาะด้านหน้า และมีการควบคุมมุมแคมเบอร์ไม่ดีเท่าไร

- ระบบช่วงล่างชนิดมัลติลิงก์ (Multi-link)

ตั้งแต่ทศวรรษที่ 80 เป็นต้นมา ระบบช่วงล่างชนิดมัลติลิงก์เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงปัจจุบันเป็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น นิสสัน 200 เอสเอ็กซ์ (Nissan 200 SX), เมอร์เซเดส เอสคลาส (Mercedes S-class) และบีเอ็มดับเบิลยู ซีรีส์ 3 (BMW 3-Series) ฯลฯ นับได้ว่าเป็นระบบที่ทันสมัยและเป็นที่ยอมรับระบบหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบนี้เป็นระบบอธิบายรูปแบบและส่วนประกอบได้ยากลำบากเพราะว่าโครงสร้างของระบบนี้ไม่ตายตัว ขึ้นอยู่รูปแบบและโครงสร้างของรถที่ทำการออกแบบ เช่น มัลติลิงก์ (Multi-link) ของบีเอ็มดับเบิลยู (BMW) เป็นรูปแบบคล้ายตัวแซด (Z) ดังนั้นจึงตั้งชื่อเป็นแซดแอกซ์เซล (Z-axle) เป็นต้น โดยระบบนี้เป็นระบบที่ควบคุมมุมแคมเบอร์ได้ดีระบบหนึ่งเทียบเท่ากับระบบช่วงล่างชนิดปีกนกดู่



รูปที่ 2-4 ระบบช่วงล่างชนิดมัลติลิงก์

#### ข้อดีและข้อเสียของระบบช่วงล่างชนิดมัลติลิงก์

ข้อดี : ควบคุมมุมแคมเบอร์ได้ดีมาก และให้ความนิ่มนวลสูงเพราะมีลิงก์หลายลิงก์ช่วยรับแรง

ข้อเสีย : ออกแบบได้ยาก ติดตั้งได้แค่ล้อหลัง และชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนไม่สามารถสร้างขึ้นมาเองได้ทำให้ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

#### 2.3.2 ระบบช่วงล่างชนิดไม่อิสระต่อกัน (Non-Independent suspension)

- ระบบช่วงล่างชนิดเทรลลิงอาร์ม (Trailing arm)

เป็นระบบช่วงล่างชนิดเก่า โดยนิยมใช้กันในรถราคาระดับตั้งแต่กลางถึงสูง หลังจากปี ค.ศ. 1990 ระบบช่วงล่างชนิดมัลติลิงก์ได้เข้ามา รถยนต์ส่วนใหญ่ก็หันไปใช้ระบบมัลติลิงก์กันเหลือเพียงรถยนต์ส่วนน้อยที่ใช้กัน ยี่ห้อรถยนต์ที่ใช้ระบบนี้ได้แก่ บีเอ็มดับเบิลยู(1982 BMW 3-series) เมอร์เซเดส (Mercedes 560SEC) และปอร์เช่ (Porsche 911)



รูปที่ 2-5 ระบบช่วงล่างชนิดเทรลลิงอาร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อดีและข้อเสียของระบบช่วงล่างชนิดเทรลลิงอาร์ม

ข้อดี : เวลารถขึ้นเนินระยะห่างระหว่างล้อซ้ายกับขวาไม่เปลี่ยน ติดตั้งได้ง่าย และราคาถูก

ข้อเสีย : น้มนวลน้อยกว่าระบบช่วงล่างชนิดคิลิกซ์ เป็นระบบช่วงล่างชนิดไม่อิสระต่อกัน และเวลารถขึ้นเนินระยะห่างระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง (Wheel base) จะเปลี่ยน

(ที่มา : <http://www.autozine.org>)

## **2.4 ระบบช่วงล่างที่เลือกใช้**

### รถอี-20

ด้านหน้าของรถเลือกใช้ระบบปีกนกคู่เพราะว่าด้านหน้าของรถอี-20 นั้นจะค่อนข้างต่ำทำให้ไม่สามารถใช้ระบบช่วงล่างแมคเฟอร์สันสตรัทได้สาเหตุจากระบบช่วงล่างชนิดแมคเฟอร์สันสตรัทจะมีส่วนช็อกอัพค่อนข้างสูง (ตามรูปที่ 2-3)

ด้านหลังของรถเลือกใช้ระบบระบบปีกนกคู่เหมือนกับด้านหน้าเพราะรถอี-20 มีน้ำหนักโดยส่วนใหญ่จะอยู่ทางด้านหลังทั้งหมด โดยเหตุผลที่ไม่ใช้มลคิลิกซ์เพราะออกแบบและสร้างขึ้นได้ยากและมีชิ้นส่วนราคาแพง

### รถไฟฟ้า

ด้านหน้าของรถเลือกใช้ระบบแมคเฟอร์สันสตรัท เพราะด้านหน้าของรถไฟฟ้า นี้มีความสูงเพียงพอที่จะติดตั้ง รวมทั้งระบบนี้สามารถสร้างขึ้นได้ง่ายและราคาไม่แพง

ด้านหลังของรถเลือกใช้ระบบเทรลลิงอาร์ม เพราะทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย ได้กำหนดว่ารถไฟฟ้าจะต้องมีแกนแข็งซึ่งทำให้ไม่สามารถติดตั้งระบบมลคิลิกซ์ได้

## บทที่ 3

### ทฤษฎี

#### 3.1 มุมล้อหน้า

การจัดตั้งมุมล้อหน้า (Wheel alignment) มีผลทำให้การขับเลี้ยวง่าย การขับเลี้ยวทรงตัวได้ดี รดมีคุณภาพในการขับขี่ และมีผลต่ออายุของยางด้วย มุมต่างๆจะเปลี่ยนไปตามระบบแขวนล้อ การเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของตัวรถเมื่อเปรียบเทียบกับล้อ น้ำหนักบรรทุกและความเร็วของรถด้วยแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นเมื่อรถเข้าทางโค้งมุมล้อหน้าคือมุมที่เปรียบเทียบหรือสัมพันธ์กันของล้อหน้า และล้อหน้าที่จุดสัมผัสกับผิวถนนกับพื้นถนน มุมต่างๆของล้อหน้ารถยนต์แบ่งออกหลายอย่างคือ มุมแคมเบอร์ การเอียงสลักล้อหน้า มุมแคสเตอร์ มุมโท และมุมล้อของรถยนต์ มุมต่างๆเหล่านี้จะสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ถ้ามุมหนึ่งมุมใดเปลี่ยนไปก็จะทำให้มุมอื่นๆผิดพลาดตามไปด้วย โดยโครงการนี้ได้ทำการศึกษามุมล้อ 3 มุมด้วยกัน คือ มุมแคมเบอร์ มุมแคสเตอร์ และมุมโท

##### 3.1.1 มุมแคมเบอร์ (Camber angle)

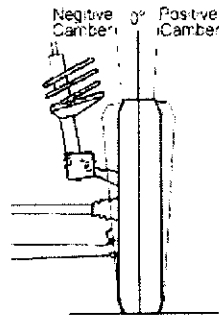
รถยนต์ส่วนมากเมื่อยืนมองจากด้านหน้ารถเข้าไป จะเห็นว่าล้อหน้าของรถเอียงเข้าหากันและกันหรือเอียงออกจากกันและกัน การเอียงของล้อรถ เรียกว่า แคมเบอร์ การวัดการเอียงของล้อนั้นวัดเป็นมุมซึ่งเรียกว่า มุมแคมเบอร์ (Camber angle) อันมีหน่วยวัดเป็นองศา มุมแคมเบอร์เป็นมุมระหว่างเส้นศูนย์กลางของคอกยางล้อรถตัดกับเส้นตั้งบนพื้นผิวถนน โดยวิศวกรผู้ออกแบบรถยนต์จะเป็นผู้ออกแบบว่าจะให้มุมแคมเบอร์มีค่าเป็นบวกหรือลบ

##### 3.1.1.1 ชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดมุมแคมเบอร์

การเอียงของล้อหน้าทำได้โดยการเอียงเพลาล้อหน้า (Wheel spindle) ในรถยนต์ที่ใช้ระบบคานหน้าเป็นคานแข็งจะไม่มีกรออกแบบจัดเตรียมเพื่อการปรับตั้งมุมแคมเบอร์ไว้ เพราะฉะนั้นถ้าเกิดว่ามุมแคมเบอร์เกิดการผิดพลาดขึ้น แสดงว่าเกิดการชำรุดหรือสึกหรอขึ้นที่ชิ้นส่วนดังต่อไปนี้คือ คานหน้าคด ข้อเสี้ยวล้อคด เพลาล้อคด บุชสลักล้อหน้าหลวมคลอน ส่วนในกรณีที่ระบบช่วงล่างเป็นแบบชนิดอิสระต่อกัน จะมีการออกแบบจัดเตรียมเพื่อการปรับตั้งมุมแคมเบอร์ไว้ โดยการออกแบบชิ้นส่วนที่จะปรับตั้งระยะของปีกนกตัวบนหรือตัวล่างของรถโดยการใส่ลูกเบี้ยว แผ่นซึม หรือร่องสกรูยึด เป็นต้น

##### 3.1.1.2 ลักษณะของมุมแคมเบอร์

สำหรับรถยนต์ส่วนมากในปัจจุบันและกฎเกณฑ์โดยทั่วไป การปรับตั้งมุมแคมเบอร์หรือโดยทั่วไปเรียกกันแต่เพียงว่าแคมเบอร์ ของล้อหน้าทั้งสองจาก  $0^{\circ}$  ถึง  $0.5^{\circ}$  ซึ่งถ้าแคมเบอร์ของรถได้ปรับตั้งถูกต้องตามนี้หรือถูกต้องตามที่บริษัทผลิตรถยนต์กำหนดไว้ ยางรถจะได้รับการรักษาให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นลักษณะมุมแคมเบอร์มีอยู่ 3 ลักษณะ คือมุมแคมเบอร์เป็นศูนย์ แคมเบอร์เป็นบวก (Positive camber) และแคมเบอร์เป็นลบ (Negative camber) ตามรูปที่ 3-1



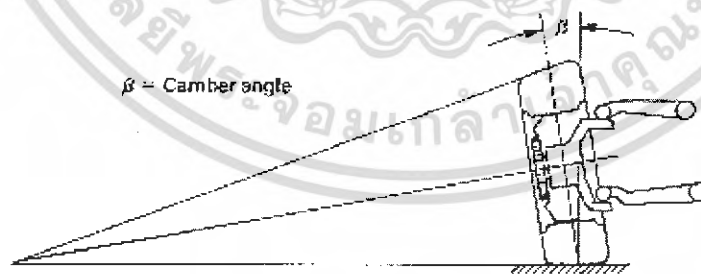
รูปที่ 3-1 มุมแคมเบอร์

### 3.1.1.3 ผลของมุมแคมเบอร์ขณะรถแล่นตรง

นอกจากมุมแคมเบอร์ของล้อหน้าทั้งสองจะทำงานสัมพันธ์ซึ่งกันและกันแล้ว ก็ยังจะต้องทำงานสัมพันธ์กับมุมอื่นๆของล้อมันเองด้วย ดังนั้นมุมแคมเบอร์จึงต้องได้รับการปรับตั้งอย่างถูกต้อง แต่ถ้าไม่ถูกต้องจะมีผลดังนี้คือ พวงมาลัยดึง ขางสึกหรือเร็วและลูกปืนล้อหรือลูกหมากคันส่งสึกหรือเร็ว

- พวงมาลัยดึงหรือรถแล่นแฉจากทิศทางตรง

การเอียงของล้อในขณะที่รถแล่นจะมีผลต่อการกลิ้งของล้อรถที่กลิ้งไปบนพื้นผิวถนน เพราะถ้าล้อเกิดการเอียงทำให้ขางรถอ่อนตัวมีผลให้ขนาดของขางมีรัศมีที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้าขาง ดังนั้นผลของเส้นผ่านศูนย์กลางกลิ้ง (Rolling diameter, รูปที่ 3-2) ของล้อในแต่ละจุดที่มีขนาดไม่เท่ากันเกิดการกลิ้งไปในลักษณะของกรวย คือการหมุนของกรวยจะกลิ้งไปเป็นวงกลมรอบจุดยอดของกรวย ในทำนองเดียวกัน การเอียงของล้อจะทำให้ล้อหมุนกลิ้งไปในทิศทางที่ไม่ตรงกับทิศทางตรงของรถ ยิ่งล้อรถมีมุมแคมเบอร์มากขึ้นเท่าใดหรือมีมุมแคมเบอร์โตเกินไป จะทำให้ล้อเกิดการดึงออกจากทิศทางตรงมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นถ้าล้อหน้าทั้งสองของรถมีมุมแคมเบอร์ไม่เท่ากัน ล้อที่มีมุมแคมเบอร์มากกว่าจะดึงให้รถยนต์แฉไปทางด้านนั้น ทำให้คนขับรถจะต้องดึงพวงมาลัยเพื่อให้รถแล่นตรงตลอดเวลาหรือถ้าปล่อยมือจากพวงมาลัยรถยนต์จะแล่นแฉไปทางด้านล้อหน้าที่มีมุมแคมเบอร์มากกว่าเสมอ



รูปที่ 3-2 เส้นผ่านศูนย์กลางกลิ้ง (Rolling diameter)

- ขางสึกหรือเร็วผิดปกติ

ผลอีกอย่างหนึ่งจากการที่ล้อรถยนต์มีมุมแคมเบอร์โตเกินไปจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางกลิ้งของล้อรถ ณ จุดที่คอกขางสัมผัสกับผิวถนนต่างกันมาก เช่น ถ้าล้อรถยนต์มีมุมแคมเบอร์บวกมากเกินไป คอกขางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านในจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางกึ่งโลกว่าดอกยางด้านนอก เป็นผลให้ความเร็วรอบที่จุดสัมผัสของดอกยาง มีความเร็วรอบไม่เท่ากัน แต่ดอกยางทั้งด้านนอกและด้านในอยู่ในล้ออันเดียวกันที่จะหมุนไปด้วย ความเร็วรอบเท่ากัน ในทิศทางตรง ดังนั้นดอกยางด้านนอกซึ่งเล็กกว่าจะต้องพยายามที่จะกลิ้งเร็วกว่า อันเป็นสาเหตุให้ดอกยางส่วนนี้กลิ้งไปบนผิวถนนโดยการลื่นไถลไปหรือฉุดไป ทำให้ขอบดอกยางด้านนอก สึกเร็วกว่าด้านใน ในทางตรงกันข้ามถ้ามุมแคมเบอร์เป็นลบมากเกินไปขอบดอกยางด้านในจะสึกหรือเร็วกว่าด้านนอก

- ลูกปืนและลูกหมากคันส่งสึกหรือเร็วผิดปกติ

จากการที่ล้อรถยนต์ที่มีมุมแคมเบอร์โตเกินกว่าปกติ ทำให้ล้อกลิ้งไปในทิศทางที่โค้งออกจากแนวตรงจึงมีผลให้ลูกหมากคันส่งต้องรับแรงที่จะต้องบังคับล้อสูงขึ้นกว่าปกติจึง ทำให้ลูกหมากเกิดการสึกหรือเร็วยิ่งขึ้น พร้อมทั้งนั้นการที่ล้อเอียงเกินปกติทำให้ลูกปืนล้อต้องรับแรงไม่ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ จึงมี โอกาสสึกหรือเร็วขึ้นด้วย

### 3.1.1.4 ผลของมุมแคมเบอร์ขณะรถแล่นบนทางเอียง

จากการที่ถนนรถยนต์ได้รับการออกแบบสร้างให้เอียงลาดเป็นหลังเต่าเพื่อให้น้ำที่เกิดจากฝนซึ่งตกลงบนถนนสามารถไหลออกจากพื้นถนนโดยเร็ว ดังนั้นจึงมีผลหลายอย่างต่อรถยนต์ที่แล่นไปบนทางลาดเอียงเช่น จุดศูนย์กลางของรถจะเลื่อนตำแหน่งไปยังด้านเอียงของถนน เป็นผลให้ตัวรถยนต์เอียงมากยิ่งขึ้น ทำให้ล้อหน้าของรถถูกดึงให้ล้อบิดเลี้ยวไปทางที่ลาดเอียงนั้น คนขับจะต้องใช้มือที่จับพวงมาลัยดึงด้านไว้เพื่อให้รถแล่นตรงไปด้านหน้า ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในประเทศที่มีการจราจรขยับรถชิดซ้าย เช่น ประเทศไทย มุมแคมเบอร์ของล้อหน้าขวาจะต้องตั้งให้เป็นบวกมากกว่าล้อหน้าซ้าย 0.25 องศา เพื่อเป็นการต้านกับการเอียงของพื้นผิวถนนและทำให้รถยนต์แล่นตรงไปข้างหน้า

### 3.1.1.5 ผลของมุมแคมเบอร์ขณะรถแล่นทางโค้ง

เมื่อรถยนต์แล่นบนทางโค้งด้วยความเร็วสูง จุดศูนย์กลางของรถจะเลื่อนไปทางล้อด้านนอกของรถ รถยนต์ส่วนมากจะเกิดการเอียงของตัวรถขึ้นคือตัวรถด้านนอกของทางโค้งจะเอียงต่ำลง ทำให้ล้อด้านนอกมีมุมแคมเบอร์โตขึ้น (เมื่อเทียบกับตัวรถ) และขณะเดียวกันล้อด้านในก็จะเกิดมุมแคมเบอร์เป็นลบ (เมื่อเทียบกับตัวรถ) อันเป็นผลให้ล้อหน้าพยายามกลิ้งออกนอกทางโค้ง หรือทำให้ตัวรถเกิดแหกโค้งได้ง่ายขึ้น

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

มุมล้อหน้าอีกมุมหนึ่งที่สัมพันธ์กับมุมแคมเบอร์และในการมองก็มองในด้านและทิศทางเดียวกัน คือมองเข้าไปจากหน้ารถจะเห็น แกนล้อเลี้ยว (Steering-axis) เอียงออกจากเส้นตั้งเข้าไปทางด้านในของรถ มุมระหว่างเส้นแกนล้อล้อกับเส้นตั้งเรียกว่า มุมเอียงแกนล้อเลี้ยว ถ้ารถยนต์ใช้ระบบช่วงล่างชนิดคานแข็งและรถยนต์ที่ใช้รถยนต์ที่ใช้สลักล้อหน้า (kingpins) จึงเรียกมุมนี้ว่ามุมเอียงสลักล้อหน้า (King pin - inclination) ส่วนรถยนต์ที่ใช้ลูกหมากปีกนก ก็เรียกว่า มุมเอียงลูกหมากปีกนก (Ball joint inclination angle)

### 3.1.2.1 วัตถุประสงค์ของการจัดมุมเอียงแกนเลี้ยวล้อ

- ลดความต้องการมุมแคมเบอร์มากเกินไป

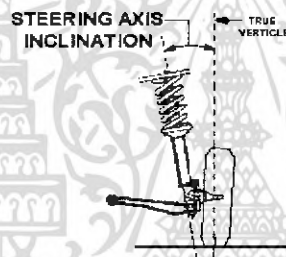
จากการที่มุมแคมเบอร์มากเกินไป จะมีผลเสียต่อการสึกหรอของดอกยางรถยนต์ และการหมุนในลักษณะกรวยของล้อทำให้แล่นไปในแนวทางโค้งซึ่งเป็นผลให้เกิดแรงคิงพวงมาลัย อันเป็นผลเสียของมุมแคมเบอร์ที่มากเกินไป ดังนั้นเมื่อทำการเอียงแกนเลี้ยวล้อแล้วก็ไม่จำเป็นต้องมีความต้องการที่จะออกแบบให้มีมุมแคมเบอร์มาก ๆ

- กระจายน้ำหนักรถที่ตกบนพื้นถนนให้ใกล้จุดศูนย์กลางของผิวสัมผัสของยางกับผิวถนน

จากการที่สามารถลดมุมแคมเบอร์ลงหรือให้มุมแคมเบอร์เป็นศูนย์ได้นั้น ทำให้ยางรถยนต์ตั้งอยู่ในแนวคิงดอกยางก็จะสัมผัสอย่างเต็มหน้ากับผิวถนน ดังนั้นจุดรวมของน้ำหนักของรถที่ดอกยางสัมผัสกับผิวถนนจะกระจายอยู่ ณ จุดศูนย์กลางของดอกยางหรือใกล้จุดศูนย์กลางมากที่สุด

### 3.1.2.2 ชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดมุมเอียงแกนเลี้ยวล้อ

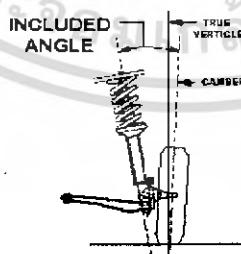
เส้นศูนย์กลางของสลักล้อหน้าหรือเส้นตรงที่ผ่านจุดศูนย์กลางของลูกหมากปีกนกทั้งตัวบนและตัวล่าง เรียกว่า แกนเลี้ยวล้อ เพราะเป็นเส้นแกนอันเป็นจุดหมุนของล้อขณะที่บิดเลี้ยวเพื่อการบังคับเลี้ยว



รูปที่ 3-3 มุมเอียงแกนล้อเดียว

### 3.1.2.3 มุมรวม (Included angle)

มุมรวมเป็นผลรวมของมุมแคมเบอร์กับมุมเอียงแกนเลี้ยวล้อ รถยนต์ที่มีมุมแคมเบอร์เป็นบวกจะมีมุมรวมโตกว่ามุมเอียงแกนเลี้ยวล้อ แต่ในกรณีที่รถยนต์ออกแบบให้มุมแคมเบอร์เป็นลบจะมีค่ามุมรวมเล็กกว่ามุมเอียงเล็กน้อย



รูปที่ 3-4 มุมรวม

### 3.1.3 มุมแคสเตอร์ (Caster angle)

เมื่อมองจากด้านข้างของรถยนต์เข้าไปที่ล้อหน้าแกนเลี้ยวล้อจะเอียงจากแนวคิงโดยปลายบนของแกนเลี้ยวล้อจะเอียงไปทางด้านหน้าหรือทางด้านหลังของตัวรถ ลักษณะการเอียงของแกนเลี้ยวล้อนี้ทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

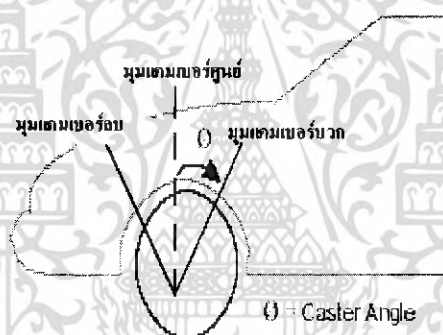
มุมแคสเตอร์ขึ้น โดยมุมแคสเตอร์คือมุมระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางล้อที่ตั้งในแนวตั้งตัดกับเส้นศูนย์กลางของแกนเลี้ยวล้อ

### 3.1.3.1 ชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดมุมแคสเตอร์

รถยนต์ปัจจุบันได้รับการออกแบบสร้างจากบริษัทผู้ผลิต โดยใช้เครื่องมือกลพิเศษที่ออกแบบเฉพาะแต่ละงานหรือชิ้นส่วนและข้อเลี้ยวล้อ (Steering knuckle) ซึ่งทำขึ้นโดยวิธีค้อนรูป (Forging) แล้วจึงนำไปผ่านเครื่องมือกล ดังนั้นในการออกแบบติดตั้งตัวยึดข้อเลี้ยวล้อและเพลาล้อหน้าเข้ากับคานหน้าโดยใช้สลักล้อหน้าหรือลูกหมากปีกนก จึงสามารถทำได้เที่ยงตรง เพราะมีเครื่องมือกลและเครื่องมือวัดที่ทันสมัย ในรถยนต์ที่ใช้ปีกนกการยึดติดปีกนกเข้ากับคานหน้าก็สามารถปรับตั้งตำแหน่งเพื่อปรับมุมแคมเบอร์ได้ ถ้าไม่อยู่ที่ปีกนกตัวบนก็จะอยู่ที่ปีกนกตัวล่างตัวใดตัวหนึ่ง ในการปรับตำแหน่งของปีกนกอาจจะใช้แผ่นชิมรอง ลูกเบี้ยวหรือหนวดกุ้ง (Strut rod) ยึดปีกนกตัวล่าง ส่วนในรถยนต์ที่คานหน้าเป็นแบบคานแข็งก็มีลิ้มรองอยู่ใต้แผ่นแหนบ

### 3.1.3.2 ลักษณะของมุมแคสเตอร์

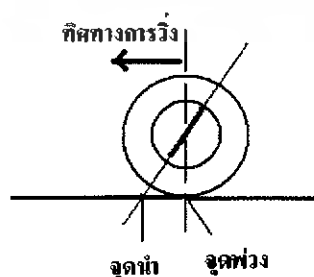
มุมแคสเตอร์มีลักษณะเป็นทั้งบวก ศูนย์และลบขึ้นอยู่กับารออกแบบรถ ที่จะใช้ตามลักษณะหรือแบบของรถ เช่น รถยนต์นั่งขนาดเล็ก รถยนต์นั่งมีระบบพวงมาลัยกำลัง หรือรถบรรทุกเป็นต้น



รูปที่ 3-5 มุมแคสเตอร์

- มุมแคสเตอร์ศูนย์ (Zero caster)

จากรูปที่ 3-6 ถ้ามุมแคสเตอร์เป็นศูนย์ จุดนำกับจุดพ่วงจะอยู่ที่เดียวกันมีผลทำให้ล้อไม่เกิดการไถ้มียงที่จะเลี้ยวไปในทิศทางใด ดังนั้นล้อก็ไม่มีคามมั่นคงในทิศทางด้วยเหมือนกันแต่ในการใช้แรงหมุนพวงมาลัยไม่จำเป็นต้องออกแรงมากนัก



รูปที่ 3-6 จุดนำและจุดพ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มุมแคสเตอร์บวก (Positive caster)

เป็นมุมของแกนเลี้ยวล้อที่เอียงไปทางด้านหลังของรถ ขณะที่ล้อเลี้ยวออกจากแนวเส้นตรง จุดนำหรือจุดศูนย์กลางจะไม่อยู่บนเส้นทิสทางเส้นของรถ ทำให้เกิดแรงจากการเลี้ยว (Turning force) ขึ้นซึ่งเป็นผลให้เกิดโมเมนต์ที่จะทำให้เกิดการจัดตั้งศูนย์กลางล้อด้วยตัวเอง (Self aligning torque) อันทำให้ล้อมีแนวโน้มที่จะรักษาล้อให้อยู่ในตำแหน่งเส้นตรงไปข้างหน้า แต่ต้องใช้แรงพยายามในการหมุนพวงมาลัยหรือขับรถเกินความเป็นจริงเช่น เมื่อขณะรถแล่นทางโค้งจะต้องใช้แรงจับยึดพวงมาลัยมาก โดยการที่รถมีมุมแคสเตอร์มากเกินไปจนเป็นสาเหตุให้รถยนต์เกิดการเต้น และกระดอนจากการไม่เรียบของถนน แต่ก็ยังเป็นผลดีในกรณีที่รถยนต์แล่นที่ความเร็วสูงๆ เพราะจะไม่ทำให้หัวรถส่ายไปมาทางด้านข้าง

- มุมแคสเตอร์ลบ (Negative caster)

เป็นมุมของแกนเลี้ยวล้อที่เอียงไปทางด้านหน้าของรถ การที่รถยนต์มีมุมแคสเตอร์เป็นลบนี้จะทำให้แรงเลี้ยวล้อและจุดพ่วงอยู่หน้าจุดนำ เป็นผลทำให้ล้อพยายามที่จะเลี้ยวอยู่ตลอดเวลาเพราะแรงเลี้ยวล้อที่เกิดขึ้นจะพยายามไปอยู่ด้านหลัง ประเภทของรถยนต์ที่ใช้มุมแคสเตอร์ลบได้แก่รถยนต์ที่มีความมั่นคงในทิสทางมากเกินไปคือรถที่พวงมาลัยกลับที่เดิมเร็วเกินไปเมื่อผ่านทางโค้ง และรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหน้าเพราะจุดสัมผัสของบางกับพื้นถนนเป็นจุดที่ล้อหมุนตะกุกให้เกิดการขับเคลื่อนหรือจุดนำนั่นเอง

### 3.1.3.3 ผลของมุมแคสเตอร์ขณะรถแล่นบนทางเอียง

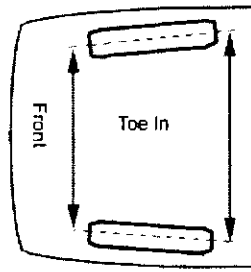
ขณะที่รถยนต์แล่นบนทางเอียง รถจะถูกดึงไปทางที่เอียงต่ำกว่าหรือให้รถตกจากถนน ดังนั้นการจัดมุมแคสเตอร์ก็สามารถที่จะช่วยแก้อาการที่รถถูกดึงได้ โดยการปรับตั้งมุมแคสเตอร์ของล้อหน้าซ้ายให้มากกว่ามุมแคสเตอร์ของล้อหน้าขวาประมาณ 0.5 องศา โดยการแก้ปัญหาด้วยมุมแคสเตอร์จะดีกว่าการแก้โดยมุมแคมเบอร์ซึ่งจะมีผลต่อการสึกหรอของดอกยาง

### 3.1.3.4 ผลของมุมแคสเตอร์ไม่ถูกต้อง

- มุมแคสเตอร์ไม่เท่ากันเป็นสาเหตุให้รถแล่นคังออกไปทางด้านข้างหรือแล่นเฉไปทางที่มีมุมแคสเตอร์เป็นบวกน้อยกว่า
- มุมแคสเตอร์น้อยเกินไปเป็นสาเหตุให้รถแล่นหัวรถส่ายไปมา หรือเฉไปเฉมา ไม่ตรงทิสทาง
- มุมแคสเตอร์น้อยเกินไปเป็นสาเหตุให้รถยนต์แล่นไม่มีความมั่นคงในทิสทาง ที่ความเร็วสูงๆ
- มุมแคสเตอร์มากเกินไปเป็นสาเหตุให้พวงมาลัยหนัก
- มุมแคสเตอร์มากเกินไปเป็นสาเหตุให้รถเต้น และกระดอนตามสภาพของถนน

### 3.1.4 ระยะโทของล้อหน้า (Toe)

ตามทฤษฎีแล้วล้อหน้ารถยนต์ต้องขนานกัน เมื่อรถแล่นตรงไปข้างหน้า แต่เมื่อใช้งานจริงๆและจากการที่ล้อรถยนต์จะต้องจัดมุมต่างๆหลายมุม จึงเป็นผลให้การจัดล้อหน้าตามปรกติต้องออกจากแนวขนานเล็กน้อย การจัดมุมล้อในลักษณะนี้เรียกว่า ระยะโทของล้อหน้า หมายถึงความแตกต่างของระยะห่างระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของล้อหน้าที่นำมาหักลบกัน



รูปที่ 3-7 มุมโท

### 3.1.4.1 วัตถุประสงค์ของการจัดระยะ โทของล้อหน้า

ระยะโทของล้อหน้าจัดว่าเป็นการปรับตั้งตำแหน่งของล้อหน้าอย่างหนึ่งเมื่อพุดถึงศูนย์ล้อหน้ารถยนต์ ดังนั้นการที่รถยนต์มีระยะโทเกิดขึ้นก็เพื่อ การหลีกเลี่ยงการสึกหรอของยางเร็วกว่าปรกติและ การทำงาน ร่วมกันกับมุมแคมเบอร์

- การหลีกเลี่ยงการสึกหรอของยางเร็วกว่าปรกติ

เพื่อให้ล้อหมุนกลิ้งไปข้างหน้าในทิศทางเดียวกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการที่ยางถูไปบนทางแฉก และเพื่อ เป็นการรักษาระยะ โทของล้อหน้าขณะรถแล่นให้เป็นศูนย์ จึงจำเป็นที่จะต้องตั้งให้ล้อเอียงเข้าหากัน เล็กน้อยในขณะที่รถอยู่กับที่ อันเป็นการแก้หรือการทดแทนสำหรับการหันเหของล้อที่เกิดขึ้นจากแรง เสียดทานของล้อบนผิวถนนและแรงที่เกิดจากการเบรก ซึ่งแรงเสียดทานของล้อบนผิวถนนและแรงเบรก นี้จะทำให้เกิดเป็นโมเมนต์ อันเป็นแนวโน้มที่ทำให้ล้อหน้าเกิดการออกทางข้างหน้าให้ล้อแล่นแยกออกจาก กัน

- การทำงานร่วมกันกับมุมแคมเบอร์

ดังที่ทราบแล้วว่าล้อหน้ารถยนต์ถ้ามุมแคมเบอร์มีค่าเป็นบวกจะทำให้ล้อหน้าแล่นออกจากกัน เปรียบเสมือนการกลิ้งของกรวยดังนั้นเมื่อจัดตั้งระยะ โทให้ข้างหน้าแคบเข้าก็จะเป็นผลให้ล้อแล่นเข้าหา กัน เมื่อปรับตั้งระยะ โทสัมพันธ์กับมุมแคมเบอร์ก็จะเป็นผลให้ล้อแล่นตรง ไปข้างหน้าตามทิศทางแฉก ของรถ

### 3.1.4.2 ชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดระยะ โทของล้อหน้า

โดยปรกติล้อหน้าทั้งสองจะทำงานในการเลี้ยวล้อ ไปด้วยกันเพื่อเลี้ยวรถ โดยมีคันส่ง (Steering rack) เป็นตัวต่อเชื่อมให้ล้อทั้งสองทำงานไปพร้อมๆกัน ณ ที่คันส่งนี้จะสามารถปรับความสั้นยาวของคันส่งได้ ดังนั้นในการปรับให้คันส่งยาวออกหรือสั้นเข้า หมายถึงการปรับระยะ โทของล้อตามลักษณะที่ต้องการ

### 3.1.4.3 ลักษณะของระยะ โทล้อหน้า

โดยทั่วไประยะ โทของล้อหน้าเป็น โทอิน แต่ในรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยล้อหน้าจะกำหนดให้ล้อ หน้ามีโทเป็นศูนย์หรืออาจจะเป็น โทเอาท์

- โทอิน (Toe-in)

ระยะโทของล้อหน้าเป็นโทอินหมายถึงลักษณะของล้อหน้าทั้งสองที่มีระยะห่างด้านหน้าสุดน้อยกว่าระยะห่างหลังสุดของล้อหน้า ตามรูปที่ 3-7

- โทเป็นศูนย์ (Toe zero)

หมายถึงระยะระหว่างความห่างของล้อหน้าทั้งด้านหน้าสุดและหลังสุดมีค่าเท่ากัน ซึ่งความต้องการอันแท้จริงคือรถยนต์จะต้องมีระยะโทของล้อหน้าขณะรถแล่นเป็นศูนย์ เพื่อต้องการให้ล้อรถยนต์ทุกๆ ล้อขนานแก่กันและกัน แต่ในทางปฏิบัติจะทำการปรับตั้งระยะโทของล้อหน้าให้เป็นโทอินเมื่อรถหยุดอยู่กับที่ โดยปรกติรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหน้าจะตั้งระยะโทเป็นศูนย์หรือเป็นโทอินเพียงเล็กน้อย

- โทเอ้าท์ (Toe-out)

คือล้อหน้าของรถยนต์ที่มีระยะห่างของล้อหน้า ด้านหน้าสุดกว้างกว่าด้านหลังสุด ปรกติโทเอ้าท์จะเกิดขึ้นจากการชำรุดเสียหายของชิ้นส่วนของระบบขับเคลื่อนและระบบช่วงล่างด้านหน้า อันซึ่งไม่เป็นปรารถนาของรถยนต์ เพราะจะมีผลทำให้รถแล่นแล้วหัวรถส่ายไป-มาไม่สามารถแล่นตรงทางไปข้างหน้าได้คนขับจะต้องคอยควบคุมให้รถแล่นตรงไปข้างหน้าตลอดเวลา

#### 3.1.4.4 ผลจากระยะโทไม่ถูกต้อง

- ทำให้ดอกยางสึกเร็วเกินไป
- รถมีระยะโทเอ้าท์ทำหัวรถแล่นเฉไปทางด้านข้าง

(ที่มา : <http://www.familycar.com> และ <http://www.autozine.org> )

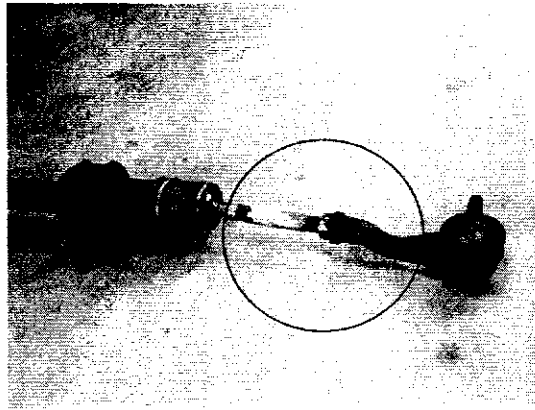
#### 3.1.4.5 มุมล้อที่เลือก

	มุมแคสเตอร์ (องศา)	มุมแคมเบอร์ (องศา)	มุมโท (องศา)	มุมคิงพิน (องศา)
รถอี-20 ด้านหน้า	15	0	0	20
รถอี-20 ด้านหลัง	0	0	0	6
รถไฟฟ้า ด้านหน้า	23.5	0	0	20
รถไฟฟ้า ด้านหลัง	-	0	0	-

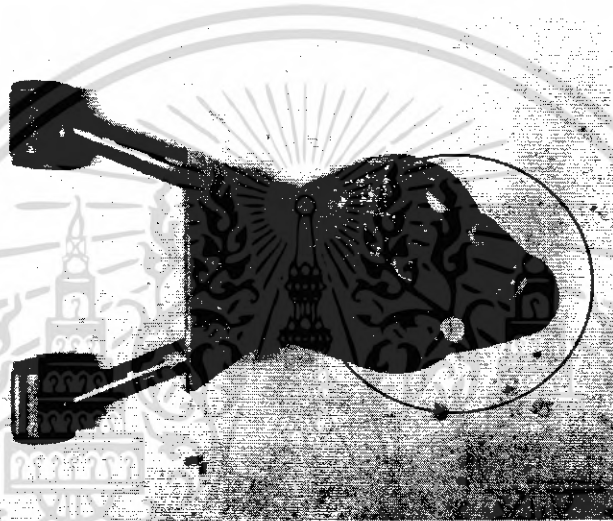
ตารางที่ 3-1 มุมล้อที่ติดตั้ง

โดยที่ รถอี-20 และรถไฟฟ้า ด้านหน้าสามารถปรับมุม แคสเตอร์ แคมเบอร์และโท ให้เพิ่ม-ลดได้ประมาณ 2 องศาโดยชิ้นส่วนตามรูปที่ 3-8 ถึง 3-11 (ออกแบบโดยกลุ่มโครงการออกแบบและพัฒนา ระบบบังคับเลี้ยวและทีมงานซิติคาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-8 ชิ้นส่วนปรับมุมโท (รถไฟฟ้าและอี-20)

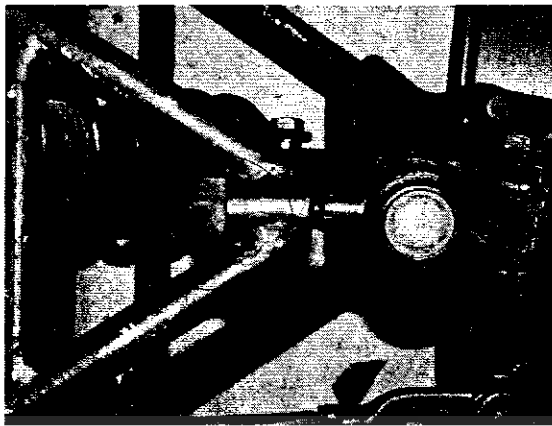


รูปที่ 3-9 ชิ้นส่วนปรับมุมแคสเตอร์ (รถไฟฟ้าและอี-20)



รูปที่ 3-10 ชิ้นส่วนปรับมุมแคมเบอร์ (รถไฟฟ้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-11 ชิ้นส่วนปรับมุมแคมเบอร์ (รถอี-20)

