

การทดสอบความทนทานชิ้นส่วนยานยนต์โดยการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วย  
คอมพิวเตอร์

DURABILITY TEST OF AUTOMOTIVE PARTS BY COMPUTER AIDED ENGINEERING

ธนบดี เชียงคอน  
ธนภัทร สิตะยัง  
สุทธิพร เพ็ชรน้อย

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การทดสอบความทนทานชิ้นส่วนยานยนต์โดยการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วย  
คอมพิวเตอร์

DURABILITY TEST OF AUTOMOTIVE PARTS BY COMPUTER AIDED ENGINEERING

ธนบดี เชียงคอน  
ธนภัทร สิตะยัง  
สุทธิพร เพ็ชรน้อย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

# DURABILITY TEST OF AUTOMOTIVE PARTS BY COMPUTER AIDED ENGINEERING

TANABODEE CHIANGKORN  
THANHAPHUTR SITAYOUNG  
SUTTIPORN PHETNOI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดสอบความทนทานชิ้นส่วนยานยนต์โดยการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์  
DURABILITY TEST OF AUTOMOTIVE PARTS BY COMPUTER AIDED ENGINEERING

ผู้จัดทำ

- |                          |                       |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. นาย ธนบดี เชียงคอน    | รหัสประจำตัว 57010544 |
| 2. นาย ธนภัทร สิตะยัง    | รหัสประจำตัว 57010560 |
| 3. นาย สุทธิพร เพ็ชรน้อย | รหัสประจำตัว 57011399 |

  
\_\_\_\_\_  
( ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ )

อาจารย์ที่ปรึกษา

การทดสอบความทนทานชิ้นส่วนยานยนต์โดยการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์

นายธนบดี	เซียงคอน	57010544
นายธนภัทร	สีตะยัง	57010560
นายสุทธิพร	เพ็ชรน้อย	57011399
ผศ.ดร. ปัญญา	ชั้นสุวรรณ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560		

## บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นโครงการจำลองการทำงานของระบบช่วงล่างรถยนต์ โดยที่เราจะสร้างแบบปีกนกรถยนต์จากขนาดจริง ลงในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค และเราทำการเก็บข้อมูลตำแหน่งจุดยึด จากเครื่องทดสอบความทนทานโดยอ้างอิงจากตำแหน่งจุดยึดของช่วงล่างรถยนต์จริง หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ของแต่ละตำแหน่งใส่ลงไปในโปรแกรม Adams Car และทำการเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นที่สภาวะการใช้งานบนถนนรูปแบบต่างๆ จากนั้นนำแรงที่ได้มาใส่ในเครื่องทดสอบความทนทานในโปรแกรม Adams View ที่เราสร้างขึ้น ซึ่งเราสามารถคำนวณอายุการใช้งานของระบบช่วงล่างได้โดยโปรแกรม Patran

## DURABILITY TEST OF AUTOMOTIVE PARTS BY COMPUTER AIDED ENGINEERING

Tanabodee	Chiangkorn	57010544
Thanhaphutr	Sitayoung	57010560
Suttiporn	Phetnoi	57011399
Asst.Prof.Dr.Panya Khansuwan		Advisor
Year 2560		

## ABSTRACT

This project studied about simulate the car suspension. We build the control arm model from real work cases in Solidworks after that Inform the real connecting point with durability test machine from truly car position. We insert this information and compare the force occur for other road situation cases in ADAMS Car program, then achieve these force in Durability test machine in ADAMS View program. Finally, We can calculate and estimate the working life of car suspension by Patran program.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีโดยมี ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และได้ให้คำแนะนำสั่งสอน พร้อมทั้งเสนอแนวทางแก้ปัญหาจนสำเร็จ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตากรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุด คือ บิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง เป็นผู้ให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และคอยให้กำลังใจเสมอ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ประโยชน์ทั้งหลายที่มีในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะได้รับเมื่อบุคคลใดที่ได้อ่านจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบคุณความดีทั้งหลายทั้งปวงให้กับคณะบุคคลที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้น

ธนบดี เชียงคอน

ธนภัทร สิตะยัง

สุทธิพร เพ็ชรน้อย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV-V
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII-VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐาน.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานของโครงการ.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความคงทนของชิ้นส่วนรถยนต์.....	3
2.1 ทฤษฎีความเสียหาย.....	3
2.2 กลศาสตร์การแตกร้าวเบื้องต้น.....	8
2.3 ความเสียหายเนื่องจากการล้า.....	9
2.4 การวิเคราะห์ทางเรขาคณิตของระบบรองรับรถยนต์.....	12
2.5 ตัวแปรในการคาดการณ์ลักษณะของพื้นถนน.....	13
2.6 ฟังก์ชัน PSD.....	14
2.7 การวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	22
3.1 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของช่วงล่างรถยนต์.....	22
3.2 การกำหนดรูปแบบถนนและหาแรงที่กระทำต่อช่วงล่างรถยนต์ในซอฟต์แวร์ ADAMs Car.....	23
3.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปีกนกรถยนต์ด้วยโปรแกรม Patran.....	31
3.4 การจำลองในโปรแกรม ADAMs View.....	33
3.5 ผลการทดสอบความทนทานของปีกนกล่าง.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	40
4.1 ทางตรงถนนเรียบ.....	40
4.2 ทางตรงถนนขรุขระ.....	41

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ทางซีกแซกถนนขรุขระ.....	43
4.4 การทดสอบบนถนน 3 เงื่อนไข.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 อภิปรายผลการทดลอง.....	46
5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	46
5.4 แผนงานในอนาคต.....	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงข้อมูลพื้นฐานยานยนต์.....	24
3.2 รูปแบบถนนต่างๆที่สร้างขึ้น ในโปรแกรม ADAMs Car.....	25
3.3 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของปีกนกบนและปีกนกล่าง.....	31
3.4 แสดงตัวอย่างลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชิ้นงานของปีกนกล่างด้วยความถี่ธรรมชาติต่างๆ...32-33	
3.5 ผลการวิเคราะห์ของแรงที่จุดจับยึดต่างๆของปีกนกล่าง ( Static normal load) ในโปรแกรม ADAMs View.....	35
3.6 ตำแหน่งจุดยึดต่างๆ.....	37
3.7 ผลการวิเคราะห์ของแรงที่จุดจับยึดต่างๆของปีกนกล่าง (Static normal load) จากการคำนวณ...39	
4.1 แสดงการคำนวณความทนทานของปีกนกล่างจากโปรแกรม Patran ได้ระยะทางการใช้งานที่ 5050000 km.....	40
4.2 แสดงการคำนวณความทนทานของปีกนกล่างจากโปรแกรม Patran ได้ระยะทางการใช้งานที่ 1594500 km.....	42
4.3 แสดงการคำนวณความทนทานของปีกนกล่างจากโปรแกรม Patran ได้ระยะทางการใช้งานที่ 1,300,000 km.....	43
4.4 แสดงการคำนวณความทนทานของปีกนกล่างจากโปรแกรม Patran ได้ระยะทางการใช้งานที่ 2,100,000 km.....	44

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะความเครียด.....	3
2.2 แสดงถึงแรงเฉือนในระนาบต่างๆ.....	4
2.3 วิธีคิดแบบ MSS.....	4
2.4 วิธีคิดแบบ Distortion Energy.....	5
2.5 วิธีคิดแบบ Maximum Stress.....	5
2.6 วิธีคิดแบบ Maximum-Normal-Stress Theory.....	6
2.7 วิธีคิดแบบ Modification of the Mohr Theory.....	6
2.8 วิธีเลือกใช้ทฤษฎีความเสียหาย.....	7
2.9 การแตกร้าวเบื้องต้นของวัสดุ.....	8
2.10 แสดงรูปแบบการแตกร้าวของวัสดุ.....	9
2.11 แผนภาพแสดงตำแหน่งการขยายตัวรอยแตกจากการล้า.....	10
2.12 S-N diagram ของเหล็กกล้า UNG G41300 โดย $s_{ut} = 116 \text{ kpsi}$ .....	11
2.13 S-N diagram ของอะลูมิเนียมอัลลอย.....	11
2.14 แสดงผลการหาอายุความล้าจากความเครียด.....	12
2.15 แสดงเวกเตอร์ประกอบช่วงล่างรถยนต์.....	13
2.16 แสดงแผนภาพการสิ้นสະเทือนเชิงกลของช่วงล่างรถยนต์.....	13
2.17 แสดงการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณระหว่างความเร่งกับเวลา.....	14
2.18 แสดงการแจกแจงสัญญาณบนสเปกตรัมความถี่.....	15
2.19 แสดงความหนาแน่นของความถี่.....	15
2.20 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์แอมพลิจูดกับเวลา.....	16
2.21 แสดงการหา PSD พิงค์ชั๊น.....	16
2.22 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าที่ถูกวัดกับค่าจากการแปลงPSD.....	17
2.23 แสดงการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง.....	19
2.24 แสดงการตัดสัญญาณรบกวน.....	20
2.25.1 ลักษณะการวิเคราะห์สองมิติโดยทั่วไป.....	21
2.25.2 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามโนด.....	21
2.25.3 แสดงการรวมกันของชิ้นส่วนเมช.....	21
2.26.1 แสดงตีเมขน้อย.....	21
2.26.2 แสดงตีเมขมาก.....	21
3.1 ขนาดและตำแหน่งของ Lower control arm ที่สร้างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	22
3.2 ขนาดและตำแหน่งของ Upper control arm ที่สร้างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	23
3.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของรถยนต์ในโปรแกรม ADAMs Car.....	24
3.4 ต้นแบบรถยนต์ที่ใช้ในการจำลองของโปรแกรม ADAMs Car.....	24
3.5 รูปการจำลองการเคลื่อนที่เพื่อหาแรงบนถนนต่างๆ.....	26
3.6 จุด Spindle upright.....	26

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Straight smooth.....	27
3.8 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Straight less rough.....	27
3.9 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Straight more rough.....	27
3.10 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Single lane change smooth.....	28
3.11 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Single lane change less rough.....	28
3.12 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Single lane change more rough.....	28
3.13 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Zigzag smooth.....	29
3.14 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Zigzag less rough.....	29
3.15 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Zigzag more rough.....	29
3.16 กราฟหลังจากแปลงสัญญาณรบกวนแบบ Rectangular.....	30
3.17.1 แรงที่ใช้ในโปรแกรม ADAMs View เพื่อใช้ในเครื่องทดสอบความทนทาน.....	30
3.17.2 แรงที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่บนถนนทางตรงแบบขรุขระในโปรแกรม ADAMs Car.....	30
3.18 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปีกนกบน.....	31
3.19 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปีกนกลาง.....	32
3.20.1 เครื่องทดสอบความทนทาน.....	33
3.20.2 ตำแหน่งจุดยึดต่างๆของช่วงล่างรถยนต์.....	33
3.21.1 แบบจำลองที่สร้างบนADAMs View.....	34
3.21.2 ตำแหน่งจุดยึดที่วัดมาจากเครื่องทดสอบความทนทานจริง.....	34
3.22 ฟังก์ชันแรงที่ใช้ในโปรแกรม ADAMs View.....	34
3.23 แบบจำลองเครื่องทดสอบความทนทานในโปรแกรม ADAMs View.....	35
3.24.1 Static normal load ใน ADAMs view.....	35
3.24.2 ตารางความเค้นที่มากที่สุด ใน Static normal load.....	35
3.25 Static normal load ปีกนกลาง ใน Patran.....	36
3.26.1 ปีกนกลางที่รับแรงแล้วใน ADAMs View.....	36
3.26.2 ตารางความเค้นที่มากที่สุดหลังรับแรงที่กระทำ.....	36
3.27 แผนภูมิอิสระของระบบกันสะเทือนแบบปีกนกคู่ในการวิเคราะห์หาแรงสถิต.....	37
4.1 maximum stress ของปีกนกลางบนถนนทางตรงเรียบ.....	41
4.2 minimum stress ของปีกนกลางบนถนนทางตรงเรียบ.....	41
4.3 maximum stress ของปีกนกลางบนถนนทางตรงขรุขระ.....	42
4.4 minimum stress ของปีกนกลางบนถนนทางตรงขรุขระ.....	42
4.5 maximum stress ของปีกนกลางบนถนนซิกแซกขรุขระ.....	43
4.6 minimum stress ของปีกนกลางบนถนนซิกแซกขรุขระ.....	44
4.7 maximum stress ของปีกนกลางบนถนน 3 เงื่อนไข.....	45
4.8 minimum stress ของปีกนกลางบนถนน 3 เงื่อนไข.....	45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในสภาวะการณปัจจุบันปฏิเสธไม่ได้เลยว่า เทคโนโลยียานยนต์นั้นถือเป็นเรื่องใกล้ตัวและจำเป็นต่อมนุษย์ทุกคน ประกอบกับรถยนต์แทบเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งที่ 5 สำหรับมนุษย์ ที่แทบทุกบ้านจำเป็นต้องมี วิศวกรได้สร้างนวัตกรรมต่างๆมากมายที่ใช้อุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ระบบอโตเมติก ระบบหัวฉีด หรือแม้แต่การปรับปรุงตัวโครงสร้างต่างๆให้มันดีขึ้น เช่น ระบบสัญญาณกันขโมย การสั่งการจากระยะไกล ระบบนำทางในตัวรถต่างๆ ในหัวข้อที่เราจะพูดถึงนั้น เราพูดถึงระบบช่วงล่างรถยนต์ที่ได้มีการวิจัยและพัฒนาควบคู่กันมาอย่างต่อเนื่อง ระบบช่วงล่างรถยนต์ถือเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งเพราะนอกจากจะรับและซึมซับแรงกระแทกแล้ว ยังเป็นส่วนหนึ่งของการขับเคลื่อนเครื่องยนต์กลไกต่างๆของตัวรถยนต์และเป็นส่วนเชื่อมต่อกับล้ออีกด้วย

ระบบช่วงล่างที่เราได้กล่าวถึงนั้น ได้อ้างอิงจากระบบช่วงล่างแบบ Double wishbone suspension หรือระบบช่วงล่างปีกนกคู่ ระบบกันสะเทือนแบบนี้ มีส่วนประกอบที่มองดูคล้ายกับปีกนกอยู่ 2 ชิ้น ติดตั้งอยู่ด้านบนและด้านล่างอย่างละ 1 ชิ้น ด้านหนึ่งยึดติดกับโครงรถ อีกด้านหนึ่ง ยึดติดกับข้อบังคับเลี้ยวที่ติดอยู่กับดุมล้อ สำหรับการติดตั้งนั้น ปีกนกด้านบน (Upper Control Arm) ด้านหนึ่งเกาะติดกับโครงรถด้วยแกนยึดกับโครงรถ อีกด้านหนึ่งยึดติดกับข้อบังคับเลี้ยวด้วยลูกหมาก (Ball Joint) และปีกนกด้านล่าง (Lower Control Arm) ก็จะมียึดติดด้วยวิธีเดียวกัน ขณะเดียวกัน แกนบังคับเลี้ยวจากพวงมาลัย จะมายึดเกาะติดกับข้อบังคับเลี้ยว トラブใดที่มีการหมุนพวงมาลัยเพื่อเลี้ยวซ้ายหรือขวา แกนบังคับเลี้ยวนี้จะดึง-ดันข้อบังคับเลี้ยวให้เปลี่ยนทิศทางเมื่อข้อบังคับเลี้ยวเปลี่ยนทิศทาง ดุมล้อที่ยึดเกาะกับแกนบังคับเลี้ยว ก็จะเปลี่ยนทิศทางด้วย ทำให้ล้อเปลี่ยนทิศทางไปเช่นกัน (เพราะล้อยึดติดกับดุมล้อ) สำหรับสปริง และโช้คอัพ จะติดตั้งอยู่ระหว่างปีกนกด้านบน และด้านล่างเพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือนในขณะที่ล้อรถตกหลุมสปริงจะดีดล่อลงและในขณะที่ขับรถข้ามสิ่งกีดขวางสปริงจะพยายามส่งผ่านแรงสะเทือนไปที่โครงรถอย่างนุ่มนวล

การวิจัยและพัฒนาในตัวโครงสร้างรถยนต์ต่างๆ มีกันมาอย่างยาวนานและต่อเนื่อง โดยที่ระบบช่วงล่างมักเป็นประเด็นที่หยิบยกกันมาตลอด ว่าควรออกแบบเช่นไรให้ซึมซับการสั่นได้ดี ควรออกแบบเช่นใดให้ผู้ขับได้รับแรงสั่นกระเทือนให้น้อยที่สุด แต่ในหัวข้อของเรานั้น เราพิจารณาถึงอายุการใช้งานที่ควรจะเป็นไปในชิ้นส่วนของระบบช่วงล่าง นั่นคือ ปีกนกบนและปีกนกล่าง โดยมีการทดสอบและเปรียบเทียบกันในลักษณะการรับแรงที่เกิดขึ้นบนถนนที่แตกต่างกัน

ซึ่งในโครงงานของเรานั้น คอมพิวเตอร์และโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจาก เราต้องอาศัยโปรแกรมในการจำลองการสั่นหรือแรงในรูปแบบต่างๆ กับตัวปีกนกและสปริง โดยที่การจำลองโดยใช้โปรแกรมนั้นมีความสะดวกและว่องไวกว่าที่จะทำในห้องทดลอง หรือสนามทดลอง ที่ต้องใช้ต้นทุนในการทดลองสูง โปรแกรมที่ใช้นอกจากจะช่วยจำลองรูปแบบแรงหรือการกระทำต่อระบบช่วงล่างแล้ว ยังสามารถประมวลผลและวิเคราะห์ผลการทดลองต่างๆให้อยู่ในรูปของตัวเลขที่เราสามารถรับรู้ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาอายุการใช้งานของช่วงล่างของรถยนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.2.2 เพื่อลดต้นทุนในการศึกษาหาอายุการใช้งานของช่วงล่างรถยนต์
- 1.2.3 เพื่อเป็นต้นแบบในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วย เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาหาอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่ต้องการศึกษา

## 1.3 สมมติฐาน

- 1.3.1 ในการศึกษาหาอายุการใช้งานของช่วงล่างรถยนต์นั้นมีการใช้อุปกรณ์ที่มากและราคาสูง
- 1.3.2 ในการศึกษาหาอายุการใช้งานของช่วงล่างรถยนต์นั้นใช้ระยะเวลาที่นาน

## 1.4 วิธีดำเนินงานของโครงการ

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 กำหนดวัตถุประสงค์, ขอบเขตการศึกษาและวางแผนการศึกษา
- 1.4.3 ศึกษาโปรแกรมที่เกี่ยวข้องคือโปรแกรม Solidworks ,Adams Car, Adams View และ Patran
- 1.4.4 สร้างแบบจำลอง
- 1.4.5 ทดสอบแบบจำลอง
- 1.4.6 เก็บผลการศึกษา
- 1.4.7 สรุปผลการศึกษา

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบอายุการใช้งานของช่วงล่างรถยนต์ได้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.5.2 ประหยัดเวลาในการวิเคราะห์หาอายุการใช้งาน
- 1.5.3 เป็นองค์ความรู้เพื่อพัฒนาในการผลิตวัสดุชิ้นส่วนยานยนต์

