



การประเมินอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340

Fatigue Life Assessment of Weld Surfacing of AISI 4340

ศิวะ สิทธิพงศ์

Siva Sitthipong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Material Engineering

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์

การประเมินอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340

ผู้เขียน

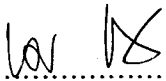
นายศิวะ สิทธิพงษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ



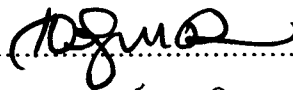


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

.....ประธานกรรมการ

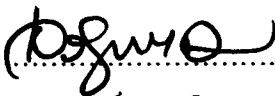
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชัย ปลุกผล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

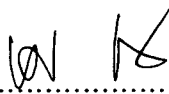


.....กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เคชวาบुकูล)



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เคชวาบुकูล)



.....กรรมการ

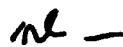
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)



.....กรรมการ

.....
(ดร.กนิษฐ์ ตะปะสา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ



.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340
ผู้เขียน	นายศิวัช สิริพิงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การชำรุดของเพลาสวิง ซึ่งผลิตมาจากเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูงเกรด AISI 4340 ซึ่งใช้ในระบบส่งกำลังแบบหมุนเหวี่ยงของรถชุดไฟฟ้า ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้คือสามารถเลือกกรรมวิธีการเชื่อมซ่อมที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้ในการเชื่อมซ่อมเพลาสวิงได้ หลังจากเพลาสวิงชำรุดมีการตรวจพินิจผิวรอยแตกของเพลาสวิงพบว่ารอยแตกเริ่มต้นจากบริเวณฟิลเลต เมื่อทำการศึกษาหาสาเหตุเพื่อแก้ปัญหา ผลจากการวิเคราะห์ค่าความเค้นสามารถพิสูจน์และนำไปสู่ทางออกของปัญหาได้ โดยศึกษาในเงื่อนไขเพลาสวิงรับภาระเต็มกำลังขณะทำงาน พบว่าบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงที่สุดเป็นบริเวณเดียวกันกับบริเวณที่เพลาดัดขาด ความเค้นสูงสุดขณะที่เพลากเกิดการเปลี่ยนแปลงภาระกะทันหันถูกเชื่อว่าเป็นสาเหตุเบื้องต้นของการแตก และการลุกลามของรอยแตก จากการวิเคราะห์การชำรุดยืนยันว่าสาเหตุมาจากการทำงานที่ภาระไม่ปกติ ท้ายที่สุดจะทำการแนะนำกรรมวิธีการเชื่อมซ่อมที่เหมาะสมที่สุดในการซ่อมเพลาสวิง

Thesis Title	Fatigue Life Assessment of Weld Surfacing of AISI 4340
Author	Mr. Siva Sitthipong
Major Program	Material Engineering
Academic Year	2009

ABSTRACT

This research is to analyze the failure of swing shaft made of high strength steel AISI 4340 and use in the swing power transmission system of Electric Shovels. The advantage of this analysis is to select the best welding process to repair the shaft. After having fractured surface, visual examination of the fractured surface indicates cracks initiated from the fillet shoulder. To find out the cause of fracture of the shaft, the analytical solution was carried out to investigate the stress of the shaft under full loading during working. Result of stress analysis reveal that the maximum stress area was at the fractured regions of the damaged shaft. The maximum stresses predict under shock loading was believed to be the cause for fatigue crack initiation and propagation of this failure. The failure analysis confirmed that the fatigue fracture of the shaft was caused by abnormal operation. Finally, some advices to select the best welding process are discussed of this swing shaft.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	5
1.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเหล็กกล้าแรงดึงสูง AISI 4340	5
1.2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกรรมวิธีการเชื่อมเชื่อม (SMAW, MAG, FCAW)	6
1.2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการชำรุดจากการล้า	8
1.3 การตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
1.3.1 การเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน	19
1.3.2 ภาวะโหลดความแข็งแรงล้าและลักษณะการวิบัติของเพลานี้ เนื่องจากความล้า	20
1.3.3 การประเมินอายุความล้า	30
1.3.4 การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์เกี่ยวกับความล้า	32
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	40
1.5 ขอบเขตการวิจัย	41
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากผลการวิจัย	41
2 วิธีการดำเนินการวิจัย	42
2.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย	43
2.2 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	44

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2.1 โปรแกรมทางวิศวกรรม	44
2.2.2 แคลมป์มิเตอร์	44
2.2.3 Digital Tachometer	45
2.2.4 อุปกรณ์เครื่องมือวัดละเอียด	45
2.2.5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงล้าแบบคานหมุน	46
2.2.6 ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้า	46
2.3 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย	47
2.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป	62
2.5 เป้าหมายในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย	62
2.5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด	62
2.5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาภาระที่เพลลาต้องแบกรับขณะใช้งาน	62
2.5.3 ขั้นตอนการศึกษาความแข็งแรงล้าของชิ้นทดสอบ (Specimen)	63
2.5.4 ขั้นตอนการประเมินอายุความล้าของเพลลาswing (Swing Shaft)	63
2.5.5 การนำไปใช้จริง	63
3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	64
3.1 ผลการตรวจสอบผิวรอยแตก	64
3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงล้า	66
3.3 ผลการคำนวณค่าความเค้น	69
3.4 ผลการประเมินอายุความล้า	73
3.4.1 ขอบเขตการวิบัติ	73
3.4.2 แผนภาพอายุความล้า	75
3.4.3 การเปรียบเทียบประเมินอายุ	78
3.5 การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการวิจัยภาพรวม	79

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	81
4.1 สรุปผลการวิจัย	81
4.2 ข้อเสนอแนะ	82
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก รายละเอียดของเนื้อวัสดุที่ใช้ทำเพลาสวิงและผิวเชื่อมพอกเพลาสวิง	89
ภาคผนวก ข การหาปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalence)	93
ภาคผนวก ค รายการอะไหล่เหล็ก AISI 4340 ของเครื่องจักร รถขุดไฟฟ้า P&H 2100BL	95
ภาคผนวก ง ประวัติการซ่อมอะไหล่ที่ทำจาก AISI 4340 และการชำรุดหลังการซ่อม	97
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของชิ้นส่วนที่ซ่อมโดยผลการวิจัย	99
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด	101
ภาคผนวก ช ขั้นตอนการหาแฟกเตอร์ปรับปรุงค่าความล้า	108
ภาคผนวก ซ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของเพลาสวิง	111
ภาคผนวก ฌ ขั้นตอนการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมวิเคราะห์ค่าความเค้น ที่เกิดขึ้นกับเพลาสวิง	115
ภาคผนวก ญ ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Shaft Component Generation วิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลาสวิง	163
ภาคผนวก ฎ การใช้โปรแกรม Shaft Component Generation วิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลาสวิงตัวใหม่	170
ภาคผนวก ฏ Technical Drawing ของเพลาสวิงและระบบสวิง	170
ภาคผนวก ฐ ข้อมูลเบื้องต้นของรถขุดไฟฟ้าและระบบส่งกำลังแบบหมุนเหวี่ยง	181
ประวัติผู้เขียน	188

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340	5
2.1 แสดงข้อมูลจำนวนฟันของชุดเฟืองขับและเฟืองตาม	48
2.2 พารามิเตอร์รูปร่างและขนาดสไปลีน (Spline)	50
2.3 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความแข็งแรงล้า	58
2.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุ	59
2.5 ข้อมูลของค่าความเค้นล้ากับอายุความล้าก่อนทำการกระชับ	60
3.1 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย	66
3.2 ข้อมูลความเร็วรอบและทอร์กในแต่ละช่วงของการส่งถ่ายแรง	70
3.3 ตัวประกอบสมการกำลัง	76
3.4 อายุการใช้งานของเพลาสวิง	78

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 รถขุดไฟฟ้า (Electric Shovel) ยี่ห้อ P&H รุ่น 2100 BL	1
1.2 เพลาสวิง	2
1.3 รอยแตก (crack) จากความล้า (fatigue)	3
1.4 แผนภาพ CCT ของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340	6
1.5 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)	7
1.6 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าใช้แก๊สไวต่อปฏิกิริยาเป็นแก๊สคลุม (MAG)	8
1.7 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ (FCAW)	8
1.8 ลักษณะของภาวะวิบัติ	10
1.9 ลักษณะบริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูง	11
1.10 บริเวณเริ่มต้นของรอยแตก	11
1.11 ผลของโครงสร้างจุลภาคต่อขีดจำกัดความทนทาน	12
1.12 ตัวอย่าง S-N Curves ของโลหะในกลุ่มเหล็ก	13
1.13 ขอบเขตการวิบัติเนื่องจากความล้า	14
1.14 ผิวหน้าการชำรุดจากภาวะแบบต่างๆ	15
1.15 ลักษณะของเพลาส่งกำลังที่ทำการวิเคราะห์การแตกหัก	20
1.16 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงล้าของภาวะแบบหมุนกับภาวะแบบหมุนกระแทก	21
1.17 ภาวะแบบหมุนกับภาวะเกินแบบหมุนตัด	22
1.18 ภาวะความเค้นความเครียดที่บริเวณรอยบาก	22
1.19 เพลากับภาวะบิดทำให้เกิดการเสียรูป	23
1.20 ลักษณะของเพลาก่อนและหลังขาด	23
1.21 ลักษณะการชำรุดของเพลาลูก	24
1.22 ผิวรอยแตกของเพลาลูก	24

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
1.23 บริเวณร่องคีย์ (keyway)	24
1.24 รอยแตก (crack) บริเวณร่องคีย์ (keyway)	24
1.25 ตำแหน่งที่เพลลาขาดและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากแรงบิดสูง	25
1.26 รูปร่างของเพลลาและตำแหน่งที่เพลลาขาด	25
1.27 ผิวยรอยแตกที่หน้าตัดที่ 1	26
1.28 ผิวยรอยแตกสุดท้ายก่อนเกิดการขาด	26
1.29 ความเสียหายที่เกิดบริเวณผิว sleeve bearing	27
1.30 พันพินเนียนที่ขาดหลุดออกมา	27
1.31 ตำแหน่งรอยเชื่อมซ่อม	28
1.32 บริเวณที่ขาดเนื่องจากความล้า	28
1.33 แบบของเพลลาขับ	29
1.34 ตำแหน่งที่เพลลาขับขาด	29
1.35 ผิวยรอยแตก	29
1.36 free body diagram ในการคำนวณ โหลด	30
1.37 ชั้นทดสอบความล้า	31
1.38 S-N curve ของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงสูง AISI 4340 กรณีทำ shot peening ด้วย chromium plated กับไม่ทำ shot peening	31
1.39 S-N Curves a.) Unnotched specimen b.) Notched specimen	32
1.40 แบบจำลอง Spline Shaft เอลิเมนต์ย่อย 16, 906 เอลิเมนต์ (element) 18,753 จุดต่อ (node)	33
1.41 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น-ความเครียดของชิ้นส่วน โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	34
1.42 แบบจำลองของเพลลาเกียร์	34
1.43 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม	35
1.44 กระบวนการทดสอบวิเคราะห์ความล้า	35

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
1.45 ภาวะวิกฤตที่ส่งผลให้เกิดความล้า	36
1.46 S-N curve ของวัสดุทำเพลลาเกียร์	36
1.47 แบบจำลองการทำงานของชุดเกียร์	37
1.48 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างเกียร์ตัวที่ 1 กับเกียร์ตัวที่ 2	37
1.49 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างเกียร์ตัวที่ 2 กับเกียร์ตัวที่ 3	38
1.50 เพลาลูกหีบ	39
1.51 แบบจำลองอย่างง่ายของเพลลา	39
1.52 หลักการสมดุลและทฤษฎีของคาน	39
1.53 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของบ่าเพลลาแบบลาดเอียงและบ่าเพลลาแบบโค้ง	39
1.54 ค่าความเค้นของฟันในแต่ละเงื่อนไขมุมหน้าสัมผัส	40
2.1 แผนภาพแสดงหลักการดำเนินงานวิจัย	42
2.2 แคลมป์มิเตอร์	44
2.3 Digital Tachometer รุ่น TC-811B	45
2.4 อุปกรณ์เครื่องมือวัดละเอียด	45
2.5 แสดงเครื่องทดสอบความล้าแบบคานหมุน	46
2.6 ชั้นทดสอบความแข็งแรงล้า	46
2.7 ลักษณะการชำรุดของเพลลาสวิง	47
2.8 ระบบการส่งกำลังแบบสวิง	48
2.9 รายละเอียดแบบจำลองเพลลา	51
2.10 เงื่อนไขการจับยึดและภาระแรง	52
2.11 ชิ้นส่วนประกอบต่างๆของเพลลาสวิง	53
2.12 แบบจำลองเพลลาสวิงที่จะส่งไปวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	53
2.13 แบบจำลองเพลลาสวิงที่ตีเมช (mesh) แล้วพร้อมเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์	55

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.14	ภาวะความเค้นหมุนค้ำขณะทำการทดสอบ	56
2.15	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	56
2.16	แบบจำลองของเพลาสวิงตัวที่ออกแบบใหม่	61
3.1	ลักษณะการชำรุดและผิวยรอยแตกของเพล	65
3.2	บริเวณบ่าเพลแบบโค้งซึ่งเป็นบริเวณเริ่มต้นของรอยแตก	65
3.3	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	67
3.4	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก	67
3.5	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์	68
3.6	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340	68
3.7	กราฟเปรียบเทียบความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์และเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340	69
3.8	แผนภาพแสดงแรงกระทำ	70
3.9	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยโปรแกรม Shaft Component Generation	71
3.10	แสดงการกระจายของความเค้นกรณีไม่สวมเฟืองเกียร์	72
3.11	แสดงการกระจายของความเค้นกรณีสวมเฟืองเกียร์	72
3.12	ขอบเขตการวิบัติของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340	73
3.13	ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	74

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม ใส่ฟลักซ์	74
3.15 ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก	75
3.16 แผนภาพอายุความล้าของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340	76
3.17 แผนภาพอายุความล้าของเนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	77
3.18 แผนภาพอายุความล้าของเนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมใส่ฟลักซ์	77
3.19 แผนภาพอายุความล้าของเนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก	78
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยโปรแกรม Shaft Component Generation	83
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

เหมืองแม่เมาะ เป็นเหมืองถ่านหินแบบเปิด (Open cut coal mine) ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ในการขุดถ่านหินจะใช้เครื่องจักรกลขนาดใหญ่คือรถขุดไฟฟ้า(Electric Shovel) ยี่ห้อ P&H รุ่น 2100 BL รูป 1.1 ขนาดของบั้งกี (Bucket) 11 ลูกบาศก์เมตรจำนวน 4 คัน และขนาด 14 ลูกบาศก์เมตร 2 คัน ราคาต่อคันประมาณ 350 ล้านบาท ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ อะไหล่และชิ้นส่วนต่างๆต้องซื้อจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักร ซึ่งมีราคาแพง ในแต่ละปีงบประมาณค่าใช้จ่ายด้านอะไหล่ประมาณปีละ 15-20 ล้านบาท



รูป 1.1 รถขุดไฟฟ้า (Electric Shovel) ยี่ห้อ P&H รุ่น 2100 BL

บ่อยครั้งที่รถชุดไฟฟ้าต้องหยุดการทำงานอย่างกะทันหัน สาเหตุมาจากการชำรุดของ เพลาในระบบส่งกำลัง (Power Transmission System) ของรถชุดไฟฟ้า ทั้งนี้เพลาลำนี้ผลิตมาจาก เหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำทนแรงดึงสูง (High Strength Low Alloy Steels) เกรด AISI4340 ที่มีค่า ความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) สูง มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) สูง อีกทั้งสามารถรับภาระพลวัต (Dynamic Load) ได้ดี เพลาที่ชำรุดบ่อยที่สุดคือเพลาสวิงรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นชิ้นส่วน ของเครื่องจักรกลหลัก ในระบบส่งกำลังแบบหมุนเหวี่ยง (swing power transmission system) ของรถชุดไฟฟ้า ทำหน้าที่ส่งถ่ายกำลังและการเคลื่อนที่จากสวิงมอเตอร์ (swing motor) ไปยังสวิงเกียร์ (swing gear) บังคับทิศของรถชุดไฟฟ้าให้หมุนไปทางซ้ายหรือทางขวาตาม แต่ควบคุม หลังเพลาสวิงผ่านการใช้งาน เมื่อถึงรอบบำรุงรักษา จะมีการตรวจสอบก่อนการใช้งานในครั้งต่อไป พบว่าเพลาสวิงจำนวนมากชำรุดโดยมีการแตกร้าวจากการล้า (Fatigue Crack) ทำให้ต้องยุติการใช้ งานหรือนำเข้าสู่กระบวนการซ่อม

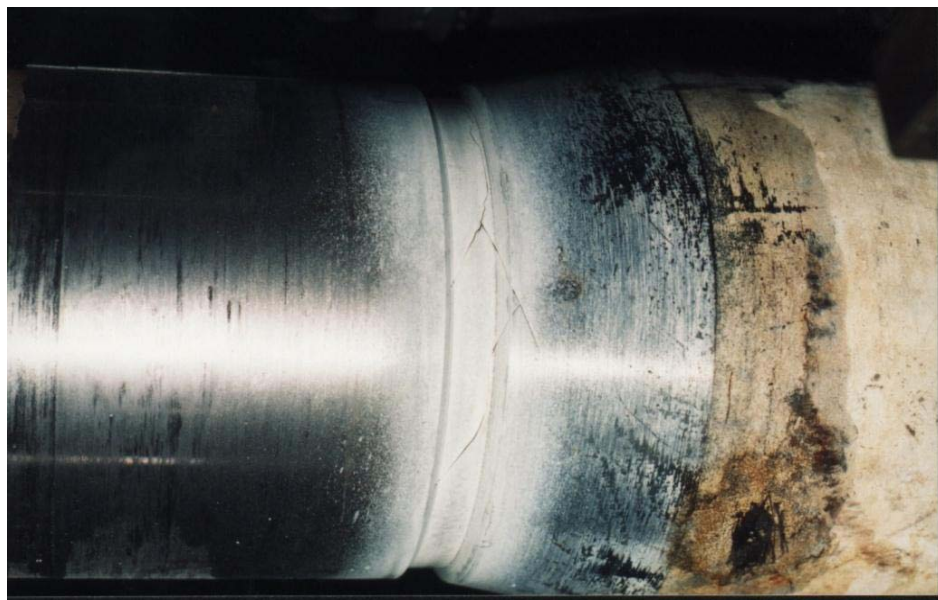


รูปที่ 1.2 เพลาสวิง

กระบวนการเชื่อมซ่อม (Welding Repair Process) โดยกรรมวิธีการเชื่อมพอกผิว ชิ้นส่วน (Welding Resurfacing or Build-Up) เป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกเลือกใช้ในการซ่อมผิวชิ้นส่วนที่ แตกร้าวจากการล้า เนื่องจากประสิทธิภาพของเนื้อเชื่อมจะให้สมบัติใกล้เคียงกับชิ้นส่วนเดิม ต้นทุน ในการซ่อมต่ำเมื่อเทียบกับการสั่งซื้อ ชิ้นงานใหม่ และหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการไฟฟ้า

สามารถซ่อมได้เอง ด้วยกรรมวิธีและขั้นตอนการดำเนินงานตามมาตรฐานของ American Welding Society (AWS) กำหนด

เมื่อนำชิ้นส่วนที่ผ่านการเชื่อมซ่อมกลับไปใช้งานจนถึงระยะเวลาหนึ่ง พบว่ามีกรแตกร้าวหรือชำรุดจากการล้า (Fatigue failure) รูป 1.3 เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน และอายุการใช้งานก็สั้นกว่าชิ้นส่วนที่ไม่ได้ทำการเชื่อมพอกผิว ซึ่งจากสถิติข้อมูลการซ่อมเพลาสวิง พบ การชำรุดหลังการซ่อม ในรอบ 20 ปี จำนวน 53 ครั้ง ส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายในการซื้อทดแทน 16 ล้านบาท ไม่นับรวมค่าเบร้ง (bearing) ประมาณ 4 ล้านบาท ค่าแรงประมาณ 1 ล้านบาท ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ค่าเครื่องจักรช่วยในการเคลื่อนย้ายเช่นเครน พาหนะ และค่าเสียโอกาสในการทำงาน



รูปที่ 1.3 รอยแตก (crack) จากความล้า (fatigue)

จากผลการวิเคราะห์การชำรุดหลังการซ่อมพบว่ารอยร้าวจะเริ่มจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affect zone) และลุกลาม (Propagated) เข้าสู่เนื้อโลหะเดิม ทำให้ชิ้นงานชำรุดจนกระทั่งไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ ซึ่งการชำรุดของชิ้นส่วนแต่ละครั้งทำให้เกิดการสูญเสียในระบบคือ

1. ค่าใช้จ่ายในการซื้ออะไหล่ใหม่
2. ค่าใช้จ่ายในการถอดเปลี่ยนชิ้นส่วน
3. เวลาและโอกาสในการผลิต
4. มีการหยุดอย่างต่อเนื่องของเครื่องจักรชนิดอื่นๆที่ทำงานร่วมกัน
5. ภาพลักษณ์ของหน่วยงานและความเชื่อถือ

การสูญเสียเหล่านี้ส่งผลไปถึงค่าใช้จ่ายในภาพรวมของประเทศ ซึ่งต้องสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการจัดหาอะไหล่ใหม่มาทดแทน

ปัจจุบันหน่วยงานภายในการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่มีหน้าที่รับผิดชอบได้ดำเนินการซ่อมเพลาสวิงโดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมพอกผิวโดยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process) ซึ่งในกรณีที่ภาวะปกติ พบว่าอายุของเพลาสวิงที่ผ่านการเชื่อมได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ในกรณีที่รับภาระไม่ปกติ เช่น ใช้งานเกินภาระกำหนด (Over Capacity) ใช้งานผิดวิธี (Misoperation) หรือ อุบัติเหตุจากการทำงาน พบว่าเพลาสวิงที่ผ่านการซ่อมมีอายุการใช้งานสั้นกว่ามากเมื่อเทียบกับเพลาสวิงที่ไม่ผ่านการซ่อม เนื่องจากการซ่อมโดยวิธีการเชื่อมจะถูกจำกัดด้วยความแข็งแรงของเนื้อเชื่อม และจากกรรมวิธีการเชื่อม (Welding Processes)

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ ซึ่งจะศึกษาประเมินอายุการใช้งานของเพลาสวิงโดยมีตัวแปรคือวัสดุเนื้อเชื่อมพอกผิวจาก กรรมวิธีการเชื่อมซ่อมเพลาสวิง 3 กรรมวิธี ได้แก่ 1. กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW; shield metal arc welding) 2. กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซปกคลุมแบบแมก (MAG; metal active gas) 3. กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าโดยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW; Flux Cored Wire Arc Welding) โดยจะประเมินว่ากรรมวิธีการเชื่อมใดที่ให้ผิวเชื่อมพอกที่มีประสิทธิภาพด้านทานการล้าดีกว่ากัน ในแง่ของอายุการใช้งานเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนเดิม

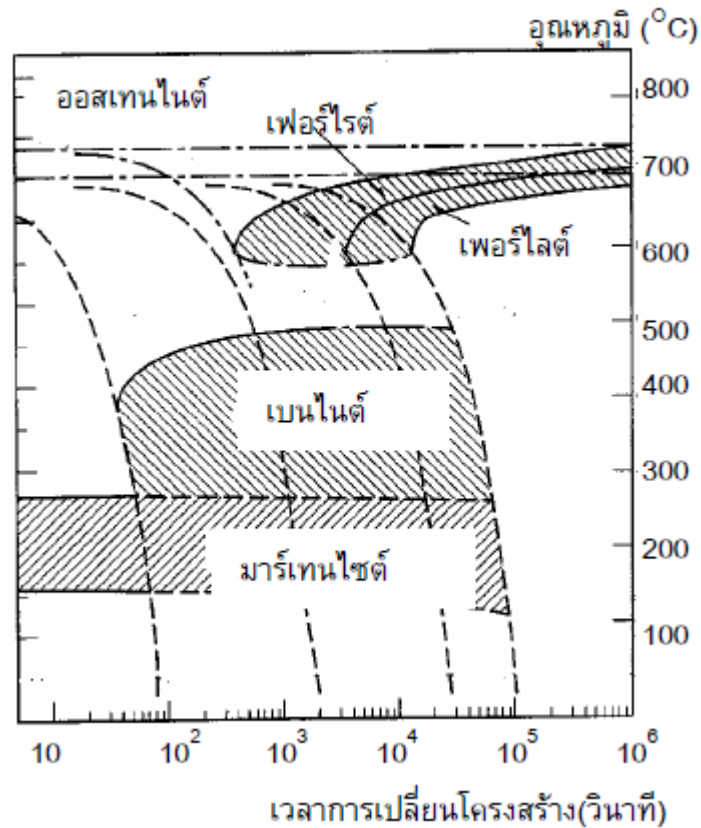
1.2 ทฤษฎีและหลักการ

1.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเหล็กกล้าแรงดึงสูง AISI 4340

AISI 4340 เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง มีธาตุองค์ประกอบหลัก คือนิกเกิล โครเมียมและโมลิบดีนัม ส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 1.1 เหล็กกล้าชนิดนี้มีความทนทานต่อการแตกหักสูง อีกทั้งยังสามารถพัฒนาให้มีความแข็งแรงดึงสูงและความแข็งแรงล้าได้ดีด้วยเงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อน ด้วยสมบัติดังกล่าวมานี้เหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340 จึงถูกเลือกนำมาใช้ในงานชิ้นส่วน โครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนเครื่องบินและรถถัง ชิ้นส่วนระบบส่งกำลัง เช่น ชุดเกียร์และเพลาส่งกำลัง ซึ่งขึ้นรูปโดยวิธีการทุบขึ้นรูป (Forging) ที่อุณหภูมิ 1800-2250°F แต่เหล็กประเภทนี้เป็นเหล็กที่เชื่อมยาก และง่ายต่อการแตกร้าว พฤติกรรมทางกลของบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนขณะเชื่อมจะแตกต่างไปจากเดิมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค สามารถพิจารณาแผนภาพ CCT (รูปที่ 1.4) ประกอบ

ตารางที่ 1.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340 ที่มา: ณรงค์ฤทธิ์ (2546)

Elements	Composition (%wt)
Carbon	0.39
Chromium	0.80
Manganese	0.74
Molybdenum	0.23
Nickel	1.72
phosphorus	0.024
Silicon	0.19
Sulfur	0.019



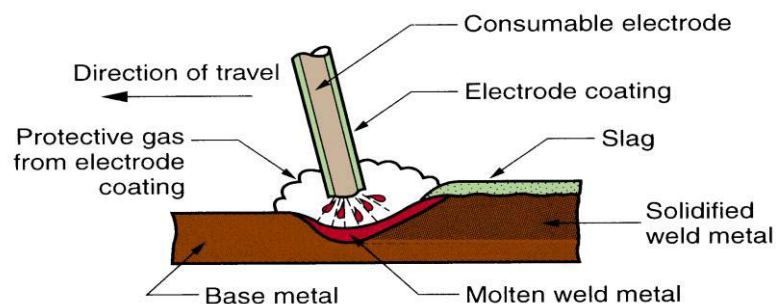
รูปที่ 1.4 แผนภาพ CCT ของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340
ที่มา: Welding handbook (1997)

1.2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกรรมวิธีการเชื่อมซ่อม (SMAW, MAG, FCAW)

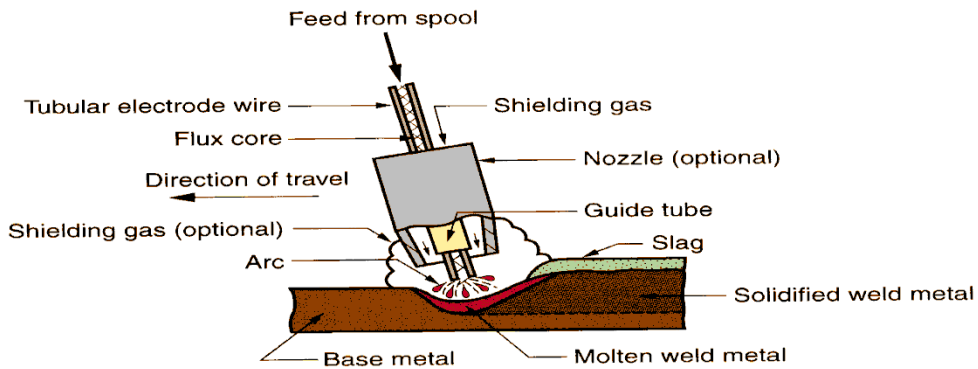
กรรมวิธีการเชื่อมทั้งสาม (SMAW, MAG และ FCAW) และลวดเชื่อมที่เลือกใช้ จะให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ; Heat affected zone) แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลถึงสมบัติความต้านทานต่อการล้า (Fatigue) ด้วย

ปัจจุบันการเชื่อมซ่อมโดยการพอกผิว (Resurfacing) เพื่อยืดอายุการใช้งานของ อะไหล่และชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น เพลลาหรือเกียร์เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ ในกรณีทั่วไปจะใช้ กรรมวิธีการเชื่อมพอกผิวโดยกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding Process) ซึ่งในกรณีที่การะปกติ พบว่าอายุของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ในกรณีที่รับภาระไม่ปกติ เช่น ใช้งานเกินภาระกำหนด (Over Capacity) ใช้งานผิดวิธี (Misoperation) หรืออุบัติเหตุจากการทำงาน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการซ่อมมีอายุการใช้งานสั้นเมื่อ เทียบกับอะไหล่ที่ไม่ผ่านการซ่อมเนื่องจากการซ่อมโดยวิธีการเชื่อม จะถูกจำกัดด้วยความแข็งแรง

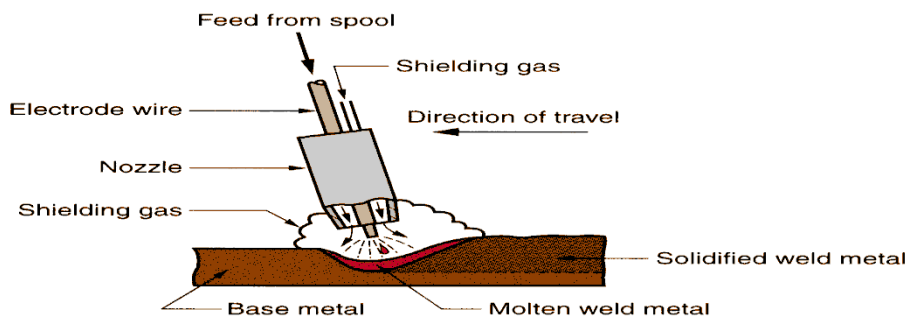
ของเนื้อเชื่อมและจากกรรมวิธีการเชื่อม (Welding Processes) กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) แสดงในรูปที่ 1.5 เป็นกรรมวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่อดีตอันเนื่องมาจากสามารถทำงานได้ง่าย อุปกรณ์ราคาถูกแต่ต้องใช้ความชำนาญและความสามารถเฉพาะตัวของช่างเชื่อมสูง เวลาในการดำเนินการนาน และต้องมีการควบคุมปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen) ที่เกิดจากฟลักซ์อย่างเคร่งครัด เพราะมีผลต่อการแตกร้าวของเนื้อเชื่อมและ HAZ ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่ทำให้เกิดการชำรุดจากความล้า ด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมสมัยใหม่ ในปัจจุบัน กระบวนการเชื่อมโดยใช้ก๊าซปกคลุมแบบแมก (MAG) แสดงในรูปที่ 1.6 และกระบวนการเชื่อมโดยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW) แสดงในรูปที่ 1.7 กำลังเป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน อันเนื่องมาจากสามารถทำงานได้เร็วกว่า ควบคุมปริมาณ Hydrogen ได้ดีกว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และอาศัยความชำนาญของช่างเชื่อมน้อยกว่า การเลือกใช้ก๊าซปกคลุมที่เหมาะสม เช่น Ar หรือ Ar+CO₂ และตัวแปรการเชื่อม อื่นๆ (Welding Parameters) เช่น กระแสที่ใช้ในการเชื่อม แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมที่เหมาะสม (Flow Rate, l/min) ส่งผลถึงคุณภาพทางกลของเนื้อเชื่อมเป็นอย่างมาก ชนิดของการส่งถ่ายน้ำโลหะ (Metal Transfer) แบบต่างๆเช่น แบบลัดวงจร (Short Circuit) หรือแบบพ่น (Spray Arc Transfer) และกระแสเชื่อมแบบพัลส์ (Pulse Arc) ก็ส่งผลถึงการซึมลึก (Penetration) ความสวยงาม (Bead Appearance) และคุณภาพทางกลของเนื้อเชื่อมด้วย นอกจากนี้กรรมวิธีการเชื่อมแบบใช้ก๊าซปกคลุม (แมก) ยังให้อัตราการเติมเนื้อเชื่อม (Deposition Rates) ที่สูงกว่ากรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มากอันเนื่องมาจากมีการสูญเสียของความร้อนระหว่างปลายลวดเชื่อมและชิ้นงานน้อยกว่าแต่การเชื่อมด้วย MAG และ FCAW มีความซับซ้อนกว่าในแง่เครื่องมือและอุปกรณ์



รูปที่ 1.5 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)



รูปที่ 1.6 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าใช้แก๊สไวต่อปฏิกิริยาเป็นแก๊สคลุม (MAG)



รูปที่ 1.7 กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)

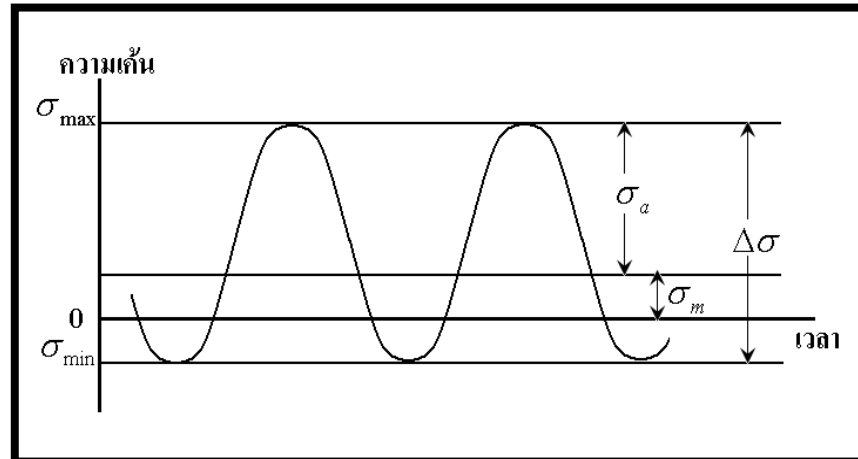
1.2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการชำรุดจากการล้า

เมื่อวัสดุรับแรงกระทำซ้ำ ๆ ซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) อาจเกิดการแตกหักขึ้นได้เนื่องจากความล้า (fatigue) เพราะเครื่องจักรเกิดความเค้นสลับไปสลับมาตลอดการทำงาน ความเสียหายจากความล้าเริ่มจากรอยร้าวขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เมื่อรอยร้าวเกิดขึ้นจะมีผลทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้น รอยร้าวจะขยายอย่างรวดเร็ว พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ภายใต้ความเค้นลดลง ความเค้นเพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดพื้นที่หน้าตัดที่เหลือก็จะขาดออกจากกันอย่างฉับพลัน การวิบัติอันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue Failure) นี้ได้บันทึกไว้ครั้งแรกในอุตสาหกรรมเหมืองแร่และรถไฟ โครงสร้างเครื่องจักรในปัจจุบันมากมายที่ผลิตโดยกรรมวิธีการเชื่อม และจากประสบการณ์ในอดีตชี้ให้เห็นว่าการวิบัติอันเนื่องมาจากการล้าได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับ

ชิ้นส่วนเชื่อมโดยตรง การชำรุดจากการล้าเป็นการชำรุดที่สำคัญในการชำรุดเชิงกล (Mechanical Failure) ซึ่งคิดเป็นปริมาณร้อยละ 90 ของการชำรุดเชิงกลทั้งหมด ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการล้า มีปริมาณสูงมาก ถึงแม้ว่าจะมีการวิจัยเรื่องการล้าใหม่ๆ อยู่ตลอดเวลา แต่การชำรุดจากการล้ายังเกิดขึ้นอยู่ Albert (1829) ได้เสนอเอกสารชิ้นแรกเกี่ยวกับการชำรุดจากภาระที่กระทำซ้ำๆ (Repeated Load) จากนั้นเป็นต้นมา มีการวิจัยกันเกือบทุกมุมโลก ซึ่งการวิจัยทางความล้าแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหม่ ๆ คือกลุ่มนักโลหะวิทยาและนักวัสดุ ซึ่งกลุ่มนี้สนใจระดับจุลภาค พยายามค้นหาสาเหตุของจุดเริ่มต้นการเติบโตรอยแตก โดยลงถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เช่น Dislocation ลักษณะของเกรน ความไม่สมบูรณ์ของเกรน Inclusion ชนิดของ โครงสร้างจุลภาคต่าง ๆ และกลุ่มนักออกแบบ กลุ่มนี้ให้ความสนใจระดับจุลภาคน้อย แต่ให้ความสนใจและมองภาพระดับมหภาค โดยนำเอาผล จากการทดสอบของกลุ่มแรกและของตัวเองมาใช้ในการออกแบบ และพยายามแปรค่าต่าง ๆ ให้สามารถนำมากำหนด ใช้อย่างเป็นรูปธรรมซึ่งใช้ผลการทดลองในเชิงสถิติเป็นหลัก เช่น ลักษณะต่าง ๆ ของภาระ คุณสมบัติทางกลของวัสดุ รูปร่างเรขาคณิตของชิ้นงาน กรรมวิธีการผลิต หลังจากนั้นมีการศึกษาต่อมาเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปของโลหะภายใต้ภาระที่กลับไปกลับมา (Reversed Load) ต่อมา Poncelet (1839) ได้เสนอคำว่า “การล้า (Fatigue)” ขึ้นเป็นครั้งแรก Wohler (1871) ได้ศึกษาผลของชิ้นทดสอบคานหมุน (Rotating Bending) และแสดงผลในกราฟความเค้น - มาตรการส่วนลอกการิทึมของรอบการชำรุด (Stress – Log Cycle to Failure, S-N Curve) และแนวคิดของ “ขีดจำกัดความทนทาน” (Endurance Limit) Ewing and Humfery (1903) ได้ศึกษาระดับผลึกของโลหะพบว่าการเสียรูปของชิ้นส่วนที่ชำรุดจากการล้า จะเกิดขึ้นจากการไถลคล้ายกับการเสียรูปจากการทดสอบแรงดึงทางเดียว (Monotonic) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่า “การล้าของโลหะจะ เกิดการเสียรูปพลาสติกเฉพาะที่ซึ่งเป็นกลไกของการไถล ” (To-and-Fro Slip หรือ Plastic Deformation Particularly at a Local Level) ซึ่งสอดคล้องกับกลศาสตร์แตกหักเชิงเส้น Paris (1960) จึงได้นำกลศาสตร์การแตกหักเชิงเส้นมาอธิบายการเติบโตของรอยแตกจากการล้าและพฤติกรรมต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

1.2.3.1 สาเหตุการชำรุด

- a) ภาระแบบวัฏจักร (Cyclic Load) เป็นภาระที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร โดยมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) ของความเค้นกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 1.8 โดยสมการที่ 1.1 ถึง 1.4 ใช้แสดงความสัมพันธ์ของกราฟ



รูปที่ 1.8 ลักษณะของภาระวัฏจักร
ที่มา: จิตติ (2550)

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.1)$$

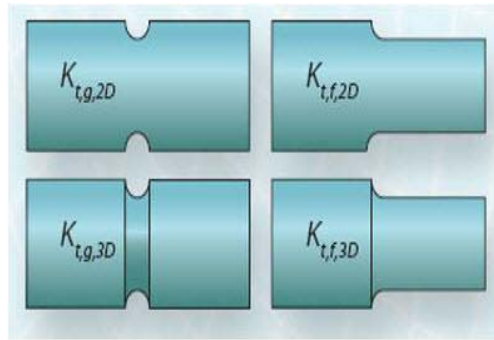
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.2)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.4)$$

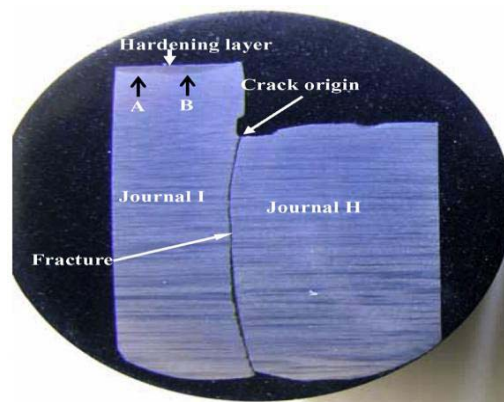
- b) บริเวณความเข้มข้นความเค้น (Stress Concentration Area) เป็นบริเวณที่เกิดความเค้นสูงเกิดจากชิ้นส่วนมีความไม่ต่อเนื่องของรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดมีผลให้ความเค้น (Stress Raiser) เพิ่มขึ้นในบริเวณดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 1.9 เช่น รอยบาก (Notch) มุมตกบ่า

(Fillet) รู (Hole) ร่อง (Groove) รอยแตก (Crack) ซึ่งเกิดจากการออกแบบหรือผลจากการใช้ชิ้นงานทำให้บริเวณดังกล่าวอาจมีความเค้นสูงเกินความแข็งแรงคราก และบริเวณความเข้มข้นความเค้นจะเป็นจุดเริ่มของรอยแตกเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.9 ลักษณะบริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูง

ที่มา: Peterson (1974)

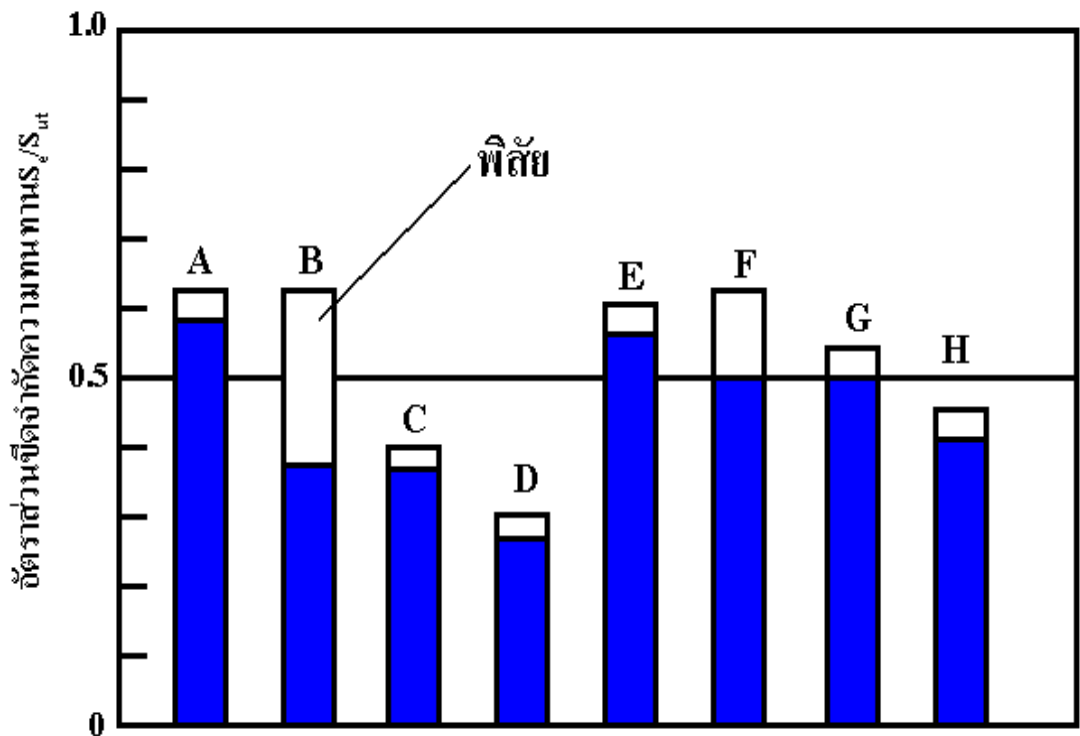


รูปที่ 1.10 บริเวณเริ่มต้นของรอยแตก

ที่มา: Xiaolei and Zhiwei (2008)

- c) คุณสมบัติของวัสดุ (Materials Properties) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติไม่เหมือนกัน สมบัติต่างๆเปลี่ยนแปลงตามส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) กับชนิดของโครงสร้างจุลภาค และเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการผลิต ต เช่น กระบวนการขึ้นรูป (Forming) และกระบวนการอบชุบทางความร้อน สมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปได้แก่ ความแข็งแรงดึง

ความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงกระแทก ความแข็ง ความต้านทานการล้า ดังแสดงในรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 ผลของโครงสร้างจุลภาคต่อขีดจำกัดความทนทาน
ที่มา: จิตติ (2550)

A= เฟอไรต์ B= เฟอไรต์+เพอร์ไลต์ C= เพอร์ไลต์ D= อันเทมเปอร์มาร์เทนไซต์
E = เทมเปอร์มาร์เทนไซต์ F = เทมเปอร์มาร์เทนไซต์ + เทมเปอร์เบนไนท์ G = เทมเปอร์เบนไนท์
H= ออสเทนไนท์

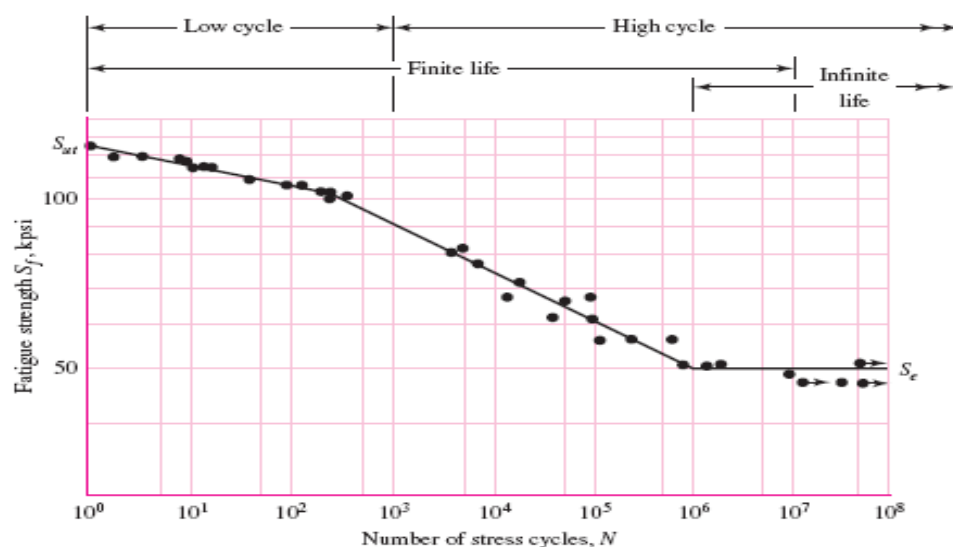
1.2.3.2 ความแข็งแรงล้า (Fatigue Strength)

ความแข็งแรงล้าได้จากการทดสอบของ Wohler (1871) กับชิ้นงานแบบคานหมุนภายใต้แรงสลับ (Alternative Force) เพื่อการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอายุ (รอบ) และนำความเค้นของชิ้นงานทดสอบที่ชำรุดกับรอบที่ได้ เขียนกราฟความเค้น - มาตรการส่วนลอกกาลิทึมกับรอบการชำรุดเรียกว่า S-N Curve ดังแสดงในรูปที่ 1.12

จาก S-N Curve ของโลหะกลุ่มเหล็กสามารถแบ่งช่วงอายุของกราฟได้ 3 ช่วง ในแต่ละช่วงมีความชันไม่เท่ากันคือช่วงแรกเป็นช่วงอายุรอบต่ำ (Low Cycle) Fuch and Stepens (1980) นิยามให้ เป็นช่วงที่มีอายุ 0-1,000 รอบ ในช่วงนี้ค่าความแข็งแรงล้า (fatigue strength) จะลดลงอย่างช้าๆเมื่อจำนวนรอบที่ความเค้นกระทำเพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่ 1,000 รอบ พบว่าค่าแข็งแรงล้า (fatigue strength) ที่จุดนี้มีค่า $0.9 S_{ut}$ ในทางปฏิบัติจริงถ้าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนอยู่ในช่วงนี้ แสดงว่าชิ้นส่วนนั้นหมุนด้วยความเร็วรอบที่ต่ำมากจึงอนุโลมได้ว่า การวิบัติที่เกิดขึ้น เป็นแบบสถิตย์ (static) สามารถใช้การคำนวณแบบสถิตย์ได้

ในช่วงที่สอง Dieter (1986) นิยามให้ เป็นช่วงอายุ 1,000-1,000,000 รอบ ในช่วงนี้ค่าความแข็งแรงล้า (fatigue strength) จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนรอบที่ความเค้นกระทำมีค่ามากขึ้น การวิบัติในช่วงนี้จะเป็นการวิบัติแบบการล้า (fatigue failure) ถ้านำค่าความแข็งแรงล้า (fatigue strength) ในช่วงนี้ไปใช้ในการคำนวณออกแบบ ชิ้นส่วนที่ได้จะมีอายุการใช้งานจำกัด (finite life)

ในช่วงที่ 3 คือช่วงอายุรอบสูง (High Cycle) จำนวนรอบที่ความเค้นกระทำจนเกิน 1,000,000 รอบ ค่าความแข็งแรงล้า (fatigue strength) มีค่าคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า endurance limit ถ้านำค่า endurance limit ไปใช้ในการคำนวณออกแบบ ชิ้นส่วนที่ได้จะมีอายุการใช้งานไม่จำกัด (infinite life)

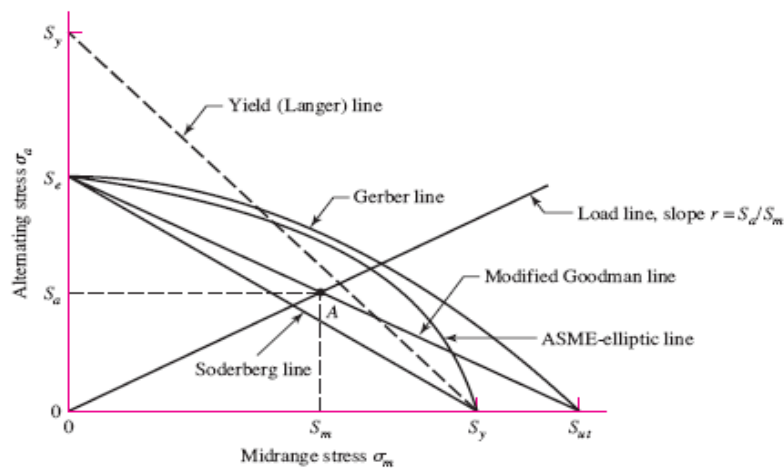


รูปที่ 1.12 ตัวอย่าง S-N Curves ของโลหะในกลุ่มเหล็ก

ที่มา: [http:// higher.ed.mcgrawhill.com](http://higher.ed.mcgrawhill.com) สืบค้นเมื่อ 8/01/53)

1.2.3.3 ขอบเขตของการวิบัติและลักษณะการวิบัติเนื่องจากความล้า

ได้มีผู้ศึกษาการวิบัติเนื่องจากความล้าหลายท่านและท่านเหล่านั้นได้รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสร้างเป็นแผนผังแสดงขอบเขตการวิบัติเนื่องจากความล้าไว้ บุคคลที่กล่าวถึงได้แก่ Soderberg, Gerber และ Goodman ถ้านำแผนผังแสดงขอบเขตการวิบัติเนื่องจากความล้าของทั้ง3ท่าน มาเปรียบเทียบกับกันจะแสดงได้ดังรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 ขอบเขตของการวิบัติเนื่องจากความล้า

ที่มา: [http:// highered.mcgrawhill.com](http://highered.mcgrawhill.com), สืบค้นเมื่อ 8/01/53

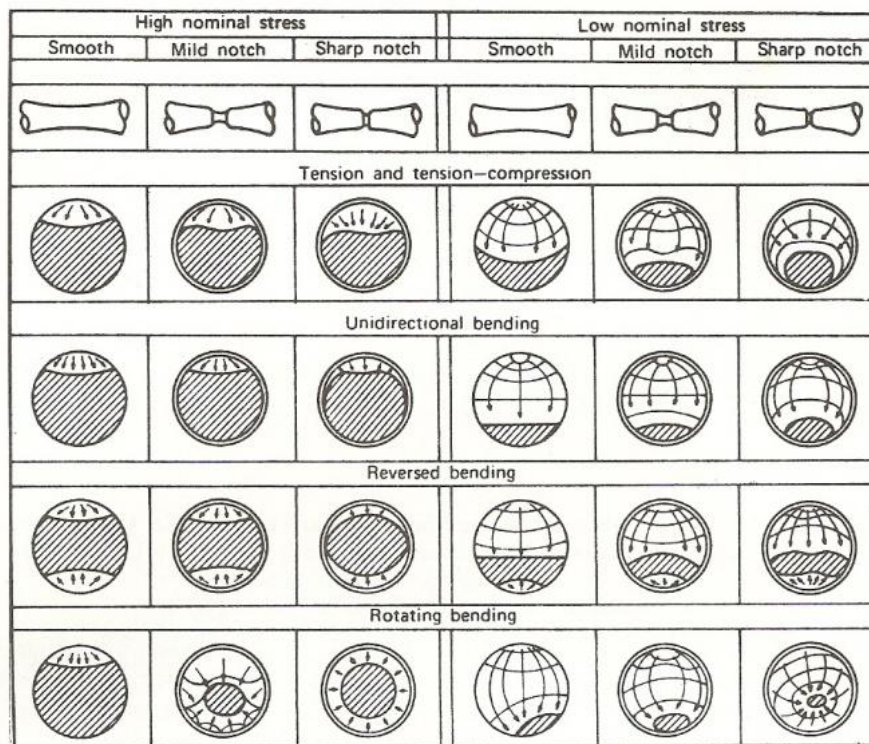
จากรูปที่ 1.13 เมื่อนำ failure lines ของ Soderberg, Gerber และ Goodman มาเปรียบเทียบกับกันจะเห็นว่า Solderberg line จะค่อนข้างอนุรักษ์ (conservative) ซึ่งหมายความว่าใช้งานได้ปลอดภัยแต่ไม่ดี ในแง่เศรษฐศาสตร์ส่วน Gerber line จะค่อนข้างไม่อนุรักษ์ (nonconservative) ซึ่งหมายความว่าในแง่เศรษฐศาสตร์ดี แต่ไม่ปลอดภัย สองทฤษฎีนี้จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ ส่วนทฤษฎีของ Goodman นั้นจะนิยมใช้กันกว้างขวางที่สุด เส้นแสดงขอบเขตความปลอดภัยตามทฤษฎีของ Goodman ประกอบด้วยเส้นตรง 2 เส้น ซึ่งเขียนแสดงด้วยสมการได้ดังนี้

$$\text{Fatigue failure; } \frac{\omega_a}{S_e} + 2 \frac{\omega_m}{S_{ut}} \leq \frac{1}{F.S.} \quad (1.5)$$

$$\text{Static failure; } \omega_a + 2 \omega_m \leq \frac{S_y}{F.S.} \quad (1.6)$$

โดยสมการเหล่านี้ใช้ไม่ได้ถ้า Load line ไม่ได้เริ่มต้นที่ตำแหน่ง (0, 0)

หากทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าชิ้นงานรับภาระแบบวัฏจักร เกินขีดจำกัดความล้า ชิ้นงานจะมีอายุการใช้งานจำกัด และเมื่อพิจารณาถึงขณะผิวกการแตกหักจะพบว่า มีจุดเริ่มจากรอยแตกล้า(Fatigue Crack)จุดเล็ก ๆ ระดับเกรนเพียงไม่กี่เกรนบริเวณความเข้มข้นความเค้นสูง(Stress Concentration Area) ซึ่งอาจเป็นผิวภายนอกหรือภายในเนื้อวัสดุ ก็ได้ การล้าของโลหะจะเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกเฉพาะที่ซึ่งเป็นกลไกของการไถล (To-and-fro slip or plastic deformation, particularly at a local level) การแตกหักจากความล้าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ มีลักษณะเส้นเป็นวงกลม คล้าย ๆ กับหาดทรายถูกคลื่นกระทบที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดเริ่มต้นของรอยแตก เรียกบริเวณนี้ว่า Beach Mark การแตกจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของวัสดุลดลง ความเค้นที่เกิดจากแรงกระทำจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนเกินวัสดุจะทนได้ และเกิดการแตกขาดในที่สุด ซึ่งผิวที่แตกบริเวณนี้มีลักษณะขรุขระ เรียกบริเวณนี้ว่า Over load ขนาดของผิวที่แตกบริเวณนี้จะบ่งบอกถึงปริมาณความเค้นที่มากระทำโดยประมาณ โดยที่พื้นที่บริเวณนี้มีขนาดเล็กแสดงว่าปริมาณความเค้นต่ำ แต่ถ้าพื้นที่บริเวณนี้มีขนาดใหญ่แสดงว่าปริมาณความเค้นสูง ดังรูป 1.14



รูปที่ 1.14 ผิวหน้าการชำรุดจากภาระแบบต่าง ๆ

ที่มา: George (1993)

1.2.3.4 การประเมินอายุความล้า

วิธีการที่ใช้ในการประเมินความเสียหายจากการล้า แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการเกิดของรอยแตกร้าว คือ

1. วิธี Total-Life Approach เป็นวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาอายุความล้าของชิ้นส่วน โดยนับจากที่ไม่มีรอยแตกร้าวจนเกิดรอยแตกร้าวขึ้น และสามารถแบ่งได้อีก 2 วิธีหลักๆ คือ 1) วิธี Strain-Life Approach เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับปัญหาความล้าประเภท Low Cycle Fatigue และ 2) วิธี Stress-Life Approach (S-N Diagram) เป็นวิธีที่เหมาะสมกับปัญหาความล้าประเภท High Cycle Fatigue

2. วิธี Deflect-Tolerant Approach เป็นวิธีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาอายุความล้าในช่วงการขยายตัวของรอยแตกร้าว โดยจะกำหนดให้ชิ้นส่วนทดสอบเริ่มต้นจากการมีรอยแตกร้าวเบื้องต้น จนเกิดการวิบัติ

วิธีการ Stress-Life หรือวิธีการ S-N Diagram เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นเวลานานกว่า 100 ปี โดยจะใช้ในการประเมินหาปริมาณความล้าที่เกิดขึ้นในเหล็ก ปัจจุบันวิธีนี้ยังคงใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะกับวัสดุที่เกิดความเค้นขึ้น โดยที่วัสดุนั้นยังอยู่ในช่วง Elastic รวมทั้งวัสดุที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

พื้นฐานของวิธี Stress-Life ก็คือ S-N Diagram ซึ่งเป็นกราฟที่เขียนระหว่างความเค้นที่ทำให้เกิดการวิบัติ (S) กับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ (N) โดยที่ S-N Diagram หาได้จากวิธีทดสอบแบบ Rotating Bending โดย S-N Diagram ส่วนใหญ่จะแสดงค่าบนกราฟแบบ log-log โดยเส้นกราฟที่ได้จะแสดงถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้ วัสดุที่มีรูปทรงแน่นอน เช่น เหล็กรูปทรงกระบอกจะมีขีดจำกัดของความล้า (S_e) ซึ่งมีระดับของความเค้นที่ต่ำ ทำให้วัสดุดังกล่าวมีอายุที่ยาวนานในทางวิศวกรรม อายุที่ยาวนานนี้จะพิจารณาจากแรงที่มากกระทำที่ 1,000,000 รอบ

การหาอายุการใช้งานของวัสดุอายุรอบสูง (high-cycle fatigue) ที่จำนวนรอบ 10^3 รอบขึ้นไปแต่ต่ำกว่า 10^6 รอบ ซึ่งความทนทานการล้าตัวที่ตำแหน่งใด ๆ ระหว่าง S'_L (ความเค้นล้ารอบต่ำ) และ S'_e (ความเค้นล้ารอบสูง) สามารถประมาณค่าโดยใช้สมการ $\omega_r | \pm K_R^B$ เมื่อ A คือ จุดตัดแกน y และ B คือ ความชันของสมการ

1.2.3.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไฟไนต์เอลิเมนต์

มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์โครงสร้างครั้งแรกเมื่อปี 1940 ต่อมาในปี 1943 ได้เริ่มใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณหาความเค้นในปัญหามิติเดียว เช่น ความเค้นที่เกิดในท่อโลหะ ในคาน แต่ในช่วงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ในปี 1956 Turner, Clough, Martins และ Topp ได้วิเคราะห์ปัญหา 2 มิติ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นครั้งแรกและได้แสดงวิธีหาสทิงเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของโครงข้อหมุนและของเอลิเมนต์คานและหาสทิงเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของโครงข้อหมุนของเอลิเมนต์คาน และหาสทิงเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์สองมิติของเอลิเมนต์ระนาบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมโดยการสมมุติฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่าวิธีสทิงเนสโดยตรง (direct stiffness method) และรวมสทิงเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์เหล่านั้นเข้าด้วยกันเป็นสทิงเนสเมทริกซ์ของโครงสร้างทั้งระบบ ในช่วง 1954-1960 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นการวิเคราะห์โครงสร้างจึงนิยมใช้วิธีเมทริกซ์และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้รับความนิยมมากขึ้น คำว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ถูกแนะนำขึ้นเป็นครั้งแรกในผลงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นระนาบ โดยใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมมุมฉากของ Clough ในปี 1960

หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบกันก่อนให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่เป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วทำการแก้สมการหาผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งที่ต้องการ โดยความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา

ขั้นตอนการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ลำดับแรกคือสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้เหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมมากที่สุดแล้วจึงแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย เลือกฟังก์ชันการกระจัดซึ่งต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดและความเค้นกับความเครียดของแต่ละเอลิเมนต์ด้วยจุดต่อ (node) โดยอาศัยเงื่อนไขขอบ (boundary conditions) หรือเงื่อนไขบังคับ (constraints) หรือจุดรองรับ (supports) เพื่อช่วยทำให้เมทริกซ์ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐานเพื่อสามารถหาค่าการกระจัดที่แต่ละจุดต่อที่ต้องการได้ แล้วจึงหาสทิงเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์และสมการของแรงของแต่ละเอลิเมนต์แล้วใช้วิธีซ้อนทับหาสมการรวมของระบบ หากการกระจัดความเค้นหรือความเครียดของระบบจากความสัมพันธ์ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง ได้ผลลัพธ์อย่างไรแล้วจึงตีความ ทำให้ทราบว่าบริเวณ

ใดของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ เช่นบริเวณที่มีการกระจัดสูงหรือบริเวณที่มีความเค้นสูง และสามารถลดขนาดของการกระจัดและความเค้นได้อย่างไร ทั้งนี้ต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะหรือมิติของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนให้เหมาะสมยิ่งขึ้นหรืออาจจะต้องเลือกใช้วัสดุชนิดอื่นที่เหมาะสมกว่า เห็นได้ว่าไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ปัญหาต่างๆได้อย่างกว้างขวาง จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเทียบกับวิธีธรรมดาครั้งนี้คือ สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีและสะดวก สามารถจำลองการกระทำของโหลดในสภาพต่างๆ เช่น โหลดที่กระจายไม่สม่ำเสมอได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง ใช้วิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนระบบเครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันโดยไม่ยุ่งยาก สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาไม่ว่าเงื่อนไขขอบ,เงื่อนไขบังคับและจุดรองรับจะอยู่ในลักษณะใดๆ สามารถจะเลือกขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งให้ใหญ่หรือเล็กได้ตามความจำเป็น ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือระบบสามารถจะเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆได้สะดวก และยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายด้วย ในระบบการออกแบบและการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสมัยใหม่ (CAD/CAM) มักใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ก่อนที่จะผลิตชิ้นส่วนจริง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและมีความถูกต้องแม่นยำสูง ในกรณีของวัสดุประเภทยืดหยุ่นตัวไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) หรือการยืดหยุ่นของวัสดุ อยู่ในช่วงพลาสติก ก็ยังสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์สิ่งที่ต้องการได้สะดวกเช่น ใช้วิเคราะห์การล้าตัวและการคืบของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์โครงสร้างหรือระบบเครื่องจักรกลโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้อง ควรตระหนักถึงข้อพึงระวัง 3 ข้อหลักๆ ข้อแรกคือ ความเหมาะสมของรูปร่างเอลิเมนต์ ข้อที่สองคือความสามารถในการประเมินพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงและสุดท้ายคือ ความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อยๆของคอมพิวเตอร์

1.3 การตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 การเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน

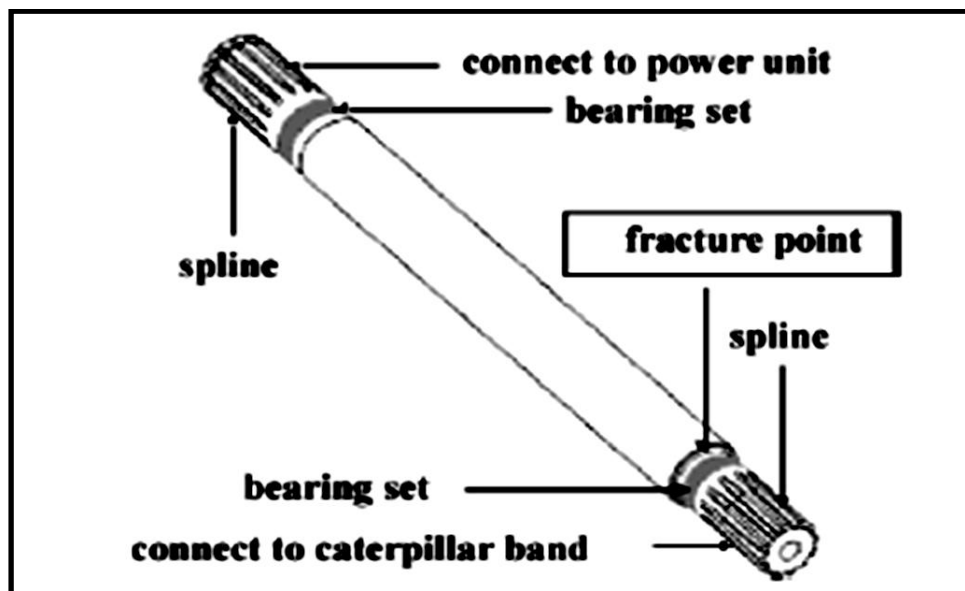
G Magudeeswaran et al (2008) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน เหล็กกล้าแรงดึงสูง AISI4340 ที่ผ่านการอบชุบ (Quenching and tempering) ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกัน 2 วิธี วิธีแรกคือเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้ม ฟลักซ์ (SMAW) วิธีที่สองคือเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW) โดยแต่ละวิธีใช้ลวดเชื่อมที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ เชื่อมด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนิติกและเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำชนิดเฟอร์ริติก พบว่าเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์(SMAW)ให้สมบัติเชิงกลของเนื้อเชื่อมดีกว่าเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์(FCAW) และพบว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนิติกให้เนื้อเชื่อมที่ทนทานต่อการแตกหักดีกว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำชนิดเฟอร์ริติก แต่ให้เนื้อเชื่อมที่มีค่าความแข็งและความแข็งแรงต่ำกว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำชนิดเฟอร์ริติก เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากแต่ละกรรมวิธีการเชื่อมนั้นมีความแตกต่างกันซึ่งเป็นผลจากการที่ได้รับปริมาณความร้อนป้อนเข้า(heat input) ในปริมาณที่ไม่เท่ากัน

Shyan Lee and Tian Su (1999) ได้ศึกษาผลของการอบชุบ (Quenching and tempering) ของเหล็กกล้าแรงดึงสูง AISI4340 ที่อุณหภูมิ 100,200,250,30,400,500 และ 650 องศาเซลเซียส ได้โครงสร้างเป็นเทมเปอร์มาเทนไซด์ (tempered martensite) ที่ให้สมบัติเชิงกลแตกต่างกัน โดยมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งลดลงตามอุณหภูมิในการอบ จากการศึกษาค้นพบว่า อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกันส่งผลถึงความหนาแน่นของดิสโลเคชัน และส่งผลถึงการตกตะกอนของคาร์ไบด์โดยอุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกันทำให้ตะกอนของคาร์ไบด์ในเมทริกซ์มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลไม่เหมือนกันด้วย

1.3.2 ภาวะโหดความแข็งแรงล้าและลักษณะการวิบัติของเพลานี้เนื่องจากความล้า

Feng Tseng and Shin Lin (2008) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์การแตกหักของเพลาส่งกำลังของเครื่องเก็บเกี่ยวถั่วลิสงรูปที่ 1.15 โดยทดสอบการแตกหักของเพลานี้ผ่านกระบวนการผลิตแตกต่างกัน 3 กระบวนการดังนี้ 1.เพลานี้ซึ่งผ่านการคาร์บูไรซิ่ง (carburizing) และอบชุบ (Quenched and tempered) 2.เพลารีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงชุบแข็งด้วยกระแสเหนียวนำ (high rolling temperature and induction hardening power) 3.เพลารีดขึ้นรูปชุบแข็งด้วยกระแสเหนียวนำ (induction hardening) จากการศึกษาพบว่าบริเวณ spline และบริเวณใกล้แบร์ริง (bearing set) เพลานี้ทุกกระบวนการผลิตมีแนวโน้มเดียวกันคือมีค่าความแข็งลดลงตามระยะห่างแบร์ริง ส่วนบริเวณอื่น

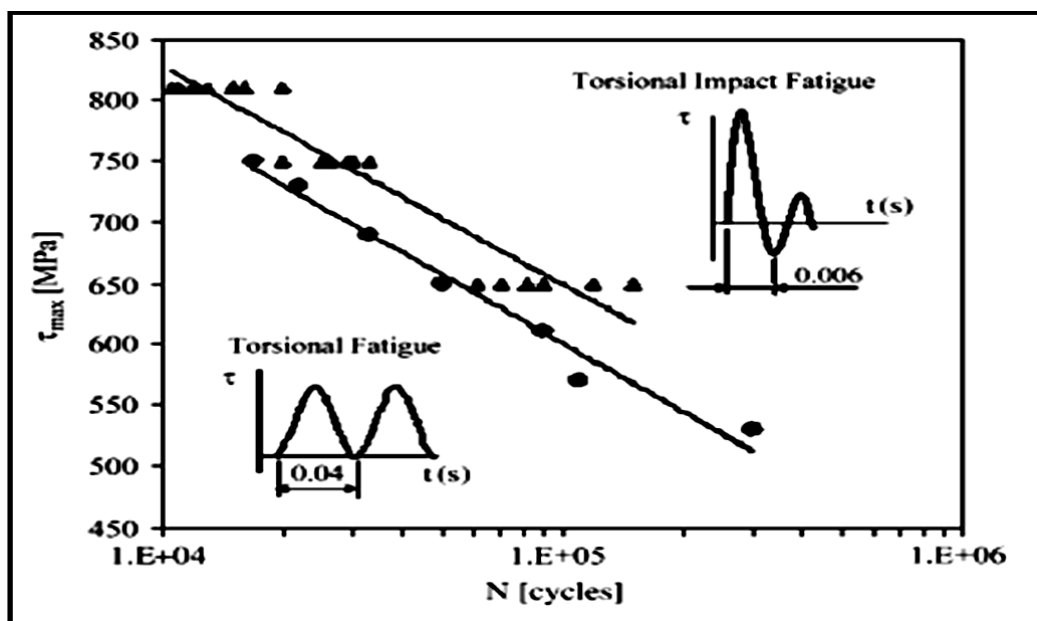
ของเพลานี้ในแต่ละกระบวนการผลิตพบว่าความสัมพันธ์ของความแข็งกับระยะห่างแบร์ริงมีแนวโน้มแตกต่างกัน กล่าวคือเพลานี้ซึ่งผ่านการคาร์บูไรซิ่ง (carburizing) และอบชุบ (Quenched and tempered) ค่าความแข็งลดลงตามระยะถึงจุดหนึ่งจึงเริ่มคงที่ ส่วนเพลานี้ที่ได้จากอีก 2 กระบวนการผลิต ค่าความแข็งจะสม่ำเสมอไม่ลดลงตามระยะ เพลานี้จากทั้ง 3 กระบวนการผลิตจะมีการแตกหักแบบล้า โดยจุดเริ่มต้นของการแตกหักอยู่ที่บริเวณ spline และบริเวณใกล้แบร์ริง (bearing set) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูง และศึกษารอยแตกจากภาพ (fractograph) ของเพลานี้จากแต่ละกระบวนการผลิตพบว่า มีลักษณะรอยแตกที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถต่อยอดการศึกษาลักษณะการแตกหักเหล่านี้ได้ด้วยทฤษฎีการล้าจากภาวะหมุนบิด (Torsional Fatigue)