### 3.2 การหาฐานล้อและ ระยะหน้าล้อ

ระยะฐานล้อ (Wheel base) หมายถึงระยะที่วัดจากจุดศูนย์กลางล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางล้อหน้า ในด้านเดียวกัน โดยฐานล้อมีผลกับความยากง่ายและความสะดวกสบายในการทรงตัวของรถเมื่อมีโหลดมากระทำที่ด้านหน้า (Axle load distributions) ช่วยลดระยะรัศมีวงเลี้ยวหากมีระยะแคบหรือกว้างเมื่อเทียบกับตัวบอดี และมีผลต่อระบบการสิ้นสะเทือน สามารถทำให้ระบบช่วงล่างมีความนุ่มนวล

ถ้าระยะฐานล้อสั้นทำให้มีการเข้าโค้งง่ายเหมาะสำหรับรถขนาดเล็กที่ต้องการวงเลี้ยวแคบๆ ซึ่งจะทำให้สามารถเลี้ยวได้ด้วยรัศมีวงเลี้ยวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับรถที่มีขนาดฐานล้อยาวกว่า โดยหมุนพวงมาลัยด้วยจำนวนรอบที่เท่ากัน

ถ้าระยะฐานล้อกว้างเหมาะสำหรับรถสปอร์ต รถนั่งแก๊งขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับรูปร่างของบอดี ฐานล้อแบบนี้จะเหมาะกับรถประเภทอเนกประสงค์มากกว่ารถขนาดเล็ก สามารถออกแบบฐานล้อได้จากสูตรดังนี้

$$i = \frac{\text{wheel base}}{\text{vehicle length}} \quad (3-1)$$

โดยใช้ค่าอ้างอิงตามขนาดของรถที่เป็นไปได้ดังนี้

$$i_l = 0.57 \sim 0.67 \text{ สำหรับรถขนาดใหญ่}$$

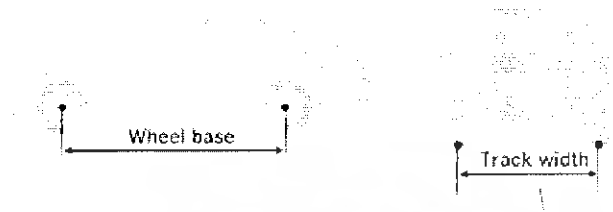
$$i_s = 0.56 \sim 0.61 \text{ สำหรับรถขนาดเล็ก}$$

แต่สำหรับรถสปอร์ตคูเป้ อาจมีค่า  $i$  ได้เพียง 0.56 แต่สำหรับรถขนาดเล็กมากๆอาจมีค่าได้มากกว่า 0.72

ระยะหน้าล้อ (Track,  $i_p$ ) หมายถึงระยะความยาวที่วัดจากกลางล้อซ้ายถึงกลางล้อขวา มีผลต่อการเข้าโค้งด้วยความคล่องตัวและมีเสถียรภาพ การเลี้ยวโค้งมีผลให้เกิดความไม่เสถียรต่อตัวบอดี โดยทั่วไปควรมีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับความยาวด้านหน้ารถ และมีความกว้างเพียงพอเมื่อทำการเลี้ยวสุด (ซ้ายสุดหรือขวาสุด) แต่ไม่ชนกับส่วนของโครงรถ ระยะหน้าล้อจะเปลี่ยนเมื่อมีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง (Bump and rebound) ของล้อและระบบช่วงล่าง โดยระยะหน้าล้อสามารถหาได้จากสูตร

$$i_b = \frac{\text{Tread width}}{\text{vehicle width}} = 0.84 \sim 0.87 \quad (3-2)$$

(ที่มา : จากหนังสือ The Automotive Chassis Engineering Principles)



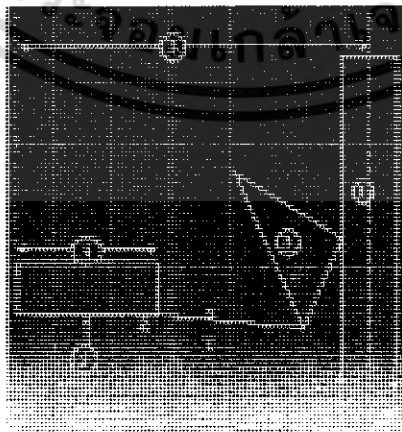
รูปที่ 3-12 ระยะฐานล้อและระยะหน้าล้อ

	รถไฟฟ้า	รถอี-20
ฐานล้อ (มม.)	1670	2400
ระยะหน้าล้อด้านหน้า (มม.)	1200	1150
ระยะหน้าล้อด้านหลัง (มม.)	1200	1200

ตารางที่ 3-2 ระยะฐานล้อและระยะหน้าล้อที่เลือก

### 3.3 การหาขนาดของปีกนก

หลังจากที่ได้ทราบระยะฐานล้อแล้วขั้นตอนต่อมาก็เป็นขั้นตอนของการหาขนาดของปีกนกโดยก่อนที่จะทำการหา สิ่งที่จะต้องทราบคือขนาดความยาวชิ้นส่วนต่อไปนี้ (จากรูปที่ 3-13) 1. ขนาดของล้อ 2. ขนาดของคอกม้า 3. ระยะห่างล้อซ้าย-ขวา 4. ขนาดของเฟรม 5. ระยะความสูงของเฟรมจากพื้น หลังจากนั้นจึงวาดระบบช่วงล่างลงในโปรแกรม CATIA แล้วทดสอบการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของปีกนกดูว่าสามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้ กี่องศา



รูปที่ 3-13 การหาระยะปีกนก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3-13 ระยะเวลาปีกนกกลางคือระยะเวลาความยาว X ในการที่จะหาระยะ X นี้ได้นั้นจำเป็นจะต้องทราบระยะ Z และ Y ซึ่งระยะ Z สามารถหาได้จากระยะความสูงของเฟรม (จุด5) หักลบกับระยะกอม้า (จุด2) ส่วนระยะ Y นั้นสามารถหาได้จากระยะครึ่งหนึ่งของระยะห่างล้อซ้าย-ขวา หักลบกับระยะความกว้างของเฟรม เมื่อได้ระยะ Z และ Y แล้วก็ใช้สูตรปีกทอร์สหาระยะ X ได้ ส่วนในรถอี-20 ก็หาระยะปีกนกด้วยวิธีเดียวกัน เพียงแต่จะมีปีกนกบนด้วย ซึ่งจะหาระยะปีกนกทั้งหมดดังตารางที่ 3-3

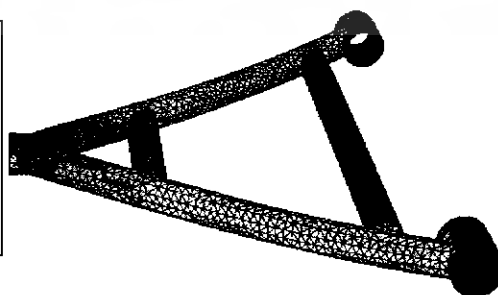
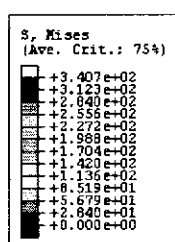
	ปีกนกบน (มิลลิเมตร)	ปีกนกกลาง (มิลลิเมตร)
รถไฟฟ้า ด้านหน้า	-	250
รถอี-20 ด้านหน้า	165	225
รถอี-20 ด้านหลัง	225	315

ตารางที่ 3-3 ระยะเวลาปีกนก

หลังจากที่ได้ทราบความยาวของปีกนกแล้วขั้นต่อไปจะเป็นการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปีกนก ในขั้นตอนนี้จะทำการสุ่มค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยหลักการสุ่มจะสุ่มค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กที่มีขายกันในท้องตลาด (ขนาดเหล็กไม่ใหญ่และเล็กจนเกินไป) จากนั้นจึงวาดปีกนกลงในโปรแกรม ABAQUS เพื่อเป็นการทดสอบว่าปีกนกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับที่สุ่มมานั้นสามารถที่จะรับแรงกระแทกได้ไหวหรือไม่ ถ้าไม่ไหวก็ให้เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จนกว่าจะได้ขนาดปีกนกที่มีขนาดเหมาะสม ตามตารางที่ 3-4

	ปีกนกบน (มิลลิเมตร)	ปีกนกกลาง (มิลลิเมตร)
รถไฟฟ้า ด้านหน้า	-	50
รถอี-20 ด้านหน้า	20	20
รถอี-20 ด้านหลัง	30	30

ตารางที่ 3-4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปีกนก

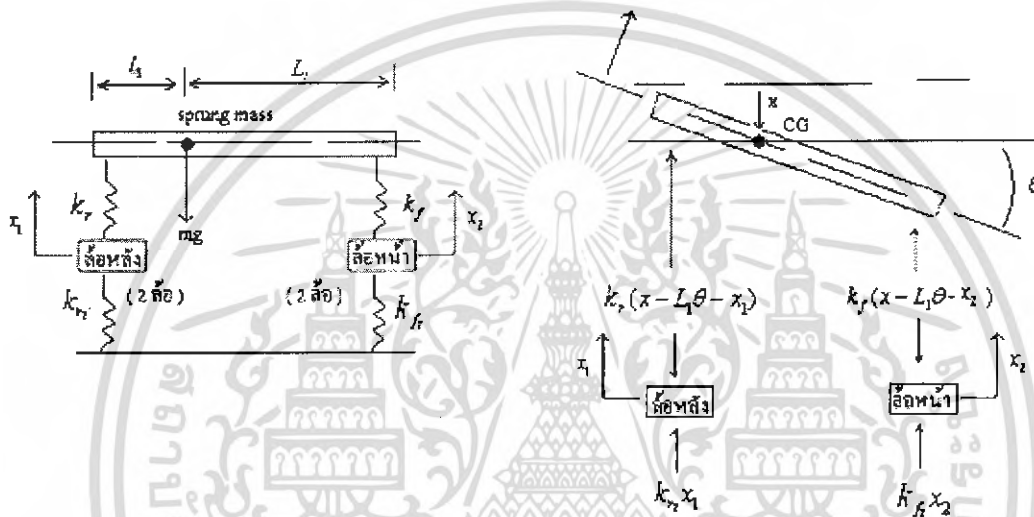


รูปที่ 3-14 การทดลองความเสียหายของปีกนกจากโปรแกรม ABAQUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การคำนวณหาค่าความยืดหยุ่นของสปริงในระบบช่วงล่างที่ออกแบบ

ในการคำนวณหาค่าความยืดหยุ่นของสปริงจะใช้แบบจำลองของระบบช่วงล่างให้เป็นแบบ “ระบบการสั่นสะเทือนแบบสี่ดีกรีอิสระเบื้องต้น (Introduction to Four Degree of Freedom Systems)” ระบบการสั่นสะเทือนที่ต้องการแกนอิสระสี่แกน เพื่อบอกตำแหน่งของมวลในระบบที่เรียกว่า “ระบบสี่ดีกรีอิสระและจะมีความถี่ตามธรรมชาติของการสั่นสี่ค่า” ความถี่ธรรมชาติแต่ละค่าจะขึ้นอยู่กับสภาวะตามธรรมชาติของการสั่นสะเทือนกับ ลักษณะการเคลื่อนที่ซึ่งเรียกว่า “นอร์มอลโหมด (Normal Mode)” ฉะนั้นระบบก็จะมีนอร์มอลโหมดสี่ค่าด้วย โดย ระบบช่วงล่างที่ออกแบบนั้นจะเป็นแบบการสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) ซึ่งขึ้นอยู่กับมวลของระบบและค่าคงที่ของสปริงในระบบโดยแบบจำลองของระบบช่วงล่างเป็นดังนี้



รูปที่ 3-15 แบบจำลองของระบบช่วงล่าง

- $x$  คือ ระยะที่ Sprung mass บุกตัวลงมา
- $x_1$  คือ ระยะการกระจัดที่เกิดขึ้นที่ล้อด้านหลัง
- $x_2$  คือ ระยะการกระจัดที่เกิดขึ้นที่ล้อด้านหน้า
- $\theta$  คือ มุมที่เกิดจากการหมุนของ Sprung mass
- $L$  คือ ระยะ ความยาวของ Sprung mass
- $L_1$  คือ ระยะความยาวจากตำแหน่งของสปริงด้านหลังถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของ Sprung mass
- $L_2$  คือ ระยะความยาวจากตำแหน่งของสปริงด้านหน้าถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของ Sprung mass
- $k_f$  คือ ค่าความยืดหยุ่นของสปริงด้านหน้า
- $k_r$  คือ ค่าความยืดหยุ่นของสปริงด้านหลัง
- $k_{r_f}$  คือ ค่าความยืดหยุ่นของยางล้อด้านหน้า
- $k_{r_r}$  คือ ค่าความยืดหยุ่นของยางล้อด้านหลัง

จากรูปด้านบน คือ ระบบต้องการแกนอิสระ 4 แกน คือ  $x$   $x_1$   $x_2$  และ  $\theta$  เพื่อบอกตำแหน่งมวลในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎข้อสองของนิวตัน จะได้สมการดังนี้

$$\sum F = m\ddot{x}$$

$$-k_r(x - L_1\theta - x_1) - k_f(x + L_2\theta - x_2) = m_{\text{sprung}}\ddot{x} \quad (3-3)$$

$$k_r(x - L_1\theta - x_1) - k_{r_t}x_1 = m_{\text{wheel}}\ddot{x}_1 \quad (3-4)$$

$$k_f(x + L_2\theta - x_2) - k_{f_t}x_2 = m_{\text{wheel}}\ddot{x}_2 \quad (3-5)$$

จากสมการ (3-1) หา Euler จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\sum M_{\text{CG}} = I_{\text{CG}}\ddot{\theta}$$

$$-k_r(x - L_1\theta - x_1) - k_f(x + L_2\theta - x_2) = m_{\text{sprung}} \frac{L^2}{12} \ddot{\theta} \quad (3-6)$$

จัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$m_{\text{sprung}}\ddot{x} + (k_f + k_r)x - k_r x_1 - k_f x_2 + (k_f L_2 - k_r L_1)\theta = 0 \quad (3-7)$$

$$m_{\text{wheel}}\ddot{x}_1 - k_r x + (k_r + k_{r_t})x_1 + k_r L_1 \theta = 0 \quad (3-8)$$

$$m_{\text{wheel}}\ddot{x}_2 - k_f x + (k_f + k_{f_t})x_2 - k_f L_2 \theta = 0 \quad (3-9)$$

$$m_{\text{sprung}} \frac{L^2}{12} \ddot{\theta} + (k_f - k_r)x + k_r x_1 - k_f x_2 + (k_r L_1 + k_f L_2)\theta = 0 \quad (3-10)$$

จากนั้นจัดรูปให้อยู่ในรูปของ  $[m][\ddot{x}] + [k][x] = [0]$  ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} m_{\text{sprung}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\text{wheel}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{\text{wheel}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m \frac{L^2}{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_f + k_r & -k_r & -k_f & k_f L_2 - k_r L_1 \\ -k_r & k_r + k_{r_t} & 0 & k_r L_1 \\ -k_f & 0 & k_f + k_{f_t} & -k_f L_2 \\ k_f - k_r & k_r & -k_f & k_r L_1 + k_f L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_1 \\ x_2 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

แทนค่ามวล ใน  $[m]$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} m_{\text{sprung}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\text{wheel}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{\text{wheel}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m \frac{L^2}{12} \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการ สุ่มค่า  $k$  ของ สปริงทั้งล้อหน้าและล้อหลังใน  $[k]$

$$\begin{bmatrix} k_f + k_r & -k_r & -k_f & k_f L_2 - k_r L_1 \\ -k_r & k_r + k_{r_t} & 0 & k_r L_1 \\ -k_f & 0 & k_f + k_{f_t} & -k_f L_2 \\ k_f - k_r & k_r & -k_f & k_r L_1 + k_f L_2 \end{bmatrix}$$

แทนค่า  $[m]$  และ  $[k]$  ลงในสมการข้างล่าง

$$[\tilde{k}] = [m]^{-1/2} [k] [m]^{1/2} \quad (3-12)$$

โดย  $[\tilde{k}]$  คือ Mass normalized stiffness

$$\det(\lambda I - \tilde{k}) \text{ โดย } \lambda = \text{eig}[\tilde{k}] \quad (3-13)$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \omega_{n_1}^2 \\ \omega_{n_2}^2 \\ \omega_{n_3}^2 \\ \omega_{n_4}^2 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

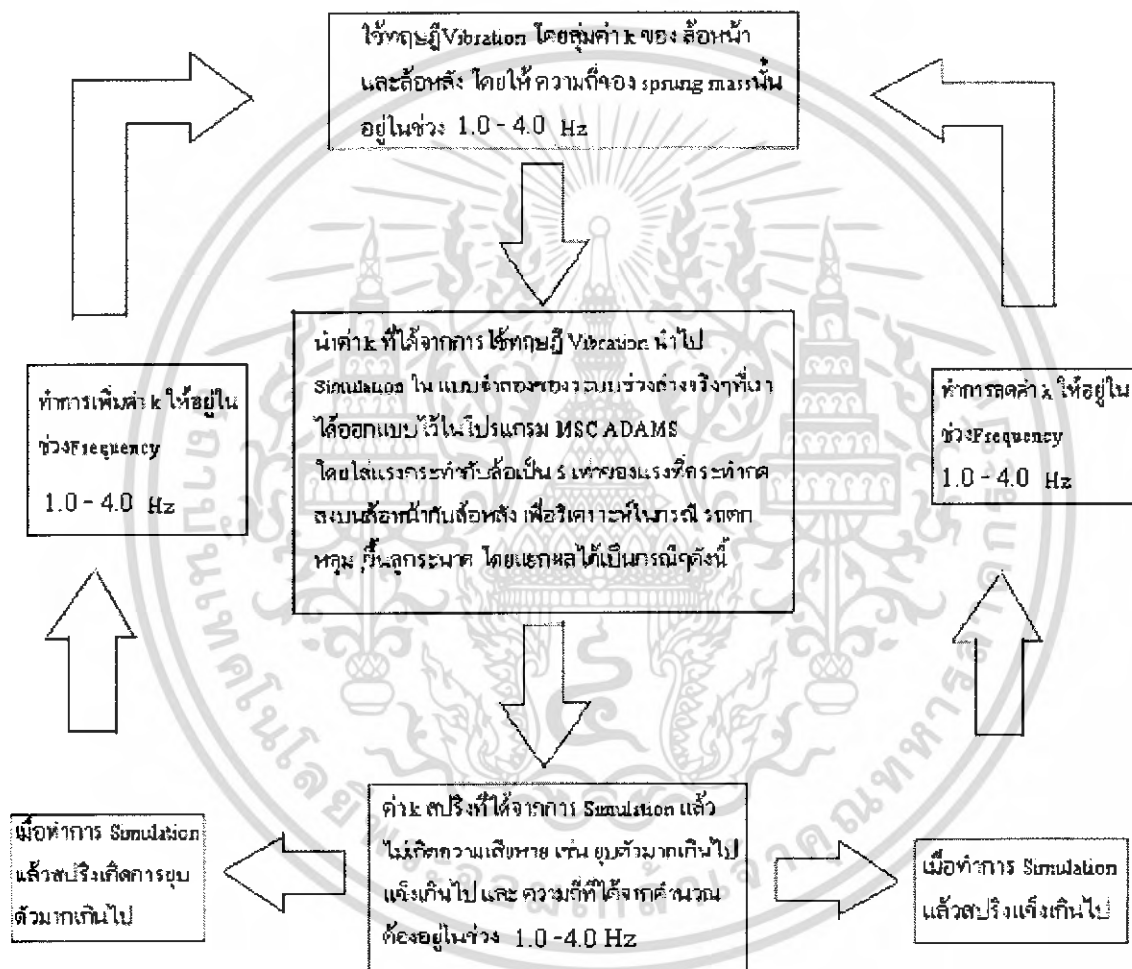
จากนั้นจะรู้ค่า  $\omega_{n_1}$ ,  $\omega_{n_2}$ ,  $\omega_{n_3}$  และ  $\omega_{n_4}$  ในที่นี้จะนำค่า  $\omega_{n_1}$  มาใช้ เพราะเป็นค่าที่น้อยที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  (Hz) (3-15)

$f$  คือ ความถี่ของ Sprung mass ของระบบ ช่วงล่างที่ออกแบบไว้

(ที่มา : Engineering Vibration)

โดยในสมการ (11) – (13) จะ ใช้โปรแกรม Matlab ในการคำนวณค่าต่างๆออกมาโดยต้องทำการสุ่มค่าความยืดหยุ่นนี้ต้องทำตามกระบวนการดังนี้



รูปที่ 3-16 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความยืดหยุ่น

เมื่อ ค่าวความยืดหยุ่นที่สุ่มแล้วผ่านกระบวนการข้างบนแล้ว ความถี่อยู่ใน ช่วง 1.0 – 4.0 เฮิรตซ์ แล้วทำการ Simulate แล้วเหมาะสม จากนั้นสามารถนำค่าความยืดหยุ่นสปริงค่านี้ไปออกแบบสร้างสปริงใช้งานในระบบช่วงล่างของรถที่ได้ทำการออกแบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การหาขนาดของต่างๆของสปริงจากค่าความยืดหยุ่นที่กำหนดมา

การคำนวณหาขนาดต่างๆของสปริงใช้สูตร

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3n} \quad \text{สำหรับสปริงที่มีขดเป็นรูปทรงกระบอก} \quad (3-16)$$

$$k = \frac{Gd^4(R_2 - R_1)}{16n(R_2^4 - R_1^4)} \quad \text{สำหรับสปริงที่มีขดเป็นรูปทรงกรวย} \quad (3-17)$$

โดยที่  $k$  = ค่าความแข็งตึงของสปริง (กก./มม.)

$G$  = ค่าโมดูลัสเฉือนของเหล็กสปริง = 8000 กก./มม.

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเหล็กสปริง (มม.)

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของสปริง (มม.)  
= (เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอก+เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน) / 2

$R_2$  = รัศมีด้านฐานกรวย (มม.)

$R_1$  = รัศมีด้านบนกรวย (มม.)

$n$  = จำนวนขดทำการของสปริง

$n_t$  = จำนวนขดทั้งหมดของสปริง

โดยค่า  $n$  นั้นขึ้นอยู่กับชนิดปลายสปริง

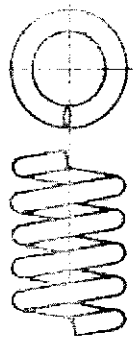
ปลายธรรมดา (Plain ends)	$n = n_t$
ปลายธรรมดาและเจียรไน (Ground end)	$n = n_t - 1.0$
ปลายตรง (Square ends)	$n = n_t - 1.5$
ปลายตรงและเจียรไน	$n = n_t - 2.0$

(ที่มา: จากหนังสือ การออกแบบเครื่องจักรกล MACHINE DESIGN เล่ม 1)



รูปที่ 3-17 ชนิดของขดสปริง

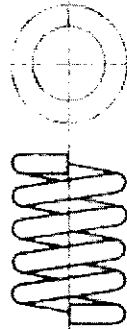
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปลายธรรมดา



ปลายธรรมดาและเจียรไน

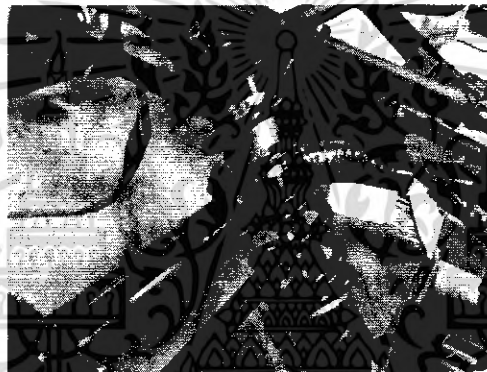


ปลายตรง



ปลายตรงและเจียรไน

รูปที่ 3-18 ชนิดของปลายสปริง

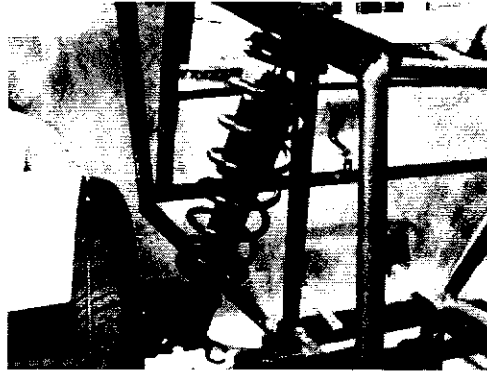


รูปที่ 3-19 สปริงด้านหน้ารูปที่-20

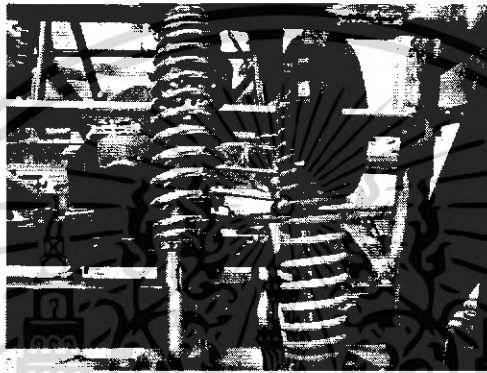


รูปที่ 3-20 สปริงด้านหลังรูปที่-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-21 สปริงด้านหน้ารถไฟฟ้า



รูปที่ 3-22 สปริงด้านหลังรถไฟฟ้า

จากรูปที่ 3-19 ถึง 3-22 สามารถกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของสปริงได้จากการวัดและหาค่าความยืดหยุ่นได้จากสมการ (3-16) หรือ (3-17) แสดงตามตารางที่ 3-5

	รถไฟฟ้า			รถอี-20	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง 1*	ด้านหลัง 2*	ด้านหน้า	ด้านหลัง
d	10.7	7.3	6.1	8.8	7.5
D	91.6	49	36.6	68	54
$n_t$	7	15	13	7	10
n	7	14	12	6	9
$R_1$	-	20	-	27.45	25
$R_2$	-	24.5	-	34	27
k (กก./มม.)	3.017	2.27	2.35	4.25	2.496
k (นิวตัน/มม.)	29.6	22.26	23.05	41.69	24.49

ตารางที่ 3-5 ค่าต่างๆในการหาค่าความยืดหยุ่น

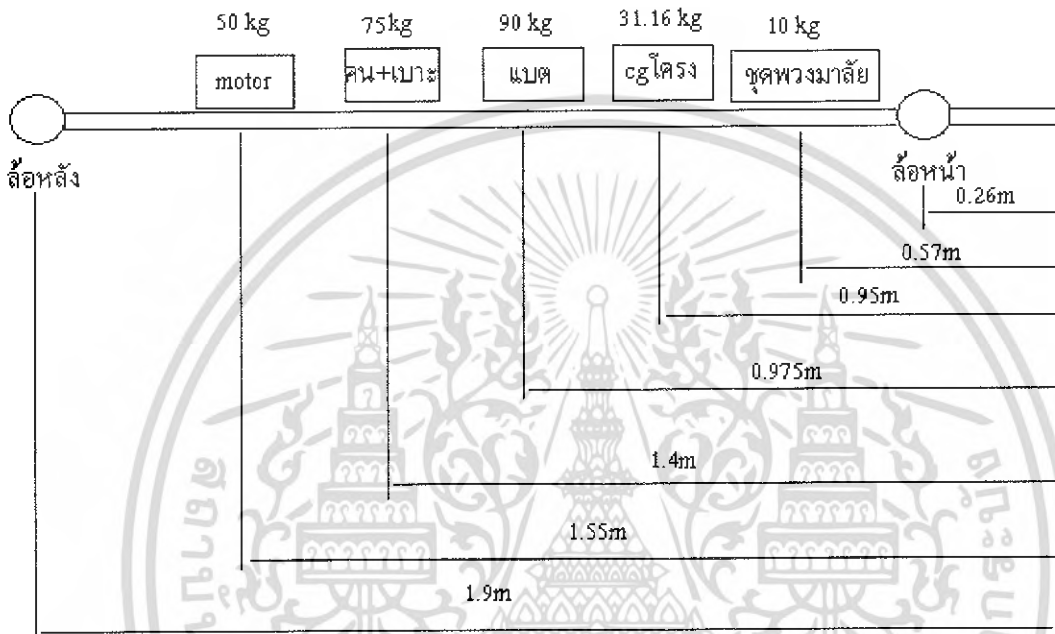
\*หมายเหตุ ด้านหลัง 1 หมายถึงสปริงสี่เหลี่ยมในรูปที่ 22 และ ด้านหลัง 2 หมายถึงสปริงสี่ขาในรูปที่ 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 การออกแบบและการวิเคราะห์

### 4.1 การหาค่าความยืดหยุ่นของสปริงของรถไฟฟ้า

รูปแบบตำแหน่งการวางน้ำหนักต่างๆของบนรถไฟฟ้า มีดังนี้



รูปที่ 4-1 ตำแหน่งการวางน้ำหนักของรถไฟฟ้า

จากนั้นทำการหาค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางรวมของน้ำหนักทั้งหมดบน โครงรถ (sprung mass)

สูตร

$$\sum M_{total} = M_1 + M_2 + \dots + M_n \quad (4-1)$$

$M_{total}$  = โมเมนต์รวมของน้ำหนักบน โครงรถ

$M_n$  = โมเมนต์ของน้ำหนักแต่ละชิ้นบน โครงรถ

(ที่มา : จากหนังสือ Mechanical of material 1)

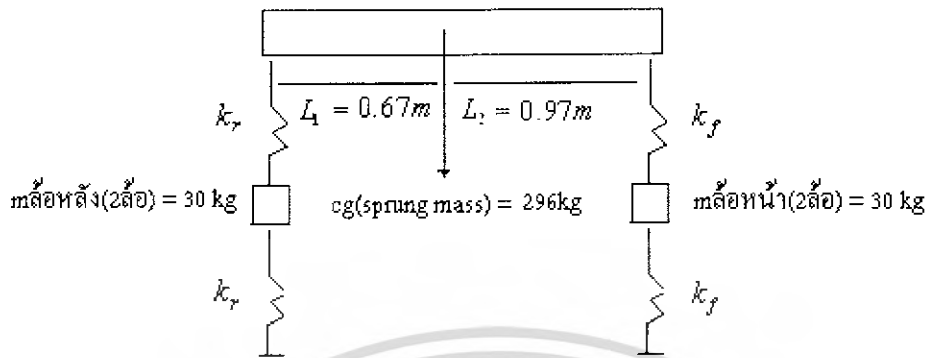
แทนค่าลงใน สมการ (4-1)

$$(296 \text{ กก.})x_{cg} = (10 \text{ กก.})(0.57 \text{ ม.}) + (31 \text{ กก.})(0.95 \text{ ม.}) + (80 \text{ กก.})(0.975 \text{ ม.}) + (125 \text{ กก.})(1.4 \text{ ม.}) + (50 \text{ กก.})(1.55 \text{ ม.})$$

$$x_{cg} = 1.23 \text{ ม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าแห่งของจุดศูนย์ถ่วงรวมของมวลบนโครงรถ (Sprung mass) มาเขียนเป็นแบบจำลอง ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 4-2 แบบจำลองการสั่นแบบระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 4 ของรถไฟฟ้า

จากนั้นนำมวลไปแทนใน เมตริก  $m$  ในสมการที่ (3-9) ได้ดังนี้

$$m = \begin{bmatrix} 296 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 89.04 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$m_{sprung} = 296 \text{ กก.}$$

$$m_{wheel} = 30 \text{ กก. (2 ล้อ)}$$

$$m \frac{L^2}{12} = \frac{(296)(1.9)^2}{12} = 89.04 \text{ กก.ม.}^2$$

$k_{r_t}$  และ  $k_{f_t}$  คือ ค่าความยืดหยุ่นของยางรถ ซึ่งมีค่า 334000 นิวตัน/มม. (2ล้อ)

จากนั้นทำการ สุ่มค่าความยืดหยุ่นของสปริงทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยค่าความยืดหยุ่นแต่ละด้านนั้น คือ ค่าความยืดหยุ่น 2 ข้าง ซ้ายและขวา มาต่อรวมกันแบบขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบจำลองระบบช่วงล่างเป็นดังรูป

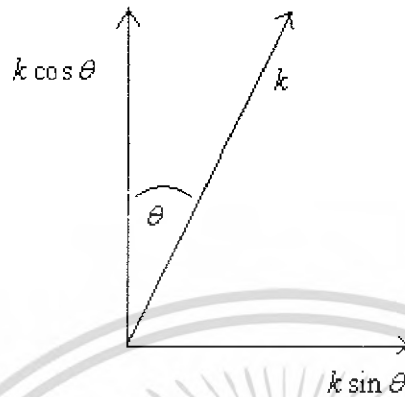


รูปที่ 4-3 แบบจำลองระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า

รูปที่ 4-4 แบบจำลองระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสุ่มค่าความยืดหยุ่นนั้นจำเป็นจะต้องใช้เท่ากับ 30 นิวตัน/มม. แทนลงใน  $[k]$  ในสมการ (3-9) เพราะว่าการวางตัวของสปริงในแบบจำลอง ของระบบช่วงล่างแบบระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 4 ในภาพ นั้นการวางสปริงเป็นการวางแบบแนวตั้ง



รูปที่ 4-5 มุมการวางตัวของสปริงของรถไฟฟ้า

**ครั้งแรก** ทำการสุ่มค่าความยืดหยุ่นของสปริง ดังนี้

**ด้านหน้า**

ค่าความยืดหยุ่นของสปริงของด้านหน้า ข้างละ 10 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 20 นิวตัน/มม.

$$k = 20 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 20^\circ = 18.793 \text{ นิวตัน/มม.} = 18793 \text{ นิวตัน/ม.} = k_F$$

**ด้านหลัง**

ค่าความยืดหยุ่นของสปริงของด้านหลัง ข้างละ 15 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 30 นิวตัน/มม.

$$k = 30 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 30^\circ = 25.98 \text{ นิวตัน/มม.} = 25980 \text{ นิวตัน/ม.} = k_F$$

ทำการแทนค่า  $= k_F$  และ  $= k_F$  ลงใน  $[k]$

$$[k] = 1.0 - 4.0 \text{ เฮิร์ตซ์}$$

จากนั้นทำการหาค่า  $[\tilde{k}]$  ในสมการ (3-10) แล้วทำการหาค่าของ  $\lambda$  ในสมการ (3-13) โดยการใช้โปรแกรม Matlab ในการคำนวณ ดังแสดงวิธีการเขียนดังนี้

To get started, select "MATLAB Help" from the Help menu.

ทำการใส่ค่า  $m$  โดยใส่ค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
>> m = [ 296 0 0 0;
         0 30 0 0;
         0 0 30 0;
         0 0 0 89.04 ]
```

จากนั้น กด Enter

m =

```
296.0000    0    0    0
    0 30.0000    0    0
    0    0 30.0000    0
    0    0    0 89.0400
```

ทำการใส่ค่าความยืดหยุ่นโดยใส่ค่าดังข้างล่าง

```
>> k = [44773 -25980 -18793 822.61;
        -25980 359980 0 17406.6;
        -18793 0 352793 -18229.21;
        -7187 25980 -18793 35635.81]
```

จากนั้น กด Enter

k =

1.0e+005 \*

```
0.4477 -0.2598 -0.1879 0.0082
-0.2598 3.5998    0 0.1741
-0.1879    0 3.5279 -0.1823
-0.0719 0.2598 -0.1879 0.3564
```

จากนั้นคือการคำนวณหา ค่า  $[\tilde{k}]$  โดยในที่นี้จะแทน  $[\tilde{k}]$  ด้วย kap แล้วทำการใส่ค่าดังด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
>> kap = m^(-1/2)*k*m^(-1/2)
```

```
kap =
```

```
1.0e+004 *
```

```
0.0151 -0.0276 -0.0199 0.0005
```

```
-0.0276 1.1999 0 0.0337
```

```
-0.0199 0 1.1760 -0.0353
```

```
-0.0044 0.0503 -0.0364 0.0400
```

แล้วหาค่า  $\lambda$  โดยในที่นี้จะแทน  $\lambda$  ด้วย lam

```
>> lam = eig(kap)
```

```
lam =
```

```
1.0e+004 *
```

```
0.0143
```

```
0.0373
```

```
1.2021
```

```
1.1774
```

$$\lambda = \begin{bmatrix} 143 \\ 373 \\ 12021 \\ 11774 \end{bmatrix} \text{ โดย } \omega^2_{n_1} = 143, \omega_{n_1} = 11.95 \text{ เรเดียนวินาที}$$

จากนั้นแทนค่า  $\omega_{n_1}$  ใน (3-13)

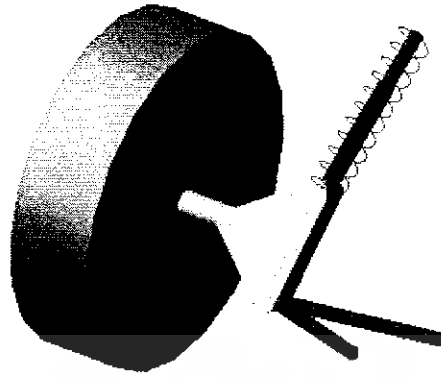
$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad k = 1.903 \text{ เฮิร์ตซ์ อยู่ในช่วง } 1.0 - 4.0 \text{ เฮิร์ตซ์ สามารถใช้ได้}$$

จากนั้นทำการ Simulate คูณการยุบของสปริงในโปรแกรม MSC.ADAMS ซึ่งสามารถดูวิธีการทำ

ได้ในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหน้า



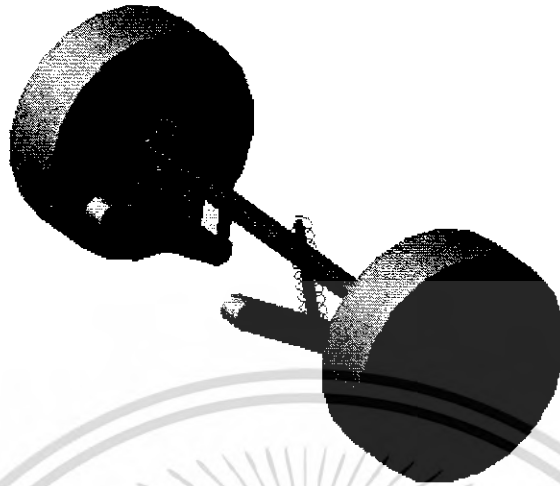
รูปที่ 4-6 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 1



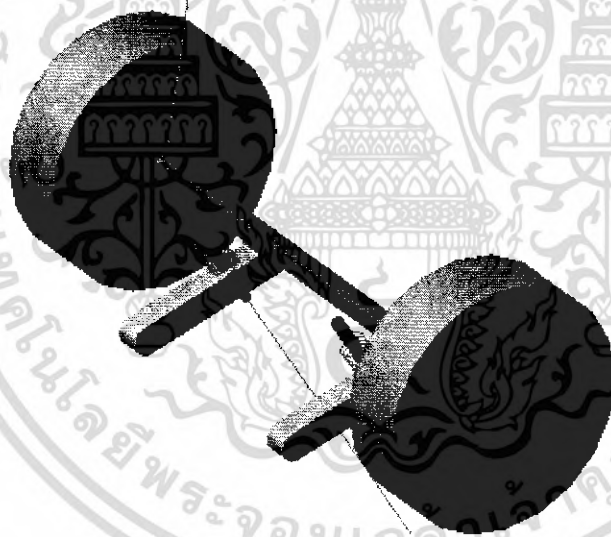
รูปที่ 4-7 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 4-8 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 1



รูปที่ 4-9 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1

จากการทำ Simulation จะเห็นได้ว่า **สปริงมีการยุบตัวที่มากเกินไปกว่าค่าที่ยอมรับได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง** แสดงว่า การสูบลมความยืดหยุ่นนั้น น้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ครั้งที่สอง** ทำการหาค่าความยืดหยุ่นสปริงโดยเพิ่มค่าจากครั้งแรก ดังนี้

### ด้านหน้า

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหน้า ข้างละ 20 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 40 นิวตัน/มม.

$$k = 40 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 20^\circ = 37.587 \text{ นิวตัน/มม.} = 37587 \text{ นิวตัน/ม.} = k_F$$

### ด้านหลัง

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหลัง ข้างละ 30 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 60 นิวตัน/มม.

$$k = 60 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 30^\circ = 51.961 \text{ นิวตัน/มม.} = 51691 \text{ นิวตัน/ม.} = k_T$$