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

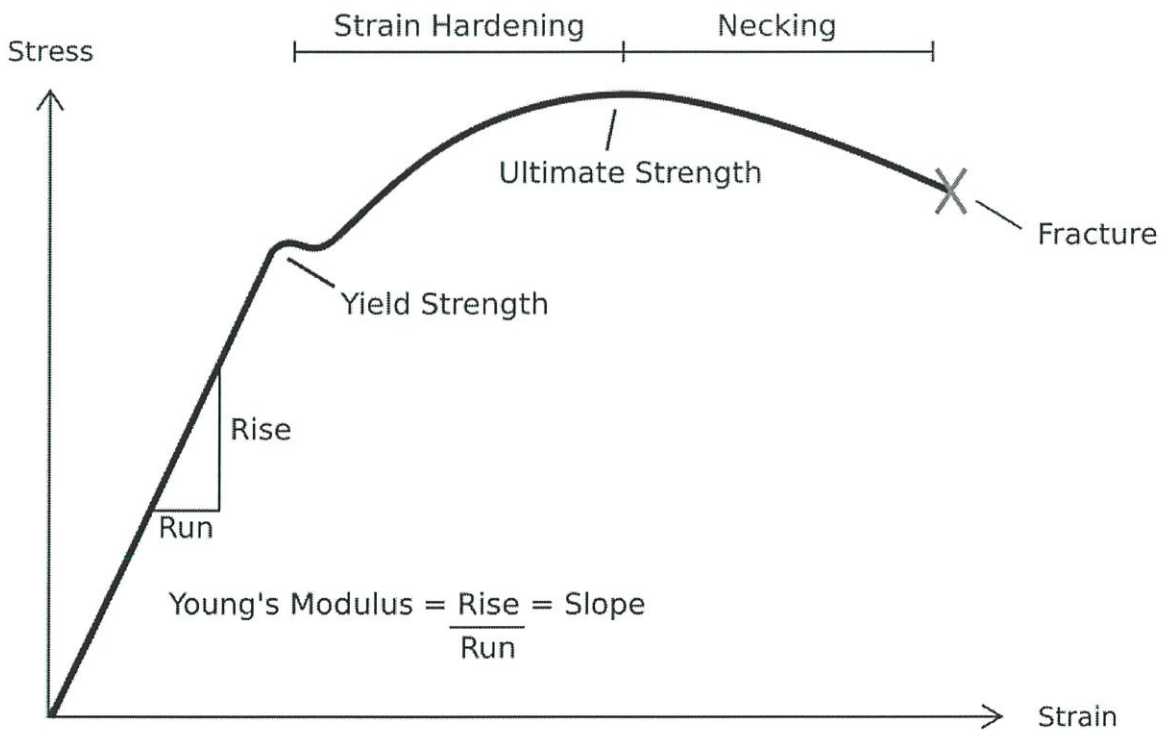
- 1.6.1 สร้างจำลองแบบชิ้นส่วนช่วงล่างรถยนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามขนาดจริง เพื่อจำลองแรงที่กระทำในตำแหน่งที่ศึกษา
- 1.6.2 หาดำเนินการจับยึดของชิ้นส่วนต่างๆ ของช่วงล่างรถยนต์ที่ต้องการทดสอบ
- 1.6.3 ศึกษาหาอายุการใช้งานช่วงล่างรถยนต์ คือ ปีกนกกลาง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความคงทนของชิ้นส่วน รถยนต์

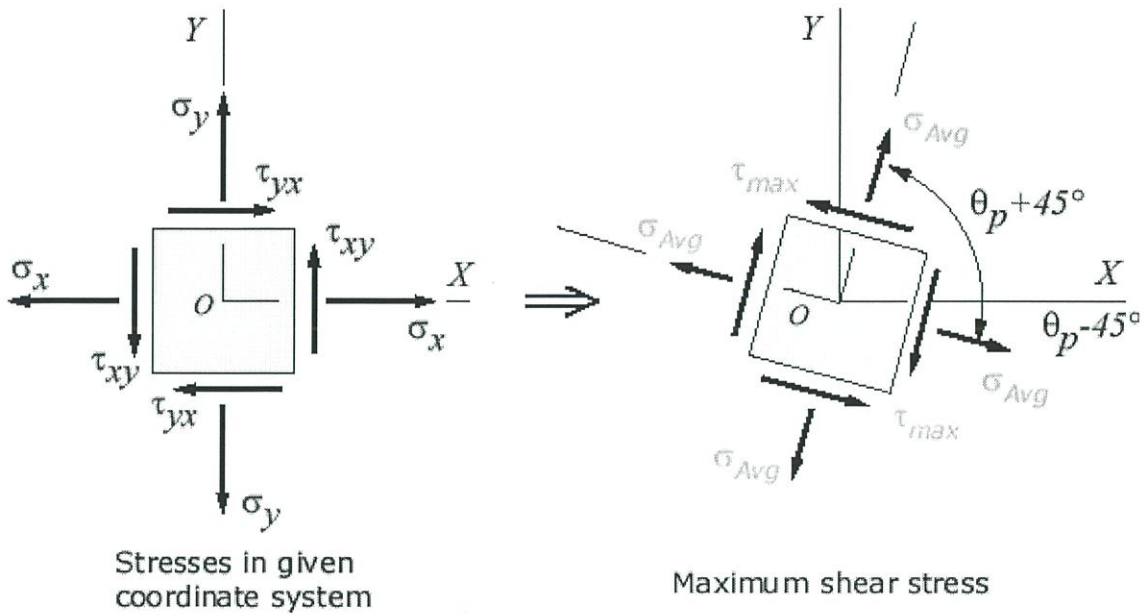
## 2.1 ทฤษฎีความเสียหาย

วัสดุจะมีความยืดหยุ่นก็ต่อเมื่อสามารถกลับคืนรูปได้ เมื่อแรงกระทำหายไป พฤติกรรมนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความเค้น และความเครียดมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น ถ้าความเค้นมีมากกว่าขีดจำกัดสัดส่วน เมื่อมีแรงกระทำ อัตราความเครียดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเค้นอย่างต่อเนื่องจนถึงขีดจำกัดความยืดหยุ่นซึ่งคือจุดสุดท้ายที่วัสดุจะคืนรูป ถ้าเพิ่มความเค้นเกินจุดนี้วัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวร หรือเรียกว่า ‘การคราก’ จุดนี้มักจะถูกนำมาเป็นหลักพิจารณาในการออกแบบ



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับระยะความเครียด

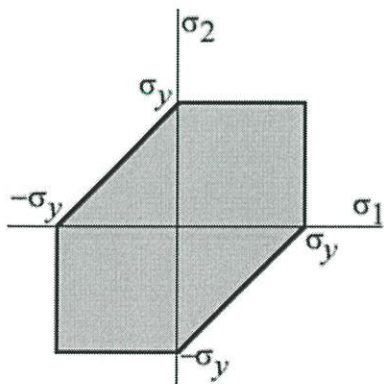
ในการเลือกใช้ทฤษฎีต่างๆ จำเป็นจะต้องระบุค่าตัวแปรสำคัญต่างๆ เช่น ความเค้นคราก การยืดตัว อายุการใช้งาน อุณหภูมิการใช้งาน ให้มีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดทางทฤษฎีต่างๆ ทฤษฎีที่ใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 แสดงถึงแรงเฉือนในระนาบต่างๆ

- Maximum Shear Stress
- Distortion Energy
- Ductile Coulomb Mohr
- Maximum-Normal-Stress Theory
- Modification of the Mohr Theory

Maximum Shear Stress (MSS)



โดยมีความเค้นเฉือนสูงสุดตามความสัมพันธ์

$$\tau_{Max} = \frac{\sigma}{2}$$

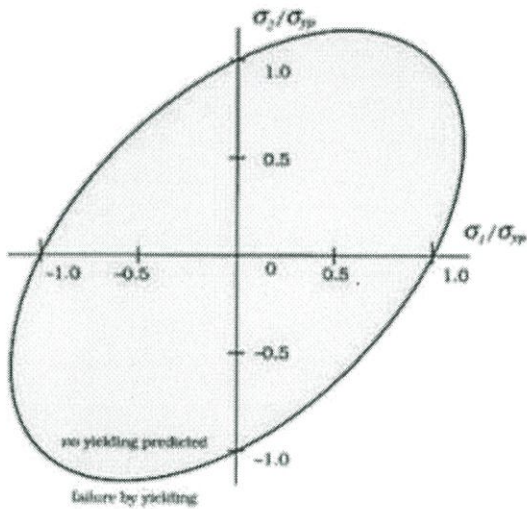
โดย

$$\tau_{Max} = \text{ความเค้นเฉือนสูงสุด}$$

$$\sigma = \text{ความเค้นเฉือนใดๆ}$$

รูปที่ 2.3 วิธีคิดแบบ MSS

## Distortion Energy



รูปที่ 2.4 วิธีคิดแบบ Distortion Energy

โดยมีความเค้นเฉือนสูงสุดตามความสัมพันธ์

$$SSE_{SIMP} = \frac{\sigma_y^2}{6G}$$

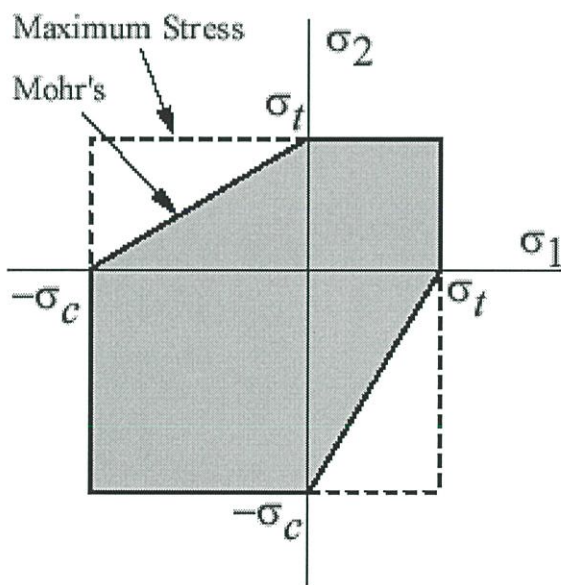
โดย

$$SSE_{SIMP} = \text{ความเค้นเฉือนสูงสุด}$$

$\sigma$  = ความเค้นเฉือนใดๆ

$E$  = Young's Modulus

## Ductile Coulomb Mohr



รูปที่ 2.5 วิธีคิดแบบ Maximum Stress

โดยมีความเค้นเฉือนสูงสุดตามความสัมพันธ์

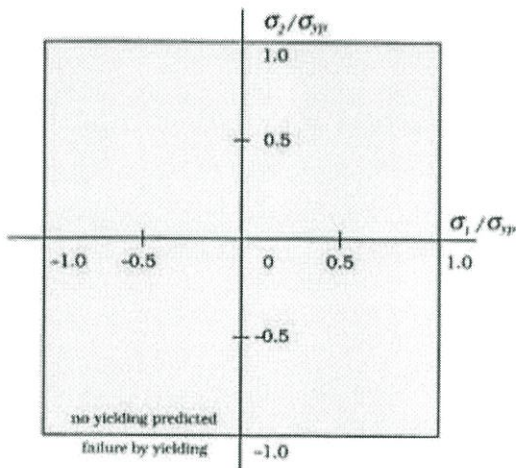
$$SSY = \frac{\sigma_{yt}\sigma_{yc}}{\sigma_{yt} + \sigma_{yc}}$$

โดย

$$SSY = \text{ความเค้นเฉือนสูงสุด}$$

$\sigma$  = ความเค้นเฉือนใดๆ

### Maximum-Normal-Stress Theory



โดยมีความเค้นเฉือนสูงสุดตามความสัมพันธ์

$$\sigma_1 \geq \sigma_{ult}$$

โดย

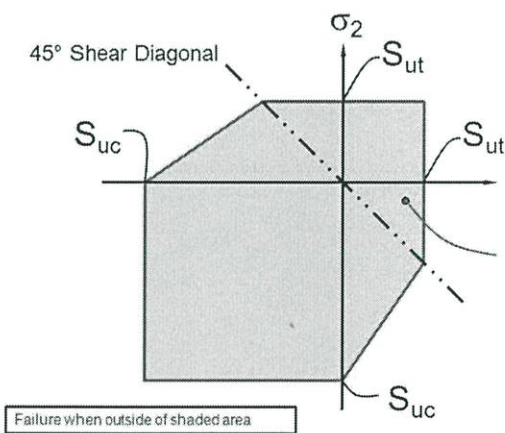
$$\sigma_{ult} = \text{Ultimate Yield Strength}$$

$\sigma$  = ความเค้นใดๆ

รูปที่ 2.6 แสดงวิธีคิดแบบ Maximum-Normal-Stress Theory

### Modification of the Mohr Theory

- Brittle Coulomb-Mohr
- Modified I-Mohr
- Modified II-Mohr
- Brittle Coulomb Mohr



โดยมีความเค้นเฉือนสูงสุดตามความสัมพันธ์

$$\sigma_a = \frac{S_{ut}}{n}$$

$$\frac{\sigma_a}{S_{ut}} - \frac{\sigma_b}{S_{uc}} = \frac{1}{n}$$

โดย  $\sigma$  = ความเค้นเฉือนใดๆ

รูปที่ 2.7 แสดงวิธีคิดแบบ Modification of the Mohr theory

Modified I-Mohr

โดยมีความเค้นเฉือนสูงสุดตามความสัมพันธ์

$$\sigma_a = \frac{S_{ut}}{n}$$

$$\frac{(S_{uc}-S_{ut})\sigma_a}{S_{uc}S_{ut}} - \frac{\sigma_b}{S_{uc}} = \frac{1}{n}$$

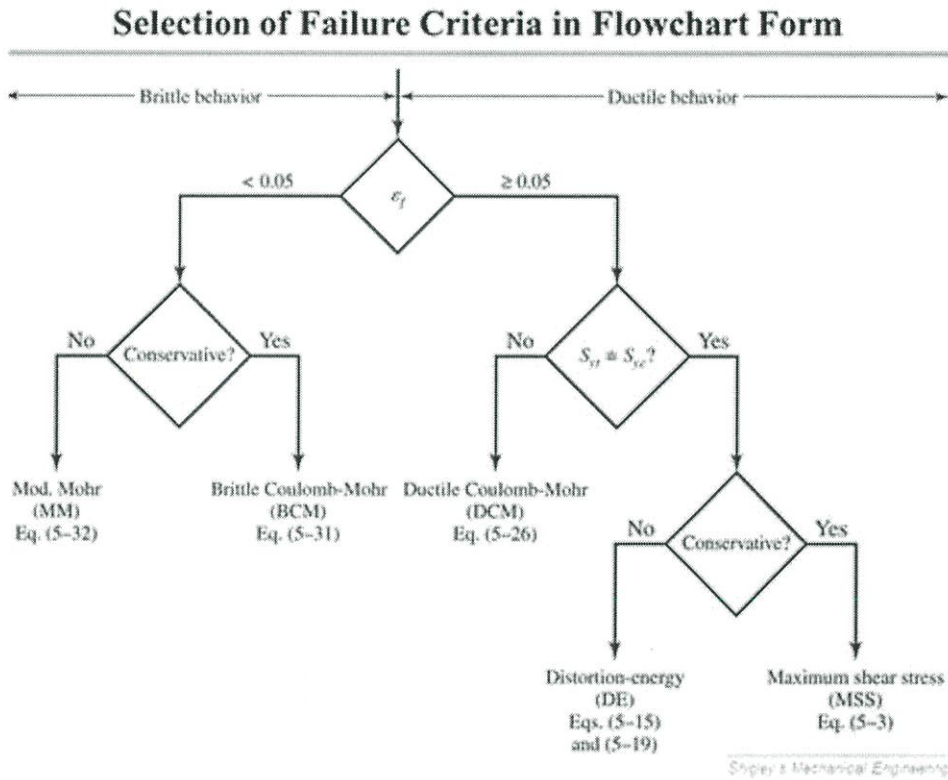
Modified II-Mohr

โดยมีความเค้นเฉือนสูงสุดตามความสัมพันธ์

$$\sigma_a = \frac{S_{ut}}{n}$$

$$\frac{n\sigma_a}{S_{ut}} + \left( \frac{n\sigma_b + S_{ut}}{S_{ut} - S_{uc}} \right) = 1$$

การเลือกใช้ทฤษฎีความเสียหาย

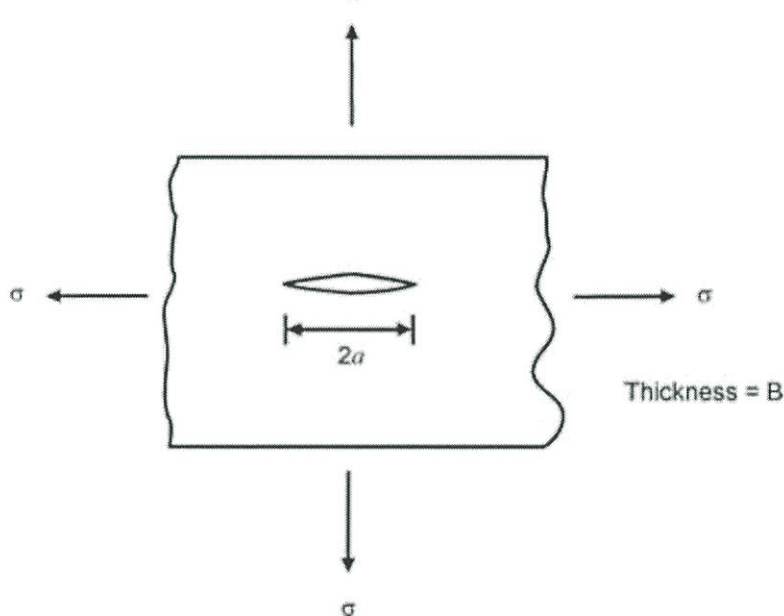


รูปที่ 2.8 วิธีการเลือกใช้ทฤษฎีความเสียหาย

## 2.2 กลศาสตร์การแตกร้าวเบื้องต้น

กลศาสตร์การแตกร้าว คือการศึกษารอยร้าวที่จะทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก โดยการใช้ค่าแฟกเตอร์ความเค้นหนาแน่น ทำให้ทราบค่าเฉลี่ยของโหนด ที่จะทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูปถาวร การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นสุทธิของชิ้นงาน โดยหาพลังงานที่ทำให้รอยร้าว นั้นขยายตัวออก จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อรอยร้าว นั้นเกิดการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น และวัสดุเปราะนั่นเอง  
ความเสียหายที่เกิดจากโหนดสถิต

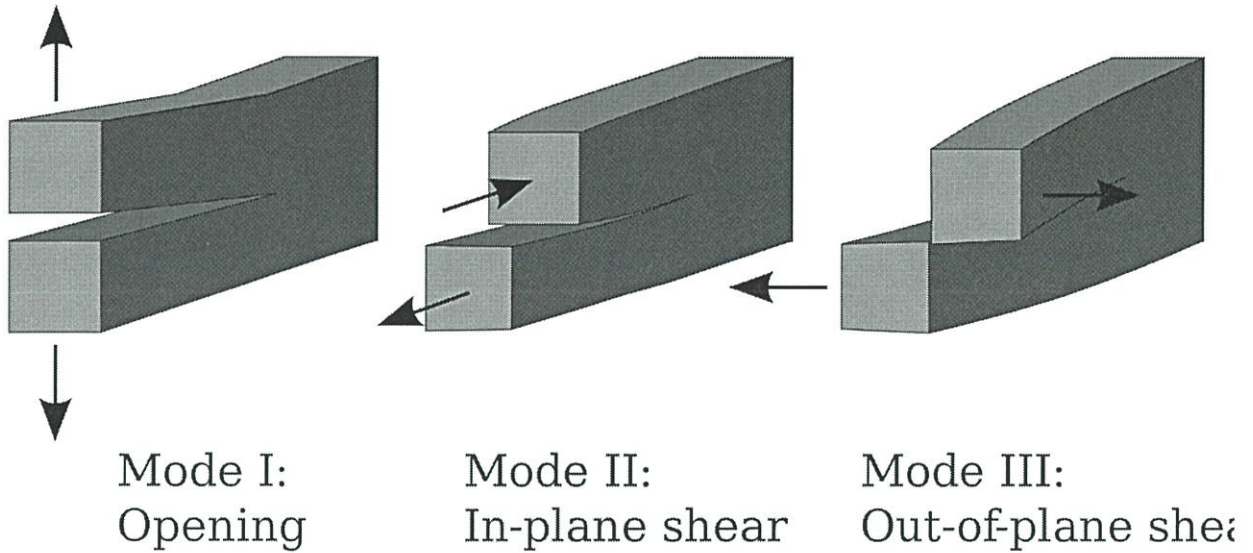
จากการศึกษาวัสดุเปราะ จะพบว่าความเสียหายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเป็นเรื่องยากที่จะสังเกตเห็นรอยร้าวได้ จนในปี 1921 ได้มีการศึกษากลศาสตร์การแตกร้าว โดยการคำนวณค่าความเค้นสำหรับรอยร้าวรูปวงรีบนแผ่นชิ้นงานที่ไม่มีขอบเขตจำกัดขึ้น และได้กลายเป็นพื้นฐานของกลศาสตร์การแตกร้าวในปัจจุบัน



รูปที่ 2.9 การแตกร้าวเบื้องต้นของวัสดุ

โหมดของการแตกร้าว และค่าความเค้นเข้มข้น แบ่งออกเป็นสามโหมดดังนี้

- Mode I Open Crack Mode
- Mode II Edge Sliding
- Mode III Tearing Mode



รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบการแตกร้าวของวัสดุ

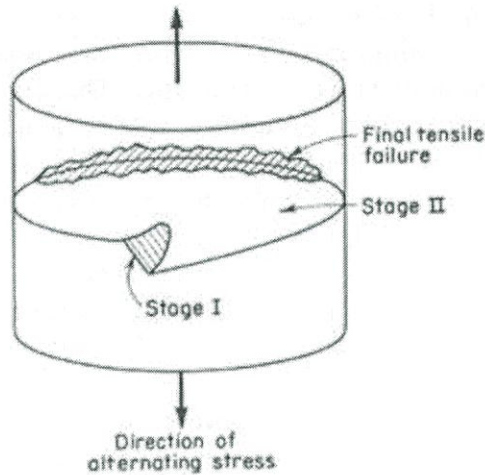
เมื่อความเข้มข้นของการร้าวถึงจุดวิกฤติค่าหนึ่ง รอยร้าวก็จะเริ่มขยายตัว โดยทั่วไปความต้านทานการแตกร้าวสำหรับความเครียดในระนาบจะมีค่าน้อยกว่าความต้านทานการแตกร้าวสำหรับความเค้นในระนาบ การตัดสินใจว่าวัสดุเปราะจะแตกร้าวในกระบวนการใช้งานหรือไม่สามารถดูได้จากค่า ความเค้นเข้มข้นขั้นวิกฤติ ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบได้กับค่าความเค้นครากสูงสุด