รูปที่ 1.15 ลักษณะของเพลาส่งกำลังที่ทำการวิเคราะห์การแตกหัก

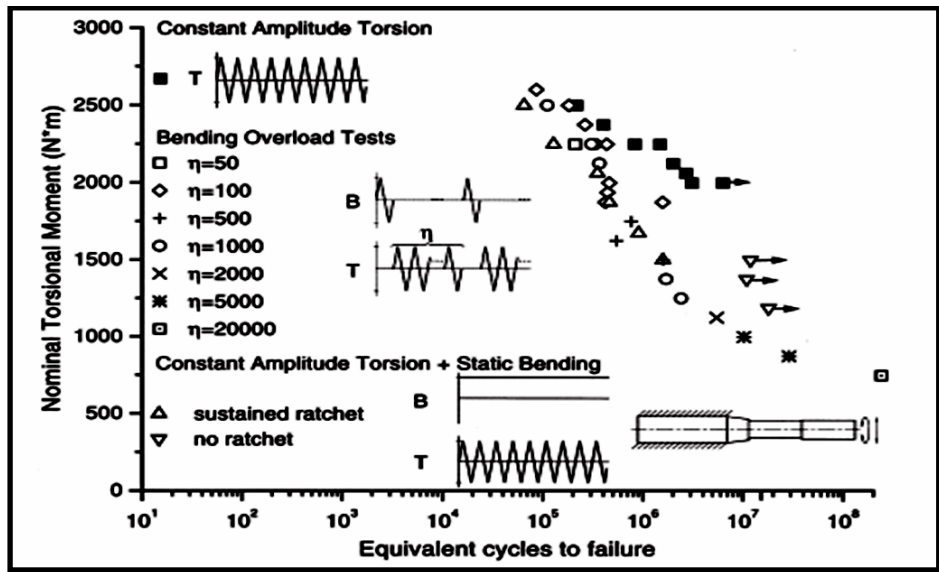
Xiaolei and Zhiwei (2008) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์การแตกหักจากความล้าของเพลารถจักรที่ผ่านการชุบด้วยกระแสเหนี่ยวนำ พบว่าส่วนผสมทางเคมีกระบวนการทางความร้อนและการชุบผิวแข็งมีผลต่อลักษณะของรอยแตก เมื่อพิจารณาการขยายตัวของรอยแตกพบว่ารากของรอยแตกเริ่มเกิดจากร่องบาก เพราะเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูง (stress concentration) การขยายตัวของรอยแตกมี Beach mark ชัดเจน ทิศทางเติบโตเข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการที่ชิ้นงานต้องรับภาระเกิน (Overload) เป็นช่วงๆ

Dumitru et al (2007) ได้ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงล้าระหว่างการล้าจากภาระหมุนบิดกับการล้าจากภาระหมุนบิดกระแทกของเพลาดังแสดงในรูปที่ 1.16 เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแตกหักจากการล้า จากการศึกษพบว่าความทนทานต่อการล้าจากการ บิดกระแทกเข้าไปเข้ามาของเพลามีค่าสูงกว่าการล้าจากการหมุน บิดแต่อย่างเดียว และทิศทางของการแตกทำมุมกับผิวชิ้นงาน 46.8°

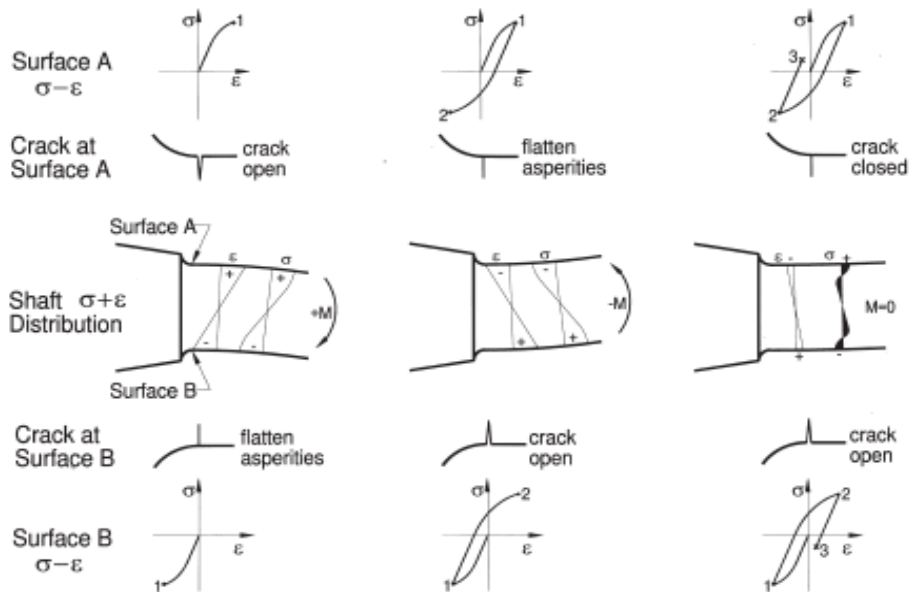


รูปที่ 1.16 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงล้าของภาระแบบหมุนกับภาระแบบหมุนกระแทก

Bonnen and Topper (2007) ได้ศึกษาผลของภาระโหลดที่มีต่อค่าความแข็งแรงล้าพบว่า ภาระเกินแบบ บิดคด (Bending -Torsion) กับภาระแบบ บิด (Torsion) ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงล้าต่างกัน โดยภาระเกินแบบบิดคด (Bending -Torsion) จะมีอายุความล้าสั้นกว่าภาระแบบ บิด (Torsion) ดังแสดงในรูปที่ 1.17 และได้ศึกษาภาวะความเค้นความเครียดที่บริเวณรอยบากจากภาระเกิน (overload) ดังรูปที่ 1.18



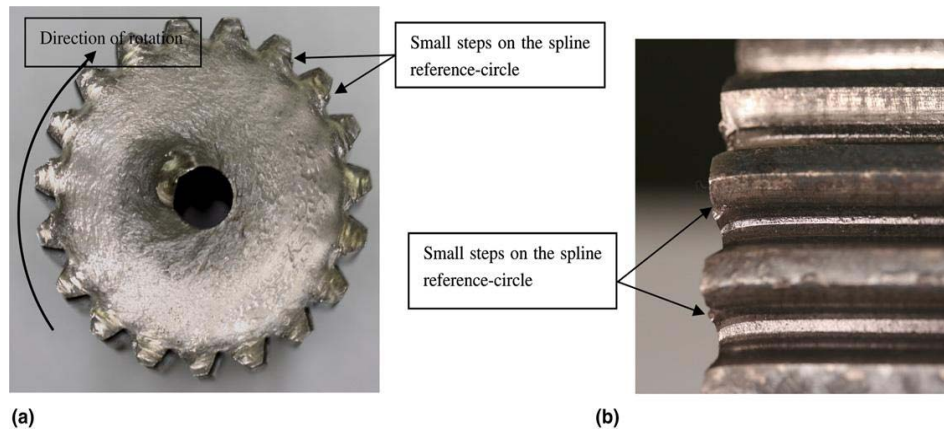
รูปที่ 1.17 ภาวะแบบหมุนกับภาวะเกินแบบหมุนคัด



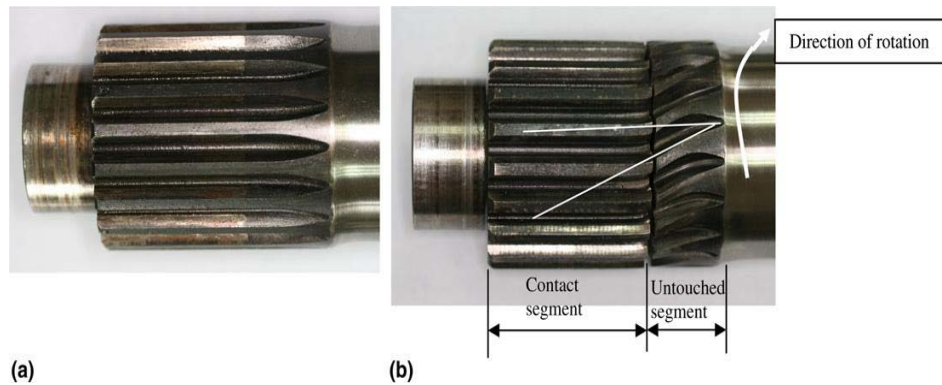
รูปที่ 1.18 ภาวะความเค้นความเครียดที่บริเวณรอยบาก

Li et al (2007) ได้ศึกษาการชำรุดของเพลาท้าย (steering Shaft) ในรถฝ่าหิมะ (Slushy vehicle) พบว่าการที่เพลาท้ายขาดอย่างกะทันหันขณะใช้งาน โดยขาดที่บริเวณ สไปลน์มีสาเหตุจากการรับภาระกระแทกเกินกำลัง (Overload impact) และภาวะบิดเสียรูป (torsional

Deformation) ดังแสดงในรูปที่ 1.19 โดยลักษณะก่อนและหลังขาดของเพลลาได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.20



รูปที่ 1.19 เพลารับภาระบิดทำให้เกิดการเสียรูป



รูปที่ 1.20 ลักษณะของเพลาก่อนและหลังขาด

Atxaga and Irisarri (2009) ได้ศึกษาความเสียหายที่เกิดบริเวณปลายเพลาส่งกำลัง ในเครื่องยนต์ พบว่าเพลาส่งกำลังเกิดความล้า มีการเริ่มของรอยแตก (crack) เล็กๆ บริเวณร่องคีย์ (key way) นำไปสู่การขาดอย่างรวดเร็วและรุนแรงซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นถูกซ่อมโดยวิธีการเชื่อม แต่ทว่าความแข็งแรงก็ยังไม่เพียงพอที่จะสามารถรองรับภาระความล้าที่มากกระทำได้ ลักษณะการชำรุดและผิวยรอยแตกของเพลาส่งกำลังแสดงไว้ในรูปที่ 1.21, 1.22 ตามลำดับ



รูปที่ 1.21 ลักษณะการชำรุดของเพลลา

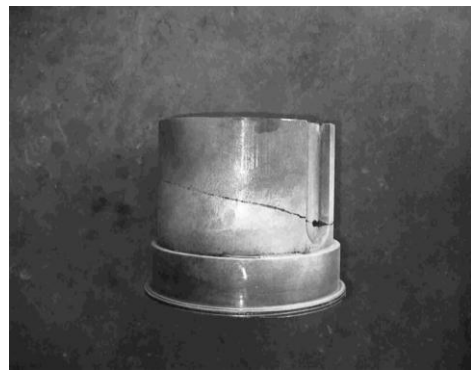


รูปที่ 1.22 ผิวรอยแตกของเพลลา

Bhaumik et al (2002) ได้ศึกษาการชำรุดเนื่องจากความล้าของเพลลาทวงส่งกำลัง พบว่ารอยแตก (crack) เริ่มเกิดบริเวณร่องคีย์ (keyway) และลุกลามจนกระทั่งเกิดการขาด ดังแสดงในรูปที่ 1.23 และ 1.24

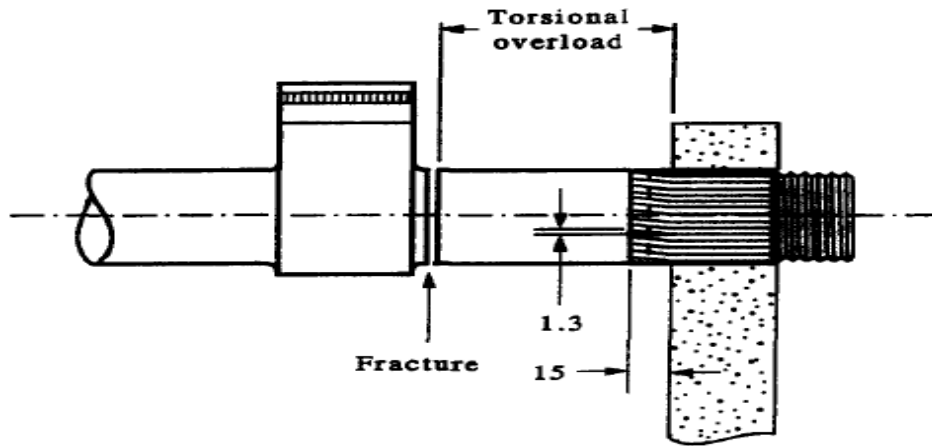


รูปที่ 1.23 บริเวณร่องคีย์ (keyway)



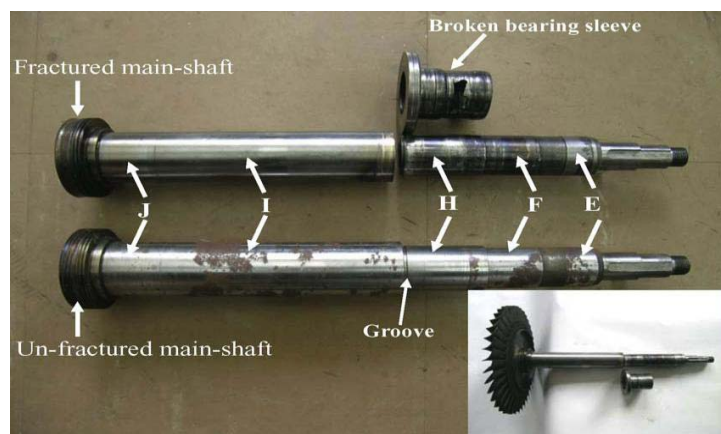
รูปที่ 1.24 รอยแตก (crack) บริเวณร่องคีย์ (keyway)

Cleland and Jones (1997) ได้ศึกษากรณีการขาดของเพลลาทำในเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ พบว่าปลายของเพลลาเป็นสไปลีน (splines) รับภาระบิดเกินกำลังทำให้เพลลาในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากแรงบิดสูงเกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปในบริเวณผิวเรียบและขาดที่บริเวณผิวขรุขระ ตำแหน่งที่เพลลาขาดและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากแรงบิดสูงแสดงในรูปที่ 1.25

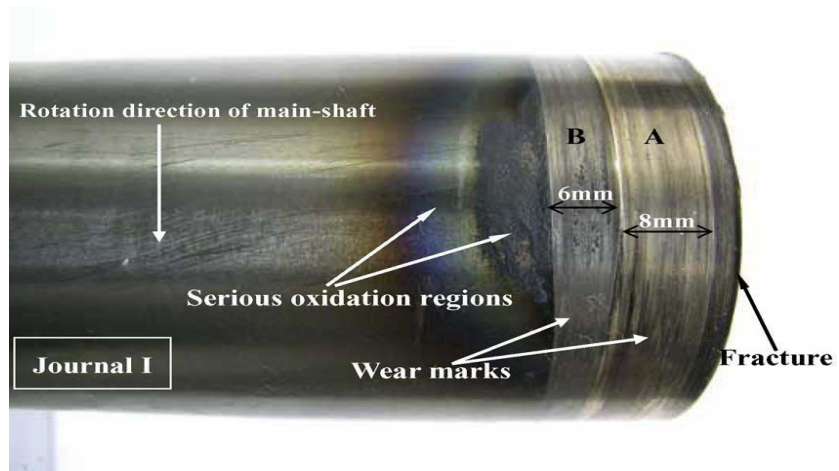


รูปที่ 1.25 ตำแหน่งที่เพลลาขาดและบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากแรงบิดสูง

Xiaolei and Zhiwei (2009) ได้ศึกษาการชำรุดของเพลลาเทอร์โบชาร์ทเจอร์ พบว่า ตำแหน่งที่เพลลาขาดคือ บริเวณคมขอบร่อง Groove ที่อยู่ระหว่างบริเวณเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของเพลลา จากการตรวจสอบรอยแตกพบว่า เกิดจากภาวะความล้าหมุนดัด และพบว่าบริเวณราก fillet ที่ร่อง Groove มีอุณหภูมิสูงเพราะเป็นบริเวณเข้มข้นของการเสียดทานระหว่าง bearing sleeve และ assisted pushing bearing และยังพบว่าความแข็งแรงล้าบริเวณราก fillet ลดลงเนื่องจากเป็นบริเวณความเข้มข้นความเค้น (stress concentration area) ลักษณะของเพลลา ก่อนและหลังขาดแสดงในรูปที่ 1.26 ส่วนรูปที่ 1.27 ถึงรูปที่ 1.29 แสดงผิวรอยแตกของเพลลา



รูปที่ 1.26 รูปร่างของเพลลาและตำแหน่งที่เพลลาขาด



รูปที่ 1.27 ฝัวยรอยแตกที่หน้าตัดที่ 1

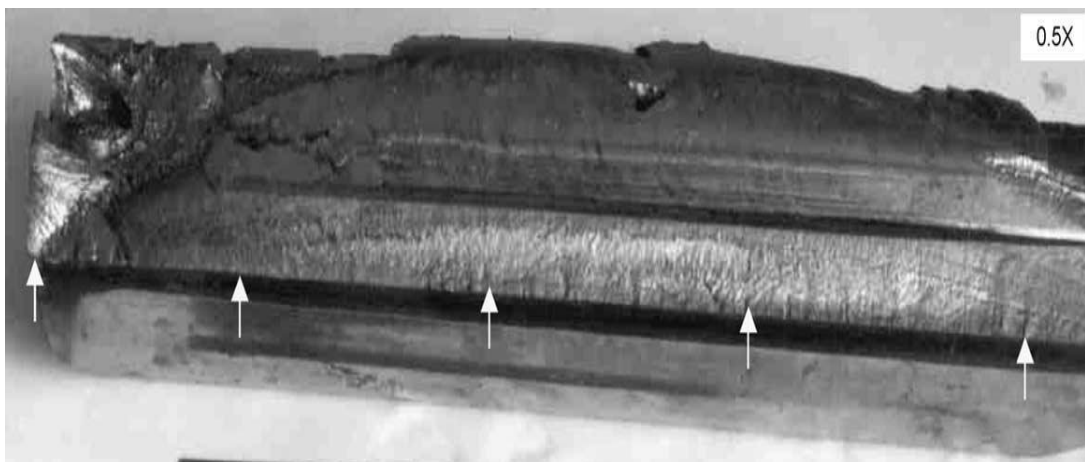


รูปที่ 1.28 ฝัวยรอยแตกสุดท้ายก่อนเกิดการขาด

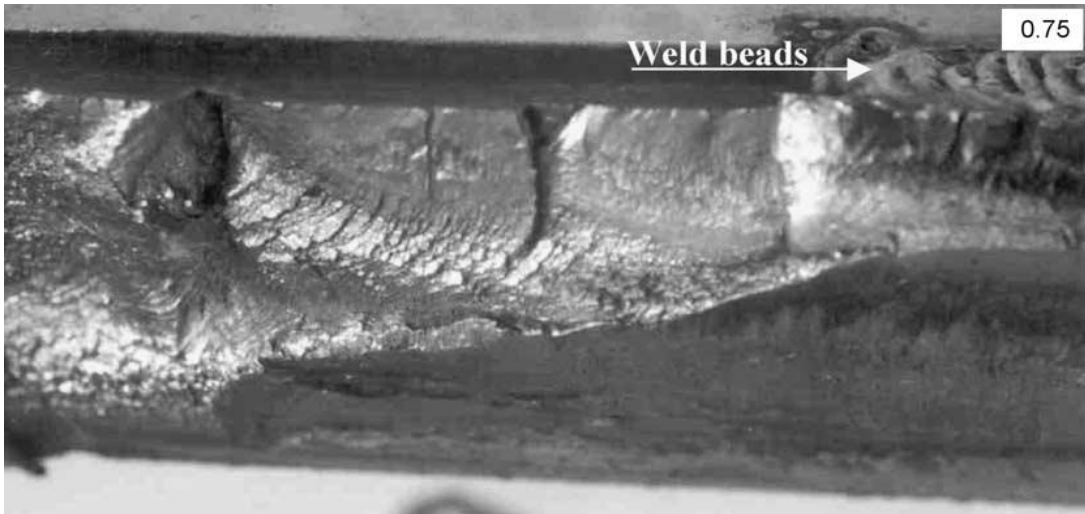


รูปที่ 1.29 ความเสียหายที่เกิดบริเวณผิว sleeve bearing

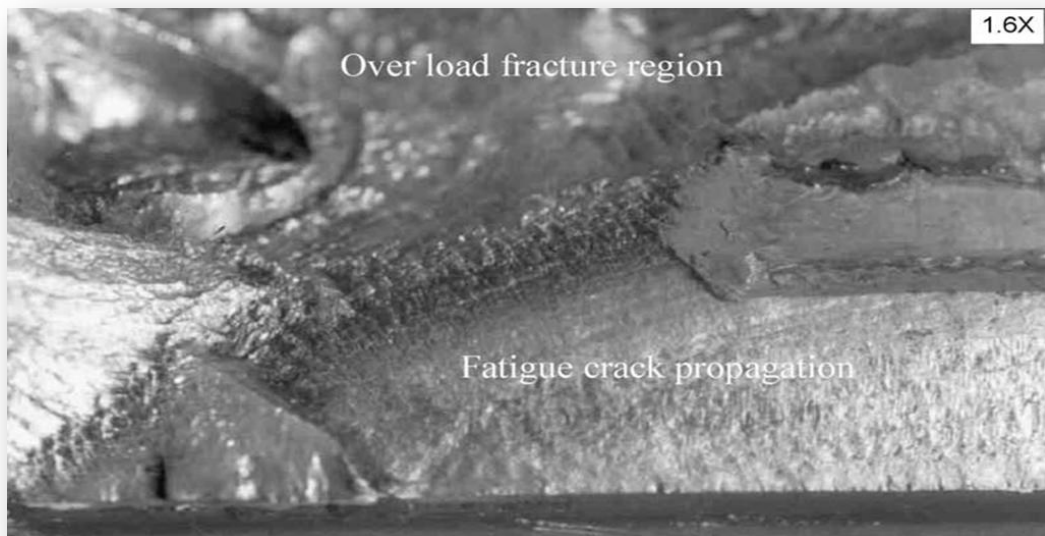
Ranganath et al (2004) ได้ทำการศึกษาหาสาเหตุการชำรุดของเพลาชับสวิง (Swing Pinion Shaft) ในรถขุดถ่าน พบว่าการขาดเป็นชิ้นพื้นของ swing pinion ดังแสดงในรูปที่ 1.30 เป็นผลมาจากภาวะความล้าแบบบิด โดยผิวรอยแตกแสดงรายละเอียดรอยแตกเริ่มต้นจากขอบด้านข้างของพื้น pinion และปรากฏทิศทางการขาดใน plane shear ดังรูปที่ 1.31 ซึ่งลักษณะการขาดดังกล่าวเหมือนกับเพลาทีขาดเนื่องจากรับภาระสถิตย์เกินกำลัง การซ่อมใช้วิธีการเชื่อมซึ่งบริเวณรอยเชื่อมแสดงในรูปที่ 1.32



รูปที่ 1.30 พื้นพินเนียนที่ขาดหลุดออกมา



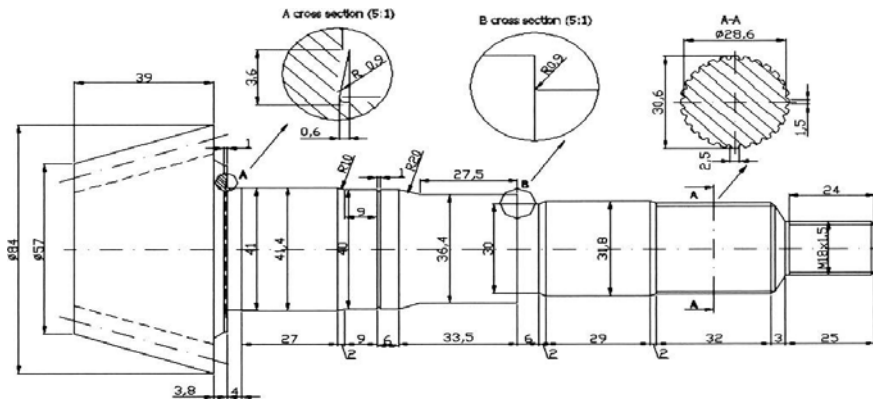
รูปที่ 1.31 ตำแหน่งรอยเชื่อมซ่อม



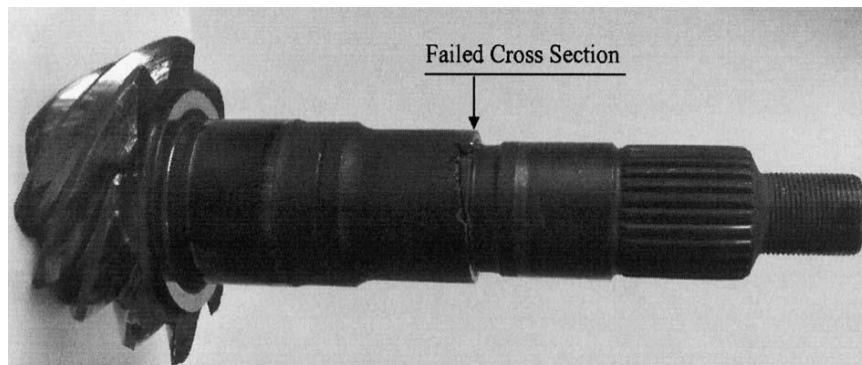
รูปที่ 1.32 บริเวณที่ขาดเนื่องจากความล้า

Bayrakceken (2006) ได้ศึกษาการชำรุดของเพลลาขับในเครื่องยนต์ซึ่งแบบของเพลลาได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.33 โดยพบว่าเพลลาเกิดการขาดที่บริเวณเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดดังแสดง

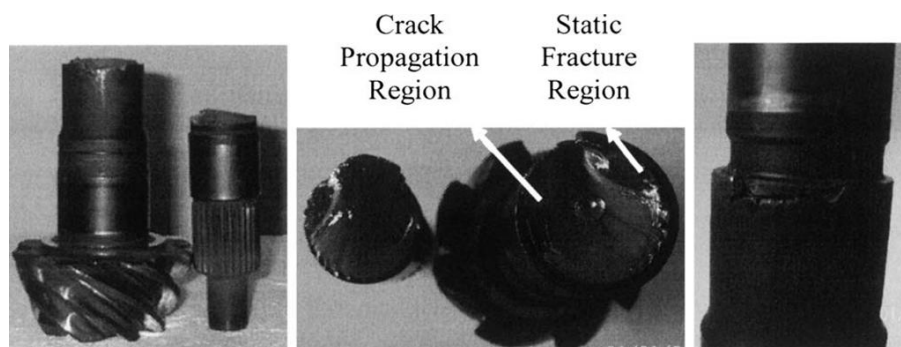
ในรูปที่ 1.34 ทำการศึกษาสาเหตุการชำรุดพบว่าเกิดจากการที่เพลาดังรับความเค้น ล้ำสูงเกินกำลัง ซึ่งสามารถพิจารณาผิวรอยแตกของเพลารูปที่ 1.35 ประกอบ



รูปที่ 1.33 แบบของเพลาลับ

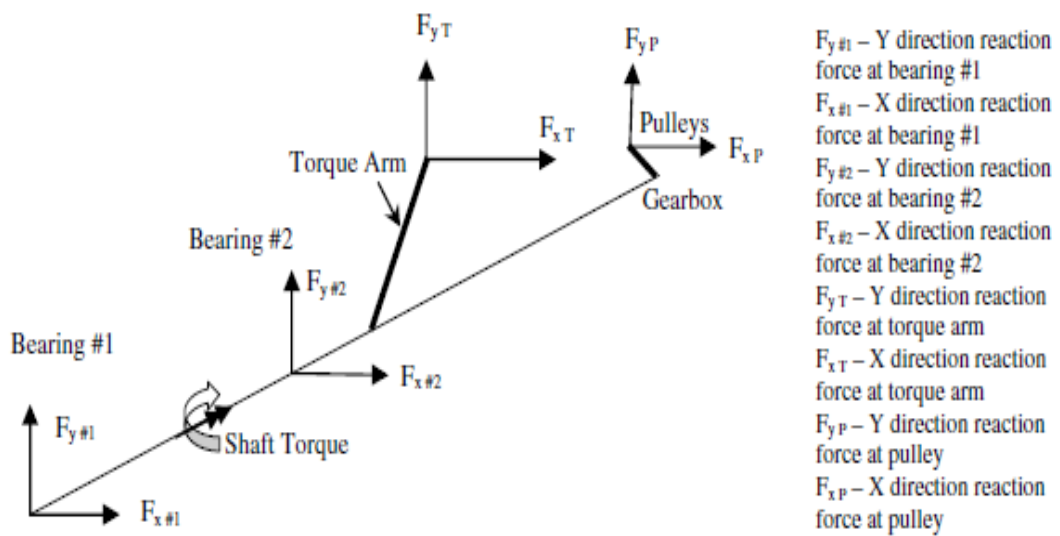


รูปที่ 1.34 ตำแหน่งที่เพลาลับขาด



รูปที่ 1.35 ผิวรอยแตก

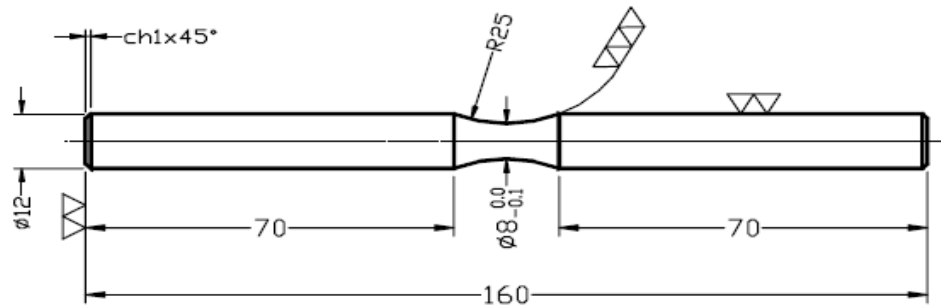
Fuller et al (2008) ได้ทำการวิเคราะห์การชำรุดของเพลาคงผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ด้วยวิธีเชิงกล free body diagram ในการคำนวณโหลดเชิงกลแสดงในรูปที่ 1.36 ซึ่งในการคำนวณหาบริเวณเริ่มต้นการชำรุดในทางกลพบว่าการหมุนบิดของเพลาคทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้นซึ่งบริเวณที่มีความเข้มข้นความเค้นสูงคือบริเวณ fillet ซึ่งเป็นผิวเชื่อมพอกมีค่า $K_t=1.48$ เป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตก



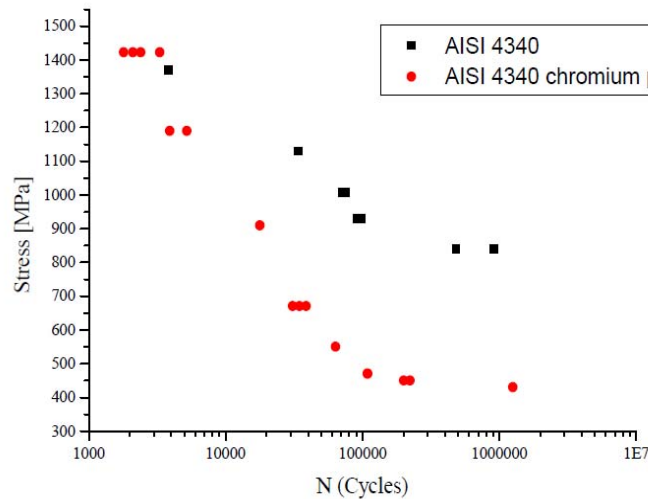
รูปที่ 1.36 free body diagram ในการคำนวณ โหลด

1.3.3 การประเมินอายุความล้า

Vooward et al (2004) ได้ศึกษาเปรียบเทียบอายุความล้าของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340 กรณีทำ shot peening ด้วย chromium plated กับไม่ทำ shot peening โดยการสร้างชิ้นทดสอบดังรูปที่ 1.37 แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัด ได้ S-N curve ดังแสดงในรูปที่ 1.38 พบว่าความแข็งแรงล้าของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340 กรณีที่ทำ shot peening ด้วย chromium plated ให้ค่าความแข็งแรงล้า 420 MPa ซึ่งต่ำกว่ากรณีไม่ทำ shot peening ซึ่งได้ค่าความแข็งแรงล้า 800 MPa



รูปที่ 1.37 ชิ้นทดสอบความล้า

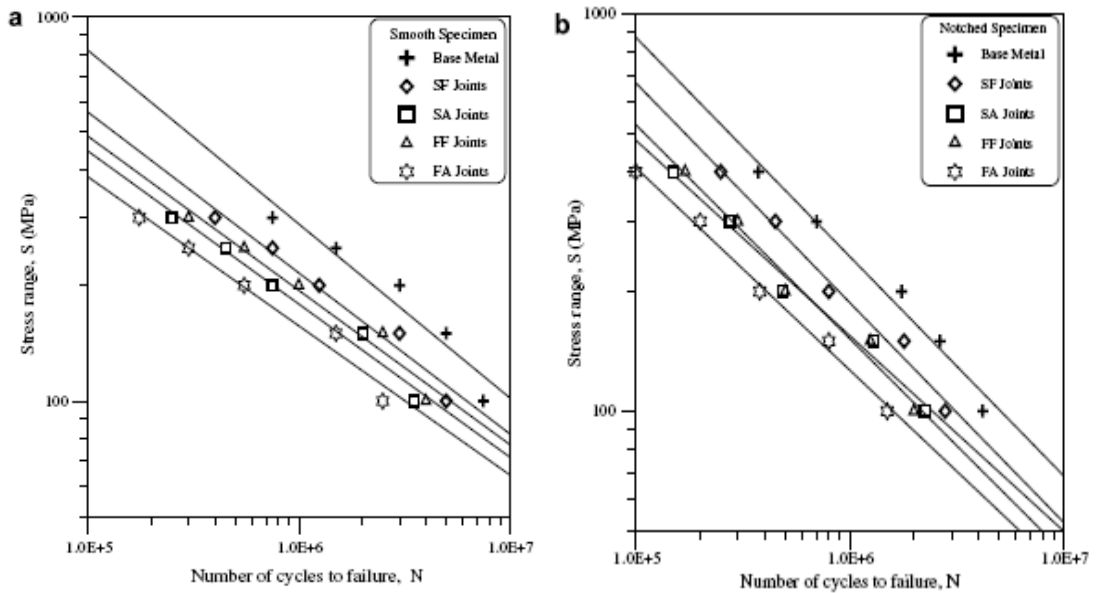


รูปที่ 1.38 S-N curve ของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI4340 กรณีทำ shot peening ด้วย chromium plated กับไม่ทำ shot peening

G Magudeeswaran et al (2008) ได้ศึกษาอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกพบว่า กรรมวิธีเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โดยใช้ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำชนิดเฟอร์ริติกให้อายุความล้าสูงที่สุด และพบว่าชิ้นงานที่มีรอยบากมีอายุความล้าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรอยบากดังแสดงในรูปที่ 1.39a และ 1.39b ได้แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรจากการทดลองดังสมการที่ (1.7)

$$S^n N = A \quad (1.7)$$

S คือ แอมพลิจูดของความเค้น N คือ จำนวนรอบในการวิบัติ ส่วน n และ A เป็นค่าคงที่ซึ่งได้จากการทดลอง



