

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

ปริญญา

เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม สาขา โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชา

เรื่อง การประมาณอายุความล้าของโครงสร้างสามล้อสกายแลป

Fatigue Lifetime Estimation of Samlor Skylab Structure

นามผู้วิจัย นายวีรฉัตร พลแสน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(_____ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชพล ชังชู, Ph.D.____)

ประธานสาขาวิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชพล ชังชู, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(_____รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.____) คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประมาณอายุความล้ำของโครงสร้างสามล้อสกายแลป

Fatigue Lifetime Estimation of Samlor Skylab Structure

โดย

นายวีรฉัตร พลแสน

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม) พ.ศ. 2552 วีรฉัตร พลแสน 2552: การประมาณอายุความล้าของโครงสร้างสามล้อสกายแลป ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม) สาขาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ประพจน์ ขุนทอง, Ph.D. 86 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์อายุความล้าของโครงสร้างรถสามล้อสกายแลปด้วย ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างถูกคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอ-ลิเมนต์ ภาระกระทำบนโครงสร้างเป็นผลมาจากความขรุขระของผิวถนนที่ให้เป็นแบบ Random Two-Dimensional Isotropic Gaussian Field วิธีการ Stress-Life ถูกใช้ในการทำนายอายุความล้าของ โครงสร้างโดยผลจากค่าความเค้นเฉลี่ยของความเค้น Alternating ซึ่งถูกรวมด้วยวิธีการ Goodman และด้วยการใช้กฎ Palmgren-Miner ในการคำนวณความเสียหายสะสมกับการใช้วิธี Rainflow สำหรับการนับจำนวนรอบความเค้น Weerachat Polsan 2009: Fatigue Lifetime Estimation of Samlor Skylab Structure. Master of Engineering (Industrial Production Technology), Major Field: Industrial Production Technology, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Mr. Prapod Kontong, Ph.D. 86 pages.

Numerical analysis of high-cycle fatigue life for the structure of Rot Samlor Skylab is presented. Stress time history for the structure is computed by means of linear transient finite element analysis. Rough pavement surfaces inducing random loads on the structure are represented by a random two-dimensional isotropic Gaussian field. The stress-life (S-N) method was use. The effect of the mean value of the alternating stress has been taken in to account. In this work, Goodman method with Palmgren-Miner's rule were used to compute the cumulative damage and the rainflow method for cycles counting is employed to predict the fatigue life of the structures.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ คร.ประพจน์ ขุนทอง อาจารย์ประจำภาควิชา เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบกุณบริษัทในเกรือกลุ่มไทยซัมมิทที่เป็นผู้อนุเกราะห์ทุนการศึกษาระดับวิศวกรรม-ศาสตรมหาบัณฑิตในโกรงการพัฒนาบุกกลากรซึ่งบุกกลที่ให้กำปรึกษาและข้อกิดดี ๆ กุณจิระป ราชณ์ อักรสุวรรณชัย กุณไพโรจน์ วิลาวรรณ เพื่อนร่วมงานที่แสนดีและขอขอบกุณเป็นพิเศษ กุณ สิริกานต์ อินทรไพโรจน์

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัวและเพื่อน ๆ ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้ กำลังใจและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

> วีรฉัตร พลแสน พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
ີວີ້ຫຼືກາງ	33
ผลและวิจารณ์	45
ผล	45
วิจารณ์	66
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก แสดงคุณสมบัติของสามล้อสกายแลป	74
ภาคผนวก ข	80
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	86

สารบัญตาราง

ตารางที่

1	ค่า a และ b ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิต	8
2	ค่าแฟคเตอร์อิทธิพลแก้ K _b	10
3	ค่าแฟคเตอร์อิทธิพลจากกระบวนการผลิต	13
4	สรุปค่าภาระตามการนับ Rainflow counting	25
5	ค่าประมาณการลักษณะของความขรุขระในรูป Spectral	26
6	สัมประสิทธิ์ความขรุขระตามลักษณะของผิวถนน	37
7	คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชุคกันสะเทือน	40
8	ผลค่าเฉลี่ยอายุการใช้งาน 5 ตัวอย่างโคยบรรทุก 1 คนขับ 6 ผู้โคยสาร	65
9	ผลก่าเฉลี่ยอายุการใช้งาน 5 ตัวอย่างการบรรทุก 1 คนขับ 10 ผู้โคยสาร	66

ตารางผนวกที่

ก1	แสดงคุณสมบัติของสามถ้อสกายแลป	75
ก2	แสดงส่วนผสมทางเกมีของกุณสมบัติเหล็ก JIS G3444 STK490	77
ก3	แสดงคุณสมบัติทางกลของเหล็ก JIS G3444 STK490	77
ข1	Mean Monotonic and Cyclic Stress - Strain Properties of Selected Steels	81
ข2	Mechanical Properties of Three Non-Steel Metals	84
ข3	Finite Life Fatigue Strengths of Selected Plain Carbon Steels	85

หน้า

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของความเก้นสลับกระทำสองทิศทาง(R=-1)	3
2	S-N diagram ของเหล็กกล้าผสม โครเมียม- โมลิคินั่ม, ผ่านกระบวนการอบ	
	(normalized)	4
3	แสดง Stress กับ จำนวนรอบของ aluminium alloy 2014 และ steel 1047	5
4	ค่าFatigue Limit ของเหล็กที่ผิวชิ้นงานที่ผ่ากระบวนการผลิตต่างๆ	9
5	การกระจายตัวของก่ากวามเก้นในแต่ละขนาดของชิ้นงานทดลอง	
	ในภาระแบบดัดและบิด	10
6	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติแรงคึงของเหล็ก	11
7	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อพิกัดกวามทนทาน (N=10 ⁷)ของโลหะผสมการ์บอน	
	และ โลหะผสม	12
8	ความเค้น- เวลา	15
9	กราฟของกู๊ดแมนแสดงความต้านแรงและขีดจำกัดขององค์ประกอบต่างๆ	
	สำหรับค่าความเค้นเฉลี่ย	16
10	ใดอะแกรมแสดงค่าความเค้นเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงดึงและกดต่อค่าอัตราส่วน	
	ค่าความแข็งแรงต่อพิกัดความความทนทาน	17
11	ใคอะแกรมแสคงการถ้าของเหล็กกล้า AISI 4340	17
12	หลักเกณฑ์ความเสียหายพื้นฐาน 5 แบบ	19
13	แสดงขอบเขตของความเค้นครากตามทฤษฎี von Mises	20
14	ตัวอย่างการนับรอบแบบ Rainflow counting (a)	23
15	ตัวอย่างการนับรอบแบบ Rainflow counting (b)	24
16	ตัวอย่างการนับรอบแบบ Rainflow counting (c)	24
17	แสดงลักษณะของแบบจำลอง	28
18	เอลิเมนต์เหล็กท่อนในระบบใหญ่ X-Y-Z	31
19	ขั้นตอนการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างรถสามล้อสกายแลป	34
20	ลักษณะ Elemenet ที่เป็น Beam Element และ Shell Element	35

ภาพที่		หน้า
21	Condition Boundary ของ Input ต่างๆในแบบจำลอง	36
22	ตัวแปรสุ่มที่มีคุณสมบัติทางสถิติเป็น White noise	38
23	ผิวถนนที่ได้จากแบบจำลอง AVERAGE CONDITON ที่ผ่านการกรอง	38
24	ผิวถนนที่ได้จากแบบจำลอง GOOD CONDITION ที่ผ่านการกรอง	39
25	ผิวถนนที่ได้จากแบบจำลอง POOR CONDITION ที่ผ่านการกรอง	39
26	โครงสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบส่วนหน้าและส่วนหลัง	40
27	ค่าที่ใส่เป็นตัวแทนผิวถนนในการกระตุ้นการสั่นในโครงสร้างและ	
	จุครองรับ โครงสร้าง	41
28	ลักษณะของผิวถนนในแบบต่างๆ	42
29	Stress Bending, von Mises สูงสุด 27.1 Mpa โดยที่ 1 คนขับ 6 คนโดยสาร	45
30	Stress bending, von Mises สูงสุด 27.1 Mpa โดยที่ 1 คนขับ 10 คนโดยสาร	46
31	ระยะขจัคที่จุครองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average Condition	
	ที่ความเร็ว60 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	47
32	ระยะขจัคที่จุครองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average Condition	
	ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	47
33	ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average Condition	
	ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	48
34	ระยะขจัคที่จุครองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor Condition	
	ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	48
35	ระยะขจัคที่จุครองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor Condition	
	ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	49
36	ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition	
	ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	49
37	ระยะขจัคที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average condition	

ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)

50

ภาพที่		หน้า
38	ลักษณะระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average Condition	
	ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	50
39	ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average condition	
	ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โคยสาร)	51
40	ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition	
	ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	51
41	ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition	
	ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	52
42	ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition	
	ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	52
43	ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average	
	Condition ที่ความเร็ว 60 กม /ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	53
44	จุดเสียหายที่บริเวณ Node 4313 ผิวถนนแบบ Average Condition ความเร็ว	
	60 กม/ชม.อายุการใช้งาน 6 ปี (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	54
45	ความเค้นที่บริเวณ Node 2235 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Average	
	Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	54
46	จุดเสียหายที่บริเวณ Node 2235 ผิวถนนแบบ Average Condition ความเร็ว	
	40 กม/ชม.อายุการใช้งาน 9 ปี (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	55
47	ความเค้นที่บริเวณ Node 3597 เป็นผิวถนน Average Condition ความเร็ว	
	20 กม/ชม. ค่าความเค้นมีค่าต่ำกว่าพิกัดความทนทาน (Endurance Limit)	
	โดยมีอายุการใช้งานไม่จำกัดจากกวามถ้ำ (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	55
48	โครงสร้างวิ่งบนผิวถนน Average Condition ความเร็ว 20 กม/ชม. มีค่าความ	
	เค้นต่ำกว่าพิกัดความทนทาน (Endurance Limit) โดยมีอายุการใช้งานไม่จำกัด	
	จากความถ้ำ (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	56
49	ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Poor	
	Condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	56

ภาพที่		หน้า
50	จุดเสียหายที่บริเวณ Node 4313 ผิวถนนแบบ Poor Condition ความเร็ว 60 กม/	
	ชม. อายุการใช้งาน 1 เดือน (1 คนขับ 6 ผู้โคยสาร)	57
51	ความเก้นที่บริเวณ Node 5140 เป็นจุคเสียหายที่สุคโดยเป็นผิวถนน Poor	
	Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	57
52	จุคเสียหายที่บริเวณ Node 5140 ผิวถนนแบบ Poor Condition ความเร็ว	
	40 กม/ชม.อายุการใช้งาน 2 เดือน (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	58
53	ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor	
	Condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	58
54	จุคเสียหายที่บริเวณ Node 4313 ผิวถนนแบบ Poor Condition ความเร็ว	
	20 กม/ชม. อายุการใช้งาน 27 เดือน (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)	59
55	ความเค้นที่บริเวณ Node 3597 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Average	
	Condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โคยสาร)	59
56	แสดงจุดที่เสียหายของโครงสร้างที่บริเวณ Node3597 ผิวถนนแบบ Average	
	ที่ ความเร็ว 60 กม/ชม.อายุการ 3.6 เคือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	60
57	ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average	
	Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	60
58	ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Average	
	Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. อายุการใช้งาน 19.3 เคือน (1 คนขับ 10 ผู้ โดยสาร)	61
59	ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average	
	Condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	61
60	ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average	
	Condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม.อายุการใช้งาน 54 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	62
61	ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโคยเป็นผิวถนน Poor	
	Condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	62
62	ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Poor Condition	
	ที่ความเร็ว 60 กม/ชม.อายุการใช้งาน 0.15 เคือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	63

ภาพที่		หน้า
63	ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุคเสียหายที่สุคโคยเป็นผิวถนน Poor	
	Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	63
64	ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Poor Condition	
	ที่ความเร็ว 40 กม/ชม.อายุการใช้งาน 1.9 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	64
65	ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Poor	
	Condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	64
66	ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Poor Condition	
	ที่ความเร็ว 20 กม/ชม.อายุการใช้งาน 14 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)	65

ภาพผนวกที่

ก1	แสดงลักษณะหน้ำตัดในโครงสร้างและคุณสมบัติ JIS G3444 STK490	77
ก2	กราฟกุณสมบัติจำนวนรอบความเสียหายกับระดับความเค้นของเหล็ก	
	SAE1020_107_HR	77
ก3	แบบแสดงขนาดตัวโครงสร้างรถสามล้อสกายแลป	78

คำอชิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

А	=	พื้นที่
A_r	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระตามลักษณะผิวถนน
С	=	ค่าความหน่วง
[C]	=	เมตริกความหน่วง
D	=	ความเสียหายสะสม
F_a	=	แอมพิลจูดของแรงที่กระทำสลับไปมา
F_m	=	ค่าแรงกระทำเฉลี่ย
F(t)	=	ฟังก์ชั่นแรงที่กระทำในโดเมนเวลา
k _a	=	แฟกเตอร์แก้ผิว
k_{b}	=	แฟกเตอร์แก้ขนาด
k _c	=	แฟกเตอร์แก้ระดับความน่าเชื่อถือ
k _{dc}	=	แฟกเตอร์แก้อุณหภูมิขณะใช้งาน
k_{f}	=	แฟกเตอร์ค่าอิทธิพลอื่น ๆ ที่เหลือ
[k]	=	เมตริกสตีฟเนส
L	=	ความยาว
[M]	=	ເມຕຣົກນວລ
N	=	จำนวนรอบ
N_i	=	อายุการถ้าที่ระดับความเค้น σ_i
<i>n</i> _i	=	อายุการใช้งานภายใต้ความเค้น $\sigma_{_i}$
R	=	อัตราส่วนความเค้น
r(x)	=	ฟังก์ชั่นแสดงลักษณะผิวถนน
$S_r(w)$	=	ฟังก์ชั่นของความขรุขระในความถี่ Wave number
S_a	=	ความต้ำนแรงสลับ
S_{e}	=	พิกัดความทนทาน
S'_e	=	พิกัดความทนทานที่ได้จากการทดลองตามมาตรฐาน Moor
S_f	=	ความต้านทานการถ้า
S_m	=	ความต้ำนแรงเฉลี่ย
S_{ut}	=	ความด้ำนทานแรงสูงสุด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

S_y	=	ความต้านทานความคราก
S_{yc}	=	ความต้านทานความครากอัด
S_{yt}	=	ความต้านทานความกรากดึง
t	=	ເວລາ
W_o	=	ความถี่ไม่ต่อเนื่อง
$\sigma_{_{ m min}}$	=	กวามเก้นต่ำสุด
$\sigma_{\scriptscriptstyle m max}$	=	ความเค้นสูงสุด
$\sigma_{_a}$	=	ความเค้นสลับ
$\sigma_{_m}$	=	ความเค้นเฉลี่ย
σ_r	=	ย่านของความเค้น
$\sigma_{_s}$	=	ความเค้นสถิต
$\{\delta\}$	=	เวกเตอร์ระยะ
$\left\{ \dot{\delta} \right\}$	=	เวกเตอร์ความเร็ว
$\left\{ \ddot{\delta} ight\}$	=	เวกเตอร์ความเร่ง
$\{\phi\}$	=	รูปร่างโหมด
ρ	=	ความหนาแน่นมวล
ω	=	ความถึ่
ξ_i	=	แทนอัตราส่วนระหว่างความหน่วงและความเฉื่อย
$arphi_k$	=	มุมเฟสของลำคับ $k^{\prime h}$ กระจายตัวแบบสุ่ม

การประมาณอายุความล้าของโครงสร้างสามล้อสกายแลป

Fatigue Lifetime Estimation of Samlor Skylab Structure

คำนำ

ความถ้า (Fatigue) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างประเภทต่างๆที่ต้องรับแรงกระทำ แบบซ้ำๆ และสามารถทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดการวิบัติได้ภายใต้ความเก้นที่มีค่าต่ำกว่าค่าความ เก้นที่จุดครากของวัสดุหรือความเก้นที่ยอมให้ที่ได้ออกแบบไว้สำหรับชิ้นส่วนนั้นๆ เป็นสาเหตุ หลักของการวิบัติที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วน, โครงสร้างต่างๆ ฉะนั้นในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง จึงมีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาความล้าของโครงสร้างดังการประมาณอายุความล้าของโครงสร้าง รถสามล้อสกายแลปซึ่งมีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อความปลอดภัยในการขับขึ่

เนื่องจากชิ้นส่วนหรือรอยต่อชิ้นส่วนประเภทต่างๆ ส่วนใหญ่จะมีกำลังในการด้านทาน กวามล้าที่ต่ำกว่าผู้ออกแบบได้ประเมินไว้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นส่วนโครงสร้างที่เกิดสภาวะของ กวามเก้นที่เพิ่มสูงขึ้น(Stress Concentration)ตัวอย่างเช่น ในชิ้นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด อย่างทันทีทันใดและรอยแตกร้าวเริ่มต้นที่มีอยู่แล้วในวัสดุ(Defect, Flaw) เหล่านี้เป็นต้น จะเป็น บริเวณที่เกิดกวามเสียหายจากกวามล้าได้มากกว่าบริเวณอื่น ซึ่งในบริเวณดังกล่าวนี้เมื่อรับแรงกระทำ ซ้ำๆ อย่างต่อเนื่องจะมีโอกาสเกิดการแตกร้าวเริ่มต้นจากกวามล้าและอาจนำไปสู่กวามเสียหายของ โครงสร้างและโครงสร้างเกิดการวิบัติจากกวามล้า ได้ดังนั้นในกระบวนการออกแบบจึงมีกวาม จำเป็นที่ต้องพิจารณาถึงกวามเสียหายอันเนื่องมา จากกวามล้า ในกระบวนการออกแบบจึงมีกวาม วิธีการทดลองนั้นมีกวามยุ่งยากและซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูงการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการ

ในงานวิจัยนี้เป็นการประมาณอายุความล้าของโครงสร้างรถสามล้อสกายแลปด้วยระเบียบวิธี เชิงตัวเลข ความเค้นในโครงสร้างซึ่งเป็นผลมาจากการที่รถวิ่งบนผิวถนนที่ขรุขระถูกวิเคราะห์ด้วย ระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ โดยผิวถนนให้มีลักษณะเป็นแบบ Random Two-Dimensional Isotropic Gaussian Field จากนั้นค่าความเค้นที่ได้ในโดเมนของเวลาถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความล้าตัว ของโครงสร้างด้วยวิธี การ Stress -Life (S-N) โดยใช้สมการของ Goodman ในการแก้ค่า Mean Stress ซึ่งกฎของ Palmgren-Miner ถูกนำมาใช้ในการกำนวณค่าความเสียหายสะสมและวิธีการ Rainflow ใน การนับจำนวนรอบความเค้น

วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์ความถ้าในโครงสร้างสามถ้อสกายแลปด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ ซึ่ง ภาระความถ้านี้เกิดจากความขุรขระของผิวถนน ดังนั้นการวิเคราะห์ความถ้าจะเป็นแบบเชิงสุ่ม (Random -Fatigue Analysis) โดยผลการวิเคราะห์จะเป็นการประมาณการถึงอายุของความถ้าตัวใน การใช้งานของโครงสร้างรถในสภาพต่างๆของผิวถนนที่เกิดขึ้นในการจราจรผ่านสภาพถนนต่างๆ และในความเร็ว, ภารบรรทุกที่ต่างกัน

ขอบเขตการวิจัย

 การวิเคราะห์ด้านสถิตศาสตร์ (Static Analysis) อันเป็นผลมาจากเกิดจากน้ำหนักตัว โครงสร้าง, สัมภาระและน้ำหนักผู้โดยสาร

 การวิเคราะห์ด้านพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) จากการที่รถสามล้อวิ่งบนผิวถนนที่ ขุรขระในงานวิจัยนี้ผิวถนนถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็น Two-Dimensional Gaussian, Isotrop and Homogeneous Random Filed และในการวิเคราะห์ความล้าเชิงสุ่ม (Random Fatigue Analysis) อยู่ บนหลักการพื้นฐานดังนี้

- Stess- Life Wöhler (1867) แสดงระดับความเค้นกับจำนวนรอบที่ทำให้วัสดุเกิดความล้า

- Palmgren-Miner'rule Palmgren และ Miner (1925, 1945) สำหรับการคำนวณความ เสียหายสะสมที่เกิดในโครงสร้าง

- Rainflow method Matsuishi and Endo (1968) ใช้เป็นวิธีสำหรับการนับจำนวนรอบความ เก้น

- ไม่พิจารณารอยเชื่อม โดยคิดโครงสร้างเป็นวัสดุเนื้อเคียวกันทั้งหมด

- ภารกระทำกับโครงสร้างรถที่เกิดจากผิวถนน ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผิว ถนนใช้แบบจำลองของ Hao Wang (2006)

- แบบจำลองโครงสร้างซึ่งมีชุดกันสะเทือนโดยมีจุดสัมผัสติดกันเสมอระหว่างชุดกัน สะเทือนกับผิวถนนในทุกสภาวะการที่พิจารณา

การตรวจเอกสาร

1. พื้นฐานเกี่ยวกับการถ้าตัวของวัสดุ

1.1 การประมาณการความล้ำ (Fatigue Lifetime Estimation)

Shigley and Miscke(1989) อธิบายถึงวิธีหลักการที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และ ออกแบบชิ้นงานที่เป็นผลจากเกิดความเสียหายเนื่องจากการล้าตัว ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถแบ่ง ออกเป็น 3 วิธีประ -กอบด้วย Stress-Life Method, Strain-Life Method และ Linear-Elastic Fracture Mechanics ซึ่งวิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่จะพยายามทำนายอายุการล้าของชิ้นงานเป็น วงรอบการรับโหลดที่จะเกิดความเสียหาย N รอบโดยทั่วไปจะแบ่งเป็นวงรอบการใช้งานต่ำ (Low – Cycle Fatigue) จะหมายถึงชิ้นงานที่มีอายุการใช้งานในช่วงวงรอบ $1 \le N \le 10^3$ รอบ และวงรอบการใช้งานสูง (High – Cycle Fatigue) จะหมายถึงชิ้นงานเที่มีอายุการใช้งานในช่วง วงรอบ N > 10³ รอบ การรับโหลดแบบวัฏจักร 1 วงรอบ (N = 1) จะประกอบ ด้วยการใส่ไหลด ซึ่งเป็นความเก้นเข้าไป 1 ครั้งจากนั้นกีนำโหลดออกแล้วใส่โหลดเข้าไปในทิศทางตรงกันข้ามอีก 1 ครั้งแล้วนำโหลดออกดังแสดงตามรูปที่ 1 ดังนั้นในกรณีเดียวกับการทดลองดังชิ้นงานทดสอบ อย่างง่าย ดังรูปกาพที่ 1



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของความเค้นสลับกระทำสองทิศทาง(R=-1)

ทีมา: RalpI.Stephens and Ali fatemr (2001)

นอกจากนั้นรูปภาพที่ 2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความล้ามักกระจัดกระจายทำให้เกิด ความแปรปรวนในค่า N ที่วัดได้จากชิ้นงานจำนวนมาก แม้ว่าการทดสอบที่ระดับความเค้นเดียวกัน ความแปรปรวนนี้นำไปสู่ความคลาดเกลื่อนในการออกแบบอย่างมาก โดยเพราะอายุการใช้งาน และพิกัดความล้า (Fatigue limit) ซึ่งการกระจายตัวดังกล่าวของข้อมูลเป็นผลมาจากความไว ของความล้(Fatigue sensitivty) ต่อจำนวนการทดสอบและตัวแปรต่างๆจากวัสดุ ซึ่งยากที่ ควบคุมได้แม่นยำโดยตัวแปรเหล่านี้ได้แก่การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ, การเตรียมผิว, ตัวแปรทาง โลหะวิทยา, แนวการวางชิ้นงานในอุปกรณ์ทดสอบและความเค้นเฉลี่ย ดังนั้นเส้นกราฟความล้านี้ จะได้มาจากการปรับค่าให้ลงตัวอย่าง ดี (bestfit curve) โดยการลากผ่านเส้นผ่าข้อมูลเฉลี่ย นอกจากในรูปที่ 2 นั้นยังแสดงให้เห็นว่ามีการจำแนกการล้าออกเป็นวงรอบและแบ่งอายุที่ใช้ใน การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสำหรับความล้าตามช่วงอายุการใช้งานคือชิ้นงานที่มีอายุจำกัด (Finite Life) และชิ้นงานที่มีอายุไม่จำกัด (Infinite Life) บริเวณระหว่างช่วงทั้งสองนี้จะไม่สามารถ ระบุได้ชัดเจนโดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิดโดยเฉพาะ เหล็กจะมีก่าอยู่ระหว่าง 10° – 10⁷ รอบ



ภาพที่ 2 S-N diagram ของเหล็กกล้าผสมโครเมียม-โมลิคินั่ม, ผ่านกระบวนการอบ (normalized) โดย S_u = 800 MPa; S_u Maximum =860 MPa; S_e=338 MPa

ที่มา: Joseph Edward Shigley amd Charles R.Mischke (1989)

โดยงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความเสียหายจากความล้ำตัวตามวิธีการ Stress-Life Method ที่จะคำนวณอายุการล้าบนพื้นฐานของระดับความเค้น ตามวิธีการนี้ก็จะเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการ ออก แบบชิ้นส่วนที่ทราบวงรอบการนำไปใช้งานที่แน่นอนและใช้สำหรับทำนายอายุการใช้งานสูงที่มี ข้อมูลสนับสนุนเพียงพอทั้งนี้เนื่องจากวิธีการนี้ในการหาความด้านทานการล้าของวัสดุจำเป็นที่ จะต้องทำการทดสอบชิ้นงานที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันหลายๆครั้งภายใต้โหลดการดัดขนาดเดียวกัน ในขณะที่ทำการทดสอบชิ้นงานที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันหลายๆครั้งภายใต้โหลดการดัดขนาดเดียวกัน ในขณะที่ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบจะอยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดความเค้น ดัดแบบวัฏจักรที่ผิวนอกของเพลาอยู่ตลอดเวลาที่เพลาหมุน โดยความเก้นดัดที่จุดใดๆบนผิวของเพลา จะเป็นความเก้นแบบกระทำสองทิสทางและมีค่าอัตราส่วนความเค้น R = -1 ผลการทดสอบเพื่อหา ก่ากวามต้านทานการล้าของวัสดุนิยมเขียนเป็นกราฟก่าความต้านทานการล้า (Fatigue Strength) หรือ ความทนทาน (Endurance Strength) เทียบกับอายุของชิ้นงาน N รอบ (S – N diagram) ในสเกล Semilog หรือสเกล log-log ซึ่งจากผลการทดสอบกับวัสดุชนิดต่าง ๆ ปรากฏว่ากราฟ S-N มีอยู่ 2 ลักษณะ ดังรูปภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดง Stress กับ จำนวนรอบของ aluminium alloy 2014 และ steel 1047

ที่มา: รศ.แม้น อมรสิทธิ์ และ ผศ.คร.สมชัย อัครทิวา (2545)

1.1.1 โลหะจำพวกเหล็ก (steels) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ทำให้เกิดการ แตกหักจะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นความเค้นก็จะลดลงถึงค่าหนึ่ง แล้วจะคงที่และความเค้นจะ ไม่ลดลงต่อ ไปอีก แต่จะออกเป็นเส้นตรงคือความเค้นคงที่ เรียกว่าพิกัด ความทนทาน (Endurance Limit, S.) หรือ พิกัดการล้า (Fatigue Limit) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10⁶-10¹⁰ รอบ ดังรูปภาพที่ 3 โดยแสดงคุณสมบัติ S-N Curve ของ carbon steel (1047 steel) Mischke(1987) ซึ่ง จะประมาณค่าพิกัดความทนทานจากการทดลอง (S') จะมีความสัมพันธ์กับความต้านแรงดึง

$$S'_{e} = \begin{cases} 0.504S_{ut} & S_{ut} \le 200 \text{ ksi (1400 MPa)} \\ 107 \text{ kpsi}S_{ut} & S_{ut} > 200 \text{ ksi} \\ 740 \text{ MPa}S_{ut} & S_{ut} > 1400 \text{ ksi} \end{cases}$$
(1)

1.1.2 โลหะที่ไม่ใช้เหล็ก (nonferrous metals) จะมีความแตกต่างจากจำพวกโลหะ ที่จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงตามรอบเรื่อยๆ ดังรูปที่ 3 สำหรับ aluminum alloy (2014-T6 aluminum) ซึ่งจะทำให้ไม่ปรากฎเส้นตรงหรือความเค้นคงที่ ที่ เรียกว่าพิกัดความทนทาน (Endurance -Limit) จะมีเพียงพิกัดต้านทานการล้า (Fatigue strength, S_r) ซึ่งพิกัดต้านทานการล้าจะใช้การประมาณที่ Marshek และ Juvinall (1991) รอบที่ 10⁸-5x10⁸ รอบที่ ความเค้นประมาณ 0.35 เท่าของความเค้นดึง (tensile -strength) และในงานวิจัยเล่มนี้มีข้อมูลพิกัด ความต้านของเหล็กหล่อบางส่วนแสดงในภาคผนวก ข.

1.2 แฟกเตอร์แก้ไขพิกัดความล้ำ (Modifying Factors)

V.Dattoma[®] (2006) นำเสนอเกี่ยวกับ อนุกรมความเสียหายของ Model ทางกลบนพื้นฐาน ทั่วไปของ Thermodynamic Framework ซึ่งถูกพัฒนาโดย Lemaitre และ Chaboche การนำเสนอ Model ซึ่งมีสูตรผลรวมความเสียหายของวัสดุที่ระดับ Load ต่าง ๆ ซึ่งมีผลประกอบด้วย ค่ากลางที่ได้ จากระดับ Load ต่าง ๆ การพิจารณาของ Load ที่ซับซ้อน โดยความล้าตัวที่ได้จากการทดลองถึงความ แข็งและอุณหภูมิเหล็กเพื่อพิสูจน์กับ Model เพื่อพยากรณ์ความล้าตัว นอกจากนั้นมีการนำเสนอ แฟกเตอร์แก้ไข

Marshek and Juvinall (1991) บอกถึงพฤติกรรมความด้าของวัสดุเหนียวทางวิศวกรรม มีความไวต่อแปรหลายตัวแปรมากและปัจจัยดังกล่าวนี้ เพื่อจะให้ได้ค่าที่ใกล้เกียงความเป็นจริง มากที่สุดจึงได้ปรับค่าแก้ไขแฟคเตอร์ของตัวแปรปัจจัยที่สำคัญที่จะใช้ประมาณการพิกัดความ ทนทาน (Endurance limit) ของวัสดุเหนียว (Ductile material) ซึ่งจะประกอบด้วย

$$S_e = k_a k_b k_c S'_e \tag{2}$$

โดย S, พิกัดการถ้าของชิ้นงานจริง, S' พิกัดการถ้าของชิ้นทดสอบการหมุนดัดมาตรฐานของ Moore (1927), k, แฟกเตอร์แก้ผิว, k,แฟกเตอร์แก้ขนาด, k,แฟกเตอร์แก้โหลด

1.2.1 แฟกเตอร์แก้ผิว k_aเมื่อกำหนดให้ผิดขัดมันของชิ้นทดสอบการหมุนดัดมาตรฐาน ของ Moore (1927) ซึ่งรับโหลดแบบกระทำซ้ำสองทิศทางมีค่า k_a = 1 ซึ่งพบว่าความเก้นสูงสุดที่ เกิดขึ้นในชิ้นงานหรือโครงสร้างจะเกิดขึ้นบริเวณผิวชิ้นงานโดยรอยแตกส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นที่ผิว โดยเฉพาะตำแหน่งที่มีศูนย์รวมความเก้นดั้งนั้นในการใช้งานจริง จึงมีข้อแตกต่างโดย (1) สภาพ ผิวทีมีรอยผิวที่ทำให้เกิดตำแหน่งที่เป็นศูนย์รวมความเก้น (2) การกระจายตัวของโลหะวิทยา บริเวณผิวหน้าและภายใน (3) ความเก้นตกก้างที่บริเวณผิวที่เกิดจากการผลิต เช่น เจียรนัย (Fine-Ground),ดัดกลึงหรือรีดเย็น(Machined)รีดร้อน (Hot-Roll) หรือตีอัดขึ้นรูป (As-Forged) จะ ทำให้พิกัดการถ้ามีค่าน้อยกว่า S' หรืออีกนัยหนึ่งคือ k_a < 1 Lipson และ Noll (1946)ได้ รวบรวมข้อมูลการทดลองชิ้นงานที่มีพื้นผิวตามขบวนการผลิตและได้สมการในการหาก่า แฟกเตอร์แก้ผิวกือ

$$k_a = aS_{ut}^b \tag{3}$$

เมื่อ S_{ut} คือค่าความต้านแรงดึง ส่วนค่าคงที่ a และ b หาได้จากตารางที่ 1

Surface Finish	Factor a		Exponent
Surface Finish	S _{ut} , kpsi	S_{ut} , Mpa	b
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold - drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
As-forged	39.9	272.	-0.995

ตารางที่ 1 ค่า a และ b ของวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิต

ที่มา: J.E. Shigley and Chare R. Mischke (1989)

จากความเสียหายจากความถ้ำมักจะเกิดขึ้นจากผิวโลหะ ดังนั้นถ้ำผิวของโลหะมีการเปลี่ยนแปลง สภาวะไปอย่างมากตามขบวนการผลิตต่างๆ จะมีผลต่อพิกัดความทนทานมากด้วยจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ทราบกรรมวิธีการผลิตอย่างละเอียดจะสามารถหาก่า k_a ได้แน่นอนมากยิ่งขึ้น สำหรับก่า k_a ของเหล็กกล้าที่มีลักษณะผิวแบบต่าง ๆ ในระดับความต้านแรงดึงต่าง ๆ แสดง ในการประมาณ ก่าได้จากรูปภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ค่าFatigue Limit ของเหล็กที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตต่างๆ

ที่มา: R.C. Juvinall and M.Marshek (1991)

1.2.2 แฟกเตอร์แก้ขนาด k, การทดสอบการตามมาตรฐานของ Moore (1927) ก่าพิกัด การล้าของชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือมีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างออกไปจะมีก่าต่างจากก่า S' ใน คุณสมบัติของวัสดุซึ่งอิทธิพลเนื่องจากขนาดและรูปร่างของชิ้นงานจะ เรียกว่า แฟกเตอร์แก้ขนาด k, ดังแสดงในตารางที่ 2 เป็นลักษณะของการกระจายแรงเทียบกับใน แนวแกน Neutral axis กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในขนาดพื้นผิวที่เท่ากันและในกรณีชิ้นงานมี พื้นที่หน้าตัดไม่เป็นวงกลมตามมาตราฐานการทดลอง Marshek และ Juvinall (1991) แนะนำให้ ใช้เทียบขนาดกับแนวแกน neutral axis เช่น ชิ้นงานที่มีหน้าสี่เหลี่ยมขนาด 6x12มิลลิเมตร ถ้าใช้ เป็นภาระกระทำแบบคัดในแนวแกน neutral axis ที่เป็นความเก้นแบบดึงและกดที่ด้าน 6 มิลลิเมตร ซึ่งแนวดังกล่าวมีนั้นมีขนาดเล็กกว่า10 มิลลิเมตรจะใช้ก่า k_b = 1 แต่ถ้าด้านที่ถูกกระทำแบบแรงกด และแรงดึงมีขนาด12 มิลลิเมตรจะใช้ค่า k_b = 0.9 ซึ่งจะใช้ก่าตาม ตารางที่ 2 จะแสดงก่าแฟกเตอร์แก้ ขนาด k, หรือการกระจายตัวของกวามเก้นตามขนาดของชิ้นงาน



ภาพที่ 5 การกระจายตัวของค่าความเก้นในแต่ละขนาดของชิ้นงานทดลองในภาระแบบดัดและบิด ที่มา: R.C. Juvinall and M.Marshek (1991)

ตารางที่ 2 ค่าแฟกเตอร์แก้ขนาด k, หรือการกระจายตัวของความเก้นตามขนาดของชิ้นงาน

k _b				
Bending	Axial	Torsion	Diameter (Ø)	
1	0.7-0.9	1	ø< 0.4 in หรือ 10 mm	
0.9	0.7-0.9	0.9	0.4 in หรือ 10 mm < ø<2 in หรือ 50 mm	
0.8	0.6-0.8	0.8	2 in หรือ 50 mm < ø < 4 in หรือ 100 mm	
0.7	0.5-0.7	0.7	4 in หรือ 100 mm < ø < 6 in หรือ 150 mm	