### 2.3 ความเสียหายเนื่องจากการล้า

การเสียหายเนื่องจากการล้าเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเกิดการแตกหักออกเป็นสองชิ้นหรือมากกว่า หลังจากรับแรงเค้นแบบคาบ (Cyclic Stress) เป็นระยะเวลาที่ยาวนานต่อเนื่องกัน ค่าความเค้นสูงสุดสำหรับการเสียหายเนื่องจากการล้าจะต่ำกว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ ถ้าสามารถควบคุมแรงเค้นที่กระทำให้มีค่าต่ำ และอยู่ในระดับที่คงที่ การเสียหายด้วยรูปแบบดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ยากมาก แรงกระทำที่เป็นคาบทำให้เกิดจุดเริ่มและการขยายตัวของรอยแตก และถ้าวัสดุเกิดการแตกร้าวจนไม่สามารถที่จะรองรับแรงได้อีกก็เกิดการแตกหักในที่สุด

กลไกการเสียหายจากการล้าแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน

1. การเริ่มต้นของรอยแตก (Crack Initiation)
2. การขยายตัวของรอยแตก (Crack Propagation)
3. การแตกหักของวัสดุ (Material Rupture)



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงตำแหน่งการขยายตัวรอยแตกจากการล้า

### 2.3.1 การคำนวณอายุการล้า

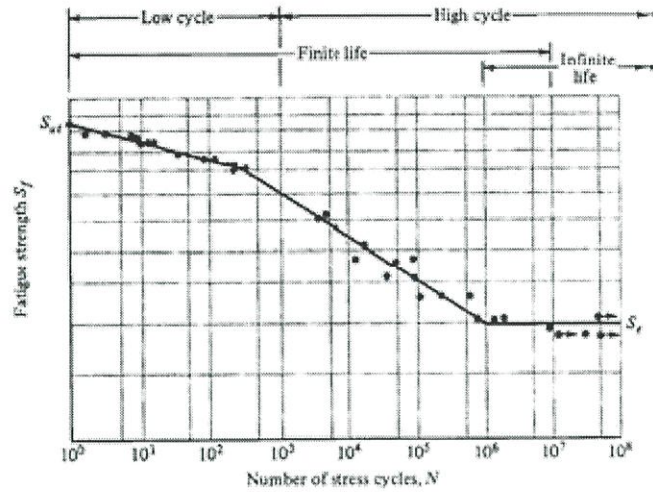
วิธีที่ถูกลำเอามาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบชิ้นงานเนื่องจากความล้ามีด้วยกัน 3 วิธี

วิธีที่ 1 คือ วิธีหาอายุการล้าจากความเค้นในการใช้งาน (Stress-Life Method) จะคำนวณอายุการล้าบนพื้นฐานของระดับความเค้นเพียงอย่างเดียว ดังนั้น จึงมีความเที่ยงตรงค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับชิ้นงานที่มีวงรอบการใช้งานต่ำ แต่วิธีการนี้ก็เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการออกแบบชิ้นส่วนที่ทราบวงรอบการนำไปใช้งานที่แน่นอน

ในการหาความต้านทานการล้าของวัสดุ จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบชิ้นงานที่เป็นวัสดุเดียวกันหลายๆ ครั้ง ภายใต้โหลดการดัดขนาดเดียวกัน ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานการล้าของวัสดุ นิยมเขียนกราฟ ค่าความต้านทานการล้า (Fatigue Strength) หรือ ความทนทาน (Endurance Strength) เทียบกับอายุของชิ้นงาน N รอบ (S-N diagram) ในสเกล Semilog ซึ่งจากผลการทดสอบกับวัสดุชนิดต่างๆ ปรากฏว่ากราฟ S-N มีอยู่ 2 ลักษณะ ดังนี้

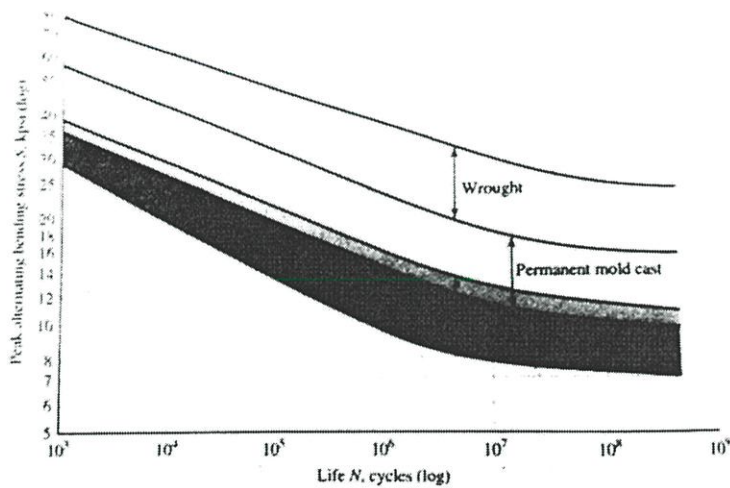
(ก) โลหะจำพวกเหล็ก กราฟ S-N ประกอบด้วยเส้นตรง 2 เส้น ตัดกันเป็นมุม ที่อายุการหมุน

$N \approx 10^6$  รอบ ดังแสดงตามรูปที่ 2.12 ซึ่งหมายความว่า ค่า  $S_f$  ต่ำสุดนี้ เป็นค่าที่ไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก หรือเป็นค่าที่ทำให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งานมากกว่า  $10^6$  รอบขึ้นไป ค่านี้เรียกว่า “พิกัดการล้า” สำหรับชิ้นงานทั่วไปใช้สัญลักษณ์  $S_e$



รูปที่ 2.12 S-N diagram ของเหล็กกล้า UNG G41300 โดย  $s_{ut} = 116 \text{ kpsi}$

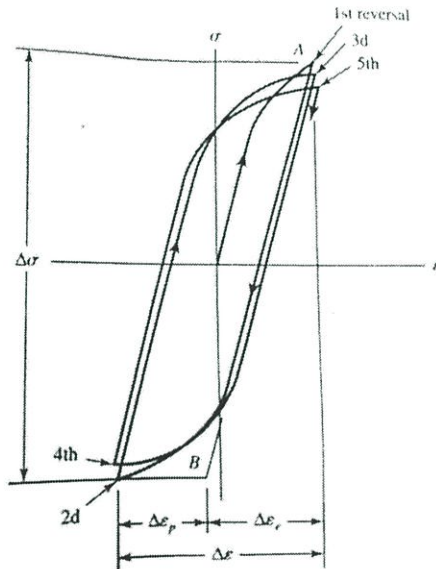
- (ข) โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก กราฟ S-N จะเป็นเส้นตรงเส้นเดียวและมีส่วนโค้ง ดังรูป .... ซึ่งเป็นกราฟ S-N ของอะลูมิเนียมอัลลอย จะเห็นได้ว่าสำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กจะมีเพียงแต่ค่าความต้านทานการล้า  $S_f$  เท่านั้น ไม่มีค่าพิคตการล้า  $S_e$  และเนื่องจากโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ไม่มีค่าพิคตการล้า โดยทั่วไปจึงแสดงค่าความต้านทานการล้าที่อายุการใช้งานที่แน่นอนค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.13 S-N diagram ของอะลูมิเนียมอัลลอย

วิธีที่ 2 คือ วิธีหาอายุการล้าจากความเครียด (Strain-Life Method) จะวิเคราะห์ที่เจาะลึกไปที่รายละเอียดในที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร และคำนวณอายุการล้าบนพื้นฐานของความเค้นและความเครียดที่เกี่ยวข้อง วิธีนี้เหมาะสำหรับการคำนวณอายุการล้าสำหรับชิ้นงานที่มีวงรอบการใช้งานต่ำ

ใช้ทรานสดิวเซอร์สร้างสัญญาณไฟฟ้าที่แปรผันกับค่าความเค้นและความเครียด แล้วนำมาแสดงผลบนออสซิโลสโคป R.W. Landgraf ได้สังเกตพฤติกรรมของชิ้นงานที่มีวงรอบการล้าต่ำ และพล็อตค่าความเค้น-ความเครียดลงในระนาบ XY ดังแสดงในรูปที่ 2.14



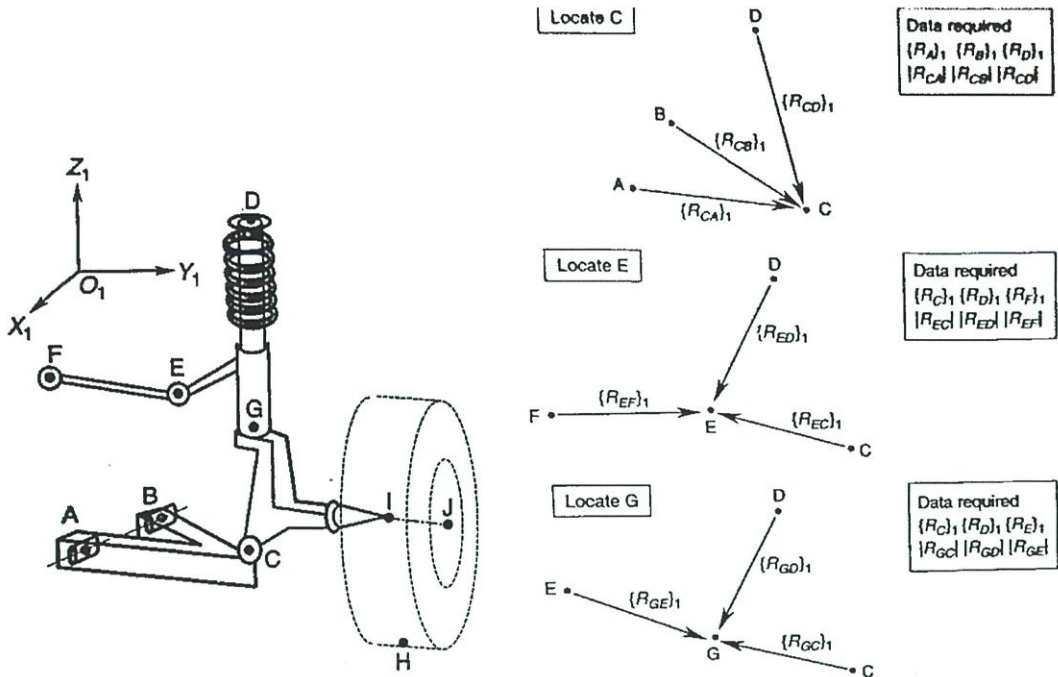
รูปที่ 2.14 แสดงผลการหาอายุความล้าจากความเครียด

ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าความต้านแรงของวัสดุจะลดลง เมื่อมีความเค้นเกิดขึ้นซ้ำๆ งานทดลองของ R.W. Landgraf แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด เมื่อแรงกระทำเป็นวัฏจักร

วิธีที่ 3 คือ วิธีหาอายุการล้าจากความยืดหยุ่นเชิงเส้นตามหลักกลศาสตร์การแตกร้าว (Linear-Elastic Fracture Mechanics) จะสมมติว่ามีรอยร้าวเกิดขึ้นในชิ้นงาน และทำนายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดจากความเข้มข้น วิธีการนี้จะมีประโยชน์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างขนาดใหญ่ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

## 2.4 การวิเคราะห์ทางเรขาคณิตของระบบรองรับรถยนต์

โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ McPherson strut เพื่อใช้แสดงการวิเคราะห์ทางเรขาคณิตของช่วงล่างรถยนต์ จุดประสงค์เพื่อคาดการณ์ และคำนวณ การเคลื่อนไหวที่เป็นไปได้ของจุดต่างๆของช่วงล่างรถยนต์ ความสัมพันธ์ทางเวกเตอร์ของแต่ละจุดแสดงไว้ดังภาพ

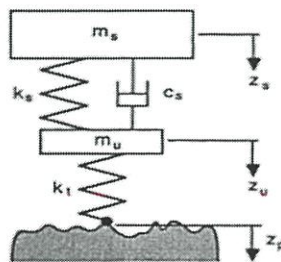


รูปที่ 2.15 แสดงเวกเตอร์ประกอบช่วงล่างรถยนต์

เราสามารถหาตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของจุดต่างๆของชิ้นส่วนระบบรองรับรถยนต์ได้โดยทฤษฎีบทของเวกเตอร์ และเรขาคณิต แต่เนื่องจากยานยนต์จริงๆนั้นประกอบไปด้วยชิ้นส่วนมากมายจึงทำให้มีความสัมพันธ์เยอะเก็นจะสามารถคำนวณด้วยมือได้ จึงต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมาช่วยเหลือในการคำนวณ

## 2.5 ตัวแปรในการคาดการณ์ลักษณะของพื้นถนน

การวิเคราะห์ทางยานยนต์ โดยใช้ยานยนต์สี่ล้อในการพิจารณา แสดงออกมาได้ดังภาพ โดยมีวัตถุแข็งเกร็งอยู่สองชิ้นซึ่งขยับในแนวขึ้นลง ทำให้มี DOF เป็นสอง องศาประกอบที่ถูกนำมาพิจารณาคือตำแหน่งของมวลที่เต็ง ( $M_s$ ) และที่ไม่เต็ง ( $M_u$ )



รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพการสั่นสะเทือนเชิงกลของช่วงล่างรถยนต์

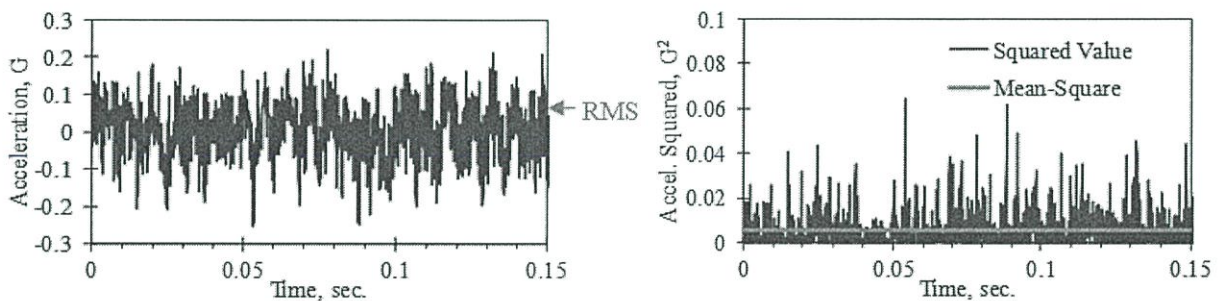
การวิเคราะห์นี้สามารถทดสอบได้จริง หรือจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองก็ได้ ซึ่งสามารถหาคำตอบทางคณิตศาสตร์โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการคาดการณ์ดังนี้

$$m_s \ddot{z}_s + k_s (z_s - z_w) + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_w) = 0$$

ในการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ มักจะใช้ความสัมพันธ์เชิงความถี่ ซึ่งจะสามารถกำหนดและวิเคราะห์โหมดของการสั่นได้ สามารถแปลงความสัมพันธ์เชิงเวลา ให้เป็นความสัมพันธ์เชิงความถี่ได้จากการแปลงเชิงฟูเรียร์ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดๆไป

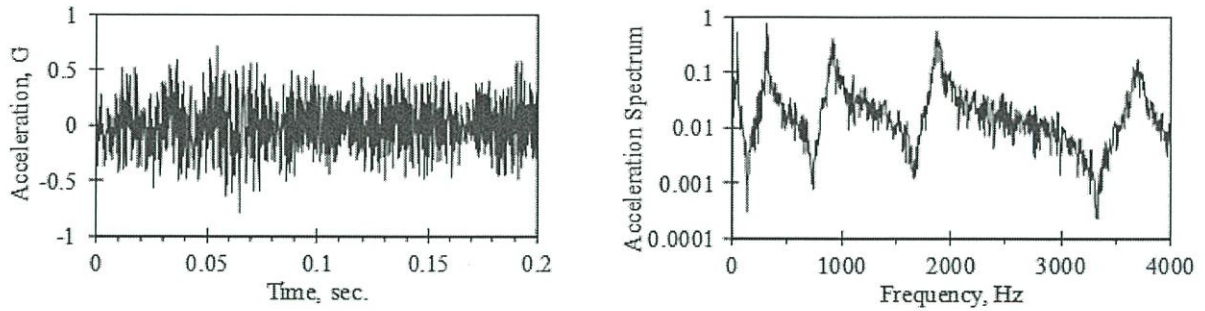
## 2.6 พังค์ชั้น PSD

พังค์ชั้นความหนาแน่นสเปกตรัมของพลังงาน สามารถนิยามได้ตามชื่อของมัน คำว่าพลังงานมาจากการที่ขนาดของ พังค์ชั้น PSD เป็นค่าเฉลี่ยกำลังสองของข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งค่านี้ไม่ได้มีหน่วยเป็นพลังงาน เนื่องจากค่าเฉลี่ยกำลังสองเป็นค่าที่สะดวกที่สุดในการวัดสัญญาณ ดังแสดงในภาพ การหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณนั้นเป็นเรื่องยาก เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ แต่เมื่อนำสัญญาณมายกกำลังสองก็จะสามารถหาค่าเฉลี่ยได้



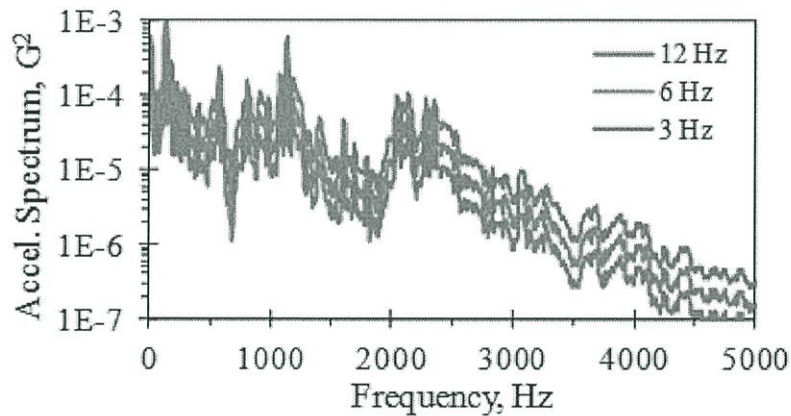
รูปที่ 2.17 แสดงการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณระหว่างความเร่งกับเวลา

สเปกตรัม มาจากข้อเท็จจริงที่ว่า PSD คือพังค์ชั้นของความถี่ โดยจะแสดงการแจกแจงของสัญญาณบนสเปกตรัมของความถี่ การแจกแจงด้วยความถี่นั้นถือว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญอย่างมาก เมื่อต้องการวิเคราะห์ระบบที่มี การแกว่งของข้อมูล ดังรูปเป็นเรื่องยากมากที่จะจำแนกการแกว่งของข้อมูลเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนมากมายในขอบเขตของเวลา อย่างไรก็ตามค่าที่สูงกว่าปกติในขอบเขตของความถี่สามารถแสดงการแกว่งของข้อมูลได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.18 แสดงการแจกแจงสัญญาณบนสเปกตรัมความถี่

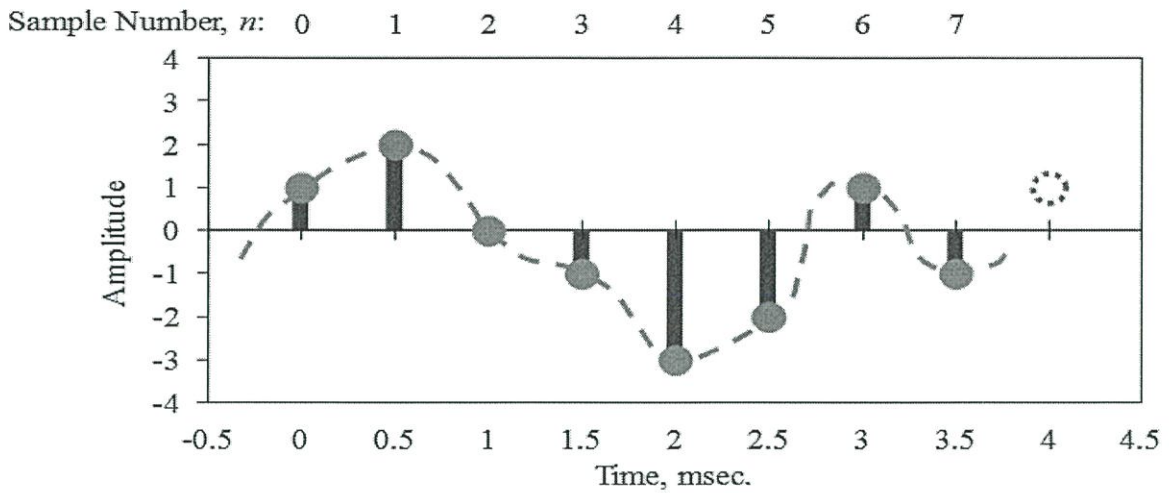
ความหนาแน่น มาจากข้อเท็จจริงที่ว่าขนาดของ PSD ถูกแจกแจงโดยใช้ความถี่ ขนาดของความถี่ที่ถูกแจกแจงขึ้นอยู่กับจำนวนของความถี่ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.19 แสดงความหนาแน่นของความถี่