รูปที่ 1.39 S-N Curve a.) Unnotched specimen b.) Notched specimen [16]

1.3.4 การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์เกี่ยวกับการล้า

Yuan Lin et al (2008) ได้ศึกษาการวิบัติจากการล้าของเพลลาในระบบส่งกำลัง ของรถบรรทุก (ATV) ซึ่งปกติทำงานแบบ หมุนกลับไปกลับมาเพื่อบังคับให้รถ ขับเคลื่อนเดินหน้าถอยหลัง ค่าโมเมนต์และแรงส่งกำลังหาได้จากสมการที่ (1.8) และสมการที่ (1.9) ตามลำดับ แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเค้นสูงสุดจากภาระหมุนดัดของเพลลาจากสมการที่ (1.10) และสมการที่ (1.11)

$$\Pi \mid \frac{60E}{2\phi K} \tag{1.8}$$

$$F \mid \frac{2\Pi}{D_p \cos \zeta} \tag{1.9}$$

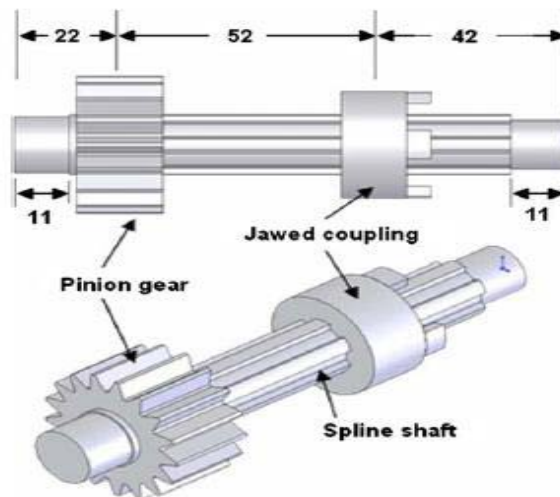
$$\omega_{\max} \mid \frac{16}{\phi d^3} [C_m M^2 \sqrt{|C_m M \theta^2 / C_t T \theta^2|}] \tag{1.10}$$

$$\sigma_{\max} \leq \frac{16}{\phi d^3} \sqrt{C_m M^2 + C_t T^2} \quad (1.11)$$

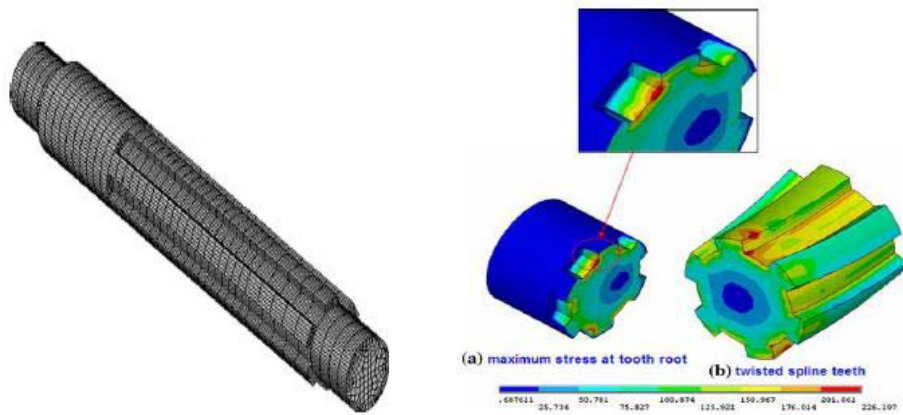
โดย C_m คือ แฟกเตอร์โมเมนต์คัต
 P คือ กำลังมอเตอร์
 F คือ แรงกระทำที่สไปลน์
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง

C_t คือ แฟกเตอร์โมเมนต์บิดของ Spline Shaft
 N คือ ความเร็วรอบมอเตอร์
 M คือ โมเมนต์คัต

จากการศึกษาทำให้ทราบว่าภาระความล้าที่เพลาดึงแบกรับนั้นมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงล้า (Fatigue Strength) ของวัสดุที่นำมาใช้ทำเพล่าทำให้เพล่ามีอายุการใช้งานจำกัด และเมื่อใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ภายใต้โหลดสม่ำเสมอและ Shock load (ภาระเปลี่ยนแปลงกะทันหัน) ศึกษาบริเวณความเค้นวิกฤต (Critical Stress) ที่เป็นบริเวณเริ่มต้นของการแตกหัก (Crack) พบว่าบริเวณสไปลน์ (Spline) ของเพล่า มีค่าความเค้นสูงสุดและเป็นจุดที่เพล่าวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 1.40 โดยสร้างโมเดลจำลองของ Spline shaft (เพล่าสไปลน์) ด้วยเอลิเมนต์รูปร่างหกเหลี่ยมแล้วแบ่งเอลิเมนต์ย่อย 16, 096 เอลิเมนต์ (element) 18,753 จุดต่อ (node) ดังรูปที่ 1.41 เพื่อใช้วิเคราะห์

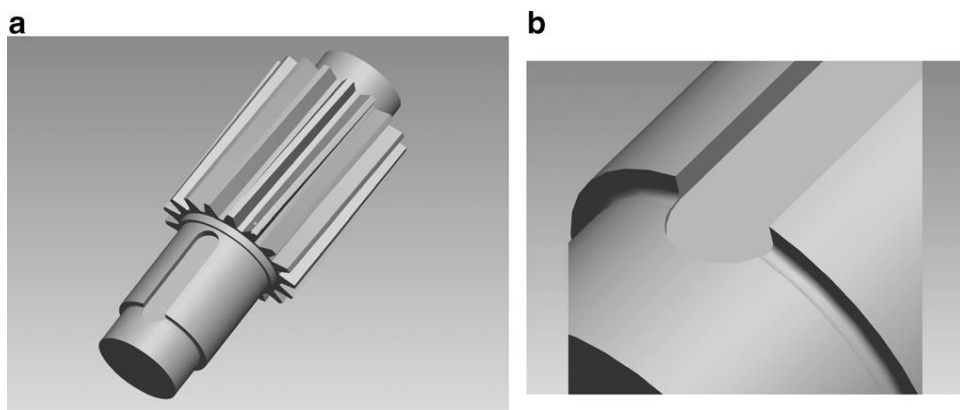


รูปที่ 1.40 แบบจำลอง Spline Shaft เอลิเมนต์ย่อย 16, 096 เอลิเมนต์ (element) 18,753 จุดต่อ (node)

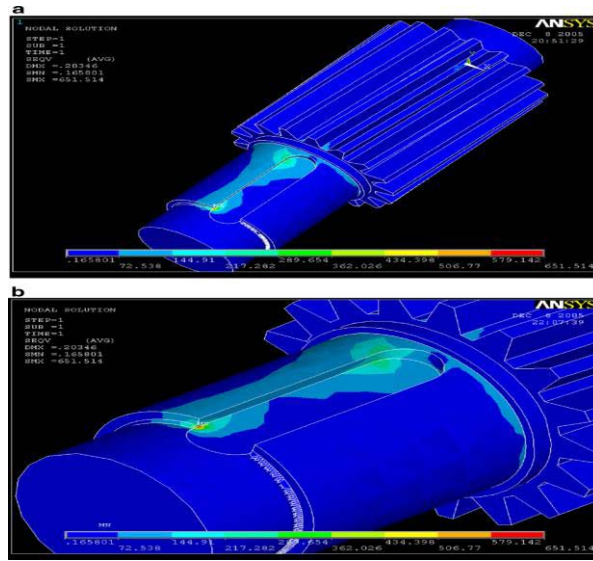


รูปที่ 1.41 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นความเครียดของเฟลาโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

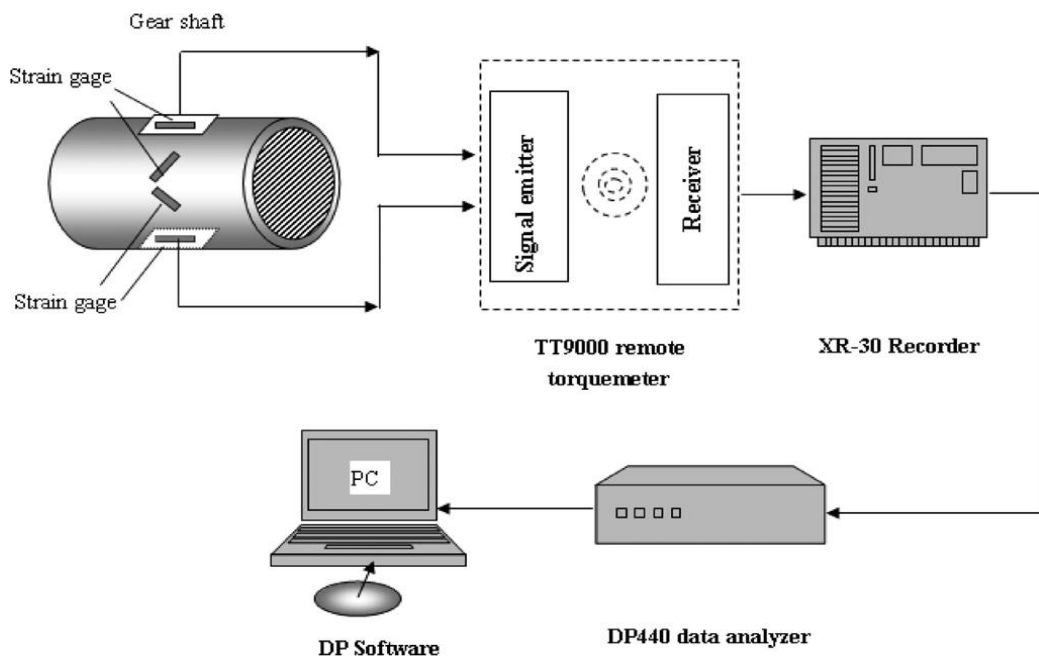
Jianping and Guang (2008) ได้ศึกษาการชำรุดของเฟลาเกียร์โดยสร้างแบบจำลองของเฟลาดังรูปที่ 1.42 แล้วใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์หาค่าความเค้นตามเงื่อนไขการใช้งาน ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 1.43 ซึ่งเห็นได้ว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่ key slot หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์การระคายความล้าของเฟลาตามกระบวนการ ในรูปที่ 1.44 ได้ค่าภาระโหลดแบบวัฏจักรออกมาดังรูป 1.45 แล้วหา S-N curve ของเฟลาเกียร์ ออกมาดังแสดงในรูปที่ 1.46 เพื่อประเมินผลอายุของเฟลาตามแต่เงื่อนไขการใช้งาน



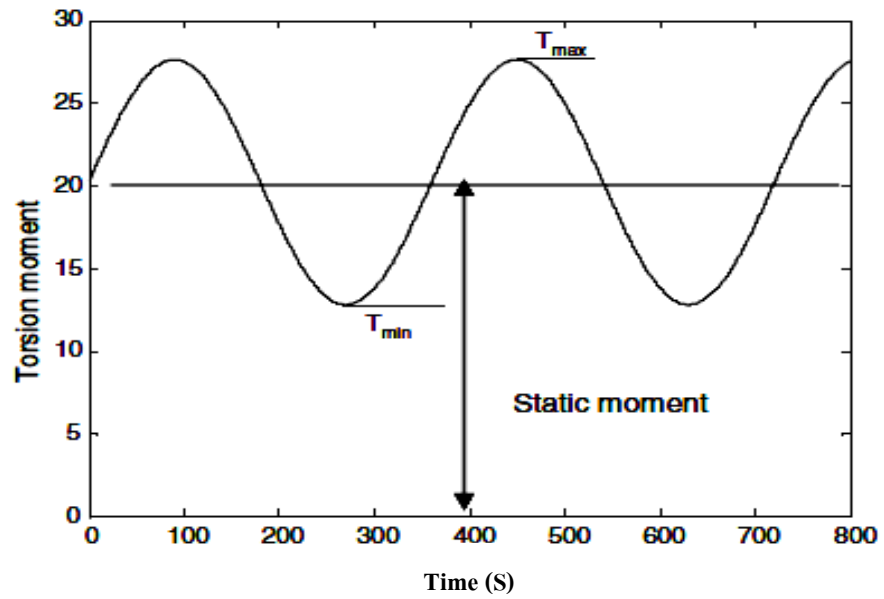
รูปที่ 1.42 แบบจำลองของเฟลาเกียร์



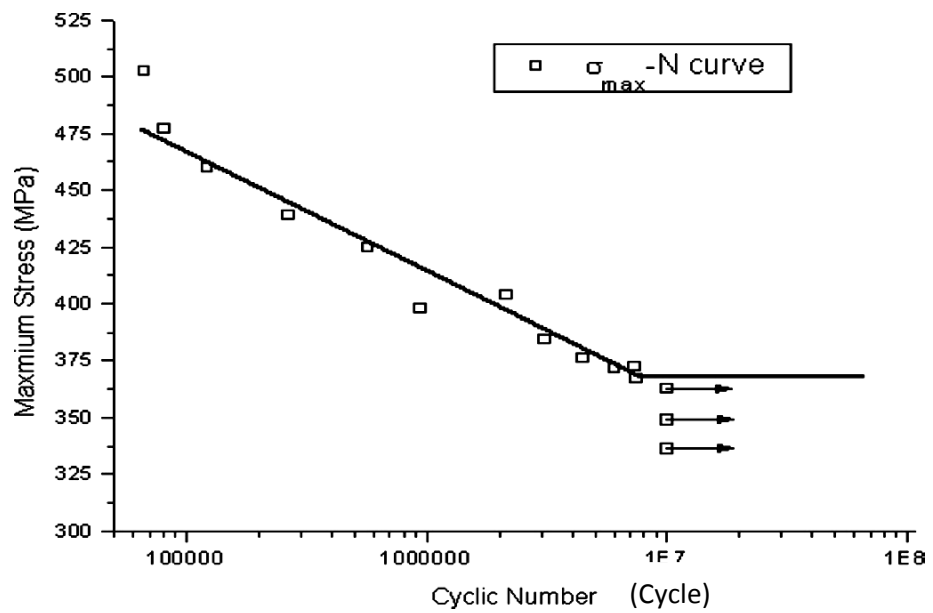
รูปที่ 1.43 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม



รูปที่ 1.44 กระบวนการทดสอบวิเคราะห์ความล้า

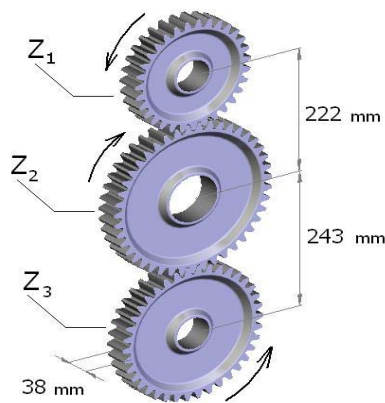


รูปที่ 1.45 ภาวะวัฏจักรที่ส่งผลให้เกิดความล้า

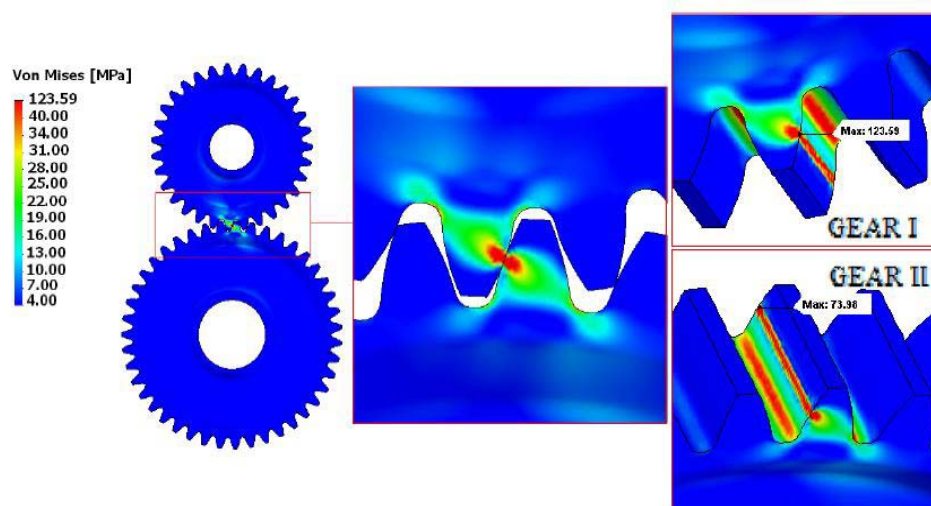


รูปที่ 1.46 S-N curve ของวัสดุทำเพลลาเกียร์

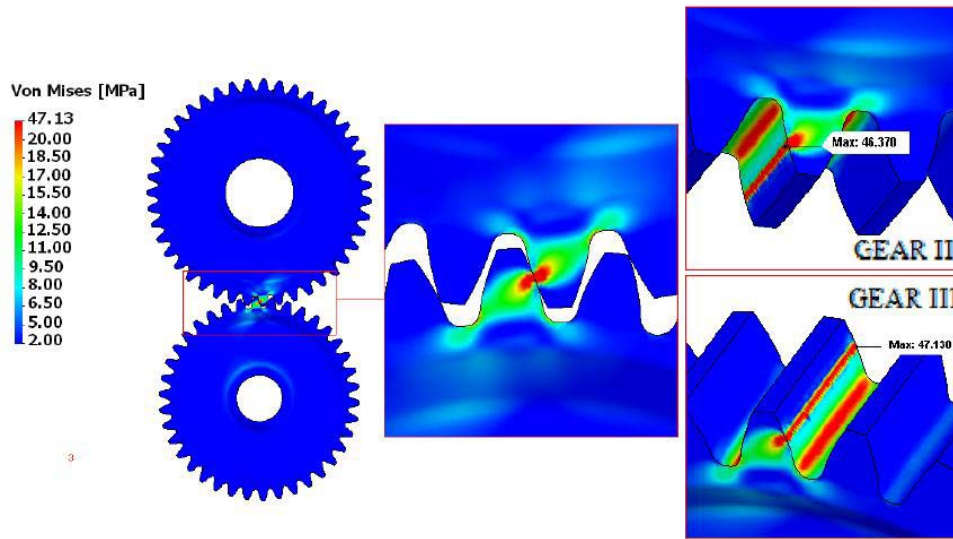
TOPAKCI et al (2008) ได้ศึกษาความเค้นคัดล้าที่เกิดขึ้นกับชุดเกียร์ของรถไถคราดเพื่อการเกษตร โดยขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากสร้างแบบจำลองการทำงานของชุดเกียร์ขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 1.47 แล้วใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมวิเคราะห์ค่าความเค้นของชุดเกียร์ตามเงื่อนไขการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 1.48 และ 1.49 พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับชุดเกียร์ไม่เกินขีดจำกัดความล้า (fatigue limit) และมีค่าความปลอดภัย (safety factor) สูง มีความสามารถพอตามเงื่อนไขการใช้งาน



รูปที่ 1.47 แบบจำลองการทำงานของชุดเกียร์



รูปที่ 1.48 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างเกียร์ตัวที่ 1 กับเกียร์ตัวที่ 2

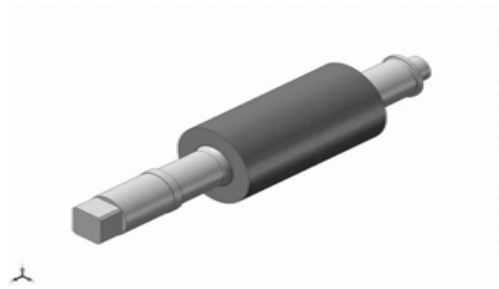


รูปที่ 1.49 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างเกียร์ตัวที่ 2 กับเกียร์ตัวที่ 3

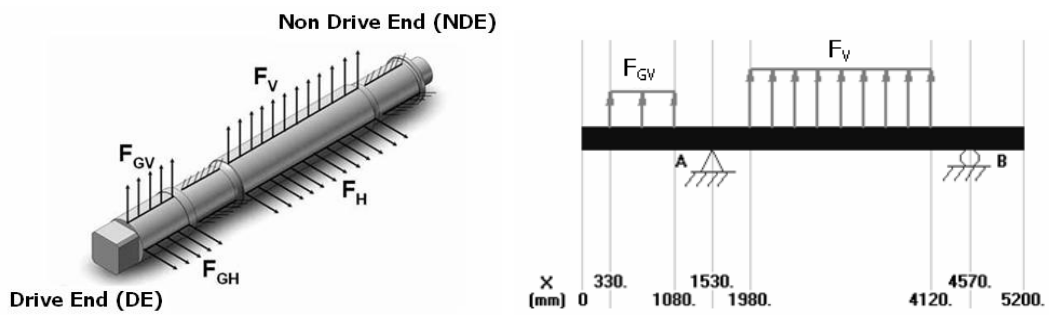
ธรรมนุญ สีดาการ และเกียรติฟ้า ตั้งใจจิต (2550) ได้ศึกษารูปร่างของบ่าเพลลาที่มีผลต่อความแข็งแรงของเพลลาลูกที่รูป 1.50 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากพบว่าในการวิเคราะห์รูปร่างของบ่าเพลลาที่เหมาะสมโดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น มีข้อจำกัดในการแก้ปัญหาบางกรณี โดยพาดพิงถึงงานวิจัยบางฉบับว่าค่าประมาณของค่าตัวประกอบความหนาแน่นความเค้นจากการคำนวณบางกรณีมีค่ามากเกินไป ดังนั้นในงานวิจัยของเขา จึงสร้างแบบจำลองอย่างง่าย ดังรูปที่ 1.51 แล้วใช้หลักการสมดุลและทฤษฎีของคานาวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวและภาระที่กระทำที่จุดรองรับ ดังรูปที่ 1.52 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์รูปที่ 1.53 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์จุดวิกฤตที่บริเวณบ่าเพลลาที่ใช้งานจริง และทำการวิเคราะห์การปรับเปลี่ยนรูปร่างลักษณะของบ่าเพลลาในสองรูปแบบคือ บ่าเพลลาแบบโค้ง (Circular fillet shoulder) และบ่าเพลลาแบบลาดเอียง (Tapered fillet shoulder) พบว่าบ่าเพลลาแบบเอียง (Tapered fillet shoulder) จะมีค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นน้อยกว่าบ่าเพลลาแบบโค้ง (Circular fillet shoulder) และมีข้อเสนอแนะ สำหรับการลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้น บริเวณบ่าเพลลาเช่น เพื่ มคาร์ซีความโค้งสำหรับบ่าเพลลาแบบโค้งหรือเพิ่มอัตราส่วนระหว่างระยะฐานต่อความสูงสำหรับบ่าเพลลาแบบลาดเอียงหรือ ทำ Relief Groove (ร่องลิ้ม) เป็นต้น



รูปที่ 1.50 เพลาลูกหีบ



รูปที่ 1.51 แบบจำลองอย่างง่ายของเพลาลูกหีบ

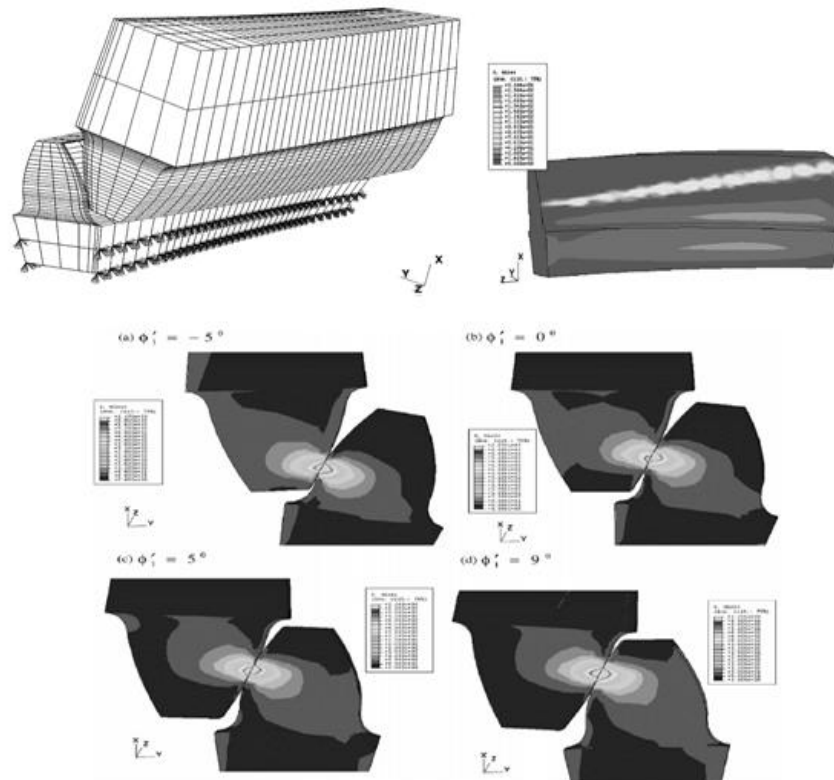


รูปที่ 1.52 หลักการสมดุลและทฤษฎีของคาน



รูปที่ 1.53 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของบ่าเพลาลูกหีบแบบลาดเอียงและบ่าเพลาลูกหีบแบบโค้ง

Cheng Chen and Biau Tsay (2002) ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นของพื่นเกียร์ โดย ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาพฤติกรรมในแต่ละเงื่อนไขมุมหน้าสัมผัสของ พื่นเฟืองดังแสดงในรูปที่ 1.54



รูปที่ 1.54 ค่าความเค้นของพื่นในแต่ละเงื่อนไขมุมหน้าสัมผัส

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.4.1 เพื่อประเมินอายุการล้าของเพลาสวิง และกำหนดอายุใช้งานของ เพลาสวิง ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมซ่อมพอกเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340

1.4.2 เพื่อพิสูจน์กรรมวิธีการเชื่อมที่ให้เนื้อเชื่อมที่มีคุณสมบัติด้านทานต่อการล้าดีที่สุดเพื่อกำหนดเป็นแนวทางวิธีการเชื่อมและมาตรฐานในการซ่อมเพลาสวิง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้คือเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของผิวเชื่อมพอกที่ได้จากแต่ละกระบวนการเชื่อมว่ากระบวนการเชื่อมแบบไหนให้ผิวเชื่อมพอกที่มีประสิทธิภาพต้านทานการล้าดีกว่ากัน ในแง่ของอายุการใช้งานเมื่อเทียบกับชิ้นส่วน เครื่องจักร เดิม ชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมพอกคือเพลาสวิง(Swing shaft) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าแรงดึงสูง AISI4340 โดยมีตัวแปรที่จะศึกษา คือ กรรมวิธีการเชื่อม (welding process) และลวดเชื่อม (wire) ที่ใช้เชื่อมพอกที่แตกต่างกัน ดังนี้

- * การเชื่อมไฟฟ้าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)
 ด้วยลวดเชื่อมชนิด AWS A5.5-96 E11018 -GH4R
 EN 757-1997 E696 Mn2NiCrMoB42H5
- * การเชื่อมอาร์กภายใต้แก๊สคลุม (MAG)
 ด้วยลวดเชื่อมชนิด AWS A5.28-ER110S-G
 EN 12534 Mn3NiCrMo
- * การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)
 ด้วยลวดเชื่อมชนิด AWS A5.29-E110T-K4
 EN: 1999 12535 69 5 Mn2NiCrMo B3 H5

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากผลการวิจัย

1.6.1 สามารถบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

1.6.2 ได้กรรมวิธีเชื่อมซ่อมที่เหมาะสมคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

บทที่ 2

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงภาพรวม ของการดำเนินงานวิจัยเป็นหลัก และลงรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยเฉพาะในขั้นตอนที่สำคัญหรือซับซ้อน โดยเน้นเป้าหมายที่จะได้รับการดำเนินงานวิจัยในแต่ละขั้นตอน ทั้งนี้ขอบเขตของงานวิจัยคือ ศึกษาความแข็งแรงล้าและ ประเมินอายุความล้าของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 จากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

หลักการดำเนินงานวิจัย

- 1.ศึกษาปัญหาที่จะทำการวิจัยให้ถ่องแท้เสียก่อน
- 2.รวบรวมข้อมูลและองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ในการแก้ปัญหา
- 3.วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รวบรวมมานำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างไร
- 4.ทำการศึกษาทดลองเติมเต็มข้อมูลในส่วนที่ขาด
- 5.นำผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาและการทดลองมาวิเคราะห์และสรุป
- 6.ประมวลความถูกต้องและความเป็นไปได้ของผลการทดลองและข้อสรุป
- 7.นำผลการวิจัยไปใช้ให้เกิดประโยชน์จริง
- 8.ศึกษาและติดตามผลของงานวิจัย

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงหลักการดำเนินงานวิจัย

2.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1.1 ศึกษาข้อมูลและตรวจวัดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ต้องนำมาใช้ในงานวิจัย

- ศึกษาการทำงานของเพลาสวิงในรถยนต์ไฟฟ้า
- ตรวจสอบประวัติการซ่อมบำรุงรักษา(maintenance)
- วิเคราะห์ผิวรอยแตก (fracture surface)
- ตรวจวัดปริมาณกระแสไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์ในแต่ละเงื่อนไขการทำงาน
- ตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ในแต่ละเงื่อนไขการทำงาน

2.1.2 นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีและองค์ความรู้ในเชิงวิศวกรรม

- การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
- การคำนวณแรงทางกลที่กระทำต่อชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
- การวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

2.1.3 ศึกษาการใช้เครื่องมือช่วยในการทำงานวิจัย

- เครื่องวัดกระแสและความเร็วรอบ
- เครื่องทดสอบความล้า (Fatigue testing machine)
- โปรแกรมออกแบบและวิเคราะห์งานทางวิศวกรรม

2.1.4 วิเคราะห์และประเมินผลงานวิจัย

- ทฤษฎีรองรับผลการวิจัย
- ประยุกต์ความรู้ภาคทฤษฎีไปสู่ภาคปฏิบัติ
- การทวนสอบความถูกต้องของผลการวิจัย

2.1.5 การนำไปใช้จริง

- มองหลายๆแง่ทางในการแก้ปัญหาเพื่อหาทางเลือกที่ดีกว่า

2.2 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.2.1 โปรแกรมทางวิศวกรรม

โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก

- ❖ โปรแกรมที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ได้แก่ Ulead Video Studio และ Converter
- ❖ โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ Gear Trax, Shaft Component Generation, Involute Spline connection, Solidwork Modeling, Solidwork Motion, Autodesk Inventer, Google Sketch up Pro, Photowork, AutoCAD 3D, 3ds max
- ❖ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล ได้แก่ MD Solid, Cosmoswork, Solidwork Simulation MSC. Patran, MSC. Nastran, MSC. Marc

2.2.2 แคลมป์มิเตอร์

แคลมป์มิเตอร์ BK Precision 325 แสดงในรูปที่ 2.2 ใช้วัดกระแสไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์



รูปที่ 2.2 แคลมป์มิเตอร์

2.2.3 Digital Tachometer

Digital Tachometer รุ่น TC-811B ใช้วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ทั้งแบบสัมผัสและใช้แสงเลเซอร์มีเทปสะท้อนแสงและหัวคอนแทคตังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Digital Tachometer รุ่น TC-811B

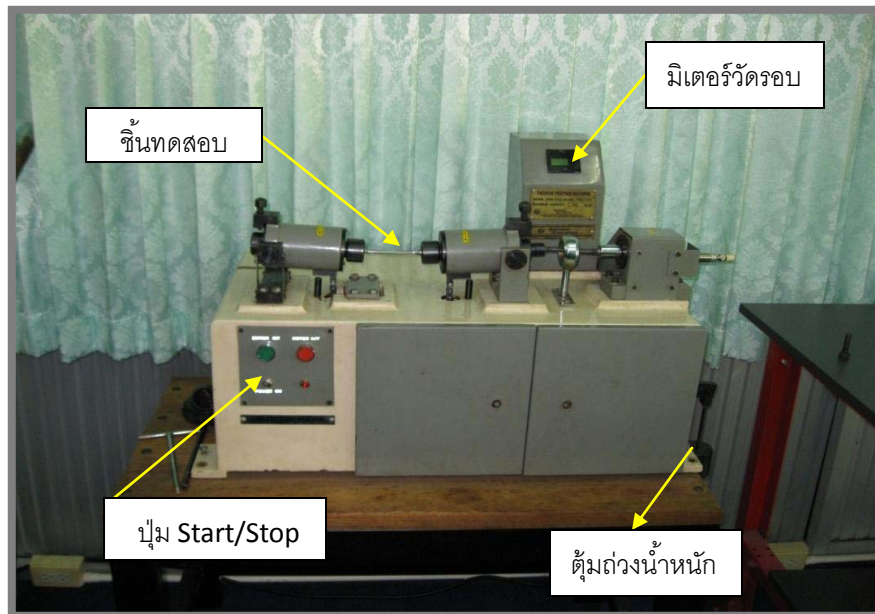
2.2.4 อุปกรณ์เครื่องมือวัดละเอียดได้แก่เวอร์เนียส ตลับเมตร ฟीलเลอร์เกจ



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์เครื่องมือวัดละเอียด

2.2.5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงล้าแบบคานหมุน

เครื่องทดสอบความแข็งแรงล้าแบบคานหมุน รูปที่ 2.5 ให้การะแบบหมุนคด (Rotating Bending) มีความเร็วรอบ 4,200 รอบต่อนาที ผลิตโดยบริษัท Ratnakar enterprises ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



รูปที่ 2.5 แสดงเครื่องทดสอบความล้าแบบคานหมุน

2.2.6 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า



รูปที่ 2.6 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงล้า

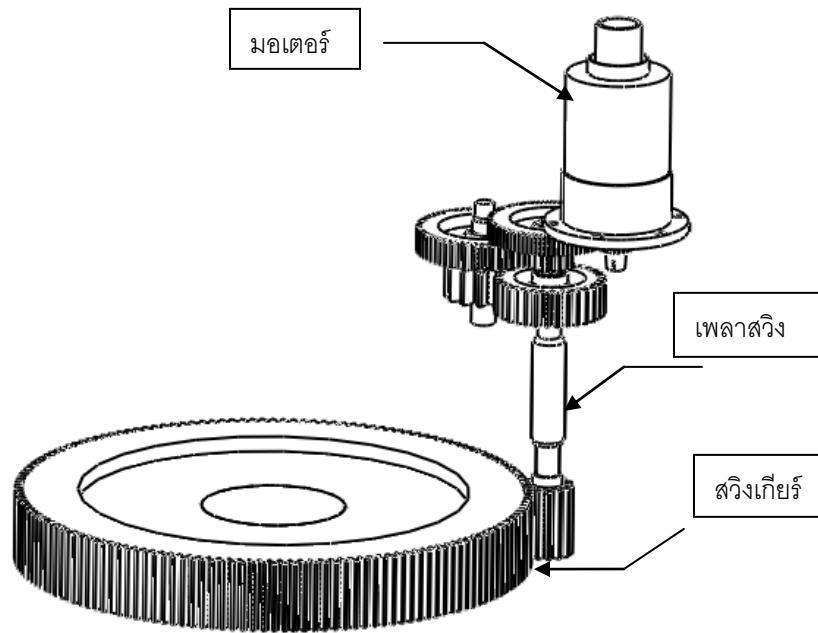
2.3 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย

2.3.1 ศึกษาการชำรุดของเพลาสวิงในรูปที่ 2.7 โดยการตรวจพินิจผิวรอยแตกของเพลาด้วยตาเปล่า ระบุลักษณะของการชำรุด บริเวณเริ่มต้นของผิวรอยแตกและบริเวณสุดท้ายที่เพลาลาขาด



รูปที่ 2.7 ลักษณะการชำรุดของเพลาสวิง

2.3.2 ศึกษากลไกการทำงานของระบบส่งกำลังแบบสวิงและศึกษากลไกการทำงานของเพลาสวิงขณะรับส่งกำลังจากสวิงมอเตอร์ไปยังสวิงเกียร์จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองของระบบส่งกำลังแบบสวิงดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบส่งกำลังแบบสวิง