ทำการแทนค่า  $= k_F$  และ  $= k_T$  ลงใน  $[k]$

$$[k] = \begin{bmatrix} 89548 & -51961 & -37587 & 1645.5 \\ -51961 & 385961 & 0 & 34813.8 \\ -37587 & 0 & 371587 & 36459 \\ -14374 & 51961 & -37578 & 71273.2 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการหาค่า  $[\tilde{k}]$  ในสมการ (3-10) แล้วทำการหาค่าของ  $\lambda$  ในสมการ (3-13) โดยการใช้โปรแกรม Matlab แบบตัวอย่างครั้งแรก

$$[\tilde{k}] = [m]^{-1/2} [k] [m]^{-1/2}$$

$$[\tilde{k}] = \begin{bmatrix} 303 & -551 & -399 & 10 \\ -551 & 12865 & 0 & 674 \\ -399 & 0 & 12386 & 705 \\ -89 & 1005 & -727 & 800 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \text{eig}[\tilde{k}], \lambda = \begin{bmatrix} 274 \\ 780 \\ 12942 \\ 12358 \end{bmatrix} \quad \omega_{n_1}^2 = 274, \omega_{n_1} = 16.55 \text{ ไร่เดียน/วินาที}$$

จากนั้นแทนค่า  $\omega_{n_1}$  ใน (3-13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{16.55}{2\pi} = 2.63 \text{ เฮิรตซ์} \text{ อยู่ในช่วง } 1.0 - 4.0 \text{ เฮิรตซ์} \text{ สามารถใช้ได้}$$

จากนั้นทำการ Simulate คูการเสียหายของสปริงใน โปรแกรม MSC.ADAMS  
ซึ่งสามารถดูวิธีการทำได้ในบทที่ 5

### ระบบช่วงล่างด้านหน้า

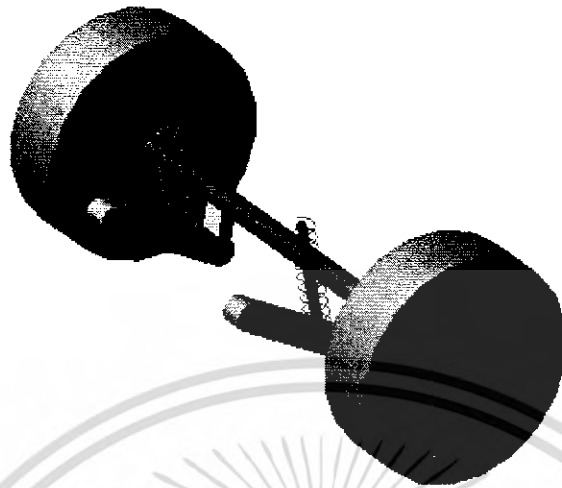


รูปที่ 4-10 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 2

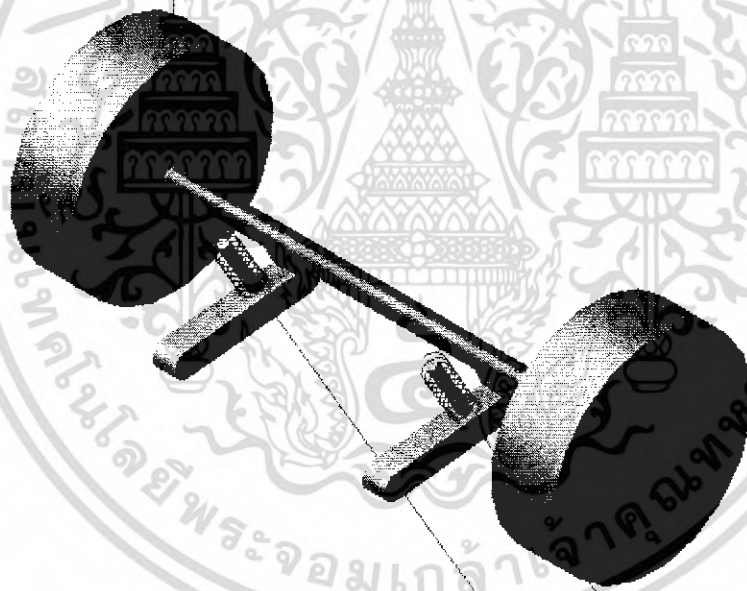
รูปที่ 4-11 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 4-12 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 2



รูปที่ 4-13 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 2

จากการทำ Simulation จะเห็นได้ว่า **สปริงมีการยุบตัวที่มากเกินไปกว่าค่าที่ยอมรับได้ทั้งด้านหน้า และด้านหลัง** แสดงว่า การสุ่มค่าความยืดหยุ่นนั้น น้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ครั้งที่สาม** ทำการหาค่าความยืดหยุ่นสปริงโดยเพิ่มค่าจากครั้งที่สอง ดังนี้

### ด้านหน้า

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหน้า ข้างละ 30 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 60 นิวตัน/มม.

$$k = 60 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 20^\circ = 56.381 \text{ นิวตัน/มม.} = 56381 \text{ นิวตัน/ม.} = k_F$$

### ด้านหลัง

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหลัง ข้างละ 45 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 90 นิวตัน/มม.

$$k = 90 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 30^\circ = 77.942 \text{ นิวตัน/มม.} = 77942 \text{ นิวตัน/ม.} = k_F$$

ทำการแทนค่า  $k_F$  และ  $k_R$  ลงใน  $[k]$

$$[k] = \begin{bmatrix} 134323 & -77942 & -56381 & 2468.43 \\ -77942 & 411942 & 0 & 52221.14 \\ -56381 & 0 & 390381 & -54689.57 \\ -21561 & 77942 & -56381 & 106910.7 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการหาค่า  $[\tilde{k}]$  ในสมการ (3-10) แล้วทำการหาค่าของ  $\lambda$  ในสมการ (3-13) โดยใช้โปรแกรม Matlab แบบตัวอย่างครั้งแรก

$$[\tilde{k}] = [m]^{-1/2} [k] [m]^{-1/2}$$

$$[\tilde{k}] = \begin{bmatrix} 454 & -827 & -598 & 15 \\ -827 & 13731 & 0 & 1010 \\ -598 & 0 & 13013 & -1058 \\ -133 & 1508 & -1091 & 1201 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \text{eig}[\tilde{k}], \lambda = \begin{bmatrix} 378 \\ 981 \\ 13908 \\ 13131 \end{bmatrix} \omega_{n1}^2 = 378, \omega_{n1} = 19.44 \text{ เรเดียน/วินาที}$$

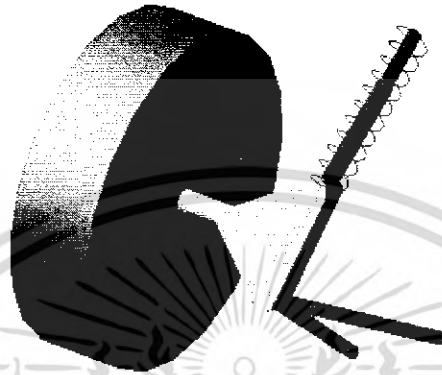
จากนั้นแทนค่า  $\omega_{n1}$  ใน (3-13)

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{19.44}{2\pi} = 3.09 \text{ เฮิรตซ์ อยู่ในช่วง 1.0 - 4.0 เฮิรตซ์ สามารถใช้ได้}$$

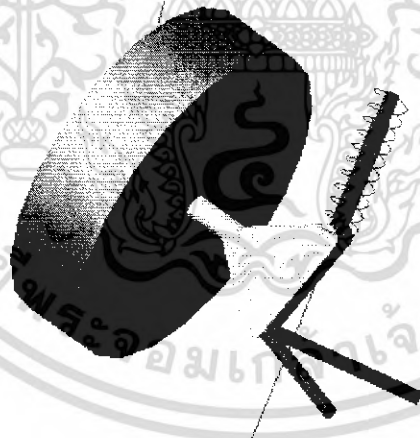
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการ Simulation ดูการเสียหายของสปริงในโปรแกรม MSC.ADAMSซึ่งสามารถดูวิธีการทำได้ในบทที่ 5

### **ระบบช่วงล่างด้านหน้า**



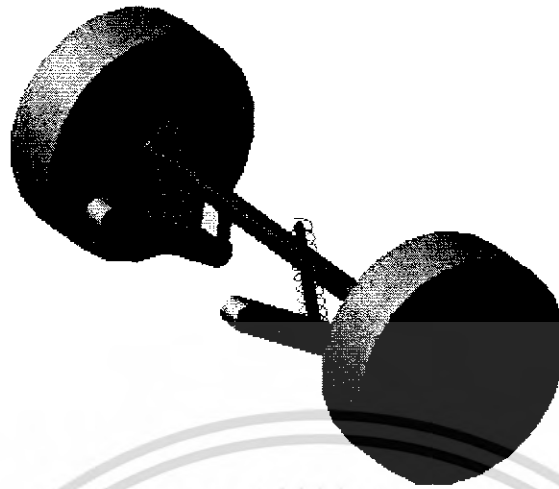
รูปที่ 4-14 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 3



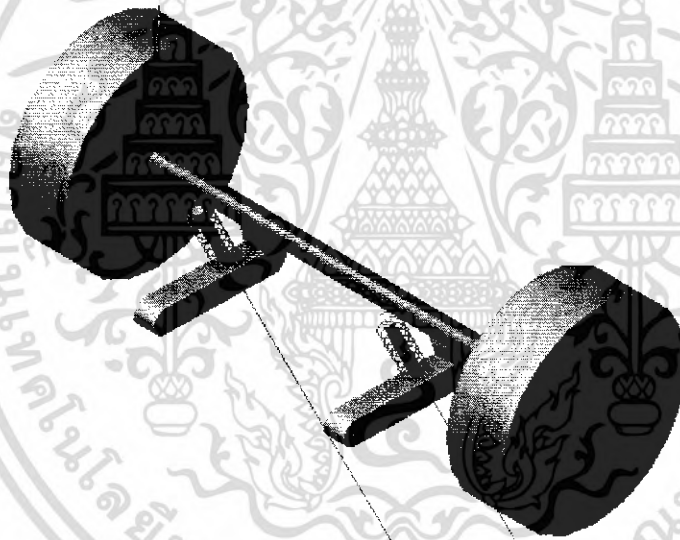
รูปที่ 4-15 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 4-16 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 3



รูปที่ 4-17 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลัง การทำ Simulation ครั้งที่ 3

จากการ Simulate จะเห็นได้ว่า **สปริงมีการยุบตัวที่ยอมรับได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง** แสดงว่าการสูบลำความยืดหยุ่นนั้น สามารถนำไปใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ครั้งที่สี่** ทำการหาค่าความยืดหยุ่นสปริงโดยเพิ่มค่าจากครั้งที่สาม ดังนี้

### ด้านหน้า

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหน้า ข้างละ 40 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 80 นิวตัน/มม.

$$k = 80 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 20^\circ = 75.175 \text{ นิวตัน/มม.} = 75175 \text{ นิวตัน/ม.} = k_f$$

### ด้านหลัง

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหลัง ข้างละ 60 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 120 นิวตัน/มม.

$$k = 120 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 30^\circ = 103.923 \text{ นิวตัน/มม.} = 103923 \text{ นิวตัน/ม.} = k_r$$

ทำการแทนค่า  $k_f$  และ  $k_r$  ลงใน  $[k]$

$$[k] = \begin{bmatrix} 179098 & -103923 & -75175 & 3291.34 \\ -103923 & 437923 & 0 & 69628.41 \\ -75175 & 0 & 409175 & -72919.75 \\ -28748 & 103923 & -75175 & 142548 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการหาค่า  $[\tilde{k}]$  ในสมการ (3-10) แล้วทำการหาค่าของ  $\lambda$  ในสมการ (3-13) โดยการใช้โปรแกรม Matlab แบบตัวอย่างครั้งแรก

$$[\tilde{k}] = [m]^{-1/2} [k] [m]^{1/2}$$

$$[\tilde{k}] = \begin{bmatrix} 605 & -1103 & -798 & 20 \\ -1103 & 14597 & 0 & 1347 \\ -798 & 0 & 13639 & -1411 \\ -177 & 2011 & -1455 & 1601 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \text{eig}[\tilde{k}], \lambda = \begin{bmatrix} 476 \\ 1227 \\ 14900 \\ 13839 \end{bmatrix} \quad \omega_{n_1}^2 = 476, \omega_{n_1} = 21.81 \text{ ไร่เคียน/วินาที}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นแทนค่า  $\omega_{n_1}$  ใน (3-13)

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{21.81}{2\pi} = 3.47 \text{ เฮิร์ตซ์ อยู่ในช่วง } 1.0 - 4.0 \text{ เฮิร์ตซ์ สามารถใช้ได้}$$

จากนั้นทำการ Simulation ดูการเสียหายของสปริงในโปรแกรม MSC.ADAMS ซึ่งสามารถดูวิธีการทำได้ในบทที่ 5

### ระบบช่วงล่างค้ำหน้า

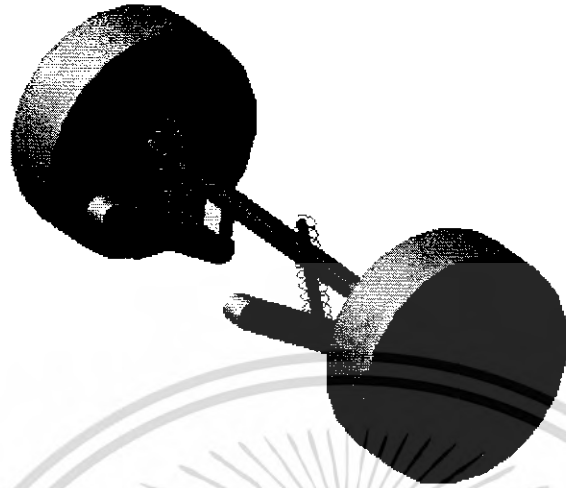


รูปที่ 4-18 ระบบช่วงล่างค้ำหน้าของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 4

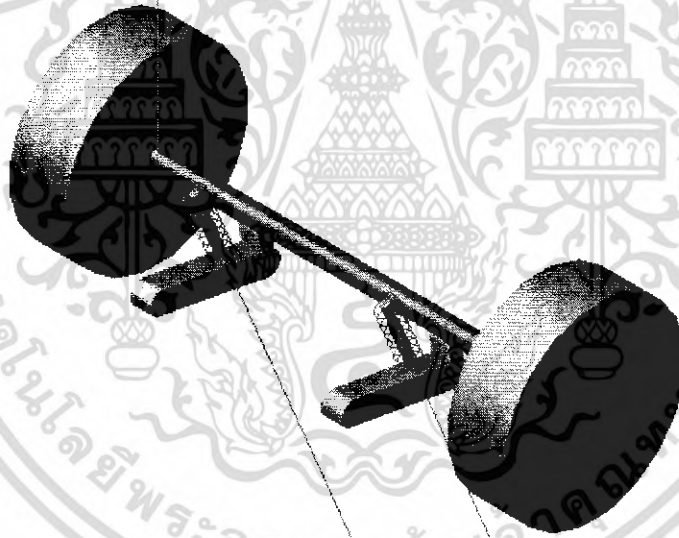
รูปที่ 4-19 ระบบช่วงล่างค้ำหน้าของรถไฟฟ้า หลัง การทำ Simulation ครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 4-20 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 4



รูปที่ 4-21 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 4

จากการ Simulate จะเห็นได้ว่า **สปริงแข็งเกินไปหรือเกิดการยุบตัวน้อยมาก** ทั้งช่วงล่างด้านหน้า และด้านหลัง แสดงว่า การสุมค่าความยืดหยุ่นนั้นไม่สามารถนำไปใช้ได้เพราะรถจะไม่เกิดความนุ่มนวล

ตารางการสุมค่าของ  $k_f$  และ  $k_r$  เพื่อดูความถี่ธรรมชาติของรถ และ แบบจำลองการยุบตัวของ สปริงในโปรแกรม MSC.ADAMS View ของรถไฟฟ้าสามารถสรุปรวมได้ตามตารางที่ 4-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

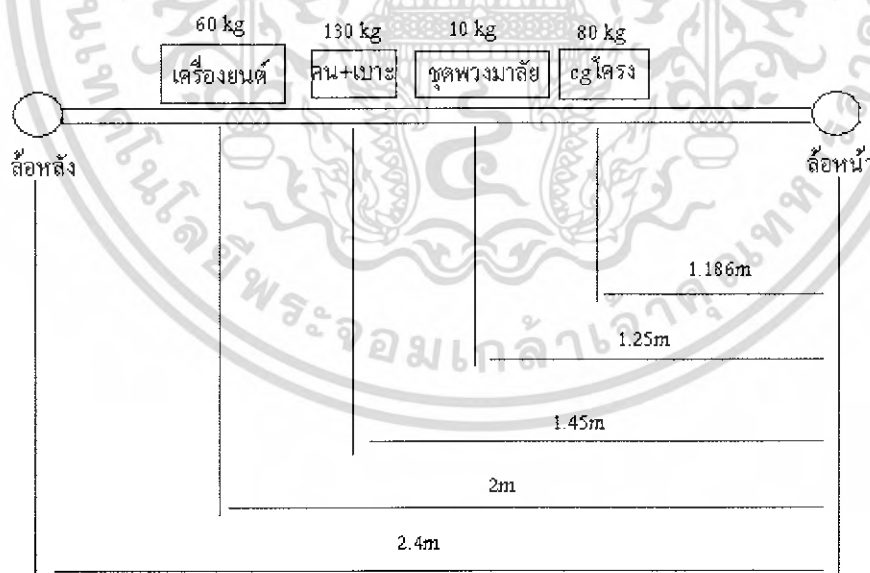
ลำดับการสุมครั้งที่	สุม $k_f$ และ $k_r$	ความถี่ธรรมชาติของรถ (เฮิรตซ์)	การยุบตัวของสปริงใน โปรแกรม ADAMS
1	10 นิวตัน/มม. 15 นิวตัน/มม.	1.903 เฮิรตซ์	การยุบตัวของสปริงมากจน เกิดความเสียหาย
2	20 นิวตัน/มม. 30 นิวตัน/มม.	2.63 เฮิรตซ์	การยุบตัวของสปริงมากจน เกิดความเสียหาย
3	30 นิวตัน/มม. 45 นิวตัน/มม.	3.09 เฮิรตซ์	การยุบตัวของสปริงอยู่ ในช่วงที่สามารถรับได้
4	40 นิวตัน/มม. 60 นิวตัน/มม.	3.47 เฮิรตซ์	การยุบตัวของสปริง น้อยมาก(สปริงแข็ง)

ตารางที่ 4-1 ผลของการ Simulate ค่าความยืดหยุ่นในรถไฟฟ้า

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า  $k_f$  และ  $k_r$  เท่ากับ 30 นิวตัน/มม. และ 45 นิวตัน/มม. ในการสร้างสปริงเพื่อใช้กับระบบช่วงล่างของรถไฟฟ้า

#### 4.2 การออกแบบค่าความยืดหยุ่นของสปริงของรถอี-20

รูปแบบตำแหน่งการวางน้ำหนักต่างๆของบนรถอี-20 แสดงได้ดังรูปที่ 4-22



รูปที่ 4-22 ตำแหน่งการวางน้ำหนักของรถอี-20

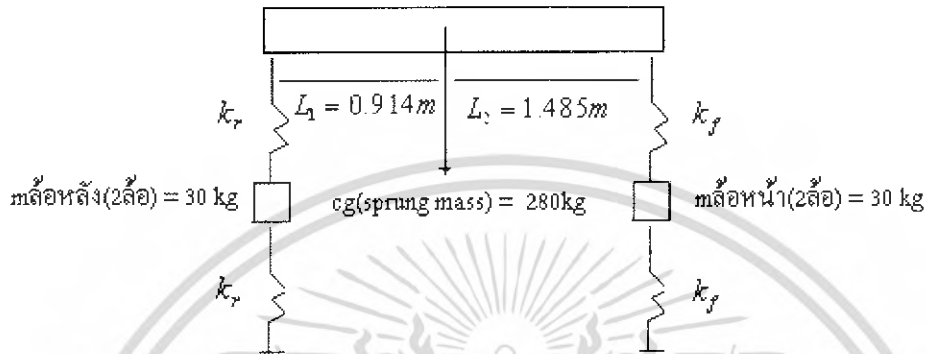
จากนั้นทำการหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลรวมของน้ำหนักทั้งหมดบน โครรงรถ (Sprung mass) แทนค่าลงในสมการ (3-18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(280 \text{ กก.})x_{cg} = (80 \text{ กก.})(1.186 \text{ ม.}) + (10 \text{ กก.})(1.25 \text{ ม.}) + (130 \text{ กก.})(1.45 \text{ ม.}) + (60 \text{ กก.})(2 \text{ ม.})$$

$$x_{cg} = 1.485 \text{ เมตร}$$

จากนั้นนำตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลรวมของมวลบนโครงรถ (Sprung mass) มาเขียนเป็นแบบจำลองการสั่นอิสระแบบระดับความเร็วเท่ากับ 4 ได้ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 4-23 แบบจำลองการสั่นแบบระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 4 ของรถอี-20

โดย  $k_r$  และ  $k_f$  คือ ค่าความยืดหยุ่นของยางรถ ซึ่งมีค่า 334000 นิวตัน/มม. (2ล้อ)

จากนั้นนำมวลไปแทนใน เมตริก  $m$  ในสมการที่ (3-9)

ได้ดังนี้

$$m = \begin{bmatrix} 280 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 224.233 \end{bmatrix}$$

โดย  $m_{sprung} = 296 \text{ กก.}$

$$m_{wheel} = 30 \text{ กก. ( 2 ล้อ)}$$

$$m \frac{L^2}{12} = \frac{(280)(3.1)^2}{12} = 224.233 \text{ กก.-ม}^2$$

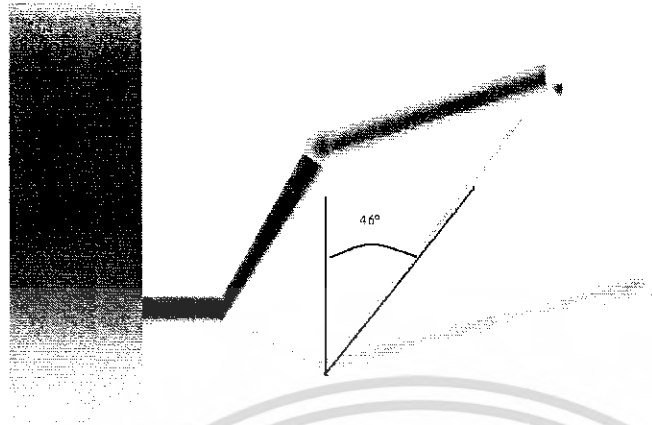
$k_r$  และ  $k_f$  คือ ค่าของยางรถ ซึ่งมีค่า 334000 นิวตัน/มม. (2ล้อ)

จากนั้นทำการ คู่มค่าความยืดหยุ่นของ สปริงทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยค่าความยืดหยุ่นแต่ละด้านนั้น

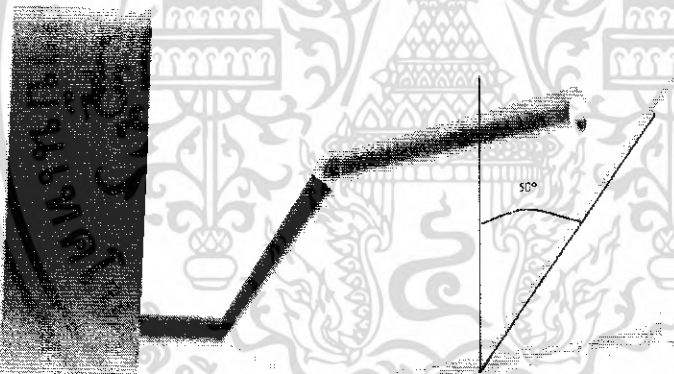
คือ ค่าความยืดหยุ่น 2 ข้าง ซ้ายและขวา มาต่อแบบขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบจำลองระบบช่วงล่างเป็นคังรูป



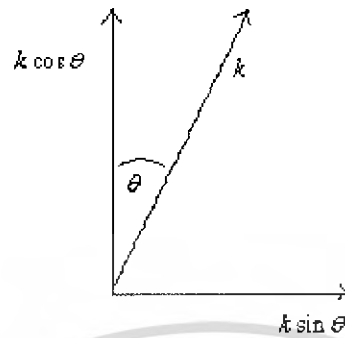
รูปที่ 4-24 แบบจำลองระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20



รูปที่ 4-25 แบบจำลองระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าความยืดหยุ่นนั้นต้องใช้  $k \cos \theta$  แทนลงใน  $[k]$  ในสมการ (3-11) เพราะว่าการวางตัวของสปริงในแบบจำลอง ของระบบช่วงล่างแบบระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 4 ในภาพนั้นการวางสปริงเป็นการวางแบบแนวตั้ง สปริง ดังนี้



รูปที่ 4-26 มุมการวางตัวของสปริงของรถอี-20

### ด้านหน้า

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหน้า ข้างละ 20 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 40 นิวตัน/มม.

$$k = 40 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 46^\circ = 27.786 \text{ นิวตัน/มม.} = 27786 \text{ นิวตัน/เมตร} = k_f$$

### ด้านหลัง

ค่าความแข็งสปริงของด้านหลัง ข้างละ 30 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 60 นิวตัน/มม.

$$k = 60 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 50^\circ = 38.567 \text{ นิวตัน/มม.} = 38567 \text{ นิวตัน/เมตร} = k_r$$

ทำการแทนค่า  $k_f$  และ  $k_r$  ลงใน  $[k]$

$$[k] = \begin{bmatrix} 66353 & -38567 & -27786 & 6011.97 \\ -38567 & 372567 & 0 & 35250.23 \\ -27786 & 0 & 361786 & -41262.21 \\ -10781 & 38567 & -27786 & 76512.44 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการหาค่า  $[\tilde{k}]$  ในสมการ (3-10) แล้วทำการหาค่าของ  $\mathcal{L}$  ในสมการ (3-13) โดยการใช้โปรแกรม

Matlab แบบบรรทัดไฟฟ้

$$[\tilde{k}] = [m]^{-1/2} [k] [m]^{-1/2}$$

$$[\tilde{k}] = \begin{bmatrix} 237 & -421 & -303 & 24 \\ -421 & 12419 & 0 & 430 \\ -303 & 0 & 12060 & -503 \\ -43 & 470 & -339 & 341 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = \text{eig}[\tilde{k}], \lambda = \begin{bmatrix} 226 \\ 299 \\ 12450 \\ 12082 \end{bmatrix} \quad \omega^2_{n_1} = 226, \omega_{n_1} = 15.033 \text{ วัตต์/วินาที}$$

จากนั้นแทนค่า  $\omega_{n_1}$  ใน (3-13)

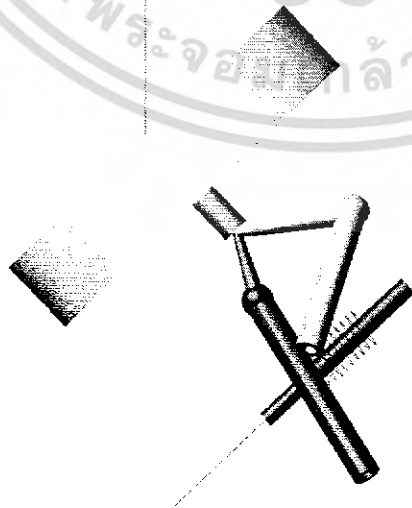
$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{15.033}{2\pi} = 2.39 \text{ เฮิรตซ์ อยู่ในช่วง 1.0-4.0 เฮิรตซ์ สามารถใช้ได้}$$

จากนั้นทำการ Simulate การเสียหายของสปริงในโปรแกรม MSC.ADAMS ซึ่งสามารถดูวิธีการทำได้ในบทที่ 5

### ระบบช่วงล่างด้านหน้า

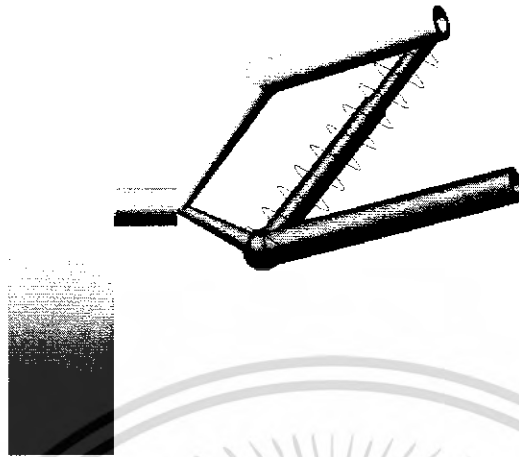


รูปที่ 4-27 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 1



รูปที่ 4-28 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 1  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 4-29 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 ก่อนทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1



รูปที่ 4-30 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 หลังทำการทำ Simulation ครั้งที่ 1

จากการทำ Simulation จะเห็นได้ว่า **สปริงมีการยุบตัวที่มากเกินไปเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้**ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แสดงว่า การสูบล้อความยืดหยุ่นนั้น น้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ครั้งที่สอง** ทำการหาค่าความยืดหยุ่นสปริงโดยเพิ่มค่าจากครั้งแรก ดังนี้

**ด้านหน้า**

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหน้า ข้างละ 30 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 60 นิวตัน/มม.

$$k = 60 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 46^\circ = 41.679 \text{ นิวตัน/มม.} = 41679 \text{ นิวตัน/มม.} = k_f$$

**ด้านหลัง**

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหลัง ข้างละ 40 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 80 นิวตัน/มม.

$$k = 80 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 50^\circ = 51.423 \text{ นิวตัน/มม.} = 51423 \text{ นิวตัน/มม.} = k_r$$

ทำการแทนค่า  $k_f$  และ  $k_r$  ลงใน  $[k]$

$$[k] = \begin{bmatrix} 93102 & -51423 & -41679 & 14892.693 \\ -51423 & 385423 & 0 & 47000.62 \\ -41679 & 0 & 375679 & -61893.31 \\ -9744 & 51423 & -41679 & 108893.93 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการหาค่า  $[\tilde{k}]$  ในสมการ (3-10) แล้วทำการหาค่าของ  $\lambda$  ในสมการ (3-13) โดยการใช้โปรแกรม

Matlab แบบตัวอย่างครั้งแรก

$$[\tilde{k}] = [m]^{-1/2} [k] [m]^{-1/2}$$

$$[\tilde{k}] = \begin{bmatrix} 333 & -561 & -455 & 59 \\ -561 & 12847 & 0 & 573 \\ -455 & 0 & 12523 & -755 \\ -39 & 627 & -508 & 486 \end{bmatrix}$$

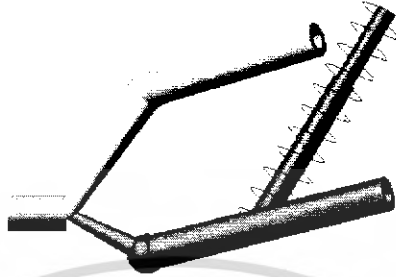
$$\lambda = \text{eig}[\tilde{k}], \lambda = \begin{bmatrix} 304 \\ 411 \\ 12902 \\ 12571 \end{bmatrix} \quad \omega^2_{n_1} = 304, \omega_{n_1} = 17.43 \text{ วินาที}$$

จากนั้นแทนค่า  $\omega_{n_1}$  ใน (3-13)

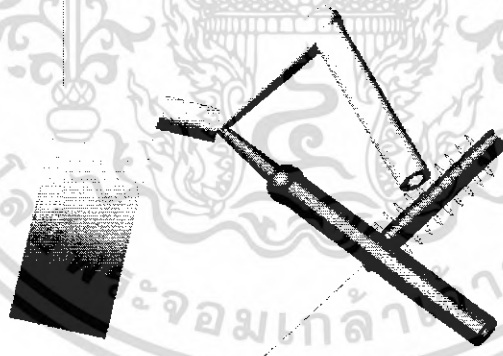
$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{17.43}{2\pi} = 2.77 \text{ เฮิร์ตซ์ อยู่ในช่วง 1.0-4.0 เฮิร์ตซ์ สามารถใช้ได้}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการ Simulation ดูการเสียหายของสปริงในโปรแกรม MSC.ADAMSซึ่งสามารถดู  
 วิธีการทำได้ในบทที่ 5  
**ระบบช่วงล่างด้านหน้า**



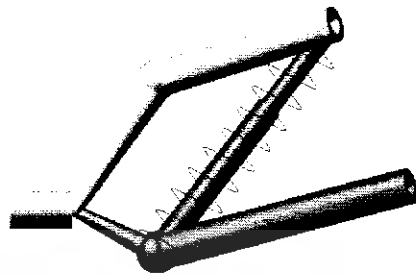
รูปที่ 4-31 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 2



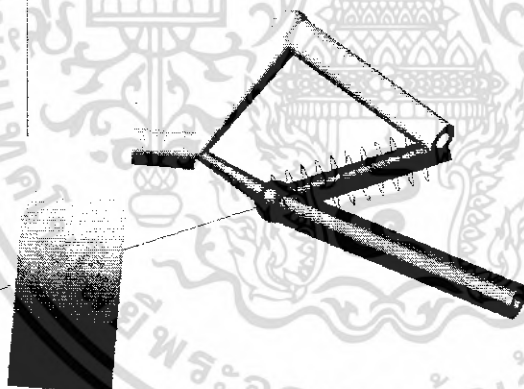
รูปที่ 4-32 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 4-33 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 ก่อนการทำ Simulate ครั้งที่ 2



รูปที่ 4-34 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulate ครั้งที่ 2

จากการทำ Simulation จะเห็นได้ว่า **สปริงมีการยุบตัวที่มากเกินไปกว่าค่าที่ยอมรับได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แสดงว่า การสู่มค่าความยืดหยุ่นนั้น น้อยเกินไป**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ครั้งที่สาม** ทำการหาค่าความยืดหยุ่นสปริงโดยเพิ่มค่าจากครั้งแรก ดังนี้

### ด้านหน้า

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหน้า ข้างละ 40 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 80 นิวตัน/มม.

$$k = 80 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 46^\circ = 55.572 \text{ นิวตัน/มม.} = k_f$$

### ด้านหลัง

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหลัง ข้างละ 50 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 100 นิวตัน/มม.

$$k = 100 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 50^\circ = 64.278 \text{ นิวตัน/มม.} = 64278 \text{ นิวตัน/ม.} = k_r$$

ทำการแทนค่า  $k_f$  และ  $k_r$  ลงใน  $[k]$

$$[k] = \begin{bmatrix} 11985 & -64278 & -55572 & 23774.32 \\ -64278 & 398278 & 0 & 58750.09 \\ -55572 & 0 & 389572 & -82524.42 \\ -8706 & 64278 & -55572 & 141274.51 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการหาค่า  $[\tilde{k}]$  ในสมการ (3-12) แล้วทำการหาค่าของ  $\lambda$  ในสมการ (3-13) โดยการ  
ใช้โปรแกรม  
Matlab แบบตัวอย่างครั้งแรก

$$[\tilde{k}] = [m]^{-1/2} [k] [m]^{-1/2}$$

$$[\tilde{k}] = \begin{bmatrix} 428 & -701 & -606 & 95 \\ 701 & 13276 & 0 & 716 \\ -606 & 0 & 12986 & -1006 \\ -35 & 784 & -678 & 630 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \text{eig}[\tilde{k}], \lambda = \begin{bmatrix} 374 \\ 518 \\ 13358 \\ 13069 \end{bmatrix} \quad \omega^2_{n_1} = 374, \omega_{n_1} = 19.33 \text{ เรเดียน/วินาที}$$

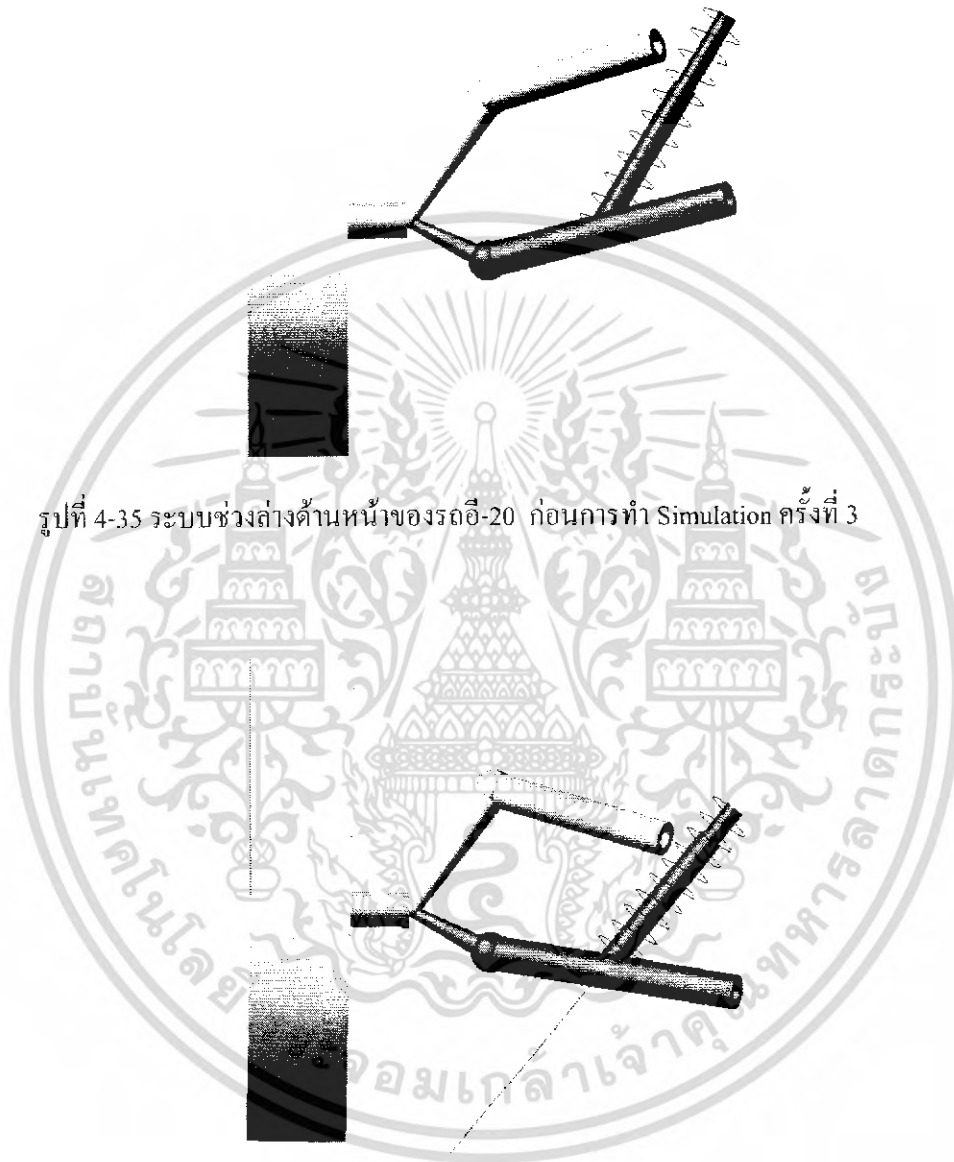
จากนั้นแทนค่า  $\omega_{n_1}$  ใน (3-15)

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{19.33}{2\pi} = 3.07 \text{ เฮิร์ตซ์ อยู่ในช่วง } 1.0 - 4.0 \text{ เฮิร์ตซ์ สามารถใช้ได้}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการ Simulate ดูการเสียหายของสปริงในโปรแกรม MSC.ADAMS ซึ่งสามารถดูวิธีการทำได้ในบทที่ 5

### ระบบช่วงล่างด้านหน้า

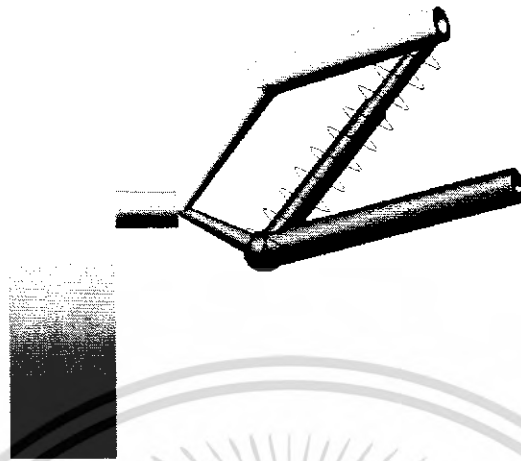


รูปที่ 4-35 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 3

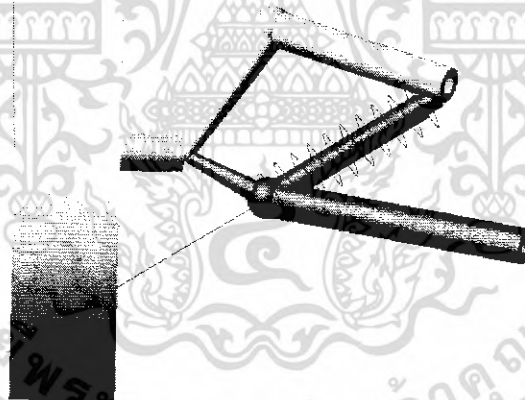
รูปที่ 4-36 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 4-37 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 3