ที่มา: R.C. Juvinall and M.Marshek (1992)

1.2.3 แฟกเตอร์แก้โหลด k ในการทดสอบความล้าด้วยโหลดที่เป็นโมเมนต์ดัด แรง กระทำตามแนวแกน (แรงดึงและแรงกด) และโมเมนต์บิดพบว่าพิกัดการล้าจะแตกต่างกัน โดย ก่าเฉลี่ยของแฟก-เตอร์แก้โหลดเป็นก่ากงที่ดังนี้

$$k_{c} = \begin{cases} 1 & การคัค (Bending) \\ 1 & โหลดในแนวแกน(Axial) \\ 0.58 & การบิค (Torsion) \end{cases}$$
 (4)

Marin (1962) นอกค่าแฟกเตอร์แก้ที่กล่าวมาขั้นด้นแล้วยังมีแฟกเตอร์ตัวอื่นๆอีกซึ่งมีปัจจัย ที่ส่งผลกระทบต่อพิกัดความทนทาน

1.2.4 แฟกเตอร์แก้อุณหภูมิ k, เมื่ออุณหภูมิเพิ่มหรือลดลงจะส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุ เปลี่ยน ไปในการใช้งานที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องโดยโลหะเปราะจะมีโอกาสที่จะแข็งขึ้น และที่ อุณหภูมิสูงๆค่าจะทำให้การเลื่อนตัว(dislocations)ของอะตอมทำให้พิกัดความล้ำ S' ลดลงใน โลหะเหนียวและจะมี



ภาพที่ 6 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติแรงคึงของเหล็ก

ที่มา: J.E. Shigley (1986)



ภาพที่ 7 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อพิกัดความทนทาน (N=10⁷)ของโลหะผสมคาร์บอนและ โลหะผสม

ที่มา: Eric A.Brand (1983)

อิทธิพลต่อคืบตัว(Creep) ของโลหะด้วย ดังแสดงในรูปภาพที่ 6 และ รูปภาพที่ 7 ซึ่งแสดงผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีต่อพิกัดความทนทานของพวกที่มีการ์บอนผสม และที่เป็นพวกโลหะผสมและจากตารางนี้ทำการประมาณแฟกเตอร์แก้อุณหภูมิได้โดย

$$k_{d} = \begin{cases} 1 & T \leq 350^{\circ} C \\ 0.5 & 350 < T \leq 500^{\circ} C \end{cases}$$
(5)

1.2.5 แฟกเตอร์แก้อิทธิพลอื่น k_f อิทธิพลเนื่องจากตัวแปรอื่น ๆ ที่ นอกเหนือจากที่กล่าวถึงข้างต้นซึ่งมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานการล้า (S_f) หรือของชิ้นงาน รวมเรียกว่า k_f ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง $0 < k_f < 1$ ตัวแปรต่าง ๆ ที่พบบ่อยมีดังต่อไปนี้

อิทธิพลต่าง ๆ	ค่า $k_{_f}$ โดยประมาณ			
 กวามเล้นตกล้างในชิ้นงานเนื่องจาก 				
- การรีดเย็น หรือตีอัดขึ้นรูป	$k_{f} > 1$			
- การทำ Short Penning	$k_{f} = 1.25$			
 การกัดกร่อนเนื่องจากการเสียดสี หรือผิวของชิ้นงานขูดกัน 	$k_f < 1$			
 การเคลือบผิวของโลหะด้วยไฟฟ้า 				
เช่น การเคลือบ Ni, Pt หรือ Cd	$k_f \approx 0.5$			
 การฉีดพ่นโลหะ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยร้าว 	$k_f \approx 0.86$			
 การกัดกร่อนระหว่างหน้าสัมผัสของคู่ชิ้นงาน 				
- ข้อต่อสลักเกลียว ล้อและคุมล้อ	$k_f \approx 0.24 - 0.9$			
อิทธิพลต่าง ๆ				
- หน้าสัมผัสระหว่างแบริ่ง	ค่า $k_{_f}$ โดยประมาณ			
6) การเกิด Frettage Corrosion โดยเริ่มด้วย Surface Discoloration ตาม k_f ขึ้นอยู่กับชนิดของกู่ด้วยการ				
เป็นหลุมบ่อที่ผิวและในที่สุคเกิดความเสียหายเนื่องจากการถ้าโลหะที่สัมผัสกัน				

ตารางที่ 3 ค่าแฟกเตอร์อิทธิพลต่าง ๆจากกระบวนการผลิตและลักษณะการใช้งาน

ที่มา: ภานุฤทธิ์ ยุกตะทัศ (2547)

2. คุณสมบัติของความเค้นสลับ (Fluctuating Stresses)

Shigley (1986) คุณสมบัติของความเค้นผันแปรของความเค้นที่กระทำต่อชิ้นส่วน เครื่องจักรมักจะเกิดในรูปแบบซึ่งเป็นวงรอบของแรงกระทำและมีการผันแปรของความเค้นที่ไม่ สม่ำเสมอก็ยังคงเกิดขึ้นอยู่แต่ก็พบว่าในวงรอบของการหมุนจะเกิดแรงกระทำสูงสุดขึ้น 1 ครั้ง และแรงกระทำต่ำสุด 1 ครั้งค่าสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละวงรอบจึงใช้ก่า F_{max} และ F_{min} ในการระบุ รูปแบบคุณลักษณะของแรงกระทำ นอกจากนั้นยังพบความจริงที่ขนาดของแรงช่วงที่สูงสุดกับ ต่ำสุดที่ห่างจากเส้นฐานก่าหนึ่งจะมีก่าเท่ากันดังนั้น

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} \qquad F_a = \left| \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \right| \tag{6}$$

เมื่อ F_m คือค่าแรงกระทำเฉลี่ย และ F_a คือแอมพลิจูดของแรงที่กระทำสลับไป– มาดังรูปภาพที่ 8 แสดง คุณสมบัติของความเค้นผันแปรรูปแบบต่างๆ โดยมีองค์ประกอบต่างๆของความเค้น

$$\sigma_{\min}$$
 = ความเค้นต่ำสุด σ_m = ความเค้นเฉลีย (Midrange Stress)
 σ_{\max} = ความเค้นสูงสุด σ_r = ย่านของความเค้น
 σ_a = ความเค้นสลับ σ_s = ความเค้นสถิต

ในสภาพความเป็นจริงความเค้นสถิตจะมีค่าไม่เท่ากับความเค้นเฉลี่ย แต่จะมีค่าอยู่ระหว่าง σ_{\max} และ σ_{\min} ความเค้นสถิตเกิดจากแรงคงที่ซึ่งกระทำต่อชิ้นงานและมักจะเป็นอิสระจากส่วนที่ เปลี่ยนแปลงของโหลดโดยทั่วไปจะเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \tag{7}$$

โดยที่
$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right|$$
(8)

และ
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} =$$
 อัตราส่วนความเค้น (Stress Ratio) (9)

หรือ
$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} =$$
 อัตราส่วนแอมพลิจูด (Amplitude Ratio) (10)

2.1 ความเสียหายจากการล้าที่เกิดจากความเค้นสลับ (Fatigue Strength under Fluctuatig Stresses)

Shigley and Mischke (1989) การกำหนดองค์ประกอบต่าง ๆ ของความเค้นที่เกี่ยวข้อง กับการออกแบบชิ้นงานที่มีการด้าเกิดขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้โหลดแบบวัฎจักรความต้านทานการด้าของ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลซึ่งมีหลักเกณฑ์การออกแบบของกู๊ดแมน Goodman (1890) รูปภาพที่ 9 เป็น การพล็อตค่าความเค้นเฉลี่ยในแนวนอนและองค์ประกอบอื่นของความเค้นในแนวตั้งโดยแรงดึงจะมี ค่าเป็นบวกส่วนค่าพิกัดการล้าหรือความเค้นสำหรับชิ้นงานที่มีอายุจำกัด (10³รอบ) จะถูกพล็อตใน แนวตั้งสำหรับแนวเส้นที่ทำมุม 45° จะเป็นค่าความเค้นเฉลี่ย เส้นการออกแบบของกู๊คแมนจะเป็น เส้นที่ลากไปยัง *S* (หรือ *S*) เหนือจุดเริ่มต้นให้สังเกตว่าก่าความเค้นครากจะถูกพล็อตลงไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานจะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการครากเมื่อ σ_{max} มีก่าเกินกว่า *S*, นอกจากนี้แล้ว



ภาพที่ 8 ความเค้น- เวลา: (a) ความเค้นที่ผสมด้วยความถี่สูงเทียบกับเวลา; (b) และ(c) ความเค้นที่มีลักษณะ ไม่คงที่เทียบกับเวลา; (d) และ (e) ความเค้นที่มีลักษณะ คงที่เทียบกับเวลา; (f) ความเค้นที่มีลักษณะคงที่มีค่ากลางที่ 0 เทียบกับเวลา

ที่มา: J.E. Shigley and Chare R.Mischke (1989)



ภาพที่ 9 กราฟของกู๊ดแมนแสดงความต้านแรงและขีดจำกัดขององค์ประกอบต่างๆ สำหรับค่าความเค้นเฉลี่ย



วิธีที่จะแสดงผลการทดลองให้ทราบอีกวิธีหนึ่งแสดงตามรูปภาพที่ 10 ซึ่งแกนแนวนอนจะ เป็นก่าอัตราส่วนระหว่างกวามด้านแรงเฉลี่ย S_m กับก่ากวามต้านแรงสูงสุด S_m โดยที่ข้อมูลสำหรับ การดึงจะถูกพลีอตทางด้านขวาและข้อมูลสำหรับการกดจะถูกพลีอตทางด้านซ้าย ส่วนแกนใน แนวตั้งจะเป็นก่าอัตราส่วนของกวามเด้นผันแปรต่อพิกัดการถ้า ดังนั้นเส้นตรง BC จะเป็นตัวแทน ของเส้นความเสียหายของกู๊ดแมน ให้สังเกตว่าความเก้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในช่วงของการกดจะส่งผล กระทบต่อก่าพิกัดการถ้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและรูปภาพที่ 11 เป็นกราฟที่มีความเป็นเอกลักษณ์ ในการแสดงองก์ประกอบทั้ง 4 ของกวามเก้นรวมทั้งก่าอัตราส่วนของกวามเก้นอีก 2 ก่าเส้นโก้งจะ เป็นตัวแทนของก่าพิกัดการถ้าสำหรับอัตราส่วน R ก่าต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่ R = -1 จนสิ้นสุดที่ R = 1 เริ่มต้นที่ S_c บนแกน σ_a และสิ้นสุดที่ S_m บนแกน σ_a นอกจากนั้นยังมีเส้นโก้งแสดงอาขุการใช้งาน กงที่สำหรับ $N = 10^5$ รอบและ $N = 10^4$ รอบ ดังนั้นกราฟจะสามารถอธิบายสภาวะความเก้นที่จุดหนึ่ง จุดใดได้ ดังจุด A โดยองก์ประกอบของกวามเก้นสูงสุดและความเก้นต่ำสุดหรือองก์ประกอบของ กวามเก้นเฉลี่ยและกวามเด้นสลับและจุดที่ปลอดภัยสำหรับการออกแบบจะอยู่ใต้เส้นอาขุการใช้งาน กงที่ เมื่อกวามเด้นเฉลี่ยเกิดจากการกดกวามเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma_a = S_c$ หรือเมื่อใดก็ตามที่ $\sigma_max = S_c$ ดังที่แสดงทางด้านซ้ายมือของรูปภาพที่ 11 ส่วนการดึงที่อยู่





ที่มา: Joseph Edward Shigley and Charles R.Mischke (1989)



ภาพที่ 11 ใดอะแกรมแสดงการล้าของเหล็กกล้า AISI 4340 ที่มีค่า $S_{\rm ut}$ = 158 kpsi และ $S_{\rm y}$ = 147 kpsi องค์ประกอบของความเก้นที่คือ $\sigma_{\rm min}$ =20 kpsi, $\sigma_{\rm max}$ =20 kpsi $\sigma_{\rm max}$ =70 kpsi และ $\sigma_{\rm a}$ =50 kpsi

ที่มา: Joseph Edward Shigley and Charles R.Mischke (1989)

ทางด้านขวามือของรูปภาพที่ 11 ดังนั้นในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีความล้า จึง จำเป็นที่จะต้องเขียนไดอะแกรมในลักษณะนี้ขึ้นมาพิจารณาสภาวะความเก้นตามจุดต่างๆ รูปภาพที่ 12 แสดงให้เห็นหลักเกณฑ์ความเสียหายพื้นฐาน 5 แบบ คือ เส้นโซเดนเบอร์ก, เส้นกู๊ดแมน, เส้น เกอร์เบอร์, วงรี ASME และการกราก เมื่อพิจารณาให้เส้นกู๊ดแมนเป็นบรรทัดฐานในการออกแบบ จุด A คือขีดจำกัดที่มีความด้านแรงสลับ *S* และความด้านแรงสลับ *S* ความชันของเส้นโหลดจะมี ค่า *S* / *S* สมการสำหรับเส้นโซเดนเบอร์กคือ

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{yc}} = 1 \tag{11}$$

และสมการของเส้นกู๊ดแมนคือ

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \tag{12}$$

จากการสำรวจรูปภาพที่ 12 พบว่าทั้งส่วนโค้งของพาราโบลาและวงรีจะมีโอกาสที่จะผ่านจุดข้อมูล ความเค้นเฉลี่ยที่เกิดจากแรงดึงได้มากกว่าดังนั้นหลักเกณฑ์การออกแบบของเกอร์เบอร์จึงมีสมการ ดังนี้

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \tag{13}$$

สมการวงรี ASME คือ $\left(\frac{S_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 = 1$ (14)

้สำหรับช่วงการเกิดความเค้นครากในวงรอบแรกตามหลักเกณฑ์ของแลงเกอร์ มีสมการดังนี้

$$\frac{S_a}{S_{yt}} + \frac{S_m}{S_{yt}} = 1$$
(15)

เมื่อนำแฟกเตอร์ความปลอดภัยในการออกแบบมาคิดจะสามารถแทนก่า S_a และ S_m ด้วย n σ_a และ n σ_m ดังนั้นจากหลักเกณฑ์ต่างๆที่กล่าวขั้นต้นจะได้สมการการออกแบบซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ใน สมการของ

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \tag{16}$$

เส้นกู๊ดแมนซึ่งในความเค้น σ_a และ σ_m ถูกแทนลงในสมการ (12) และหารด้วยค่าแฟคเตอร์ความ ปลอดภัย



ภาพที่ 12 หลักเกณฑ์ความเสียหายพื้นฐาน 5 แบบ

ที่มา: ภานุฤทธิ์ ยุกตะทัต (2547)

3. ทฤษฎีความเสียหายของ Von Mises

Shigley (1986) การออกแบบชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเหนียวและรับภาระแบบสถิตย์นิยมใช้ ทฤษฎีความเค้นเฉือนอีอคตาฮีครัลและทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ซึ่งจากผลการทคสอบพบว่าทฤษฎี ความเค้นเฉือนอีอค-ตาฮีครัลสามารถทำนายผลการครากของชิ้นงานได้ดีในทุก Quadrant (นั่นคือ ทุกสภาวะของความเค้น) ส่วนทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดจะให้ผลการออกแบบที่ Conservative กว่า(มีขนาดใหญ่กว่าที่จะจำเป็นจริงๆ)ในทุกๆ Quadrant ยกเว้นที่จุด A, B, D, E จากรูปภาพที่ 13 ซึ่งจะให้ผลเท่ากัน ดังนั้นในที่นี้จะใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนอีอคตาฮีครัลเพื่อคำนวณความเค้น (บางครั้งทฤษฎีความเค้นเฉือนอีอคตาฮีครัลนี้มีชื่อเรียกว่า Mises-Hencky หรือ เรียกง่าย ๆ ว่า หลักเกณฑ์ของ von Mises) ซึ่งทฤษฎีคัง กล่าวจะมีรูปสมการเป็นดังนี้

$$\sigma_{von\,Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2}$$
(17)

โดยที่ σ_1, σ_2 และ σ_3 เป็นก่าความเค้นหลักในแนวแกน x , y และ z ตามลำคับ



ภาพที่ 13 แสดงขอบเขตของความเค้นครากตามทฤษฎี von Mises

ที่มา: ภานุฤทธิ์ ยุกตะทัต (2547)

4. ทฤษฎีการคำนวณความเสียหายโดย Palmgren-Miner Rule

ชนะพงศ์ ทองแสน (2545)ใช้วิธี Palmgren-Miner rule หรือวิธี Miner's rule เป็นวิธีการ ประเมินอายุความล้าที่มีพื้นฐานจาก S-N Diagram ซึ่งได้จากการทดสอบความล้าของชิ้นส่วนรูปแบบ ต่างๆ ภายใต้แรงกระทำซ้ำที่มีขนาดคงที่และเป็นวิธีที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายอย่างไรก็ ตามวิธีนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับข้อมูลของวัสดุ เมื่อนำมาใช้สำหรับชิ้นส่วนที่เกิดรอยแตกร้าวจากความ ล้าและแรงกระทำซ้ำมีลักษณะของกระบวนการสุ่มซึ่งขนาดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยพิจารณา จากความล้าในชิ้นส่วนแรงกระทำซ้ำที่เกิดจากการสัญจรของแบบจำลองความล้าในการศึกษานี้ อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎี Linear Elastic Fracture Mechanics และวิธีการ Loading Block Palmgren-Miner rule หรือวิธี Miner's rule เป็นวิธีการประเมินอายุความล้าที่มีพื้นฐานจาก S-N Diagram Shigley (1986) ความเสียหายที่เกิดจากความเค้นผันแปรความเค้นสลับและความล้า สะสมชิ้นงานภายใต้ภาวะความเค้นที่กำหนดใด ๆ ชิ้นงานรับโหลดความเค้นสลับ σ_1 เพียง n_1 รอบจากนั้นความเค้นจะเปลี่ยนไปเป็น σ_2 อีก n_1 รอบหรือสภาวะความเค้นในแต่ละวงรอบมีจุคสูงสุด ที่เปลี่ยนแปลงไปชิ้นงานนั้นเป็นชิ้นงานเสียหาย เพื่อให้วงรอบของการกระทำที่ซ่อนแฝงอยู่จะ ถูกนำมาพิจารณาอย่างกรบถ้วนโดยกำหนดวงรอบของการกระทำเริ่มจากก่าสูงสุด-ก่าต่ำสุด-ก่าสูงสุดเท่าเดิมและหาก่าองก์ประกอบของความเค้นสลับ σ_2 และความเค้นเฉลี่ย σ_m ซึ่งพบว่ากวาม เสียหายสูงสุดจะเกิดขึ้นในวงรอบ วิธีการนับวงรอบการกระทำของความเค้น