2.3.3 ใช้แคลมป์มิเตอร์ ตรวจสอบวัดกระแสไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์ แล้วใช้เครื่องวัดความเร็วรอบวัดรอบมอเตอร์ พารามิเตอร์ที่ได้จากการตรวจวัดนี้จะถูกนำมาคำนวณหาค่ากำลังของมอเตอร์โดยใช้สมการที่ (2.1) จากนั้นจึงนับจำนวนฟันเฟืองข้อมูลแสดงดังตารางที่ 2.1 เพื่อคำนวณการส่งถ่ายแรงจากมอเตอร์สวิงผ่านชุดเฟืองไปยังเพลลาสวิง โดยใช้หลักการการส่งถ่ายกำลังของชุดเฟืองตรงในสมการที่ (2.2) และสมการ (2.3) วิเคราะห์แรงที่กระทำกับฟันสไปลน์ โดยใช้สมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5)

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลจำนวนฟันของชุดเฟืองขับและเฟืองตาม

ลำดับชุดเฟือง	จำนวนฟันของเฟืองขับ	จำนวนฟันของเฟืองตาม
ชุดที่ 1	20	84
ชุดที่ 2	15	60
ชุดที่ 3	13	32

$$\Xi/hp0| \frac{IV \Delta eff}{746} \quad (2.1)$$

$$n_3 | \frac{K_2}{K_3} n_2 \quad (2.2)$$

$$\Pi | 63,000 \frac{\Xi}{K} \quad (2.3)$$

$$F_{AT} | \frac{2\Pi}{R} \quad (2.4)$$

$$F_{AN} | F_{AT} \tan 30^0 \quad (2.5)$$

โดย P คือ กำลังมอเตอร์ขณะที่ใช้ขับเคลื่อน eff คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์
n คือ จำนวนฟันของเฟืองเกียร์ F_{AT} คือ แรงกระทำแนวแทนเจนต์ ณ ตำแหน่ง A
T คือ แรงบิด F_{AN} คือ แรงกระทำแนวตั้งฉาก ณ ตำแหน่ง A

จากนั้นทำการย้ายแรงจากฟันสไปลงไปยังตำแหน่งที่เพลลาขาด เกิดโมเมนต์คัตในสองแนวแกนซึ่งคำนวณค่าได้จากสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7 และคำนวณค่าผลรวมของโมเมนต์คัตด้วยสมการที่ 2.8

$$I_{xy} | F_{AT} \Delta R \quad (2.6)$$

$$I_{yz} | F_{AN} \Delta R \quad (2.7)$$

$$I_{all} | \sqrt{I_{xy}^2 + 2I_{yz}^2} \quad (2.8)$$

ภาระบิดคัตที่บ่าเพลลาต้องแบกรับนั้นสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการหาค่าความเค้นหลักสูงสุดต่ำสุด บริเวณบ่าเพลลาดังสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10 และสามารถหาค่าความเค้นรวมได้จากการคำนวณโดยอาศัยสมการที่ 2.11

$$\omega_{\max}, \omega_{\min} \mid \frac{16}{\phi d^3} \Psi \partial \sqrt{I^2 + 2 \Pi^2} \quad (2.9)$$

$$\vartheta_{\max}, \vartheta_{\min} \mid \partial \frac{16}{\phi d^3} \sqrt{I^2 + 2 \Pi^2} \quad (2.10)$$

$$\omega_{a,e} \mid \sqrt{\omega_a^2 + 3 \vartheta_a^2} \quad (2.11)$$

โดย ϑ_a คือ แอมพลิจูดความเค้นเฉือนสลั็บ ω_a คือ แอมพลิจูดความเค้นดัดสลั็บ

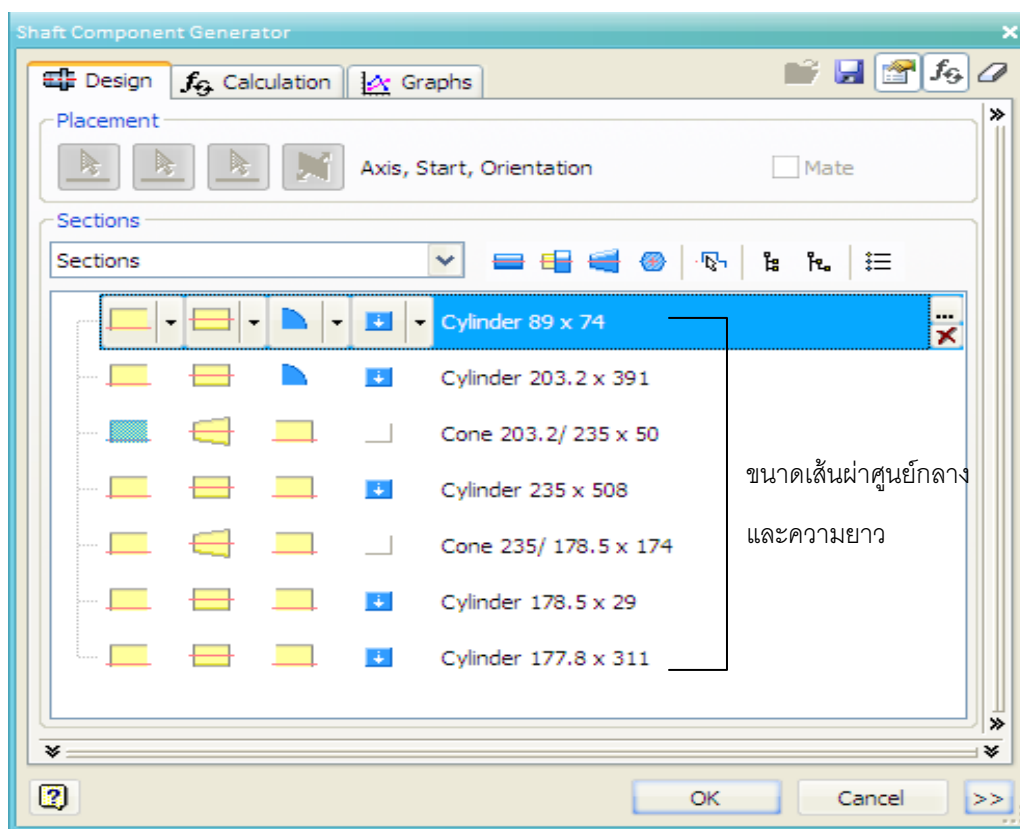
2.3.4 ตรวจสอบวัดรายละเอียดของเพลลาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์รูปร่างและขนาดสไปลัน (Spline) ของเพลลาข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์รูปร่างและขนาดสไปลัน (Spline)

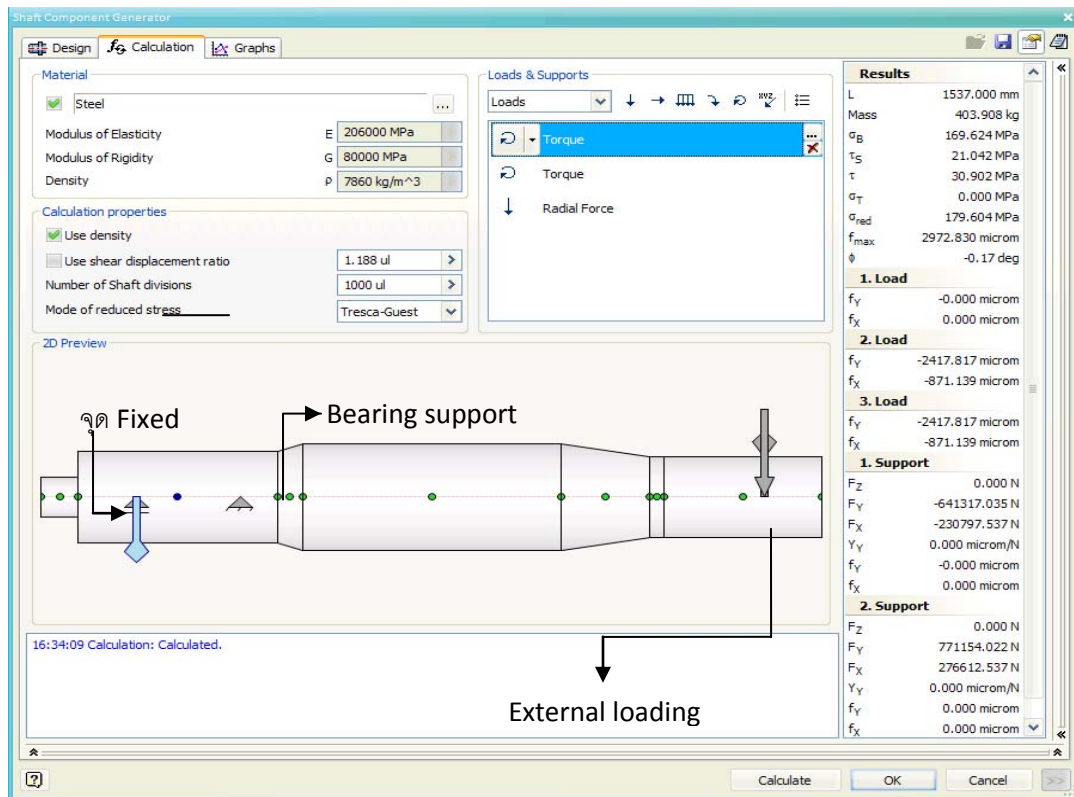
EXTERNAL INVOLUTE SPLINE DATA		
FILLET ROOT SIDE FIT	SPLINE-PINION(A)	SPLINE-PINION(B)
NUMBER OF TEETH	31	27
PITCH	4/8	4/8
PRESSURE ANGLE	30 ⁰	30 ⁰
BASE DIAMETER	170.459 mm	148.463 mm
PITCH DIAMETER	196.850 mm	171.450 mm
MAJOR DIAMETER	203.200 mm	177.800 mm
FORM DIAMETER	202.996 mm	164.414 mm
MINOR DIAMETER	185.240 mm	160.020 mm

จากการคำนวณภาวะบิดคดของเพลานในข้างต้นสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าความ
เค้นที่เกิดขึ้นกับเนื้อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่เพลายึดตามทฤษฎีสมมูลของคานดั่งที่ได้กล่าวมาแล้ว

ขั้นตอนต่อไปเป็นการ สอบเทียบความถูกต้อง ในการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม Shaft
Component Generation แสดงรายละเอียดแผนภาพภาระกระทำเชิงกลของเพลาชึ่งวิธีการวิเคราะห์
คือ สร้างแบบจำลองเพลาลแล้วใส่สมบัติวัสดุที่ใช้ทำเพลาล เนื่องเ้าไขการจับยึดและภาระแรง ดังรูปที่
2.9 และ 2.10 จากนั้นใช้คำสั่งประมวลผลให้เพลาลคำนวณค่าต่างๆตามแต่ต้องการ



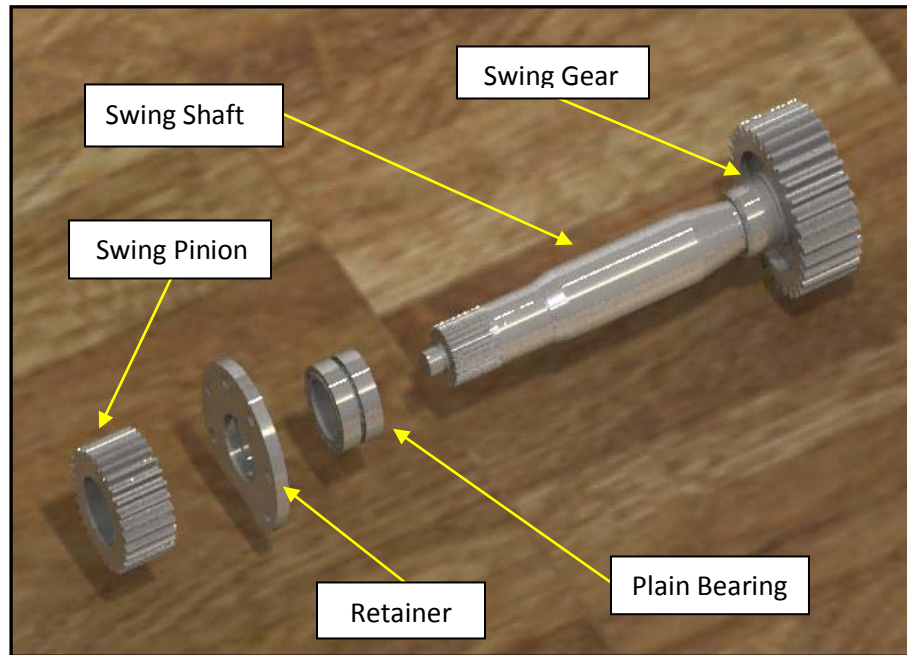
รูปที่ 2.9 รายละเอียดแบบจำลองเพลาล



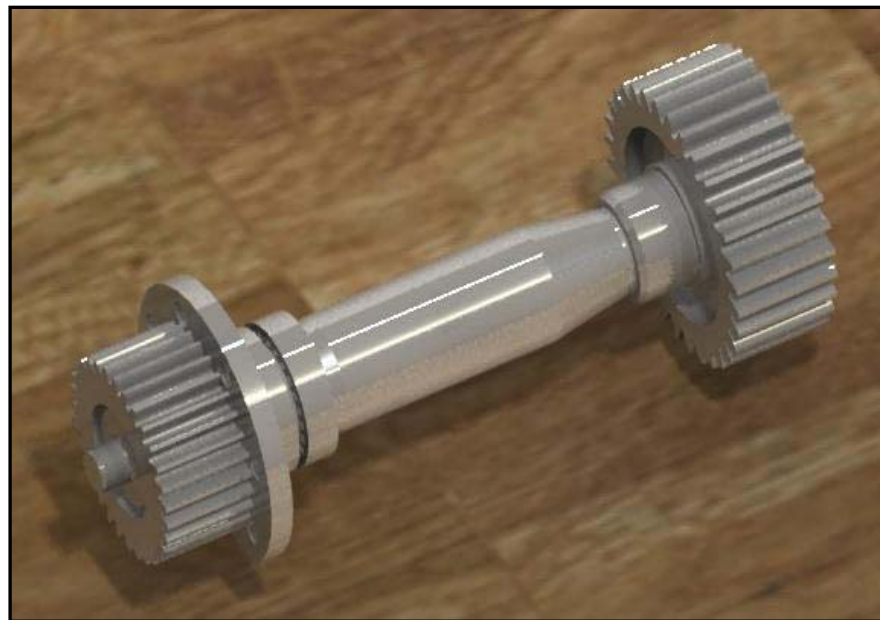
รูปที่ 2.10 เงื่อนไขการจับยึดและภาระแรง

2.3.5 สร้างแบบจำลองแสดงชิ้นส่วนประกอบของเพลาสวิงในรูปที่ 2.11 แล้วทำการประกอบชิ้นส่วนให้เป็นดังรูปที่ 2.12 ส่งแบบจำลองที่ประกอบแล้วนี้ไปวิเคราะห์หาค่าความเค้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป โดยวิธีการสร้างแบบจำลองเป็นดังต่อไปนี้

- สร้างตัวเพลาด้วยโปรแกรมเขียนแบบ 3 มิติ (Solidwork) นามสกุลไฟล์เป็น .prt
- สร้างฟันเฟืองด้วยโปรแกรมออกแบบเกียร์ (Camnetics Gertrax)
- สร้างฟันสไปลน์และบ่าเพลาระบบโค้งด้วยโปรแกรมออกแบบสไปลน์ (Involute Spline connection) และโปรแกรมออกแบบเพลาสวิง (Shaft Component Generator)
- ประกอบชิ้นส่วนเพลาสวิงเข้าด้วยกันในโปรแกรมเขียนแบบ 3 มิติ (Autodesk Inventor) นามสกุลไฟล์เป็น .iam
- ทำการส่งชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



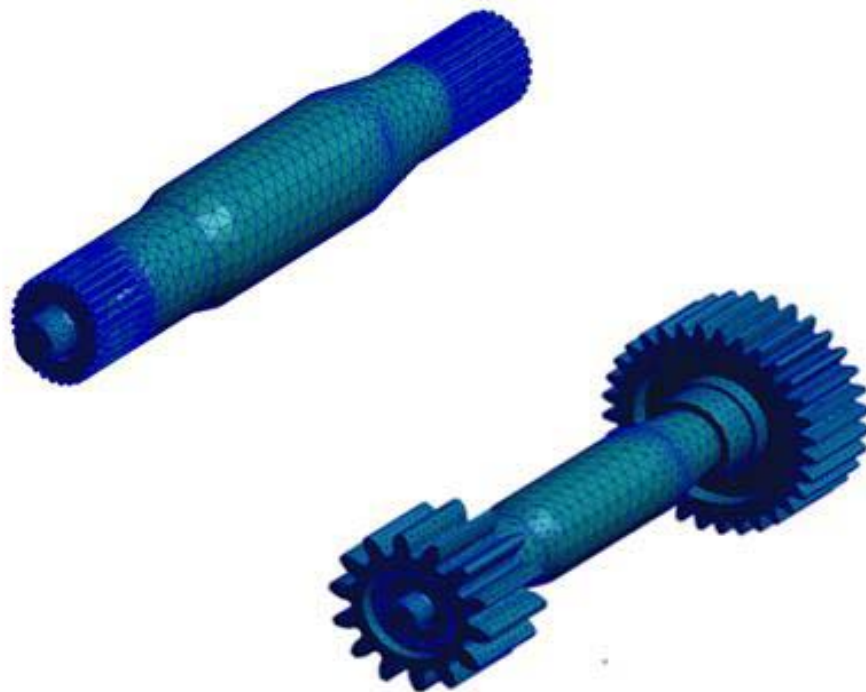
รูปที่ 2.11 ชิ้นส่วนประกอบต่างๆของเพลาสวิง



รูปที่ 2.12 แบบจำลองเพลาสวิงที่จะส่งไปวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3.6 ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมวิเคราะห์หาค่าความเค้นและบริเวณความเข้มข้นความเค้นของเพลาสวิงอีกทั้งใช้หาค่าตัวประกอบความหนาแน่นความเข้มข้นความเค้นบริเวณบ่าเพลาสวิง (Fillet Shoulder) ซึ่งไม่สามารถคำนวณมือได้ ซึ่งในการวิเคราะห์ใช้วิธีการดังต่อไปนี้

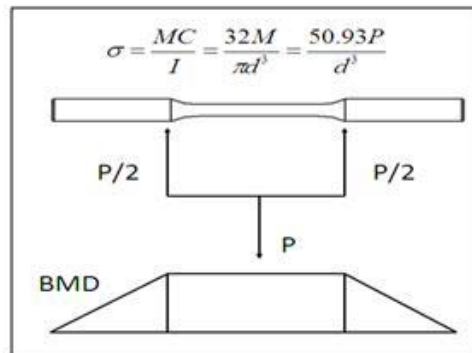
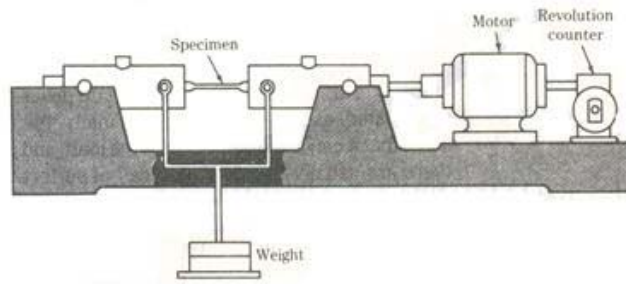
- ทำการจัดการแปลงไฟล์ CAD เป็น Para solid ไฟล์สกุล*.xmt
- ทำการนำเข้า (Import) แบบจำลองชิ้นงานเพลาสวิง (Swing Shaft) แล้วตรวจสอบว่านำเข้าได้ 100% หรือไม่และเป็นรูปแบบใด เหมาะสมหรือไม่
- ทำการตีเมช (mesh) ให้กับชิ้นงาน พิจารณารูปร่างชิ้นงานว่าเหมาะกับเอลิเมนต์รูปทรงแบบไหนความละเอียดของเอลิเมนต์มากน้อยเพียงใดบริเวณใดควรควบคุม Mesh ให้ละเอียดเป็นพิเศษโดยในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์แบบ Tet10 (พีระมิด 4 หน้า 10 จุดต่อ) ซึ่งเหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และควบคุมเมช (Mesh) ให้ละเอียดเป็นพิเศษในบริเวณพื้นที่ที่มีความเข้มข้นความเค้นสูงดังแสดงในรูปที่ 2.13
- กำหนดภาระแรงและเงื่อนไขการจับยึด แบบจำลองเพลาสวิง (Swing shaft) มี support 1 จุด บริเวณที่เป็นแบร์ริงกัป (Plane Bearing) โดยกำหนดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกนแต่สามารถหมุนรอบแกนได้ และ Fix ปลายเพลาช้างหนึ่งไว้ ส่วนอีกข้างใส่แรงกระทำทำให้เพลาสวิงที่ Spline ของเพลาสวิง โดยแรงกระทำที่ใส่ให้เพลาสวิง ก่อให้เกิดแรงคัต และสร้าง node เพื่อเป็นจุดหมุนทำการใส่ทอร์กก่อก่อให้เกิดแรงบิด ดังนั้นภาระที่เพลาสวิงต้องแบกรับจึงเป็นภาระบิดคัต
- สร้างคุณสมบัติของวัสดุ โดยใช้สมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI4340
- กำหนดคุณสมบัติ (Properties) ให้กับเอลิเมนต์ตามความเหมาะสม
- วิเคราะห์ปัญหาด้วย MSC. Nastran (Post- Processing)
- ดึงผลลัพธ์เข้าสู่ MSC. Patran (Pre-Processing) ดูผลลัพธ์การกระจายตัวของค่าความเค้นในแนวแกนหลัก (Principal Stress) และค่าความเค้นรวม (Vonmises Stress)



รูปที่ 2.13 แบบจำลองเพลาสวิงที่ตีเมช (mesh) แล้วพร้อมเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์

2.3.7 ทำการทดสอบความล้า (Fatigue Testing) ของเนื้อวัสดุฐาน (เหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI4340) และเนื้อเชื่อมพอกผิวจาก 3 กรรมวิธีการเชื่อม (SMAW, FCAW, MAG) ซึ่งในงานวิจัยนี้ ชิ้นทดสอบจะไม่มีรอยบาก และต้องรับภาระความล้าแบบหมุนตัด โดยชิ้นทดสอบจะสวมด้วยรองเพลาท่างกัน 100 มิลลิเมตร มีภาระ (น้ำหนักห้อยแขวน) คงที่ (P) ทำให้เกิดค่าโมเมนต์คงที่และในการหมุน 1 รอบ จะเกิดความเค้นตัดสลับไปมาบนชิ้นทดสอบดังรูปที่ 2.14 ที่ขึ้นลงบนแกนที่มีค่าความเค้นเฉลี่ยเป็นศูนย์ เมื่อหมุนไปนานๆ ค่าความเค้นแอมพลิจูดจะตกลงเรื่อยๆ จนชิ้นทดสอบขาดได้ค่าจำนวนรอบมากรอกในตารางที่ 2.3 ซึ่งชิ้นงานที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้มีดังนี้

1. ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมซ่อมเป็นเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI4340
2. ชิ้นงานที่เป็นเนื้อเชื่อมบริสุทธิ์จาก 3 กรรมวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกันได้แก่ การเชื่อมไฟฟ้าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) การเชื่อมอาร์คภายใต้แก๊สคลุม (MAG) และการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)



รูปที่ 2.14 ภาวะความเค้นหมุนดัดขณะทำการทดสอบ

➤ ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.15



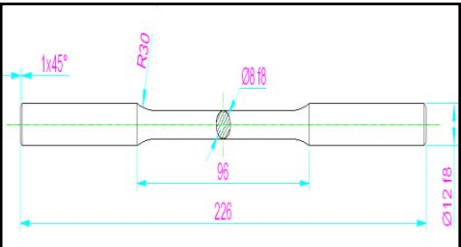
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ตัดชิ้นงาน โดยใช้เลื่อยมือแล้วกลึงชิ้นงานให้ได้ขนาดตามแบบ ส่วนผิวงานใช้
กระดาษทราย ตะไบละเอียด ตบแต่งผิวชิ้นงานให้เรียบเป็นมันปราศจากออกไซด์หรือวัสดุหล่น
และต้องได้ระดับ

➤ ขั้นตอนวิธีการทดสอบ

1. ยึดชิ้นทดสอบให้แน่น
2. ตั้งตัวนับรอบอยู่ที่ศูนย์
3. ให้การะมัดแก่ชิ้นทดสอบ
4. ปรับตั้งระยะกะประมาณเมื่อชิ้นทดสอบขาด ให้เรื่อนวงแหวนครอบลูกปืนรอง
เพลาลูกกลิ้งของไมโครสวิตช์ปิดกระแสไฟทำให้มอเตอร์หยุดหมุน
5. เสียบปลั๊กและกดปุ่มให้เครื่องทำงาน
6. บันทึกค่าแรง $F(N)$ เมื่อเครื่องหมุนได้ตามจำนวนรอบในตารางทดสอบ
คำนวณหาค่าความเค้นนำมาพล็อตกราฟแผนภาพโวห์เลอร์ (Wohler)
7. กรณีฉุกเฉินในขณะที่ทดสอบ ให้กดสวิตช์ฉุกเฉินที่ด้านขวาของเครื่อง

ตารางที่ 2.3 ตารางบันทึกผลการทดสอบค่าความแข็งแรงล้า

ชนิดทดสอบ	หมายเลข		<div style="text-align: center;"> ชนิดทดสอบ  </div>		
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_0)				
	ความยาวก่อนดึง (L_0)				
	ความยาวทดสอบ (L_g)				
	ความยาวรวม (L_t)				
	รัศมีโค้ง (R)				
ผลการทดลอง	แรง (N)	โมเมนต์ดัด (N.m)	$\frac{\phi}{32} d^3$	$\omega \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	จำนวนรอบที่ขาด N
	35.2			350	
	40.2			400	
	50.3			500	
	60.3			600	
	70.3			700	
	80.4			800	

ทดสอบโดยการเปลี่ยนน้ำหนัก ซึ่งได้ค่าโมเมนต์ดัดและค่าความเค้นปกติเปลี่ยนแปลงตาม โดยทดสอบเปลี่ยนค่าน้ำหนัก 6 ค่า แต่ละค่าทดสอบ 6 ตัวอย่าง ตามคำแนะนำมาตรฐาน ASTM E739-91 และพิจารณาการกระจายของข้อมูล ไม่ควรกระจายตัวมากเกินไป หากข้อมูลใดมีการกระจายตัวมากเกินไปให้ทำการตัดออก และทำการทดสอบใหม่

2.3.8 ทำการกระชับข้อมูลโดยใช้หลักการกำลังสองน้อยสุด (Least square criterion) คือการทำผลรวมกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อน ให้มีค่าน้อยที่สุด จากสมการแบบอื่นๆที่ไม่ได้อยู่ในรูปเชิงเส้น $y = a_0 + a_1 x$ เราสามารถเปลี่ยนสมการเหล่านั้น โดยการกระชับข้อมูล ให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบสมการกำลัง $y = a_2 x^{b_2}$ ทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้โดยการแปลงลอการิทึม (logarithmic transformation) ทั้งสองข้างเป็น $\log y = \log a_2 + b_2 \log x$

$$\text{โดย } b_2 \mid \frac{n \sum \tilde{x}_i \tilde{y}_i - 4 \sum \tilde{x}_i \tilde{y}_i}{n \sum \tilde{x}_i^2 - 4 \sum \tilde{x}_i} \text{ และ } \tilde{a}_2 \mid \frac{\sum \tilde{y}_i - 4 \sum \tilde{x}_i}{n - 4} \text{ และ } a_2 \mid 10^{\tilde{a}_2}$$

เมื่อทราบค่าตัวแปรต่างก็จะนำไปสู่สมการที่ต้องการคือสมการที่ 2.12

$$y \mid a_2 x^{b_2} \tag{2.12}$$

2.3.9 ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมความเค้นและ หาคอบเขตการวิบัติของเพลาสวิง โดยกรอกข้อมูลสมบัติเชิงกลของ วัสดุ และข้อมูลจากการทดสอบความล้าในตารางที่ 2.4 เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ผลรวม

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุ

วัสดุ	ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa)	ค่าความแข็งแรงคราก (MPa)	ค่าความแข็งแรงล้า (MPa)
AISI4340	1044	918	375
เนื้อเชื่อม FCAW	760	680	370
เนื้อเชื่อม SMAW	840	780	355
เนื้อเชื่อม MAG	900	800	360

2.3.10 ใช้แฟกเตอร์ปรับปรุงค่าความแข็งแรงล้าตาม Marine equation ในสมการที่ 2.13 จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการในการประเมินอายุความล้าของเพลาสวิง

$$S_e \mid K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_e' \tag{2.13}$$

โดย S_e' ได้มาจากผลการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบ

2.3.11 ประเมินอายุความล้าของเพลาสวิง ด้วยหลักการ Stress life approach (S-N diagram) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาความล้าประเภท High Cycle Fatigue โดยอธิบายรายละเอียดไว้ในทฤษฎีการประเมินอายุความล้าในบทที่ 1 ซึ่งเพลานำเข้าสู่การประเมินคือเพลาสวิง โดยจะแสดงผลในรูปแบบของ stress concentration และประเมิน อายุการใช้งาน ในรูปของ cycle loading โดยใช้สมการที่ 2.14 ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดลอง จากการ กระจายข้อมูลด้วยวิธีการในหัวข้อ 2.48 จากนั้น ใช้แฟกเตอร์ปรับปรุงค่าความแข็งแรงล้า ประยุกต์ใช้ S-N Curve ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการทดสอบความแข็งแรงล้าเพื่อหาขอบเขตของการวิบัติ และเปรียบเทียบอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกจาก 3 กรรมวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกัน

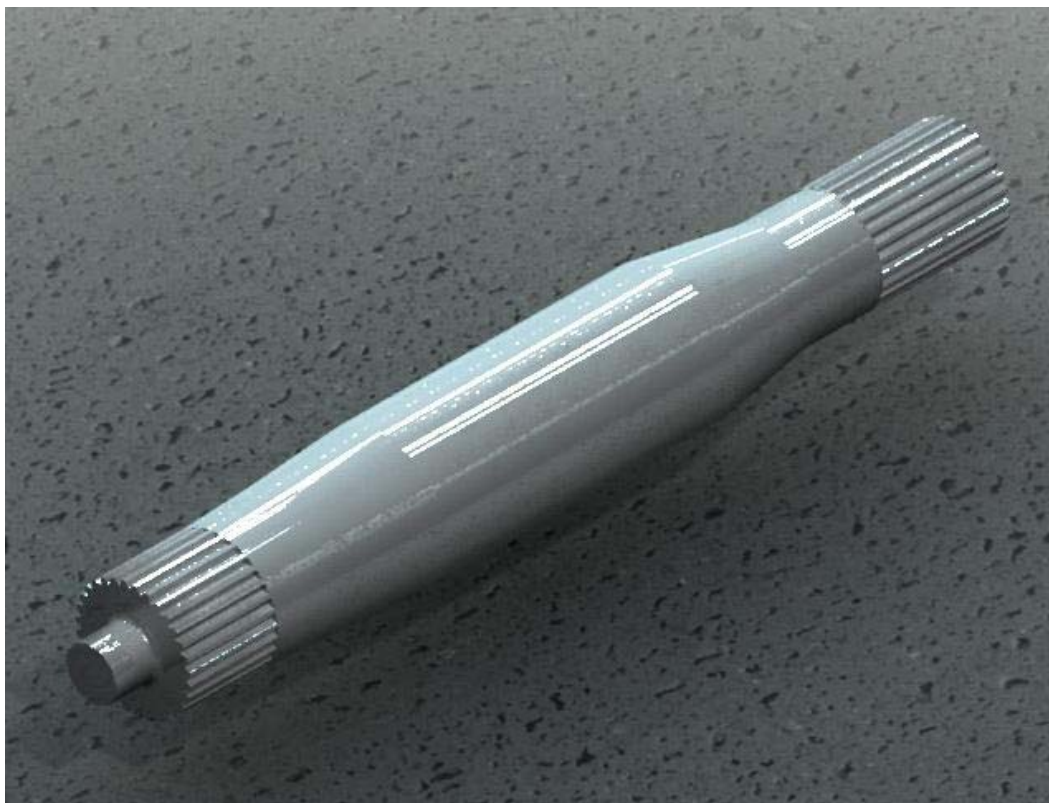
$$\pm | \omega_R K_R^B \tag{2.14}$$

โดยค่า A และ B หาได้จาก S-N Curve ที่ผ่านการกระจายข้อมูลด้วยวิธีการในหัวข้อที่ 2.48 โดยใช้ค่าจากตาราง 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลของค่าความเค้นล้ากับอายุความล้าก่อนทำการกระจาย

ความเค้น (MPa)	อายุ (รอบ)			
	MMA	MIG/MAG	FCAW	Base Metal
300	-	-	6,713,160	-
350	1,166,063	1,582,570	1,467,630	-
400	203,481	202,039	804,931	435,609
500	86,168	39,854	105,401	-
600	52,474	-	216760	85,546
700	4,270	3,663	51,210	13,025
800	-	-	1710	11,831

2.3.12 ออกแบบเพลาสวิง ใหม่เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ในการซ่อมบำรุงรถชุดไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยแนวคิดในการวิเคราะห์ออกแบบจะยึดความสามารถในการลดค่าความเค้นคัตเป็นหลัก โดยการปรับเปลี่ยนระยะ และปรับเปลี่ยนรูปร่างของปาเพลลาแบบโค้งเป็นปาเพลลาแบบลาดเอียง ซึ่งแบบจำลองของเพลาสวิงตัวใหม่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 โดยโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ มี 3 ส่วน คือ โปรแกรม Shaft Component Generation ใช้สร้างตัวเพลลา โปรแกรม Involute Spline connection ใช้สร้างฟันสไปลัน และโปรแกรม Autodesk Inventer ใช้ประกอบชุดเพลลาไฟล์นามสกุล .asm จากนั้นทำการวิเคราะห์ประมวลผลค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลลาที่ออกแบบใหม่ ทำการประเมินเปรียบเทียบกับอายุการใช้งานของเพลลาตัวเดิมกับตัวที่ออกแบบใหม่ และใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมทวนสอบอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 2.16 แบบจำลองของเพลาสวิงตัวที่ออกแบบใหม่

2.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงขอสรุปวิธีการดำเนินงานวิจัยไว้ดังต่อไปนี้

- เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่เหมืองแม่เมาะการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและศึกษามาตรฐานวิธีการออกแบบเพลลาและเฟืองเกียร์
- คำนวณการส่งถ่ายกำลังของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลลาสวิง
- สร้างแบบจำลองของเพลลาสวิงและใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ผลความเค้นและบริเวณความเข้มข้นความเค้นที่เกิดขึ้นบนเพลลาสวิงเพื่อทวนสอบความถูกต้องของการคำนวณ และเพื่อหาตัวประกอบความหนาแน่นความเค้นล้าในบริเวณที่มีรูปร่างซับซ้อน
- สร้างแผนภาพขอบเขตของการวิบัติและแผนภาพทำนายอายุความล้า
- ประเมินอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกัน
- ออกแบบเพลลาสวิงตัวใหม่เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับเพลลาสวิงตัวเก่า

2.5 เป้าหมายในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย

2.5.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

- สามารถระบุปริมาณกระแสไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์ในแต่ละเงื่อนไขการทำงาน
- สามารถระบุความเร็วรอบของมอเตอร์ในแต่ละเงื่อนไขการทำงาน
- สามารถระบุลักษณะการชำรุดของเพลลา

2.5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาภาระที่เพลลา ต้องแบกรับขณะใช้งาน

- วิเคราะห์การส่งถ่ายแรงของชิ้นส่วนทางกล
- สามารถระบุทอร์กในแต่ละช่วงการส่งถ่ายแรงของชุดเกียร์
- สามารถอธิบายการส่งถ่ายแรงจากชุดเกียร์มายังเพลลา
- วิเคราะห์ค่าความเค้น (Stress Analysis)
- สามารถชี้แจงการแก้ปัญหาด้วยการคำนวณ (Analytical Solution)
- สามารถพิสูจน์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

2.5.3 ขั้นตอนการศึกษาความแข็งแรงล้าของชิ้นทดสอบ (Specimen)