รูปที่ 4-38 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 3

จากการ Simulate จะเห็นได้ว่า **สปริงมีการยุบตัวที่ยอมรับได้**ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แสดงว่าการสูบล้อความยืดหยุ่นนั้น สามารถนำไปใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ครั้งที่** ทำการหาค่าความยืดหยุ่นสปริงโดยเพิ่มค่าจากครั้งแรก ดังนี้

### ด้านหน้า

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหน้าข้างละ 50 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 100 นิวตัน/มม.

$$k = 100 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 46^\circ = 69.465 \text{ นิวตัน/มม.} = 69465 \text{ นิวตัน/ม.} = k_f$$

### ด้านหลัง

ค่าความยืดหยุ่นสปริงของด้านหลังข้างละ 60 นิวตัน/มม. ดังนั้น 2 ข้าง เท่ากับ 120 นิวตัน/มม.

$$k = 120 \text{ นิวตัน/มม. และ } k \cos 50^\circ = 77.134 \text{ นิวตัน/มม.} = 77134 \text{ นิวตัน/ม.} = k_r$$

ทำการแทนค่า  $k_f$  และ  $k_r$  ลงใน  $[k]$

$$[k] = \begin{bmatrix} 146599 & -77134 & -69465 & 32655.04 \\ -77134 & 411134 & 0 & 70500.46 \\ -69465 & 0 & 403465 & -103155.52 \\ -7669 & 77134 & -69465 & 173656 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการหาค่า  $[\tilde{k}]$  ในสมการ (3-12) แล้วทำการหาค่าของ  $\lambda$  ในสมการ (3-13) โดยการใช้โปรแกรม Matlab แบบตัวอย่างครั้งแรก

$$[\tilde{k}] = [m]^{-1/2} [k] [m]^{-1/2}$$

$$[\tilde{k}] = \begin{bmatrix} 524 & -842 & -758 & 130 \\ -842 & 13704 & 0 & 860 \\ -758 & 0 & 13449 & -1258 \\ -31 & 940 & -847 & 774 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \text{eig}[\tilde{k}], \lambda = \begin{bmatrix} 438 \\ 618 \\ 13575 \\ 13820 \end{bmatrix} \quad \omega_{n1}^2 = 438, \omega_{n1} = 20.92 \text{ วัตวินาที}$$

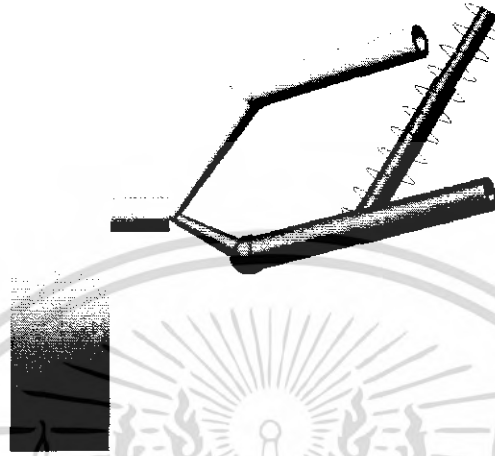
จากนั้นแทนค่า  $\omega_{n1}$  ใน (3-15)

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{20.92}{2\pi} = 3.33 \text{ เฮิร์ตซ์ อยู่ในช่วง 1.0-4.0 เฮิร์ตซ์ สามารถใช้ได้}$$

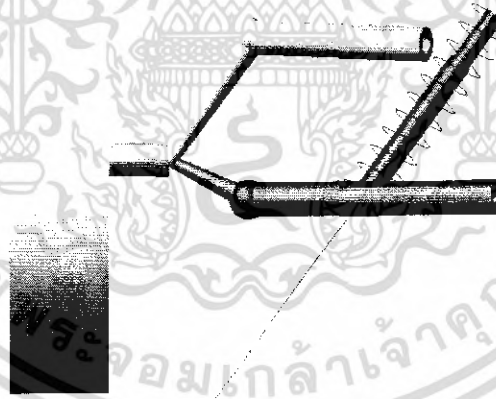
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการ Simulate ดูการเสียหายของสปริงในโปรแกรม MSC.ADAMSซึ่งสามารถดูวิธีการ  
ทำได้ในบทที่ 5

### ระบบช่วงล่างด้านหน้า



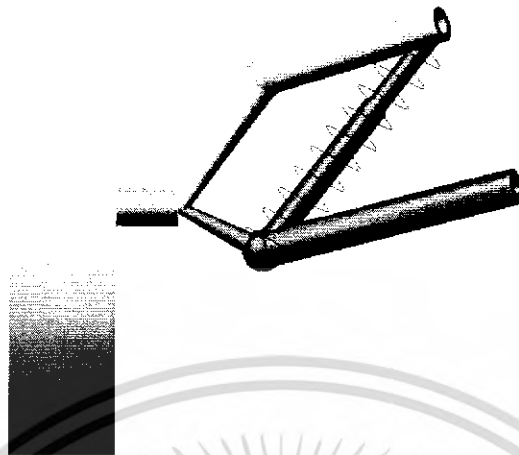
รูปที่ 4-39 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 4



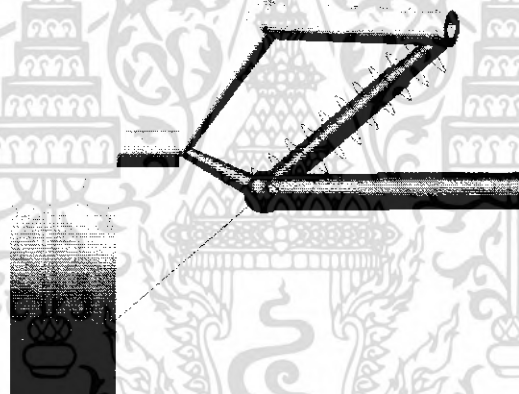
รูปที่ 4-40 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20 หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบช่วงล่างด้านหลัง



รูปที่ 4-41 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า ก่อนการทำ Simulation ครั้งที่ 4



รูปที่ 4-42 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20 หลังการทำ Simulation ครั้งที่ 4

จากการ Simulate จะเห็นได้ว่า **สปริงแข็งเกินไปหรือเกิดการยุบตัวน้อยมาก ทั้ง ช่วงล่างด้านหน้า และด้านหลัง** แสดงว่า การตั้งค่าความยืดหยุ่นนั้นไม่สามารถนำไปใช้ได้เพราะรถจะไม่มีคามนุ่มนวล

ตารางการตั้งค่าของ  $k_f$  และ  $k_r$  เพื่อดูความถี่ของ ธรรมชาติของรถ และ แบบจำลองการยุบตัวของสปริงในโปรแกรม MSC.ADAMS View ของรถอี-20สามารถสรุปรวมได้ตามตารางที่ 4-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับการสุ่มครั้งที่	สุ่ม $k_f$ และ $k_r$	ความถี่ธรรมชาติของรถ (เฮิรตซ์)	การยุบตัวของสปริงในโปรแกรม ADAMS
1	20 นิวตัน/มม. 30 นิวตัน/มม.	2.39 เฮิรตซ์	การยุบตัวของสปริงมากจนเกิดความเสียหาย
2	30 นิวตัน/มม. 40 นิวตัน/มม.	2.77 เฮิรตซ์	การยุบตัวของสปริงมากจนเกิดความเสียหาย
3	40 นิวตัน/มม. 50 นิวตัน/มม.	3.07 เฮิรตซ์	การยุบตัวของสปริงอยู่ในช่วงที่สามารถรับได้
4	50 นิวตัน/มม. 60 นิวตัน/มม.	3.33 เฮิรตซ์	การยุบตัวของสปริงน้อยมาก(สปริงแข็ง)

ตารางที่ 4-2 ผลของการ Simulate ค่าความยืดหยุ่นในรถอี-20

ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า  $k_f$  และ  $k_r$  เท่ากับ 40 นิวตัน/มม. และ 50 นิวตัน/มม. ในการสร้างสปริงเพื่อใช้กับระบบช่วงล่างของรถอี-20 ของ

#### 4.3 ทฤษฎีความเสียหาย

สูตรที่ใช้คำนวณคิดหาค่าความเสียหาย ที่กระทำต่อสปริงอันเนื่องมาจากแรงกระทำของน้ำหนักรถ มีดังนี้

$$\tau = \frac{8KFD}{\pi d^3} \quad (4-2)$$

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (4-3)$$

$$C = \frac{D}{d} \quad (4-4)$$

โดยที่  $\tau$  = ความเค้นเฉือน (นิวตัน/มม.<sup>2</sup>)

$K$  = ตัวประกอบของวาล์ท (Wahl's factor)

$F$  = แรงที่กระทำต่อสปริง (นิวตัน)

$C$  = ดัชนีสปริง (spring's index)

สำหรับค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

$$\sigma_u = 1687 \text{ นิวตัน/มม.}$$

$$\tau_y = 0.5\sigma_u = 843.5 \text{ นิวตัน/มม.}^2$$

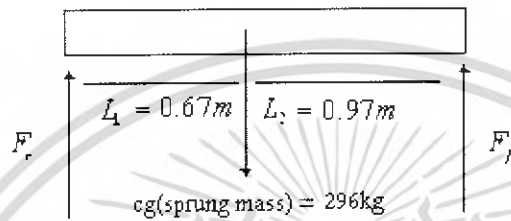
(ที่มา: จากหนังสือ การออกแบบเครื่องจักรกล MACHINE DESIGN เล่ม 1 และ โครงการเรื่อง

Experimental Study on Coned Disk Springs for Vertical Seismic Isolation System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการคำนวณมีดังต่อไปนี้

1. หาค่าดัชนีสปริงจากสูตร (4-4)
  2. หาค่าตัวประกอบของวาล์วจากสูตร (4-3)
  3. หาค่าความเค้นเฉือนจากสูตร (4-2)
  4. นำค่าความเค้นเฉือนที่ได้ไปตรวจสอบว่ามีค่าเกินค่าความเค้นเฉือนสูงสุดหรือเปล่า ถ้าเกินหมายความว่าเมื่อใช้งานจริงแล้วสปริงจะเสียหายจะต้องเปลี่ยนสปริงใหม่ แต่ถ้าไม่เกินก็แสดงว่าสปริงตัวนั้นสามารถใช้งานได้จริงโดยแรงที่กระทำต่อระบบช่วงล่างด้านหน้าและด้านหลังสามารถหาได้ดังนี้
- รถไฟฟ้า



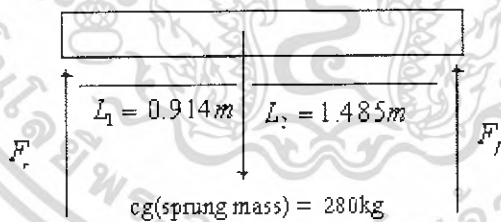
รูปที่ 4-43 การหาแรงด้านหน้าและด้านหลังที่กระทำต่อระบบช่วงล่างของรถไฟฟ้า

ทำการ เทค โมเมนต์ ที่จุดช่วงล่างที่รับแรงด้านหลัง

$$F_f(1.64) = (296)(9.8)(0.67)$$

$$F_f = 1185.08 \text{ นิวตัน} \quad F_f = 1718.68 \text{ นิวตัน}$$

รถอี-20



รูปที่ 4-44 การหาแรงด้านหน้าและด้านหลังที่กระทำต่อระบบช่วงล่างของรถอี-20

ทำการ เทค โมเมนต์ ที่จุดช่วงล่างที่รับแรงด้านหลัง

$$F_f(2.399) = (280)(9.8)(0.914)$$

$$F_f = 1045.44 \text{ นิวตัน} \quad F_f = 1701.36 \text{ นิวตัน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	รถไฟฟ้า			รถอี-20	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง 1	ด้านหลัง 2	ด้านหน้า	ด้านหลัง
C	8.56	6.71	6	7.727	7.2
K	1.17	1.223	1.2525	1.191	1.2305
F	1422.45	517	517	960.47	1472
$\tau$	316.88	202.6	265.88	290.667	590.39
$\tau < \tau_y$	✓	✓	✓	✓	✓

ตารางที่ 4-3 ค่าต่างๆในการคำนวณความเสียหาย

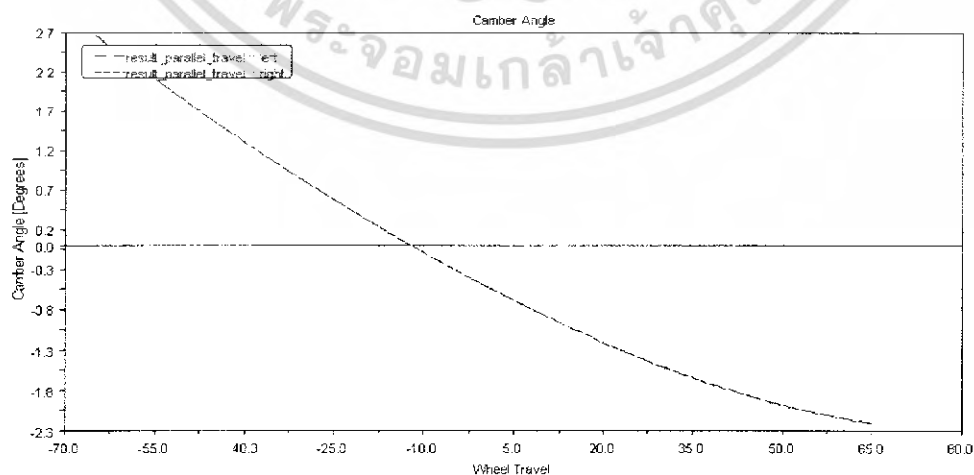
จากตารางที่ 4-3 จะเห็นว่าค่าความเค้นเฉือนนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นเฉือนที่รับได้ ดังนั้นสปริงที่เลือกนั้นสามารถใช้ได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย

#### 4.4 การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของระบบช่วงล่าง

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของระบบช่วงล่างเฉพาะด้านหน้าของรถเพราะล้อหลังไม่ค่อยมีผลต่อเสถียรภาพของรถเท่าไหร่นัก

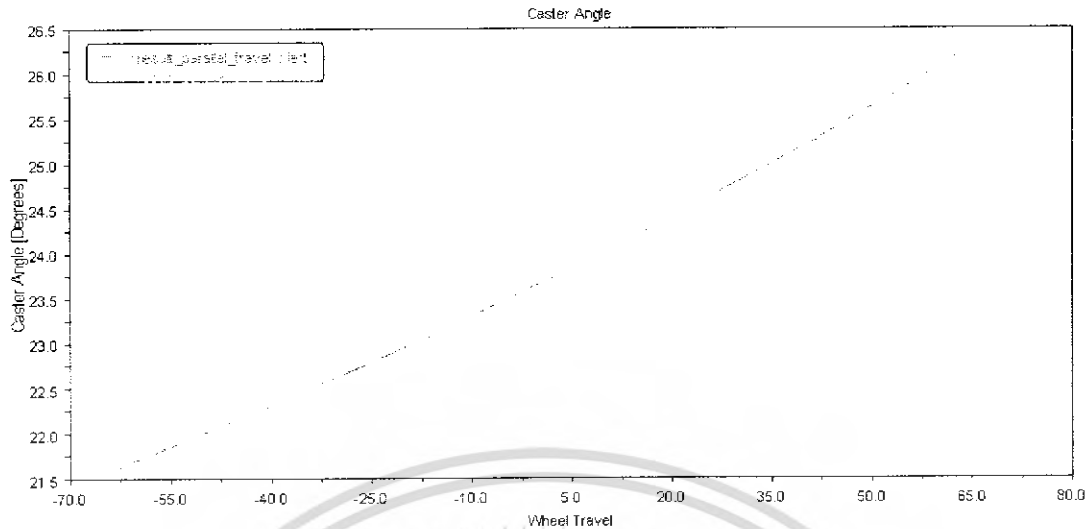
##### ● รถไฟฟ้า

ทำการวิเคราะห์โดยวิธี Parallel wheel analysis โดยจำลองการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ของของระบบช่วงล่างและล้อรถ ซึ่งเปรียบเสมือนขณะที่รถวิ่งขึ้นลูกระนาด โดยกำหนดระยะเคลื่อนที่ขึ้น-ลง 65 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจะทำการพล็อตกราฟเพื่อดูค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมล้อ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้ (ขั้นตอนการทำงานสามารถดูได้ใน บทที่ 5)

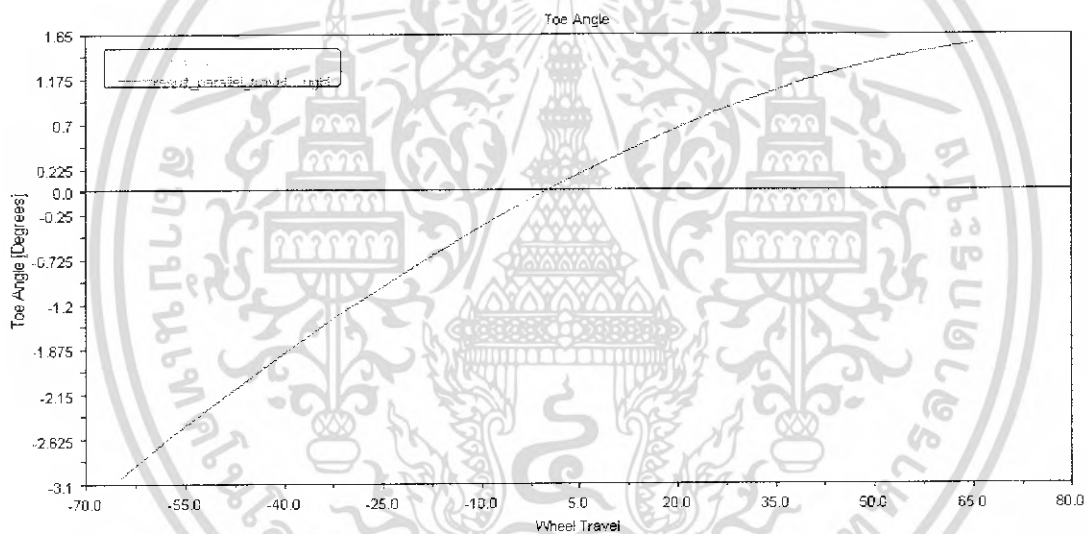


รูปที่ 4-45 กราฟแสดงมุมแคมเบอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



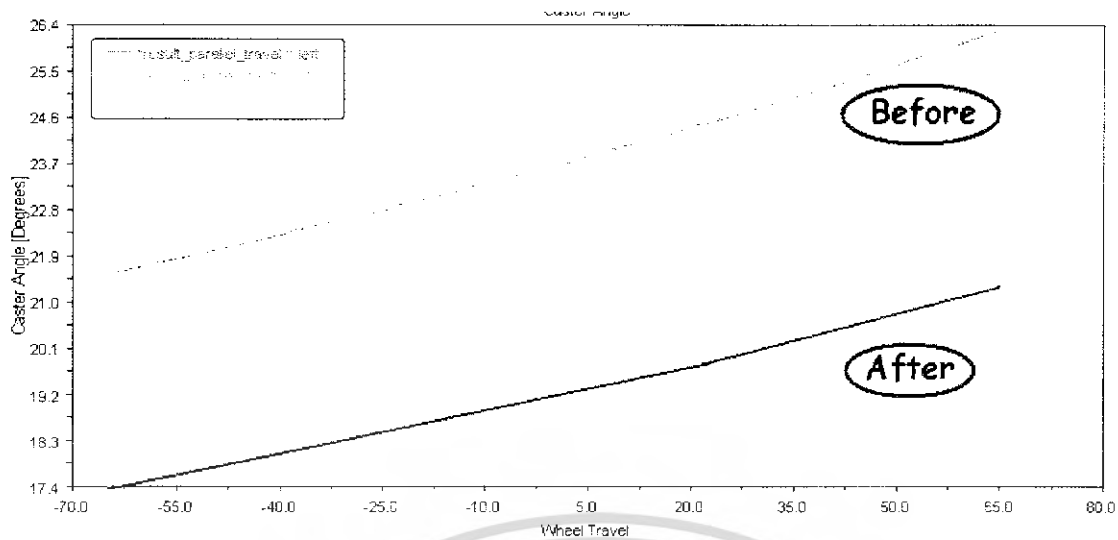
รูปที่ 4-46 กราฟแสดงมุมแคสเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า



รูปที่ 4-47 กราฟแสดงมุมโทที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

จากกราฟจะเห็นว่า มุมแคมเบออร์มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2.66 องศา ถึง -2.02 องศา มุมแคสเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 21.5 องศา ถึง 26.29 องศา และมุมโทมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -3.04 องศา ถึง 1.54 องศา ซึ่งในการออกแบบของโครงการนี้ ค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมที่ยอมรับได้ประมาณ 4 องศา ดังนั้นมุมแคมเบออร์ และ มุมโท ที่ทำการออกแบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ส่วนมุมแคสเตอร์มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป สาเหตุอันเนื่องมาจากการตั้งมุมแคสเตอร์ในคอนสโลล์อยู่กับที่ (Wheel travel=0) มากเกินไป สำหรับการแก้ไขนั้นสามารถทำได้โดยลดมุมแคสเตอร์ในคอนสโลล์อยู่กับที่ตามรูปที่ 4-45

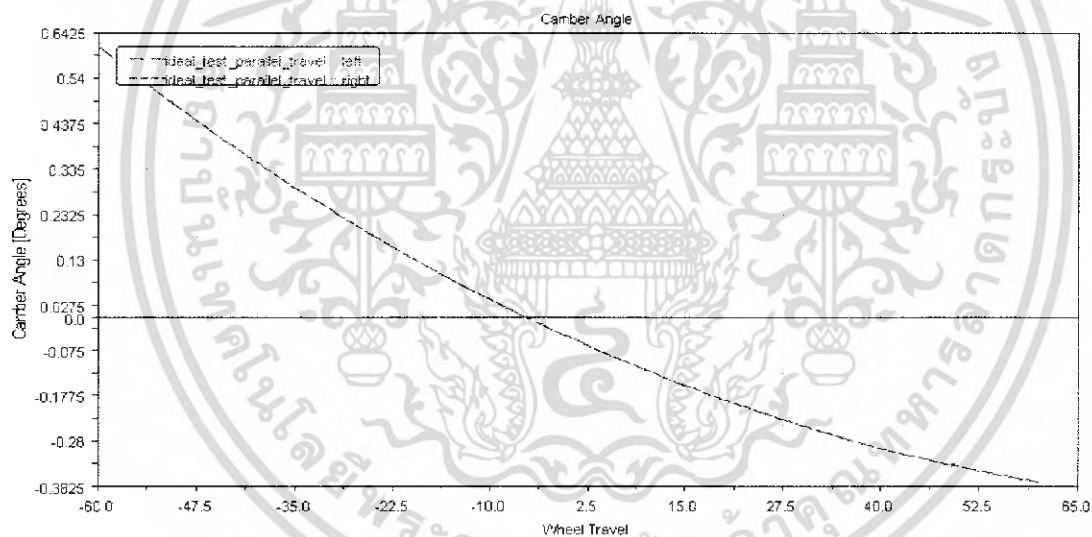
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-48 กราฟเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับมุมแคสเตอร์ของรถไฟฟ้า

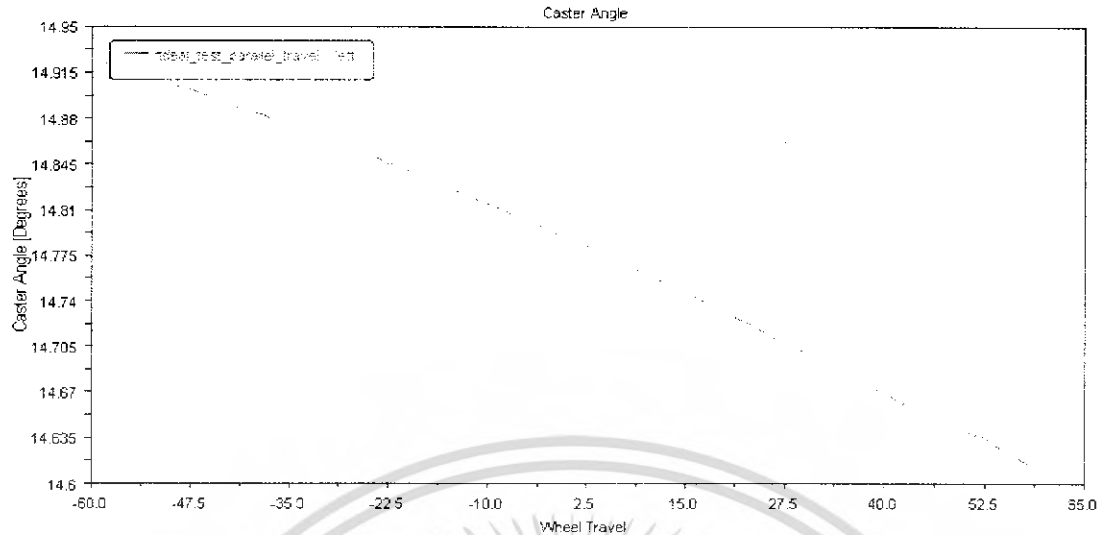
● รถอี-20

ทำการวิเคราะห์โดยวิธี Parallel wheel analysis เหมือนกับรถ ไฟฟ้า ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

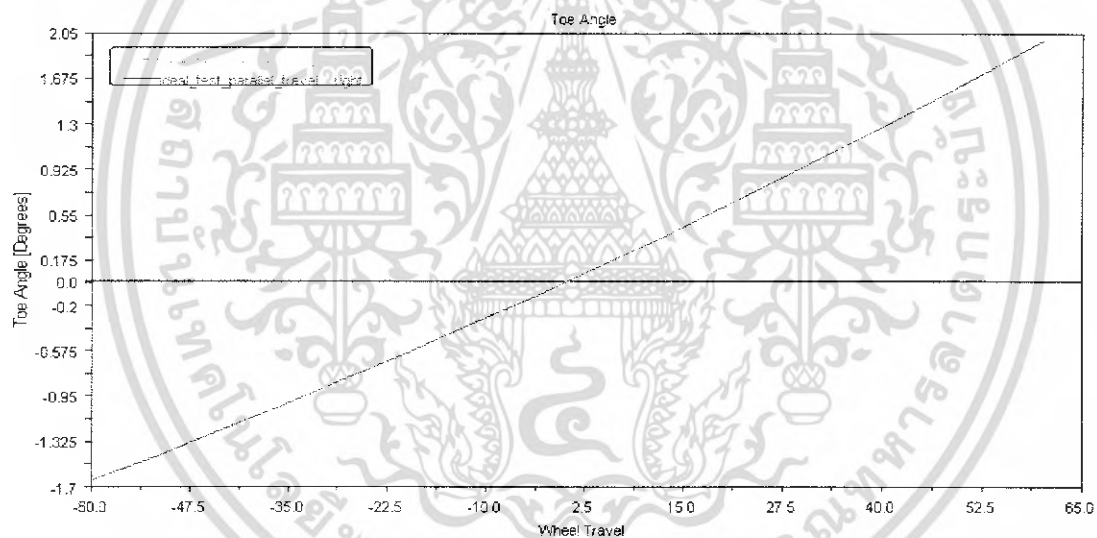


รูปที่ 4-49 กราฟแสดงมุมแคมเบอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถอี-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-50 กราฟแสดงมุมแคสเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถอี-20



รูปที่ 4-51 กราฟแสดงมุมโทที่เปลี่ยนแปลงกับระยะล้อเคลื่อนที่ของรถอี-20

จากกราฟจะเห็นว่า มุมแคมเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.6425 องศา ถึง -0.6825 องศา มุมแคสเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 14.5 องศา ถึง 14.93 องศา และมุมโทมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -1.7 องศา ถึง 2.05 องศา ซึ่งในการ ออกแบบของโครงการนี้ ค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมที่ยอมรับได้ประมาณ 4 องศา ดังนั้นมุมแคมเบอร์ มุมโท และมุมแคสเตอร์ที่ทำการออกแบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 4 องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การคำนวณระบบช่วงล่างโดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

โปรแกรม MSC.ADAMS View เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆเพื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่แล้วดูค่าผลลัพธ์ต่างๆออกมาบนชิ้นส่วนแต่ละชิ้น ยกตัวอย่าง เช่น แรง โมเมนต์ ความถี่ การกระจัด ความเร็ว และ ความเร็วรอบ เป็นต้น

สาเหตุที่ MSC.ADAMS View เป็นภาษาที่เหมาะสมกับการออกแบบระบบช่วงล่างรถ ที่ทำการออกแบบก็คือ

1. ง่ายต่อการเรียนรู้
2. เป็นโปรแกรมเฉพาะทางด้าน การออกแบบจำลองการเคลื่อนที่ต่างๆ
3. สามารถคำนวณค่าผลลัพธ์ที่เราต้องการ
4. มีความรวดเร็วในการประมวลผลและจำลองการเคลื่อนที่

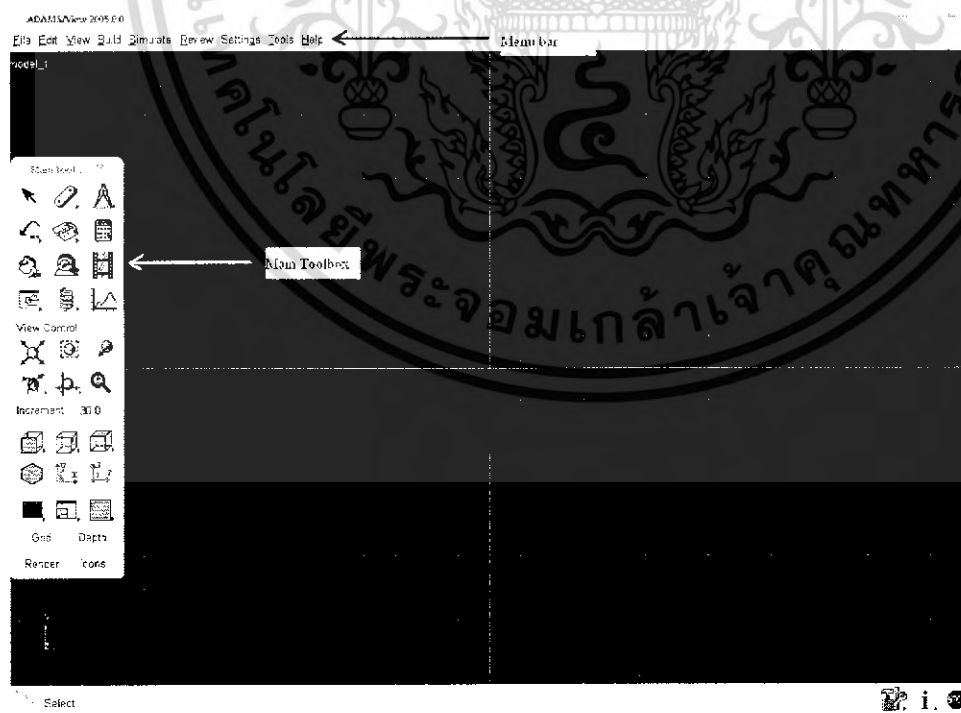
#### 5.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม MSC.ADAMS View ที่ใช้ในการทำงาน

##### 5.1.1 เมนู (Menu Bar)

จะเป็นแถบของเมนูหลักที่บรรจุคำสั่งย่อยหลายคำสั่งที่ใช้ในการทำงานไว้ สามารถที่จะเรียกใช้งานเมนูได้โดยการคลิกเมาส์ที่ชื่อของเมนูที่ต้องการ

##### 5.1.2 เครื่องมือคำสั่ง (Main Toolbox)

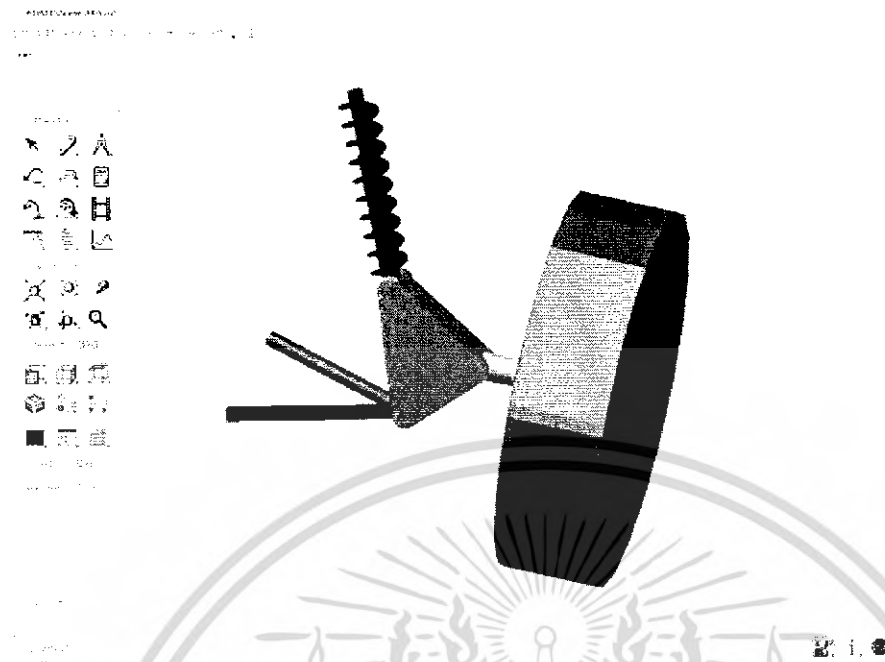
เป็นแถบคำสั่งเครื่องมือในการวาดชิ้นงานและกำหนดข้อแม้ต่างๆในกับชิ้นงานที่เราสร้างขึ้น



รูปที่ 5-1 แถบคำสั่งข้อมูลการใช้โปรแกรม MSC.ADAMS View

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

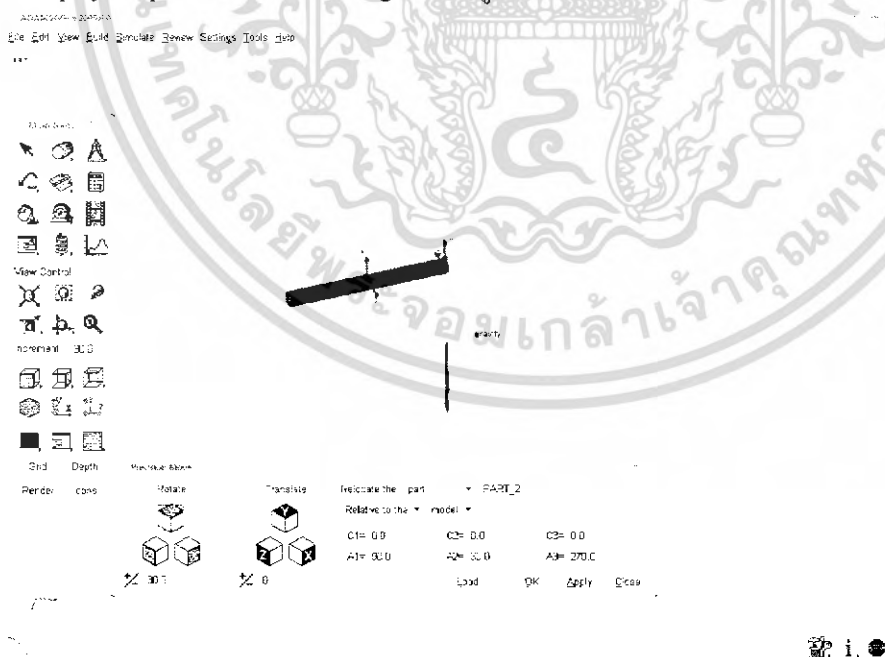
## 5.2.วิธีการวาดแบบจำลองวิเคราะห์ระบบช่วงล่างของรถไฟฟ้า ช่วงล่างด้านหน้า



รูปที่ 5-2 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า ด้านหน้า

สิ่งแรกที่ต้องสร้างขึ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างด้านหน้ามีดังนี้

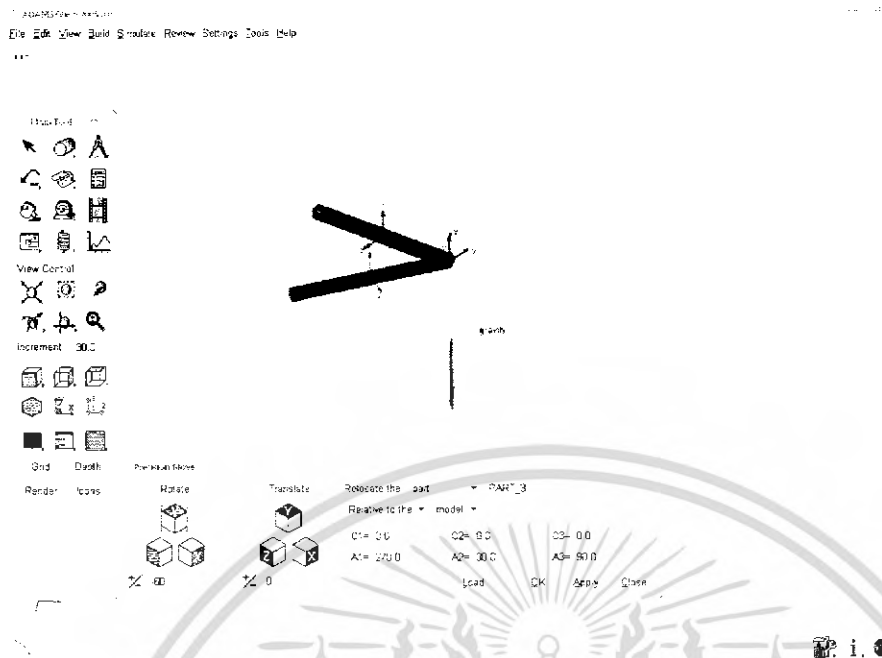
1. ปีกนกกลาง คลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาวเท่ากับ 29 ซม. และรัศมี 1.2 ซม. จากนั้นทำการหมุนทรงกระบอกไปเป็นมุม 30 องศา รอบแกน y โดยใช้คำสั่ง Display the precision Move Dialog Box ดังรูป



รูปที่ 5-3 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกบน

แล้วทำการเลือกที่ ชิ้นส่วนPart นี้แล้วทำการ ทำการกด Copy แล้วทำการหมุนชิ้นส่วนที่ Copy ขึ้นมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

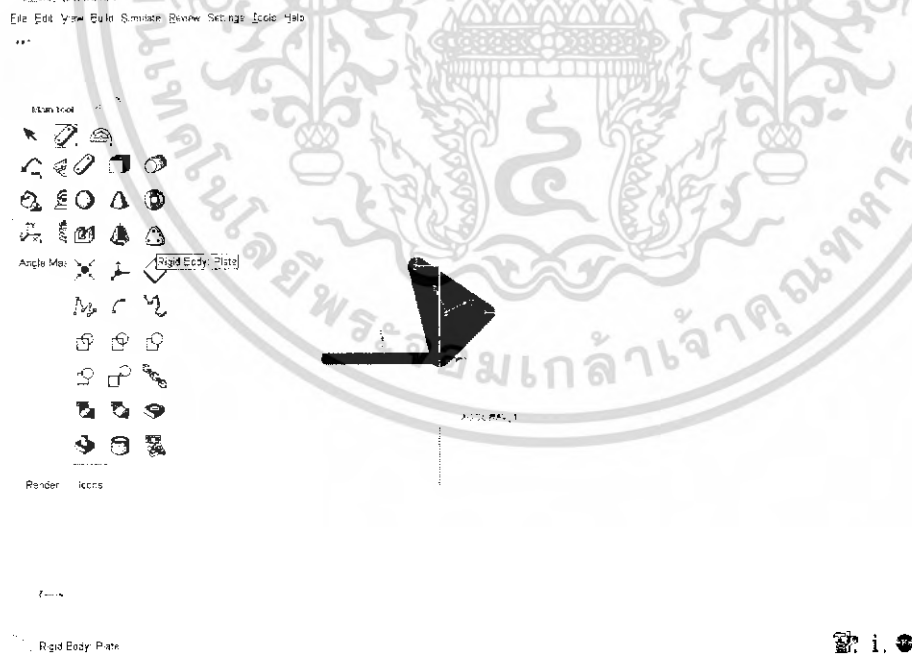
แล้วทำการหมุนไปเป็นมุม 60 องศา โดยใช้คำสั่ง Display the precision Move Dialog Box ดังรูป