ฟังก์ชันความหนาแน่นของสเปกตรัม เป็นการคำนวณเชิงสถิติเพื่อกำหนดคุณลักษณะของสัญญาณแบบสุ่ม อย่างเช่นการสั่นของยานยนต์บนถนนขรุขระ ขั้นตอนสำคัญในการคำนวณหา PSD คือการแปลงให้อยู่ในรูปสเปกตรัมของความถี่ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ การแปลงเชิงฟูเรียร์ ซึ่งมีพื้นฐานมาจากแนวคิดที่ว่าสัญญาณ  $x$  ในช่วง  $T$  สามารถแสดงได้โดยผลรวมของอนุกรมไซน์ และ โคไซน์ แสดงดังสมการ

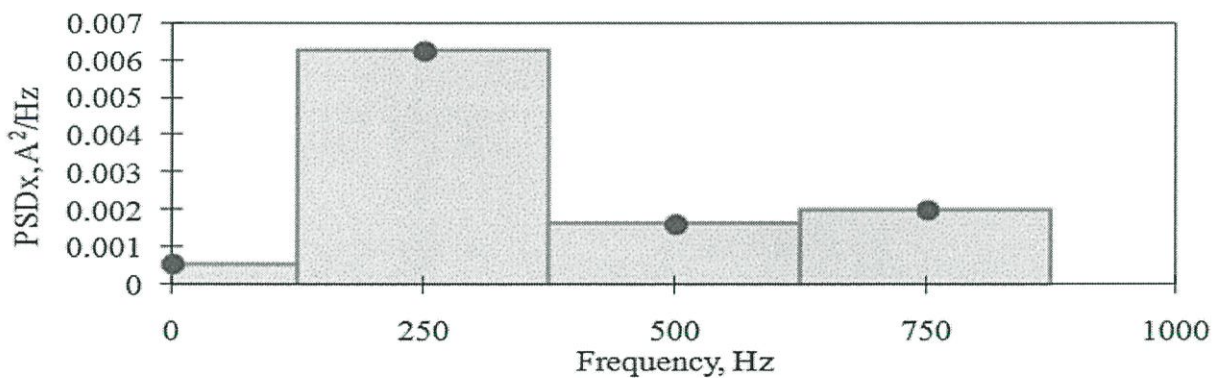
$$x(t) = \bar{x} + \sum_{i=1}^{\infty} [C_i \cos(2\pi f_i t) + S_i \sin(2\pi f_i t)]$$



รูปที่ 2.20 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์แอมพลิจูดกับเวลา

หลังจากข้อมูลถูกแปลงจากขอบเขตของเวลามาอยู่ในขอบเขตของความถี่แล้วสามารถหา PSD ได้จากความสัมพันธ์แสดงโดยสมการ

$$PSD_x(f_i) = \frac{1}{2} (C_i^2 + S_i^2) / \Delta f$$



รูปที่ 2.21 แสดงการหา PSD ฟังก์ชัน

โดยที่ PSD ของข้อมูล มีความสัมพันธ์กับข้อมูลดังนี้

$$\int_0^{\infty} G_{xx}(f) df = \sigma_x^2 + u_x^2$$

$G_{xx}$  คือฟังก์ชัน PSD ของตัวแปร  $X$  โดยมี  $f$  เป็นความถี่  $\sigma_x^2$  คือความแปรปรวนของ  $X$  และ  $u_x$  คือค่าเฉลี่ยของ  $x$  โดยสามารถอธิบายฟังก์ชันความหนาแน่นของสเปกตรัม ในความสัมพันธ์ของเวลาได้ดังนี้

$$G_{xx}(f) \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} |X(f, T)|^2$$

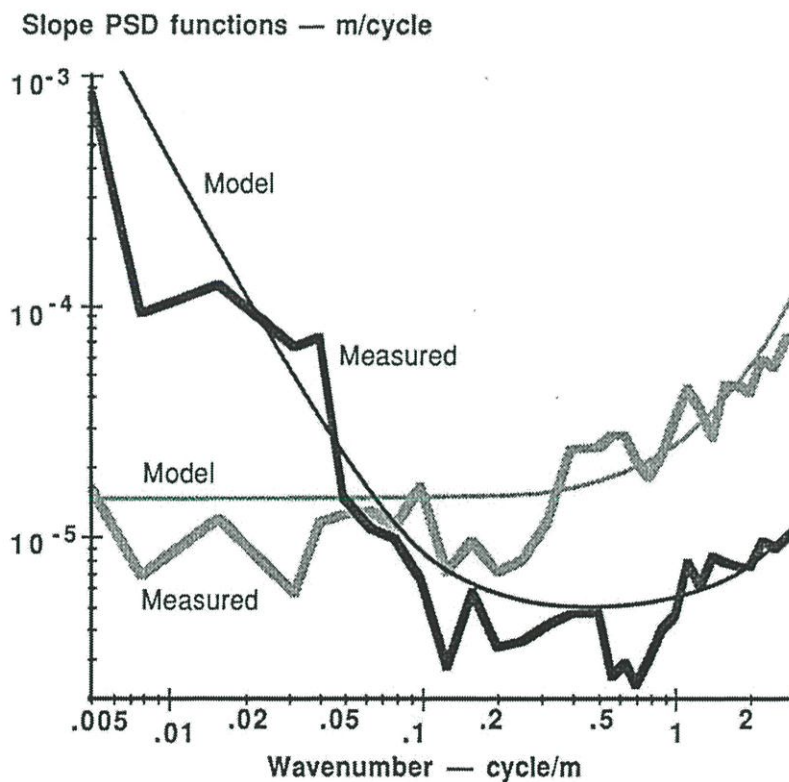
โดยที่  $X(f, T)$  คือการแปลงเชิงฟูเรียร์ของ  $x(t)$  อธิบายโดย

$$X(f, T) \triangleq \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน ที่มีทั้งส่วนจริง และส่วนจินตภาพ แต่ PSD นั้นคำนวณมาจากขนาดซึ่งจะเป็นส่วนจริงเสมอ โดยที่สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของความชรณะพื้นถนนได้ดังนี้

$$G_z(v) = G_a (2\pi v)^{-4} + G_s (2\pi v)^{-2} + G_e$$

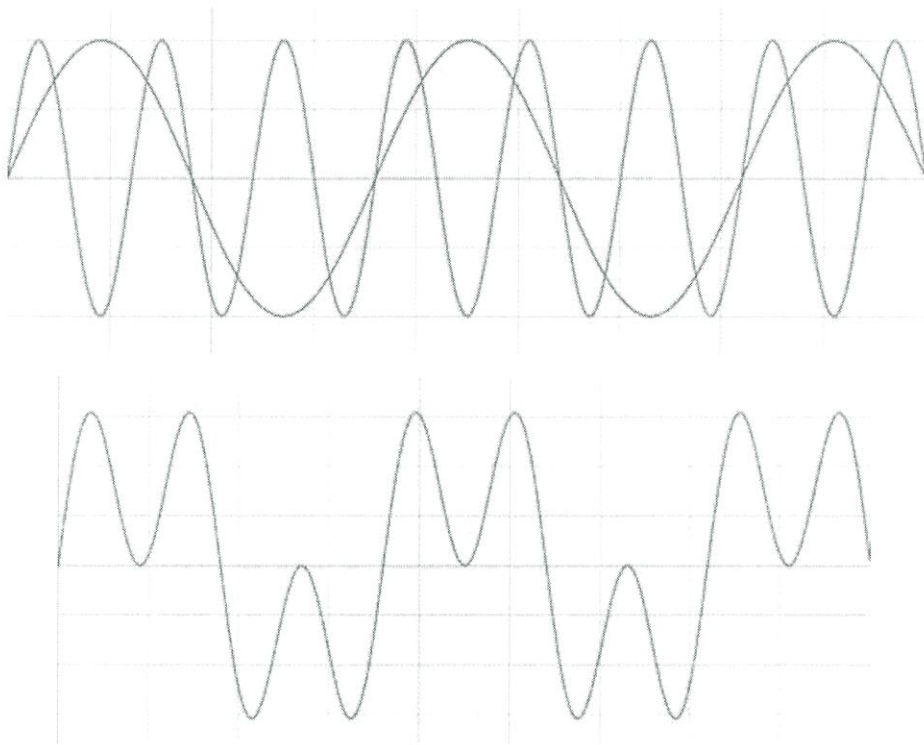
สมการทำให้สามารถกำหนดคุณลักษณะของพื้นถนนได้ด้วยองค์ประกอบสามตัว ตัวแรก  $G_a$  คือความแรงของ white-noise ซึ่งมาจากการหาปฏิยานุพันธ์สองครั้ง  $G_s$  คือสโลปของ white-noise ซึ่งมาจากการหาปฏิยานุพันธ์หนึ่งครั้ง และ  $G_e$  คือตำแหน่งการเคลื่อนไหวของ white-noise สามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าที่ถูกวัด และค่าที่ได้จากการแปลง PSD ได้ดังนี้



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าที่ถูกวัดกับค่าจากการแปลง PSD

### 2.6.1 การวิเคราะห์เชิงฟูรีเยร์

แนวคิดการวิเคราะห์เชิงฟูรีเยร์กล่าวว่า ฟังก์ชันรูปคลื่นในขอบเขตเวลา สามารถแสดงได้โดยผลบวกของ ฟังก์ชัน ไซน์ และโคไซน์ ดังแสดงไว้ในภาพด้านล่าง เป็นการรวมฟังก์ชันไซน์ สองฟังก์ชัน ทำให้เกิดลูกคลื่นแบบใหม่ขึ้น



ดังตัวอย่างที่ได้แสดงมา เราสามารถสร้างฟังก์ชันลูกคลื่นไซน์ได้โดยใช้ผลรวมของฟังก์ชันไซน์มากกว่าหนึ่งตัว ในทางเดียวกันเราก็สามารถแยกส่วนลูกคลื่นที่เราได้มา ให้อยู่ในรูปของผลรวมของฟังก์ชันไซน์เช่นกัน โดยการที่จะทำแบบนั้นสามารถใช้แนวคิดการวิเคราะห์เชิงฟูรีเยร์ได้

ในโปรเจกต์นี้แรงที่วัดมาได้มีลักษณะเป็นความถี่ ที่อยู่ในรูป ไซน์ และโคไซน์ ซึ่งจะสามารถทำนายได้โดยอนุกรมฟูรีเยร์ ซึ่งการคาดการณ์ปรากฏการณ์ที่ไม่มีช่วงคาบแน่นอนนั้นต้องใช้ การแปลงเชิงฟูรีเยร์ และการหาปฏิยานุพันธ์เชิงฟูรีเยร์อีกด้วย ซึ่งการแปลงเชิงฟูรีเยร์นี้เป็นการแปลงสัญญาณ หรือความสัมพันธ์เชิงโคไซน์อื่นๆ จากฟังก์ชันของเวลา ให้มาอยู่ในรูปของฟังก์ชันของความถี่ ซึ่งการแปลงเชิงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันเวลานั้นอยู่ในรูปของฟังก์ชันเชิงซ้อนของความถี่ การแปลงเชิงฟูรีเยร์มีหน้าตาดังนี้

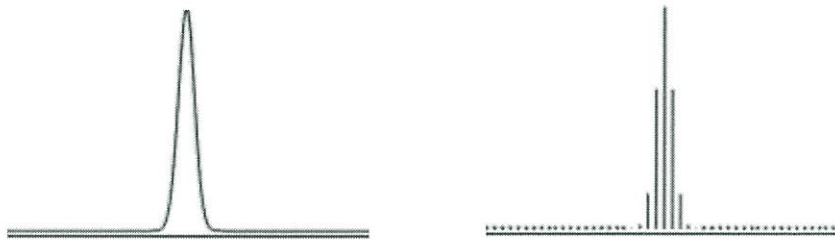
$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx.$$

สำหรับจำนวนจริง  $\xi$  ใดๆ โดยที่  $X$  แทนเวลาในหน่วยวินาที และ  $\xi$  แทนความถี่ในหน่วย Hz ในขณะที่การแปลงย้อนกลับมีหน้าตาดังนี้

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\xi) e^{2\pi i x \xi} d\xi$$

สำหรับจำนวนจริง  $X$  ใดๆ

การแปลงเชิงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่องเป็นการแปลงลำดับที่จำกัดของการแปลงฟูรีเยร์แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของความถี่ ซึ่งความสัมพันธ์นี้ขึ้นอยู่กับลำดับของข้อมูลขาเข้า ความสัมพันธ์ของการแปลงเชิงฟูรีเยร์ และการแปลงเชิงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่องแสดงดังภาพ



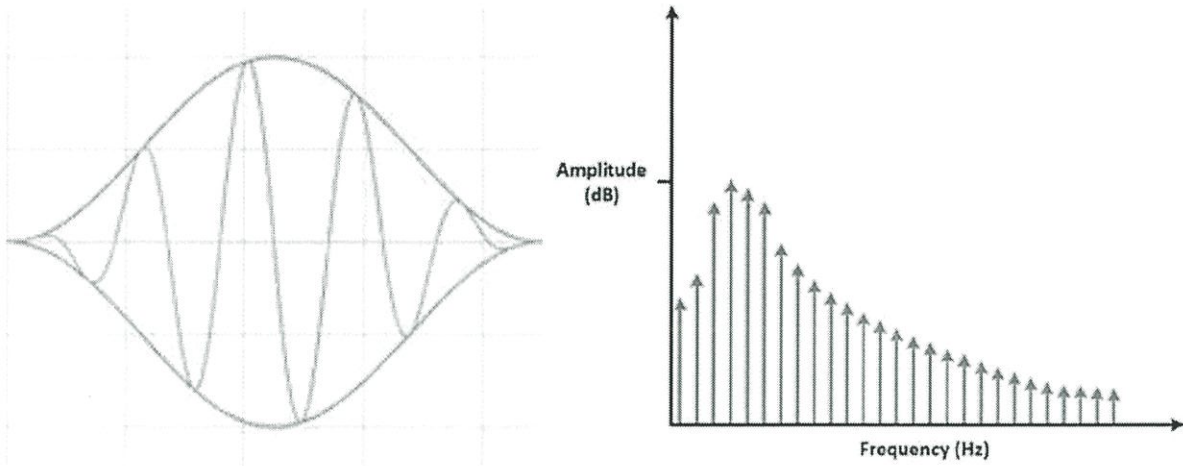
รูปที่ 2.23 แสดงการแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง

การแปลงฟูรีเยร์ไม่ต่อเนื่อง ของ  $N$  ลำดับของ  $X$  แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} X_k &= \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi kn/N} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot [\cos(2\pi kn/N) - i \cdot \sin(2\pi kn/N)] \end{aligned}$$

## 2.6.2 การตัดสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการวินโดวริง

เมื่อเราใช้หลักการฟูรีเยร์ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ เราจะวิเคราะห์ข้อมูลในจำนวนจำกัด โดยจะสมมติให้สัญญาณเป็นแบบต่อเนื่องที่มีช่วงแน่นอน อย่างไรก็ตามสัญญาณที่เราวัดได้มักจะไม่ใช่อันเต็มที่มีช่วงแน่นอน ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่เราแปลงมาจะถูกกลบฝังจนมีรูปร่างผิดไปจากแรงดันแบบก่อนการวิเคราะห์เชิงฟูรีเยร์ ส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหานี้คือความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ

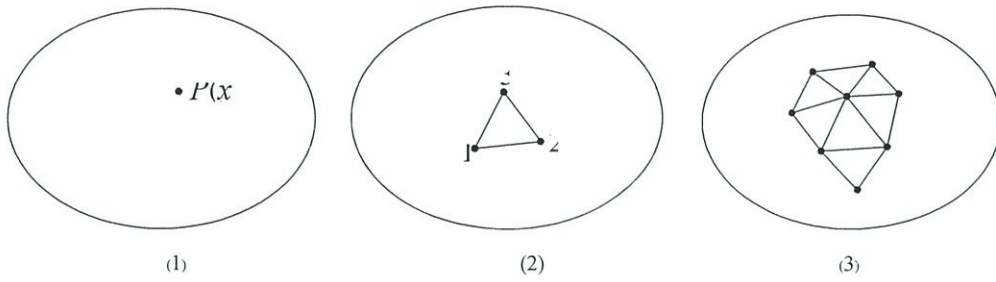


รูปที่ 2.24 แสดงการตัดสัญญาณรบกวน

โดยเราสามารถลดข้อผิดพลาดนี้ได้โดยการวินโดวริง เพื่อลดขนาดของลูกคลื่นที่ไม่ต่อเนื่องเพื่อไม่ให้มีผลต่อการวิเคราะห์โดยรวม หลักการนี้คือการคูณวินโดวที่มีความยาวจำกัด และมีขนาดที่ราบรื่นในการเพิ่มขึ้น และลดลง กับฟังก์ชันในขอบเขตเวลา ซึ่งจะทำให้จุดปลายของคลื่นมีจุดบรรจบ สิ่งนี้ทำให้เกิดสัญญาณที่ต่อเนื่อง ดังภาพที่แสดงไว้ด้านบน

## 2.7 การวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอเลเมนต์

หลักการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอเลเมนต์ คือหลักการคำนวณเพื่อใช้ประมาณคำตอบของปัญหาทางวิศวกร ซึ่งเป็นปัญหาที่ต้องทำการคำนวณสมการอนุพันธ์ เพื่อหาตัวแปรตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไป โดยหลักการนี้สามารถอธิบายได้ด้วยรูปด้านล่าง ในรูปแสดงปริมาตรของวัตถุหนึ่ง ซึ่งปริมาตรนี้แสดงถึงความสัมพันธ์ในขอบเขตของปัญหา ในที่นี้เราวิเคราะห์ในขอบเขตสองมิติในทุกจุด  $P$  โดยคำตอบทางเลขาคณิตสามารถหาได้โดยการพิจารณาชิ้นส่วนเมฆย่อยของชิ้นงานที่พิจารณา แล้วตั้งระบบสมการอนุพันธ์ของระบบที่เราต้องการจะพิจารณาขึ้น

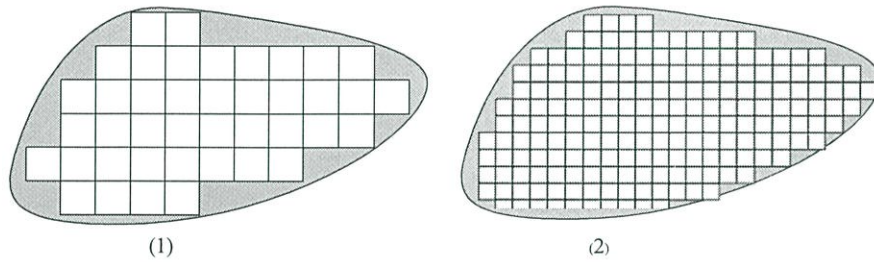


รูปที่ 2.25 (1) ลักษณะการวิเคราะห์สองมิติโดยทั่วไป

(2) การวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามโนด

(3) แสดงการรวมกันของชิ้นส่วนเมช

หลักการแปลงวัตถุทางกายภาพเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเรียกว่าการตีเมช ยิ่งใช้จำนวนเมชมาก คำตอบที่ได้จะยิ่งแม่นยำตรงมากเท่านั้นดังรูปด้านล่าง เป็นการแสดงการตีเมชสี่เหลี่ยมในชิ้นงาน