สรุปได้ดังนี้
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = 1$$
 หรือ $D = \sum \frac{n_i}{N_i}$ (18)

เมื่อ n₁ คืออายุการใช้งานภายใต้ความเก้น σ_i แล N_i คืออายุการล้าของชิ้นงานที่ระดับความเก้น σ_i ในความเสียหายมีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานในลักษณะเชิงเส้นจะได้เมื่อ D คือความเสียหาย สะสมซึ่งหมายถึงความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ D = 1 โดยจากการประมาณการ S-n curve ของ ชิ้นงานที่มีรอบอายุความในการใช้งานสูง(N>10³) ซึ่งสามารถของสมการของ S-n curve เป็น

$$\log S'_f = b \log N + C \tag{19}$$

โดย S'_f คือค่าเฉลี่ยพิกัดด้านทานความล้า (Fatigue strength), N คือจำนวนรอบ สำหรับค่า b และ C ซึ่ง Shigley (1986) แนะนำค่าดังกล่าวดังนี้

$$b = -1/3 \log 0.8S_{ut} / S'_{e}$$
⁽²⁰⁾

$$C = \log \left(0.8S_{ut} \right)^2 / S'_e \tag{21}$$

เมื่อกำนวณใด้ก่า b และ C ซึ่งจะกำนวณหาก่า S'_t ก่าเฉลี่ยพิกัดต้านทานกวามล้าโดยทราบ N รอบ

$$S'_{f} = 10^{\circ} N^{\circ}$$
 $i \vec{j} = 10^{\circ} N \leq 10^{\circ}$ (22)

หรือต้องการหา N รอบ โคยทราบ S', ก่าเฉลี่ยพิกัดต้านทานความล้า

$$N = 10^{-C/b} S'_{f}^{1/b} \qquad i \vec{3} = 10^{3} \le N \le 10^{6}$$
(23)

5. วิธีการรอบความเค้น โดยวิธี Rainflow Countig

Mario Leonardo Boéssio[®] (2005) ได้วิเคราะห์และคำนวณการออกแบบของยานยนตร์ เชิงพาณิชย์ถึงความถ้ำตัวโดยสมการ Dynamicในวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ภาระกระทำเป็นสมการ เชิงสุ่ม ซึ่งมาจากผิวถนนแต่ละลักษณะโดยขึ้นอยู่กับเวลาที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบ Gaussian บนพื้นฐาน S-N curve ใช้หลักของ Palmgren-miner's Rule คำนวณผลรวมของความเสียหาย และ ใช้ Rainflow คำนวณรอบของภาระกระทำวิธีที่นิยมใช้ในการนับรอบ

Matsuishi และ Endo (1968) ได้นำเสนอวิธีการนับรอบที่เกี่ยวกับ,ภาระ-เวลา,ความเค้น-เวลาหรือเครียด-เวลาในการบันทึกนับรอบ เช่น แกนเวลาจะอยู่แนวตั้งและแนวนอนจะเป็นภาระ ความเก้น,ความเครียดดังรูปภาพ 14-15 โดยหลักการที่

- จัคเรียงข้อมูล โคยเริ่มต้นจากสูงสุดหรือต่ำสุดก่อนของแต่ละยอด

 เริ่มนับรอบจากจุดสูงสุด (หรือจุดค่ำสุด) ใส่ลงด้านล่างไปยังคำแหน่งต่อๆไปของยอดการ นับของ Rainflow จะนับใส่ลงต่อไปจนได้ของแต่ละขนาดของก่าสูงสุด (หรือก่าต่ำสุด, ถ้าเริ่มนับ จากจุดต่ำสุด) ซึ่งเท่าหรือมีขนาดใหญ่กว่าจุดที่พิจารณาจากตำแหน่งขนาดของก่าเริ่มต้นหรือก่า Rainflow ที่นับได้จากตำแน่งก่อนหน้านี้

- ทำซ้ำต่อไปเรื่อย ๆ จนครบถึงจบ

- นำส่วนที่ได้ทั้งหมคมาจัดเรียง

ตามตัวอย่างรูปภาพ 14 b ตามก่าที่บันทึก ก่าที่จุด A เป็นจุดเริ่มนับและเริ่มไล่ลงมาที่จุด B ไปจุด C ที่ตำแหน่งต่อไป ซึ่ง C มีขนาดน้อยกว่าขนาดของ A ดังนั้นจึงให้ตำแหน่งของ B ไล่ลงมา เป็นตำแหน่งB'และนับตำแหน่งต่อไปที่จุด D เนื่องจากขนาดของจุด E และ G มีขนาดเล็กกว่า A
ดังนั้นจะนับจุด A-D และเมื่อไล่ลงมายังตำแหน่ง B ไปยังตำแหน่ง C เนื่องจากจุด D มีขนาดใหญ่ กว่าจึงหยุดที่จุด C และนับเป็นครึ่งรอบที่ได้จาก B-C เมื่อเริ่มนับจุดใหม่ซึ่ง C ไปยัง B' ซึ่งเป็น ตำแหน่งที่มีการนับไปแล้วที่จุด A ดังนั้นผลของอีกครึ่งรอบคือ C-B' ในตำแหน่งต่อไปที่จุด D ไล่ ลงมายังตำแหน่ง E เนื่องจาก F และ H น้อยกว่า D จึงไล่จุดที่ E' และหยุดที่ตำแหน่งI ก็จะได้ ครึ่งรอบจาก D – I และทำจนครบโหลดที่ต้องการนับจะได้ค่าที่สรุปจากทุกๆส่วนของโหลดซึ่งนับ ได้เพียงครึ่งรอบในคู่ของขนาดโหลดก็จะได้เต็มรอบซึ่งตามตัวอย่างจะได้ A - D และ D - I, B - C และ C - B', E - H และ H - E', F-G และ G- F' เมื่อทำให้เต็มรอบจะได้ A - D - I, B - C - B', E -H -E' และ F - G - F' จะได้ผลตามตารางที่ 4



ภาพที่ 14 ตัวอย่างการนับรอบแบบ Rainflow counting (a) ภาระความเค้นหรือ ความเครียด

ทีมา: RalpI.Stephens and Ali fatemr (2001)



ภาพที่ 15 ตัวอย่างการนับรอบแบบ Rainflow counting (b) ตัวอย่างการนับรอบการะ

ที่มา: RalpI.Stephens and Ali fatemr (2001)



ภาพที่ 16 ตัวอย่างการนับรอบแบบ Rainflow counting (c) ผลที่ได้จากการนับ Rainflow counting ที่มา: RalpI.Stephens and Ali fatemr (2001)

Cycle	Maximum	Minimun	Range	Mean
A-D-I	25	-14	39	5.5
В-С-В'	14	5	9	9.5
E-H-E'	16	-12	28	2
F-G-F	7	2	5	4.5

ตารางที่ 4 สรุปค่าภาระตามการนับของ Rainflow counting

ทีมา: RalpI.Stephens and Ali fatemr (2001)

6. การประเมินค่าความขรุขระรูปแบบผิวจราจร

Peter Andrén (2006) ใช้The power spectral density (PSD) ซึ่งจะถูกแสดงเป็นตัวแทน Profile ของผิวถนนซึ่งสามารถใช้ประเมินความขรุขระและใช้เป็นตัว Input (ISO (1995-09-01) G_d (n) = Cn^{-w}) กับยานยนตร์ในการวิเคราะห์ Dynamic เป็นตัวการประมาณฟังก์ชันของตัวอย่างซึ่ง ในเอกสารเป็นการสำรวจค่าประมาณของ PSD และทดสอบค่าประมาณของ Profile ถนนซึ่งใช้ข้อมูล ของ Swedish Road Network ตามตารางที่ 5

วัชรพงษ์ (2547) ใช้การประเมินก่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ ของ โกรงสร้างสะพานอย่างเป็นระบบโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง และผลจากการตรวจวัดพฤติกรรมจริงของโครงสร้างโดยนำหลักการที่เรียกว่า Sensitivity –Based ไฟ- ในต์เอลิเมนต์ Model Updating มาประยุกต์ใช้งานกับโครงสร้างสะพานประเภท Box Girder การ ตอบสนองเชิงพลวัตรของโครงสร้างสะพานโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงกระทำจาก รถบรรทุกเนื่องจากความเร็วรถบรรทุก,น้ำหนักรถบรรทุกและระดับความขรุขระของผิวจราจรที่ เปลี่ยนแปลงรวมถึงผลกระทบโดยศึกษาผลการสั่นไหวของระบบโครงสร้างในรูปของ Power Spectral Density

สุนิติ (2548) วิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นส่วนช่วยในการตรวจสอบหาอายุการใช้งาน ของสปริงแหนบที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการตรวจสอบหาอายุการใช้งานของสปริงแหนบเริ่มต้นจากการสร้าง แบบจำลองของสปริงแหนบบนคอมพิวเตอร์จากนั้นใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ผล ออกมาโดยภาระกระทำอยู่ในรูปแบบวักจักรไซน์ผลที่ได้นั้นถือว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญมากต่อ อายุการใช้งานคือก่าตัวประกอบอิทธิพลของความเก้นหนาแน่นทางทฤษฎี (K,)โดยจะนำผลที่ได้ นี้ความสัมพันธ์เพื่อหาอายุการใช้งานของสปริงแหนบที่เกิดขึ้นการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ ไฟ ในต์เอ-ลิเมนต์และความน่าเชื่อถือของโครงสร้างเป็นแนวทางหนึ่ง ซึ่งในการวิเคราะห์ ด้วยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจะช่วยให้ทราบถึงจุควิบัติของโครงสร้างที่สามารถนำไปคำนวณหาก่าความ น่าจะเป็นของการวิบัติมาเข้าสมการ

Name	PSD approximation	Wavenumber
ISO (1995-09-01)	$G_d(n) = Cn^{-w}$	$0 \le n \le \infty$
BSI (1972)	$G_{d}(n) = \begin{cases} Cn^{-w_{1}} \\ Cn^{-w_{2}} \\ Cn^{-w_{2}} \\ Cn^{-w_{1}} \end{cases}$	$0 \le n \le n_0$ $n_0 \le n \le \infty$ $n \le n \le n$
Two split	$G_d(n) = \int Cn^{-w^2}$	$n_1 \le n \le n_2$
Sayers (1986)	$G_d(n) = C_1 C n^{4w_1^2} + C_2 / n^2 + C_3$	$\theta_2 \leq 4$ t s $\infty \infty$
Gillespie (1985)	$G_d(n) = C(1 + (0.066 / n)^2) / n^2$	$0 \le n \le \infty$
Margondos et al. (1001)	$C_1(n) = C_1 \exp(-kn^p)$	$0 \le n \le n_0$
Marcondes et al. (1991)	$C_{d}(n) = \begin{cases} C_{2}(n-n_{0})^{q} \end{cases}$	$n_0 \le n \le \infty$
Sussman (1974)	$G_d(n) = \frac{C}{\alpha^2 + n^2}$	$0 \le n \le \infty$
Macvean (1980)	$G_d(n) = \frac{C}{\left(\alpha^2 + n^2\right)^2}$	$0 \le n \le \infty$
Sussman (1974)	$G_{d}(n) = \frac{C(n^{2} + \alpha^{2} + \beta^{2})}{(n^{2} + \alpha^{2} + \beta^{2})^{2} + 4n^{2}\alpha^{2}}$	$0 \le n \le \infty$
Xu et al. (1992)	$G_d(n) = A / 2a \exp(-n^2 / ((2a)^2))$	$0 \le n \le \infty$
Kozin and Bogdanoff (1961)	$G_d(n) = A / a \exp\left(-n^2 / a^2\right)$	$0 \le n \le \infty$

ตารางที่ 5 ค่าประมาณการลักษณะของความขรุขระในรูปแบบ Spectral

หมายเหตุ $C, C_1, C_2, C_3, p, k, q, \alpha$ and β are real positive constants ที่มา: Peter AndreÂn (2006) ฐาปนา (2544) ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการสั่นไหวของโครงสะพานซึ่งประ กอบด้วย น้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุกรวมถึงความขรุขระของผิวถนนของพื้นสะพาน โดยพัฒนาแบบ จำลองทางสถิติอาศัยโปรแกรม MATLAB เพื่อสุ่มตัวอย่างค่าความขรุขระของพื้นสะพานจาก ข้อมูล Power Spectral Density การวิเคราะห์การตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน ภายใต้อิทธิพลของพาหนะซึ่งกำลังเคลื่อนที่ความขรุขระของพื้นผิวถนนถูกนำมาพิจารณาเนื่องจาก เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้พาหนะเกิดการสั่นสะเทือนและก่อให้เกิดแรงกระทำแบบสุ่มกับ โครงสร้างสะพานที่รองรับเมื่อความเร็วต่ำการสั่นไหวของพาหนะอาจมีเพียงเล็กน้อยและมีขนาด เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วสูงขึ้นและนำไปสู่การสั่นไหวของพาหนะที่รู้สึกและสังเกตได้ ไม่เพียงลด คุณภาพในการขับขี่พาหนะแต่ยังก่อให้เกิดแรงเลื่อยในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาผลงานวิจัย ที่ผ่านมาพบว่าวิธีการหาข้อมูลความขรุขระของพื้นผิวถนนโดยทั่วไปใช้กันอยู่ 3 วิธีคือ

- การตรวจวัดโดยตรงจากเครื่องมือวัดระดับ

การคำนวณย้อนกลับจากคุณสมบัติทางพลศาสตร์และข้อมูลการสั่นใหวของพาหนะแสะ
 พานที่ได้จากการตรวจวัดหรือจากงานวิจัยซึ่งเป็นที่ยอมรับ

- ใช้สมการประมาณค่าความขรุขระของพื้นผิวถนนโดยวิธี Inverse Fourier Transform สมการ Power Spectral Density (PSD) ความขรุขระของพื้นผิวถนนจากงานวิจัยซึ่งเป็นที่เชื่อถือ

วิธีแรกการตรวจวัคความขรุขระ โดยตรงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือตรวจวัคและการ ตรวจวัดแต่ละครั้งต้องเสียเวลาแรงงานและก่าใช้ง่ายวิธีที่สองการกำนวณย้อนกลับจากข้อมูลการสั่น ใหวและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของพาหนะและสะพานข้อมูลความขรุขระที่ได้มีโอกาส กลาดเกลื่อนสูงเนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการกำนวณต่างมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสั่น ใหวของระบบ ทั้งนี้อยู่ในลักษณะที่ไม่สามารถกำหนดค่าที่แน่นอนได้ (Random Vibration)วิธีที่ สามใช้สมการประมาณค่าความขรุขระจากแบบจำลองทางสถิติของความขรุขระที่ได้จากการ ตรวจวัดงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ใช้วิธีนี้ในการพิจารณาผลกระทบของความขรุขระและใช้ PSD จากผลงานวิจัยของ Dodds and Robson (1973) หรือ Honda et al.(1982) เมื่อผ่านการใช้ งานเป็นระยะเวลายาวนานความขรุขระของพื้นผิวถนนก็จะเพิ่มขึ้นโดยเปรียบเทียบจากสภาพดี (Good) เป็นปกติ (Normal)และขรุขระมาก (Poor) ตามลำดับทำให้พาหนะซึ่งเกลื่อนที่เกิดการ สั่นสะเทือนมากขึ้นนำไปสู่ขนาดของแรงกระทำต่อโกรงสร้างสะพานที่มากขึ้นเช่นกัน จึงพิจารณา ผลกระทบของความขรุขระในระดับต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ วิธีการที่เหมาะสมเพื่อสุ่มตัวอย่างความขรุขระของพื้นผิวถนนสำหรับระดับต่างๆ ตามมาตรฐาน ISO (1995-09-01)

7. การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างรถ

ฐาปนา (2544) แบ่งกลุ่มตามแบบจำลองจะเป็นข้อพิจารณาใช้แบบจำลองโครงสร้างโคยที่ จะประกอบด้วยโครงสร้างสำหรับ Chasis ระบบกันสะเทือนและด้อยางโดยจำลองรูปแบบของ มวล,สปริงและตัวหน่วงแบบจำลองตามลักษณะรูปภาพที่17 (a) จะมีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง (1 Degree of freedom) ที่จะพิจารณาระบบกันสะเทือนดังรูปภาพ17 (b) เป็นแบบจำลองมวล,สปริงและ ตัวหน่วง 2 ชุดแทนระบบกันสะเทือนและล้อยางมีพิกัดการเคลื่อนที่อิสระในแนวดิ่ง 2 DOFs ดังแสดงในรูปภาพที่ 17(c) ส่วนแบบจำลอง ½ ของคัน (Half – truck) เป็นแบบ2 มิติ และ แบบจำลองแบบเต็มคัน 2 มิติจำลองเพลาหน้าและหลังของพาหนะ ด้วยมวล สปริงและตัวหน่วง 2 ชุด แทนล้อยาง สปริงและตัวหน่วงอีก 2 ชุดแทนระบบกันสะเทือน เชื่อมด้วยโครงข้อแข็งเป็น ตัวถัง ดังแสดงในรูปภาพที่ 17(d)



ภาพที่ 17 แสดงลักษณะของแบบจำลอง

โดยลักษณะดังกล่าวได้แบบจำลองที่มีลักษณะเสมือนจริงเพื่อให้ได้ผลการคำนวณ ใกล้เคียงความเป็นจริงดังรูปภาพที่ 17(d) และในการคำนวณแบบพลศาสตร์ (Dynamic) ประกอบด้วย แรงเฉื่อย (Inertia Force), แรงหน่วง (Damping Force) ซึ่งจะได้แบบจำลองในงานวิจัย นี้จะมีลักษณะแบบจำลองดังรูปที่ดังรูปภาพที่ 26 และคุณสมบัติต่างๆ ของส่วน ประกอบของ โครงสร้างตามภาคผนวก ก.