รูปที่ 5-4 ชิ้นส่วนของปีกนกบน

จากนั้นทำการกำหนดให้ทรงกระบอก 2 ชิ้น นั้นเป็นชิ้นส่วนอันเดียวกันโดยใช้คำสั่ง Rigid Body: Merge two body

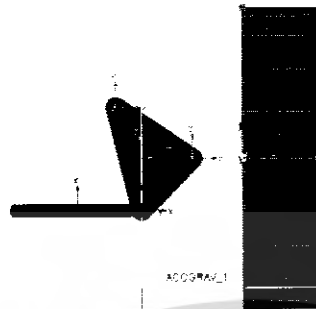
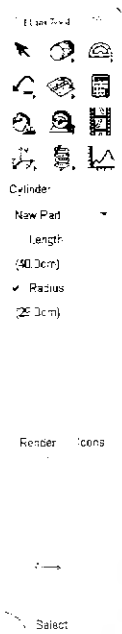
2. ส่วนของคอกม้า ทำการสร้างโดยเลือกที่คำสั่งของ Rigid Body: Plate แล้วทำการสร้างให้ได้มาตราส่วนตามรูปด้านล่าง



รูปที่ 5-5 การสร้างชิ้นส่วนของคอกม้า

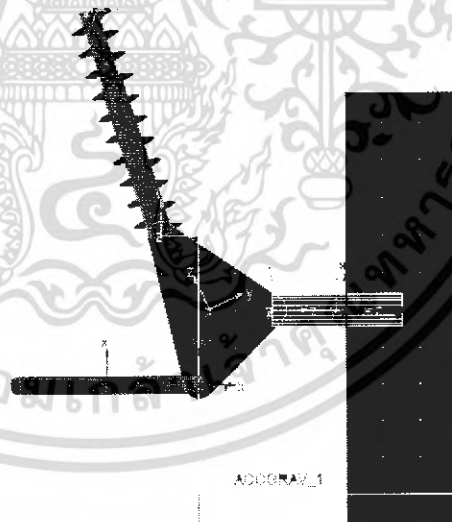
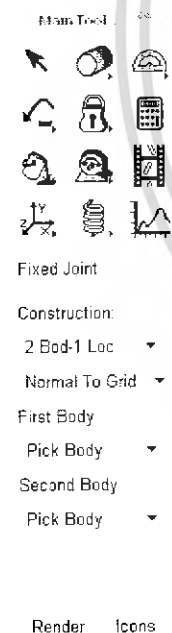
3. ส่วนของล้อ ทำการสร้างโดยคลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาวเท่ากับ 18 ซม. และรัศมี 29 ซม. แล้วกำหนดคุณสมบัติ ให้มวลเท่ากับ 15 กก. ดังรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADAMS View 2005.00  
File Edit View Build Simulate Review Settings Tools Help



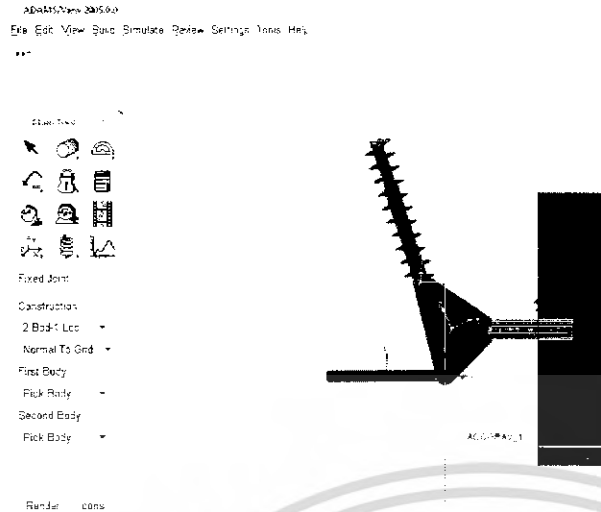
รูปที่ 5-6 การสร้างชิ้นส่วนของล้อรถ

4. ส่วนของค้อนล้อ ทำการสร้างโดยคลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยให้เชื่อมระหว่าง ค้อนล้อ กับ ตำแหน่งกึ่งกลางของล้อ ดังรูป



รูปที่ 5-7 การสร้างชิ้นส่วนของค้อนล้อ

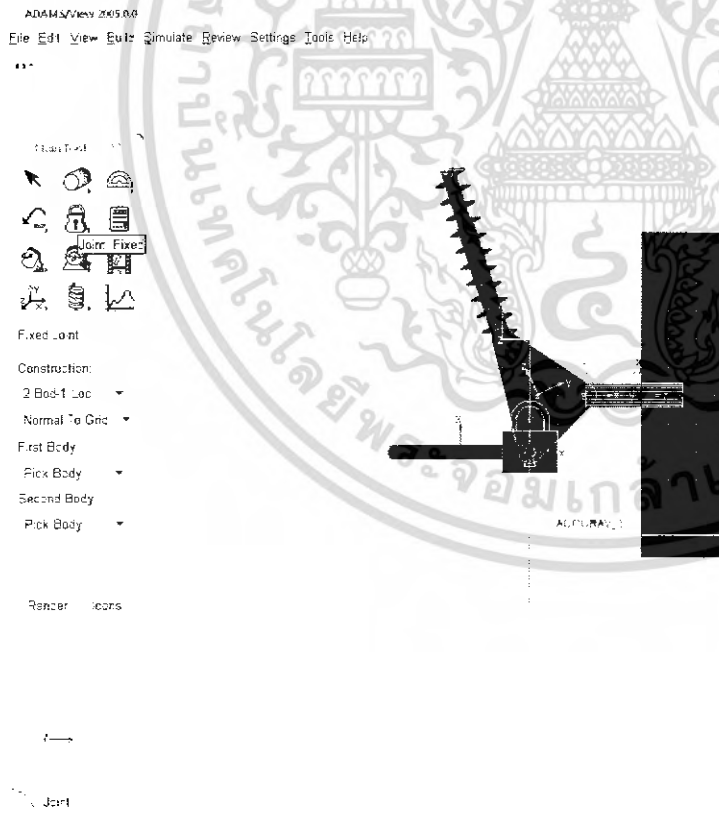
5. ส่วนของสปริง ทำการสร้างโดยเลือกที่คำสั่ง Connector: Translational Spring – Damper แล้วทำการวาด โดยให้ โช้ค ทำมุมกับแนวตั้ง 20 องศา และ ค่าความยืดหยุ่นสามารถเปลี่ยนได้ ดังรูป  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-8 การสร้างชิ้นส่วนของสปริงของรถ

จากนั้นทำการกำหนดจุดเชื่อมต่างๆ ให้กับแต่ละชิ้นส่วน โดยมีจุดเชื่อมดังนี้

1. จุดเชื่อมระหว่างปีกนกกลางกับคอกม้า โดยใช้คำสั่ง Joint: Fixed ดังรูป

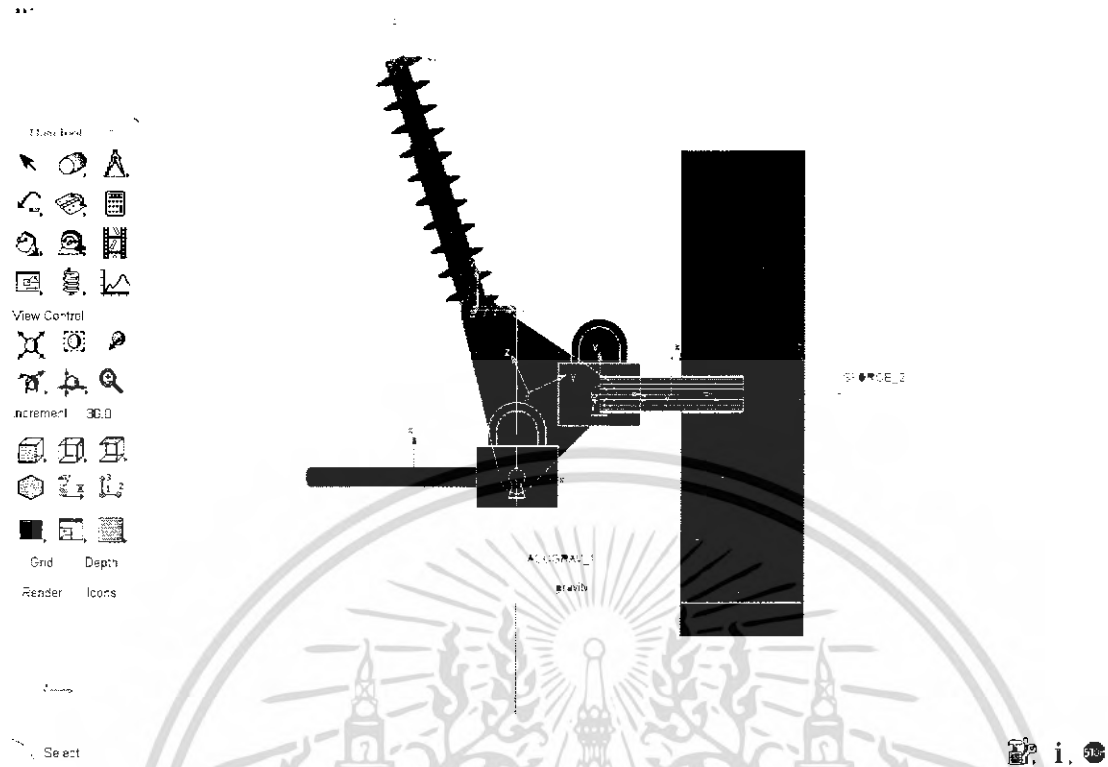


รูปที่ 5-9 การยึดจุดคอกม้ากับปีกนกกลาง

2. จุดเชื่อมระหว่างคอกม้ากับคอกม้า โดยใช้คำสั่ง Joint: Fixed ดังรูป

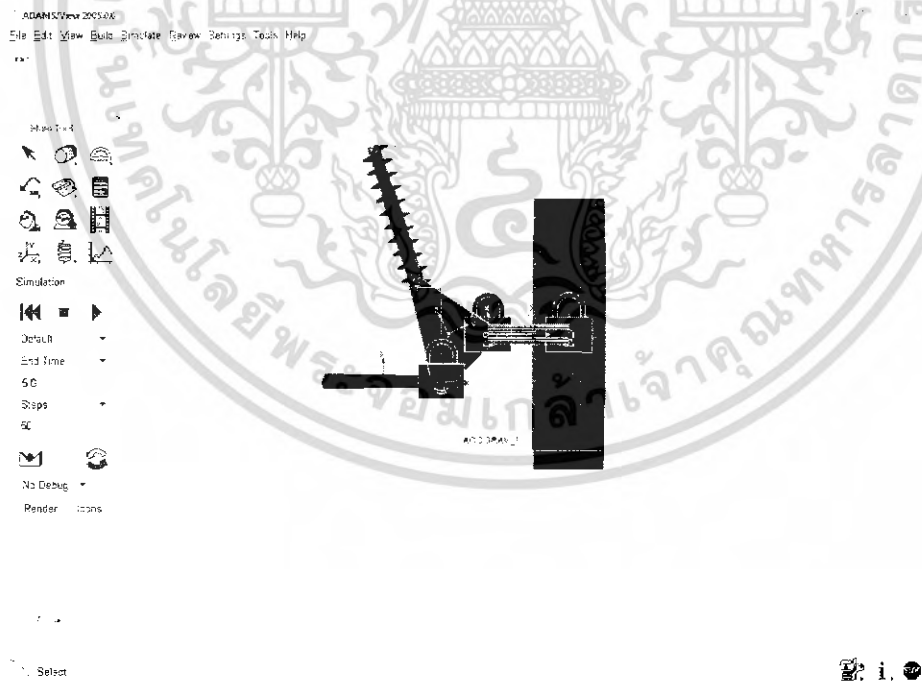
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADAMS/View 2005.0.0  
File Edit View Build Simulate Review Settings Tools Help



รูปที่ 5-10 การยึดชิ้นส่วนของคอม้ากับค้อน

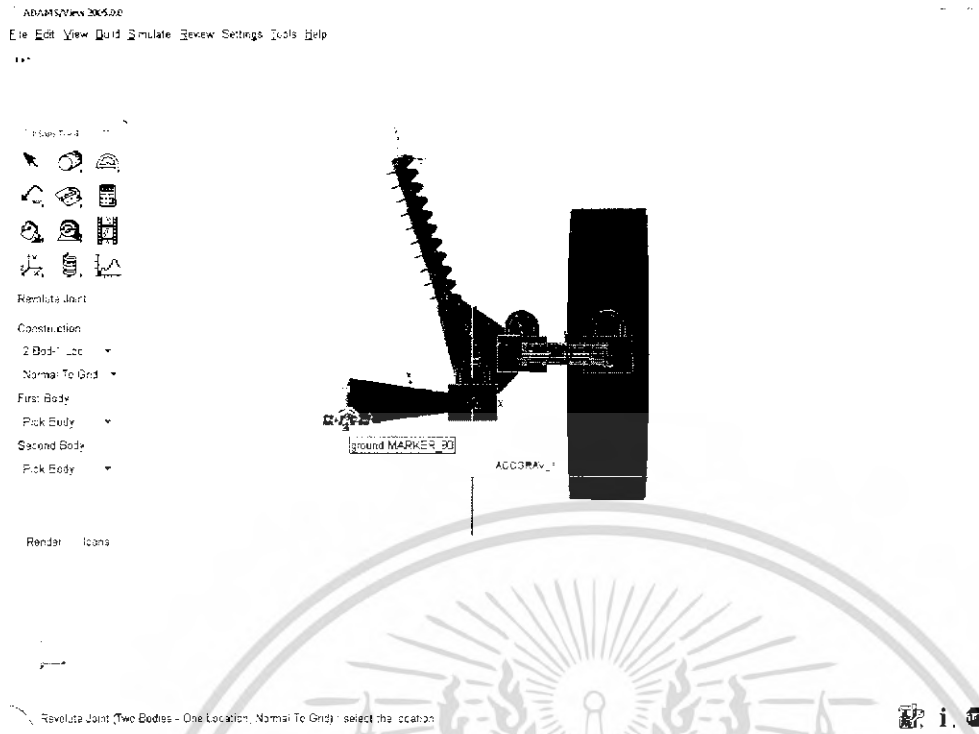
3. จุดเชื่อมระหว่างค้อนกับกลอง โดยใช้คำสั่ง Joint: Fixed ดังรูป



รูปที่ 5-11 การยึดชิ้นส่วนของค้อนกับล้อรถ

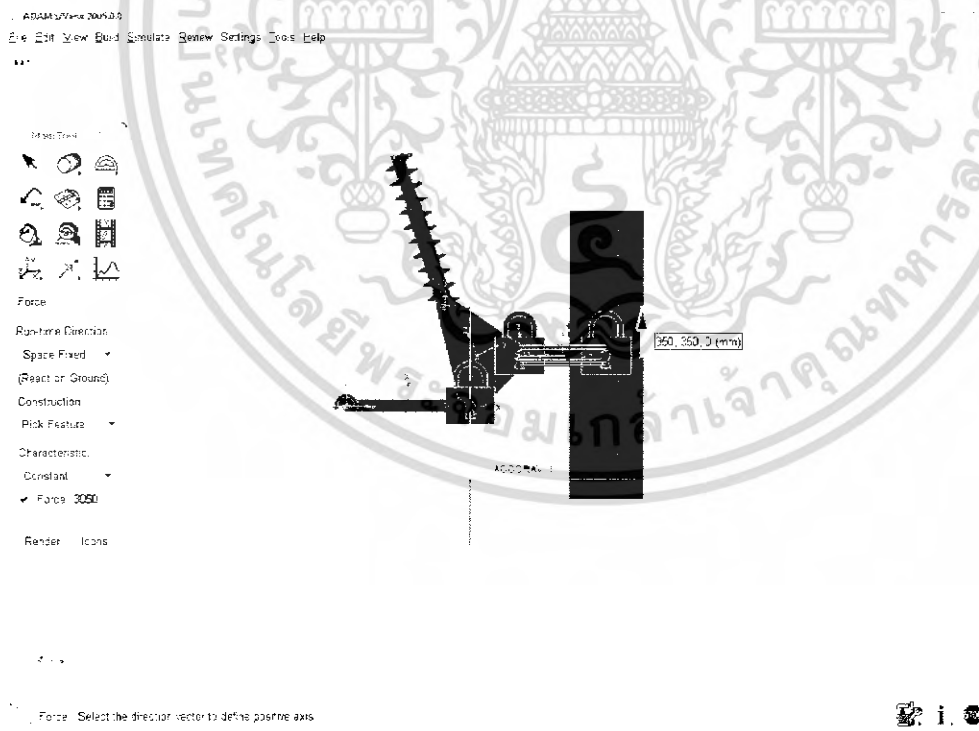
4. จุดเชื่อมระหว่าง Part : ground กับ ปีกนกกลาง โดยใช้คำสั่ง Joint : Revolute ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-12 การยึดจุดหมุนที่ปีกนกกับโครงรถ

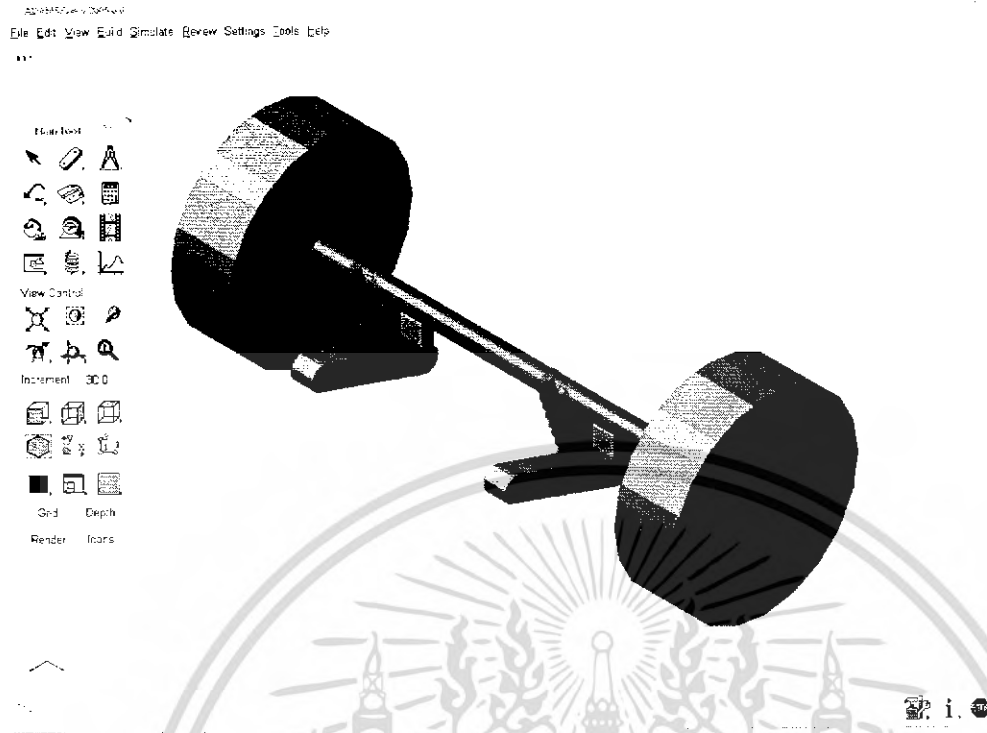
จากนั้น ทำการใส่แรงที่ขบล้อ โดยแรงที่ใช้นั้นจะต้องเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ตกหลุม ในที่นี้ใช้แรงเป็น 5 เท่า ของแรงจากน้ำหนักที่ทำต่อระบบช่วงล่างด้านหน้า



รูปที่ 5-13 การใส่แรงที่ขึ้นส่วนของล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

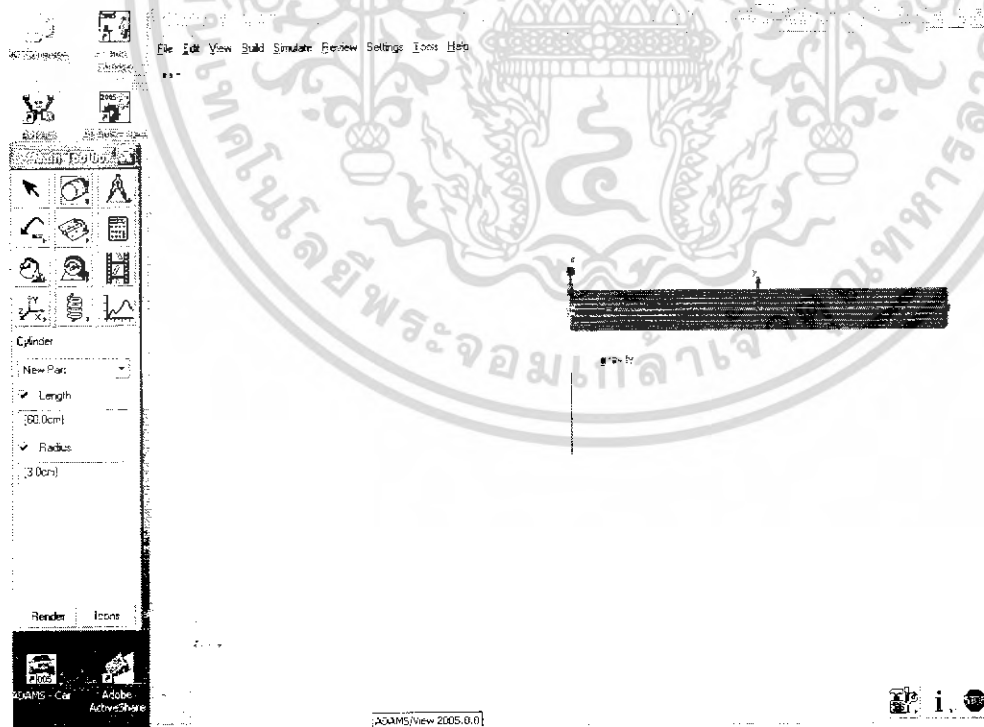
### 5.3 วิธีการวาดแบบจำลองวิเคราะห์ระบบช่วงล่างของรถไฟฟ้าด้านหลัง



รูปที่ 5-14 ระบบช่วงล่างของรถไฟฟ้า ด้านหลัง

สิ่งแรกที่ต้องสร้างชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างด้านหลังมีดังนี้

1. เพลาล้อหลัง คลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาวเท่ากับ 60 ซม. และรัศมี 3 ซม. ดังรูป



รูปที่ 5-15 การสร้างชิ้นส่วนของเพลาส่งกำลัง

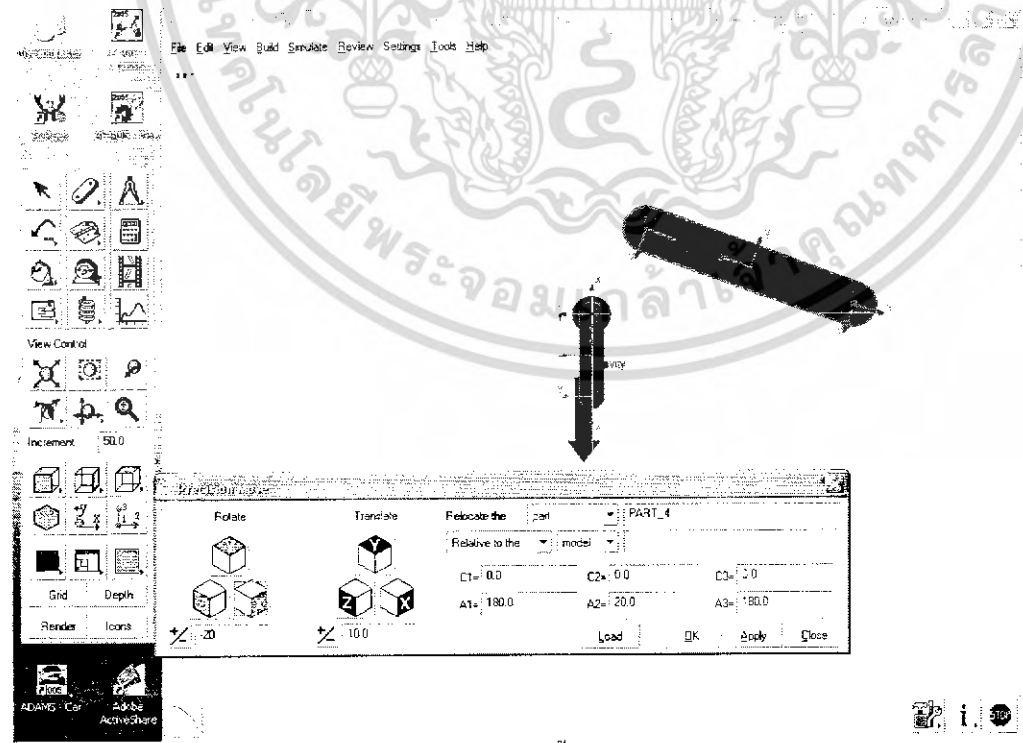
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสร้าง Joint ของเพลลาไว้สำหรับเชื่อมกับคานรับแรงจากสปริง ทำการเป็นมุมมองเป็น side view จากนั้นทำโดยใช้คำสั่ง Rigid Body: Link ให้มีความยาวประมาณ 8 ซม. กว้าง 7 ซม. ลึก 6.5 ซม. แล้วไปต่อกับกึ่งกลางเพลลาหลังดังรูป



รูปที่ 5-16 การสร้าง joint ของเพลลาส่งกำลัง

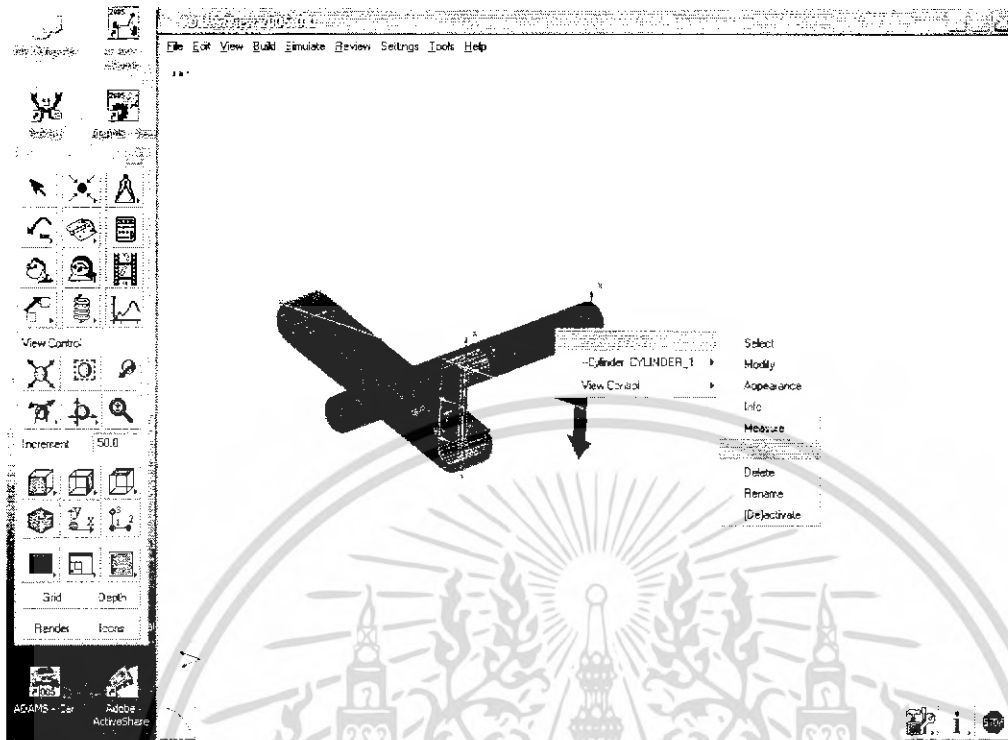
3. ทำคานรับแรงจากสปริง ใช้คำสั่ง Rigid Body: Link ให้มีความยาวประมาณ 35 ซม. กว้าง 7 ซม. ลึก 6.5 ซม. จากนั้นทำการหมุนคานให้ทำมุมจากเดิมไป 20 องศา ดังรูป



รูปที่ 5-17 การสร้างชิ้นส่วนของคานรับแรง

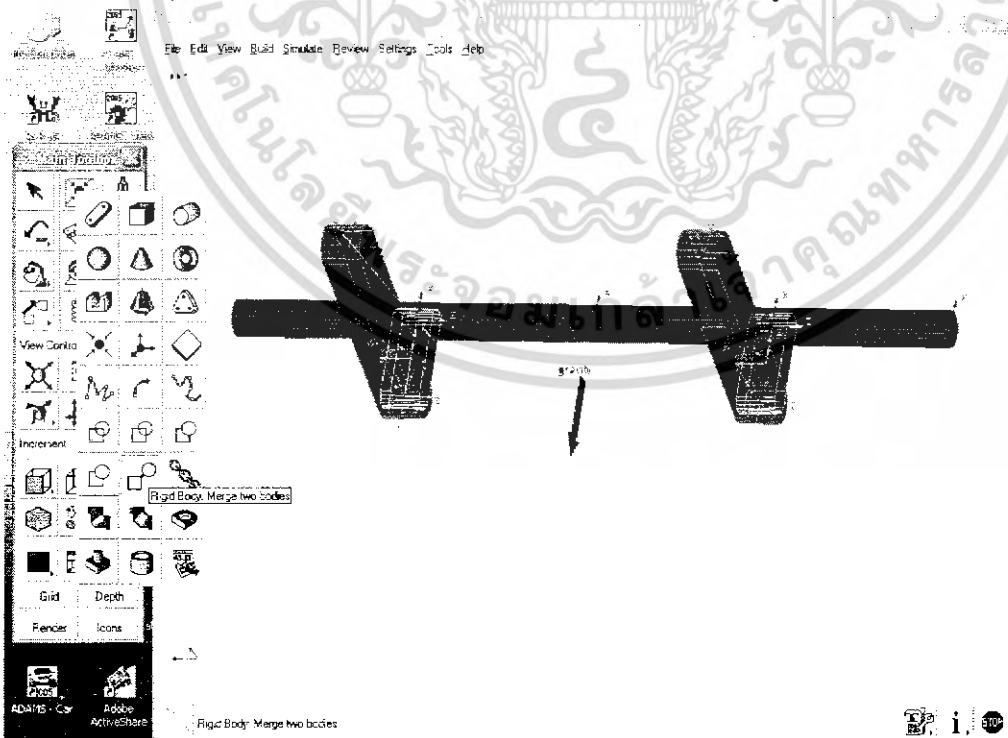
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการย้ายคานรับแรงจากสปริงไปยังจุด Joint ของเพลลา โดยใช้คำสั่ง Position : Move จากนั้นทำการ copy เพลลาหลัง joint ของเพลลาและ คานรับแรงจากสปริง ดังรูป



รูปที่ 5-18 การติดคานรับแรงกับ joint ของเพลลาส่งกำลัง

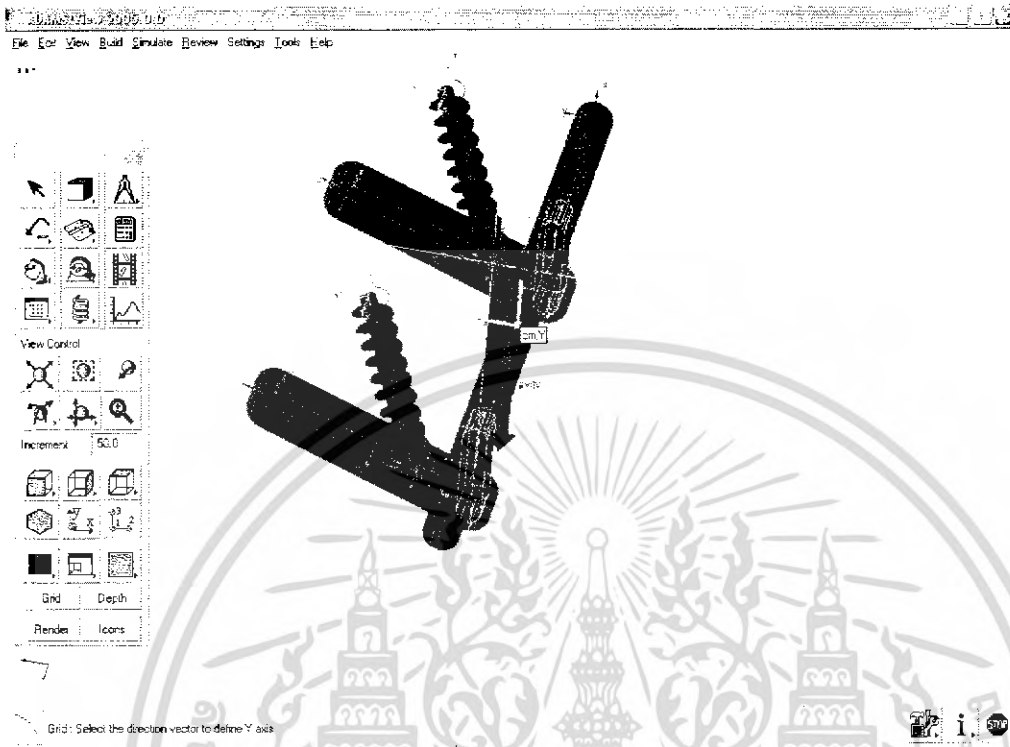
ขั้นส่วนที่ Copy มาวางต่อทางด้านซ้ายของระบบที่สร้างไว้แล้ว จากนั้นทำการกำหนดให้เพลลา 2 ชิ้นเสมือนเป็นวัตถุชิ้นเดียว โดยใช้คำสั่ง Rigid Body: Merge two bodies ดังรูป



รูปที่ 5-19 การคัดลอกระบบด้านล้อซ้ายแล้วมาสร้างระบบด้านล้อขวา

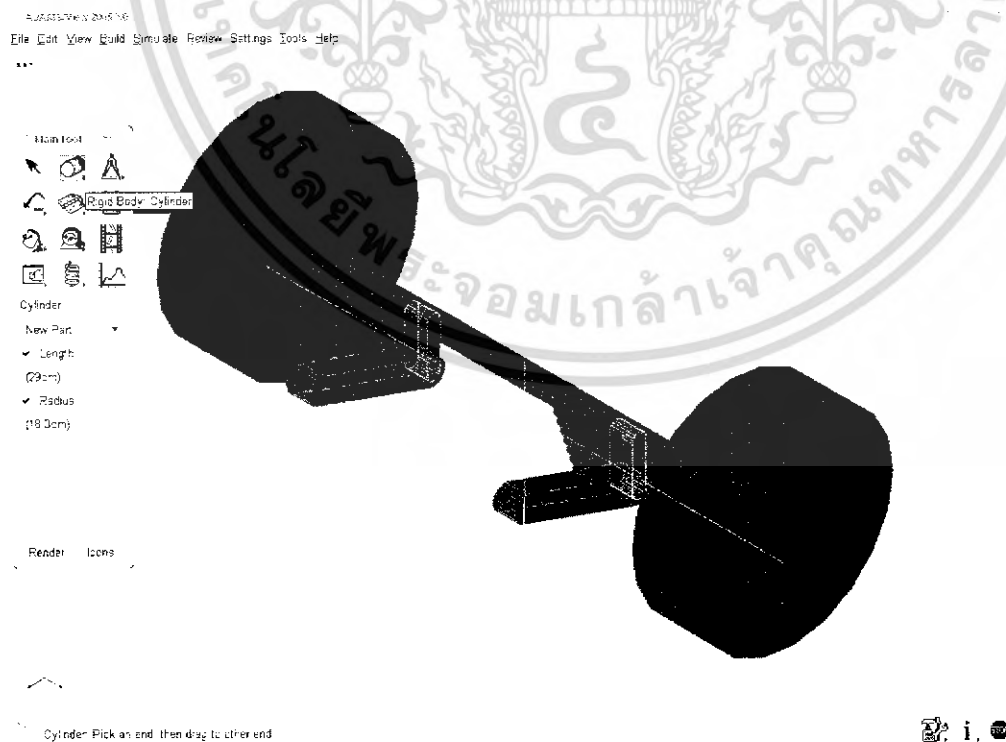
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการสร้างจุดอ้างอิงบนแกนรับแรงจากสปริง โดยใช้จุดนั้นห่างจากปลายแกนเท่ากับ 9 ซม. โดยใช้คำสั่ง Construction Geometry: Point แล้วทำการสร้าง Spring โดยนำไปติดตรงจุดอ้างอิงที่ได้สร้างไว้ แล้วให้ Spring ทำมุม กับแนวคิ่ง 30 องศา



รูปที่ 5-20 การสร้างชิ้นส่วนของสปริงทางด้านซ้ายและด้านขวา

4. ส่วนของล้อ ทำการสร้างโดยคลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาว เท่ากับ 18 ซม. และรัศมี 29 ซม. แล้วกำหนดคุณสมบัติ ให้มวลเท่ากับ 15 กก. ดังรูป



รูปที่ 5-21 การสร้างชิ้นส่วนของล้อด้านซ้ายและด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการกำหนด Joint ระหว่างแต่ละชิ้นส่วน ดังนี้

1. ล้อกับเพลาหลัง ใช้คำสั่ง Joint : Fixed
2. เพลากับ joint เชื่อม ใช้คำสั่ง Joint : Revolute
3. คานรับแรงจากสปริงกับ joint เชื่อม ใช้คำสั่ง Joint : Fixed
4. คานรับแรงจากสปริงกับ ground ใช้คำสั่ง Joint : Revolute

ทำการใส่แรงที่ล้อด้านใดด้านหนึ่ง ใช้คำสั่ง Applied Force โดยใส่แรงไป 3000 N

จากนั้นทำการ Simulation



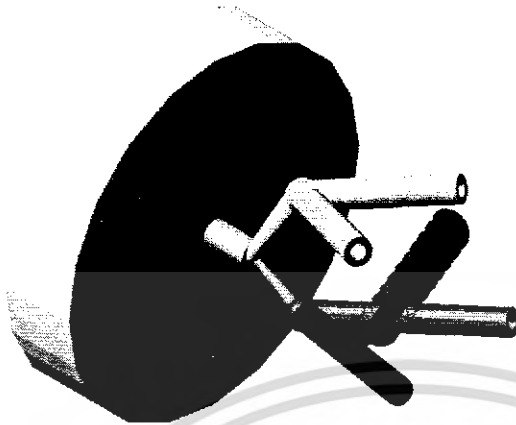
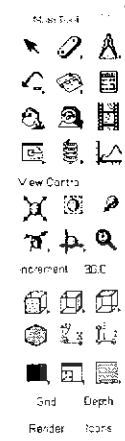
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 วิธีการวาดแบบจำลองวิเคราะห์ระบบช่วงล่างของรถ E20 ช่วงล่างด้านหน้า

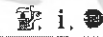
APDM52View 2005.0.0

File Edit View Build Simulate Review Settings Tools Help

...