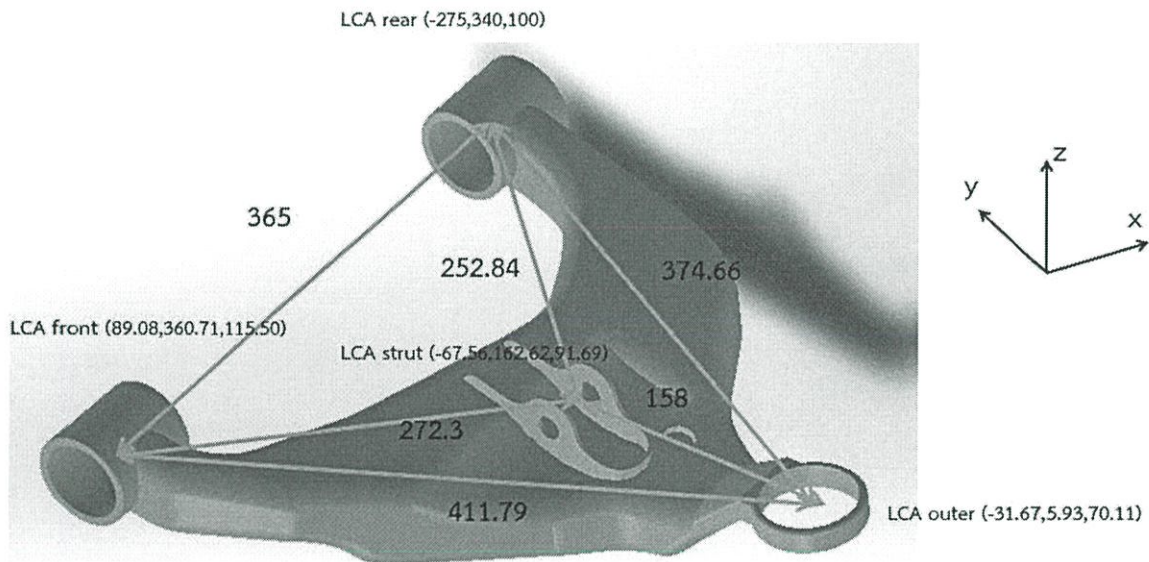
รูปที่ 2.26 (1) แสดงตีเมชน้อย

(2) แสดงตีเมชมาก

## บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

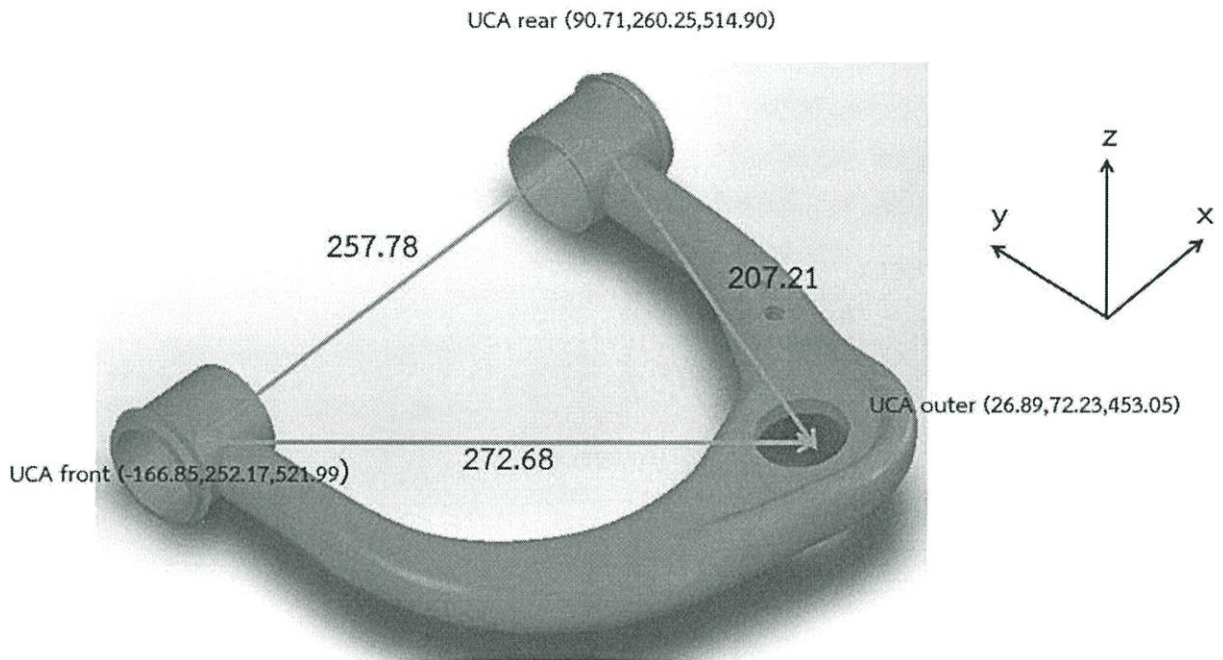
### 3.1 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของช่วงล่างรถยนต์

3.1.1 ปีกนกกลาง เป็นส่วนหนึ่งของชุดปีกนก ประกอบด้วยตัวจับยึด 4 จุดด้วยกัน ได้แก่ Front lower control arm และ Rear lower control arm ที่ติดกับตัว Body Frame ของรถยนต์ ทำให้ทางทฤษฎีปีกนกกลางนี้สามารถหมุนรอบแกนที่เชื่อมเป็นแนวเส้นตรงของทั้ง 2 จุด โดยที่ Front lower control arm จะมีทิศทางไปทางด้านหน้าของรถยนต์ และ Rear lower control arm จะมีทิศทางไปด้านหลัง และอีก 2 จุดเชื่อมต่อ ได้แก่ Outer lower control arm ที่เชื่อมเข้ากับ Wheel knuckle และ Strut lower control arm ที่เชื่อมเข้ากับชุดสปริง เป็นหน้าที่หลักของปีกนกกลางในระบบกันสั่นสะเทือนแบบ Double wishbone เพื่อลดการรบกวนจากแรงที่ล้อสู่ตัวรถยนต์นั่นเอง



รูปที่ 3.1 ขนาดและตำแหน่งของ Lower control arm ที่สร้างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1.2 ปีกนกบน เช่นเดียวกับกับปีกนกกลาง ที่ส่งเสริมการแยกแรงที่พื้นถนนกระทำต่อตัวรถยนต์ แม้ว่าจะไม่ได้ทั้งหมด เนื่องจากจุดเชื่อมต่อที่ Front และ Rear upper control arm ยังคงต่อกับ Sub frame ของรถยนต์ อย่างไรก็ตามตัวปีกนกกลางยังคงมีความอิสระในการหมุนรอบแกนที่เชื่อมเป็นเส้นตรงระหว่าง Front กับ Rear upper control arm เพื่อช่วยการแยกระบบแรงจากถนนผ่านล้อ ซึ่งทำให้ระบบกันสะเทือนแบบ Double wishbone เป็นระบบกันสะเทือนแบบอิสระนั่นเอง



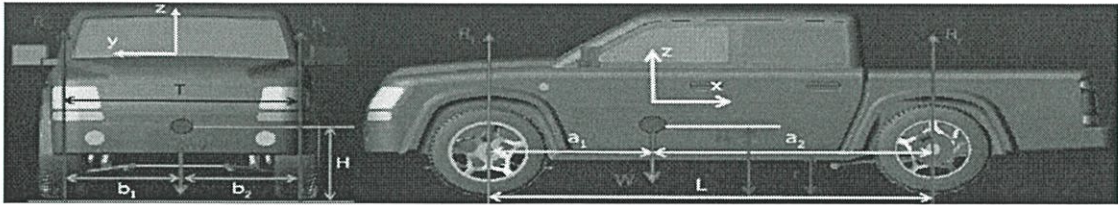
รูปที่ 3.2 ขนาดและตำแหน่งของ Upper control arm ที่สร้างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 3.2 การกำหนดรูปแบบถนนและหาแรงที่กระทำต่อช่วงล่างรถยนต์ในซอฟต์แวร์ ADAMS Car

โปรแกรม ADAMS คำว่า ADAMS นั้นย่อมาจาก Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System ถูก คิดค้นและพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1974 ที่มหาวิทยาลัยมิชิแกน และต่อมา Mechanical Dynamics, Inc. เริ่มพัฒนาการแก้ปัญหาต่างๆโดยใช้โปรแกรมนี้ ใช้ทฤษฎี Euler-Lagrange ในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ และใช้ทฤษฎี ทำนายและการแก้ไข ( Predictor and Corrector ) ในการแก้สมการ ในโปรแกรม ADAMS มีส่วนประมวลผลที่เป็นทั้ง อนุเมชันและกราฟด้วย

การใช้ประโยชน์จากโปรแกรม ADAMS

- จุดประสงค์ทั่วไปคือการสร้างโมเดล การเสนอรูปแบบที่เป็นไปได้รวมถึงอนุเมชัน
- สมการจะถูกสร้างและแก้ไข ได้ด้วย ADAMS Solver
- มีการประมวลผลออกมาในหลายรูปแบบเช่น กราฟ ตัวเลข และอนุเมชัน



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของรถยนต์ในโปรแกรม ADAMS Car  
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลพื้นฐานยานยนต์

Description	Value
น้ำหนักยานยนต์ทั้งหมด (W)	1977 kg
น้ำหนักยานยนต์บนล้อคู่หน้า ( $R_f$ )	1102 kg
น้ำหนักยานยนต์บนล้อคู่หลัง ( $R_r$ )	875 kg
น้ำหนักยานยนต์บนล้อคู่ข้างขวา ( $R_{Rr}$ )	973 kg
น้ำหนักยานยนต์บนล้อคู่ข้างซ้าย ( $R_{Lr}$ )	1004 kg
ระยะห่างจุด CG จากแกนเพลาล้อหน้า ( $a_1$ )	1365 mm
ระยะห่างจุด CG จากแกนเพลาล้อหลัง ( $a_2$ )	1720 mm
ระยะห่างระหว่างแกนเพลาล้อหน้ากับแกนเพลาล้อหลัง (wheel base, $L = a_1 + a_2$ )	3085 mm
ความสูงของจุดศูนย์ถ่วงยานยนต์ (H)	638 mm
ระยะห่างจุด CG จากแนวแกนล้อขวา ( $b_1$ )	770 mm
ระยะห่างจุด CG จากแนวแกนล้อซ้าย ( $b_2$ )	770 mm
ระยะห่างระหว่างแกนล้อขวากับแกนล้อซ้าย (car tract, $T = b_1 + b_2$ )	
- Front car tract, $T_f$	1540 mm
- Rear car tract, $T_r$	1550 mm

### Template



Suspension



Roll bar



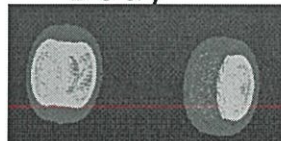
Steering



Body

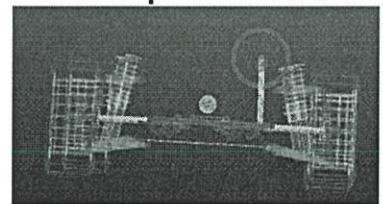


Engine



Tire

### Suspension



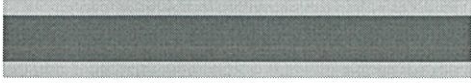
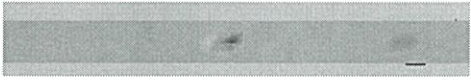

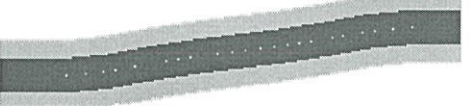





### Full Vehicle

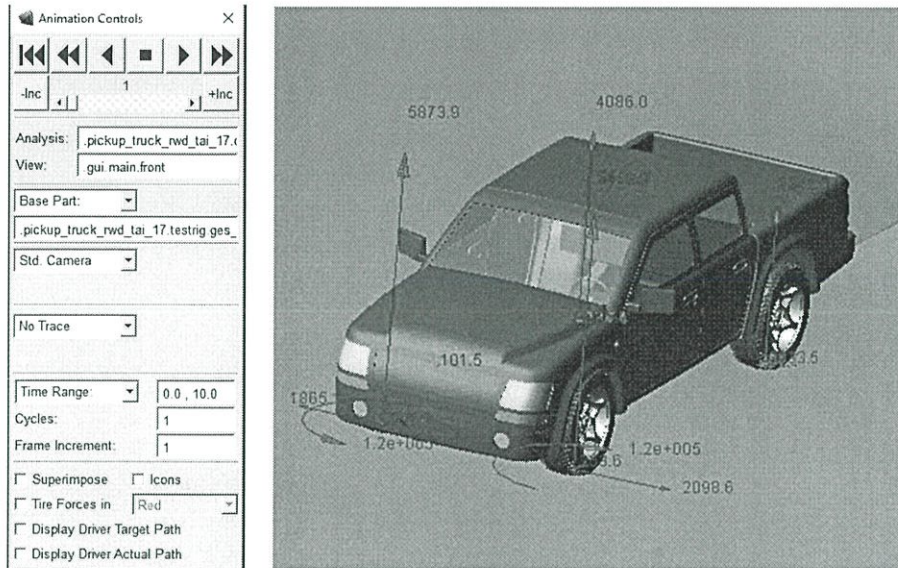


รูปที่ 3.4 ดัชนีแบบรถยนต์ที่ใช้ในการจำลองของโปรแกรม ADAMS Car

เราได้กำหนดรูปแบบถนนในการขับขี่ด้วยทั้งหมด 9 รูปแบบซึ่งมีรูปร่างและความขรุขระที่ต่างกัน

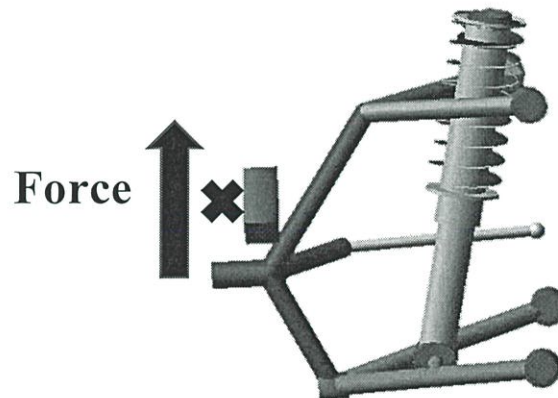
ตารางที่ 3.2 รูปแบบถนนต่างๆที่สร้างขึ้น ในโปรแกรม ADAMs Car

Straight smooth	
Straight less rough	
Straight more rough	
Single lane change smooth	
Single lane change less rough	
Single lane change more rough	
Zigzag smooth	
Zigzag less rough	
Zigzag more rough	



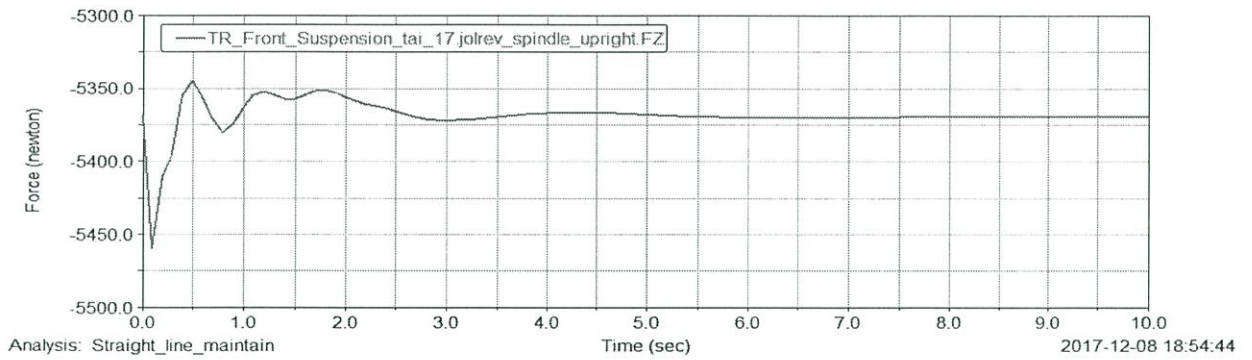
รูปที่ 3.5 รูปการจำลองการเคลื่อนที่เพื่อหาแรงบนถนนต่างๆ

หาแรงตรงจุด Spindle upright ตามแนวแกน Z ตามรูปที่ 3.5

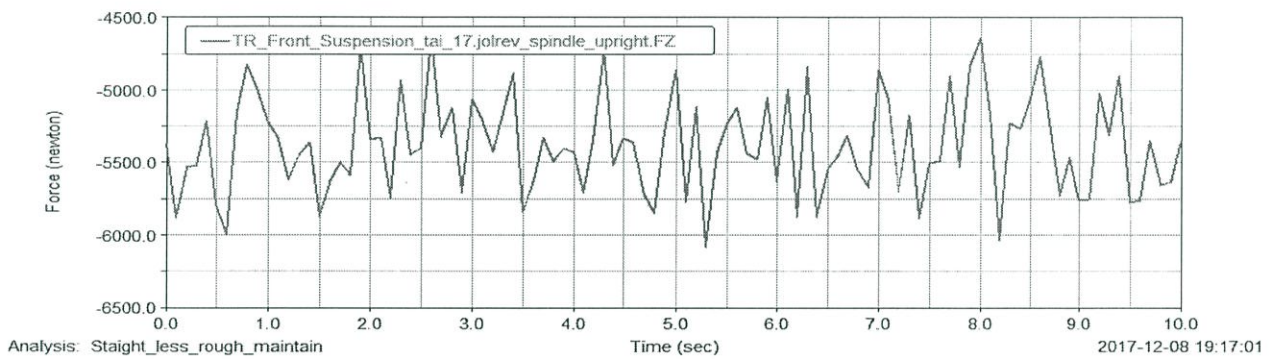


รูปที่ 3.6 จุด Spindle upright

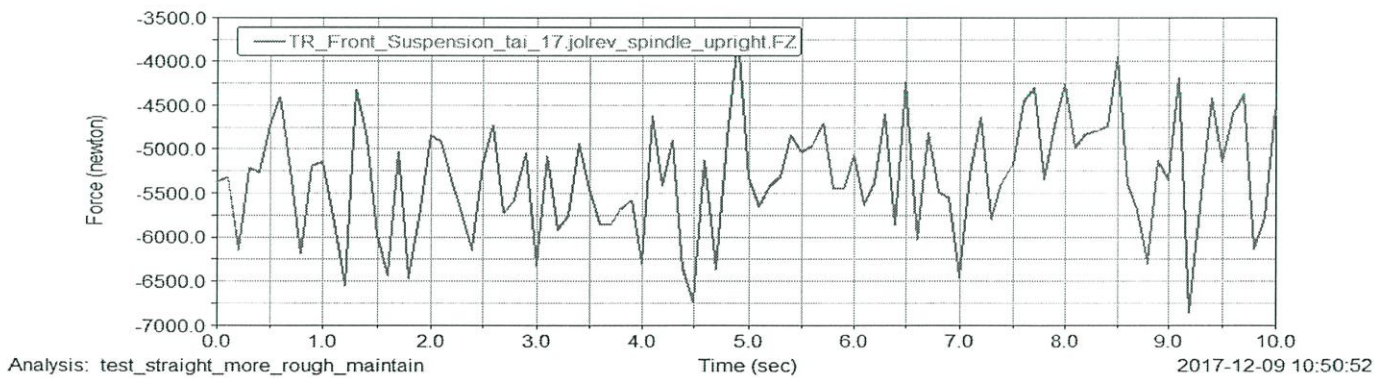
กราฟแสดงผลแรงต่อเวลาบนถนนรูปแบบต่างๆตรงจุด Spindle upright



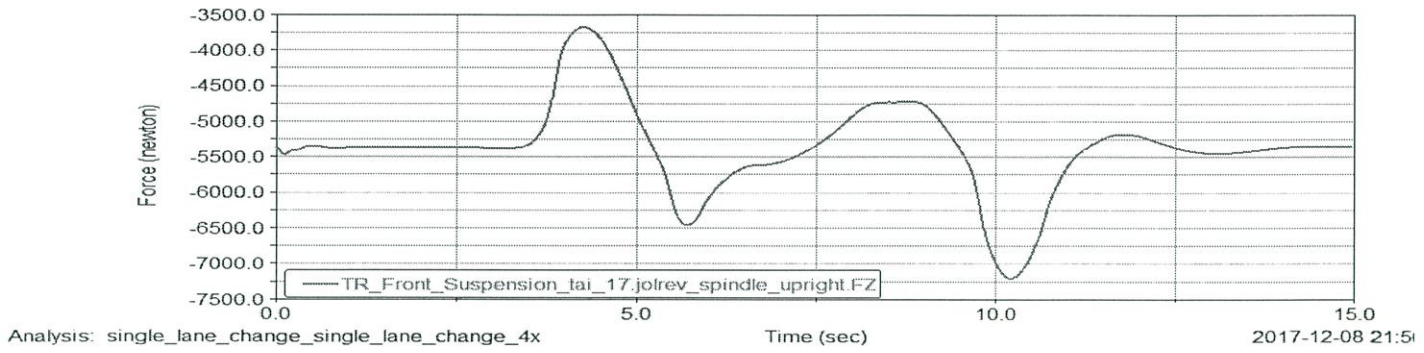
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงผลแรงต่อเวลาบนถนน Straight smooth