8. การวิเคราะห์ไฟในต์เอลิเมนต์

ปราโมทย์ เดชะอำไพ (2542) สำหรับปัญหาในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปแรงภายนอกที่มากระทำ ต่อวัตถุนั้น โดยปกติจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาก่อให้เกิดการเคลื่อนที่และความเค้นในวัตถุที่ เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยภาพรวมจะ พบว่าการแก้ปัญหานี้ไม่แตกต่างไปจากปัญหาในขณะที่วัตถุอยู่ภายใต้ภาวะอยู่ตัวมากนักสมการไฟ ในต์เอลิเมนต์ต่างๆ ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมาเมื่อวัตถุถูกแรงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลามากระทำจะ ก่อให้เกิดแรงเพิ่มขึ้นอีก 2 แรงซึ่งก็คือ : (1) แรงเฉื่อย (inertia force) ซึ่งแปรผันกับความเร่ง (acceleration)และ (2) แรงหน่วง (damping force) ซึ่งแปรผันกับความเร็ว (velocity) ของวัตถุนั้นแรง ทั้งสองนี้จะมิทิศในทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการเคลื่อนตัวและเนื่องมาจากหลักการของคาลอง แบต์ (D'Alembert principle) Merirovitch (1967) แรงทั้งสองนี้อาจเปรียบได้กับแรงวัตถุ (body force) นั่นคือ แรงเฉื่อยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงวัตถุได้ดังนี้

$$\{F\} = -\rho\left\{\begin{matrix} \ddot{\omega} \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{w} \end{matrix}\right\} = -\rho\left\{\begin{matrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{w} \end{matrix}\right\}$$
(24)

โดย ρ แทนความหนาแน่นมวล (Mass density) และเครื่องหมายลบระบุว่าแรงนั้นมีทิศทางตรงกัน ข้ามกับการเคลื่อนตัวในทำนองเดียวกันแรงหน่วงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงวัตถุดังนี้คือ

$$\{F\} = -C\left\{\frac{\dot{\sigma}}{\dot{\delta}}\right\} = -C\left\{\frac{\dot{u}}{\dot{v}}\right\}$$
(25)

เพื่อให้ง่ายแก่การทำความเข้าใจ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งประกอบด้วยพจน์ต่างๆ นับตั้งแต่พจน์ ที่เกี่ยวข้องกับความเฉื่อย ความหน่วง ความแข็งเกรึงของวัตถุ และแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนให้อยู่ ในรูปแบบที่ง่ายๆ ได้ดังนี้

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C] \{\dot{\delta}\} + [K] \{\delta\} = \{F(t)\}$$

$$(26)$$

โดยมีเมตริกซ์ของฟังก์ชั่นการประมาณภายของเอลิเมนต์เมตริกมวลสำหรับเอลิเมนต์เหล็กท่อนที่วาง ในแนวแกน x ที่มีการกระเคลื่อนตัวแนวแกน x ดังรูปภาพที่18 ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} = \int_{O}^{L} \rho[N]^{T} [N] (Adx)$$
(27)

$$= \rho A \int_{0}^{L} \left\{ \frac{1 - \frac{x}{L}}{\frac{X}{L}} \right\} \left[1 - \frac{x}{L} \frac{x}{L} \right] dx$$
(28)

ซึ่งเรียกว่าเมตริกซ์มวลแบบแนบนัย (Consistent mass matrix) ซึ่งสร้างขึ้นมาโดยใช้สมการของเอลิ เมนต์เมตริกซ์มวล (27) โดยตรง เมตริกซ์มวลแบบแนบนัยนี้เป็นเมตริกซ์เต็ม (full matrix) กล่าวคือ สัมประสิทธิ์ทุกๆตัวในเมตริกซ์นี้ไม่เท่ากับศูนย์ซึ่งหมายความว่าสมการย่อยต่างๆของสมการไฟในด์ เอลิเมนต์ (26) นั้นจะเกี่ยวข้องและสัมพันธ์กันหมด (coupled equations) ซึ่งจะทำให้การแก้สมการ ระบบรวมเพื่อหาผลลัพธ์จำเป็นต้องใช้เวลาในการคำนวณมากจากประสบการณ์ในวิธีการผลต่าง สืบเนื่อง(finite difference) โดยโหลดเวกเตอร์ { F(t) } ทางด้านขวาของสมการ (26) นั้นรวมถึงแรงทุกๆ อย่างที่มากระทำหรือเกิดขึ้นบนวัตถุนั้นซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาอันจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัว, ความเครียด และความเก้นที่จะแปรผันไปตามเวลาด้วย ซึ่งให้ผลลัพธ์ของเมตริกซ์มวลแบบรวมตัวที่จุดต่อ (Lumped Massmatrix)โดยมีความหมายทางกายภาพคือการรวมมวลไปอยู่ตำแหน่งที่จุดต่อนั่นคือ

$$\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} = \rho A L \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$
(29)

ผลประโยชน์ของการใช้เมตริกซ์มวลแบบรวมตัวที่จุดต่อดังแสดงในสมการ (29) นี้จะช่วยลดเวลาใน การคำนวณโดยเฉพาะสำหรับปัญหาขนาดใหญ่เนื่องจากสมการย่อยต่างๆ ในสมการระบบรวมนั้น ไม่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน (uncoupled equations) และลักษณะของเมตริกซ์ของ [C] และ [K] ก็มี ลักษณะคล้ายกันในการหาระยะเคลื่อนตัว การแก้สมการไฟในต์เอลิเมนต์ (26) เพื่อคำนวณหาการ เคลื่อนที่แปรผันไปตามเวลาสามารถทำได้หลายวิธีโดยประสิทธิภาพของวิธีต่างๆ จะมากหรือ น้อยจะขึ้นอยู่กับลักษณะชนิดของปัญหานั้น และหนึ่งในนั้นคือ วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (Recurrence Relations)



ภาพที่ 18 เอลิเมนต์เหล็กท่อนในระบบใหญ่ X-Y-Z

วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (Recurrence Relations)

ในการแก้สมการระบบรวมที่อยู่ในรูปแบบของสมการ (26) เพื่อหาค่าเคลื่อนตัว ณ จุดต่อ ต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดยจะใช้วิธีการย่อย 2 วิธีกล่าวคือ วิธีการผลต่างตรงกลาง (Central Difference Method) และวิธีการนิวมาร์ก (Newmark Method) ทั้งสองวิธีการย่อยนี้วางอยู่บน หลักการที่สำคัญคือ การเปลี่ยนแปลงความเร่งและความเร็วให้อยู่ในรูปแบบของค่าเคลื่อนตัวที่จุด ต่อเพื่อที่จะสามารถแก้ ปัญหาเพื่อหาค่าเคลื่อนตัวตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงวิธีการนิวมาร์ก (Newmark Method) เป็นวิธีการหาผลตอบสนองชั่วครู่ของการเคลื่อนตัววิธีการหนึ่งที่ใช้กันโดย แพร่หลายเนื่อง มาจากเหตุผลหลักที่ว่าเป็นวิธีการที่จะไม่เกิดผลลัพธ์แบบลู่ออก (Diverged solution) วิธีการนี้พิจารณาค่าต่าง ๆ ที่เวลาปัจจุบัน t และเวลาถัคไปที่ $t + \Delta t$ เท่านั้น โดยใช้สมมุติฐานบน หลักของการใช้ความเร่งเฉลี่ยในช่วงเวลานี้ นั่นคือ

$$\ddot{\delta}_{avg} = \frac{\ddot{\delta}_t + \ddot{\delta}_{t+\Delta t}}{2} \tag{30}$$

และจากนั้นจึงเขียนก่าการเกลื่อนตัวและความเร็วที่เวลา $t + \Delta t$ โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ และ ความเร่งเฉลี่ยของสมการ (30) นั่นคือ

$$\{\delta\}_{t+\Delta t} \cong \delta_t + \dot{\delta}_t \ \Delta t + \frac{1}{2}\ddot{\delta}_{avg} \ (\Delta t)^2 \tag{31}$$

ແລະ

$$\left\{\dot{\delta}\right\}_{t+\Delta t} \cong \dot{\delta}_t + \ddot{\delta}_{avg} \Delta t \tag{32}$$

หากแทนความเร่งเฉลี่ยจากสมการ (30) ลงในสมการ (31) และจัดพจน์จะได้ความเร่งที่เวลา $t+\Delta t$ ในรูปแบบดังนี้

$$\ddot{\delta}_{t+\Delta t} = \frac{4}{\left(\Delta t\right)^2} \delta_{t+\Delta t} - \frac{4}{\left(\Delta t\right)^2} \delta_t - \frac{4}{\Delta t} \dot{\delta}_t - \ddot{\delta}_t$$
(33)

จากนั้นหากแทนความเร่งเฉลี่ยจากสมการ (31) ลงในสมการของความเร็ว (32) พร้อมทั้งแทนค่าความ เร่งที่เวลา $t + \Delta t$ จากสมการ (33) ที่ได้นี้ตามลงไปจะได้ความเร็วที่เวลา $t + \Delta t$ ในรูปแบบดังนี้

$$\dot{\delta}_{t+\Delta t} = \frac{2}{\Delta t} \delta_{t+\Delta t} - \frac{2}{\Delta t} \delta_t - \dot{\delta}_t$$
(34)

เมื่อได้ทั้งความเร่งและความเร็วที่เวลา $t + \Delta t$ ดังแสดงในสมการ (33) และ (34) นี้แล้วก็สามารถทำ การสร้างสมการเพื่อที่จะคำนวณการเคลื่อนตัวที่จุดต่อต่าง ๆ ได้โดยเริ่มจากสมการระบบรวม (26) ที่ เวลา $t + \Delta t$ นั่นคือ

$$[M]\{\dot{\delta}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{\delta}\}_{t+\Delta t} + [K]\{\delta\}_{t+\Delta t} = \{F(t+\Delta t)\}$$
(35)

แทนสมการ (33) และ (34) ลงในสมการ (35) นี้แล้วทำการจัดพจน์เพื่อหาค่าของการเคลื่อนตัวที่เวลา t + Δt จะได้สมการระบบรวมออกมาในรูปแบบคือ

$$\left[\overline{K}\right]\left\{\delta\right\}_{t+\Delta t} = \left\{\overline{F}\right\}$$
(36)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

- 1. Computer Note Book Intel[®] coreTM2 Duo processor T5500 @1.66GHz 1.5GB of Ram
- 2. Computer Desktop Intel[®] coreTM2 Duo processor T5500 @2GHz 2GB of Ram
- 3. Software MSC. PRATRAN 2006
- 4. Software MSC. FATIGUE 2006
- 5. Software MSC. ADAMS 2005
- 6. Unix Graphic NX3

ີວສີຄາร

เมื่อพิจารณาถึงการวิเคราะห์พื้นผิวถนนแล้วนั้น จะมีผลให้ถ้อบริเวณผิวสัมผัสมีการ เคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random Displacement) ทำให้พาหนะเกิดการสั่นไหวเป็นผลให้เกิดแรงกระทำกับ โครงสร้างรถสามถ้อสกายแลปในลักษณะของกระบวนการสุ่ม (Random Vibration) ซึ่งรถดังกล่าวเป็น รถสำหรับขนส่งผู้โดย สารขนาดไม่เกิน 11 คน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)

ในสภาพที่โครงรถไม่มีการเคลื่อนที่ หรือหยุดนิ่งแรงที่กระทำกับโครงสร้างจะอยู่ในรูปแรงสถิต (Static Force) นั่นคือน้ำหนักคงที่ของโครงสร้าง (Dead Load) และเมื่อโครงสร้างเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว แรงกระทำจะอยู่ในรูปแรงพลศาสตร์ (Transient Force) ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา โดยทั่วไป แล้วมีค่าแตกต่างจากแรงสถิต (Static force) ที่กระทำกับโครงสร้างซึ่งแรงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการ เปลี่ยนตำแหน่งและการสั่นไหวของโครงสร้างโดยความสัมพันธ์ของการสั่นไหวระหว่างเอลิเมนต์ ของโครงสร้างจะถูกพิจารณาในรูปสมการที่เรียกว่า Coupling Equation จากขอบเขตของการวิจัย ซึ่ง ให้เป็นข้อเปรียบเทียบถึงน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณา 7 คน(โคนขับ 6 ผู้โดยสาร) และ11คน(โคนขับ 10 ผู้โดยสาร)ในการวิจัยโดยแต่ละคนมีน้ำหนัก 60 กก. และการโดยสารที่ความเร็ว 20, 40 และ 60 กม/ ชม. ซึ่งโครงสร้างรถสามล้อสกายแลปจะถูกจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพื้นที่และคุณสมบัติ ทางกลศาสตร์อ้างอิงจากคุณ สมบัติของวัสคุในภาคผนวก ก. และแบบจำลองซึ่งอยู่ในรูป แบบ ของฟังก์ชันแสดงลักษณะผิวถนน Hao Wang (2006) ที่ได้จาก Power Spectral Density (PSD) Peter AndreAn (2006) , Dodds and Robson (1973) กวามขรุขระของผิวถนนจะถูกสังเคราะห์จาก โปรแกรมคำนวณที่ใช้จากโปรแกรม MATLAB สร้างผิวถนนส่วนการวิเคราะห์ปัญหา พลศาสตร์ (Transient) จะถูกวิเคราะห์ในรูปแบบไฟในต์เอลิเมนต์เชิงพื้นที่มีระบบสมการระบบ รวมมีความสัม-พันธ์ (Coupled Equations) และใช้วิธีนิวมาร์ก Newmark (1959) หาผลเฉลย ซึ่ง กระบวนการดังกล่าวจะใช้โปรแกรมซึ่งถูกพัฒนาเพื่อนำมาช่วยในการคำนวณร่วมกันในโปรแกรม MSC.NASTRAN/PATRAN ของความเล้นที่เกิดขึ้น ณ คำแหน่งต่างๆ และใช้โปรแกรม MSC.FATIGUE วิเคราะห์คำนวณความเสีย หายตามกฎ Palmgren – Miner (1945) จากการนับ จำนวนความเค้นโดยวิธีนับแบบ Rainflow Matsuishi และ Endo (1968) ซึ่งแก้ไขค่า เฉลี่ยของความเก้น Alternating เพื่อให้ได้ก่าความเล้นสมมูลตามวิธีการ Goodman (1890) และในส่วนของสภาวะที่ เป็น Input ระขะขจัดเพื่อหาระขะการเคลื่อนที่ในจุดรอง-รับโครงสร้างที่ผ่านระบบกันสะเทือน จากการวิ่งผ่านถนนในลักษณะต่างๆของผิวถนนและความเร็วที่ต่างกันผ่านโปรแกรม MSC-ADAMS ในลักษณะวัตถุเคลื่อนที่เป็นวัตถุแข็งแกร่งเพื่อประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยมี วิธีในการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วนคือ



ภาพที่ 19 ขั้นตอนการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างรถสามล้อสกายแลป

1. การวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ (Static Force)

ในหัวข้อนี้มีสมมุติฐานว่ามีการไม่มีสั่นไหวก่อนการเคลื่อนที่หรือฉะนั้นแรงกระทำกับ โครงสร้างรถจะเป็นน้ำหนักบรรทุกวิเคราะห์หาความเค้น ณ จุดต่างๆ บนโครงสร้างโดยลักษณะ ขั้นตอนการวิเคราะห์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

 1.1 การสร้างแบบจำลอง และใช้ระเบียบวิธีไฟในต์อิลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความเสียหาย ของแบบจำลองโดยการคำนวณทางไฟในต์อิลิเมนต์ ซึ่งใช้แบบจำลองเป็นBeam Element เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างความยาวกับหน้าตัดมีอัตราต่ำจึงเลือกใช้และใช้Shell Element ดัง รูปภาพที่ 20 โดยการแบ่ง Element ของแบบจำลองในการวิเคราะห์โดยมีจำนวน11954 Element, 16501Node วิเคราะห์ Stress Bending ที่จุด C ของหน้าตัดของโครงสร้าง ตามแสดงในภาคผนวก ก.



ภาพที่ 20 ลักษณะ elemenet ที่เป็น Beam element และ Shell element

1.2 วิเกราะห์ความเสียโดยใช้พื้นฐานทฤษฎีความเสียหายของ von Mises โดยข้อกำหนด แบ่งเป็น

 สัมภาระ โดยสาร 1 คนขับผู้โดย 6 คน และ 1 คนขับผู้โดยสาร 10 คน (น้ำหนักของคนละ 60 กก.)

- น้ำหนักของโครงรถและเครื่องยนต์รวม 310 กก.

- วัสดุของโครงสร้างเป็นเหล็กท่อตามมาตราฐาน JIS G 3444 โดยแสดงขนาด และ คุณสมบัติทางกลในภาคผนวก ก.