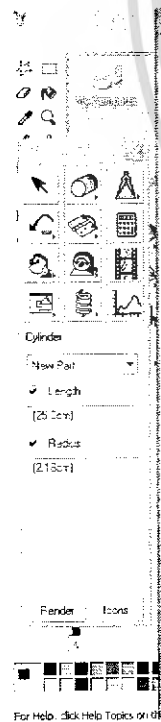
Select



รูปที่ 5-23 ระบบช่วงล่างของรถ E-20 ด้านหน้า

สิ่งแรกที่ต้องสร้างชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างด้านหลังมีดังนี้

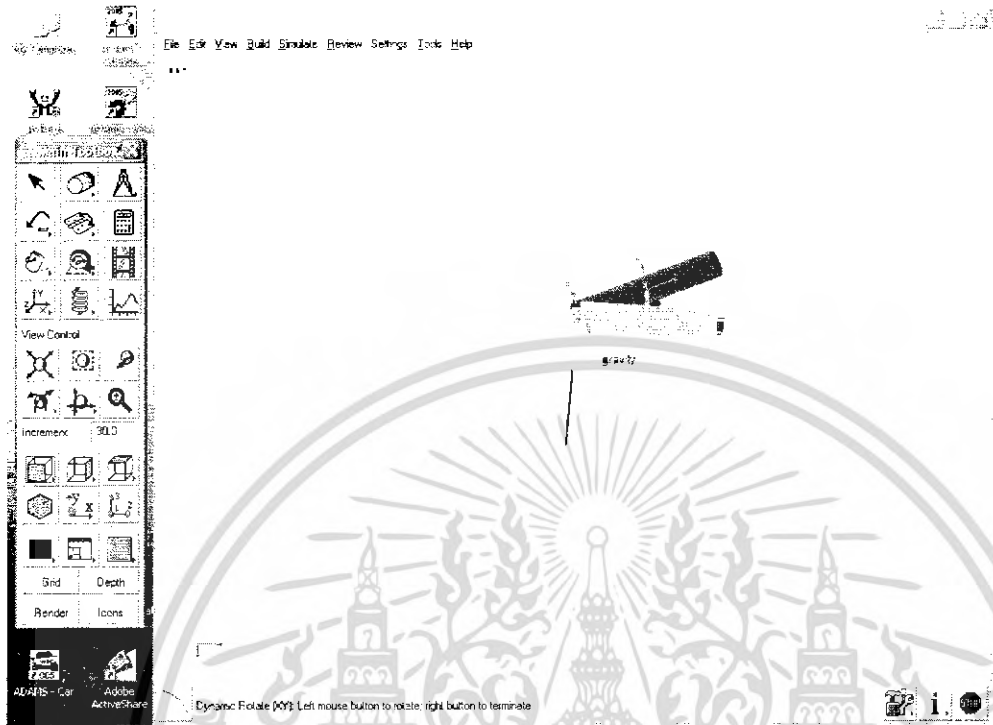
1. ปีกนกบน กลไกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาวเท่ากับ 25 ซม. และรัศมี 2.16 ซม.และรัศมีรู เท่ากับ 1 ซม. ดังรูป



รูปที่ 5-24 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกบน

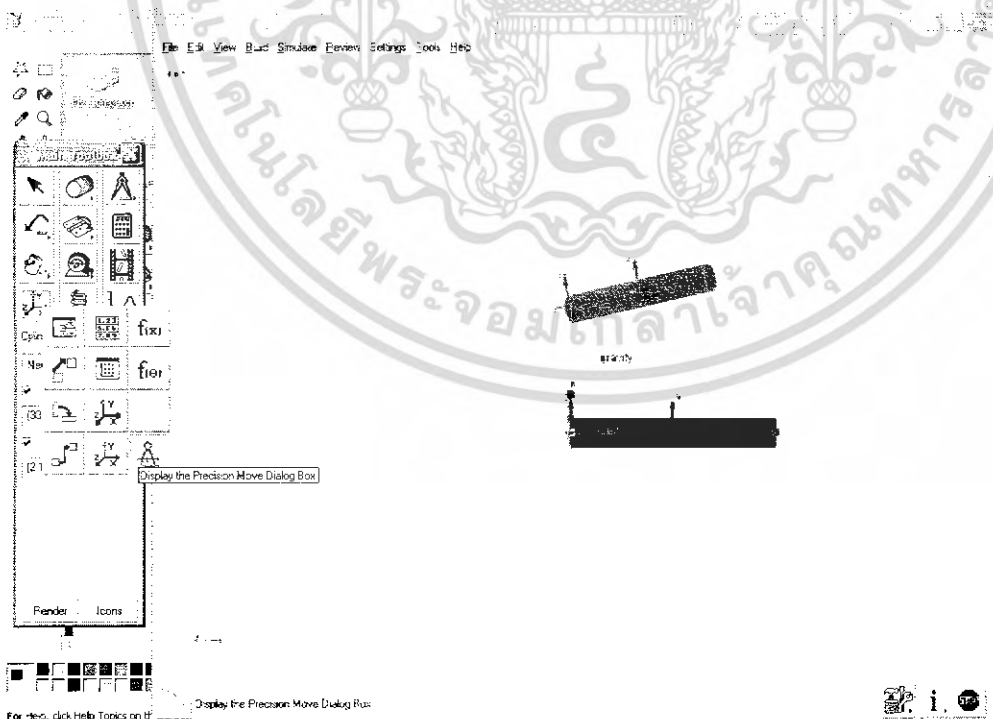
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการ Copy ชิ้นส่วนนี้ แล้ววางโดยให้ชิ้นส่วนทั้งสองทำมุมกันเท่ากับ 47.15 องศา และ ชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นทำมุมกับแนวระนาบ 13 องศา โดยใช้คำสั่ง Display the Precision Move Dialog Box ดังรูป



รูปที่ 5-25 ชิ้นส่วนของปีกนกบน

2. ปีกนกลาง คลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาวเท่ากับ 33 ซม. และรัศมี 2.16 ซม. รัศมีรู เท่ากับ 1 ซม. โดยให้ปีกนกลางจากปีกนกบน 23 ซม. ดังรูป



รูปที่ 5-26 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

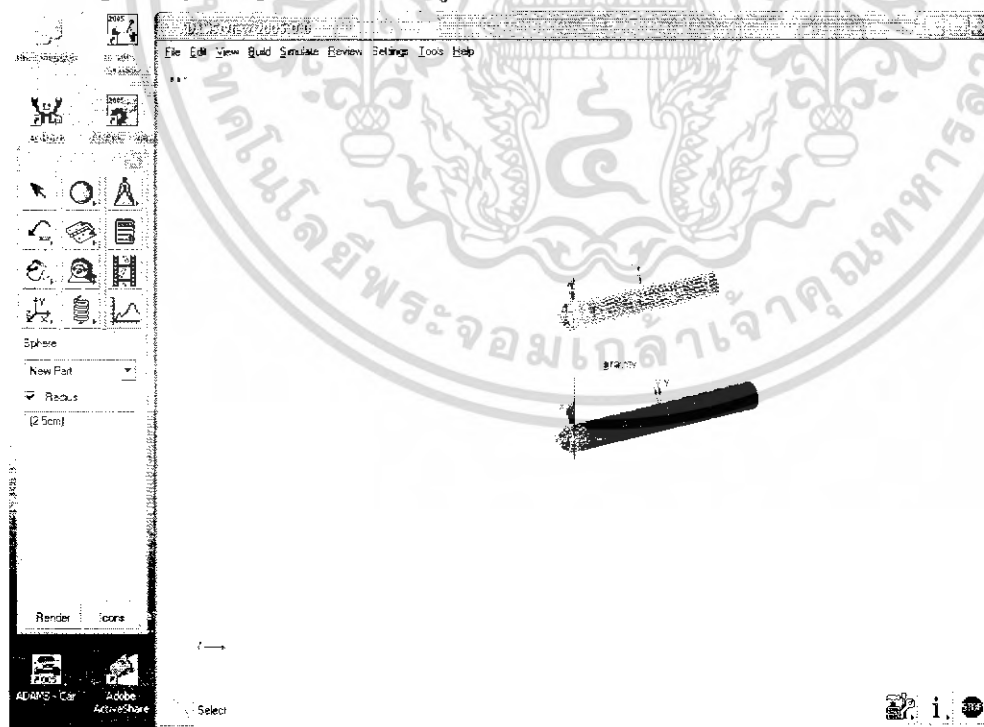
ทำการ Copy ชิ้นส่วนนี้ แล้ววางโดยให้ชิ้นส่วนทั้งสองทำมุมกันเท่ากับ 56.23 องศา โดยใช้คำสั่ง

Display the Precision Move Dialog Box แล้วสร้างแกนวางสปริงของปีกนกกลาง ดังรูป



รูปที่ 5-27 ชิ้นส่วนของปีกนกกลางและปีกนกบน

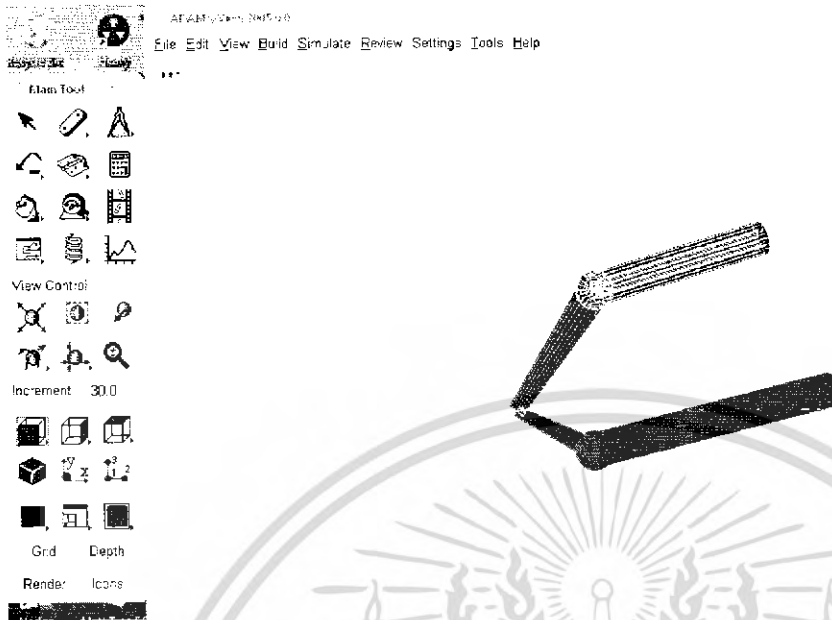
3. ชิ้นส่วนของ Upper ball joint และ Lower ball joint โดยใช้คำสั่ง Rigid body: Sphere โดยรัศมีเท่ากับ 2.5 ซม. แล้วทำการกำหนด ชิ้นส่วน 3 ชิ้นของปีกนกบนเหมือนเป็นชิ้นเดียวกันและปีกนกกลางด้วยโดยใช้คำสั่ง Rigid Body: Merge two bodies ดังรูป



รูปที่ 5-28 การสร้างชิ้นส่วนของ Upper ball joint และ Lower ball joint

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ชิ้นส่วนของ คอม่่า (knuckle) ส่วนบนให้มีความยาว 19 ซม. และ ด้านล่างยาว 11 ซม. โดยใช้คำสั่ง Rigid Body: Frustum จากนั้นทำการเชื่อมต่อกันระหว่างด้านบนและด้านล่างโดยใช้คำสั่ง: Position Move



รูปที่ 5-29 การสร้างชิ้นส่วนของคอม่่า

5. ชิ้นส่วนของคุดมล้อ บน คลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนดความยาวเท่ากับ 15 ซม. และรัศมี 2.16 ซม. ดังรูป



รูปที่ 5-30 การสร้างชิ้นส่วนของคุดมล้อ

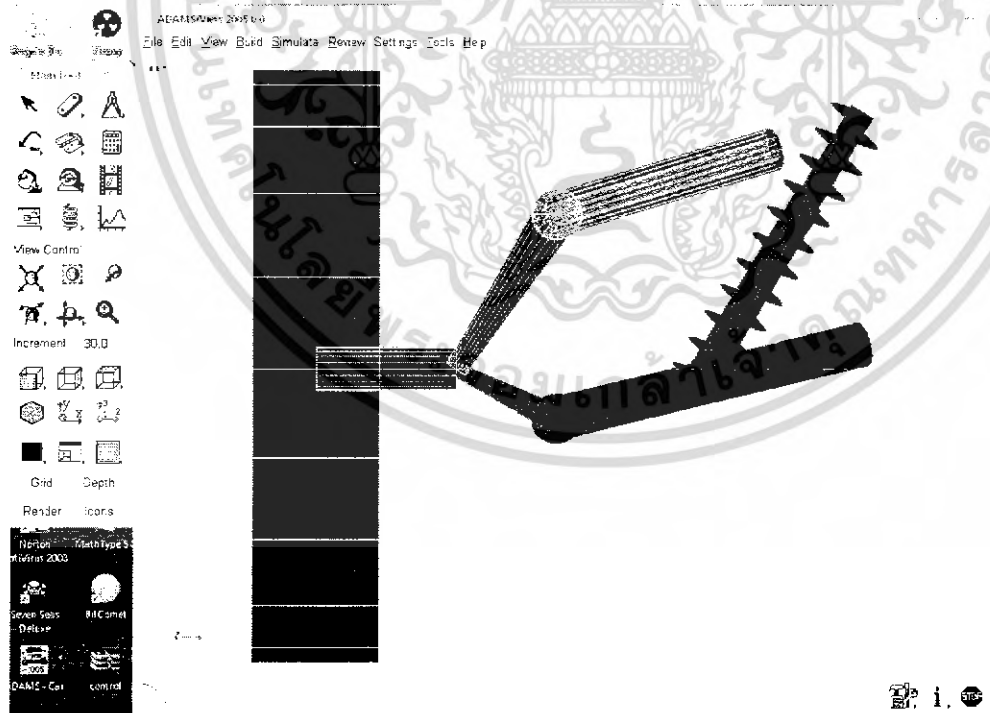
6. ชิ้นส่วนของ Spring โดยวางที่แกนยึดสปริงของปีกนกกลางโดยใช้ทำมุมกับแนวตั้ง 50 องศา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าความยืดหยุ่นของสปริงนั้นสามารถเปลี่ยน โดยเลือกที่ Modify



รูปที่ 5-31 การสร้างชิ้นส่วนของสปริง

7. ส่วนของล้อ ทำการสร้างโดยคลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาว เท่ากับ 18 ซม. และรัศมี 29 ซม. แล้วกำหนดคุณสมบัติ ให้มวลเท่ากับ 15 kg ดังรูป



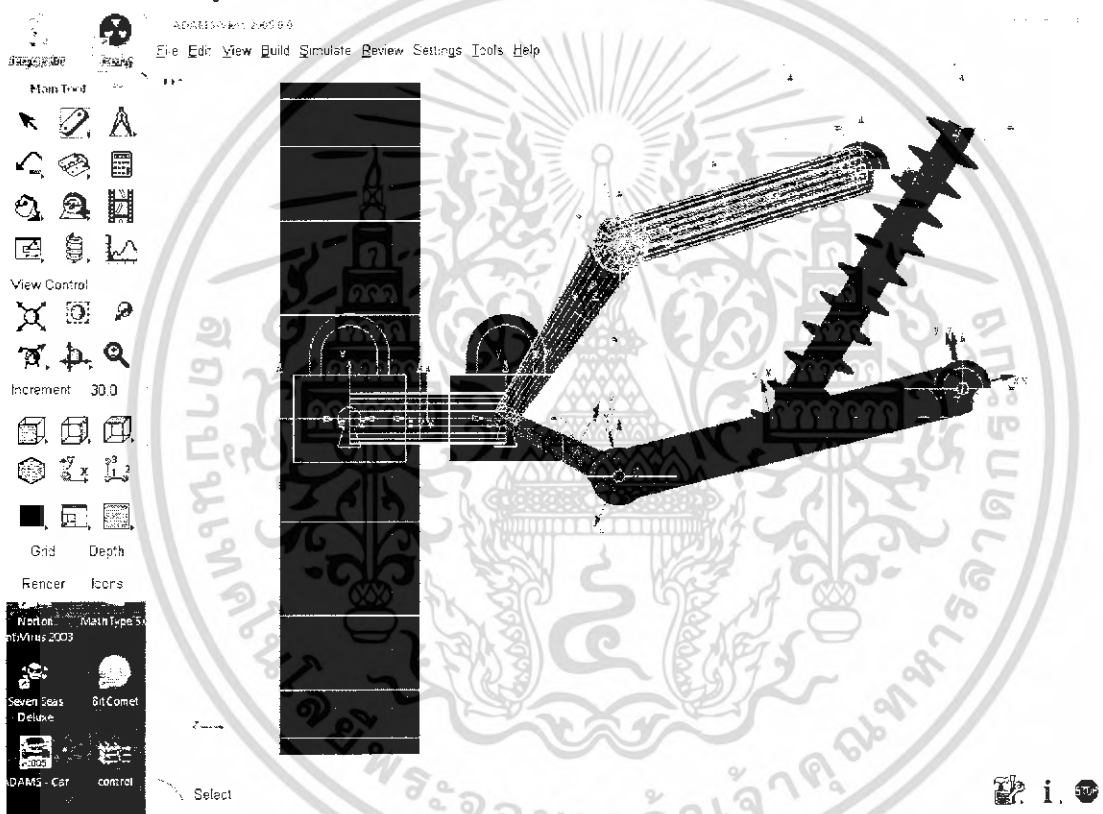
รูปที่ 5-32 การสร้างชิ้นส่วนของล้อรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการกำหนด Joint ระหว่างแต่ละชิ้นส่วน ดังนี้

1. ล้อกับคัมล้อ ใช้คำสั่ง Joint: Fixed
2. คอม่้ากับคัมล้อ ใช้คำสั่ง Joint: Fixed
3. ปีกนกบนกับคัมล้อ ใช้คำสั่ง Joint: Revolute
4. ปีกนกล่างกับคัมล้อ ใช้คำสั่ง Joint: Revolute
5. ปีกนกบนกับ Ground ใช้คำสั่ง Joint: Revolute
6. ปีกนกล่างกับ Ground ใช้คำสั่ง Joint: Revolute

ทำการใส่ แรงที่ล้อด้านใดด้านหนึ่ง ใช้คำสั่ง Applied Force โดยใส่แรงไป 3000 นิวตัน จากนั้นทำการ Simulation ดังรูป

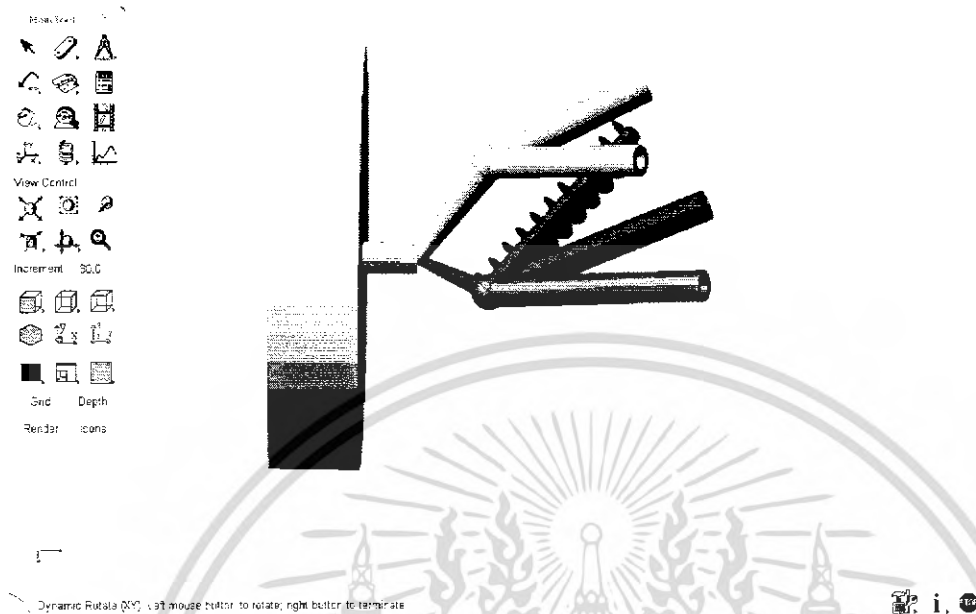


รูปที่ 5-33 การสร้างจุดยึด ณ ตำแหน่งต่างๆและการใส่แรงที่ล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 วิธีการวาดแบบจำลองวิเคราะห์ระบบช่วงล่างของรถ E-20 ช่วงล่างด้านหลัง

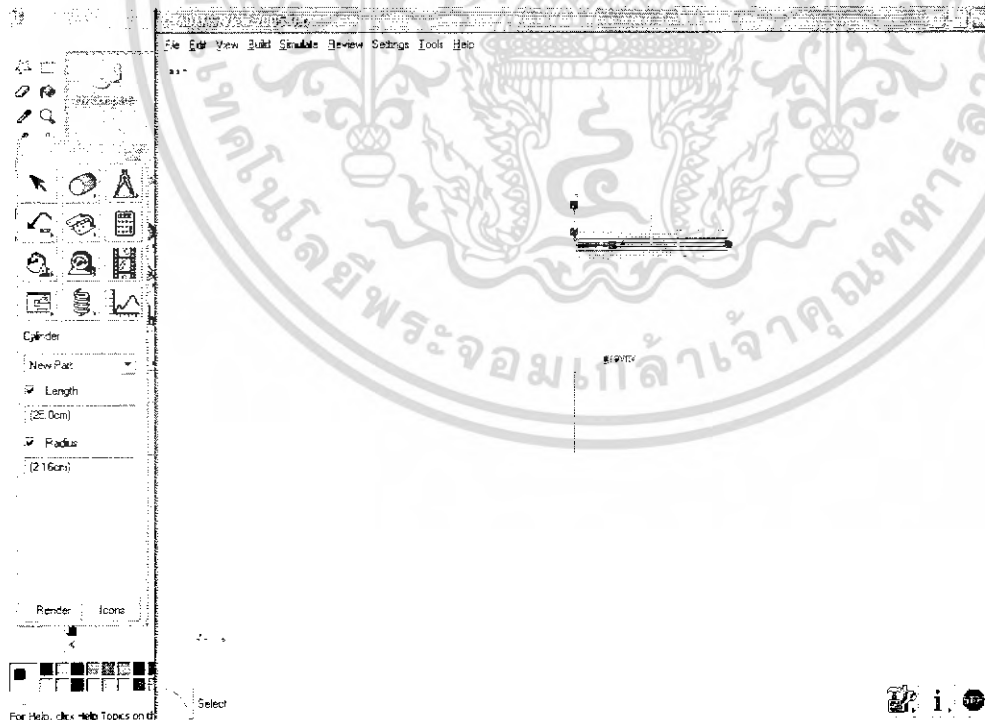
AGIAMS/Nov 2005.04  
File Edit View Build Simulate Review Settings Tools Help



รูปที่ 5-34 ระบบช่วงล่างของรถ E20 ด้านหน้า

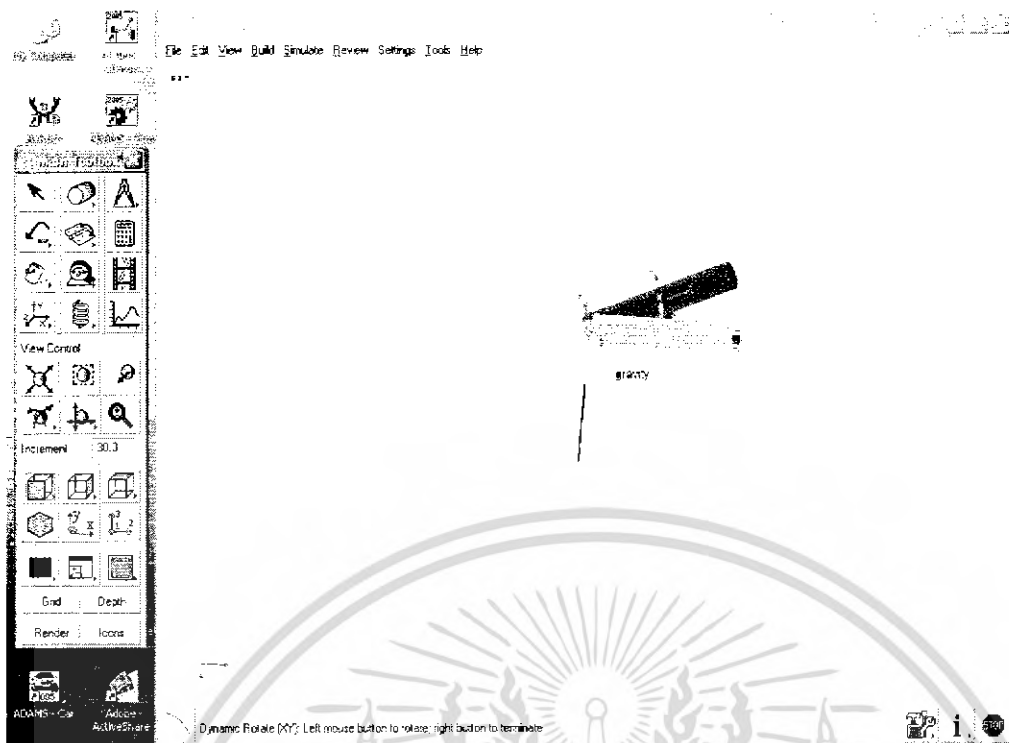
สิ่งแรกที่ต้องสร้างขึ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างด้านหลัง มีดังนี้

1. ปีกนกบน คลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาวเท่ากับ 24.5 ซม. และรัศมี 2.16 ซม. และรัศมีรู เท่ากับ 1 ซม. ดังรูป



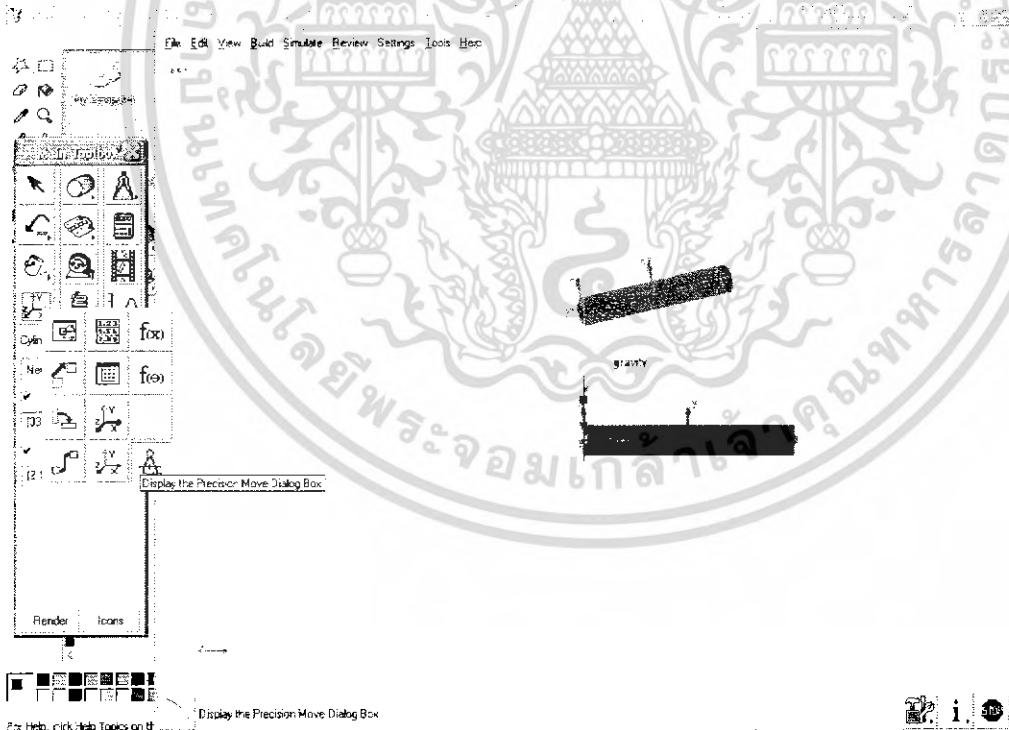
รูปที่ 5-35 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกบน

จากนั้นทำการ Copy ชิ้นส่วนนี้ แล้ววางโดยให้ชิ้นส่วนทั้งสองทำมุมกันเท่ากับ 52 องศา และ ชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นทำมุมกับแนวระนาบ 15 องศา โดยใช้คำสั่ง Display the Precision Move Dialog Box ดังรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-36 ชิ้นส่วนของปีกนกบน

2. ปีกนกลาง คลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาวเท่ากับ 33 ซม. และรัศมี 2.16 ซม. รัศมีรู เท่ากับ 1 ซม. โดยให้ปีกนกลางจากปีกนกบน 23 ซม. ดังรูป



รูปที่ 5-37 การสร้างชิ้นส่วนของปีกนกลาง

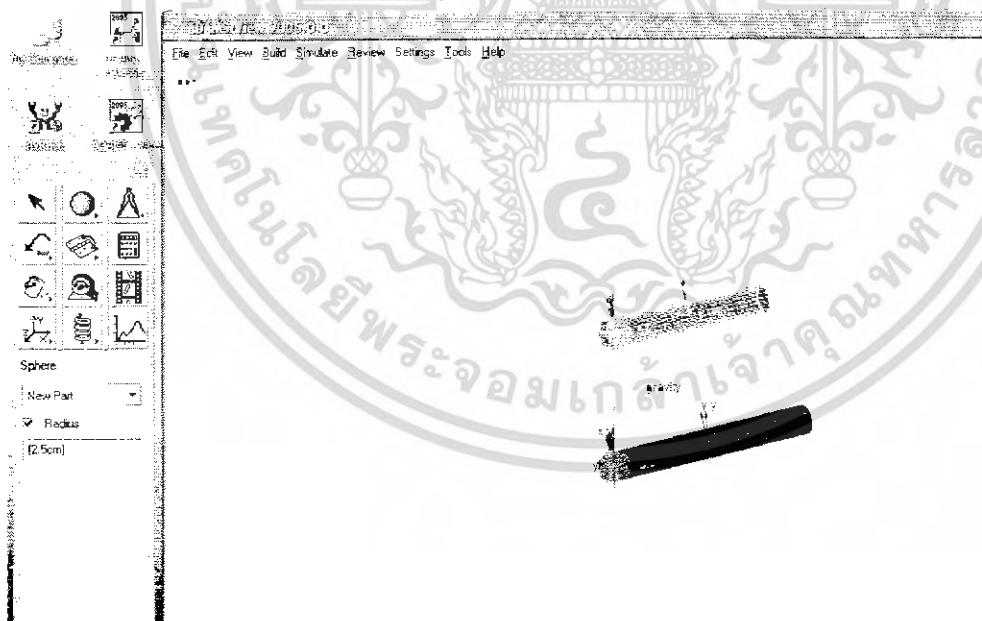
ทำการ Copy ชิ้นส่วนนี้ แล้ววางโดยให้ชิ้นส่วนทั้งสองทำมุมกันเท่ากับ 40 องศา โดยใช้คำสั่ง Display the Precision Move Dialog Box แล้วสร้างแกนวางสปริงของปีกนกลาง ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-38 ชิ้นส่วนของปีกนกบนและปีกนกล่าง

3. ชิ้นส่วนของ Upper ball joint และ Lower ball joint โดยใช้คำสั่ง Rigid body: Sphere โดยรัศมีเท่ากับ 2.5 ซม. แล้วทำการกำหนด ชิ้นส่วน 3 ชิ้นของปีกนกบนเหมือนเป็นชิ้นเดียวกันและปีกนกล่างด้วยโดยใช้คำสั่ง Rigid Body: Merge two bodies ดังรูป



รูปที่ 5-39 การสร้างชิ้นส่วนของ Upper ball joint และ Lower ball joint

4. ชิ้นส่วนของ คอไม้ (knuckle) ส่วนบนให้มีความยาว 18 ซม. และ ด้านล่างยาว 11 ซม. โดยใช้คำสั่ง Rigid Body: Frustum จากนั้นทำการเชื่อมต่อกันระหว่างด้านบนและด้านล่าง โดยใช้คำสั่ง: Position Move

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-40 การสร้างชิ้นส่วนของคอกม้า

5. ชิ้นส่วนของคอกม้า บนคลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนดความยาวเท่ากับ 15 ซม. และรัศมี 2.16 ซม. ดังรูป



รูปที่ 5-41 การสร้างชิ้นส่วนของคอกม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ชั้นส่วนของ Spring โดยวางที่แกนยึดสปริงของปีกนกกลาง โดยใช้ทำมุมกับแนวตั้ง 46 องศา โดยค่าความยืดหยุ่นของสปริงนั้นสามารถเปลี่ยน โดยเลือกที่ Modify



รูปที่ 5-42 การสร้างชั้นส่วนของสปริง

7. ส่วนของล้อ ทำการสร้างโดยคลิกที่คำสั่ง Rigid Body Cylinder เพื่อเป็นการสร้างทรงกระบอกโดยกำหนด ความยาว เท่ากับ 18 ซม. และรัศมี 29 ซม. แล้วกำหนดคุณสมบัติ ให้มวลเท่ากับ 15 กก. ดังรูป



รูปที่ 5-43 การสร้างชั้นส่วนของล้อรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการกำหนด Joint ระหว่างแต่ละชิ้นส่วน ดังนี้

1. สลักกับค้อน ใช้คำสั่ง Joint: Fixed
2. ค้อนกับค้อน ใช้คำสั่ง Joint: Fixed
3. ปีกนกบนกับค้อน ใช้คำสั่ง Joint: Revolute
4. ปีกนกล่างกับค้อน ใช้คำสั่ง Joint: Revolute
5. ปีกนกบนกับ Ground ใช้คำสั่ง Joint: Revolute
6. ปีกนกล่างกับ Ground ใช้คำสั่ง Joint: Revolute

ทำการใส่ แรงที่ล้อด้านใดด้านหนึ่ง ใช้คำสั่ง Applied Force โดยใส่แรงไป 3000 นิวตัน จากนั้นทำการ Simulation ดังรูป



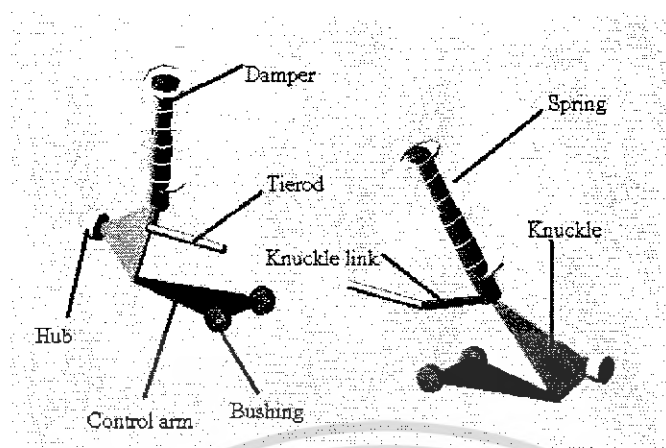
รูปที่ 5-44 การยึดชิ้นส่วนต่างและทำการใส่แรงที่ล้อ

### 5.6 การวาดระบบช่วงล่างลงในโปรแกรม ADAMS/Car Template builder

1. กำหนดฮาร์ดพอยท์ (Hard point) ทั้งหมดลงในโปรแกรม เพื่อเป็นการบอกขนาดชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบช่วงล่าง
2. พิจารณาว่าในแต่ละชิ้นส่วนของระบบช่วงล่างนั้นมีรูปทรงและหน้าที่เป็นอย่างไร เช่น ลิงค์ (Link) อาร์ม(Arm) ทรงกระบอ ก ฯลฯ
3. สร้าง(Create) พาร์ททั้งหมด
4. กำหนดรูปทรง(Geometry) ของพาร์ทตามที่ได้กำหนดในข้อ 2.
5. กำหนดจอยท์(Joint) หรือสิ่งที่ยึดติดกัน(Attachment) ให้กับพาร์ท 2 ชิ้นที่ยึดติดกัน เช่น บานพับ(Revolute joint) หรือ บูช(Bushing)
6. กำหนดมุมแกมเบอรั่มและมุมแคสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6.1 รถไฟฟ้า ด้านหน้า



รูปที่ 5-45 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า

- กำหนดฮาร์ดพอยท์ตามพิกัด ในตารางที่ 5-1
- กำหนดมุมแคมเบอร์ =  $-0.5^{\circ}$  และมุมโท =  $0^{\circ}$
- สร้างพาร์ททั้งหมด 9 ชิ้น ตามตารางที่ 5-2 และขั้นตอนการสร้างตามรูปที่ 5-65 ถึงรูปที่ 5-68
- กำหนดครุพทรงของพาร์ททั้งหมด(ที่จำเป็น) ตามตารางที่ 5-3
- กำหนดค้อยท์และบุชชิ่ง ตามตารางที่ 5-4
- กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบช่วงล่างตามรูปที่ 5-69

หมายเหตุ การสร้างระบบช่วงล่างในโปรแกรม MSC.ADAMS/Car ไม่จำเป็นจะต้องวาดทั้ง 2 ด้าน (ล้อซ้าย-ล้อขวา) เพียงแค่วาดด้านใดด้านหนึ่งก็พอ เพราะโปรแกรมจะทำการสร้างด้านที่เหลืออีกด้านหนึ่งโดยอัตโนมัติ

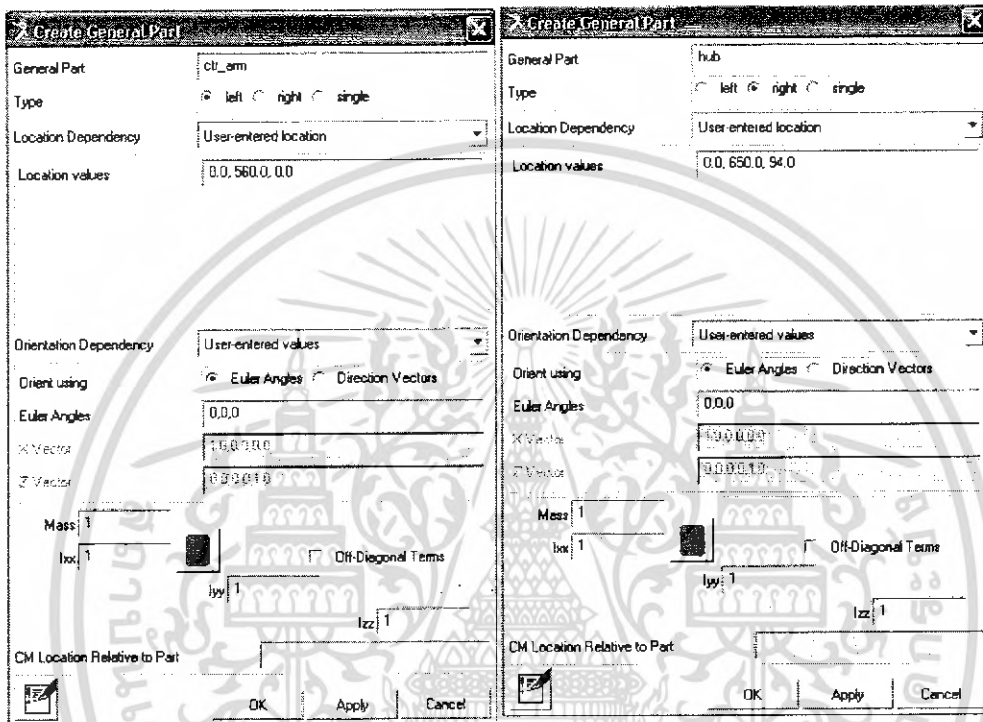
ชื่อของฮาร์ดพอยท์	พิกัด
arm_front	-80.0,-280.0,0.0
arm_outer	0.0,-560.0,0.0
arm_rear	80.0,-280.0,0.0
spring_lower	-120.0,-420.0,290.0
strutz_upper	-240.96,-337.4,550.0
strut_lower	-95.7,-440.0,220.0
tierod_inner	-235.7,-165.0,220.0
tierod_outer	-235.7,-360.0,220.0
wheel_center	0.0,-650.0,94.0

ตารางที่ 5-1 แสดงพิกัดของฮาร์ดพอยท์

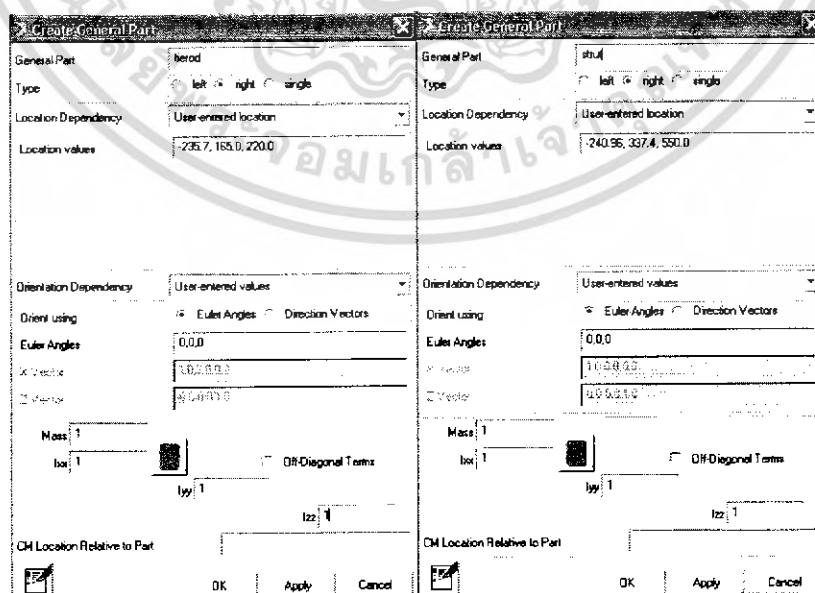
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อของพาร์ท	ชนิดของพาร์ท
Ctr_arm, Knuckle, Strut, Tierod, Hub	General part
Strut_to_frame, Arm_to_frame, Tierod_to_steering	Mount part
Hub_bearing (เป็นตัวกำหนดมุมแกมเบอร์และโท)	Construction frame