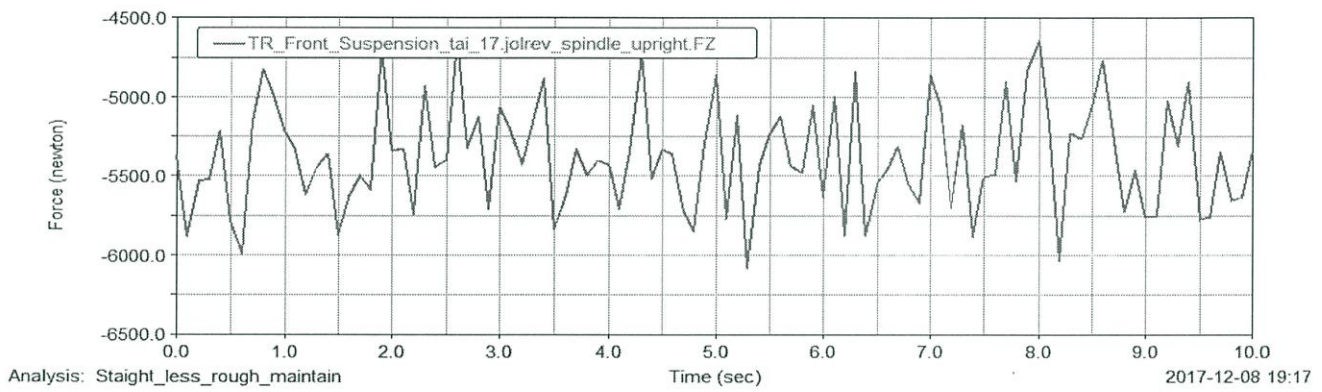
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงผลแรงต่อเวลาบนถนน Straight less rough



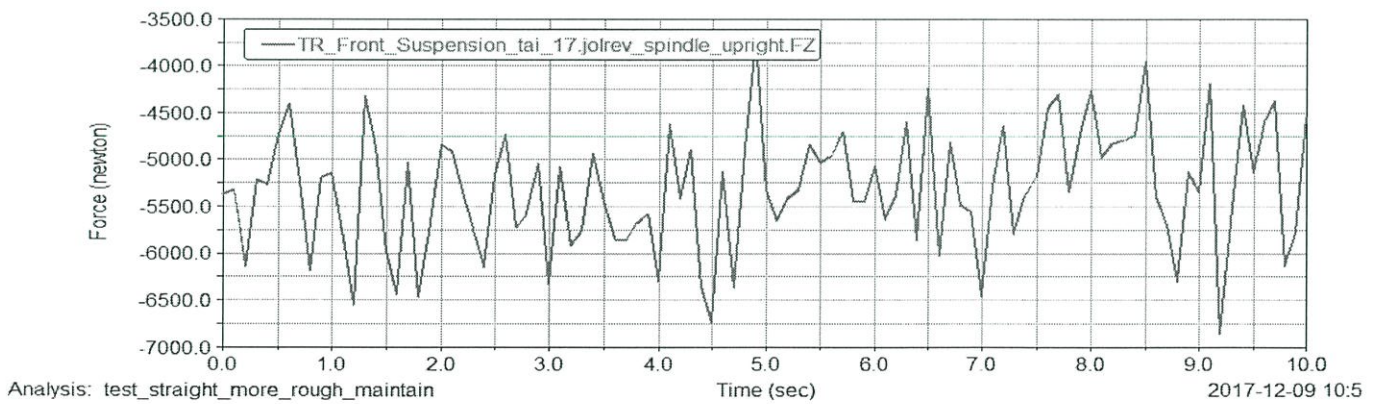
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงผลแรงต่อเวลาบนถนน Straight more rough



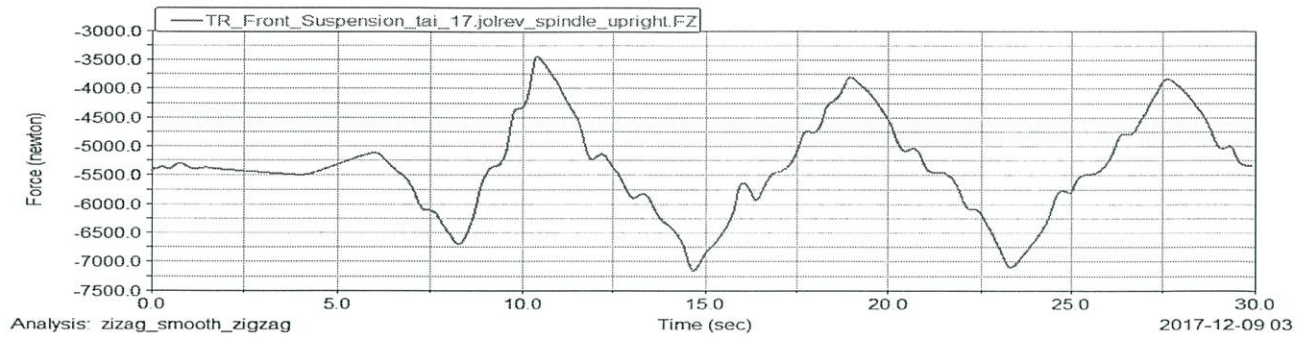
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Single lane change smooth



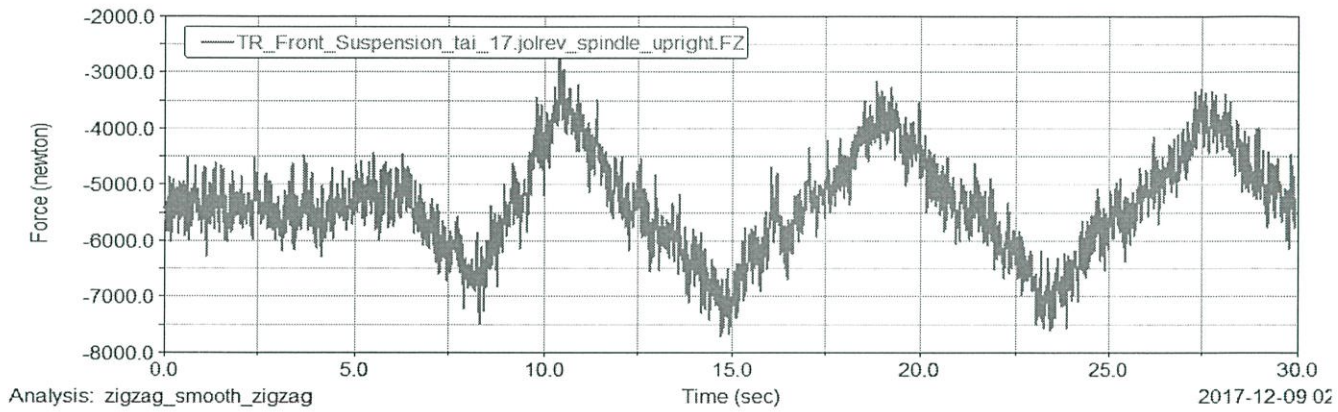
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Single lane change less rough



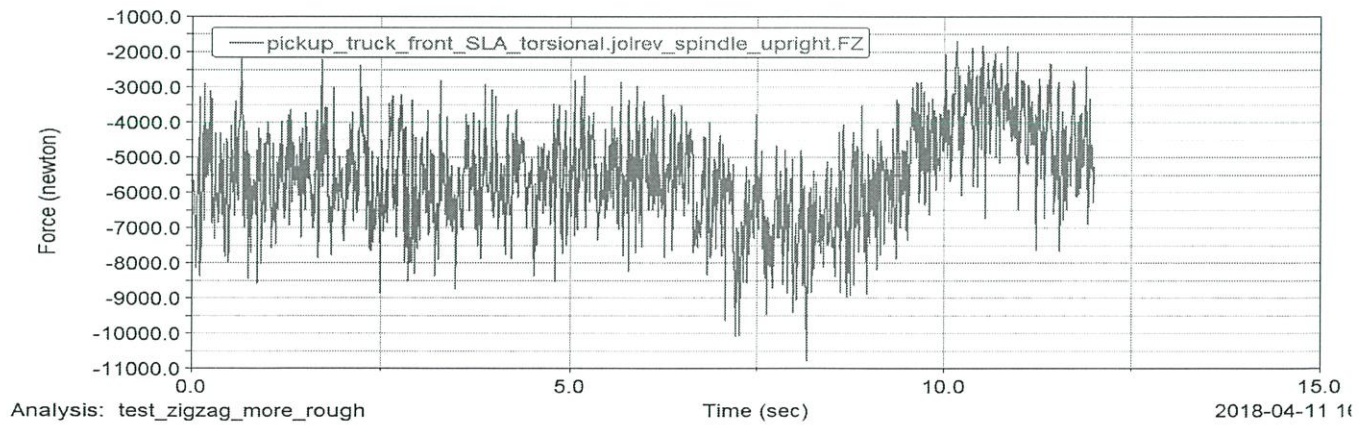
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Single lane change more rough



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Zigzag smooth

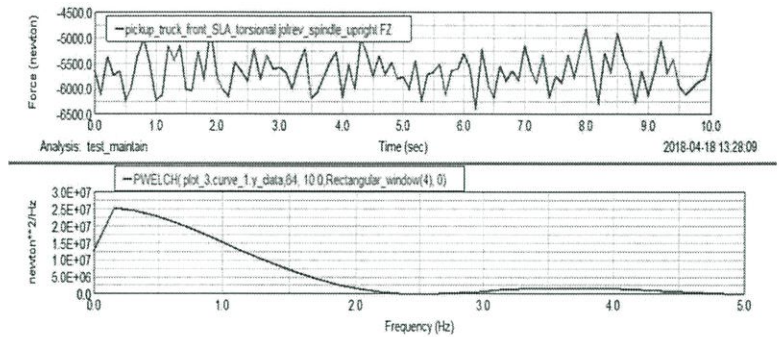
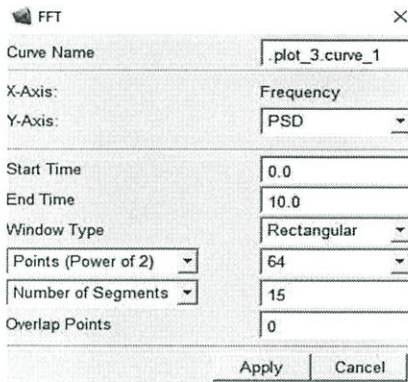


รูปที่ 3.14 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Zigzag less rough



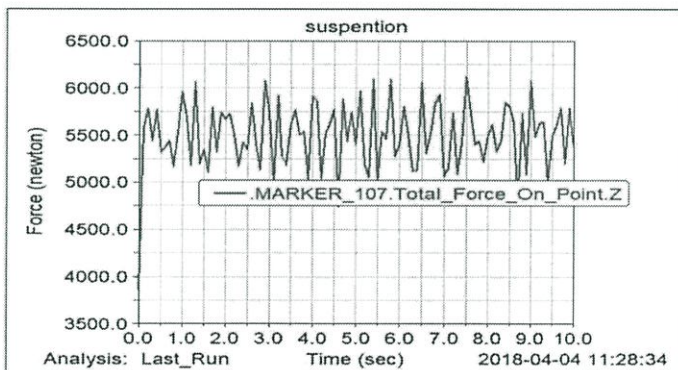
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงแรงต่อเวลาบนถนน Zigzag more rough

ขั้นตอนต่อไปเราเลือกที่จะใช้แรงของถนนทางตรงขรุขระน้อย (รูปที่ 3.7) ที่กระทำตรงจุด Spindle upright ตามแนวแกน z เพื่อนำไปใช้เป็นแรงใส่ในเครื่องทดสอบความทนทานของโปรแกรม ADAMS View แรงนี้เราใช้เป็นเงื่อนไขหลักในการหาอายุการใช้งานของปีกนก เราทำการแปลงค่านับของกราฟ จากที่เป็นกราฟแรง ต่อเวลา ให้กลายเป็นกราฟความถี่ โดยการใช้แนวคิด Power spectrum density แล้วใช้การตัดสัญญาณรบกวนแบบ Rectangular เพื่อทำการตัดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการออก แล้ว Export กราฟในขอบเขตความถี่ ที่ได้เป็นค่านับเพื่อที่จะนำไปใช้ใน ADAMS View ต่อไป

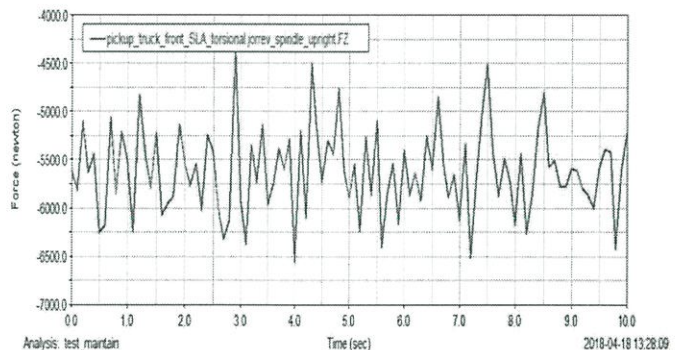


รูปที่ 3.16 กราฟหลังจากแปลงสัญญาณรบกวนแบบ Rectangular

นำกราฟที่ได้ มาแปลงกลับจากขอบเขตความถี่ มาเป็นขอบเขตเวลา โดยใช้คำสั่ง Invert Power Spectrum Density ในโปรแกรม ADAMS View เพื่อที่จะนำแรงไปใช้กับแบบจำลองเครื่องทดสอบการสั่น ที่ได้กล่าวถึงไปแล้วในข้างต้น เมื่อแปลงกลับมาแล้วเรา ก็ทำการเปรียบเทียบแรงที่ได้ กับแรงจาก ADAMS Car เพื่อให้แน่ใจว่า ไม่มีการสูญเสียพลังงานมากนักระหว่างขั้นตอนการตัดสัญญาณรบกวน



(1)



(2)

รูปที่ 3.17 1) แรงที่ใช้ในโปรแกรม ADAMS View เพื่อใช้ในเครื่องทดสอบความทนทาน  
2) แรงที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่บนถนนทางตรงแบบขรุขระในโปรแกรม ADAMS Car

### 3.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปีกนกรถยนต์ด้วยโปรแกรม Patran

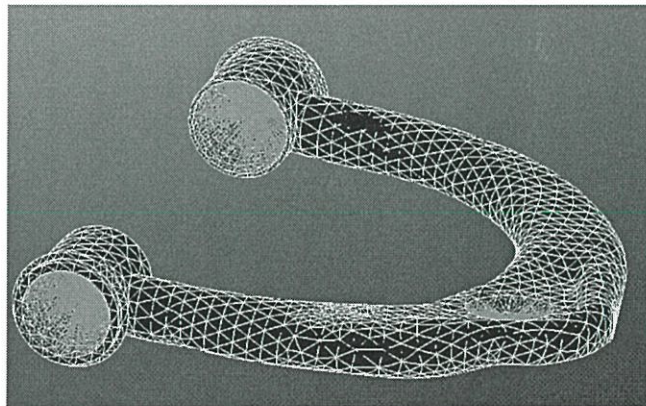
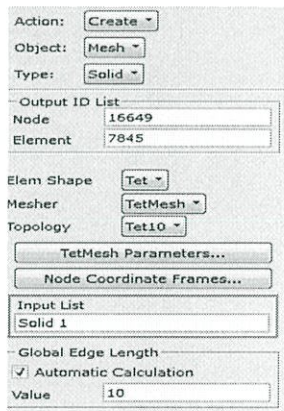
Patran มีเครื่องมือมากมายที่จะช่วยให้นักออกแบบ วิศวกร รวมถึงนักวิเคราะห์ CAE ในการปรับปรุง CAD ที่ด้อยคุณภาพ ไม่ว่าจะเกิดจากการสร้าง หรือเกิดจากการแปลงข้อมูล (Translation) ให้เหมาะกับงาน FEA รวมไปถึงเครื่องมือและกระบวนการวิธีที่มีคุณภาพในการเปลี่ยน CAD ให้เป็นไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลในแบบ หนึ่ง สอง หรือสามมิติ ด้วยวิธี Automatic, Semi Automatic และ Manual เพื่อให้งานสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลมีคุณภาพ และสามารถสำเร็จลงด้วยเวลาอันรวดเร็ว

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของปีกนกบนและปีกนกล่าง

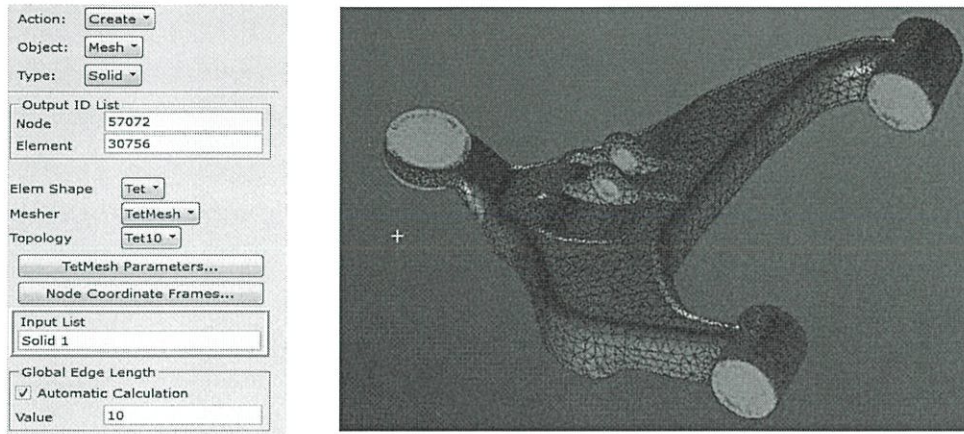
Mass of upper control arm	1.5902 kg
Mass of lower control arm	6.8636 kg
Density	$7874 \text{ kg/m}^3$
Elastic Modulus	206000 MPa
Poisson Ratio	0.3

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Patran

ด้วยวิธีการนี้จะทำให้ชิ้นงานปีกนกบนและปีกนกล่าง จะถูกจำลองชิ้นงาน Flex แทนชิ้นงานแบบ Rigid body ในระบบกันสะเทือน ชิ้นงานแบบ Flex ที่เหมาะสมสำหรับโปรแกรม ADAMS View ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ Normal Mode Analysis ของชิ้นงานไฟไนต์เอลิเมนต์ สร้างเป็นไฟล์สกุล .mnf ด้วยโปรแกรม Patran



รูปที่ 3.18 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปีกนกบน



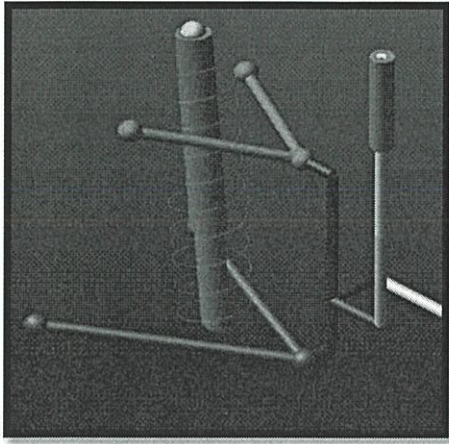
รูปที่ 3.19 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปีกนกกลาง

ตารางที่ 3.4 แสดงตัวอย่างลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชิ้นงานของปีกนกกลางด้วยความถี่ธรรมชาติต่างๆ

Mode7_28.532 Hz	
Mode8_31.325 Hz	
Mode9_39.087 Hz	



เมื่อทำการวัดระยะเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราก็ทำการสร้าง และพัฒนาแบบจำลองจากพิกัดจุดยึดที่สำคัญ ที่ได้มาจากการวัดตัวเครื่องทดสอบการสั่นของจริง



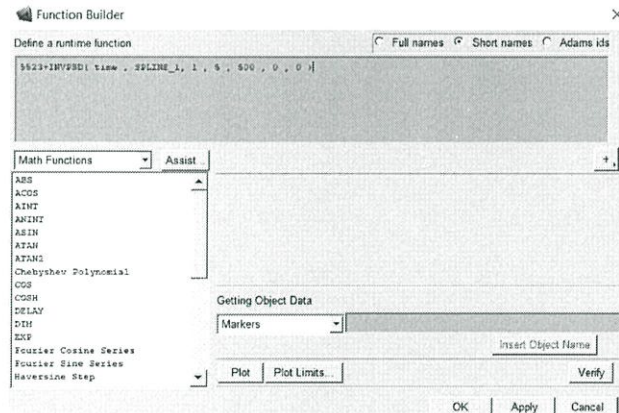
(1)