ภาพที่ 21 Condition Boundary ของ Input ต่างๆในแบบจำลอง 1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร ในวิเคราะห์สถิตยศาสตร์

โดยที่ข้อจำกัดการเกลื่อนที่ดังนี้โดยแสดงในรูปภาพที่21 ตามลักษณะสภาวะหยุดนิ่งหรือ โกรงไม่มีการเกลื่อนที่

- จุด A1 จำกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y, Z และจำกัดการหมุนรอบแกน X, Y, Z
- จุด A2 และ A3 จำกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y และจำกัดการหมุนรอบแกน X, Y
- จุด B1 เป็นจุดที่เกิดแรงกระทำจากภาระน้ำหนักผู้โดยสาร
- จุด B2 เป็นจุดที่เกิดแรงกระทำจากภาระน้ำหนักของผู้ขับ
- จุด B3 เป็นจุดที่เกิดแรงกระทำจากภาระน้ำหนักเกรื่องยนต์
- 2. การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (Transient Force)

ในส่วนนี้มีการวิเคราะห์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน โดยแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูปภาพ ที่ 19 โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การสร้างแบบจำลองของผิวถนนแบบ Good, Average และ Poor โดยใช้ความเร็วที่ 20,40

และ 60 กม/ชม. โดยการสังเคราะห์จากโปรแกรม MATLABโดยจำลองลักษณะของผิวถนน โดยทั่วไปอาจจะพิจารณาให้เป็นแบบ Random Two-Dimensional Isotropic Gaussian Field ซึ่ง แสดงได้โดยฟังก์ชัน Power Spectral Density (PSD) Dodds and Robson (1973), Hao Wang (2006)

$$S_r(w) = A_r \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-2}$$
(37)

เมื่อ $S_{r}(w)$ คือฟังก์ชันของความขรุขระในความถี่ Wave number ($_{m^3/cycle}$), A_r คือค่า สัมประสิทธิ์ความขรุขระตามลักษณะของผิวถนนโดยมีค่าดังตารางที่ 6, w คือช่วงของ ความถี่ ($_{m^3/cycle}$) และ w_o คือความถี่ไม่ต่อเนื่องมีค่าเป็น $1/2 \pi (_{cycle/m})$ จาก PSD ผิวถนนสภาพ ผิวถนนจัดให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ โดยผิวถนนแบบ Good, Average และ Poor และสังเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ที่ลักษณะของผิวถนนที่ได้กล่าวข้างต้น และในค่า ความเร็วที่ 20, 40 และ 60 กม/ชม. ตามสมการ (38) Hao Wang (2006)

$$r(x) = \sum_{k=1}^{N} \sqrt{4A_r \left(\frac{\pi k}{L\omega_0}\right)^{-2} \frac{\pi}{L}} \cos\left(\frac{\pi k}{L}x + \varphi_k\right)$$
(38)

โดย r(x) คือฟังก์ชันแสดงลักษณะผิวถนน L คือความยาวของผิวถนน $arphi_k$ คือมุมเฟสของลำดับ ความถี่ k^{th} ซึ่งกำหนดให้มุมเฟสของความถี่มีการกระจายตัวแบบสุ่มที่มีค่าระหว่าง 0 และ 2 π

ตารางที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระตามลักษณะของผิวถนนตามลักษณะต่างๆ

ดักษณะผิวถนน	Roughness coefficient (A _r)	
Good	$20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{cycle/m}$	
Average	$80 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{cycle/m}$	
Poor	$256 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{cycle/m}$	

ทีมา: Hao Wang (2006)

จากสมการที่ (38) ในการสังเคราะห์ลักษณะผิวถนนจะประกอบด้วยตัวแปรสุ่มที่มี กุณสมบัติทางสถิติเป็น White Noise ดังรูปที่ 22 ดังนั้นจึงจำเป็นกรองสัญญาณโดยใช้ ก่าพารามิเตอร์หลักในการกำหนดคุณสมบัติของตัวกรองหรือค่าความถี่คัตออฟ (cut-off frequency) โดยระบุจุดตัดของสัญญาณลักษณะการกรองแบบจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม กับสภาพความเป็นจริงในการคำนวณ ดังแสดงในรูปภาพที่ 22-25 และในส่วนอื่นๆ ที่สภาพถนน GOOD, AVERAGE, POOR ที่ความเร็ว 20, 40, 60 กม/ชม.โดยจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพ ถนนกับความเร็วตามกำหนด



ภาพที่ 22 ตัวแปรสุ่มที่มีคุณสมบัติทางสถิติเป็น White noise



ภาพที่ 23 ผิวถนนที่ได้จากแบบจำลอง AVERAGE CONDITON ที่ผ่านการกรอง

ในการสังเคราะห์ลักษณะผิวถนนจะประกอบด้วยตัวแปรสุ่มที่มีคุณสมบัติทางสถิติเป็น White noise จึงกรองข้อมูลนี้ให้เป็นการกำหนดขอบเขตของการพิจารณาจะยอมให้สัญญาณผ่านไป ได้ในช่วงหนึ่ง โดยใช้ลักษณะในการกรองแบบ Moving Average Sayer (1996) ซึ่งแสดงในรูปภาพ ที่ 23และ 25



ภาพที่ 24 ผิวถนนที่ได้จากแบบจำลอง GOOD CONDITION ที่ผ่านการกรอง



ภาพที่ 25 ผิวถนนที่ได้จากแบบจำลอง POOR CONDITION ที่ผ่านการกรอง

2.2 การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างรถและวิเคราะห์หาระยะขจัด ณ จุดรองรับโดย โครงสร้างรถมีคุณสมบัติเป็นวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic) มีคุณสมบัติของวัสดุตามที่กำหนดไว้ใน ภาคผนวก ก.



ภาพที่ 26 โครงสร้างแบบจำลอง (A) ซึ่งประกอบส่วนหน้า: ระบบกันสะเทือนแบบโช๊คคู่, ล้อหน้า ส่วนหลัง: ระบบกันสะเทือนแบบแหนบสปริง, ล้อหลัง (B) แบบจำลองชุคกันสะเทือฯ ของยาง และโช๊ค

สำหรับระบบกันสะเทือนของรถนั้นประกอบด้วย ระบบกันสะเทือนแบบโช๊คคู่ที่ล้อหน้า และแหนบสปริงที่ล้อหลังดังรูปที่ 26 แสดงแบบจำลองโครงสร้างและระบบกันสะเทือนของ รถสามล้อโดยค่าคงที่สำหรับชุดระบบกันสะเทือนนั้น ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชุดกันสะเทือน

ค่าคงที่สำหรับชุดระบบกันสะเทือน	ล้อหน้า	ด้อหถัง
การหน่วงของยาง, c1 (kN·s/m)	2.86	2.86
การหน่วงของโช๊ค, c2 (kN·s/m)	1	1.1
สตีฟเนสของยาง, k1 (kN/m)	215	215
สตีฟเนสของโช๊ค, k2 (kN/m)	35	38

ที่มา: Jeff Ruber (2006)

ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจะใช้เป็นค่าคงที่ในการคำนวณการสั่นใหว รวมถึง การวิเคราะห์ระยะขจัดที่จุดรองรับตัวโครงสร้างในการใช้โปรแกรม MSC. ADAMS เพื่อให้ทราบระยะ ขจัด ณ จุดรองรับโครงสร้างคังรูปภาพที่ 27 โดยโปรแกรมจะวิเคราะห์ด้วยภาระที่สภาวะมี 1 คนขับ 6 ผู้โดยสารและ1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร (น้ำหนักเฉลี่ยคนละ 60 กก.) ขับตามสภาพท้องถนน



ภาพที่ 27 ค่าที่ใส่เป็นตัวแทนผิวถนนในการกระตุ้นการสั่นในโครงสร้างและจุดรองรับโครงสร้าง ที่มา: Anthony Clancy, Scott Gibson,Dave Hartung, Jacob Seal and Adam Skelskie (2006)

โดยแบ่งออกเป็นลักษณะถนนที่สภาพดี เช่น ถนนหลวงเป็นผิวค่อนข้างเรียบ (ค่า สัมประสิทธิ์ความขรุขระ 20x10⁶ _{m³ / cycle}) ถนนที่สภาพค่อนข้างดี เช่น ถนนทางหลวงชนบทหรือ เป็นผิวถนนที่มีความขรุขระเล็กน้อย (ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ 80x10⁶ _{m³ / cycle}), ถนนที่ขรุขระ เช่น ถนนที่มีความเสียหายของผิวถนน (ค่าสัมประสิทธิ์ ความขรุขระ 256x10⁶ _{m³ / cycle}) ดังรูปภาพ ที่ 28



ภาพที่ 28 ลักษณะของผิวถนนแบบ (a) GOOD, (b) AVERAGE และ (c), (d) POOR

ที่มา: Hao Wang (2006)

2.3 การสร้างแบบจำลองและใช้ระเบียบวิธีไฟในต์อิลิเมนต์วิเคราะห์หาค่าความเค้น(Stress) บนพื้นฐานทฤษฎีความเสียหาย von Misses Stress ซึ่งการวิเคราะห์ใช้วิธีการSemidiscretization, Hughes (2000) โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองไฟในต์เอลิเมนต์ในโดเมนเชิงพื้นที่ ซึ่งจะทำให้ ใด้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญอัน ดับสองในฟังก์ชันของเวลา ดังแสดงในสมการ (26) ซึ่งสมการระบบ รวมนี้เกี่ยวข้องสัมพันธ์ (coupled equation) กันหมดและวิเคราะห์ปัญหาแบบผลตอบสนองชั่วครู่ (Transient Analysis) โดยใช้วิธี Newmark (1959) ซึ่งอาศัยหลักการแบ่งเวลาออกเป็นจุดย่อย ๆ คือ t_n จากนั้นหาคำตอบแต่ละจุดโดยช่วงเวลาใช้ Δt เป็นคาบเวลาที่พิจารณา ซึ่งในสมการสมคุล ของโครงสร้างขณะที่มีการสั่นใหวตามสมการ (26)

$$[M] \{ \ddot{\delta}(t) \} + [C] \{ \dot{\delta}(t) \} + [K] \{ \delta(t) \} = \{ f(t) \}$$

$$(26)$$

โดยมีสภาวะเริ่มต้นที่
$$\{\delta(0)\} = \{\delta_0\}$$
 (27)

$$\left\{\dot{\delta}(0)\right\} = \left\{\dot{\delta}_{0}\right\} \tag{28}$$

โดย $\{\dot{\mathcal{S}}(t)\}, \{\dot{\mathcal{S}}(t)\}\$ และ $\{\mathcal{S}(t)\}$ เป็นเวกเตอร์ความเร่ง, ความเร็ว, และการขจัดในฟังก์ชันของ เวลาตามลำดับ [*M*], [*C*] และ [*K*] เป็นเมทริกซ์ของมวล, ความหน่วง, และความแข็งแกร่งตามลำดับ $\{f(t)\}\$ เป็นเวกเตอร์แรงภายนอกที่กระทำกับ โครงสร้าง โดยมีสภาวะเริ่มต้น (Initial Conditions) เป็น เวกเตอร์ระยะขจัด $\{\mathcal{S}(0)\} = \{\mathcal{S}_0\}\$ และเวกเตอร์ความเร็ว $\{\dot{\mathcal{S}}(0)\} = \{\dot{\mathcal{S}}_0\}\$ ซึ่งวิธีการดังกล่าวคำนวณ โดยโปรแกรม MSC.PATRAN/NASTRAN

2.4 วิธีการ Stress-Life ถูกใช้ในการวิเคราะห์อายุความถ้าของโครงสร้างรถสามถ้อ โดยใช้กฎ ของ Palmgren-Miner สำหรับคำนวณความเสียหายสะสมในแต่ละรอบความเค้นดังแสดงในสมการ (18)

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \ge 1 \tag{18}$$

โดย n_i คือจำนวนรอบของค่าความเก้น Alternating σ_i และ N_i คือ จำนวนรอบอายุการใช้งานที่ ระดับความเก้น σ_i ซึ่งในการนับจำนวนความเก้นนั้นได้ใช้วิธีการ RainFlow และค่าของความเก้น ที่กล่าวในข้างต้นจะวิธีการGoodman ถูกนำมาใช้ในการแก้ไขค่าเฉลี่ยของความเก้น Alternating เพื่อให้ได้ก่าความเก้นสมมูล σ_{equiv} ดังแสดงในสมการ(16)

$$\sigma_{equiv} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \sigma_m / \sigma_u\right)} \tag{16}$$

โดยที่ σ_a เป็นกวามเก้น Alternating, σ_m เป็นก่าเฉลี่ยของกวามเก้น Alternating และ σ_a เป็นกวามเก้น ประลัย ซึ่งกวามเก้นที่ใช้ในการกำนวณสมการ (2-11) นั้นให้ใช้เป็นก่ากวามเก้นสมมูล von Mises โดย ข้อกำหนดแบ่งออกเป็นการเกลื่อนที่ และภาระกระทำดังนี้ - สัมภาระ โดยสาร 1 คนขับผู้ โดย 6 คนและ 1 คนขับผู้ โดยสาร10 คน (น้ำหนักของคนละ60 kg.)

- น้ำหนักของโครงรถ และเครื่องยนต์รวมในการใช้ 310 kg.

 วัสดุของโครงสร้างเป็นเหล็กท่อตามมาตรฐาน JIS G 3444 โดยแสดงขนาดและ คุณสมบัติทางกลในภาคผนวก ก.โดยที่ข้อจำกัดการเคลื่อนที่นี้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 21 และ 27 โดย

- จุด A1จำกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Z โดยสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ซึ่งใส่ ระยะขจัด (displacement) และจำกัดการหมุนรอบแกน X

- จุด A2 จำกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z และสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ซึ่งใส่ระยะ ขจัด (displacement) และจำกัดการหมุนรอบแกน X

- จุด A3 จำกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z และสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ซึ่งใส่ระยะ ขจัด (displacement) และจำกัดการหมุนรอบแกน X

- จุด B1 เป็นจุดที่เกิดแรงกระทำจากภาระน้ำหนักผู้โดยสาร

- จุด B2 เป็นจุดที่เกิดแรงกระทำจากภาระน้ำหนักของผู้ขับ

- จุด B3 เป็นจุดที่เกิดแรงกระทำจากภาระน้ำหนักเครื่องยนต์

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการวิเคราะห์แรงกระทำแบบสถิตศาสตร์

เมื่อพิจารณาโครงสร้างที่จอคนิ่งก่อนการเกลื่อนใหวกับตำแหน่งสมคุลย์แรงกระทำมี ลักษณะเป็นแรงกระทำเป็นแบบแรงสถิต จากสภาวะดังกล่าวเพื่อหาก่าความเก้นของภาระกระทำ ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก, เครื่องยนต์และน้ำหนักของโกรงสร้างซึ่งทำให้เกิดก่าความเก้นในขณะ จอคนิ่ง

1.1 วิเคราะห์ความเค้น (Stress) บนพื้นฐานทฤษฎีความเสียหายของ von Mises



ภาพที่ 29 Stress Bending, von Mises สูงสุด 2.71 Mpa โดยที่ 1 คนขับ 6 คนโดยสาร

จากการวิเคราะห์ค่า Stress Bending, von Mises สูงสุดในรูปภาพที่ 29 ได้ค่า 27.1 MPa ซึ่งเมื่อเทียบ กับค่า Yield Point ของเหล็กท่อ JIS G 3444 มีค่า 291 MPa ค่าความปลอดภัย 10.6 เท่า



ภาพที่ 30 Stress bending, von Mises สูงสุด 2.81 Mpa โดยที่ 1 คนขับ 10 คนโดยสาร

จากการวิเคราะห์ค่า Stress Bending, von Mises สูงสุดในรูปภาพที่ 30 ใด้ค่า 28.1 Mpa ซึ่งเมื่อเทียบ กับค่า Yield Point ของเหล็กท่อ JIS G 3444 มีค่า 291 MPa ค่าความปลอด ภัย 10.3 เท่า

2. ผลการวิเคราะห์แรงกระทำแบบพลศาสตร์

2.1 การจำลองการวิ่งบนผิวถนนจากการใช้โปรแกรม MSC.ADAMS ซึ่งแสดงการ วิเคราะห์ในรูปที่ 27 โดยมี Input ของลักษณะผิวถนนจราจลต่างๆและในความเร็วที่ต่างกันจาก สมการ Hao Wang (2006) ผ่านระบบกันสะเทือนของโครงสร้างรถ ที่มีคุณสมบัติทางกลแสดงใน ตารางที่ 6 จากรูปแบบที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ ที่เป็นการสั่นใหวในแนวดิ่ง (Bouncing) และ การสั่นใหวในรูปแบบการหมุนในแนวขนานกับโครงสร้าง (Pitching) จากรูปแบบการสั่นใหว ส่งผลกระทำกับโครงสร้างรถที่พิจารณาเป็นในรูปแบบ Rigid body โดยพิจารณา ณ จุดรองรับดัง รูปภาพที่ 27 (A1, A2, A3) ในช่วงเวลา (Time History) ของการวิเคราะห์ที่ 10 วินาที ซึ่งแสดงผลใน รูปที่ 31-42



ภาพที่ 31 ลักษณะระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โคยสาร)



ภาพที่ 32 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 33 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 34 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 35 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 36 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 37 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 38 ลักษณะระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 39 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Average condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 40 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 41 ระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างในผิวถนนแบบ Poor condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)





2.2 วิเคราะห์ความเค้นโดยเมื่อพิจารณาระยะขจัดที่จุดรองรับโครงสร้างพบในช่วงของ 8 วินาทีหลังจากการสั่นใหวในโครงสร้างเป็นการสั่นใหวที่เสถียร (Steady State Response) ดัง รูปภาพที่ 30-41 ดังนั้นจึงตัดช่วง 2 วินาทีแรกออกจากการวิเคราะห์ความเค้น ณ จุดต่างๆ ของ

โกรงสร้างในการใส่ก่าสภาวะ (Boundary Condition) โดยใช้โปรแกรมที่ถูกพัฒนาช่วยในการ วิเคราะห์จากโปรแกรม MSC.PATRAN /NASTRAN ผลวิเคราะห์จากโปรแกรมในการใช้งาน โครงสร้างวันละ 8 ชม. และการนับรอบอายุของโครงสร้างในการล้ำตัว(Fatigue) ซึ่งใช้โปรแกรม MSC. FATIGUE ในการนับความเสียหายตามทฤษฎี Palmgren-Miner ตามสมการการที่ (4-1) นอกจากนั้นในการนับย่านความเสียหายใช้วิธีการนับแบบ RainFlow และการปรับแก้ไขค่าเฉลี่ย ของความเก้น Alternating ตามวิธีการ Goodman ดังสามการสมการที่ (2-11) โดยผลการวิเคราะห์ ตามวิธีการดังกล่าวจะแสดงจาก 5 ตัวอย่างการ โดยแสดงก่าความเก้น ณ เวลาที่พิจารณาในจุดที่ เสียหายที่สุดดังแสดงในรูปภาพ 43-66 และแสดงเป็นผลเฉลี่ยของอายุการใช้งานตามตารางสรุปที่ 8 และ 9



ภาพที่ 43 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Average condition ที่ความเร็ว 60 กม /ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)







ภาพที่ 45 ความเค้นที่บริเวณ Node 2235 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 46 จุดเสียหายที่บริเวณ Node 2235 ผิวถนนแบบ Average condition ความเร็ว 40 กม/ชม. อายุการใช้งาน 9 ปี (1 คนงับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 47 ความเค้นที่บริเวณ Node 3597 เป็นผิวถนน Average condition ความเร็ว20 กม/ชม. ค่าความเค้นมีค่าต่ำกว่าพิกัดความทนทาน (Endurance Limit) โดยมีอายุการใช้งาน มากกว่า 20 ปี (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 48 โครงสร้างวิ่งบนผิวถนน Average Condition ความเร็ว 20 กม/ชม.มีค่า ความเค้นต่ำกว่า พิกัดความทนทาน(Endurance Limit) โดยมีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 49 ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 กนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 50 จุดเสียหายที่บริเวณ Node 4313 ผิวถนนแบบ Poor condition ความเร็ว 60 กม/ชม. อายุการใช้งาน 1 เดือน (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 51 ความเค้นที่บริเวณ Node 5140 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 52 จุดเสียหายที่บริเวณ Node 5140 ผิวถนนแบบ Poor condition ความเร็ว 40 กม/ชม. อายุการใช้งาน 2 เดือน (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 53 ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor condition ที่กวามเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)