ตารางที่ 5-2 แสดงชนิดของพาร์ท

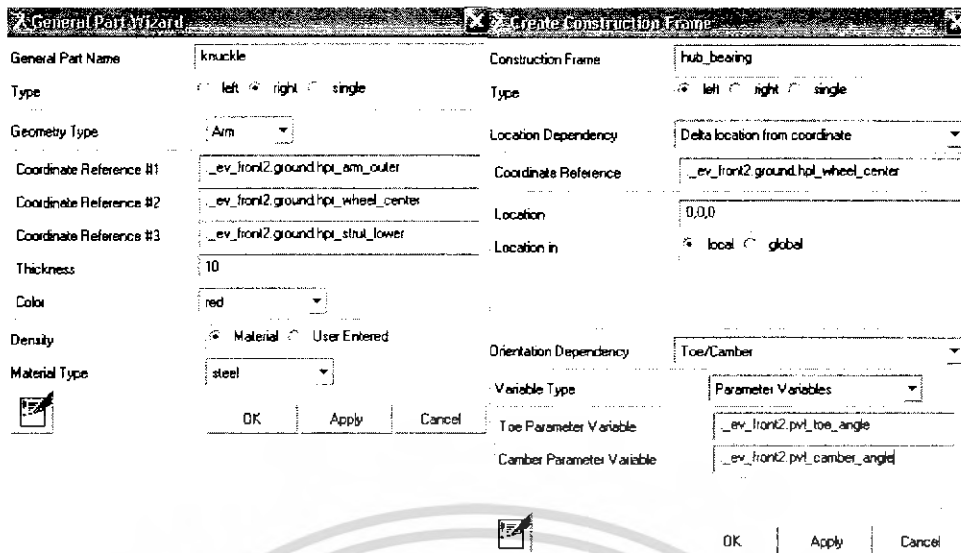


รูปที่ 5-46 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท ctr\_arm และ hub

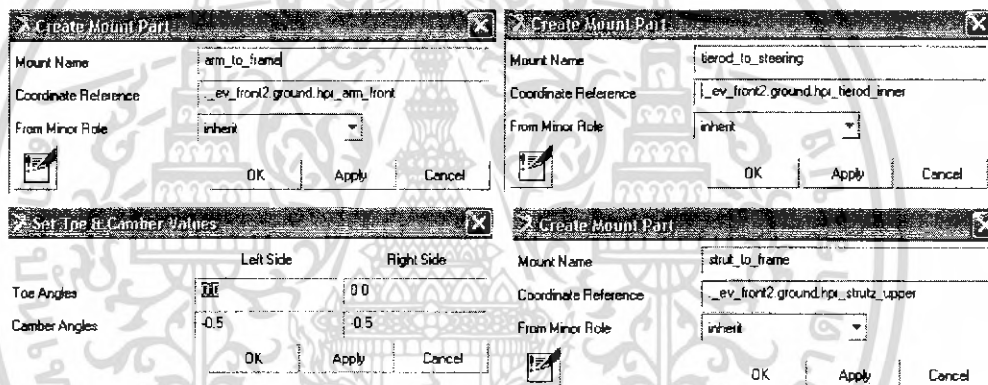


รูปที่ 5-47 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท tierod และ strut

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-48 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท knuckle และ hub\_bearing



รูปที่ 5-49 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท arm\_to\_frame, tierod\_steering, strut\_to\_frame และการกำหนดค่ามุมแคมเบอร์และโท

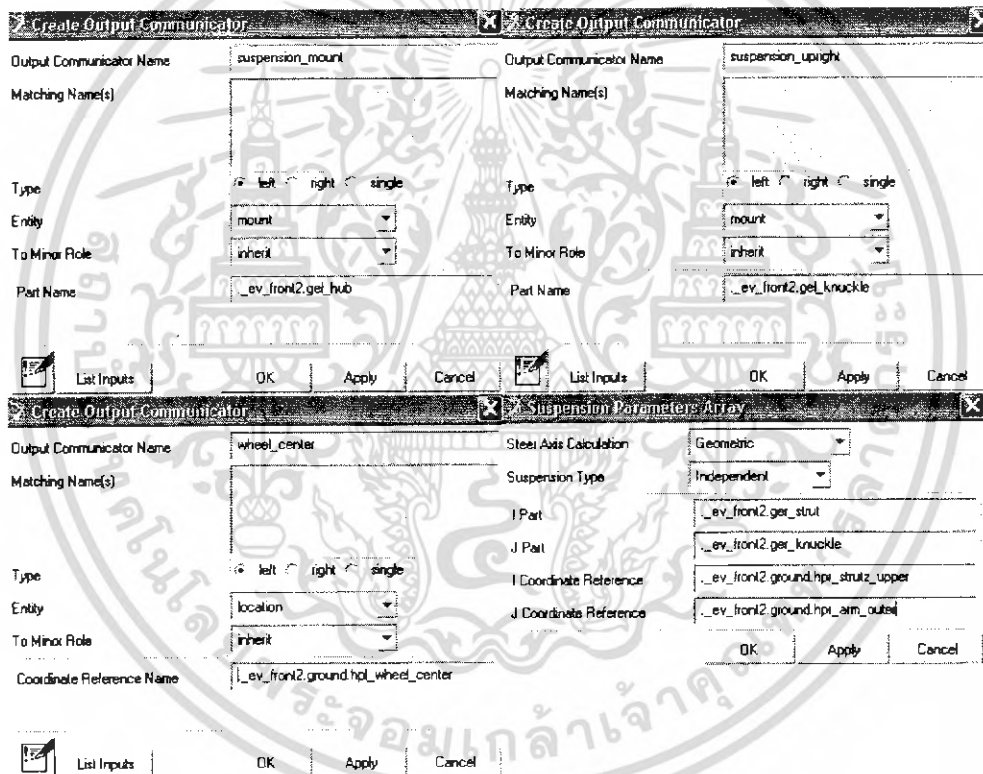
ชื่อพาร์ท	รูปทรง	ชาร์ตพอยท์ที่เกี่ยวข้อง
Ctr_arm	Arm	arm_front, arm_outer, arm_rear
Knuckle	Arm	strut_lower, wheel_center, arm_outer
Tierod	Link	tierod_inner, tierod_outer
Tierod_link	Link	strut_lower, tierod_outer
Hub	Cylinder	wheel_center
Strut	Force	strut_lower, strutz_upper
Spring	Force	spring_lower, spring_upper

ตารางที่ 5-3 แสดงรายละเอียดรูปทรงของพาร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่พารท์ที่ยึดกัน	ยึดติดกันแบบ	ฮาร์ดพอยท์ที่เกี่ยวข้อง
Ctr_arm กับ Arm_to_frame	Bushing และ Revolute joint	arm_front, arm_rear
Ctr_arm กับ Knuckle	Spherical joint	arm_outer
Knuckle กับ Hub	Revolute joint	wheel_center
Tierod กับ Tierod_link	Spherical joint	tierod_outer
Tierod กับ Tierod_steering	Hooke joint	tierod_inner(ขวา), tierod_outer(ซ้าย)
Strut กับ Strut_to_frame	Bushing,Spherical joint และ Translation joint	strut_lower, strutz_upper

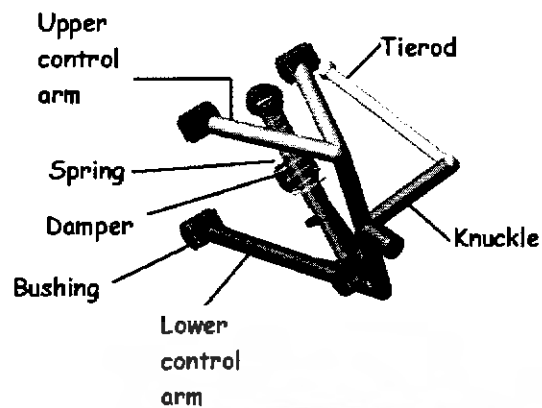
ตารางที่ 5-4 แสดงรายละเอียดของจอยท์และบูชิ่ง



รูปที่ 5-50 แสดงหน้าต่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6.2 รถE20-ด้านหน้า



รูปที่ 5-51 แสดงชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถ อี-20

- กำหนดฮาร์ดพอยท์ตามพิกัด ในตารางที่ 5-5
- กำหนดมุมแคมเบอร์ =  $-0.5^\circ$  และมุมโท =  $0^\circ$

จุดที่กำหนดเกี่ยวกับ ฮาร์ดพอยท์

ชื่อของฮาร์ดพอยท์	พิกัด
Lca_front	100,-235,195
Lca_rear	-100,-235,195
Lca_outer	0,-560,195
Wheel_center	0,-600,300
Tierod_outer	150,-565,360
Top_mount	0,-297,425
Subframe_front	-400,-450,150
Subframe_rear	400,-450,150
Tierod_inner	150,-270,385
Uca_front	57.5,-315,475
Uca_rear	-147.5,-345,475
Uca_outer	-45,-540,475
Lwr_strut_mount	0,-490,195
Drive_shaft_inr	0,-200,225

ตารางที่ 5-5 แสดงพิกัดของฮาร์ดพอยท์

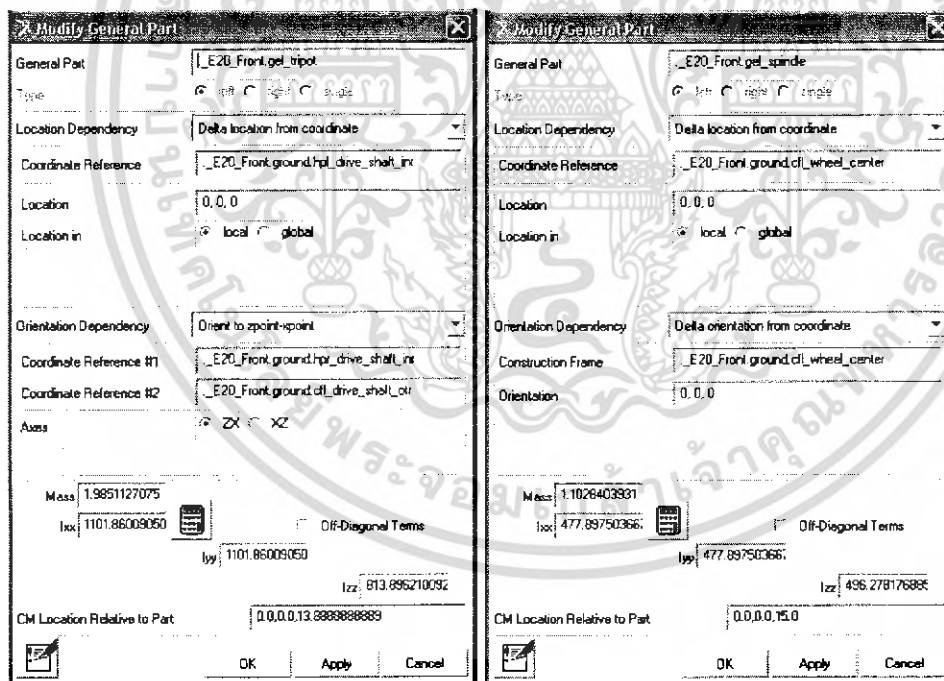
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดที่กำหนดเกี่ยวกับพาร์ทและชนิดของพาร์ท

ชื่อของพาร์ท	ชนิดของพาร์ท
Lower_control_arm, upright, subframe, upper_strut, tierod, upper_control_arm, lower_strut, spindle, tripot	General part
Tierod_to_steering, subframe_to_body, strut_to_body, uca_to_body, tripot_to_differential	Mount part
Wheel_center, lwr_strut_ext, top_mount_ext, subframe_fixed, ARB_pickup, lwr_spring_seat, drive_shaft_otr, drive_shaft_inr, lca_front_middle, lca_rear_middle	Construction frame

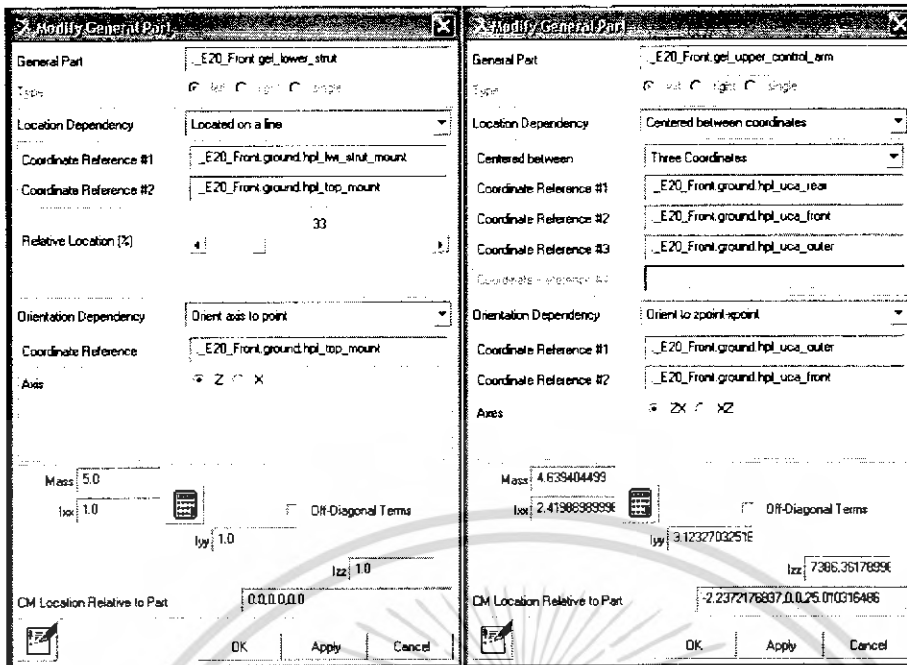
ตารางที่ 5-6 แสดงชนิดของพาร์ท

วิธีการสร้างพาร์ทชนิด เจเนอรัลพาร์ท

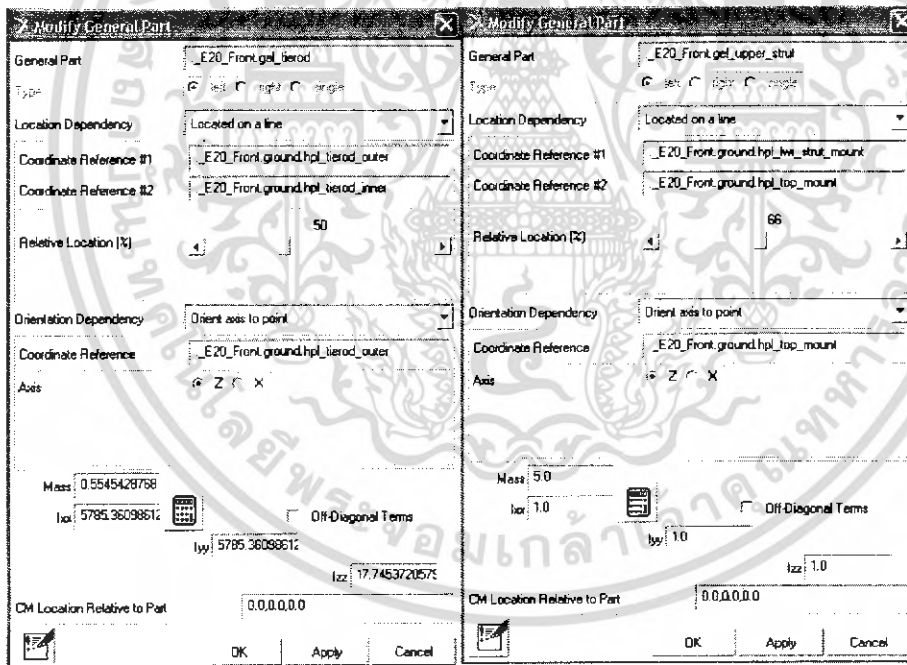


รูปที่ 5-52 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท tiepot และ spindle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

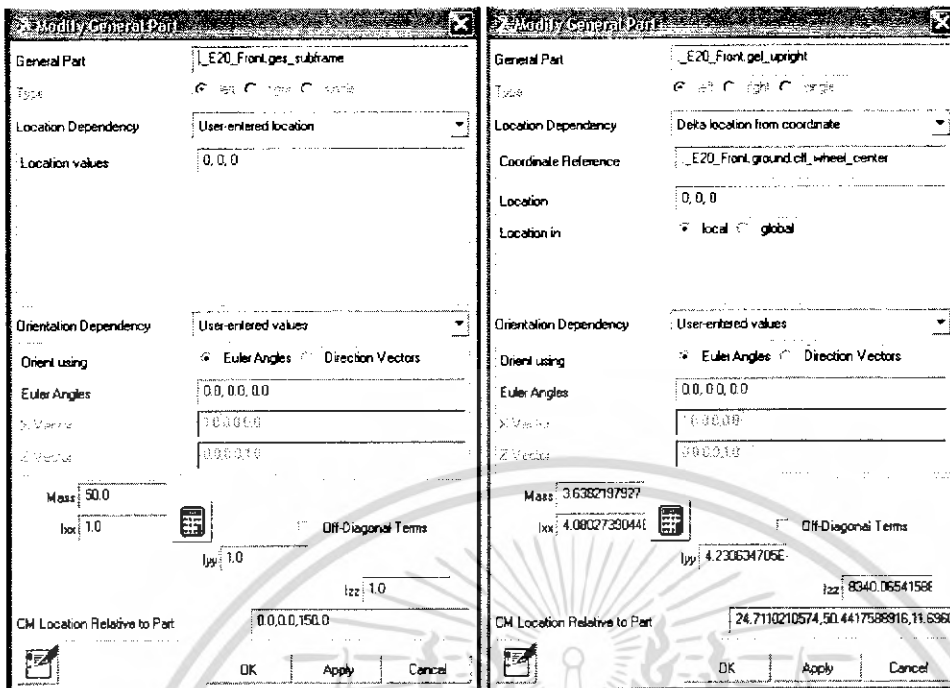


รูปที่ 5-53 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท lower strut และ upper control\_arm

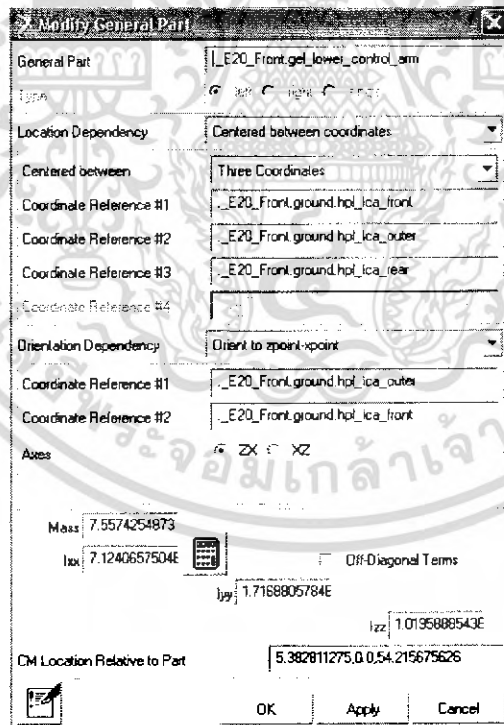


รูปที่ 5-54 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท tierod และ upper\_strut

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



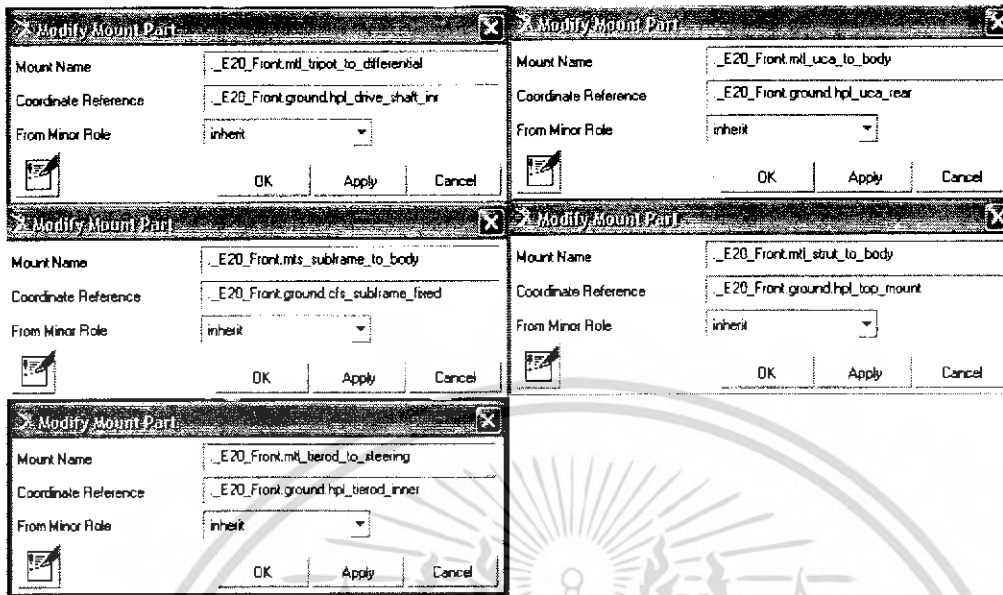
รูปที่ 5-55 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท subframe และ upright



รูปที่ 5-56 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท lower\_control\_arm

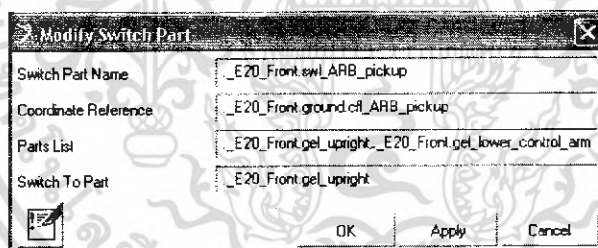
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีสร้างพาร์ทชนิด เม้าท์พาร์ท



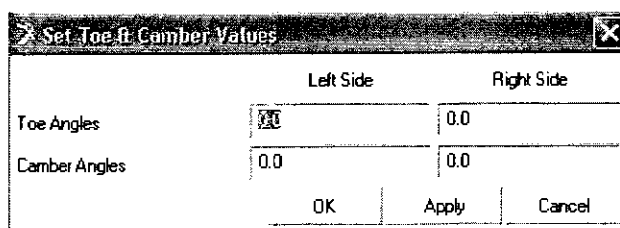
รูปที่ 5-57 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท tiepot\_to\_differential, uca\_to\_body, strut\_to\_body, subframe\_to\_body, tierod\_to\_steering

## วิธีการสร้างพาร์ทชนิด สวิตช์พาร์ท



รูปที่ 5-58 แสดงหน้าต่างการสร้างพาร์ท ARB\_pickup

## การกำหนดมุมแคมเบอร์และมุมโท



รูปที่ 5-59 กำหนดมุมโทและแคมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จุดที่กำหนดเกี่ยวกับ จีโอเมทรี

ชื่อพาร์ท	รูปทรง	ฮาร์ดพอยท์ที่เกี่ยวข้อง
Lower_control_arm	Link	lca_front, lca_outer
Tierod	Link	Tierod_outer, tierod_inner
Upper_control_arm	Link	Uca_front, uca_outer
Upright	Link	Uea_front, uca_outer
Upright	Cylinder	Upright_spindle_inr
Tierod_inr	Ellipsoid	Tierod, tierod_inner

## ตารางที่ 5-7 แสดงรายละเอียดรูปทรงของพาร์ท

## จุดที่กำหนดเกี่ยวกับ แอทแทชเม้นท์

คู่พาร์ทที่ยึดกัน	ยึดติดกันแบบ	ฮาร์ดพอยท์ที่เกี่ยวข้อง
Whl_wheel กับ gel_spindle	Revolute joint	Cfl_spin_axis
Ges_steering_input_slider กับ ground	Translational	Hps_steering_input_slider
Ges_steering_input_translation กับ ground	Translational	Hps_steering_input_translation
Ges_steering_input_rotation กับ ground	Translational	Hps_steering_input_rotation
Gel_diff_output กับ ground	Revolute joint	Cfl_differential_output
Gel_table กับ gel_jack	Revolute joint, fixed	Cfl_jack_ref
Ger_table กับ gel_table	Inplane	Cfr_wheel_contact_point กับ cfl_wheel_contact_point
Gel_upper_strut กับ mtl_strut_to_body	Bushing	Hpl_top_mount
Gel_upper_control_arm กับ mtl_uca_to_body	Bushing	Hpl_uca_front กับ hpl_uca_rear
Gel_lower_strut กับ gel_lower_control_arm	Bushing	Hpl_lwr_strut_mount
Gel_lower_control_arm กับ ges_subframe	Bushing	Hpl_lca_front กับ hpl_lca_rear

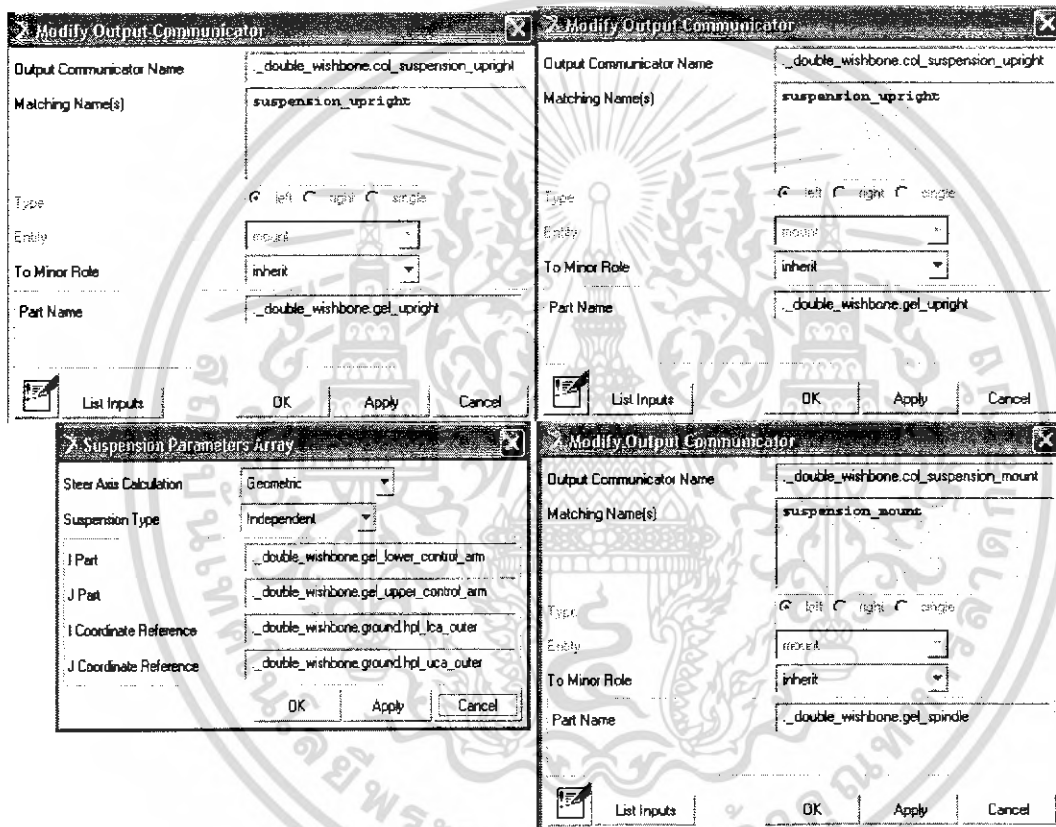
## ตารางที่ 5-8 แสดงรายละเอียดของจอยท์และบุชชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดที่กำหนดเกี่ยวกับ ฟอรัช

คู่พาร์ทที่ยึดกัน	แรงที่กระทำด้วย	ฮาร์ดพอยท์ที่เกี่ยวข้อง
Mtl_strut_to_body ก๊ีบ gel_lower_strut	Spring, damper	Hpl_top_mount ก๊ีบ cfl_lwr_spring_seat
Gel_upper_strut ก๊ีบ gel_lower_strut	Bumpsrop	Hpl_top_mount ก๊ีบ cfl_lwr_strut_ext

ตารางที่ 5-9 แสดงรายละเอียดของแรง

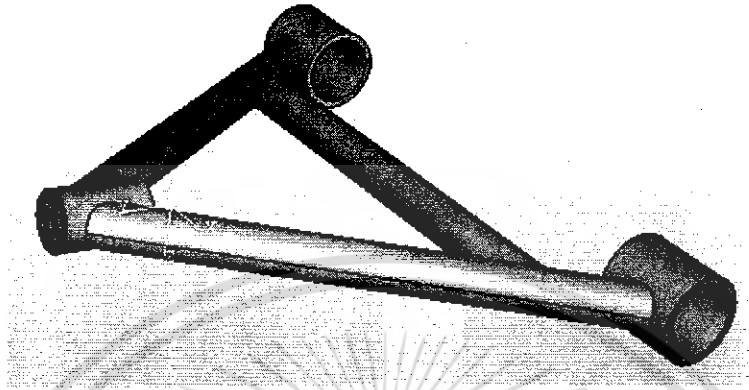


รูปที่ 5-60 แสดงหน้าต่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.7 การวิเคราะห์แบบจำลองในโปรแกรม ABAQUS

หัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายของปีกนกโดยวัดขนาดของแรงที่กระทำต่อปีกนกจากโปรแกรม MSC.ADAMS/View ซึ่งมีขนาดและทิศทางตามตารางที่ 5-10 และรูปที่ 5-61



รูปที่ 5-61 แสดงทิศทางของแกนอ้างอิง

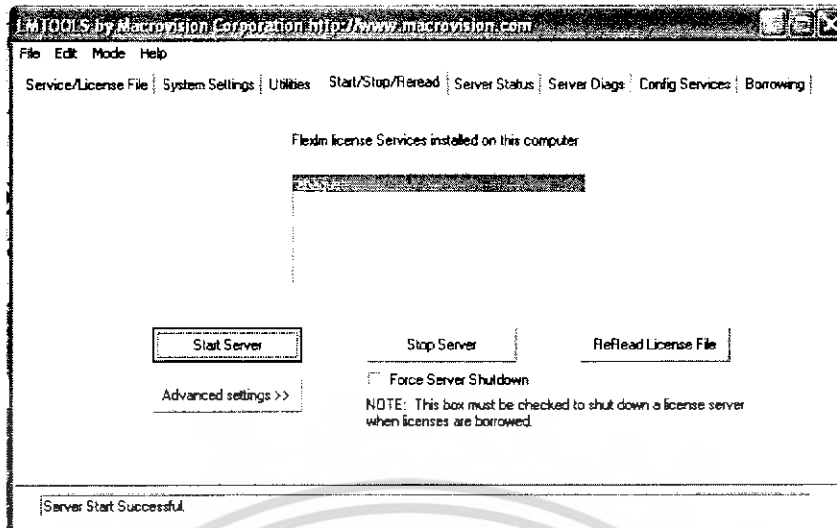
	ขนาดของแรง		
	แกน X (นิวตัน)	แกน Y (นิวตัน)	แกน Z (นิวตัน)
ปีกนกล้างด้านหน้า	-1222.5914	1222.5914	-1445.02
ปีกนกล้างด้านหลัง	-2001.1493	2001.1493	-638.30
ปีกนกบนด้านหน้า	769.5157	-1328.5192	485.69
ปีกนกบนด้านหลัง	790.1385	-1968.13	-381.33

ตารางที่ 5-10 แสดงขนาดของแรงที่กระทำต่อปีกนก

โดยมีขั้นตอนการทำดังนี้

1. เปิดโปรแกรม ABAQUS โดยเปิด ABAQUS Licensing และเลือก Start/Stop/Reread แล้วเลือก ABAQUS แล้วกด Start Sever ตามรูปที่ 5-62
2. เปิดโปรแกรม ABAQUS CAE หน้าจอแสดงดังรูปที่ 5-63
3. สร้าง Part ขึ้นมาหรือ Import เข้ามาจากโปรแกรมวาดรูปอื่นๆก็ได้ ในที่นี้จะ Import เข้ามาจากโปรแกรม Solid work 2005 โดยคลิกที่ File เลือก Import และ Part
4. กำหนดวัสดุโดยคลิกที่ Module แล้วเลือก Property เพื่อกำหนดชนิดของวัสดุที่ใช้ในงานนี้ โดยคลิกที่ Create material โดยกำหนดให้มีค่า Density เท่ากับ 0.0079 กก./มม.<sup>3</sup> ค่า Young's Modulus เท่ากับ 120000 นิวตัน/มม.<sup>2</sup> และค่า Poisson Ratio เท่ากับ 0.31
5. ต่อจากนั้นสร้าง Section โดยเลือก Create section แล้วเลือกวัสดุที่สร้างไว้ แล้วกำหนด Section นั้นให้  
ใช้งาน

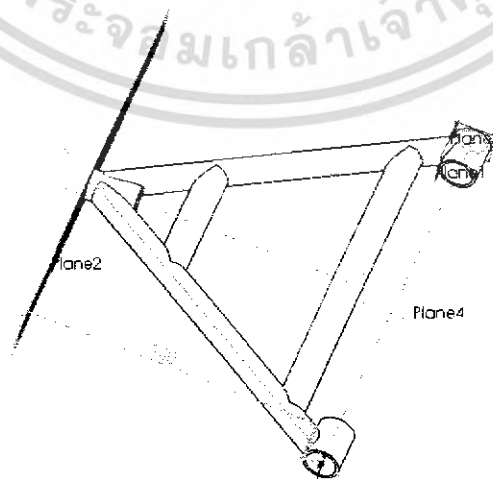
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-62 หน้าต่าง ABAQUS Licensing

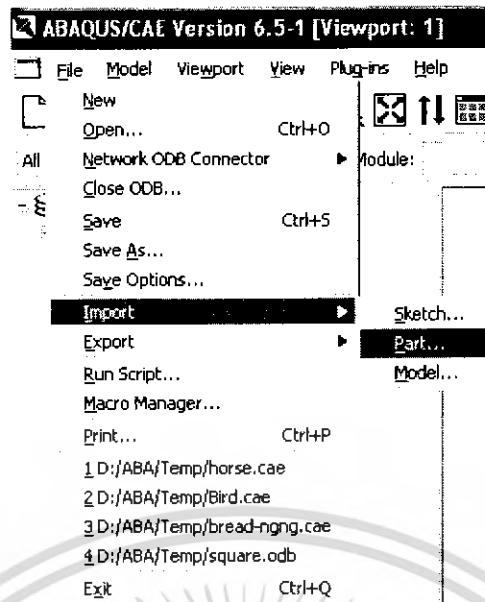


รูปที่ 5-63 แสดงหน้าจอขณะเปิด โปรแกรม ABAQUS

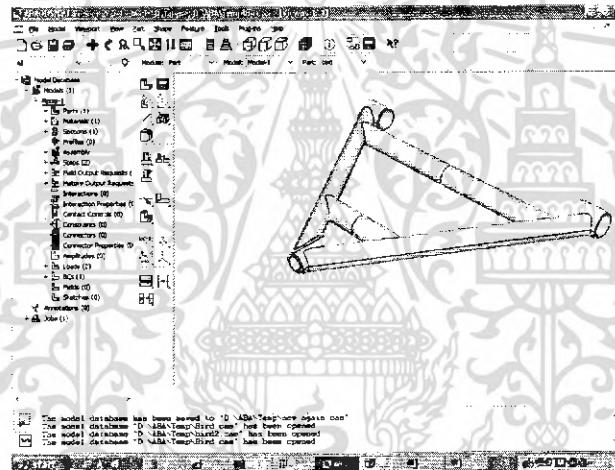


รูปที่ 5-64 ปีกนกที่วาดในโปรแกรม Solid Work 2005

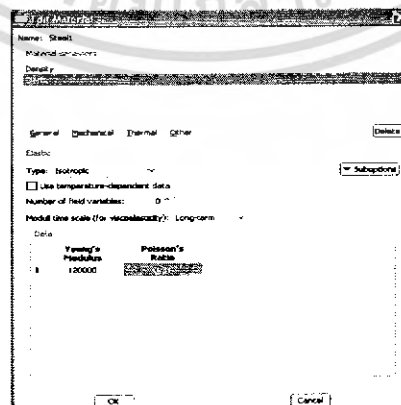
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-65 ขั้นตอนการ Import files จากโปรแกรม Solid work 2005

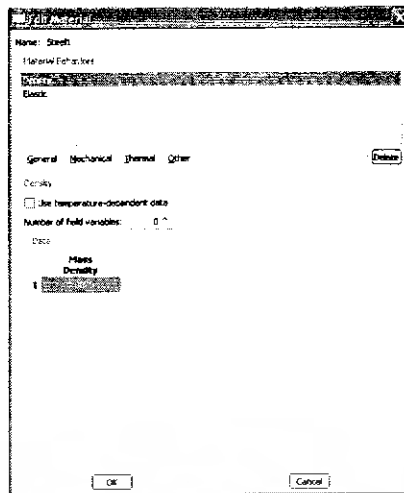


รูปที่ 5-66 แสดงภาพป๊อปอัพที่ Import เข้ามาใน โปรแกรม ABAQUS แล้ว

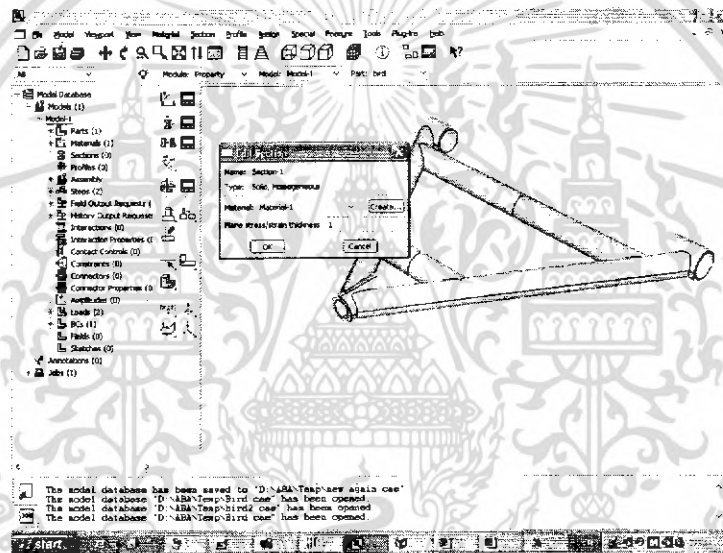


รูปที่ 5-67 แสดงการกำหนดค่า Elastic ในวัสดุ

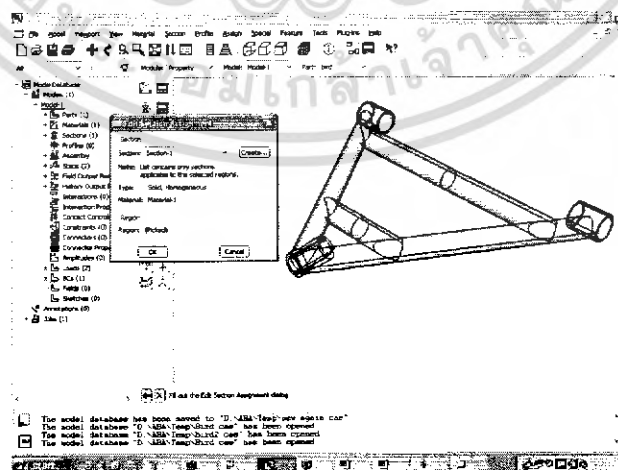
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-68 แสดงการกำหนดค่า Density ในวัสดุ

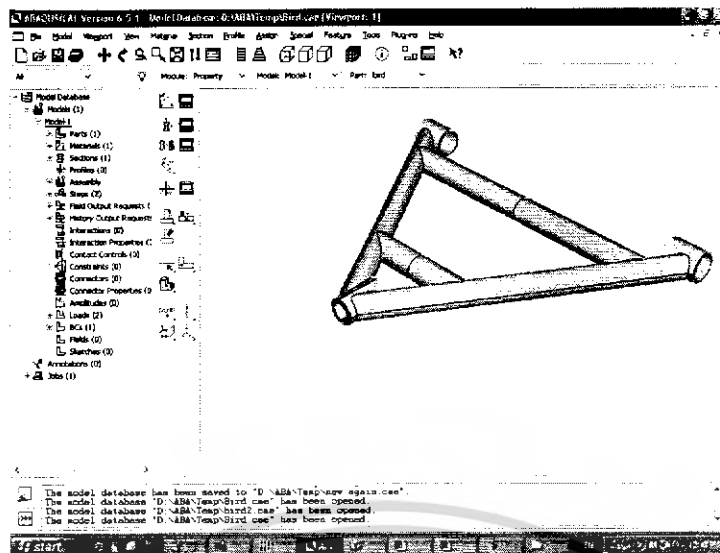


รูปที่ 5-69 แสดงการสร้าง Section



รูปที่ 5-70 แสดงการกำหนด Section ลงในปีกนก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