	Loc_X	Loc_Y	Loc_Z
lca_outer	-31.67	5.93	70.11
lca_front	-275.0	340.0	100.0
lca_rear	89.08	360.71	115.5
uca_outer	26.89	72.23	453.05
uca_rear	90.71	260.25	514.9
uca_front	-166.85	252.17	521.99
spindle	26.89	-100.0	175.0
str_lower	-67.57	162.62	91.69
str_up	-50.0	235.0	690.0
low_str	-57.37	204.63	439.0

(2)

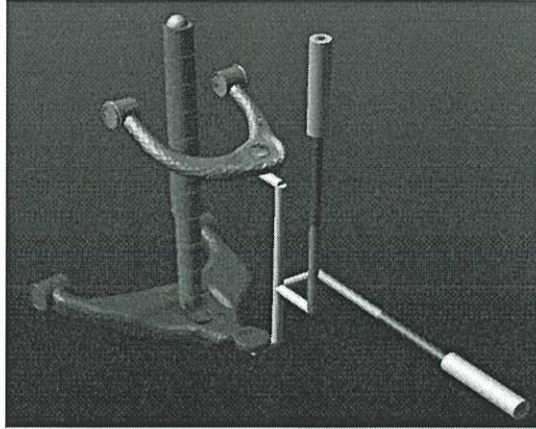
รูปที่ 3.21 1).แบบจำลองที่สร้างบนADAMS View 2).ตำแหน่งจุดยึดที่วัดมาจากเครื่องทดสอบความทนทานจริง

ต่อมาเราทำการหาแรงที่จุดสมดุล ซึ่งก็คือแรงเริ่มต้นที่ใช้ทำให้โมเดลของเราอยู่ในสถานะสมดุลโดยไม่มีแรงเคลื่อนไหว แล้วเราก็ใส่แรงที่ได้จากการวิ่งรถจำลองบนถนนจำลอง โดยใช้การ Inverse power spectral density เพื่อนำแรงที่ปราศจากสัญญาณรบกวนมาใช้งาน

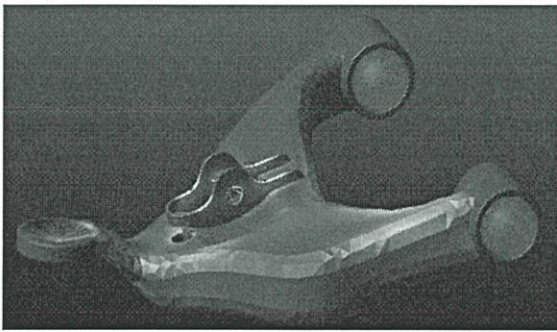


รูปที่ 3.22 ฟังก์ชันแรงที่ใส่ในโปรแกรม ADAMS View

หลังจากใส่แรงแล้ว เราก็นำแรงที่จุดต่างๆในแบบจำลองการสั่นของเรา ไปเปรียบเทียบกับแรงที่เกิดขึ้น ที่จุดเดียวกันในแบบจำลองรถ ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องดังรูปที่ 3.16 เมื่อทดสอบความถูกต้องเสร็จแล้ว เราก็นำเข้าแบบจำลองของ ปีกนกบน และปีกนกกลาง ที่ผ่านการทำให้เป็นชิ้นงานยึดหยุ่นโดยแนวคิดการแบ่งส่วนชิ้นงาน จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Patran



รูปที่ 3.23 แบบจำลองเครื่องทดสอบความทนทานในโปรแกรม ADAMS View



(1)

MAXIMUM PRINCIPAL Hot Spots for lca_flex Date= 2018-04-22 20:07:09						
Model= .suspention		Analysis= Last_Run		Time = 0 to 5 sec		
Top 5 Hot Spots			Abs	Radius= 10 mm		
Hot Spot	Stress	Node	Time	Location wrt LPRF (mm)		
#	(newton/mm**2)	id	(sec)	X	Y	Z
1	273.473	29636	0.2	73.916	333.076	97.0725
2	231.107	40702	0.2	72.8913	285.247	81.4975
3	209.941	40688	0.2	64.3119	274.393	79.2909
4	202.432	40705	0.2	78.5735	299.11	84.1778
5	186.254	53188	0.2	-46.9871	31.3404	60.7418

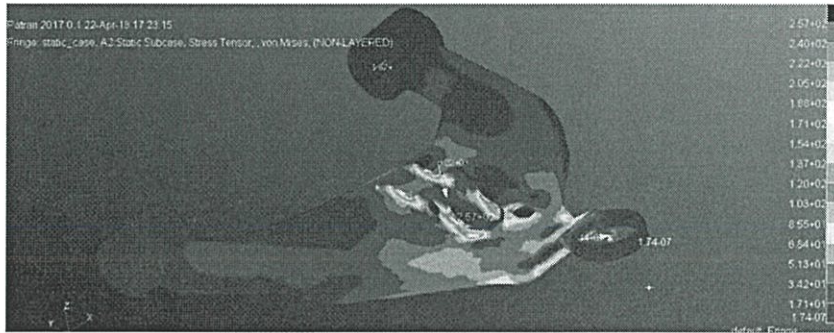
(2)

รูปที่ 3.24 1.Static normal load ใน ADAMS view 2.ตารางความเค้นที่มากที่สุด ใน Static normal load การเทียบแรง static normal load

HARDPOINT	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
LCA Outer	734.71	-861.95	4801.68
LCA Front	-305.89	1452.96	2174.69
LCA Rear	-165.08	481.125	2070.22
LCA Strut	-268.89	-1106.1	-9159

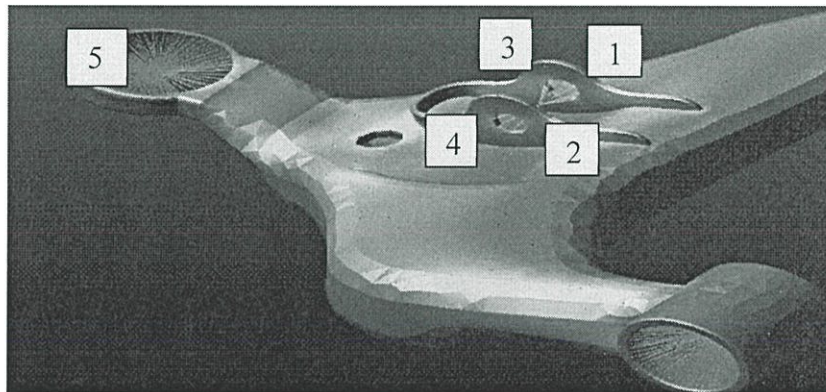
ตารางที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์ของแรงที่จุดจับยึดต่างๆของปีกนกกลาง ( Static normal load) ในโปรแกรม ADAMS View

ต่อมานำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบ stress ที่เกิดขึ้นเพื่อทำการเช็คความถูกต้อง



รูปที่ 3.25 Static normal load ปีกนกกลาง ใน Patran

ซึ่งหลังจากเราทำการเปรียบเทียบแล้วพบว่าค่า Static load นั้นค่าเท่ากันทั้ง 2 โปรแกรม ซึ่งแปลว่ากระบวนการทำนั้นถูกต้อง เราจึงสามารถทำกระบวนการต่อไปได้



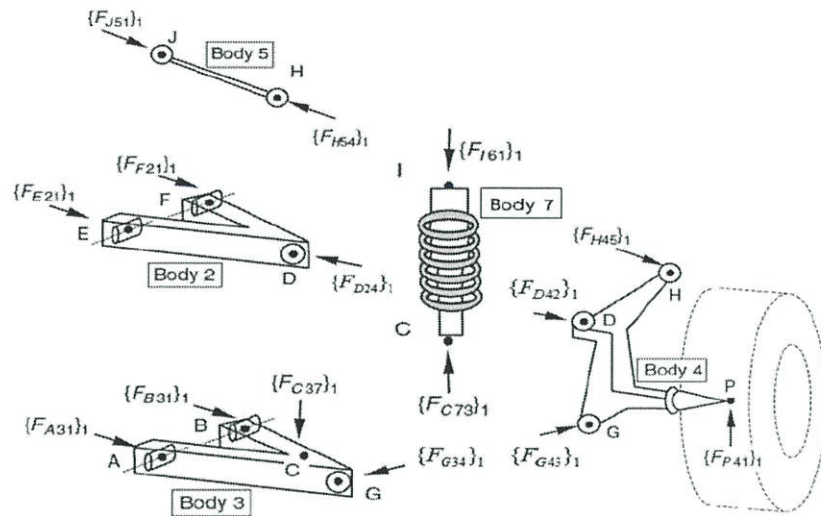
(1)

MAXIMUM PRINCIPAL Hot Spots for PART_18_flex_1 Date= 2018-05-07 13:55:43						
Model= .suspension		Analysis= Last Run		Time = 0 to 10 sec		
Top 10 Hot Spots			Abs	Radius= 10 mm		
Hot Spot	Stress	Node	Time	Location wrt LPRF (mm)		
#	(newton/mm**2)	id	(sec)	X	Y	Z
1	369.75	29636	5.4	73.916	333.076	97.0725
2	310.664	40702	5.4	72.8913	285.247	81.4975
3	284.527	40688	5.4	64.3119	274.393	79.2909
4	271.468	40705	5.4	78.5735	299.11	84.1778
5	250.247	35016	5.4	65.6169	285.965	112.462
6	246.407	31158	5.4	68.6519	296.732	107.674
7	236.971	40680	5.4	53.8329	265.563	77.4317
8	234.047	40726	5.4	83.7312	312.413	84.5377
9	230.48	29981	5.4	75.8319	340.53	90.6819
10	228.018	35000	5.4	62.4614	276.219	113.857

(2)

รูปที่ 3.26 1.ปีกนกกลางที่รับแรงแล้วใน ADAMs View 2.ตารางความเค้นที่มากที่สุดหลังรับแรงที่กระทำ

## Static normal load



รูปที่ 3.27 แผนภูมิอิสระของระบบกันสะเทือนแบบปีกนกคู่ในการวิเคราะห์หาแรงสถิต

ตารางที่ 3.6 ตำแหน่งจุดยึดต่างๆ

Point	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
a	89.08	360.71	115.5
b	-275	340	100
c	-67.57	162.62	91.69
d	26.89	72.23	453.05
e	90.7	260.25	514.9
f	-166.85	252.17	521.9
g	-31.67	5.93	70.11
h	120.96	5.93	175
i	-50	235	690
j	120.96	-594	175
p	26.89	-100	175

เราสามารถหาขนาดและทิศทางของแรงสถิตที่กระทำต่อแต่ละชิ้นส่วนได้จากสมการสมดุลแรงและโมเมนต์ของแต่ละชิ้นงานดังนี้

ซึ่งเราทราบแรงที่กระทำจุด P= 5523 นิวตัน ด้วยโปรแกรม ADAMs Car

สำหรับ ปีกนกบน ( body 2 ) ผลรวมแรงและโมเมนต์รอบจุด D

$$\sum \{F_2\}_1 = \{0\}_1$$

$$\sum \{M_{D2}\}_1 = \{0\}_1$$

สำหรับ ปีกนกกลาง ( body 3 ) ผลรวมแรงและโมเมนต์รอบจุด G

$$\sum \{F_3\}_1 = \{0\}_1$$

$$\sum \{M_{G3}\}_1 = \{0\}_1$$

สำหรับ ปีกนกล่าง ( body 4 ) ผลรวมแรงและโมเมนต์รอบจุด G

$$\sum \{F_4\}_1 = \{0\}_1$$

$$\sum \{M_{G4}\}_1 = \{0\}_1$$

และอีก 2 สมการที่อาศัยหลักการของแรงบนชิ้นส่วนแบบแนวเส้นตรง 2 แรง ของ Tie rod และ Damper

$$\sum \{F_{H54}\}_1 = f_{s1} \{R_{fh}\}_1$$

$$\sum \{F_{C37}\}_1 = f_{s2} \{R_{CI}\}_1$$

เมื่อ  $\{R_{fh}\}_1$  และ  $\{R_{CI}\}_1$  เป็นเวกเตอร์ หนึ่งหน่วยจากจุด J เป็นจุด H ของ Body 5 และจากจุด C ไปจุด I

ของ Body 7 สมการที่ใช้แก้สมการจึงมี 18 สมการ แต่ประกอบด้วย 20 ตัวแปร คือ

Fe21x, Fe21y, Fe21z, Ff21x, Ff21y, Ff21z, Fd24x, Fd24y, Fd24z, Fa31x, Fa31y, Fa31z, Fb31x, Fb31y, Fb31z, Fg34x, Fg34y, Fg34z, fs1, fs2

ดังนั้น จำเป็นต้องหาสมการเพิ่มอีก 2 สมการ ด้วยการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตของปีกนกบนและปีกนกกลาง แรงที่กระทำต่อ จุดจับยึด ตั้งฉากกับแนวการหมุนของปีกนก ได้สมการที่เราสามารถนำไปใช้งานได้อีก 2 สมการ ด้วยหลักการคูณสเกลาร์ของเวกเตอร์

$$\{F_{F21}\}_1 \cdot \{R_{EF}\}_1$$

$$\{F_{B31}\}_1 \cdot \{R_{BA}\}_1$$

เมื่อทราบตำแหน่งของจุดยึดต่างๆ เราสามารถใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Mathematica) หาเวกเตอร์ตำแหน่งและแก้สมการหาค่าแรงที่จุดต่างๆ ในหน่วย นิวตัน

$$\begin{aligned}
& \text{Solve}[\{Fe_{21} + Ff_{21} + Fd_{24} = 0, \text{Cross}[ed, Fe_{21}] + \text{Cross}[fd, Ff_{21}] \\
& = 0, Fa_{31} + Fb_{31} + Fc_{37} + Fg_{34} \\
& = 0, \text{Cross}[ag, Fa_{31}] + \text{Cross}[bg, Fb_{31}] + \text{Cross}[cg, Fc_{37}] \\
& = 0, Fp_{41} + Fh_{45} - Fd_{24} - Fg_{34} \\
& = 0, \text{Cross}[hg, Fh_{45}] + \text{Cross}[pg, Fp_{41}] + \text{Cross}[dg, -Fd_{24}] \\
& = 0, \text{Dot}[Ff_{21}, fe] = 0, \text{Dot}[Fb_{31}, ba] \\
& = 0\}, \{Fe_{21x}, Fe_{21y}, Fe_{21z}, Ff_{21x}, Ff_{21y}, Ff_{21z}, Fd_{24x}, Fd_{24y}, Fd_{24z}, \\
& Fa_{31x}, Fa_{31y}, Fa_{31z}, Fb_{31x}, Fb_{31y}, Fb_{31z}, Fg_{34x}, Fg_{34y}, Fg_{34z}, fs_1, fs_2\}]
\end{aligned}$$

ได้ผลลัพธ์ดังนี้ในปีกนกกลาง

ตารางที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ของแรงที่จุดจับยึดต่างๆของปีกนกกลาง (Static normal load) จากการคำนวณ

HARDPOINT	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
LCA Outer	722.49	-854.66	4724.56
LCA Front	-173.59	1299.76	2341.03
LCA Rear	-286.63	635.252	1864.86
LCA Strut	-262.25	-1080.8	-8930.4

ซึ่งสังเกตจากตารางที่ 3.5 และ 3.7 ค่าผลจากการวิเคราะห์ของแรงที่จุดจับยึดต่างๆของปีกนกกลางจากไนโปรแกรม และการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน

### 3.5 ผลการทดสอบความทนทานของปีกนกกลาง

ผลการทดสอบความทนทานของปีกนกกลางจากแบบจำลองผสมผสานระหว่างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของ Multibody system และการวิเคราะห์ความล้าแบบ S-N curve มีขั้นตอนดังนี้

1. ดูภาพรวมทั่วไปของปีกนกกลาง
2. ตั้งค่า Stress-Life analysis ใน MSC Fatigue ภายในโปรแกรม Patran
3. นำค่า Adams Loads จากหลายๆเงื่อนไขของถนน
4. แจกแรงวัฏจักรการทำงานในรูปแบบต่างๆ
5. ดำเนินการวิเคราะห์ความล้าด้วย MSC Fatigue
6. นำผลที่ได้มาทบทวนและวิจารณ์ใน MSC Patran and Adams

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ระยะทางการเคลื่อนที่แต่ละรอบหาได้จากการคำนวณดังนี้

#### 4.1 ทางตรงถนนเรียบ

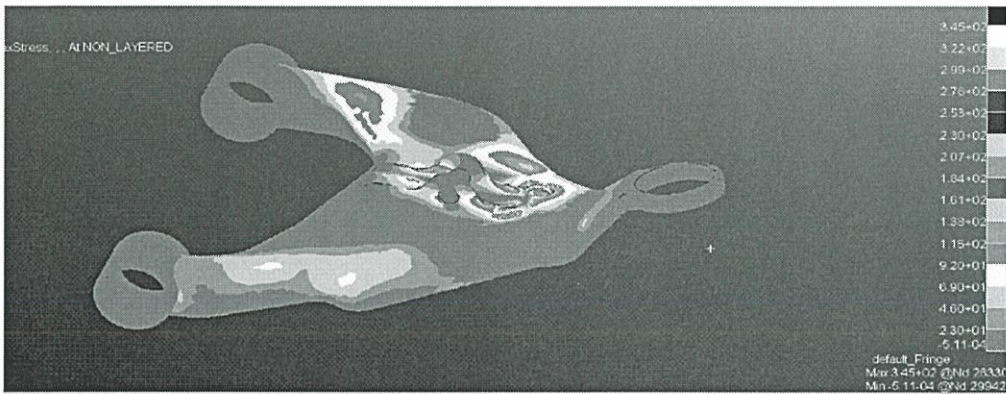


ความเร็วในการเคลื่อนที่ในโปรแกรม ADAMs Car คือ 60 km/hr

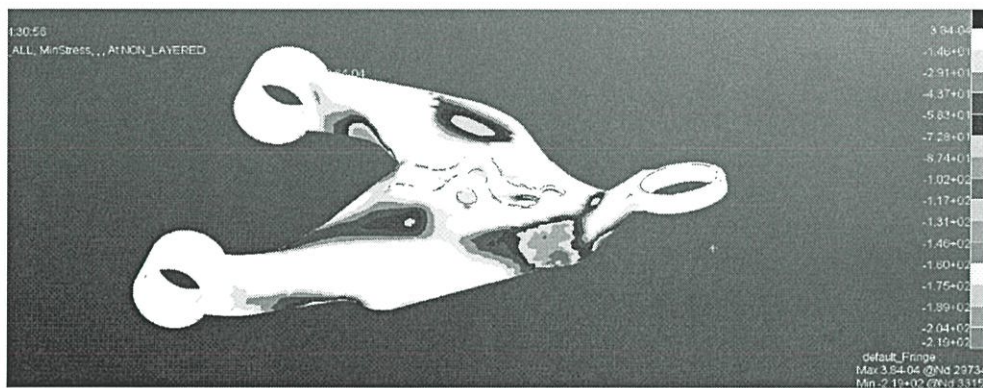
ใช้เวลาการเคลื่อนที่ 10 วินาที รอบทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรม Patran คือ 1000 รอบ  
 ดังนั้น ระยะทางทั้งหมดคือ  $60 \text{ km/hr} * (1/3600)(\text{hr/s}) * 10\text{s} * 1000 = 166.67 \text{ km}$

NodeId	Damage	MaxStress	MinStress	LifeReps	Traveling
		MPa	MPa	Repeats	km
26330	3.30E-05	345.2	-3.30E-04	3.03E+04	5.05E+06
26330	3.30E-05	345.2	-3.30E-04	3.03E+04	5.05E+06
26327	3.09E-05	341.4	-3.15E-04	3.24E+04	5.40E+06

ตารางที่ 4.1 แสดงการคำนวณความทนทานของปีกนกกลางจากโปรแกรม Patran ได้  
 ระยะทางการใช้งานที่ 5,050,000 km