ภาพที่ 54 จุดเสียหายที่บริเวณ Node 4313 ผิวถนนแบบ Poor Condition ความเร็ว 20 กม/ชม. อายุการใช้งาน 27 เดือน (1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 55 ความเก้นที่บริเวณ Node 3597 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average Condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 56 แสดงจุดที่เสียหายของโครงสร้างที่บริเวณ Node3597 ผิวถนนแบบ Average ที่ความเร็ว 60 กม/ชม.อายุการ 3.6 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 57 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 58 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. อายุการใช้งาน 19.3 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 59 ความเก้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุด โดยเป็นผิวถนน Average Condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 60 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Average Condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม.อายุการใช้งาน 54 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)



ภาพที่ 61 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor Condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)

ภาพที่ 62 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor Condition ที่ความเร็ว 60 กม/ชม.อายุการใช้งาน 0.15 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)

ภาพที่ 63 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)

ภาพที่ 64 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor Condition ที่ความเร็ว 40 กม/ชม.อายุการใช้งาน 1.9 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)

ภาพที่ 65 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor Condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม. (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)

ภาพที่ 66 ความเค้นที่บริเวณ Node 4313 เป็นจุดเสียหายที่สุดโดยเป็นผิวถนน Poor Condition ที่ความเร็ว 20 กม/ชม.อายุการใช้งาน 14 เดือน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร)

ในตารางที่ 8 เป็นผลการวิ่งบนสภาพถนนต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักบรรทุก 1 คนขับ 6 ผู้โดยสาร (น้ำหนักเฉลี่ยคนละ 60 กก.) จะเป็นการสรุปอายุการใช้งานในสภาพต่าง ๆ จากการใช้โปรแกม MSC.FATIGUE วิเคราะห์ในการทดลอง 5 ตัวอย่างแสดงเป็นผลเฉลี่ยในอายุการใช้งาน (หน่วย: วัน)

ตารางที่ 8 ผลค่าเฉลี่ยอายุการใช้งาน 5 ตัวอย่างโดยบรรทุก 1 คนงับ 6 ผู้โดยสาร

ความเร็วรถ		สภาพผิวถนน	
(km/hr)	Good	Average	Poor
60	>7300*	2101	33
40	>7300*	3288	61
20	>7300*	>7300*	815

* คือมีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี (หน่วย: วัน)

ในตารางที่ 9 จากผลการวิ่งบนสภาพผิวถนนในสภาพต่างๆ โดยการบรรทุก 1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร (น้ำหนักเฉลี่ยคนละ 60 กก.) ในการทดลอง 5 ตัวอย่างแสดงเป็นผลเฉลี่ยอายุการใช้งาน (หน่วย: วัน)

ความเริ่วรถ		สภาพผิวถ	นน
(km/hr)	Good	Average	Poor
60	>7300*	108	3.6
40	>7300*	360	58
20	>7300*	1692	432

ตารางที่ 9 ผลค่าเฉลี่ยอายุการใช้งาน 5 ตัวอย่างการบรรทุก 1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร

* คือมีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี (หน่วย: วัน)

วิจารณ์

จากการทคลองในงานวิจัยนี้นั้นการล้าตัวมืองค์ประกอบหลายส่วนที่เป็นส่วนส่งเสริมทำ ให้เกิดความล้าของโครงสร้างในการจำลองลักษณะการใช้งานตามสภาพการใช้งานจริงโดยมีปัจจัย ที่เกี่ยวข้องคือ การขับขี่ในแต่ละสภาพถนน, ความเร็วที่ใช้ในการขับขี่และน้ำหนักบรรทุกโดยสรุป ดังผลวิเคราะห์ตารางที่ 7 และ 8 มีเนื้อหาดังนี้

 การวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์ของโครงสร้างในการบรรทุกผู้โดยสารและผู้ขับขี่ที่ 7 คนและ 11 คนพบว่าค่าความปลอดภัยมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 10.6-10.3 เท่าซึ่งบริเวณเสียหายจะ เกิดใกล้เคียงกัน คือบริเวณช่วงต่อระหว่างบังคับเลี้ยวกับที่นั่งคนขับ และบริเวณจุดรองรับโครงสร้าง ที่ A2 ซึ่งมีค่าที่ 27.1- 28.1 MPa ตามรูปภาพที่ 29-30

 ผลการวิเคราะห์ในสภาพการบรรทุกและที่มีความเร็วเหมือนกัน โดยที่สภาพถนน ต่างกันพบว่าซึ่ง ที่สภาพถนน Good condition (มีความขรุขระน้อย) ในทุกความเร็วและการบรรทุกจะ เกิดความเก้นสะสมต่อจำนวนรอบการใช้งานของโครงสร้างมีก่าต่ำกว่าก่าพิกัดความทนทาน (Endurance Limit) ซึ่งทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน (มากกว่า 20 ปี) และในสภาพถนน Average condition ในการบรรทุกผู้โดยสารและผู้ขับขี่ 7 คนที่ความเร็ว 20 กม/ชม. ก็จะมีลักษณะเดียวกันคือ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 20 ปีเช่นเดียวกัน และในการบรรทุกผู้โดยสารและผู้ขับขี่ทั้ง 7และ 11 คน ในสภาพถนน Average condition (ขรุขระปานกลาง), Poor condition (ถนนที่มีสภาพเสียหาย) มีอายุการใช้งานน้อยลงตามสภาพถนนโดยตำแหน่งการเกิดความเสียหายจะมีขนาดที่ขยายตัวขึ้น ตามสภาพความขรุขระดังรูปภาพที่ 56 และ 62 ที่เห็นได้ชัดของการขยายตัวของบริเวณความ เสียหาย

 4aการวิเคราะห์ในน้ำหนักบรรทุกและที่สภาพถนนที่เหมือนกัน โดยมีการขับขี่ที่ ความเร็วต่างกัน พบว่าที่ความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างน้อยลง และที่เห็น ได้ชัดคือในความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ตำแหน่งความเสียหายเพิ่มขึ้นและตำแหน่งการเกิด ความเสียหายจะเพิ่มขึ้นตามเช่นกันตามดังรูปที่ 62 และ 66

 4. ผลการวิเคราะห์สภาพถนนและความเร็วในการขับขี่ที่เหมือนกัน โดยน้ำหนักบรรทุก พบว่าอายุการใช้งานที่บรรทุกน้ำหนักมากขึ้นจะส่งผลอย่างมากกับอายุการใช้งานซึ่งจะเห็นได้จากการ สรุปผลในตารางที่ 7และ 8 ที่มีอายุการใช้งานน้อยลง จากโครงสร้างที่แสดงความเสียหายพบว่าบริเวณ ที่รองรับที่นั่งผู้ขับขี่จะเป็นบริเวณและติดกับห้องผู้โดยสารจะเป็นบริเวณที่เกิดความเสียหาย แล้วดังรูป ที่ 44 และ 56 เมื่อบรรทุกน้ำหนักเพิ่มขึ้นก็จะทำให้บริเวณช่วงที่วางเครื่องยนต์เชื่อมต่อไปยังบริเวณ บังกับทิสทางจะเสียหายเพิ่มขึ้นเสมอ

5. ข้อสังเกตโดยรวมในการออกแบบโครงสร้างพบว่าจุดเชื่อมต่อบริเวณที่รองรับที่นั่งผู้ขับ ขี่และบริเวณที่วางเครื่องยนต์เชื่อมต่อที่บริเวณบังขับทิสทางจะเป็นบริเวณที่เกิดความเสียเสมอ ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างบริเวณดังกล่าว ในการเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างจึงควร ออกแบบให้ดียิ่งขึ้น เช่น บริเวณดังกล่าวควรใช้วัสดุที่มีพิกัดความต้านการล้าตัวที่สูงขึ้นเป็นต้น

6. จากแรงกระทำจากผิวถนนที่กระทำกับโครงสร้าง, น้ำหนักบรรทุก, ความเร็วนั้นเมื่อ ส่งผลกระทำไปยังโครงสร้างผ่านระบบกันสะเทือนซึ่งจะทำเป็นแรงกระทำย้อนกับไปยังพื้นถนน ด้วย นั้นหมายความว่า ถนนจะเสียหายด้วยจาก น้ำหนักบรรทุกมากขึ้น และความเร็วเพิ่มขึ้นจะเป็น ตัวกระตุ้นทำให้ถนนมีสภาพเสียหายยิ่งขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการวิเคราะห์ถึงแรงกระทำต่อโครงสร้างรถ ซึ่งมีผลมาจากความขรุขระของผิวถนน สามารถสรุปความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก, ความเร็วของรถสามล้อสกายแลปและความขรุขระ ของผิวถนนที่มีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างรถสามล้อสกายแลป

พบว่าภาระบรรทุก 7 คน (1 คนขับขี่ 6 ผู้โดยสาร) อายุการใช้งานของโครงสร้างรถนั้นขึ้นอยู่กับ ทั้งสภาพผิวถนนและความเร็ว โดยโครงสร้างรถจะมีอายุการใช้งานเกินกว่า 20 ปี เมื่อวิ่งบนผิวถนนแบบ Good ในทุกก่าความเร็วที่ใช้ ในสภาพถนนแบบ Average และ Poor โครงสร้างรถจะมีอายุการใช้ต่ำลง เมื่อใช้ความเร็วรถสูงขึ้นโดยที่ภาระบรรทุก 11 คน (1 คนขับ 10 ผู้โดยสาร) จะมีลักษณะคล้ายกับภาระ บรรทุก 7 คนโดยจะมีความเก้นเฉลี่ยที่มากกว่าทำให้ภาระบรรทุกที่มากกว่าจะให้อายุการใช้งานต่ำกว่า ภาระบรรทุกที่น้อยกว่าเช่นกัน

ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์ของโครงสร้างรถสามล้อสกายแลปมีประเด็นในการศึกษา เพิ่มเติมในรายละเอียดดังนี้

 เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพใช้งานจริงของโครงสร้าง ควรมีการพิจารณาถึงจุดที่เชื่อมต่อ ของโครงสร้างที่มีการเชื่อมต่อซึ่งในการพิจารณา Model ที่ใช้ในระเบียบวิธีทางไฟในต์เอลิเมนต์นั้น อาจใช้ Model ที่มีความละเอียดยิ่งขึ้นในการวิเคราะห์ที่จุดเชื่อมต่อดังกล่าว เพื่อการออกแบบ โครงสร้างที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

 ในส่วนของความขรุขระของผิวถนน เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดการสั่นใหวของโครงสร้าง โดยแรงกระทำอาจจะมีการพิจารณาความสัมพันธ์ของการสั่นใหวที่ไม่เท่ากัน (Hopping, Pitching) กระทำกับเพลาหลังระหว่างล้อซ้ายและล้อขวา ความขรุขระของผิวถนนควรมีการศึกษาสภาพถนนภายในประเทศเพื่อให้สอดคล้องกับ การสภาพใช้งานภายในประเทศโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสังเคราะห์ผิวถนน ตามตามสภาพถนนในประเทศ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชนะพงศ์ ทองแสน, นาย. 2545. การขยายตัวของรอยแตกร้าวเนื่องจากความถ้าในขึ้นส่วนหมุดย้ำ ของโครงสร้างสะพานเหล็กภายใต้แรงกระทำจากขบวนรถไฟในต์เชิงกระบวนการสุ่ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ฐาปนา สุทธาทิพย์, นาย. 2544. <mark>การศึกษาการสั่นใหวในลักษณะกระบวนการสุ่มของโครงสร้าง</mark> สะพานประเภทแผ่นพื้นวางบนคาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

วัชรพงษ์ ประสารเกลียว, นาย. 2547. การประเมินค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไฟในต์เอลิเมนต์ และการตอบสนองเชิงพลวัตของโครงสร้างสะพานแบบ box girder ภายใต้แรงกระทำจาก รถบรรทุก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สุนิติ เกิดหนุนวงศ์, นาย. 2548. <mark>การวิเคราะห์การแตกหักของแหนบสปริงโดยใช้วิธีไฟในต์เอเล</mark> เมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ปราโมทย์ เตชะอำไพ, นาย. 2542. **ไฟในต์เอลิเมนต์.** ครั้งที่ -. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Palmgren, A. 1924. Durability of Ball Bearings. ZDVDI. 1924 (14): 339

August, Wöhler. 1867. Wöhler's Experiments on the Strength of metals. Engineering 186(2):160

- Noll, C.G. and C Lipson. 1946. Allowable Working Stresses. Proc.Soci.Exp.Stress Analysis 1946 (2):49
- Dodds, C.J. and J.D. Robson. 1973. The description of road surface roughness. Journal of Sound and Vibration. 31(1973):175

Mischke, C.R. 1979. A Probabilistic Model of Size Effect in The Fatigue Strength of Rounds in Bending and Torsion. ASME. 79-DE-16

- Mischke, C.R. 1979. " **Prediction of Stochastic Endurance Stregth**". trans ASME, j. vibration, Acoustic, Stress ,and Reliability in Design.vol 109 pp 113-122 junury 1987
- Clough, R. W. and Bathe, K. J. 1977. Finite Element Analysis of Dynamic Response Advance in Computational Methods In Structural Mechanics and Design, University of Alabama, Alabama

Moore, H.F. and J.B. Kommer. 1927. The Fatigue of Metals. McGraw-hill Book Co., New York

- Hao Wang. 2006. Road Profiler Performance Evaluation and Accuracy Criteria Analysis, Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University
- Honda, H, Y Kajikawa and T Kabori. 1982. Spectra of Road Suface RouGHness on Bridges. Journal of the Stuctural Devision 108. 1982

Hughes, T. 2000. The Finite Element Method, Dover Pubications, Inc., Mineola, New York,

Morsch, I.B, M.L. Boessio and A.M. Awruch. 2005. Fatiguelifetime estimation of commercial vehicles. Journal of Sound and Vibration. 2005 (291):169–191

Shigley, J.E. 1986. Mechanical Engineering Design. McGraw-Hill, NewYork

- Shigley, J.E. and R Mischke Chares. 1989. **Mechanical Engineering Design**. **fifth edition**. McGraw-Hill, NewYork
- Ruberti, Jeff, S.G Anthony Clany and Adam Skelskie. 2006.Capstone Hybrid Motorcycle Phase IV. Design Proposal Report, Northeastern University Boston.

Goodman, John. 1890. Mechanics Applied to Engineering. n.p

Marin, Joseph. 1962. Mechanical Behavior of Materail. Prentice-Hall, Englewood Cliffs

- Miner, M.A. 1945. Cumulative Damage in Fatigue. **Tranns ASME, J.AppL, Mech** 1945 (67):A159
- Matsuishi, M and T.Endo. 1968. Fatigue of Metal Subjected to varying Stress. **The Japan Society of Mechanical Engineers**. Japan

Meirovitch, L. 1967. Analytical Method in Vibrations. Macmillan, New York

- Michael Sayers, W. 1996. Interetatation Of Road Roughness Profile Data, Transportation Researe Institute, University of Michigan
- Newmark, N.M. 1959. A Method of Computation for Stuctural Dynamics. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1959(85):67-94
- Pandey, A.K., P. Dechaumphai and A.R. Wieting. 1990. Thermal-Structural Finite Element Analysis Using Using Linear Flux Formulation. NASA TM 102746

AndreÂn, Peter. 2006. Power spectral density approximations of longitudinal road profiles. Swedish National Road and Transport Research Institute. 40(2006)

- Robertv, C., Juvinall and M Kurt Marshek.1991 **Fundamentals of Machine Component Design.** John Wiley & Sons United Steted of America
- Dattoma, V.S., R, Giancane and F.W. Panella Nobile. 2006. Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model. International Journal of Fatigue. 2006 (28):89–95

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แสดงคุณสมบัติของสามล้อสกายแลป

	อียครถและผลการตรวจและทคสอบ	เรถสามล้อสร้างประกอบ	
หมายเลข	เครื่องยนต์		
หมายเส	າບຕັວຄັ້		
	ຽວນ	310	กก.
น้ำหนักรถ	หน้า	110	กก .
	หลัง	200	กก .
จำนวนที่นั่ง	1		คน
	ระยะช่วงล้อ	1850	ນນ.
	ระยะยื่นหน้า	0	ນນ.
r	ระยะยื่นท้าย	550	ນນ.
โค ส่วะ	ความยาวสุด	2900	ນນ.
นาดถึ	ความกว้างสุด	1380	ນນ.
l	ระยะต่ำสุดจากพื้น	160	ນນ.
	ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางยางหลัง	1080	ນນ.
	มุมเงยหลัง		องศา
ขนาดถ้อ	หน้า	110/90-16" 6.9PR	
และยาง	หลัง	4.50-12" NYLON 8PR RIM8	
<u>9</u> 9	ความเร็วสูงสุด	72.44	กม./ชม.
າງຈູດາ	มุมไต่ทางลาด		องศา
ផ្ស	Stability	26.34	องศา
	วัสดุที่ใช้ทำโครงรถ	โลหะเหล็ก	
วัสคุ	วัสดุที่ใช้ทำตัวถัง	โลหะเหล็ก	
	กระจกกันลมหน้ำ	พลาสติก	

ตารางผนวกที่ ก 1 แสดงคุณสมบัติของสามล้อสกายแลป

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

	ແກກ			โอเวอร์เฮดแคมชาฟท์ ECONO power	
	จำนวนสูบ จ	ข้งหวะ		1 สูบ 4 จังหวะ	
	ความกว้างก	ระบอกสูบ	ระยะชัก	61x49.5 มม.	
	ความจุกระเ	เอกสูบรวม		150 ถบ.ซม.	
تھر ا	อัตราส่วนกำ	าถังอัค		9.2:1	
้องยา	กำลังเครื่อง	สูงสุด		10.5 kw ที่ 9,000 รอบ/นาที	
len S	แรงบิดสูงสุ	ค		12.06 N-m ที่ 7,000 รอบ/นาที	
	ชนิดของเชื้อ	อเพลิง		เบนซินไร้สารตะกั่ว ออกเทน 91 ขึ้นไป	
	ระบายความ	เร้อนด้วย		ด้วยอากาศแบบปึกผีเสื้อ	
	การผสมน้ำม	มันกับอากาศ	ŕ	MAGNETO CDI	
	ระบบสตาร์	ท		CDI 2 ระบบ / สตาร์ทมือ - สตาร์ทเท้า	
		ชนิด		5 speeds, 1 down 4 up	
26			เกียร์ 1	2.769 (36/13)	
ไงกำเ	สี่สั		เกียร์ 2	1.882 (32/17)	
າມ	1101	อัตราทค	เกียร์ 3	1.40 (28/20)	
يد 99			เกียร์ 4	1.130 (26/23)	
			เกียร์ 5	0.960 (24/25)	
ำนัก	וט ו	ง ล้องหน้า	ແນນ	โช้กคู่	
ู่นน้ำห	นคล ์ เทื่อ เ	แขทผา	จำนวน	1	ชุด
຺ຎຌ຺	าห่อ เมสะ		แบบ	ระบบแหนบ พร้อมโช้คคู่	
រះប្រារ	เครื่อ ควา	ด้อหลัง	ຈຳนวน	1	ชุด