- สามารถเปรียบเทียบอายุความล้าของเนื้อเชื่อม (Weld metal) จากแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม
- สามารถเปรียบเทียบอายุความล้าของเนื้อเชื่อม (Weld metal) กับ โลหะฐาน (base metal)

2.5.4 ขั้นตอนการประเมินอายุความล้าของเพลาสวิง (Swing Shaft)

- สามารถอธิบายกลไกความล้า (Fatigue Mechanism Analysis)
- สามารถเข้าใจขอบเขตของการวิบัติ (Fatigue Criteria Analysis)
- สามารถทำนายอายุความล้า (Fatigue life prediction) ของเพลาสวิง (Swing shaft)

2.5.5 การนำไปใช้จริง

- สามารถออกแบบเพลานใหม่เพื่อเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งแก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิต

บทที่ 3

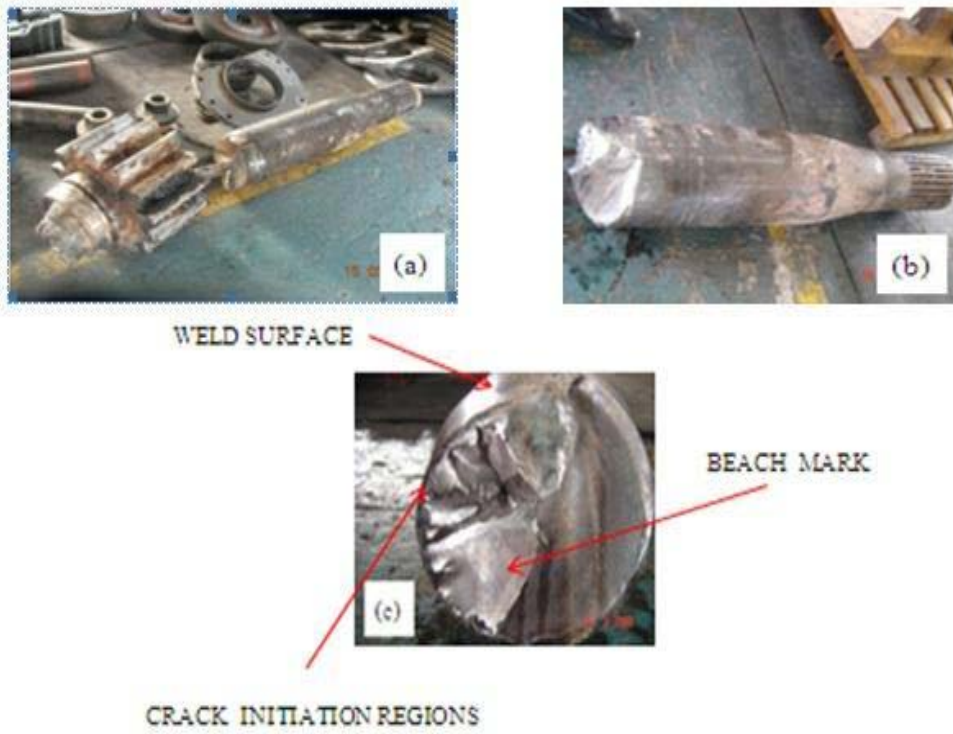
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

เนื้อหาภายในบทนี้เป็นการนำเสนอข้อมูลและผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละขั้นตอน การดำเนินงานวิจัย โดยจะแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ ผลการตรวจสอบฟิวรอยแตก ผลการทดสอบความแข็งแรงล้า ผลการคำนวณค่าความเค้น และผลการประเมินอายุความล้า โดยจะสอดแทรกแนวคิดในการวิเคราะห์ควบคู่ไปด้วย และสิ่งสุดท้ายที่จะนำเสนอคือการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 ผลการตรวจสอบฟิวรอยแตก

จากการตรวจสอบการชำรุดเบื้องต้นด้วยการตรวจพินิจฟิวรอยแตกของเพลลาในรูปที่ 3.1 พบว่าฟิวรอยแตกค่อนข้างหยาบและขรุขระ ฟิวรอยแตกทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวแกนของเพลลา ซึ่งทิศทางการแตกในลักษณะนี้คล้ายการแตกแบบเปราะด้วยภาวะบิดสถิตย์ วงรอบการขยายตัวของรอยแตกในแต่ละชั้นค่อนข้างห่าง โดยจุดเริ่มต้นของรอยแตกมีหลายจุด (Multi-Origin) โดยเริ่มจากบริเวณบ่าเพลลาแบบโค้ง (Fillet Shoulder) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรอยแตกขยายเป็นวงกว้างเข้าไปในเนื้อเพลลาโดยเห็นBeach markชัดเจน ทำให้พื้นที่ในการรับแรงของเพลลาลดลงส่งผลให้ค่าความเค้นบริเวณนั้นสูงขึ้นจนกระทั่งเพลลาเริ่มเกิดการก้มงอทำให้เกิดบริเวณการวิบัติอย่างฉับพลัน (Over Load) ส่งผลให้เพลลาขาดอย่างทันทีทันใดในขณะที่ใช้งาน

ซึ่งจากข้อมูลลักษณะของฟิวรอยแตกในข้างต้นทำให้ทราบว่าลักษณะการชำรุดของเพลลาเป็นลักษณะการชำรุดด้วยกลไกของความล้าซึ่งมาจากการ ที่เพลลาเริ่มบิดคดเป็นวัฏจักร โดยการเกิดรอยแตกเริ่มต้นนั้นเกิดเนื่องจากบริเวณนั้นมีค่าความเค้นล้าสูง(High fatigue stress) ซึ่งปกติอายุความต้านทานต่อการล้าจะต่ำ (Low cycle fatigue) เกิดการเสียรูปพลาสติก (Plastic deformation) เฉพาะที่ซึ่งเป็นกลไกของการไถล (To-and-fro slip) แต่เมื่อมีรอยแตกเกิดขึ้นแล้วปรากฏว่ากลไกความล้าของการขยายตัวของรอยแตกกลับมีค่าความเค้นล้าต่ำ (Low fatigue stress) ทำให้อายุความล้าหลังเกิดรอยแตกสูงขึ้น (High cycle fatigue)



รูปที่ 3.1 ลักษณะการชำรุดและผิวยรอยแตกของเพลลา



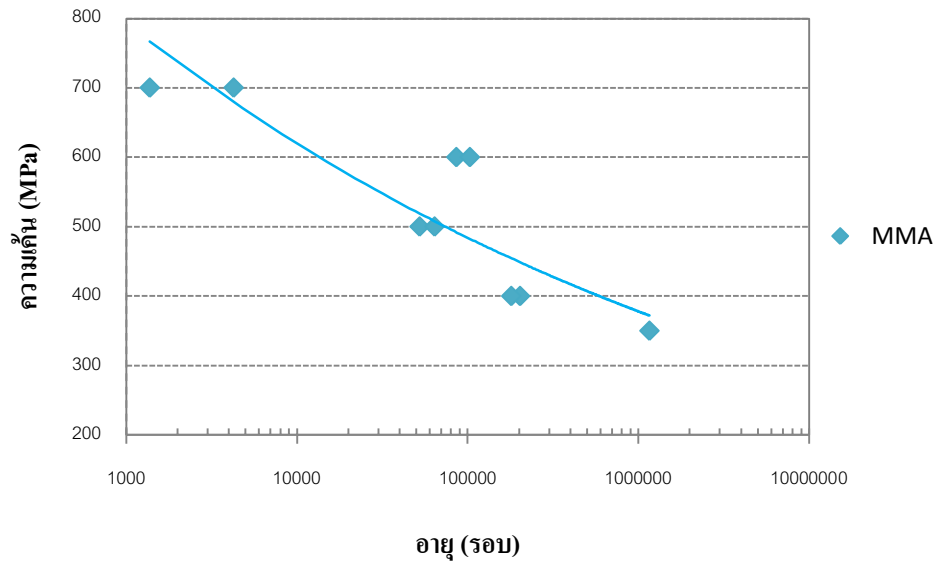
รูปที่ 3.2 บริเวณป่าเพลลาแบบโค้งซึ่งเป็นบริเวณเริ่มต้นของรอยแตก

3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงล้า

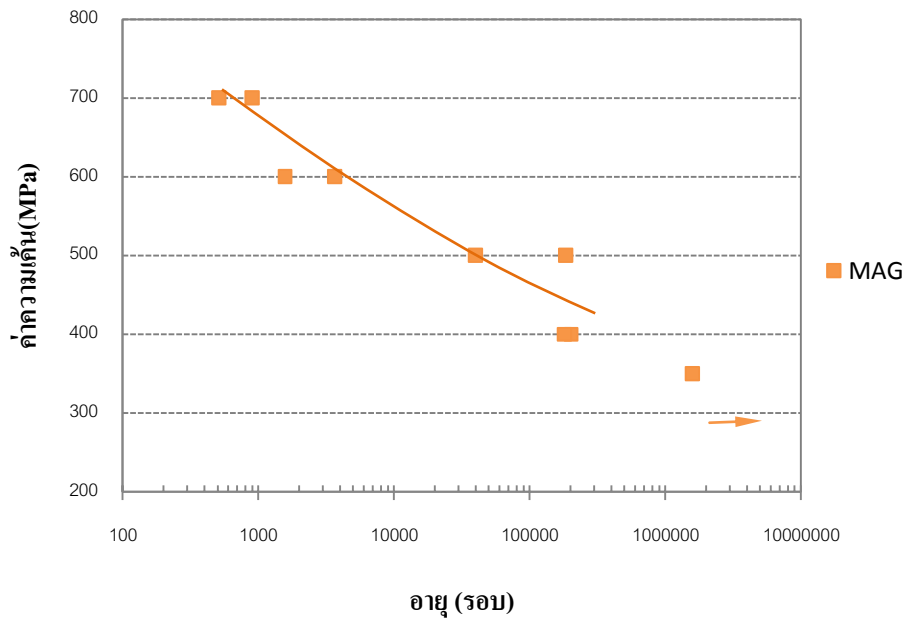
จากการทดสอบความแข็งแรงล้าของชิ้นทดสอบที่เตรียมจากเนื้อเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกัน 3 กรรมวิธี ได้แก่ กรรมวิธีการ เชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกและกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ พบว่ากรรมวิธี การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ให้เนื้อเชื่อมที่มีความสามารถต้านทานต่อการล้าดีที่สุด รองลงมาคือ เนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ส่วนเนื้อเชื่อมที่ได้จาก กรรมวิธี การเชื่อมมิก/แมกนั้นมีค่าความแข็งแรงล้าต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบ ค่าความแข็งแรงล้า ระหว่าง โลหะเนื้อเดิมซึ่งเป็นเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงเกรด AISI 4340 กับเนื้อเชื่อม พบว่า โลหะเนื้อเดิมซึ่งเป็นเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงเกรด AISI 4340 นั้นมีแนวโน้มค่าความแข็งแรงล้าสูงกว่าเนื้อเชื่อม โดยข้อมูลจากการทดสอบความแข็งแรงล้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และนำเสนอกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอายุการใช้งาน (S-N Curve) ของชิ้นทดสอบ ในรูปที่ 3.3 - 3.7 เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเปรียบเทียบ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย

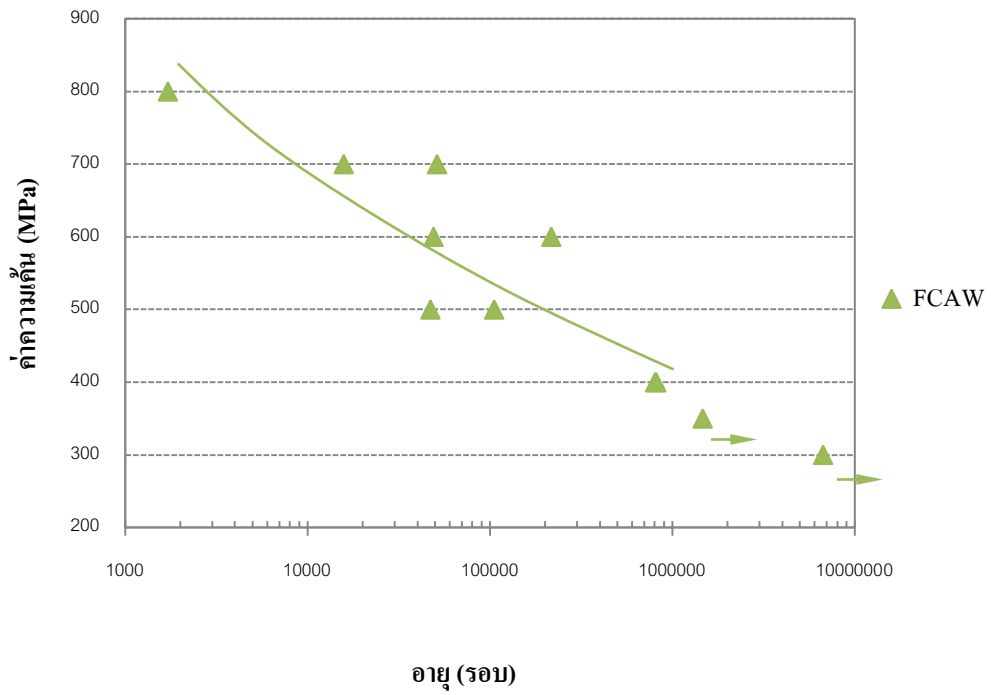
ความเค้น (MPa) (ครั้งที่)	อายุ (รอบ)			
	MMA	MIG/MAG	FCAW	Base Metal
300	-	-	6713160*	-
350	1166063	1582570*	1467630*	-
400 (1)	203481	202039	804931	435609
400 (2)	180793	180793	815756	746380
500 (1)	52474	39854	105401	-
500 (2)	64230	184415	47150	107616
600 (1)	86168	3663	216760	85546
600 (2)	103394	1574	49008	-
700 (1)	4270	510	51210	13025
700 (2)	1377	895	15763	15763
800	-	-	1710	11831



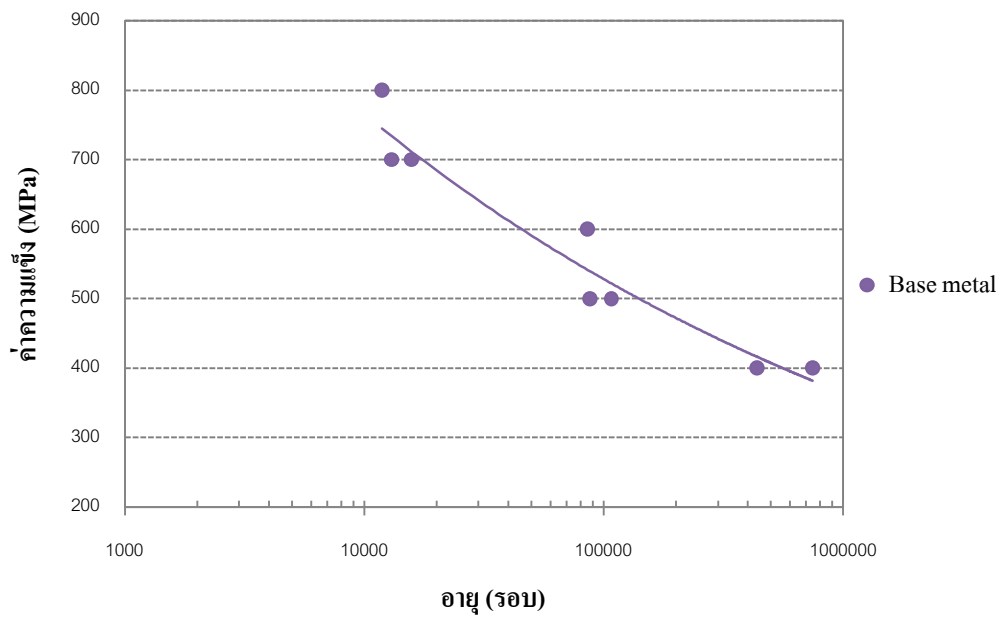
รูป 3.3 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์



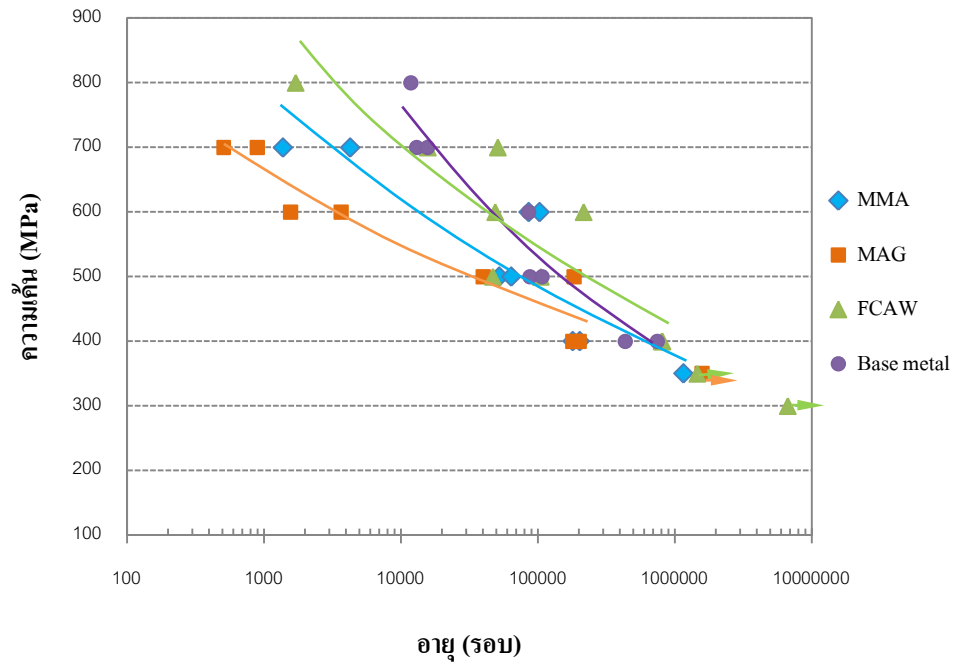
รูป 3.4 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก



รูป 3.5 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้า AISI 4340 ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์



รูป 3.6 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับอายุของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340



รูป 3.7 กราฟเปรียบเทียบความเค้นกับอายุของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์ และเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340

3.3 ผลการคำนวณค่าความเค้น

ในการคำนวณค่าความเค้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ส่วนของการคำนวณมือ (Analytical Solution) โดยใช้ทฤษฎีสถิตดุลของคาน (Beam Equilibrium) ส่วนของวิธีการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบเพลลา (Shaft Component Generation) และส่วนของการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

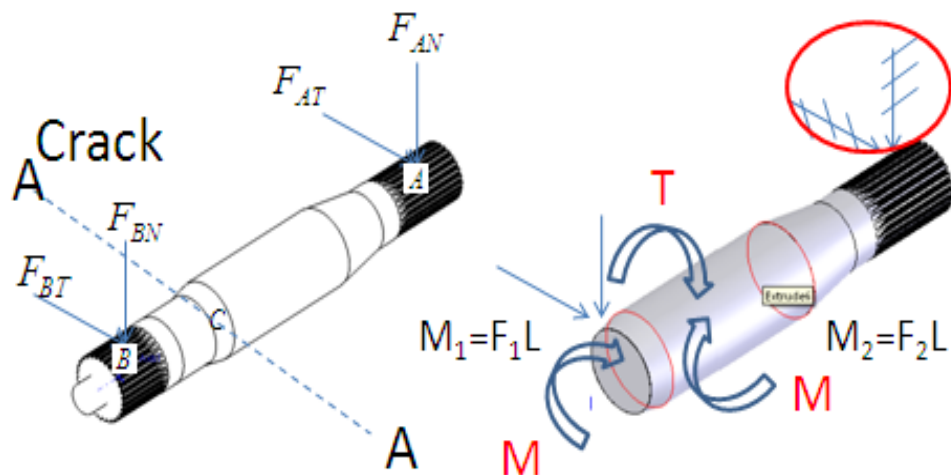
จาก Name plate (ข้อมูลเครื่องจักร) ของสวิงมอเตอร์ แสดงกำลังขับ สูงสุด 95 แรงม้า ความเร็วรอบ 515 รอบต่อนาที เมื่อทำการวัด กระแสและความเร็วรอบของมอเตอร์ ขณะมอเตอร์ทำงานที่ full-load พบว่ากระแสไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์มีค่า 450 แอมแปร์ แกนมอเตอร์พยายามรักษาทอร์คให้คงที่โดยควบคุมความเร็วรอบ 515 รอบต่อนาที ซึ่งประสิทธิภาพของมอเตอร์ 86% จากข้อมูลพารามิเตอร์ข้างต้นนี้สามารถใช้สมการที่ (2.1) หาค่ากำลังที่แท้จริงของมอเตอร์ออกมา ซึ่งมีค่าประมาณ 60 แรงม้า จากนั้นทำการคำนวณการส่งถ่ายแรงจากมอเตอร์ผ่านชุดเกียร์ โดยต้องใช้สมการที่ (2.2) หาค่าความเร็วรอบในแต่ละช่วงการส่งถ่ายแรงออกมาเพื่อแปลง

เป็นค่าทอร์กด้วยสมการที่ 2.3 โดยรายละเอียดข้อมูลของความเร็วรอบและทอร์กได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลความเร็วรอบและทอร์กในแต่ละช่วงของการส่งถ่ายแรง

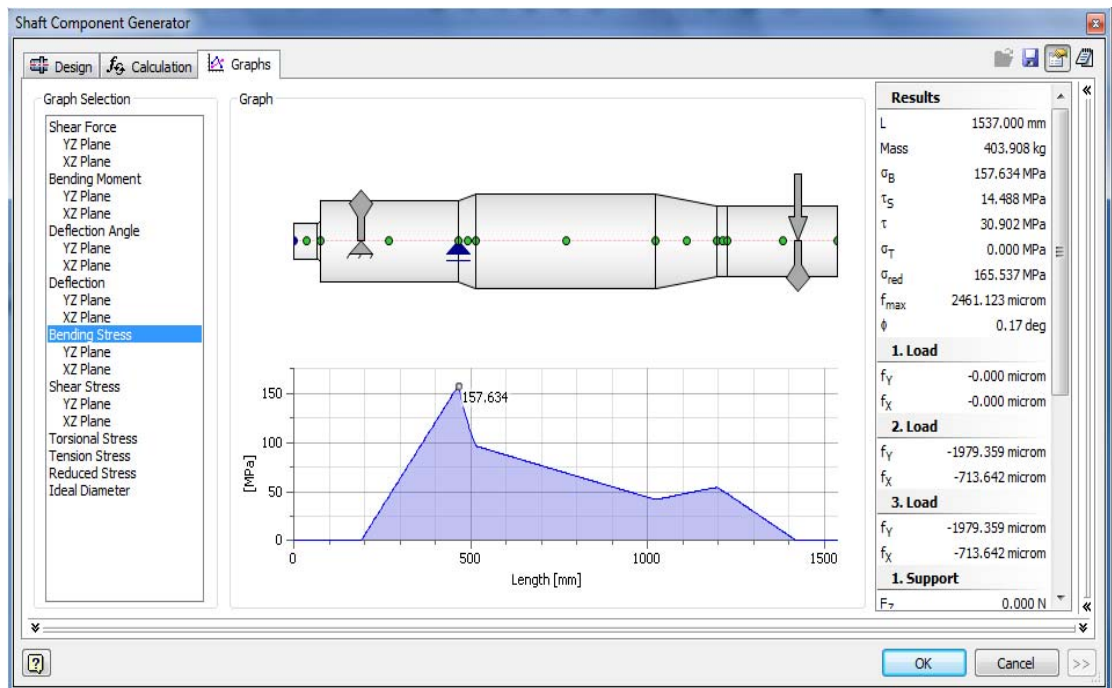
ลำดับชุดเฟือง	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ทอร์ก (นิวตัน-เมตร)
ชุดที่ 1	122.6	3,484
ชุดที่ 2	30.65	13,934
ชุดที่ 3	12.45	34,304

เมื่อมอเตอร์ ส่งกำลังผ่านชุดเกียร์ ไปยังสไปลน์ของ เพลาสวิง แล้ว ได้ทำการวิเคราะห์พบว่า มีแรงกระทำ บริเวณ สไปลน์ในสองแนวแกนคือในแนว Tangential มีค่าเท่ากับ 125,876 นิวตัน โดยใช้สมการที่ 2.4 ในการคำนวณ ในแนว Normal มีค่าเท่ากับ 45,815 นิวตัน โดยใช้สมการที่ (2.5) ในการคำนวณจากนั้นใช้หลักการสมดุลของคานาย้ายแรงจากบริเวณสไปลน์ไปยังตำแหน่งที่เพลาคาดดังแสดงในรูปที่ 3.8 เกิดโมเมนต์คัตในสองแนวแกนซึ่งคำนวณค่าตามสมการที่ (2.6) และ (2.7) ภาระคัตรวมที่เพลาสวิงแบกรับ จำนวนตามสมการที่ (2.8) ค่าที่ได้คือ 128,530 นิวตัน-เมตร ส่วนภาระบิดที่เพลาสวิง แบกรับคือ 34,104 นิวตัน-เมตร จากการแบกรับภาระบิดคัตยังผลให้เพลาสวิงเกิดความเค้นตึงฉากและความเค้นเฉือนสูงสุด 156 MPa และ 81MPa โดยคำนวณตามสมการที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ สุดท้ายใช้สมการที่ (2.11) ในการคำนวณหาค่าความเค้นรวมสูงสุดซึ่งได้ค่าออกมาเป็น 170 MPa



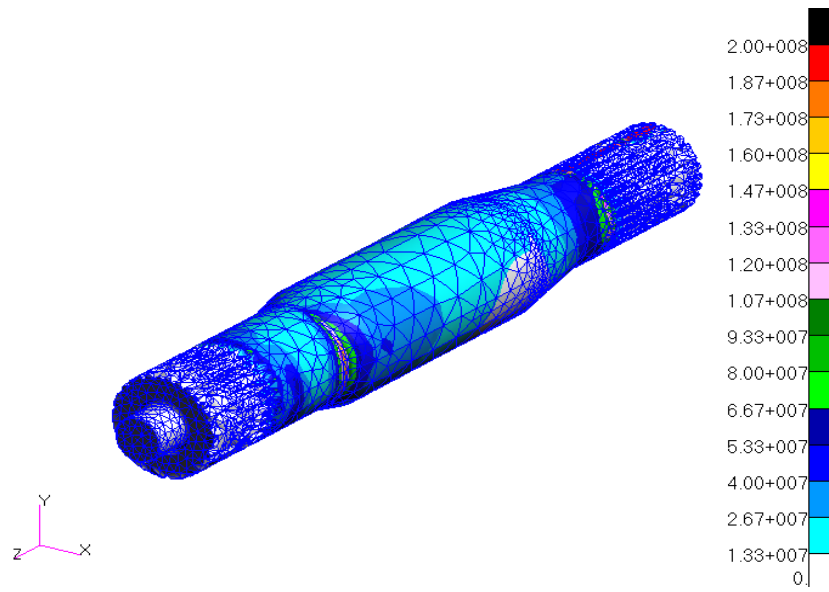
รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงแรงกระทำ

การวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยโปรแกรม Shaft Component Generation ใช้สอบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ พบว่าค่าความเค้นรวมที่โปรแกรมประมวลได้มีค่าเป็น 157.6 MPa โดยประมาณ แผนภาพความเค้นตัดดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยค่าความเค้นรวมสูงสุด ณ ตำแหน่งที่เพลลาขาคมีค่าเป็น 172 MPa

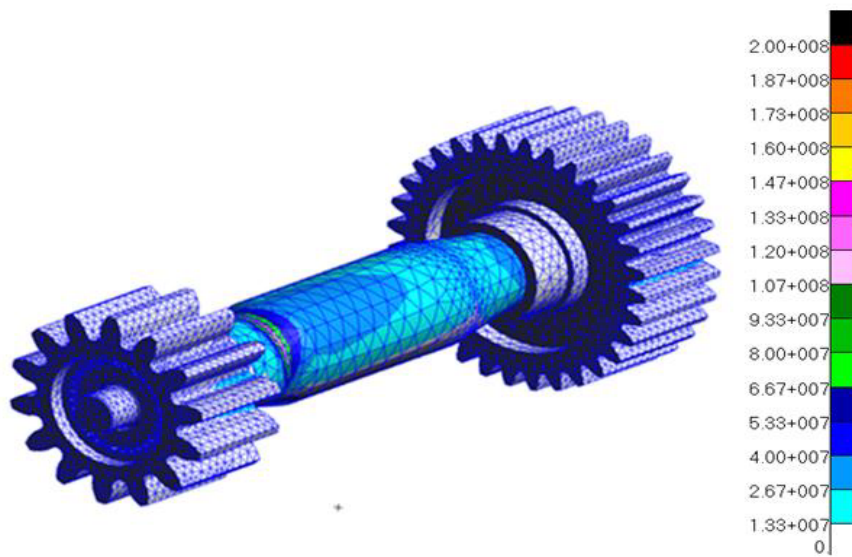


รูปที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยโปรแกรม Shaft Component Generation

ผลลัพธ์ของการ วิเคราะห์ค่าความเค้น และบริเวณความเข้มข้นความเค้น ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมตามวิธีการในหัวข้อ 2.4.6 แสดงในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 พบว่าบริเวณที่ค่าความเข้มข้นความเค้นสูงนั้นเป็นบริเวณบ่าเพลลาแบบโค้ง ซึ่งตรงกับบริเวณที่เกิดการชำรุดในเพลลาswingของจริง โดยมีค่า K_t torsion (ตัวประกอบความหนาแน่นความเข้มข้นความเค้นล้ากรณีการระัด) เท่ากับ 1.16 และมีค่า K_t bending (ตัวประกอบความหนาแน่นความเข้มข้นความเค้นล้ากรณีการระัด) เท่ากับ 1.40 ผลการคำนวณค่าความเค้น รวมสูงสุด มีค่าเท่ากับ 192 MPa ทั้งนี้ได้อธิบายรายละเอียดและวิธีการทำไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 3.10 แสดงการกระจายของความเค้นกรณีไม่สวมเฟืองเกียร์



รูปที่ 3.11 แสดงการกระจายของความเค้นกรณีสวมเฟืองเกียร์

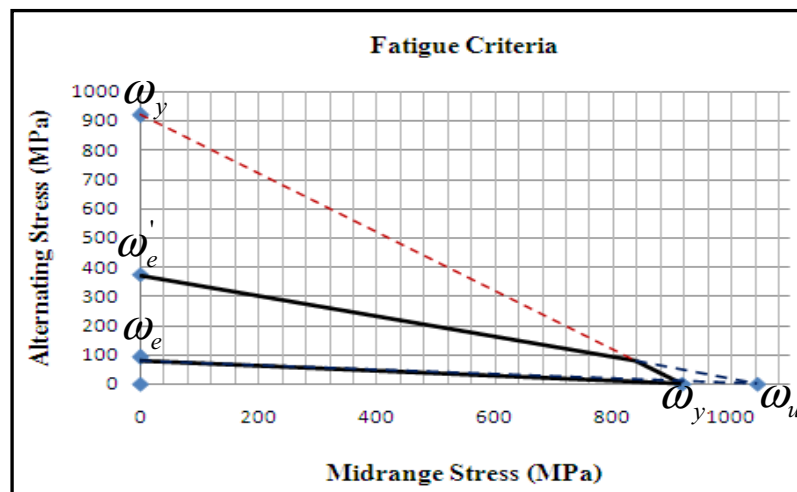
3.4 ผลการประเมินอายุความล้า

การประเมินอายุความล้าในงานวิจัยนี้เป็นไปตามหลักการ Stress life approach (S-N diagram) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับ การแก้ปัญหาความล้าประเภท High Cycle Fatigue โดยจะประเมินในรูปของ cycle loading ผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ขอบเขตของการวิบัติ แผนภาพอายุความล้า และการเปรียบเทียบประเมินอายุ

3.4.1 ขอบเขตของการวิบัติ

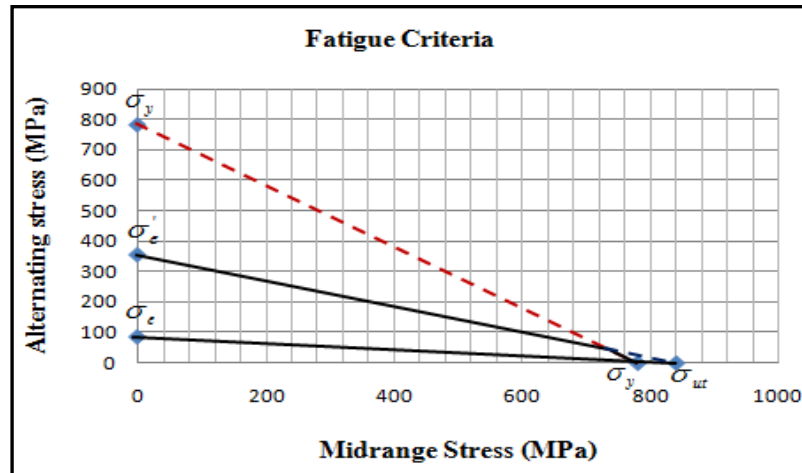
ในการหาขอบเขตของการวิบัติ ต้องทราบถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุ อันได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงล้า ข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ข้อมูลดังกล่าวนำมาเขียนแสดงขอบเขตการวิบัติ ตามวิธีการของ Goodman ดังรูปที่ 3.12-3.15 โดยเส้นประสีแดงคือขอบเขตการครากตัว ส่วนเส้นทึบสีดำคือเส้น Goodman กรณีก่อนและหลังคุณแพคเกจปรับปรุงค่าความแข็งแรงล้า ซึ่งสมการกำกับเส้นคือสมการที่ 1.5 หากภาระความเค้นเกินขอบเขตของการวิบัติอายุการใช้งานจะมีขีดจำกัด ส่วนอายุการใช้งานจะเป็นเท่าไรนั้นต้องใช้แผนภาพอายุความล้าในการทำนายซึ่งจะแสดงผลในหัวข้อถัดไป

- ขอบเขตการวิบัติของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340 แสดงในรูปที่ 3.12



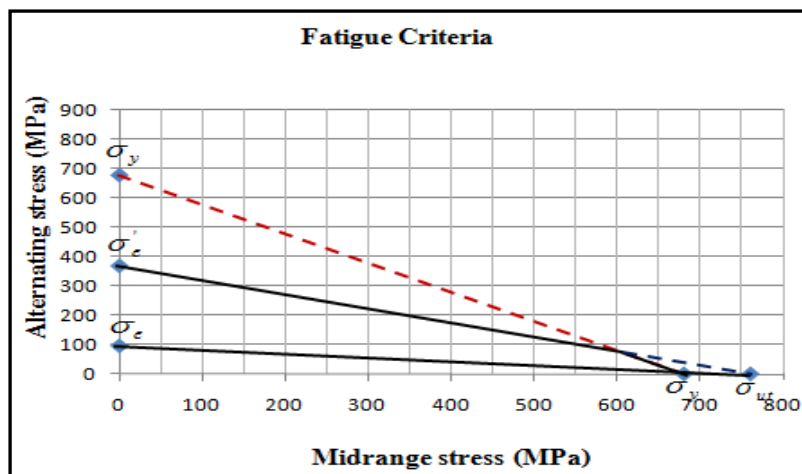
รูปที่ 3.12 ขอบเขตการวิบัติของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340

- ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์แสดงในรูปที่ 3.13



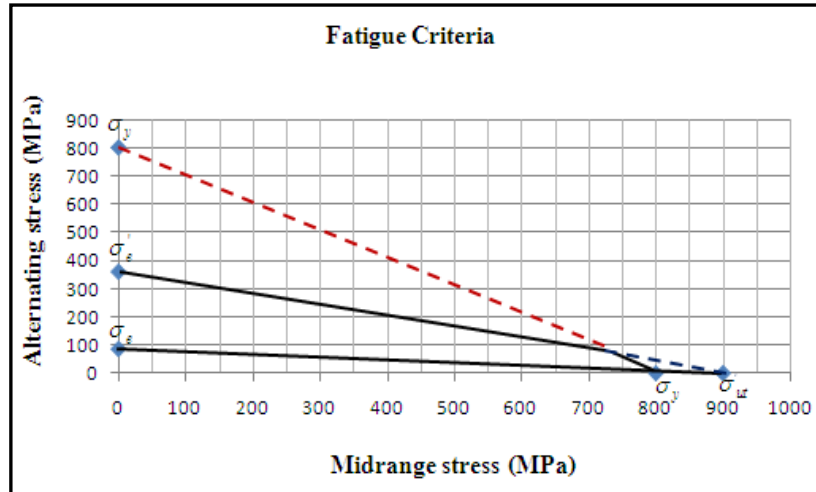
รูปที่ 3.13 ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

- ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์

- ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก /แมกแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ขอบเขตการวิบัติของเนื้อเชื่อมพอกผิวซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก

3.4.2 แผนภาพอายุความล้า

แผนภาพอายุความล้าในรูปที่ 3.16-3.19 ใช้ทำนายอายุการใช้งานของวัสดุที่เข้าสู่กลไกการล้า โดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบความล้าที่ผ่านการกระชับข้อมูลแล้วมาปรับปรุ่ค่าความแข็งแรงล้าด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4.10 ซึ่งมีค่าประมาณ 0.24 โดยที่มาของแฟกเตอร์ปรับปรุ่ค่าความแข็งแรงล้าได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก สมการกำกับเส้นทำนายอายุความล้าของแต่ละวัสดุแสดงในสมการที่ 3.1 ถึงสมการที่ 3.4 ดังต่อไปนี้

$$\text{AISI 4340} \quad K | 10^{\frac{1}{40.16919} / \log \omega 4 \log 90320} \quad (3.1)$$

$$\text{เนื้อเชื่อมมิกแมก} \quad K | 10^{\frac{1}{40.09214} / \log \omega 4 \log 30840} \quad (3.2)$$

$$\text{เนื้อเชื่อมไส้ฟลักซ์} \quad K | 10^{\frac{1}{40.12721} / \log \omega 4 \log 56090} \quad (3.3)$$

$$\text{เนื้อเชื่อมหุ้มฟลักซ์} \quad K | 10^{\frac{1}{40.13232} / \log \omega 4 \log 53270} \quad (3.4)$$

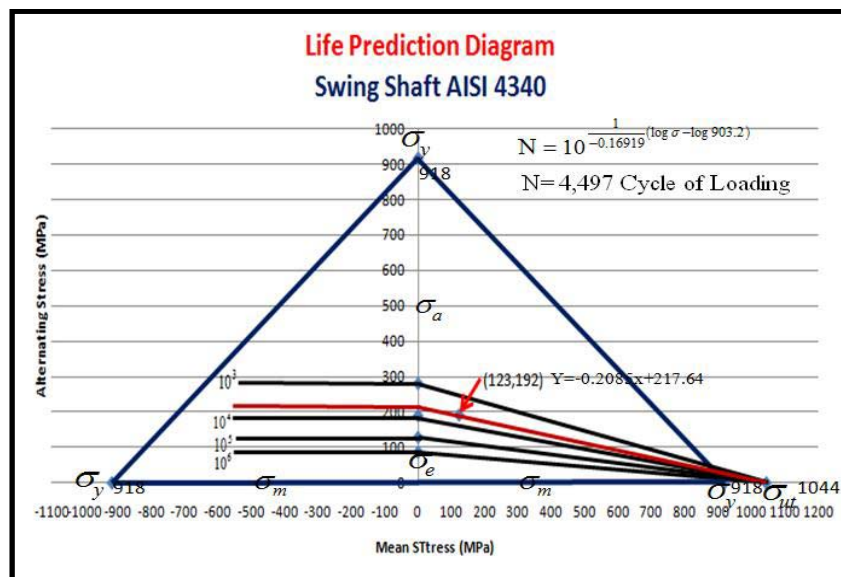
ทั้งนี้ค่าตัวประกอบของสมการกำลังข้างต้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และแสดงที่มาของสมการที่ใช้ในการประเมินอายุโดยละเอียดไว้ในภาคผนวก

ตารางที่ 3.3 ตัวประกอบสมการกำลัง

Process of welding	A	B
AISI 4340	903.2	-0.16919
MIG/MAG	308.4	-0.09214
FCAW	560.9	-0.12721
SMAW	532.7	-0.13232

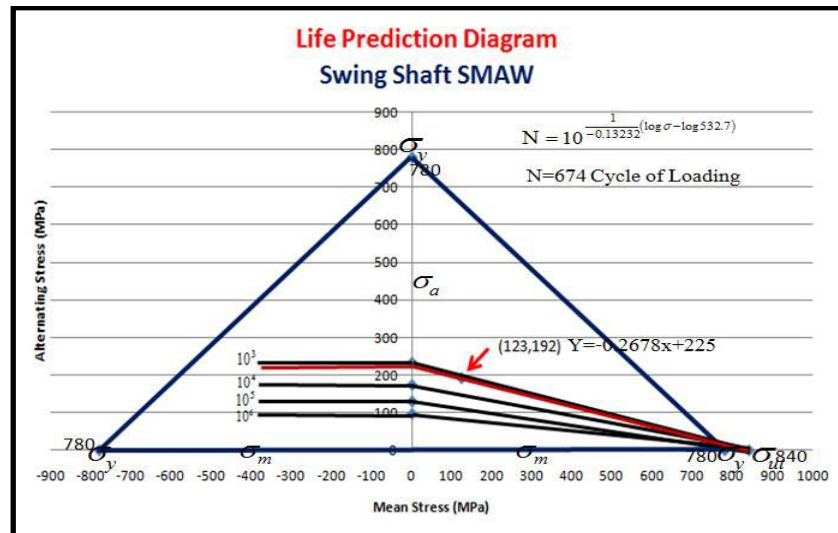
แผนภาพอายุความล้าถูกนำมาใช้ทำนายอายุการใช้งานของเพลาสวิง ทั้งนี้อาศัยค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นค่าอ้างอิงในการประเมิน

- แผนภาพอายุความล้าของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340 ในรูปที่ 3.16



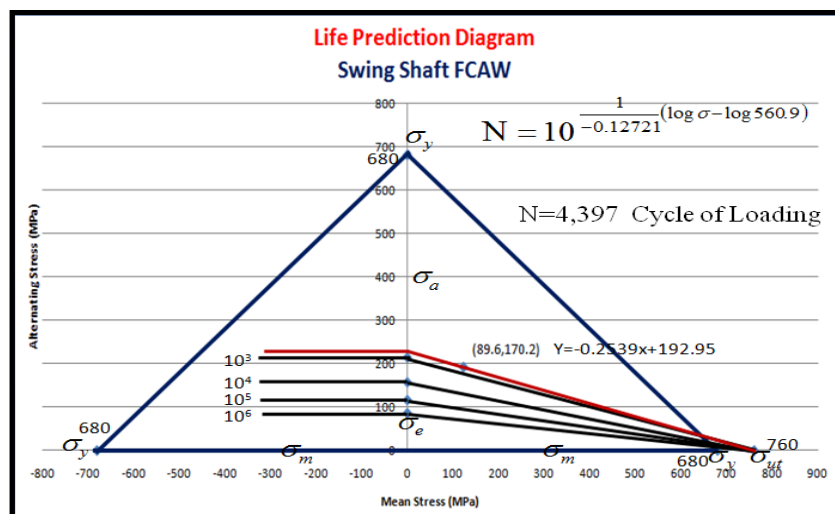
รูปที่ 3.16 แผนภาพอายุความล้าของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI4340

- แผนภาพอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์แสดงในรูปที่ 3.17



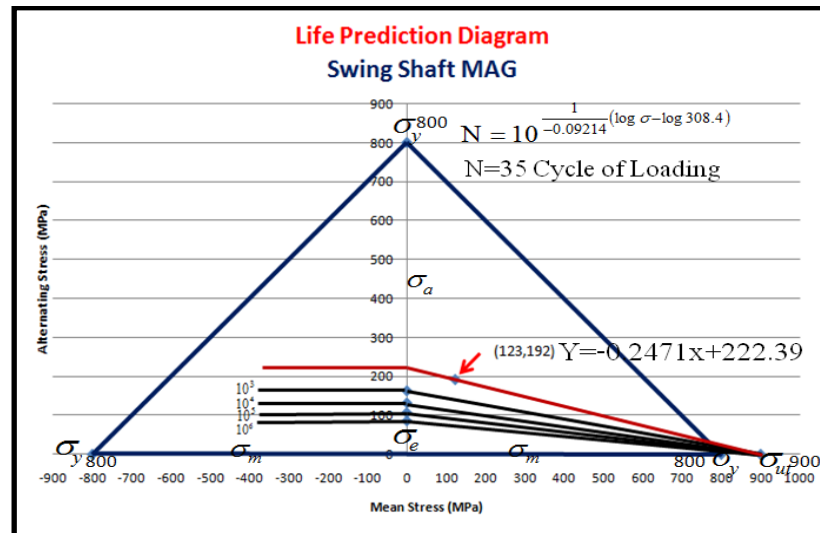
รูปที่ 3.17 แผนภาพอายุความล้าของเนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

- แผนภาพอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนภาพอายุความล้าของเนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

- แผนภาพอายุความล้าของผิวเชื่อมพอกซึ่งเตรียมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แผนภาพอายุความล้าของเนื้อเชื่อมจากกรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก

3.4.3 การเปรียบเทียบประเมินอายุ

ผลลัพธ์จากการคำนวณค่าความเค้นด้วย 3 วิธีการอันได้แก่ การคำนวณมือ การคำนวณโดยใช้โปรแกรม Shaft Component Generation (SCG) และการคำนวณ วิเคราะห์ค่าความเค้นโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) คือ 170 MPa, 172 MPa และ 192 MPa ตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแผนภาพอายุความล้าของ เนื้อเชื่อมที่ได้จากแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม สามารถประเมินอายุการใช้งานของเพลาสวิงค่าดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อายุการใช้งานของเพลาสวิง

Process of welding	Classical method	SCG	FEM
AISI 4340	11,317 Cycle	10,584 Cycle	4,497 Cycle
FCAW	4,397 Cycle	4,006 Cycle	1,141 Cycle
MIG/MAG	2,370 Cycle	2,169 Cycle	674 Cycle
SMAW	203 Cycle	179 Cycle	35 Cycle

3.5 การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการวิจัยภาพรวม

เพลาสวิงซึ่งเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหลักในระบบส่งกำลังแบบหมุนเหวี่ยงของรถขุดไฟฟ้า ที่เงื่อนไขการทำงานภาระเต็มกำลัง(Full load) นั้น ยังผลให้เพลาสวิงมีค่าความเค้นรวมสูงสุดเกิดขึ้นมาค่าหนึ่ง ซึ่งค่านี้น้อยมต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำเพลาสวิง จึงทำให้เพลาสวิงสามารถใช้งานได้ ดังนั้นการชำรุดของเพลาสวิงอันเนื่องมาจากภาระสถิตย์(Static loading) จึงถูกตัดไป แต่การที่ใช้งานเพลาสวิงไปได้ระยะเวลาหนึ่งแล้วเพลาก็เกิดการชำรุดนั้น ทำให้มุ่งประเด็นไปยังการล้าซึ่งเป็นการชำรุดอันเนื่องมาจากภาระพลวัต(Dynamic) การชำรุดในลักษณะนี้แม้ว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุสูงกว่าภาระที่วัสดุแบกรับก็ตามก็ยังสามารถก่อให้เกิดการชำรุดได้อยู่ดี โดยการชำรุดลักษณะนี้ พบได้ทั่วไปกับชิ้นส่วน เครื่องจักร กลที่ทำหน้าที่ ในการ ส่งถ่ายกำลังและการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงหาค่าความแข็งแรงล้าของเหล็กกล้าทนแรงดึง สูงเกรด AISI 4340 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำเพลาสวิงเพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ในการที่ต้นเหตุของการชำรุดของเพลาสวิงจะมาจากการล้า พบว่าค่าความแข็งแรงล้าของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูงเกรด AISI 4340 นั้น มีค่าเพียง 87 MPa ซึ่ง คาดว่า ต่ำกว่าค่าความเค้นที่เพลาสวิงต้องแบกรับ จึงเกิดการชำรุด แนวโน้มการวิบัติอันเนื่องมาจากความเค้นล้าจึงมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นไปได้สูงขึ้น ด้วยฐานความคิดข้างต้นนี้จึงนำไปสู่การออกแบบและสร้างเงื่อนไขการวิจัยโดยอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์การชำรุดจาก การล้าเป็นหลักยึด แต่ ทั้งนี้มิได้ปิดกั้นแนวความคิดอื่นซึ่งอาจเกิดขึ้นขณะทำการศึกษาวิจัย เมื่อดำเนินการศึกษาวิจัยต่อไปทำให้มั่นใจเพิ่มขึ้นว่าการชำรุดมีสาเหตุมาจากความล้า เพราะว่าครบ ทั้ง 3 องค์ประกอบของการเกิด การล้า องค์ประกอบแรกได้จาก การศึกษาการทำงานของเพลาสวิงในระบบส่งกำลัง พบว่าเพลาสวิงมีการรับภาระแบบวัฏจักร โดยมีทั้งภาระบิดและภาระดัด ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการเกิดการล้า เมื่อทำการคำนวณ หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลาสวิงก็เพิ่มเติมรายละเอียดให้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่าอิทธิพลของภาระดัด นั้นมีมากกว่าภาระบิด ซึ่งจากการตรวจพินิจพิจารณาของเพลาสวิงตัวที่ชำรุดพบว่าจุดเริ่มต้นของรอยแตกเป็น บริเวณบ่าเพลาสวิงแบบโค้ง ซึ่งน่าจะเป็นบริเวณความเข้มข้นความเค้นซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สองของการเกิดการล้า รอยแตกทำมุมประมาณ 45° และมีลักษณะการชำรุดเช่นเดียวกับการชำรุดด้วยภาระบิดสถิตย์ในวัสดุเปราะทั้งที่ภาระดัดมีค่าสูงกว่าภาระบิดทั้งนี้เนื่องจากภาระบิดมีความไวรอยบากสูงกว่าภาระดัดนั่นเอง และสุดท้ายความแข็งแรงของวัสดุต้องมีค่ามากกว่าภาระที่วัสดุแบกรับ นับเป็นองค์ประกอบที่ 3 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนผลการคำนวณค่าความเค้นนั้นมีความแตกต่างกันตามวิธีการในการคำนวณ เนื่องจากแต่ละวิธีการที่ใช้ในการหาค่าความเค้นนั้นมี ความสามารถในการวิเคราะห์รูปร่างรายละเอียดของเพลาสวิงได้ถูกต้องแม่นยำแตกต่างกัน การประมวลผลค่าความเค้นที่ได้จึงแตกต่างกัน

ไปด้วย ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมถูกเลือกใช้ทำหน้าที่สำคัญในการวิเคราะห์ค่าความเค้นของเพลาสวิงซึ่งมีรูปร่างที่ซับซ้อน เพราะเป็น โปรแกรมทางวิศวกรรมที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ ค่าความเค้นในรูปร่างที่ซับซ้อนสูงและความถูกต้องแม่นยำของผลที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ที่ถูกต้องก็เป็นที่ยอมรับตามหลักการทางวิศวกรรม ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ก็ออกมาตรงกับความเป็นจริง คือบริเวณบ่าเพลาระบบโค้งซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกนั้นเป็นบริเวณความเข้มข้นความเค้นมีค่าความเค้นรวมสูงสุด สูงถึง 192 MPa และเมื่อนำค่าความเค้นที่ได้ นั้น ไปพิจารณาในแผนภาพขอบเขตของการวิบัติของวัสดุก็พบว่าค่าความเค้นที่วัสดุแบกรับนั้นมีค่าสูงเกินกำลังของวัสดุทำให้วัสดุอยู่นอกเส้นความปลอดภัยเข้าสู่กลไกการล้าจึงมีอายุการใช้งานจำกัด และเมื่อนำผลการคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลาสวิงขณะทำงาน มาวิเคราะห์ร่วมกับแผนภาพอายุ ความล้าของแต่ละวัสดุเพื่อ หาอายุการใช้งาน ของเพลาสวิง พบว่าเพลาสวิงที่เชื่อมซ่อมด้วยเนื้อเชื่อมไส้ฟลักซ์มีประสิทธิภาพต้านทานต่อการล้าดีที่สุด โดยประเมินจากอายุการใช้งาน ซึ่งความแตกต่างของประสิทธิภาพในการต้านทานต่อการล้านี้ น่าจะเป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม การทดสอบความแข็งแรงล้าเพียงเป็นตัวประเมินสมบัติของวัสดุในเชิงกลเท่านั้น โดยค่าความเค้นกับอายุความล้า ที่ได้จากการทดสอบ เมื่อนำ ไปพล็อตเป็น (S-N Curve) ทำให้เห็นแนวโน้มค่าความแข็งแรงล้าที่ชัดเจน แต่อาจขาดความแม่นยำเฉพาะจุดอยู่บ้าง แต่ก็พยายามทำการกระชับข้อมูลด้วยหลักการกำลังสองน้อยสุด ทำให้ได้ค่าที่แม่นยำขึ้น ด้วยการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย โดยอาศัยองค์ความรู้ทางวิศวกรรมซึ่งอ้างอิงด้วยหลักการและทฤษฎีต่างๆซึ่งเป็นที่ยอมรับ ดังที่กล่าวมาแล้วทำให้ผลของงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตามยังไม่อาจรับประกันได้ถึงความแม่นยำและความสมบูรณ์ การนำข้อมูลไปใช้จึงอยู่ในดุลพินิจและประสบการณ์ของผู้ใช้งานเอง

บทที่ 4

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการล้าของผิวเชื่อมพอกเพลาสวิงเพื่อประเมินอายุการใช้งานของเพลาสวิงหลังผ่านกระบวนการเชื่อมซ่อม ในการศึกษา จะใช้ค่าความเค้นซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมร่วมกับแผนภาพอายุความล้าซึ่งได้จากการทดลองเป็นหลัก โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ กรรมวิธีการเชื่อมซ่อม 3 กรรมวิธีได้แก่ กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และกรรมวิธีการเชื่อมแบบมิก /แมก โดยใน บทสรุป นี้จะรวบรวมผลสำเร็จของงานวิจัย ในภาคทฤษฎีเชื่อมโยง ไปสู่ภาค ปฏิบัติเพื่อสามารถก่อให้เกิดประโยชน์ในเชิงรูปธรรมได้ ส่วนข้อเสนอแนะที่เห็นจะเป็นประโยชน์ทั้งในส่วนของการซ่อมบำรุง และเปิดมุมมองแนวคิดใหม่ในการแก้ไขปัญหา โดยการนำ องค์ความรู้ทางวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

1) กรรมวิธีการเชื่อม ไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ นั้น ให้น้ำเชื่อมที่มีประสิทธิภาพต้านทานต่อการล้าดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ กรรมวิธีการเชื่อมแบบมิก /แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ซึ่งค่าความแข็งแรงล้าจากการทดสอบของแต่ละเนื้อเชื่อมมีค่าเป็น 370 MPa 360 MPa และ 355 MPa ตามลำดับ

2) อายุการใช้งานของเพลาสวิงหลังผ่านกระบวนการเชื่อมซ่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ คือ 1,141 Cycle of Loading หรือประมาณ 20,000 ชั่วโมงการทำงาน สูงกว่ากระบวนการเชื่อมซ่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และกรรมวิธีการเชื่อมแบบมิก/แมกอย่างเห็น ได้ชัดคือ 40.93% และ 96.93%ตามลำดับ

4.2 ข้อเสนอแนะ

1) การเชื่อมซ่อมพอกผิวของเพลาสวิงถูกจำกัดประสิทธิภาพด้วยความแข็งแรงของเนื้อเชื่อม ด้วยเหตุนี้จึงต้องยอมรับว่าเพลาสวิงหลังผ่านการเชื่อมซ่อมไม่สามารถจะมีอายุการใช้งานยาวนานเท่าเพลาสวิงก่อนผ่านการเชื่อมซ่อม แต่กรรมวิธีการเชื่อมซ่อมนี้ก็ยังสามารถยืดอายุการใช้งานไปได้ระยะเวลาหนึ่งซึ่งคุ้มค่ากว่าการสั่งซื้อเพลาสวิงใหม่ซึ่งมูลค่ารวมประมาณเจ็ดแสนบาทต่อตัวและยังทำให้ไม่เสียค่าโอกาสในการทำงาน

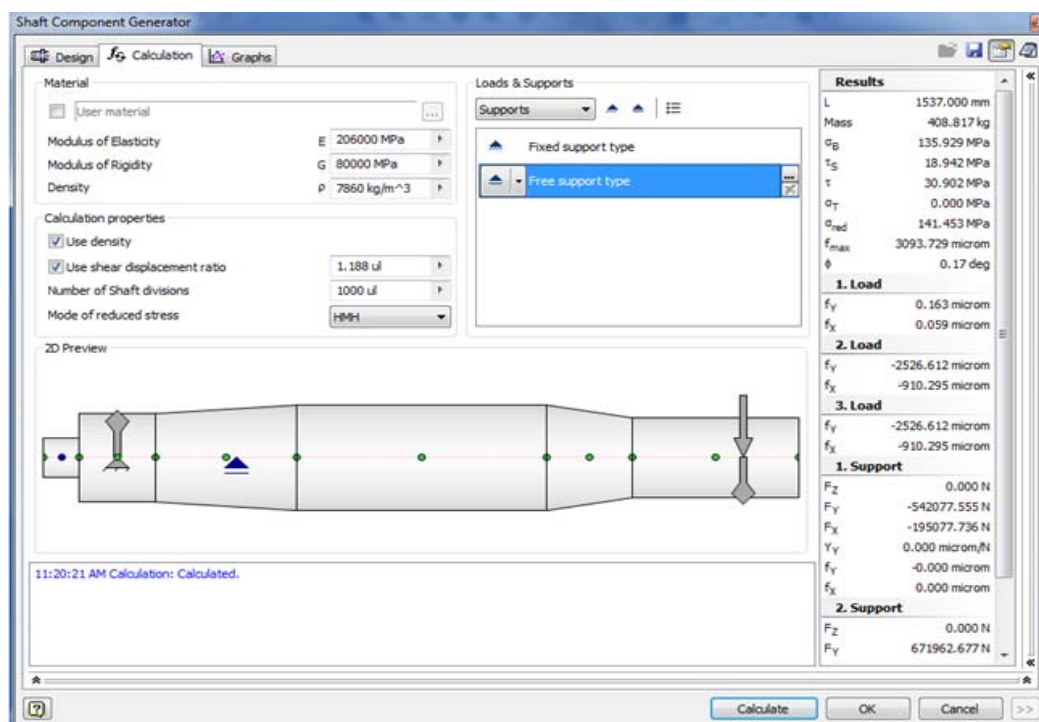
2) เมื่อเพลาสวิงผ่านกระบวนการเชื่อมซ่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แล้วนั้น เมื่อนำไปใช้ก็ควรใส่ใจเป็นพิเศษและควรถอดเปลี่ยนเพลาสวิงก่อนถึงรอบอายุการใช้งานที่ได้ทำนายไว้คือ 1,141 cycle loading หรือประมาณ 20,000 ชั่วโมงการทำงานเพื่อป้องกันการชำรุดรุนแรงขณะใช้งาน และควรอบลวดเชื่อมที่อุณหภูมิ 350° เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนทำการเชื่อมทุกครั้งเพราะความชื้นในลวดเชื่อมมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมเป็นอย่างมาก

3) ผลการวิจัยนี้ช่วยประกอบการตัดสินใจในการกำหนดมาตรฐานกรรมวิธีการเชื่อมซ่อมได้เพราะวิธีการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัยได้อาศัยองค์ความรู้ทางวิศวกรรมซึ่งอ้างอิงด้วยหลักการและทฤษฎีต่างๆซึ่งเป็นที่ยอมรับจึงมีความน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตามยังไม่อาจรับประกันได้ถึงความแม่นยำและความสะดวก การนำข้อมูลไปใช้จึงอยู่ในดุลพินิจและประสบการณ์ของผู้ใช้งานเอง ซึ่งการบันทึกประวัติการซ่อม สถิติการชำรุด ของเพลาสวิง เพื่อสอบเทียบความคลาดเคลื่อนของผลการวิจัย เพื่อหาปัจจัยปรับแก้ และจุดที่เหมาะสมระหว่างภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ เพื่อกำหนดเป็นเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมที่สุดในการซ่อมบำรุงต่อไป เป็นสิ่งที่ควรทำ

4) การออกแบบเพลาสวิงใหม่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้แก้ปัญหาการชำรุดจากการล้า เนื่องจากเมื่อทำการวิจัยพบว่าภาระวัฏจักรส่งผลโดยตรงกับบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่องของรูปร่างและพื้นที่หน้าตัด ยังผลให้ บริเวณ นั้นเป็นบริเวณ ความเข้มข้นความเค้นซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการชำรุด ดังนั้นหากเราสามารถออกแบบเพลาสวิงที่มีความต่อเนื่องของรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดได้ดีกว่าก็จะสามารถยับยั้งกลไกการล้าให้น้อยลงได้

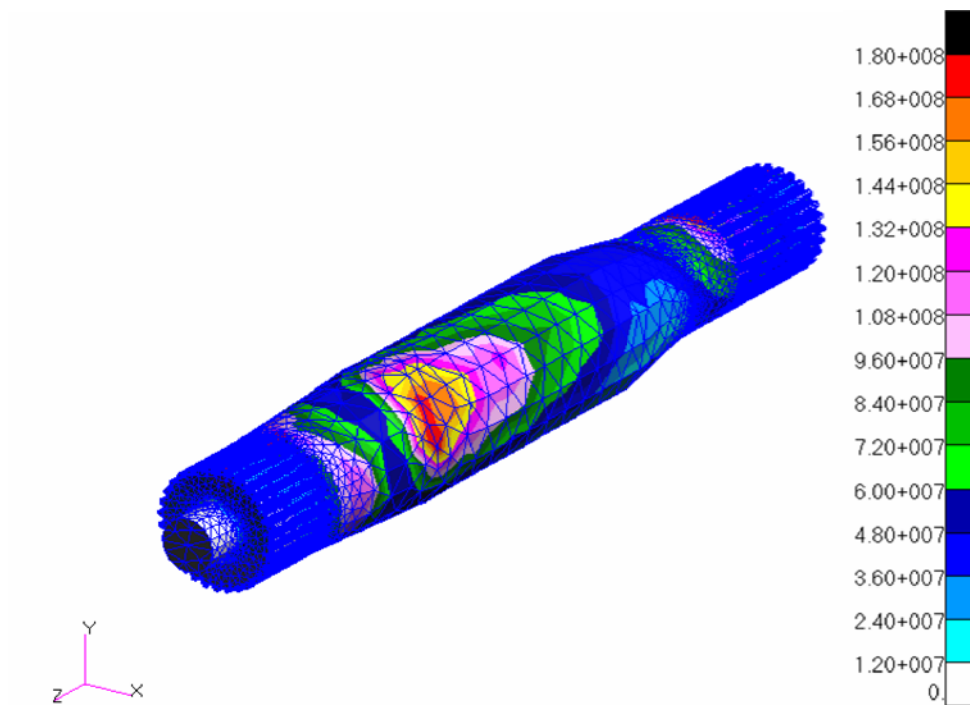
แนวคิดในการวิเคราะห์หรือออกแบบจะยึดความสามารถในการลดค่าความเค้นดัดเป็นหลัก เพราะค่าความเค้นจากภาระดัดมีอิทธิพลสูงในการทำให้เพลาสวิงเกิดการชำรุด โดยทั้งนี้ จะทำการปรับเปลี่ยนระยะและปรับเปลี่ยนรูปร่างของบ่าเพลาสวิงแบบโค้งเป็นบ่าเพลาสวิงแบบลาดเอียง ซึ่ง

แบบจำลองของเพลาสวิงตัวใหม่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 จากนั้นทำการวิเคราะห์ห้ประมวลผลค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลาสวิงที่ออกแบบใหม่ตามเงื่อนไขขอบเขตจตุรกรรับและภาระแรงกระทำ ดังรูปที่ 4.1 พบว่าค่าความเค้นรวมลดลงเหลือ 111 MPa โดยความเค้นรวมสูงสุดลดลงเหลือ 159 MPa และเมื่อทำการประเมินเปรียบเทียบอายุการใช้งานของเพลาสวิงตัวเดิมกับตัวที่ออกแบบใหม่ พบว่าเพลาสวิงตัวที่ออกแบบใหม่มีอายุการใช้งาน 28,761 Cycle of loading ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 59 %



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยโปรแกรม Shaft Component Generation

กรณีใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ ดีเมชที่ 383,012 เอลิเมนต์ 472,380 โหนด ค่าความเค้นรวมสูงสุดมีค่าเป็น 169 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.2 อายุการใช้งานเป็น 20,056 Cycle loading เพิ่มขึ้น 2.125 เท่า



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

5) ควรทำ shot peening บริเวณฟิลเลต และตรวจสอบการแตกร้าวตามแผนการบำรุงรักษา

บรรณานุกรม

- กฤษณพงษ์ เกียรติอนันต์. การประเมินอายุความล้าของโครงสร้างสะพานสมเด็จพระพุทธยอดฟ้าฯ ช่วง **Bascule Span**. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2546.
- จิตติ บัวพูน, นิรมิต เดชสุภา, ประศาสน์ สุบรรพวงศ์ และณรงค์ฤทธิ์ โทชรรัตน์ “การวิเคราะห์การชำรุดเบื้องต้น” สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2550.
- ณรงค์ฤทธิ์ โทชรรัตน์. อิทธิพลการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณผลกระทบจากความร้อนต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้าของเหล็กเกรดเอไอเอสไอ 4340. กองโรงงานเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 วันที่ 15-17 ตุลาคม 2546 จ. ปราจีนบุรี.
- เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- ธรรมบุญ สีดาคาร และ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต. “การศึกษารูปร่างของบ่าเพล่าที่มีผลต่อความแข็งแรงของเพล่า ลูกหนีบ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” วิศวกรรมสาร มข. 34(6): 733-747 พฤศจิกายน-ธันวาคม 2550.
- Albert. “Failure of iron mine-hoist chains arising from repeated small loadings.” **Journal of Engineering Failure Analysis** xxx (1829): xxx-xxx.
- Atxaga, G. and Irisarri, A.M. “Failure analysis of the end of a shaft of an engine.” **Journal of Engineering Failure Analysis** xxx (2009): xxx-xxx.
- Bayrakceken, H. “Failure analysis of an automobile differential pinion shaft.” **Journal of Engineering Failure Analysis** 13(2006): 1422-1428.
- Bhaumik, S.K. et al. “Fatigue Failure of a hollow power transmission shaft.” **Journal of Engineering Failure Analysis** 9(2002): 457-467.
- Bonnen and Topper. “The effect of bending overloads on torsional fatigue in normalized 1045 steel.” **International Journal of Fatigue** 21(1999): 23-33.