รูปที่ 4.1 maximum stress ของปีกนกกลางบนถนนทางตรงเรียบ



รูปที่ 4.2 minimum stress ของปีกนกกลางบนถนนทางตรงเรียบ

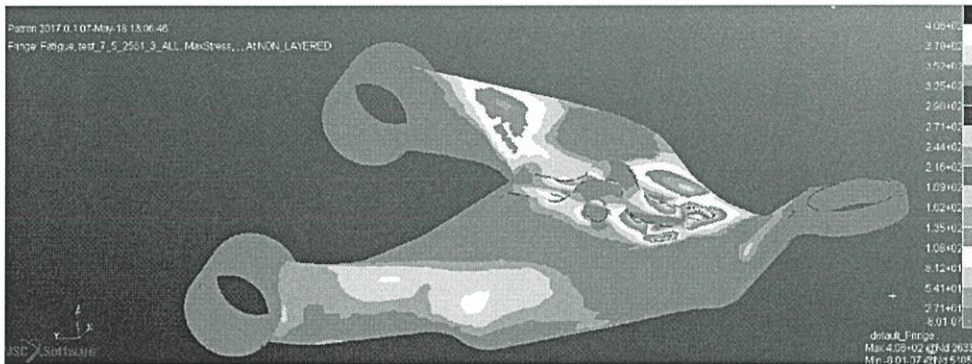
## 4.2 ทางตรงถนนขรุขระ



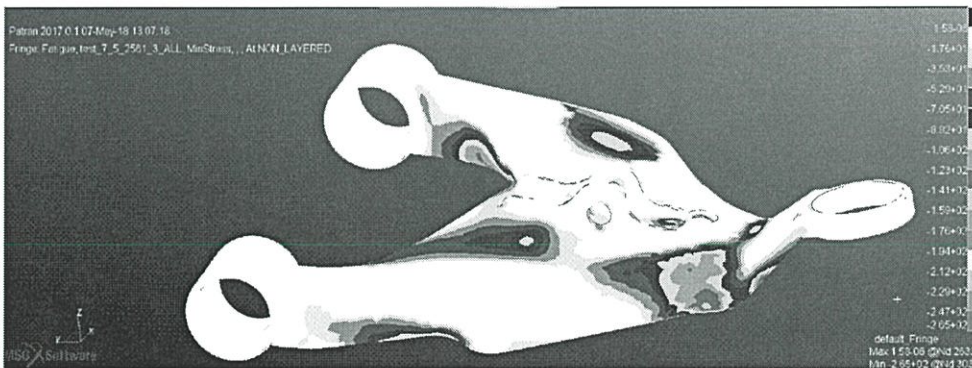
ความเร็วในการเคลื่อนที่ในโปรแกรม ADAMs Car คือ 60 km/hr  
 ใช้เวลาการเคลื่อนที่ 10 วินาที รอบทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรม Patran คือ 1000 รอบ  
 ดังนั้น ระยะทางทั้งหมดคือ  $60 \text{ km/hr} * (1/3600)(\text{hr/s}) * 10\text{s} * 1000 = 166.67\text{km}$

NodeId	Damage	MaxStress	MinStress	LifeReps	Traveling
		MPa	MPa	Repeats	km
26330	1.05E-04	405.9	1.58E-06	9,567	1594500
26330	1.05E-04	405.9	1.58E-06	9,567	1594500
26327	9.63E-05	401.4	1.53E-06	10,400	1733333

ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณความทนทานของปีกนกกลางจากโปรแกรม Patran ได้ระยะทางการใช้งานที่ 1,594,500 km



รูปที่ 4.3 maximum stress ของปีกนกกลางบนถนนทางตรงขรุขระ



รูปที่ 4.4 minimum stress ของปีกนกกลางบนถนนทางตรงขรุขระ

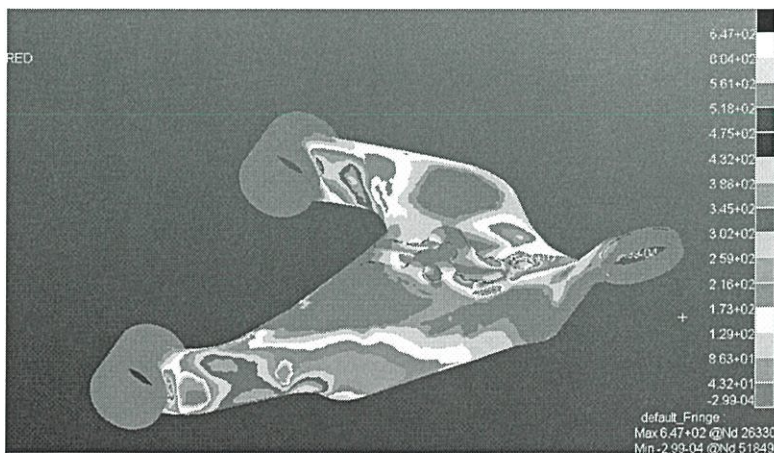
### 4.3 ทางซีกแซกถนนขรุขระ



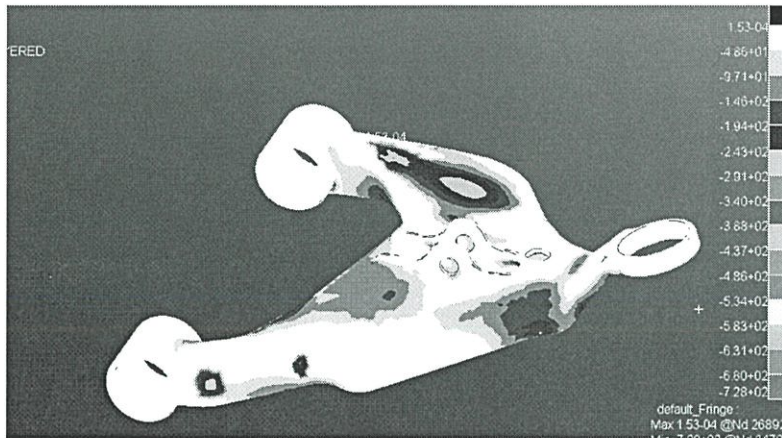
ความเร็วในการเคลื่อนที่ในโปรแกรม ADAMs Car คือ 30 km/hr  
 ใช้เวลาการเคลื่อนที่ 15วินาที รอบ ทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรม Patran คือ 1000 รอบ  
 ดังนั้น ระยะทางทั้งหมดคือ  $30 \text{ km/hr} * (1/3600)(\text{hr/s}) * 15 \text{ s} * 1000 = 125 \text{ km}$

NodeId	Damage	MaxStress	MinStress	LifeReps	Traveling
		MPa	MPa	Repeats	km
26330	9.59E-06	647.5	-33.4	1.04E+04	1.30E+06
26330	9.59E-06	647.5	-33.4	1.04E+04	1.30E+06
26327	8.96E-06	639.8	-30.23	1.12E+04	1.40E+06

ตารางที่ 4.3 แสดงการคำนวณความทนทานของปีกนกกลางจากโปรแกรม Patran ได้ระยะทางการใช้งานที่ 1,300,000 km



รูปที่ 4.5 maximum stress ของปีกนกกลางบนถนนซีกแซกขรุขระ



รูปที่ 4.6 minimum stress ของปีกนกลางบนถนนซิกแซกขรุขระ

#### 4.4 การทดสอบบนถนน 3 เงื่อนไข

ทางตรงถนนเรียบ(40%)+ทางตรงถนนขรุขระ(30%)+ทางซิกแซกถนนขรุขระ(30%)

ความเร็วในการเคลื่อนที่ในโปรแกรม ADAMs Car คือ 60 km/hr ของทางตรงถนนเรียบ

ใช้เวลาการเคลื่อนที่ 10 วินาที รอบทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรม Patran คือ 400 รอบ

ดังนั้น ระยะทางทั้งหมดคือ  $60 \text{ km/hr} * (1/3600)(\text{hr/s}) * 10\text{s} * 600 = 100 \text{ km}$

ความเร็วในการเคลื่อนที่ในโปรแกรม ADAMs Car คือ 60 km/hr ของทางตรงถนนขรุขระ

ใช้เวลาการเคลื่อนที่ 10 วินาที รอบทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรม Patran คือ 300 รอบ

ดังนั้น ระยะทางทั้งหมดคือ  $60 \text{ km/hr} * (1/3600)(\text{hr/s}) * 10\text{s} * 300 = 50 \text{ km}$

ความเร็วในการเคลื่อนที่ในโปรแกรม ADAMs Car คือ 30 km/hr ของทางซิกแซกถนนขรุขระ

ใช้เวลาการเคลื่อนที่ 15วินาที รอบทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรม Patran คือ 300 รอบ

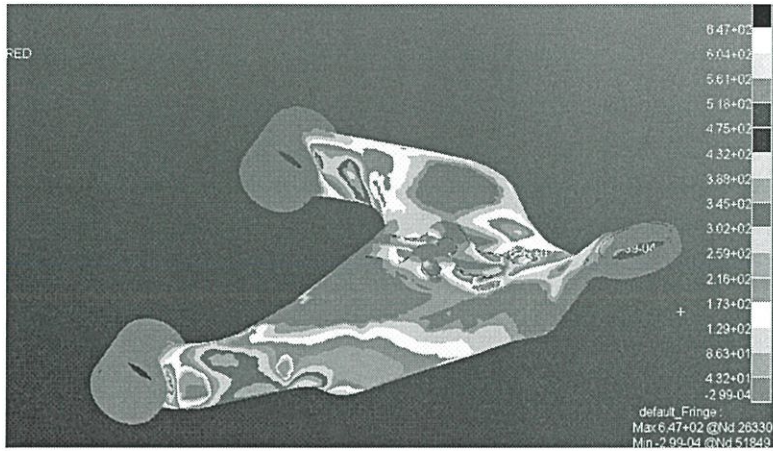
ดังนั้น ระยะทางทั้งหมดคือ  $30 \text{ km/hr} * (1/3600)(\text{hr/s}) * 15 \text{ s} * 300 = 37.5 \text{ km}$

ระยะทางทั้งหมดในแต่ละรอบการเคลื่อนที่ =  $100+50+37.5$

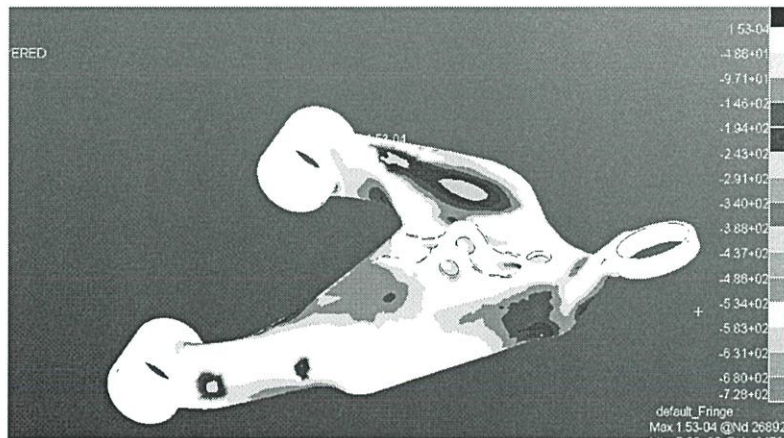
$$= 187.5 \text{ km}$$

NodeId	Damage	EventName	MaxStress	MinStress	LifeReps	Traveling
			MPa	MPa	Repeats	km
26330	9.59E-06	lca_force_zizag_1_00	647.5	-33.4	1.12E+04	2.10E+06
26330	9.59E-06	ALL	647.5	-33.4	1.12E+04	2.10E+06
26327	8.96E-06	lca_force_zizag_1_00	639.8	-30.23	1.35E+04	2.53E+06

ตารางที่ 4.4 แสดงการคำนวณความทนทานของปีกนกลางจากโปรแกรม Patran ได้ระยะทางการใช้งานที่ 2,100,000 km



รูปที่ 4.7 maximum stress ของปีกนกลางบนถนน 3 เ็นไข



รูปที่ 4.8 minimum stress ของปีกนกลางบนถนน 3 เ็นไข

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ที่ทางตรงถนนเรียบ วิ่งด้วยความเร็ว 60 km/hr ปีกนกลางรับความเค้นสูงสุดที่ 345.2 MPa และสามารถทำงานได้ระยะทางยาวนานถึง 5,050,000 Km

5.1.2 ที่ทางตรงถนนขรุขระ วิ่งด้วยความเร็ว 60 km/hr ปีกนกลางรับความเค้นสูงสุดที่ 405.9 MPa และสามารถทำงานได้ระยะทางยาวนานถึง 1,594,500 Km

5.1.3 ที่ทางซิกแซกถนนขรุขระ วิ่งด้วยความเร็ว 30 km/hr ปีกนกลางรับความเค้นสูงสุดที่ 405.9 MPa และสามารถทำงานได้ระยะทางยาวนานถึง 1,300,000 Km

5.1.4 ที่การทดสอบบนถนน 3 เงื่อนไข ทางตรงถนนเรียบ(40%)+ทางตรงถนนขรุขระ(30%)+ทางซิกแซกถนนขรุขระ(30%) วิ่งด้วยความเร็ว 60 และ 30 km/hr ตามลำดับ ปีกนกลางรับความเค้นสูงสุดที่ 647.5 MPa และสามารถทำงานได้ระยะทางยาวนานถึง 2,100,000 Km

#### 5.2 อภิปรายผลการทดลอง

5.2.1 เราสามารถหาอายุการใช้งานของช่วงล่างรถยนต์ได้จริง

5.2.2 เราสามารถสร้างต้นแบบในการทดสอบความทนทานของรถยนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.2.3 เราสามารถลดต้นทุนและเวลาในการหาอายุการใช้งานของช่วงล่างรถยนต์ได้

#### 5.3 วิจัยผลการทดลอง

จากการทดลองทั้ง 4 สภาพถนนเราพบว่า หากรถวิ่งที่ทางตรงถนนเรียบตลอดเวลา ปีกนกลางจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งตรงกันข้ามกับการวิ่งที่ทางซิกแซกถนนขรุขระ ปีกนกลางจะมีอายุการใช้งานที่สั้นลงอย่างเห็นได้ชัด และจากการทดสอบและสร้างแบบจำลองต่างๆในโปรแกรมเราพบว่า ที่ถนนราบเรียบปีกนกลางจะรับความเค้นสูงสุดต่างกับถนนขรุขระอย่างมีนัยยะสำคัญ อันเนื่องมาจากปีกนกลางนั้นรับแรงกระแทกในแนวตั้งเป็นอย่างมาก และการวิ่งบนถนนขรุขระนั้นปฏิเสธไม่ได้เลยว่ารถต้องรับแรงกระแทกในตั้งจากพื้นถนนที่ไม่ราบเรียบ

#### 5.4 แผนงานในอนาคต

5.4.1 สามารถหาอายุการใช้งานของปีกนกลางที่สภาพถนนอื่นๆได้ เช่น ขึ้น-ลงสะพาน เป็นต้น

5.4.2 สามารถหาอายุการใช้งานของช่วงล่างรถยนต์ส่วนอื่นได้

5.4.3 สามารถนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ด้านอื่นๆเช่น การวิจัยและพัฒนา รวมถึงกระบวนการผลิตช่วงล่างรถยนต์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] Michael Blundell and Damian Harty, Multibody Systems Approach to Vehicle,2004
- [2] Kenneth G. McConnell,Vibration Testing Theory and Practice,1995
- [3] Krishnamoorthy, C.S ,Finite Element Analysis: Theory and Programming,2006
- [4] WRIGHT-PATTERSON,AIR FORCE BASE DYNAMIC TERRAIN INPUTS TO PREDICT STRUCTURAL INTEGRITY OF GROUND VEHICLES,1988
- [5] Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design,2011

## ภาคผนวก

สมการที่ใช้ในโปรแกรม Mathematica

### Input

```
a={89.08,360.71,115.5};
b={-275,340,100};
c={-67.57,162.62,91.69};
d={26.89,72.23,453.05};
e={90.7,260.25,514.9};
f={-166.85,252.17,521.9};
g={-31.67,5.93,70.11};
h = {120.96,5.93,175};
i={-50,235,690};
j = {120.96,-594,175};
p={26.89,-100,175};
ci=c-i;
hj=h-j;
ed=e-d;
fd=f-d;
cg=c-g;
ag=a-g;
bg=b-g;
pg=p-g;
dg=d-g;
hg=h-g;
fe=f-e;
ba=b-a;
hp=h-p;
dp=d-p;
gp=g-p;
mp={0,0,0};
fe21={fe21x,fe21y,fe21z};
```

```

ff21={ff21x,ff21y,ff21z};
fd24={fd24x,fd24y,fd24z};
fa31={fa31x,fa31y,fa31z};
fb31={fb31x,fb31y,fb31z};
fg34={fg34x,fg34y,fg34z};
fh45=fs1*hj/Norm[hj];
fc37=fs2*ci/Norm[ci];
fp41={0,0,5400};
Solve[{fe21+ff21+fd24==0,Cross[ed,fe21]+Cross[fd,ff21]==0,fa31+fb31+fc37+fg34==0,Cross[ag,fa3
1]+Cross[bg,fb31]+Cross[cg,fc37]==0,fp41+fh45-fd24-
fg34==0,Cross[hg,fh45]+Cross[pg,fp41]+Cross[dg,-
fd24]==0,Dot[ff21,fe]==0,Dot[fb31,ba]==0},{fe21x,fe21y,fe21z,ff21x,ff21y,ff21z,fd24x,fd24y,fd24z,f
a31x,fa31y,fa31z,fb31x,fb31y,fb31z,fg34x,fg34y,fg34z,fs1,fs2}]

```

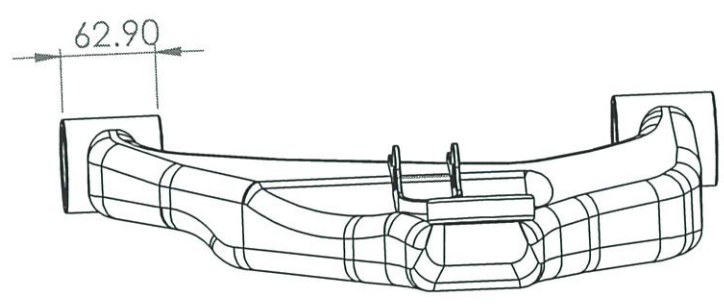
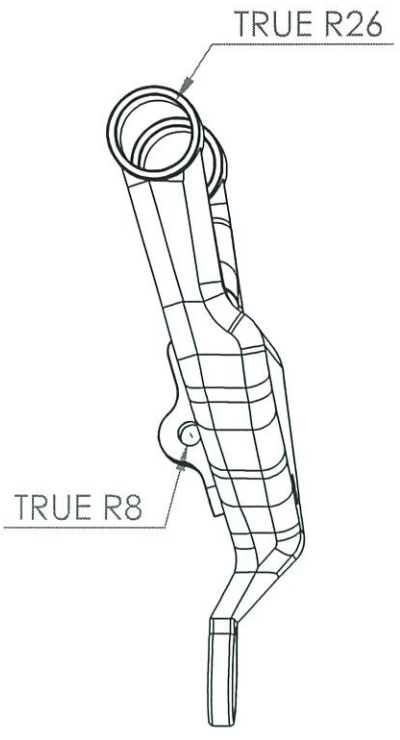
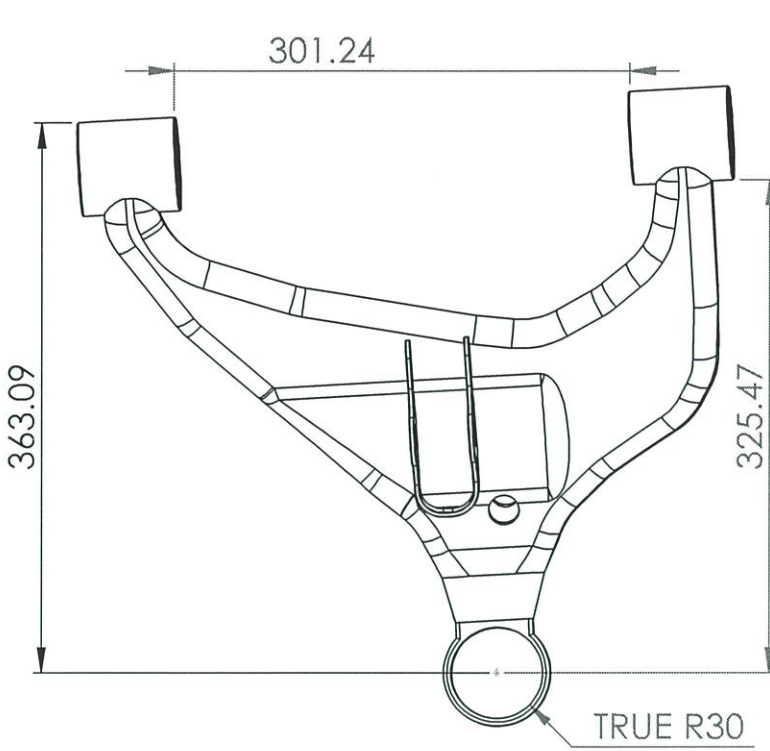
### Output

```

fe21x -> 700.508, fe21y -> -899.433, fe21z -> -333.993,
ff21x -> 21.9818, ff21y -> -996.478, ff21z -> -341.447,
fd24x -> -722.49, fd24y -> 1895.91, fd24z -> 675.441,
fa31x -> -286.638, fa31y -> 635.252, fa31z -> 1864.86,
fb31x -> -173.599, fb31y -> 1299.76, fb31z -> 2341.03,
fg34x -> 722.49, fg34y -> -854.663, fg34z -> 4724.56,
fs1 -> 1041.25, fs2 -> 8999.38

```





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:			
DRAWN						
CHK'D						
APPVD						
MFG						
Q.A			MATERIAL:	DWG NO.	A4	
			WEIGHT:	SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1	

lowerarm\_left