ภาพผนวกที่ ก 1 แสดงลักษณะหน้าตัดในโครงสร้างและคุณสมบัติ JIS G3444 STK490

ตารางผนวกที่ ก 2 แสดงส่วนผสมทางเกมีของกุณสมบัติเหล็ก JIS G3444 STK490

С	Mn	Р	S	Si
0.18%Max	1.50%Max	0.040%Max	0.040%Max	0.55%Max

ตารางผนวกที่ ก3 แสดงคุณสมบัติทางกลของเหล็ก JIS G3444 STK490

Tensile Strength	Yield Point	Elongation
Min 490MPa	Min 315MPa	Min 23%

ภาพผนวกที่ ก2 กราฟคุณสมบัติจำนวนรอบความเสียหายกับระดับความเค้นของเหล็ก

ภาคผนวก ข

ตารางผนวกที่ ข1 Mean Monotonic and Cyclic Stress-Strain Properties of Selected Steels

							This	-		a state a state of the state of t		Fatione	Fatigue	Fatione
				Tensile Str	han	Reduction	Strain at	Modul	us of	Patigue Str	ength	Strength	Ducklifty	Ductility
	Ortentation	Description	Hardness	Su	,	in Area	Fracture	Elastic	tiy B	Coefficient	d'	Exponent	Coefficient	Exponent
Orade (a)	(e)	Ø	EH.	MPa	ks!	%	e,	GP.	10 ⁴ psi	MPa	ksi	.	- ⁸⁴ 80	Q
A538A (b)	L	STA	405	1515	220	67	1.10	185	27	1655	240	-0.065	0.30	-0.62
A538B (b)	1	STA	460	1860	270	86	0.82	185	27	2135	310	110.0-	0.80	-0.71
A538C (b)	در	STA	480	2000	290	35	0.81	180	26	2240	325	-0.07	09'0	-0.75
AM-350 (c)	ب	HRA		1315	161	22	0.74	195	8	2800	404	-0.14	0.33	-0.84
AM-350 (c)	ы г	8	496	1905	276	20	0.23	180	26	2690	390	-0.102	01.0	-0,42
Gainex (c)	LT	HR sheet		530	11	58	0.86	200	292	805	117	-0.07	0.86	-0.65
Gainex (c)	ŗ	HR shoet		510	74	z	1.02	200	29.2	805	111	-0.071	0.86	-0.63
. 11-H	r	Ausformed	600	2585	375	33	0.40	205	30	3170	460	-0.077	0.08	-0.74
RQC-100 (s	1) LT	HR plate	290	040	136	Ş	0.56	205	30	1240	180	-0.07	0.66	-0.69
RQC-100 (s) L	HIR plate	290	056	135	67	1.02	205	30	1240	180	-0.07	0.66	-0.69
10862	Ţ	Q&T	430	1640	238	38	0.89	195	28	1780	258	-0.067	0.32	950-
1005-1009	LT .	HR sheet	06	360	25	R	13	205	30	580	84	-0,09	0.15	-0.43
1005-1009	LT	CD sheet	125	470	89	66	60'1	205	96	315	75	-0.059	0.30	15.0-
1005-1009	ŗ	CD sheet	125	415	60	64	1.02	200	30	540	82	-0.073	0.11	-0.41
1005-1009	T	HR sheet	06	345	20	80	1.6	200	29	640	56	-0.109	010	-0.39
1015	ŗ	Normalized	68	415	60	68	1.14	202	30	825	120	11.0-	0.95	-0.64
1020	ч	HR plate	108	440	64	62	0.96	205	29.5	895	061	-0.12	0.41	-0.51
1040	Ч	As forged	225	620	8	60	0.93	200	29	1540	223	-0.14	19'0	-0.57
1045	1	Q&T	225	725	105 .	65	1.04	200	29	1225	178	-0,09	1.00	-0.66

81

							True					Fatique	Fatigue	Fatique
				Tensile Su	utgner	Reduction	Strain at	Modul	us of	Fatique	Strength	Strength	Ductility	Ductility
	Orientation	Description	Hardness	S.	**	fin Area	Fracture	Elastic	a va	Coefficie	a d	Exponent	Coefficient	Exponent
Grade (a)	9	9	HB	MPa	ksl	*	s,	6	10 ⁴ psi	MPa	ksi	Ą	2	9
1045	L	Q&T	410	1450	310	51	0.72	200	29	1860	270	-0.073	0.60	-0.70
1045	ц	Q&T	390	1345	195	66	0.89	205	30	1585	230	-0.074	0.45	-0.68
1045	, J	Q&T	450	1585	230	55	0.81	205	30	\$61.1	260	-0.07	0.35	-0.69
1045	7	Q&T	200	1825	265	21	0.71	205	30	2275	330	-0.08	0.25	-0.68
1045	-1	Q&T	595	2240	325	41	0.52	205	30	2275	395	-0.081	0.07	-0.60
1144	L	CDSR	265	000	135	33	0.51	195	28.5	1000	145	-0.05	0.32	-0.38
1144	ŗ	DAT	305	1035	150	25	0.29	200	28.8	1585.	230	-0.09	0.27	-0.53
1541 F	-1	Q&T forging	290	026	138	64	0.68	205	29.9	1275	185	-0.076	0.68	-0.65
1541 F	. ,	Q&T forging	260	068	129	60	0.93	205	29.9	1275	185	1.00	0.93	-0.63
4130	در	Q&T	258	895	130	67	1.12	220	32	1275	185	-0.083	0.92	-0.63
4130	r	Q&T	365	1425	201	55	0.79	200	29	1695	246	-0.081	0.89	-0.69
4140		Q&T,DAT	310	1075	156	60	0.69	200	29.2	1825	265	-0.08	1.2	-0.59
4142	r	DAT	310	1060	154	29	0.35	200	29	1450	210	-0.10	0.22	-0.51
4142	ŗ	DAT	335	1250	181	38	0,34	300	28.9	1250	181	-0.08	0.06	-0.62
4142	r	Q&T	380	1415	205	88	0.66	205	8	1825	265	-0.08	0.45	-0.75
4142	<u>ب</u>	Q&T and deform	ad 400	1550	225	47	0.63	200	8	1895	515	-0.09	0.50	-0.75
4142	فہ	O&T	450	1760	255	Ģ	0.54	205	R	2000	290	-0.08	0,40	-0,73
6414	-	O&T and deform	wed 475	2035	205	20	0.22	200	29	2070	300	-0.082	020	-0.77

(ต่อ)
11
ตารางผนวกที่

Tensile Sitengeth Reduction Strain at the tensile Sitengeth Strain at the tensile Sitengeth Strain at the tensile Sitengeth Strain at tensile 4142 L Quality Mate tensile Strain at tensile Strain at tensile	krain at Mod racture Elas	tulus of	Fatione Strenot	Strength	Durbility	Preschiller.
Orientiation Description Hardness S_{wf} in Area Fracture Grade (a) (a) (b) (b) HB MPa isi N_{c} f_{c} 4142 L Q&T and deformed 450 1930 280 37 0.43 4142 L Q&T 475 1930 280 37 0.43 4142 L Q&T 475 1930 280 37 0.43 4142 L Q&T 475 1930 280 37 0.43 4340 L Q&T 473 1930 280 37 0.43 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.43 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.43 4340 L Q <e< td=""> 242 280 242 0.84 5160 L Q<e< td=""> 242 242 0.87</e<></e<>	racture Elas		without any section a		Commenses and	Antonalist
Grade (a) (b) (f) HB MPa isi % \mathcal{E}_f 4142 L Q&T and deformed 450 1930 280 37 0.46 4142 L Q&T and deformed 450 1930 280 37 0.46 4142 L Q&T 473 1930 280 37 0.46 4142 L Q&T 473 1930 280 37 0.46 4142 L Q&T 409 1470 213 35 0.46 4340 L Q&T 409 1470 213 36 0.46 5160 L Q <t< td=""> 43 2015 221 42 0.87</t<> <th></th> <th>ticity E</th> <th>coefficient σ_f</th> <th>Exponent</th> <th>Coefficient</th> <th>Exponent</th>		ticity E	coefficient σ_f	Exponent	Coefficient	Exponent
4142 L Q&T and deformed 450 1930 280 37 6.46 4142 L Q&T 473 1930 280 35 0.43 4142 L Q&T 475 1930 280 35 0.43 4142 L Q&T 475 1930 280 35 0.43 4340 L Q&T 560 2240 325 120 43 0.57 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.48 4340 L Q&T 430 1670 242 42 0.87 5160 L Q&T 518 2015 292 11 0.12 5160 L Q <t< td=""> 430 1670 242 42 0.87 52100 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L A 260 925 140 1670 242 42 0.87 9262 L A 260 925</t<>	EJ OPa	1 10 ⁴ psi	MPa	a a	e, b	a
4142 L Q&T 475 1930 280 35 0.43 4142 L Q&T 560 2240 325 27 0.31 4340 L HR,A 243 825 120 43 0.57 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.48 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.48 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.48 5160 L Q&T 430 1670 242 42 0.87 5160 L Q&T 430 1670 242 42 0.87 52100 L Q <t< td=""> 518 2015 292 11 0.12 9262 L A 260 925 1470 545 33 0.41 9262 L A 260 925 194 14 0.15 9262 L A 260 925 227 32</t<>	0.46 200	29	2105 30,	5 -0.09	0970	-0.76
4142 L Q&T 560 2240 325 27 0.31 4340 L HR,A 245 825 120 43 0.57 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.48 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.48 4340 L Q&T 350 1240 180 57 0.84 5160 L Q&T 518 2015 292 11 0.12 52100 L Q&T 518 2015 292 11 0.12 9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L Q 260 140 565 227 33 0.41 9262 L Q 140 565 227 32 0.41 9262 L A 565 227 33 0.41 9262 L A 565 227 32 0.38	0,43 205	30	2170 31	180'0- 6	60'0	-0.61
4340 L HR,A 243 825 120 43 0.57 4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.48 4340 L Q&T 350 1240 180 57 0.84 5160 L Q&T 430 1670 242 42 0.84 5160 L Q&T 430 1670 242 42 0.84 52100 L Q&T 430 1670 242 42 0.87 52100 L Q&T 430 1670 242 42 0.87 9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L Q 260 925 134 14 0.16 9262 L Q 260 925 134 14 0.16 9262 L Q 410 565 227 32 0.41 9262 L HR bar 159 565 227 32 0.41 9262 L HR bar 159 565 227 32 0.38 950C(d) L HR bar 150 <td< td=""><td>0.31 205</td><td>80</td><td>2655 381</td><td>-0.089</td><td>0.07</td><td>-0.76</td></td<>	0.31 205	80	2655 381	-0.089	0.07	-0.76
4340 L Q&T 409 1470 213 38 0.48 4340 L Q&T 350 1240 180 57 0.84 5160 L Q&T 430 1670 242 42 0.87 52100 L Q&T 518 2015 292 11 0.12 9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L Q 280 925 134 14 0.16 9262 L Q 260 925 134 14 0.16 9262 L Q 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q 965 227 32 0.38 9262 L HR 159 565 227 32 0.38 9262 L HR 159 565 227 32 0.38 920C(d) L HR 150 565 1.19	0.57 195	28	1200 174	500'0- 1	0.45	-0.54
4340 L Q&T 350 1240 180 57 0.84 5160 L Q&T 430 1670 242 42 0.87 52100 L Q&T 518 2015 292 11 0.12 9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L Q&T 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q&T 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q&T 410 565 227 32 0.38 9262 L HR plate 159 565 82 64 1.03 9262<(d)	0.48 200	29	2000 29(160'0- (0.48	-0.60
5160 L Q&T 430 1670 242 42 0.87 52100 L SH,Q&T 518 2015 292 11 0.12 9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L Q&T 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q&T 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q&T 410 565 227 32 0.38 9262 L Q&T 410 565 227 32 0.38 950C(d) LT HR plate 150 565 82 64 1.03 950C(d) L HR ber 150 565 82 69 1.19	0.84 195	28	1655 24	0.076	0.73	-0.62
52100 L SH,Q&T 518 2015 292 11 0.12 9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L Q&T 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q&T 410 565 227 32 0.38 950C(d) LT HR plane 159 565 82 64 1.03 950C(d) L HR bar 150 565 82 69 1.19	661 195	28	1930 281	0.071	0.40	-0.57
9262 L A 260 925 134 14 0.16 9262 L Q&T 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q&T 410 565 227 32 0.38 950C (d) LT HR plate 159 565 82 64 1.03 950C (d) L HR bet 150 565 82 69 1.19	0,12 205	R	2585 37	60'0-	0.18	-0.56
9262 L Q&T 280 1000 145 33 0.41 9262 L Q&T 410 565 227 32 0.38 950C(d) LT HR plate 159 565 82 64 1.03 950C(d) L HR ber 150 565 82 69 1.19	0.16 205	30	1040	1/0'0-	0.16	-0.47
9262 L Q&T 410 565 227 32 0.38 950C (d) LT HR plate 159 565 82 64 1.03 950C (d) L HR ber 150 565 82 69 1.19	0,41 195	28	1220 177	-0.073	0.41	-0.60
950C (d) LT HR plate 159 565 82 64 1.03 950C (d) L HR ber 150 565 82 69 1.19 250C (d) L HR ber 150 565 82 69 1.19	138 200	29	1855 269	-0.057	0.38	-0.65
950C (d) 1. HR ber 150 565 82 69 1.19 Astro A 24 64 1.05	1.03 205	29.6	N1 0/11	0.12	0.95	-0.61
ASAV 2.1 Y Districtional 120 440 2.4 2.4 102	1.19 205	30	970 141	-0.11	0.85	-0.59
ANTE CO LO LOLA ACT INSTITUTE TO AN ANTE ANTER ANTE	1.06 205	30	625 91	-0.075	0.35	-0.54
950X (d) L HR plate 156 530 77 72 1.24	1.24 205	29.5	1005 14	-0.10	0.85	-0.61
950X (d) L Plate channel 223 6950 101 68 1.15	1.15 195	28,2	1055 15:	-0.08	0.21	-0-53

cold drawn strain relieved; DAT, drawn at temperature; A, annealed.

' Cast Iron
of Gray
roperties
ypical P ₁
Metals T
n-Steel N
hree No.
ties of T
l Properi
Mechanical
เทื่ ข2
ตารางพนวย

	Tensile	Compressive	Shear Modulus					Fatigue Stress	
MILSA	Strength S_{ut} ,	Strength S_{w} ,	of Rupture	Modulus of Elasticity,	Mpsi	Endurance Limit*	Brinell Hardness	Concentration	
Number	kpsi	kpsi	S_{su} , kpsi	Tension †	Torsion	S_e , kpsi	H_B	Factor K_f	
20	22	83	26	9.6 - 14	3.9 - 5.6	10	156	1.00	
25	26	- 61	32	11.5 - 14.8	4,6-6,0	11.5	174	1.05	
30	31	109	4	13 - 16.4	5.2 - 6.6	14	201	1.10	
35	36.5	124	48.5	14.5 - 17.2	5.8-6.9	16	212	1.15	
4	42.5	140	21	16.0-20	6,4-7,8	18.5	235	1.25	
20	52.5	164	54	18.8-22.8	7.2 - 8.0	21.5	262	1.35	
60	62.5	187.5	88.5	20.4 - 23.5	7.8-8.5	24.5	302	1.50	
 Polished or 	machined specimens.								

+ The modulus of elasticity of cast iron in compression corresponds closely to the upper value in the range given for tension and is a more constant value than that for tension.

ตารางผนวกที่ ข3 Finite Life Fatigue Strengths of Selected Plain Carbon Streets

	والمستقبل والمستقبل والمستعمل والمستعمل والمستعمل والمستعمل والمستعمل والمستعمل والمستعمل والمستعمل والمستعمل		Tensile Yiald												
			Strength	Strength						Stress	Cycles to J	Fallure			
Material	Condition	BHN*	kpsi	kpai	RA*	104	4(10')	105	4(10°)	106	4(10')	107	10'		
1020	Furtisce cooled		58	30	0.63				37	\$	30	28	33		
1030	Air-sooled	135	80	45	0.62		51	,	47	42	38	38	38		
1035	Normal	132	77	35	0.54				44	6	37	46	33	33	
	WQT	209	103	87	0.65		80		72	65	60	57	57	21	2
1040	Forged	195	92	23	0.23					8	47	33	33		
1045	HR,N		107	63	0.49	80	70		8	47	47	47	47		
1050	N.AC	164	92	47	0.40	8	48		46	6	38	34	¥		
	WQT														
,	1200	196	57	20	0.58		S		57	52	50	95	50	50	
.56 MN	z	193	96	47	0,42	61	55		51	47	43	41	41	41	
	WQT	277	111	84	0.57	2	18		73	62	57	55	55	55	
	1200														
1060	A3 R.cc.	67 Rb	134	65	0.20	65	09 09		55	50	48	48	48		
1095		162	84	33	0.37	8	43		1	34	31	30	30	8	
	oqr	277	115	65	0.40	LL_	68		64	57	56	38	56	56	
	1200														
10120	,	224	117	59	0.12		8		56	51	8	50	50		
-	OQT	369	180	130	0.15		102		95	16	16	16	16		
	860														

* BIN = Brinell hardness number; RA = frational reduction in area

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายวีรฉัตร พลแสน
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2519
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาออกแบบแม่พิมพ์
	หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ำพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ไทยซัมมิทโมลด์แมนูแฟคเจอริ่ง จำกัด
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการพัฒนาบุคลากรสนับสนุนการศึกษาระคับ ป.โท

86