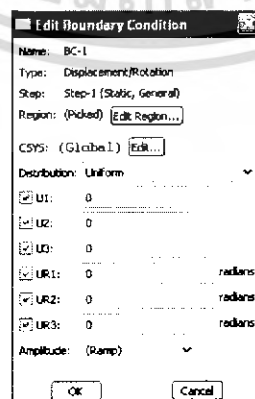
รูปที่ 5-71 แสดงภาพหลังกำหนด Section เสร็จแล้ว

6. กำหนด Step การทำงานโดยเลือกที่ Module Step แล้วเลือก Create step โดยกำหนด Step เป็น Static, General และมีเพียง 1 Step (ชิ้นงานจะไม่เคลื่อนที่) แล้วกด OK



รูปที่ 5-72 แสดงการสร้าง Step

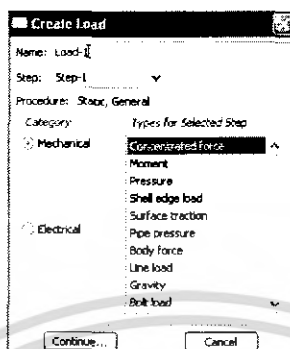
7. ต่อกำหนด Boundary Condition เลือกที่ Module Load ทำการยึดหุ้ยัด 2 ข้าง ไม่ให้เคลื่อนที่และหมุนในแกนใดๆ



รูปที่ 5-73 แสดงการสร้างและตำแหน่งของ BC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. กำหนด Load ที่ห้วงด้านหน้าซึ่งจะต่อกับคอมม่า โดยเลือกชนิดของโหลดเป็น Concentrated Force คลิ๊กที่จุดเชื่อมต่อกับคอมม่า (ตรงข้ามหูยึด ทั้ง 2 ข้าง) แล้วใส่แรงตามแกนที่ได้ระบุไว้แล้วตามตารางที่ 5-10



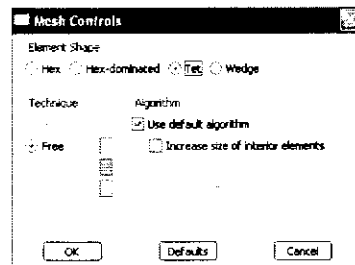
รูปที่ 5-74 แสดงการสร้าง Concentrated Force

9. ที่ Module Mesh เป็นขั้นตอนการตี Mesh แต่เนื่องจากรูปพื้นที่ส่วนมากเป็นผิวโค้งจึงทำให้ตี Mesh ยาก จึงแก้ปัญหาโดยกำหนดใช้ Mesh 3 เหลี่ยมในการตีแทน Mesh 4 เหลี่ยม เพื่อความสะดวกและรวดเร็ว โดยเลือกที่ Assign mesh controls เลือกชนิดที่ต้องการ แล้วที่แถบบนเลือก Tet แล้วกด OK จากนั้นปีกนกจะเปลี่ยนจากสี่เหลี่ยมเป็นสี่มุม

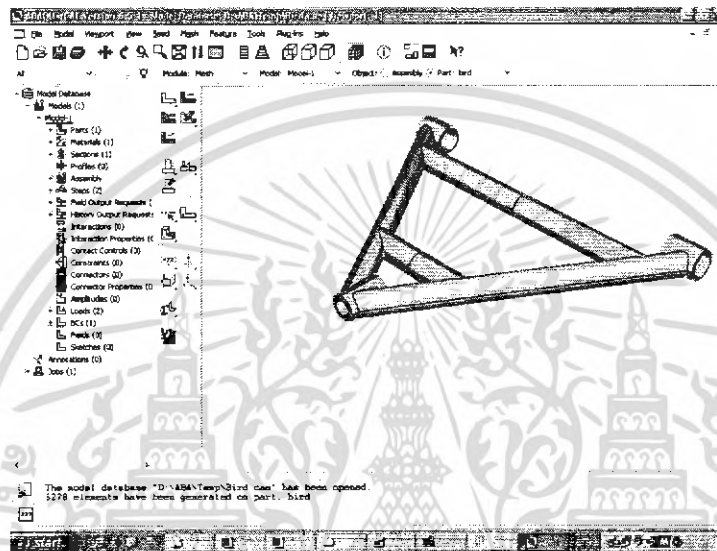


รูปที่ 5-75 แสดงรูปปีกนกก่อนเลือกชนิดของ Mesh 3 เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

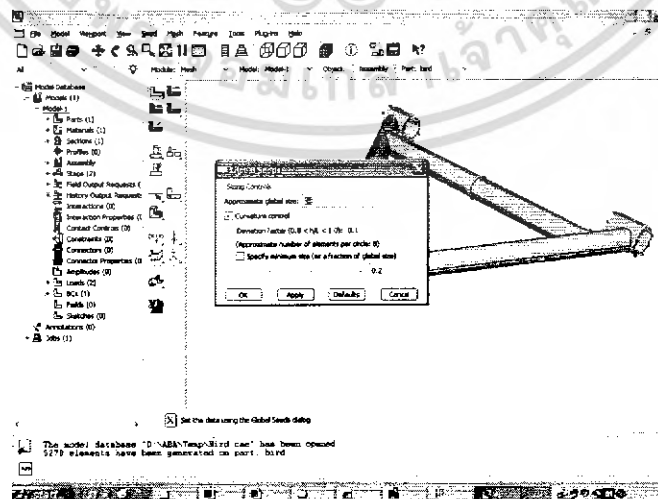


รูปที่ 5-76 แสดงการ Assign mesh controls



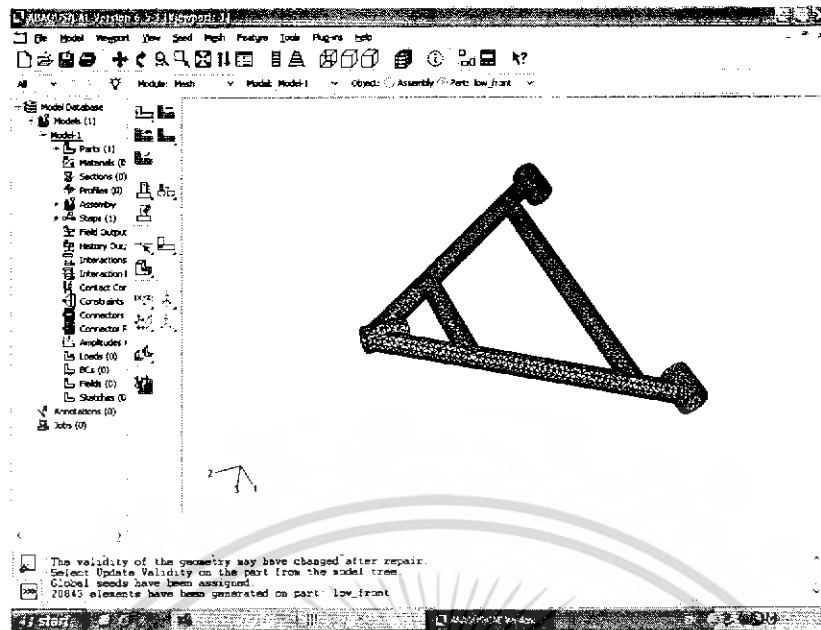
รูปที่ 5-77 แสดงภาพหลัง Assign mesh controls

10. หลังจากนั้นก็ Seed part instance ตามปกติ Approximate size เป็น 8 และ Deviation factor เป็น 0.1 แล้วก็ mesh part เพื่อติ mesh



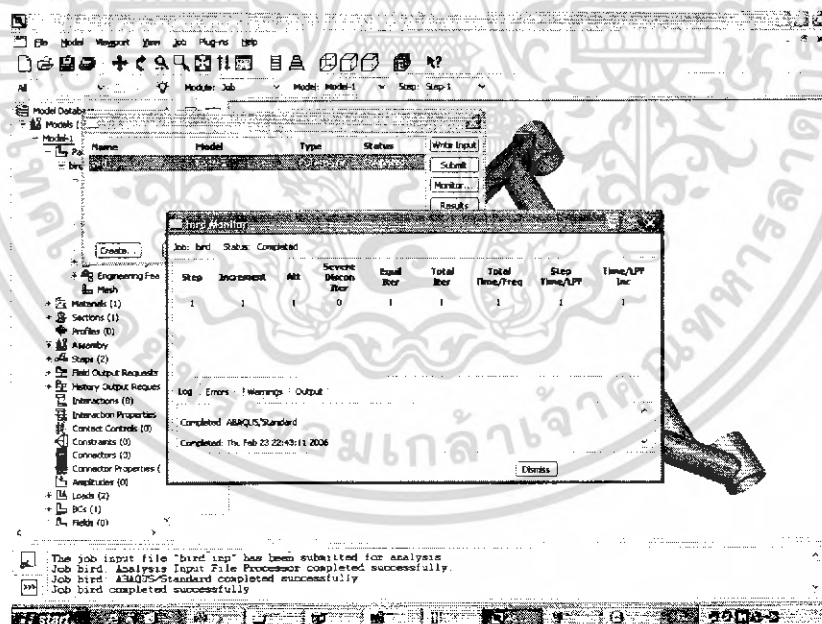
รูปที่ 5-78 แสดงการ Seed part instance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



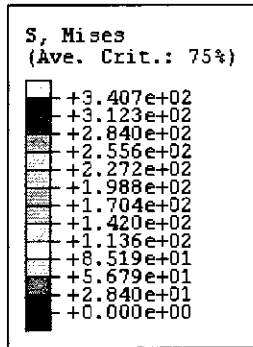
รูปที่ 5-79 แสดงการรูปหลังตี Mesh เสร็จแล้ว

11. เลือกที่ Module job เพื่อวิเคราะห์ที่งาน Create job แล้ว Submit ที่ Job Manager เมื่อรันเสร็จแล้วดูผลโดยกดที่ Result

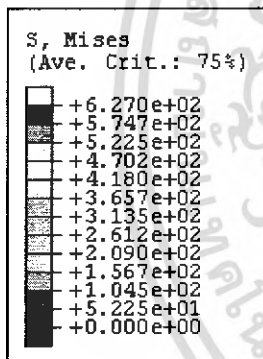


รูปที่ 5-80 แสดงภาพระหว่างรันโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

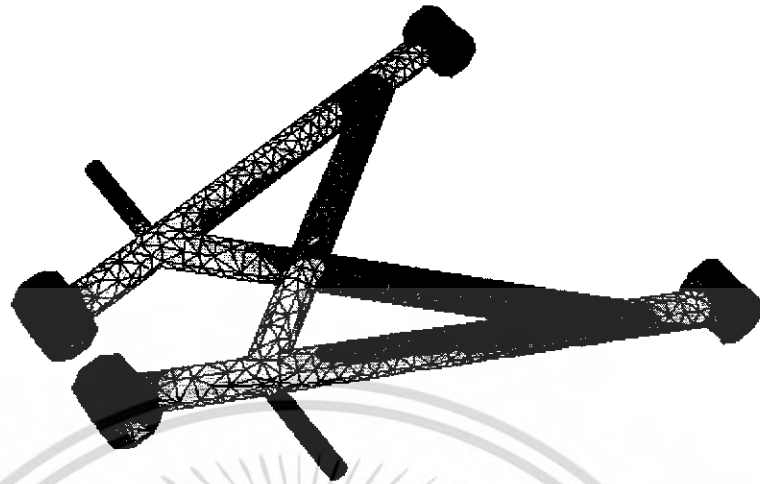
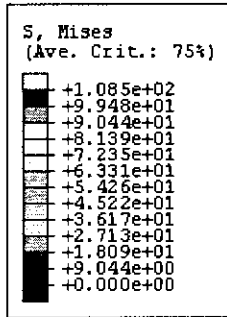


รูปที่ 5-81 แสดงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น ของปีกนกทางด้านหน้า

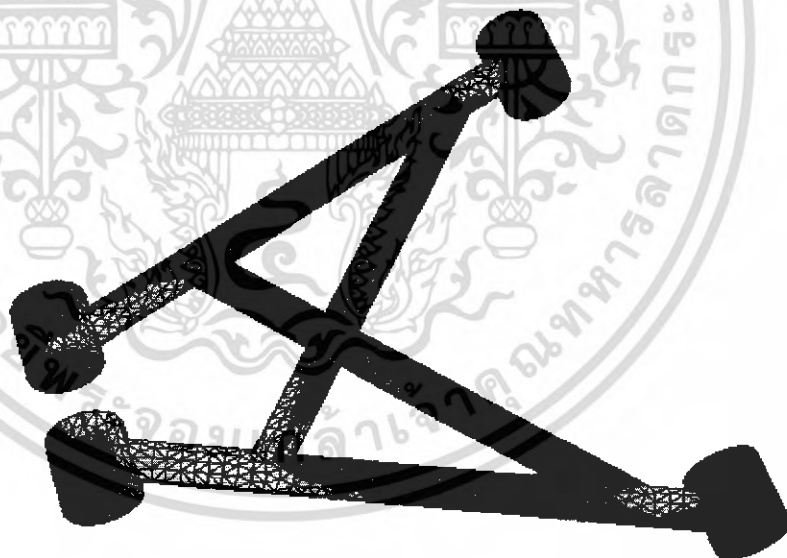
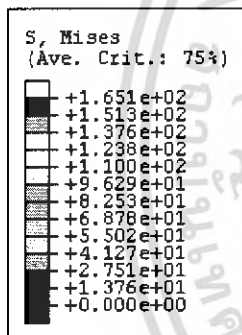


รูปที่ 5-82 แสดงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น ของปีกนกบนด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-83 แสดงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น ของปีกนกทางด้านหลัง



รูปที่ 5-84 แสดงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น ของปีกนกบนทางด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์

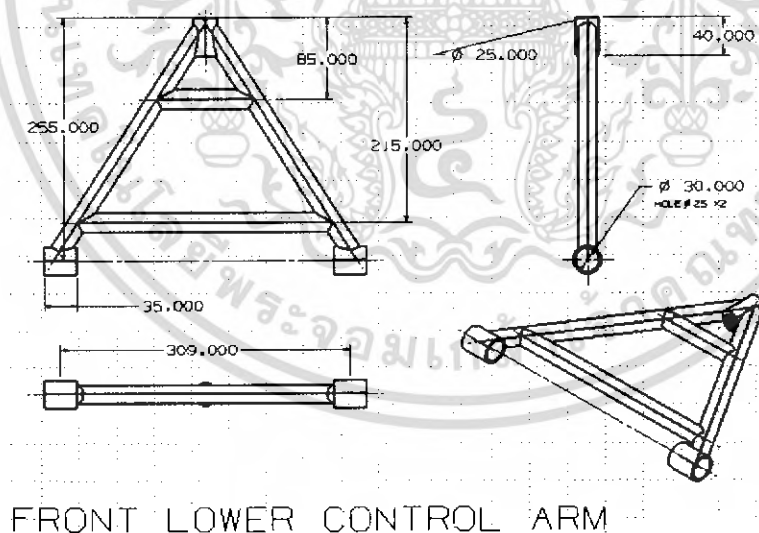
### 6.1 สรุปผล

6.1.1 ในการออกแบบระบบช่วงล่างของรถยนต์ที่คืนัน ผู้ออกแบบได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบช่วงล่างให้ดีขึ้นในด้านความมีเสถียรภาพและความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่างๆ โดยความมีเสถียรภาพและความแข็งแรง มีผลมาจากตัวแปรต่างๆ ในการออกแบบ เช่น ผลของมุมแคมเบอร์ แคสเตอร์และโท เป็นต้น ซึ่งตัวแปรต่างๆเหล่านี้ สามารถดูผลได้จากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม MSC.ADAMS และ ABAQUS

6.1.2 โปรแกรม MSC. ADAMS เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบระบบช่วงล่างและเป็นโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะในการออกแบบด้วยโดยการการทำงานได้ทำการอธิบายไว้แล้วในส่วนของเนื้อหา

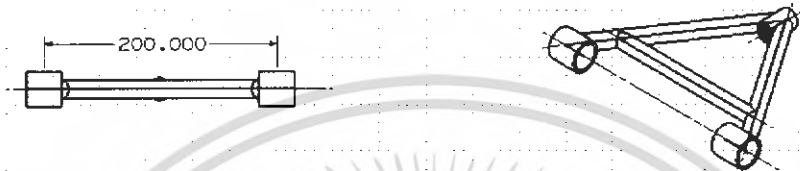
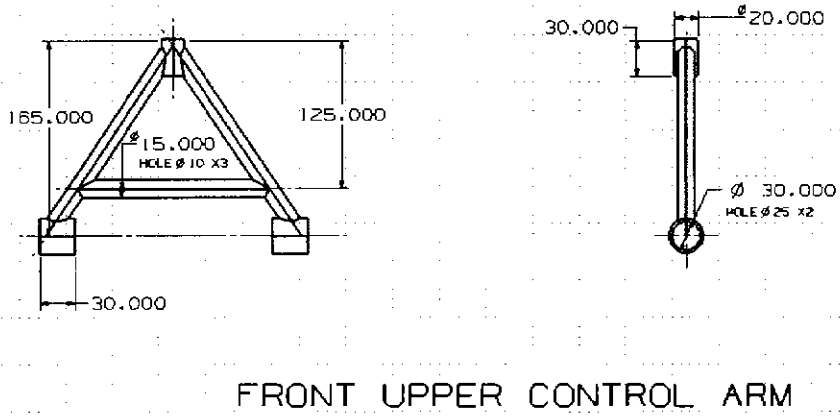
6.1.3 โปรแกรม ABAQUS เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่างๆ เมื่อรับแรงกระแทกเนื่องจากน้ำหนักของตัวรถใน กรณีที่รถ ตกหลุม ขึ้นลูกระนาด หรือวิ่งบนถนนขรุขระ

6.1.4 ขนาดและความยาวของปีกนกที่ได้ สามารถสรุปรวมเป็นภาพฉายดังรูป

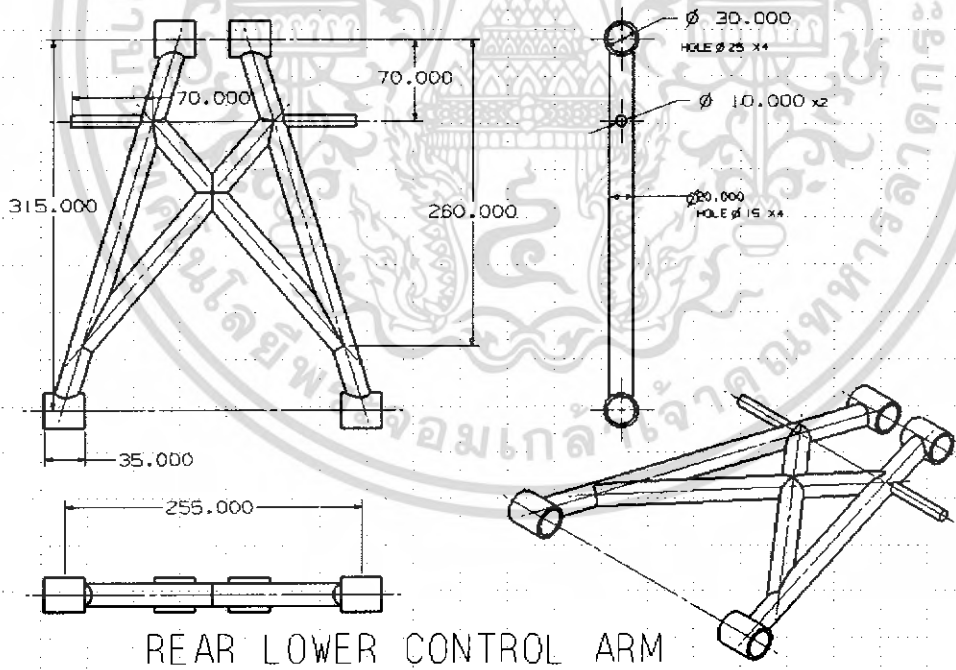


รูปที่ 6-1 ปีกนกล่างด้านหน้าของรถอี-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

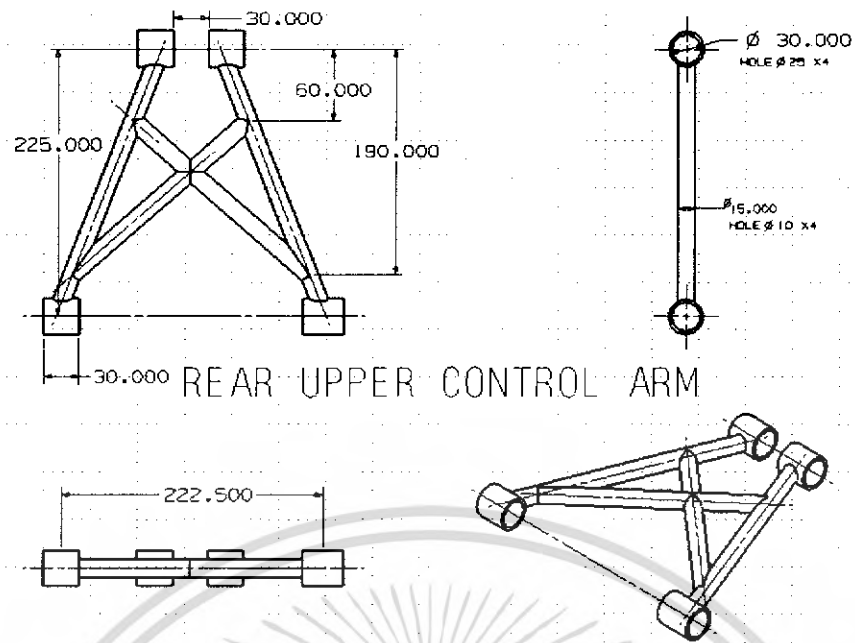


รูปที่ 6-2 ปีกนกบนด้านหน้าของรถอี-20



รูปที่ 6-3 ปีกนกกลางด้านหลังของรถอี-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-4 ปีกนกบนด้านหลังของรถอี-20

6.1.5 การหาค่าความยืดหยุ่นของสปริงสามารถทำได้โดยวิธีจำลองการสั่นของระบบช่วงล่างเป็นการสั่นแบบอิสระ โดยใช้ทฤษฎีของวิชา Vibration โดยให้ความถี่ธรรมชาติของการสั่นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แล้วจึงใช้โปรแกรม MSC.ADAMS ช่วยในการหาค่าความยืดหยุ่นเมื่อได้ค่าความยืดหยุ่นของสปริงแล้วจึงนำมาคำนวณต่อโดยใช้ทฤษฎีความเสียหายตรวจสอบได้ว่าสปริงที่ออกแบบนั้นรับแรงได้เพียงพอต่อความต้องการหรือไม่ โดยค่าความยืดหยุ่นที่ใช้กับระบบช่วงล่างได้แสดงไว้แล้วตามตารางที่ 3-5

6.1.6 จากการวิเคราะห์หลักศาสตร์ของระบบช่วงล่างในหัวข้อ 4.4 นั้นทำให้สามารถพิสูจน์ได้ว่าระบบช่วงล่างชนิดปีกนกสามารถควบคุมมุมแคมเบอร์ ได้ดีกว่าระบบช่วงล่างชนิดแมคเฟอร์สันสตรัท ซึ่งตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

## 6.2 วิจารณ์ผล

ขั้นตอนในการออกแบบระบบช่วงล่างนั้น อาจเกิดความคลาดเคลื่อน (Error) ในการออกแบบโปรแกรมได้ เพราะในการกำหนดพิกัดต่างๆ วัสดุที่ใช้หรือโหนดที่กระทำอาจจะผิดพลาดไปจากความจริงที่เกิดขึ้นเล็กน้อย ทำให้ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม MSC.ADAMS และ ABAQUS นั้นอาจจะคลาดเคลื่อนได้

## 6.3 ปัญหาที่พบ

ในการออกแบบระบบช่วงล่างปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากสาเหตุ ดังนี้

6.2.1. ปัญหาที่เกิดจากแรงจากน้ำหนัก(Spring Mass)ที่กระทำตรงตำแหน่งของช่วงล่างด้านหน้าและด้านหลังเพราะในการคำนวณน้ำหนักจุดศูนย์กลางของ Spring Mass นั้นตำแหน่งของจุดศูนย์กลางอาจมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคลาดเคลื่อนได้เพราะว่าการออกแบบการวางตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆบนรถ ตัวอย่างเช่น ตำแหน่งเครื่องยนต์ คนนั่ง เป็นต้นนั้นอาจจะคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริงเพราะว่าในการติดตั้งชิ้นส่วนต่างๆบนรถจริงนั้นย่อมมีปัญหาทางพื้นที่ที่จะวางชิ้นส่วนทำให้อาจมีการเคลื่อนจากตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ จึงส่งผลแรงของน้ำหนัก(Spring mass) ที่กระทำตรงตำแหน่งของช่วงล่างด้านหน้าและด้านหลังนั้นอาจคลาดเคลื่อนไปจากของจริงได้ ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณการออกแบบสปริงที่ใช้ในระบบช่วงล่าง

6.2.2. ปัญหาที่เกิดจากการเขียนแบบจำลองระบบช่วงล่างในโปรแกรม MSC.ADAMS นั้นในการออกแบบนั้นอาจจะเกิดจากเคลื่อนจากของระบบที่สร้างจริงไปเล็กน้อยเนื่องมาจากรูปแบบชิ้นส่วนของจริงที่สร้างขึ้นกับรูปแบบชิ้นส่วนของระบบช่วงล่างที่เขียนแบบจำลองในโปรแกรม MSC.ADAMS นั้นอาจจะมีข้อแตกต่างเล็กน้อยซึ่งอาจส่งผลต่อผลตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อเสถียรภาพรถที่ได้จากโปรแกรม MSC.ADAMS นั้นอาจคลาดเคลื่อนจากของจริงเล็กน้อย

6.2.3. ปัญหาจากการทำงานร่วมกันกับกลุ่มทีมงานระบบบังคับเลี้ยว กลุ่มเฟรมและทีมงานฝ่ายสถาปัตยกรรม โดยปัญหามีดังนี้

- ทีมงานฝ่ายสถาปัตยกรรม : ทีมงานฝ่ายสถาปัตยกรรมจะเป็นผู้กำหนดมิติต่างๆของรถว่าควรจะมีขนาดความยาวและความกว้างเท่าไร ทำให้ไม่ได้รับอิสระในการออกแบบตรงส่วนนี้มากนัก เช่น ระยะฐานล้อ ระยะล้อหน้า แต่ข้อดีที่ได้รับจากตรงนี้คือ รถมีความสวยงาม ซึ่งเป็นจุดเด่นที่สามารถนำไปแข่งกับหลายคันอื่นๆได้
- ทีมงานกลุ่มเฟรม : ทีมงานเฟรมจะเป็นคนริเริ่มในการออกแบบขนาดของรถ โดยทีมงานฝ่ายนี้จะเน้นไปทางด้านความปลอดภัยของเฟรม เมื่อรถถูกแรงกระทำในกรณีต่างๆ แต่จะไม่เน้นคำนวณถึงเนื้อที่ในการติดตั้งระบบช่วงล่างรวมถึงระบบบังคับเลี้ยว ทำให้ต้องเสียเวลาปรับแก้กันหลายสัปดาห์
- ทีมงานระบบบังคับเลี้ยว : ทีมงานระบบบังคับเลี้ยวจะทำหน้าที่ร่วมกันกับกลุ่มระบบช่วงล่าง ทำให้บางเวลาที่ต้องการทำงานร่วมกันในพื้นที่ที่มีจำกัด มีปัญหาในการทำงาน รวมถึงปัญหามุมล้อที่จะต้องใช้ร่วมกัน ทำให้บางครั้งต้องช่วยกันคิด

6.2.4 ปัญหาเรื่องงบประมาณ มีน้อยเกินไป เหตุผลเพราะว่า โครงการนี้ได้ทำการออกแบบระบบช่วงล่างทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ของรถไฟฟ้าและรถอี-20 แต่งบประมาณที่ได้รับมีเพียงแค่ประมาณ 10000 บาท ซึ่งน้อยเกินไปอย่างมากสำหรับการหาซื้อวัสดุอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆของระบบช่วงล่าง

6.2.5 ปัญหาเรื่องอุปกรณ์ในการทำเวิร์คช็อปมีไม่เพียงพอ เนื่องมาจากการสร้างรถ 2 คันนั้นจำเป็นต้องใช้คนจำนวนมากเมื่อมีคนจำนวนมากก็ย่อมต้องการอุปกรณ์มากเช่นกัน

6.2.6 ปัญหาเรื่องวัสดุและอุปกรณ์หาได้ยาก เช่น ต้องการสปริงที่มีความสูงไม่มากแต่แข็งเพียงพอ ซึ่งไม่สามารถหาได้ตามแหล่งขายชิ้นส่วนรถยนต์ทั่วไป

6.2.7 ปัญหาเรื่องเวลา เนื่องมาจากการที่คณะผู้จัดทำต้องศึกษาโปรแกรมที่ใช้ช่วยในการออกแบบไปพร้อมๆกับการทำเวิร์คช็อปจึงทำให้การออกแบบระบบช่วงล่างของรถ 1 คันจะใช้เวลาค่อนข้างนาน

6.2.8 ปัญหาจากตัวคณะผู้จัดทำเองไม่มีความรู้ทางด้านรถยนต์มาก่อนทำให้ต้องเสียเวลาในการทำความเข้าใจและศึกษา

## 6.4 แนวทางแก้ไข

เรียงตามปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

- 6.4.1. ควรจะกำหนดตำแหน่งวางของ เครื่องยนต์ คนขับ แบตเตอรี่ ฯลฯ ให้ตายตัวเพราะมิฉะนั้นจะต้องทำออกแบบค่าความยืดหยุ่นสปริงใหม่หมด
- 6.4.2. ควรจะศึกษาตัวโปรแกรมให้เข้าใจอย่างละเอียดลึกซึ้ง
- 6.4.3. ทุกฝ่ายควรมีการประชุมกันบ่อยๆ (ทุกๆสัปดาห์จะดีมาก) เพื่อจะได้ทราบถึงรายละเอียดปลีกย่อยของแต่ละฝ่ายต้องการและทำการปรับแก้ให้เข้ากัน
- 6.4.4. ทางมหาลัยควรจะทำให้การสนับสนุนมากกว่านี้ เพราะนอกจากจะเป็นการส่งเสริมทางการศึกษาแล้วยังเป็นการสร้างชื่อเสียงให้แก่สถาบันอีกด้วย
- 6.4.5. ควรจัดหาอุปกรณ์ให้เพียงพอกับจำนวนคน
- 6.4.6. ถ้ามีเวลาและเงินเพียงพอ ควรจะสั่งทำที่บริษัท
- 6.4.7. ควรจะทำการศึกษาค้นคว้า เกี่ยวกับเนื้อหาและตัวโปรแกรมแต่เนิ่นๆ
- 6.4.8. ควรทำการศึกษามากๆและช่วยรุ่นพี่ ในการทำรถ



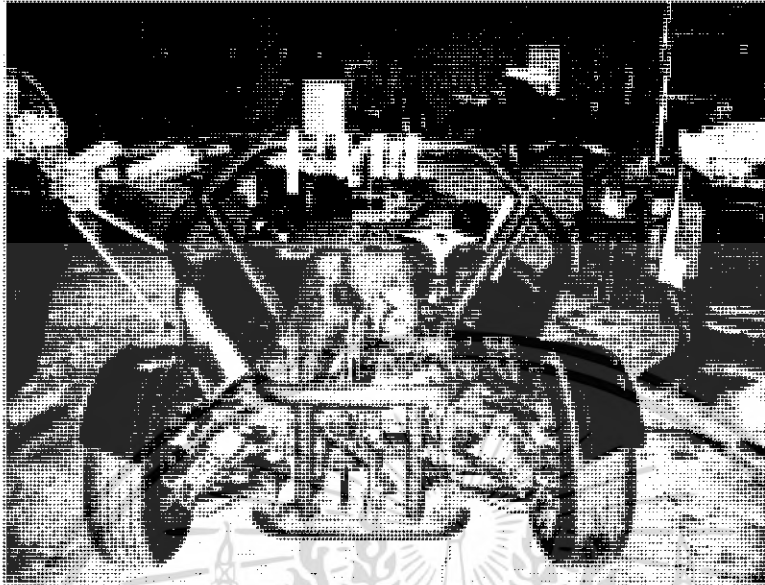
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

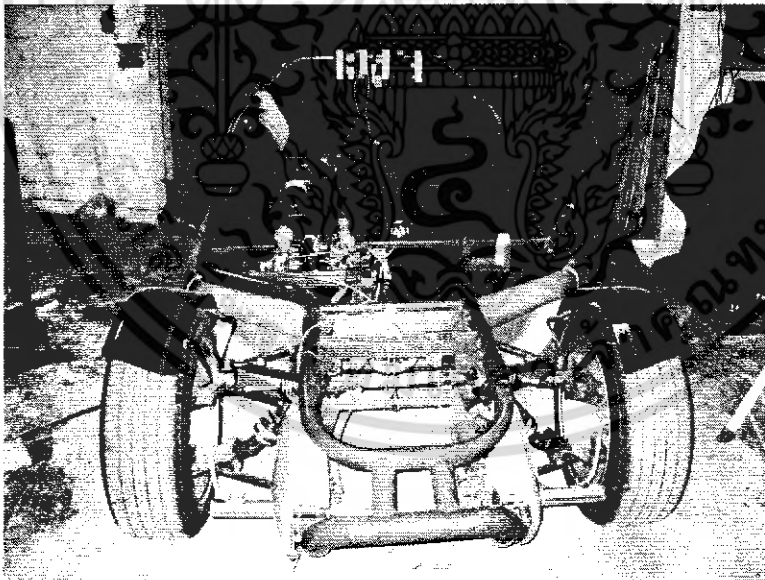
- [1] James D.halderman, *Automotive Technology Principle and Service 2<sup>nd</sup> Edition*, 2003
- [2] J Reimpell & H Stoll, *The Automotive Chassis Engineering Principles, English Edition*, 1996
- [3] Sangwoo Bae, Jang Moo Lee, Won Jun Choi, Jung Rak Yun and Tae Oh Tak, "Int.J. of Vehicle Design", Vol.31 ,No.1 ,2003
- [4] ศ.ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และ รศ. ชาญ ถนัดงาน, *MECHINE DESIGN 1*, 2546
- [5] R.C. HIBBELIER, *MECHANIC OF MATERAILS 1*
- [6] Daniel J.Inman *ENGINEERING VIBRATION*
- [7] Seiji Kitamura, Tetsundo Nakatogawa, Akinori Miyamoto and Takahiro Somaki, *Experimental Study on Coned Disk Springs for Vertical Seismic Isolation System*, 2003
- [8] <http://www.carscare.com>
- [9] <http://www.autozine.org>
- [10] <http://www.familycar.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก  
รูประบบช่วงล่างที่ได้จัดสร้าง

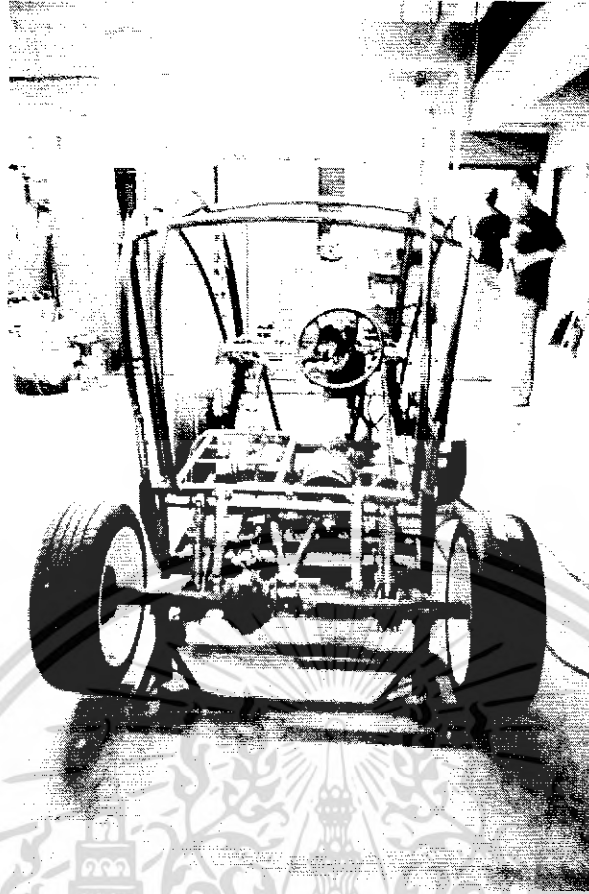


รูปที่ ก-1 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถอี-20

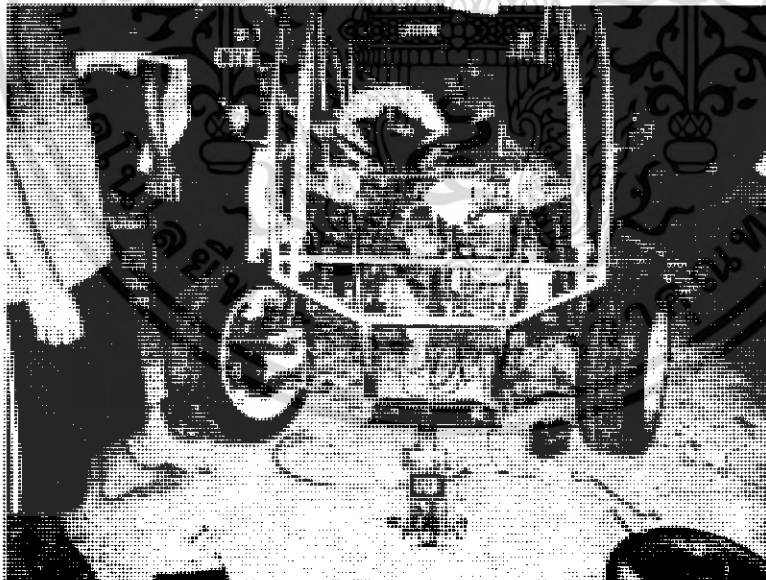


รูปที่ ก-2 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถอี-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

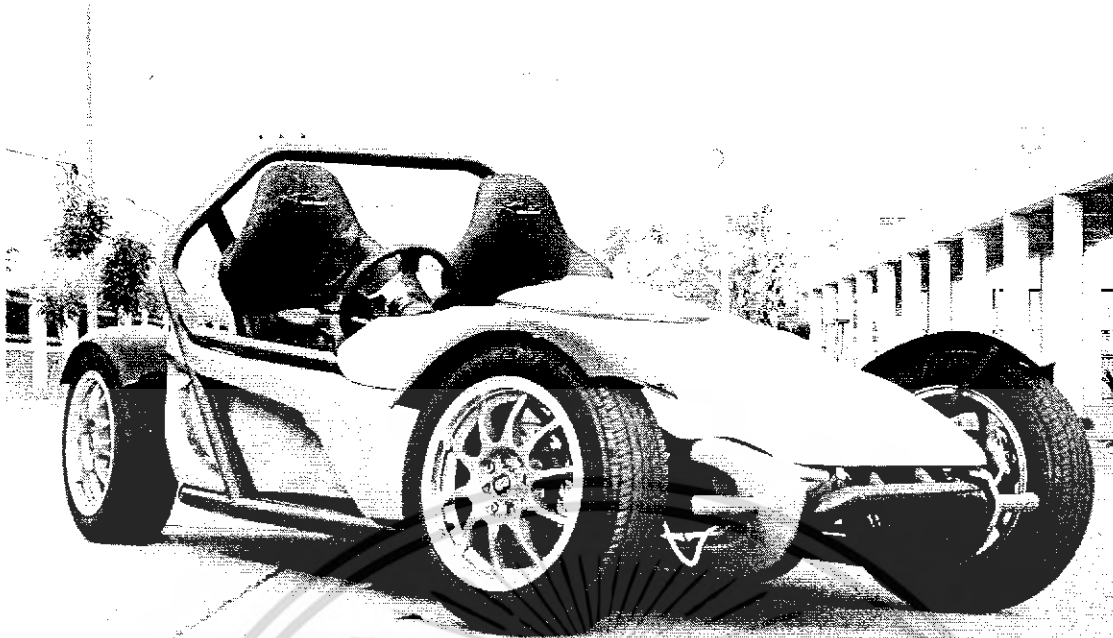


รูปที่ ก-3 ระบบช่วงล่างด้านหลังของรถไฟฟ้า



รูปที่ ก-4 ระบบช่วงล่างด้านหน้าของรถไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-5 รถอี-20



รูปที่ ก-6 รถไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้