- Cheng Chen and Biau Tsay. "Stress Analysis of a helical gear set with localized bearing contact." **Journal of Finite Element in Analysis and Design** 38 (2002): 707-723.
- Cleland, J.H. and Jones, D.R.H. "Shear Fatigue of a road-vehicle steering shaft." **Journal of Engineering Failure Analysis** 4(1): 81-88, 1997.
- Dumitru et al. "Experimental Study of Torsional Impact fatigue of shafts." **Journal of Sound and Vibration** 308(2009):479-488.
- Dieter, G. *Mechanical Metallurgy*. 3rd Edition, McGraw-Hill, Singapore: 1986.
- Ewing and Humfery. "The Fracture of metals under rapid alteration of stress." Philosophical Transaction of The Royal of society, London, A 200(1903): 241-250.
- Feng Tseng and Shin Lin. "The processing and fracture analysis on transmission shafts of a peanut harvester." **Journal of Materials Processing Technology** 201 (2008): 374-379.
- Fuch, H. and Stephen, R. *Metal Fatigue in Engineering*. John Wiley&Sons, Inc. Newyork: 1980.
- Fuller, R.W. et al. "Failure analysis of AISI 304 stainless steel shaft." **Journal of Engineering Failure Analysis** 15(2008): 835-846.
- George F. Vander Voort, "*Fatigue Fractures: Visual Examination and Light Microscopy*," in *Fractography*, ASM Hand book, vol.12, ASM International, OH, 1993, pp. 215-236.
- <http://highered.mcgrawhill.com/sites/dl/free/0073121932/365766/chapter6.pdf> สืบค้นเมื่อ วันที่ 8/01/53
- Herbert, J. and Paul, S. The development of confidence limits for fatigue strength data. Wind Energy Technology Department, ASME/AIAA: 2000.
- Jianping and Guang. "Investigation on the failure of the gear shaft connected to extruder." **Journal of Engineering Failure Analysis** 15 (2008): 420-429.
- Kaplan, P and Wolff, A. Fatigue life assessment of weld-surfacing AISI 4340. EAD Aerospace, Inc.: 2002.
- Magudeeswaran, G. et al. "Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of high strength, quenched and tempered steel joints." **Journal of Materials**

- Processing Technology** 29 (2008): 1821-1827.
- Paris and Erdogan J. *Basic Eng.*, Vol.85 (1960) pp. 528-534.
- Peterson, R. E.: “Stress Concentration Factors,” John Wiley & Sons, 1974
- Ranganath, V.R. et al. “Failure of a swing pinion shaft of a dragline.” **Journal of Engineering Failure Analysis** 11 (2004): 599-604.
- Shyan Lee and Tian Su. “Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions.” **Journal of Materials Processing Technology** 87 (1999): 198-206.
- Topacki, M. et al. “Stress analysis on transmission gears of a rotary tiller using finite element method.” Akdeniz University, Faculty of Agriculture Antalya, Turkey 2008, 21(2): 155-160.
- Toth and Yarema. “FORMATION OF THE SCIENCE OF FATIGUE OF METALS.” *Materials Science*, Vol. 42, No. 5, 2006.
- Voorwald, H.J.C et al. “Influence of shot peening on chromium-electroplated AISI 4340 steel fatigue strength.” Fatigue and Aeronautic Research Group, Department of Materials and Technology, 2004.
- Welding Handbook. “*Material and Application Part 2*”, 8th Edition, Miami, American Welding Society, 1997.
- Wholer. “Uber die festigkeitversuche Mit eihen Und Stahl.”, SAE fatigue design handbook, 3rd Edition, AE-22, 1871.
- Xiaolei and Zhiwei. “Failure analysis of a locomotive turbocharger main-shaft.” **Journal of Engineering Failure Analysis** xxx (2008): xxx-xxx.
- Yuan Lin et al. “Failure Analysis of Reverse Shaft in the transmission System of All-Terrain Vehicles.” **J Fail. Anl. And Preve.**8 (2008): 75-80.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของเนื้อวัสดุที่ใช้ทำพลาสติกและผิวเชื่อมพอกพลาสติก

เหล็ก AISI 4340 จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ ซึ่งผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัว ทำให้มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมกับงานผลิตชิ้นส่วนเครื่องกล สำหรับงานหนัก ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆดังนี้

ตาราง ก.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก AISI 4340

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Mo%	Ni%	Cr%
0.39	0.74	0.19	0.024	0.019	0.23	1.72	0.8

ตาราง ก.2 คุณสมบัติทางกล AISI 4340

ความแข็งแรงดึง (MPa)	1044	หมายเหตุ Quenched & Tempered
ความแข็งแรงคราก (MPa)	918	
อัตราการยืดตัว (%)	16.2	
การลดของภาคหน้าตัด (%)	42.9	
ความแข็ง (HV)	320-340	

ที่มา : Krupp Hoesch Stahlexpost GmbH

Test Certificate No. 5/24496

Date: 05/1201995

Test required: AS PER DIN 50049-3.1B

คุณสมบัติของลวดเชื่อม

การเลือกลวดเชื่อมสำหรับเชื่อมเหล็ก AISI 4340 ซึ่งเป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง จำเป็นต้องพิจารณาความแข็งแรงดึงเป็นหลัก และความผสมทางเคมีต้องอยู่ในกลุ่มเดียวกัน คือ กลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เลือกใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน AWS A5.5-96 E11018- G H 4R (EN 757-1997 E696Mn2NiCrMoB42H5) โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตาราง ก.3 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Mo%	Ni%	Cr%
0.05	1.5	0.4	-	-	0.5	2.0	0.4

ตาราง ก.4 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ความแข็งแรงดึง (MPa)	840
ความแข็งแรงคราก (MPa)	780
อัตราการยืดตัว (%)	20
ความแข็งแรงกระแทก (Charpy-V) Joule	110 ที่ 20 °C
ปริมาณการแพร่ไฮโดรเจนในเนื้อเชื่อม	<5 ml/100g

ลวดเชื่อมมิก/แมก เลือกใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.28-ER110S-G (EN 12534 Mn3NiCrMo) โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตาราง ก.5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมมิก/แมก

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Mo%	Ni%	Cr%
0.1	1.6	0.6	-	-	0.25	1.3	0.25

ตาราง ก.6 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมมิก/แมก

ความแข็งแรงดึง (MPa)	900
ความแข็งแรงคราก (MPa)	800
อัตราการยืดตัว (%)	19
ความแข็งแรงกระแทก (Charpy-V) Joule	190 ที่ 20 °C

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ เลือกใช้ลวดเชื่อมมาตรฐาน AWS A5.29-E110T-K4 (EN: 1999 12535 69 5 Mn2NiCrMo B3 H5) โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตาราง ก.7 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Mo%	Ni%	Cr%
0.05	1.40	0.40	0.005	0.015	0.50	2.40	0.50

ตารางที่ ก.8 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ความแข็งแรงดึง (MPa)	760
ความแข็งแรงคราก (MPa)	680
อัตราการยืดตัว (%)	15
ความแข็งแรงกระแทก (Charpy-V) Joule	27 ที่ -51 °C

ภาคผนวก ข

การหาปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalence)

การหาปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าในเหล็กจะเป็นดัชนีบอกถึงความยากง่ายในการเชื่อม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15}$$

แทนค่าส่วนผสมทางเคมี จากภาคผนวก ก จะได้ CE = 0.87

จากผลการวิจัยของ Welding Technology Institute of Australia (1989) ได้แบ่งกลุ่มเหล็กออกเป็น 12 กลุ่ม ตามผลการคำนวณค่าปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า

ตาราง ข-1 ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกลุ่มต่างๆ

กลุ่มที่	คาร์บอนเทียบเท่า	ความสามารถในการเชื่อม
1	< 0.30	ง่ายมาก
2	0.30-0.35	
3	0.35-0.40	
4	0.40-0.45	
5	0.45-0.50	
6	0.50-0.55	
7	0.55-0.60	
8	0.60-0.65	
9	0.65-0.70	
10	0.70-0.75	
11	0.75-0.80	
12	> 0.80	

ภาคผนวก ค

รายการอะไหล่เหล็ก AISI 4340 ของเครื่องจักร รถขุดไฟฟ้า P&H 2100BL

รายการอะไหล่ของเครื่องจักร รถขุดไฟฟ้า P&H 2100BL ที่ทำจากเหล็ก AISI 4340 แสดงไว้ในตาราง ค.1

ตาราง ค-1 รายการอะไหล่และราคาอะไหล่ที่ทำจาก AISI 4340

รายการที่	ชื่ออะไหล่	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1	Center gudgeon pin	1,600,000	ราคาปี 2543
2	Final drive shaft	980,656	
3	Final drive gear	1,561,704	
4	Final drive pinion	1,852,000	
5	Lower roller	538,640	
6	Second reduction shaft	570,000	
7	Shipper shaft	2,206,495	
8	Shipper shaft pinion	1,300,000	
9	Swing pinion	680,000	
10	Swing shaft	650,000	
11	Front idler shaft	150,000	
12	Lower roller pin	120,000	

ภาคผนวก ง

ประวัติการซ่อมอะไหล่ที่ทำจาก AISI 4340 และการชำรุดหลังการซ่อม

หน่วยงานการซ่อมของเหมืองแม่เมาะพยายามที่จะประหยัดค่าใช้จ่าย พยายามนำชิ้นงานที่เกิดการชำรุดหลังการใช้งานมาซ่อม โดยที่ไม่มีกรรมวิธีในการซ่อมที่เป็นมาตรฐาน ซึ่งผลส่วนใหญ่จะชำรุดก่อนที่จะถึงรอบบำรุงรักษา ทำให้ต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อถอดเปลี่ยนอะไหล่ก่อนถึงรอบบำรุงรักษา ซึ่งมีผลต่อระบบการผลิต โดยเข้าซ่อม 57 ชิ้น และชำรุด 42 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การชำรุดหลังซ่อมเท่ากับ 74 เปอร์เซ็นต์ เป็นเงิน 49 ล้านบาท แสดงตามตาราง ง-1

ตาราง ง-1 ประวัติการซ่อมอะไหล่ที่ทำจาก AISI 4340 และการชำรุดจากการซ่อม

ที่	รายการอะไหล่	หมายเลขอะไหล่ที่เข้าซ่อม	หมายเลขที่แตกร้าว	หมายเลขที่ขาด	จำนวนเงินที่สูญเสีย (บาท)
1	Final drive shaft	01 02 03 05 06 07 08 09 10 11 12 15 16 17 18 19 20 23 24	05 06 08 11 16	01 02 03 07 09 10 15 18 19	13,729,184
2	Final drive gear	01 02 03	01 02 03		4,685,112
3	Final drive pinion	02 04 05 06 07 08 09 10 12 14 15 19 20 21 22	08 09 10 12 14	02 03 04 05 06 07 15	22,224,000
4	Second reduction shaft	16 17	16 17		1,140,000
5	Shipper shaft pinion	05 20 21 26 30 32		05 20 21 30 32	3,361,940
6	Swing shaft	07 08 21 22 23 25 26 27 30 32 35 37	07 08	25 32 35 37	3,900,000
จำนวน		57 ชิ้น	17 ชิ้น	25 ชิ้น	
รวมเงินสูญเสียจากการชำรุด					49,040,236

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของชิ้นส่วนที่ซ่อมโดยผลการวิจัย

อะไหล่ที่เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยทั่วไป บริษัทผู้ผลิตจะกำหนดอายุการใช้งาน (Expected life) แต่ครั้งไว้ซึ่งบริษัทผู้ออกแบบจะมีข้อมูลต่างๆที่ใช้กำหนดอายุ เช่น ข้อมูลการออกแบบ ประวัติการใช้งานของเครื่องจักรทั่วโลก และผลการใช้อะไหล่ที่ขายให้แก่ผู้ใช้เครื่องจักร ซึ่งส่วนใหญ่การกำหนดชั่วโมงใช้งานมีความแม่นยำค่อนข้างสูง ซึ่งเมื่อถึงเวลาทางผู้ใช้งานเครื่องจักรก็นำอะไหล่ตัวใหม่เข้าเปลี่ยนแทนตัวเก่า ทำให้ความมั่นคงของระบบดีขึ้น แต่ขณะเดียวกัน ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอะไหล่ก็มีค่าสูงเช่นกัน ในขณะที่การดำเนินการวิจัยข้อมูล ลชุดแรกเรื่องการหาความแข็งแรง ถ้าได้เสร็จลง ทางผู้วิจัยมีความมั่นใจว่า ผลที่ได้น่าจะมีการถูกต้องในแนวทางที่ได้จากผลการวิจัย จึงส่งมอบข้อมูลให้หน่วยงานผู้รับผิดชอบของการไฟฟ้าได้ทำการนำอะไหล่เก่าที่ยุบสภาพแล้วจำนวนหนึ่งดำเนินการซ่อมตามกรรมวิธีใหม่ที่ได้จาก การวิจัย ซึ่งอะไหล่ส่วนหนึ่งถูกนำขึ้นใช้งานแล้วและติดตามการใช้งานอย่างใกล้ชิด ปัจจุบันส่วนหนึ่งกำลังดำเนินการซ่อมและส่วนที่ซ่อมเสร็จเรียบร้อยแล้ว สรรอง ทำให้เกิดความมั่นคงขึ้นในระบบสูง

ตาราง จ.1 แสดงรายการ ราคา ค่าใช้จ่าย และอายุ ของอะไหล่ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต

ที่	รายการอะไหล่	ราคา (บาท)	อายุใช้งาน (ชั่วโมง)	ค่าใช้งานอะไหล่ (บาท/ชั่วโมงการทำงาน)
1	Final drive shaft	980,565	33,000	28.02
2	Final drive gear	1,561,704	35,000	44.62
3	Final drive pinion	1,852,000	33,000	56.12
4	Shipper shaft	2,206,495	20,000	110.32
5	Shipper shaft pinion	1,300,000	20,000	65
6	Swing shaft	650,000	20,000	32.5

ภาคผนวก ฉ

การวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ให้ความสนใจ เพื่อที่จะทำนายและประมาณค่าแนวโน้มของข้อมูล วิธีการที่นิยมมากที่สุด คือ การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ดังนี้

จ.1 การหาสมการอายุความเส้นโค้ง

สมการการวิเคราะห์หาอายุของวัสดุที่รับความเค้นล้าโดยทั่วไปจะใช้สมการของ Basquin ในการวิเคราะห์

$$\omega_R = A K_R^B \quad (จ.1)$$

ใส่ \log ทั้งสองด้าน สมการ (จ.1)

$$\log/\omega_R = \log \pm 2 \mu \log/K_R \quad (จ.2)$$

ซึ่งคือสมการเส้นตรงในกราฟล็อก-ล็อกปริมาตร ช่วงที่ 2 ของการเติบโต ซึ่งเขียนใหม่ได้ โดยกำหนดตัวแปรใหม่ดังนี้

$$Y = aX + b \quad (จ.3)$$

เมื่อ

$$Y = \log \omega_R$$

$$a = B$$

$$b = \log A$$

และค่า a และ b ที่ทำให้มีความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดของข้อมูล n คือ

$$a = \frac{\sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad (น.4)$$

$$b = \bar{Y} - a\bar{X} \quad (น.5)$$

ข้อมูลและผลการกระจายข้อมูลการทดสอบความแข็งแรงล้าของชิ้นทดสอบดังต่อไปนี้

ตาราง น.1 แสดงการกระจายข้อมูลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340

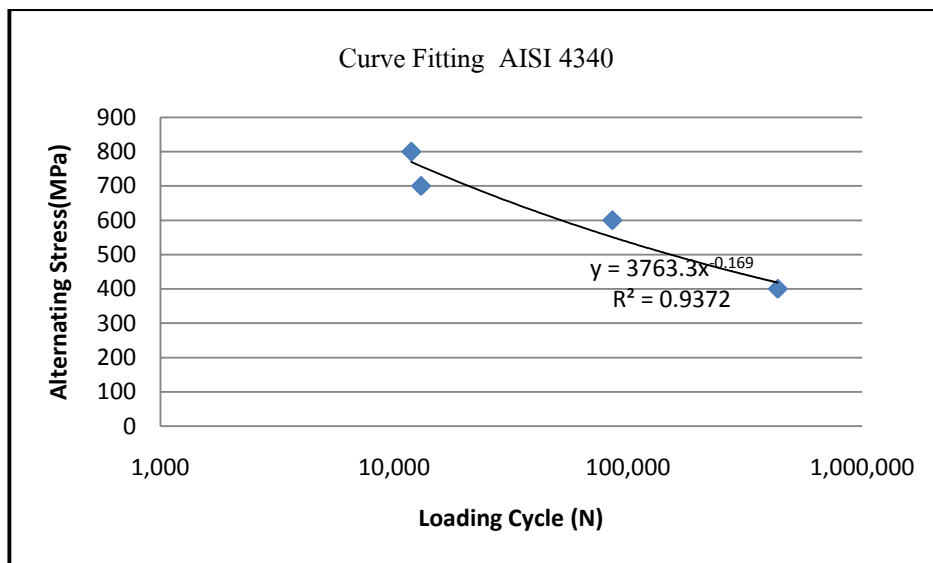
AISI4340							
	life	stress					
n=4	x	y	$\tilde{x}=\log x$	$\tilde{y}=\log y$	$(\tilde{x})^2$	$(\tilde{y})^2$	$(\tilde{x}\tilde{y})$
	435,609	400	5.639097	2.60206	31.79941	6.770716	14.67327
	85,546	600	4.9322	2.778151	24.32659	7.718124	13.7024
	13,025	700	4.114778	2.845098	16.9314	8.094583	11.70695
	11,831	800	4.073021	2.90309	16.5895	8.427931	11.82435
sum	546011	2500	18.7591	11.1284	89.64691	31.01135	51.90696

$$a = 903.2$$

$$b = -0.16919$$

ได้สมการ (น.6) สำหรับทำนายอายุการใช้งานของเพลาสวิงเนื้อเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340 ดังแสดง

$$K | 10^{\frac{1}{40.16919} / \log \omega 4 \log 903.20} \quad (น.6)$$



รูป จ.1 S-N Curve ของเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง AISI 4340 ที่ผ่านการกระชับข้อมูลแล้ว

ตาราง จ.2 แสดงการกระชับข้อมูลการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมไส้ฟลักซ์

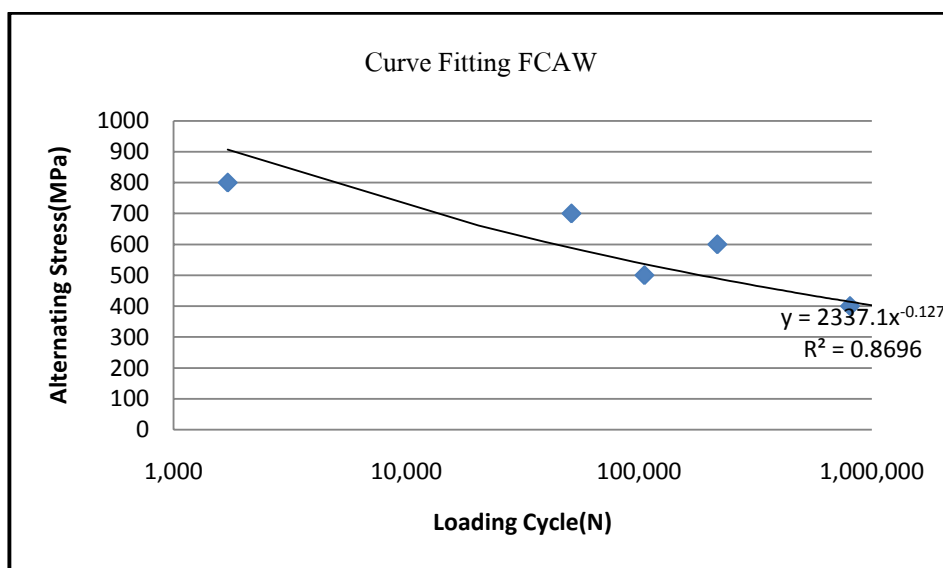
FCAW	life	stress					
n=7	x	y	$x^{\sim}=\log x$	$y^{\sim}=\log y$	$(x^{\sim})^2$	$(y^{\sim})^2$	$(x^{\sim}-y^{\sim})$
	6,713,160	300	6.826927	2.477121	46.60693	6.13613	16.91113
	1,467,630	350	6.166617	2.544068	38.02716	6.472282	15.68829
	804,931	400	5.905759	2.60206	34.87799	6.770716	15.36714
	105,401	500	5.022845	2.69897	25.22897	7.284439	13.55651
	216,760	600	5.335979	2.778151	28.47267	7.718124	14.82416
	51,210	700	4.709355	2.845098	22.17802	8.094583	13.39858
	1,710	800	3.232996	2.90309	10.45226	8.427931	9.385679
sum	9,360,802	3,650	37	19	206	51	99

$a = 560.9$

$b = -0.12721$

ได้สมการ (จ.7) สำหรับทำนายอายุการใช้งานของเพลาสวิงเนื้อเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340 เชื่อมพอกด้วยเนื้อเชื่อมไส้ฟลักซ์ดังแสดง

$$K = 10^{\frac{1}{40.12721} / \log \omega 4 \log 56090} \tag{จ.7}$$



รูป จ.2 S-N Curve ของเนื้อเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ผ่านการกระชับข้อมูลแล้ว

ตาราง จ.3 แสดงการกระชับข้อมูลการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมแมก

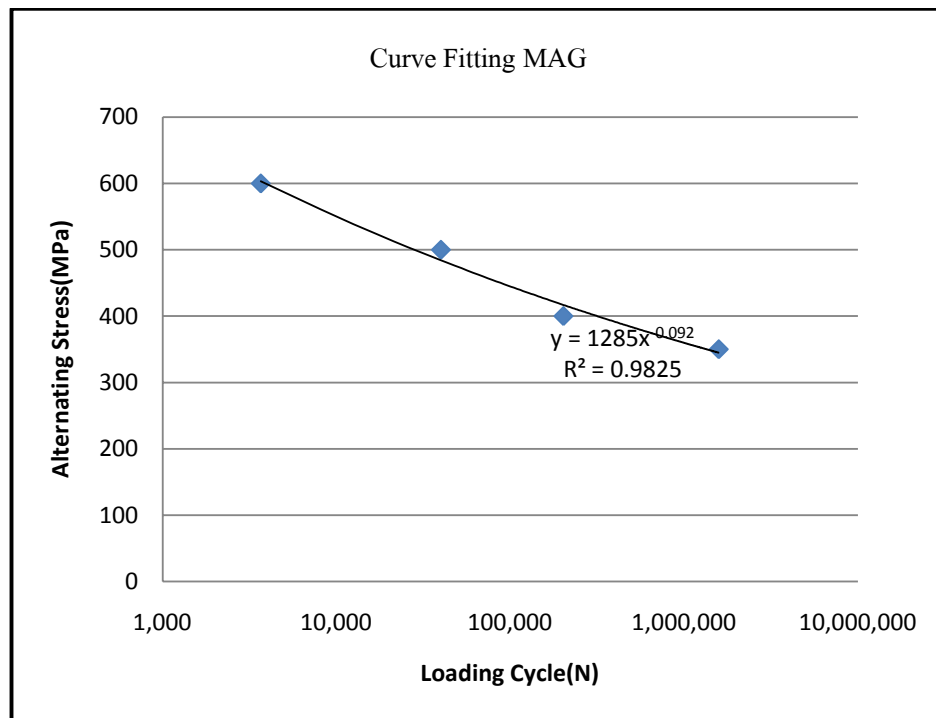
MAG	life	stress					
n=4	x	y	$x^{\sim}=\log x$	$y^{\sim}=\log y$	$(x^{\sim})^2$	$(y^{\sim})^2$	$(x^{\sim}y^{\sim})$
	1,582,570	350	6.199363	2.544068	38.4321	6.472282	15.7716
	202,039	400	5.305435	2.60206	28.14764	6.770716	13.80506
	39,854	500	4.600472	2.69897	21.16434	7.284439	12.41654
	3,663	600	3.563837	2.778151	12.70093	7.718124	9.900878
sum	1,828,126	1850	19.66911	10.62325	100.445	28.24556	51.89408

$$a = 308.4$$

$$b = -0.09214$$

ได้สมการ (ฉ.8) สำหรับทำนายอายุการใช้งานของเพลาสวิงเนื้อเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340 เชื่อมพอกด้วยเนื้อเชื่อมแมกดังแสดง

$$K | 10^{\frac{1}{40.09214} / \log \omega 4 \log 308.40} \quad (\text{ฉ.8})$$



รูป ฉ.3 S-N Curve ของเนื้อเชื่อมแมก ที่ผ่านการกระชับข้อมูลแล้ว

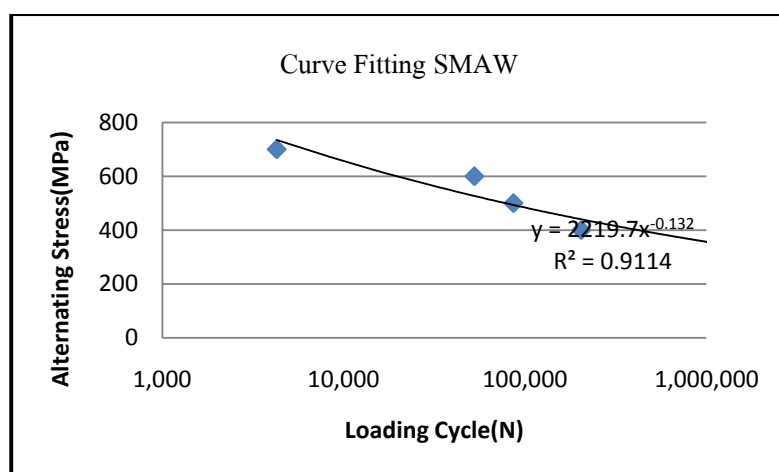
ตาราง จ.4 แสดงการกระจายข้อมูลการทดสอบความล้าของชิ้นทดสอบเนื้อเชื่อมหุ้มฟลักซ์

SMAW							
	life	stress					
n=5	x	y	$x^{\sim}=\log x$	$y^{\sim}=\log y$	$(x^{\sim})^2$	$(y^{\sim})^2$	$(x^{\sim}y^{\sim})$
	1,166,063	350	6.066722	2.544068	36.80512	6.472282	15.43415
	203,481	400	5.308524	2.60206	28.18043	6.770716	13.8131
	86,168	500	4.935346	2.69897	24.35764	7.284439	13.32035
	52,474	600	4.719944	2.778151	22.27787	7.718124	13.11272
	4,270	700	3.630428	2.845098	13.18001	8.094583	10.32892
sum	1,512,456	2550	24.66096	13.46835	124.8011	36.34014	66.00924

$a = 532.7$ และ $b = -0.13232$

ได้สมการ (จ.8) สำหรับทำนายอายุการใช้งานของเพลาสวิงเนื้อเหล็กกล้าผสมต่ำทนแรงดึงสูง AISI 4340 เชื่อมพอกด้วยเนื้อเชื่อมแมกคังแสดง

$$K | 10^{\frac{1}{40.09214} / \log \omega 4 \log 30840} \quad (จ.8)$$



รูป จ.4 S-N Curve ของเนื้อเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ผ่านการกระจายข้อมูลแล้ว

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการหาแฟกเตอร์ปรับปรุงค่าความล้า

แฟกเตอร์ปรับปรุงค่าความแข็งแรงล้าตาม Marine equation $S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_{ut}$ เป็นดังต่อไปนี้

☒ K_a คือ แฟกเตอร์ปรับปรุงผิว หาได้จากสมการ $K_a = a S_{ut}^b$

Surface finish	Factor a S _{ut} kpsi	Factor a S _{ut} MPa	Exponent b
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machine or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
Asforged	39.9	272	-0.995

$$\text{ดังนั้น } K_a = 4.51(1044)^{-0.265} = 0.715$$

☒ K_b คือ แฟกเตอร์ปรับปรุงขนาด หาได้จากสมการ $K_b = 1.51d^{-0.157}$

K_b	$d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107}$	$0.11 \leq d \leq 2 \text{ in}$
	$0.91d^{-0.157}$	$2 < d \leq 10 \text{ in}$
	$(d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107}$	$2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$
	$1.51d^{-0.157}$	$51 < d \leq 254 \text{ mm}$

$$\text{ดังนั้น } K_b = 1.51(203.3)^{-0.157} = 0.655$$

☒ K_c คือ แฟกเตอร์ปรับปรุงภาระโหด ในที่นี้ใช้ค่า 0.59

K_c	1	bending
	0.85	axial
	0.59	torsion

☒ K_d คือ แฟกเตอร์ปรับปรุงอุณหภูมิใช้งาน หาได้จากสมการ $K_d = S_R / S_{RT}$ ในที่นี้ใช้ค่าเป็น 1

K_d	Temperature (C ⁰)	S_R / S_{RT}
	20	1
	50	1.01

☒ K_e คือ แฟกเตอร์ความน่าเชื่อถือ หาได้จากสมการ $K_e = 1 - 0.08 z_\zeta$ ในที่นี้ใช้ค่าเป็น 0.868

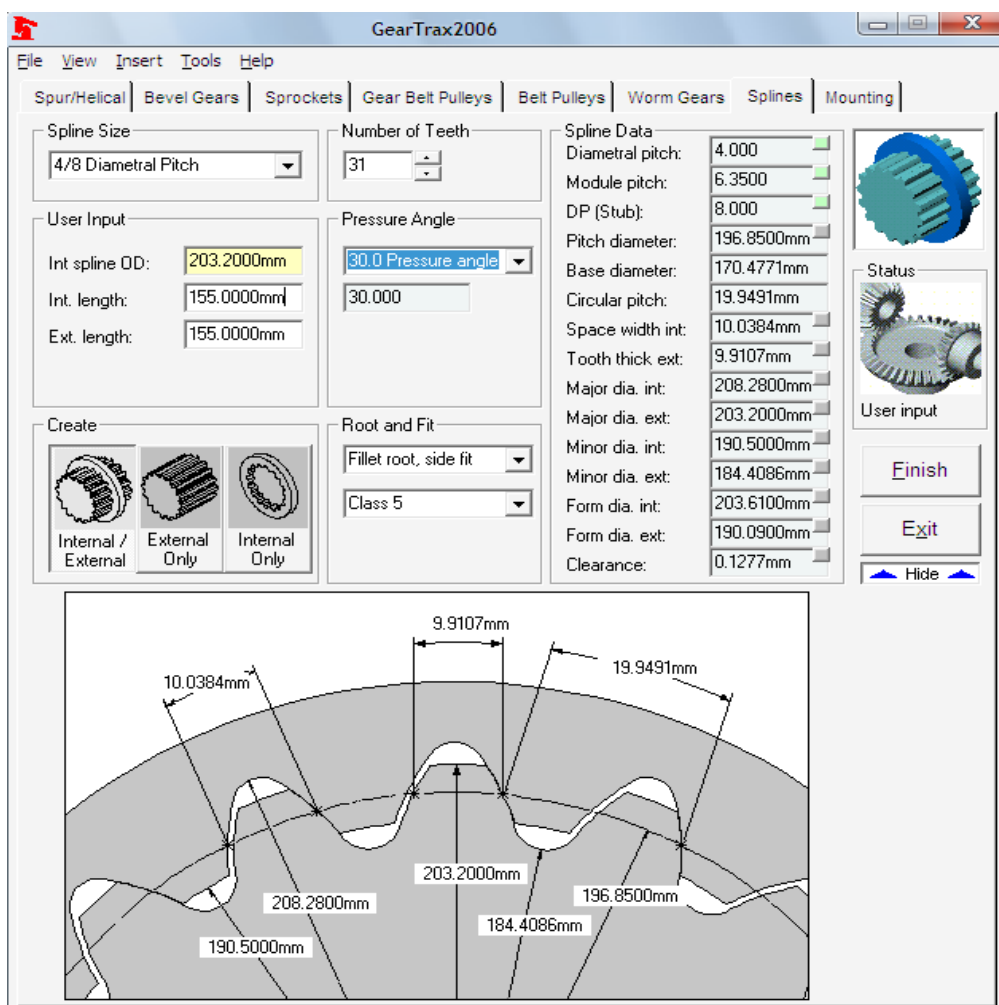
Reliability %	Transformation Variate z_ζ	Reliability factor K_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
100	3.091	0.763

$$\text{ดังนั้น } K_{\text{รวม}} = H_a \Delta H_b \Delta H_c \Delta H_d \Delta H_e = 0.715 \Delta 0.655 \Delta 0.59 \Delta 1 \Delta 0.868 = 0.24$$

ภาคผนวก ข

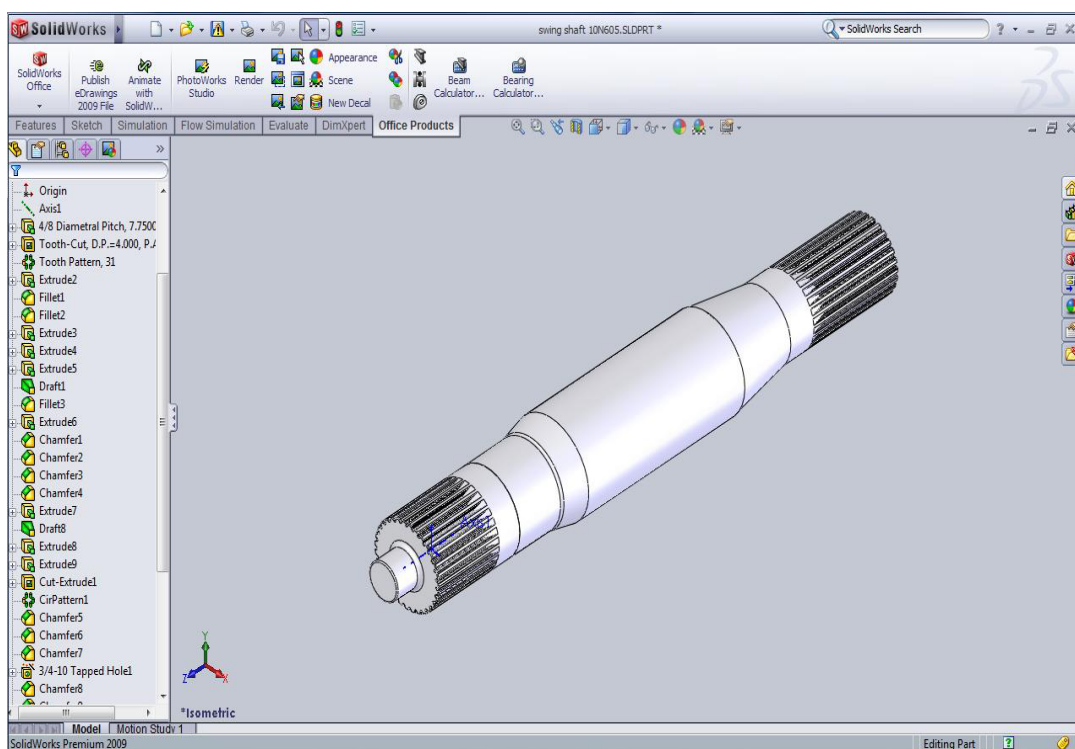
ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของเพลตสวิง

ซ.1 เปิดโปรแกรม Camnetics Geartrax ไปที่ Mode Spline ทำการสร้าง spline โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 2.2 รอส่งเข้าไปในโปรแกรม Solidwork



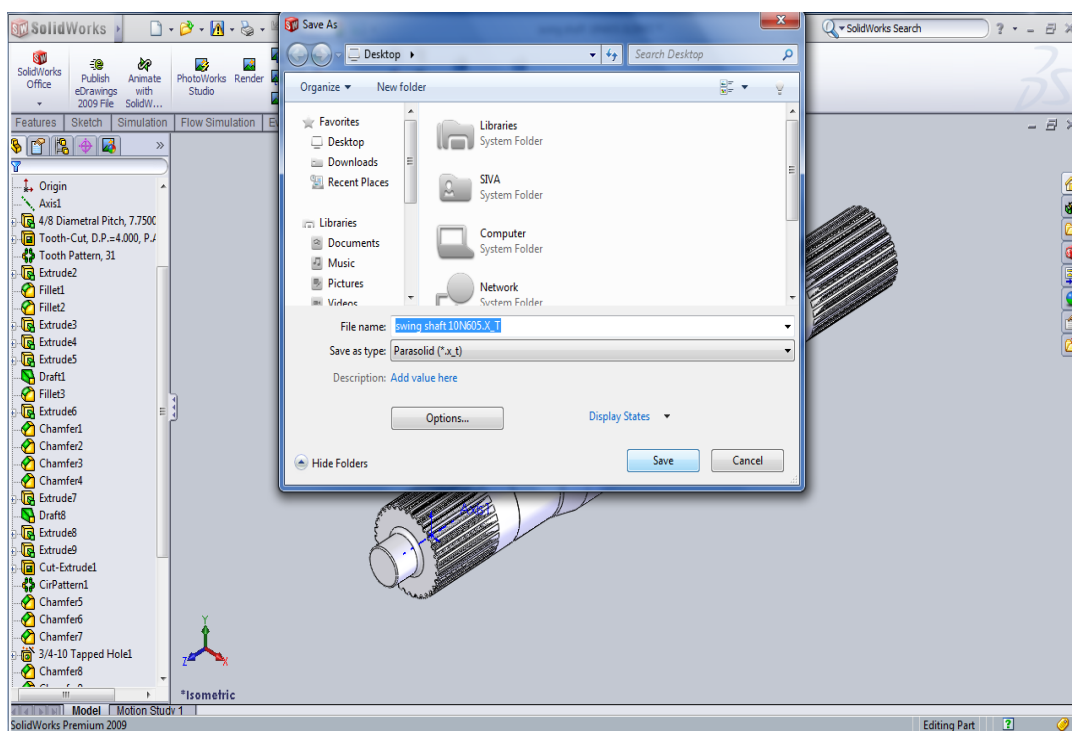
รูป ซ.1 ภาพประกอบคำบรรยาย ซ.1

ซ.2 เปิดโปรแกรม Solidwork ไปที่ Mode Part สร้างไฟล์ขึ้นมาตั้งชื่อว่า Swing Shaft นามสกุล ไฟล์เป็น .prt จากนั้นสร้างแบบจำลองของเพลสวิตตาม Technical drawing ภาคผนวก ก



รูป ซ.2 ภาพประกอบคำบรรยาย ซ.2

ซ.3 Save CAD File ให้เป็นไฟล์กลาง Parasolid File นามสกุล . xmt พร้อมทั้งจะส่งไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

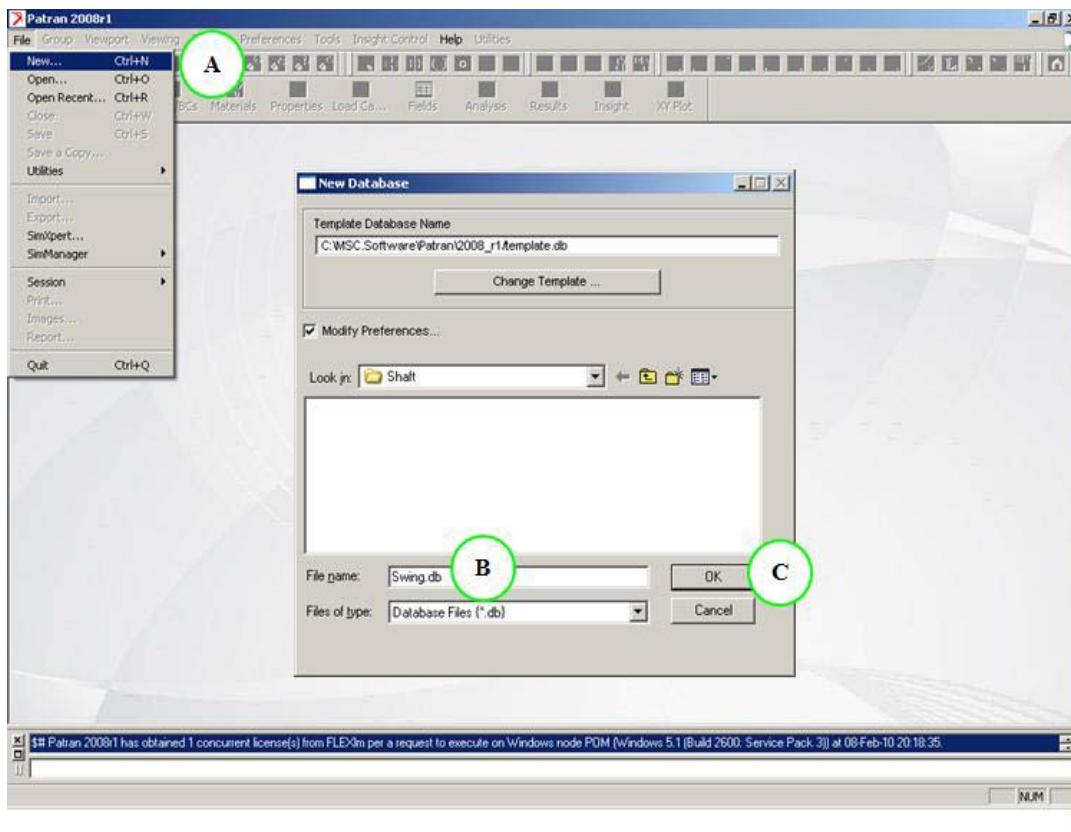


รูป ซ.3 ภาพประกอบคำบรรยาย ซ.3

ภาคผนวก ฅ

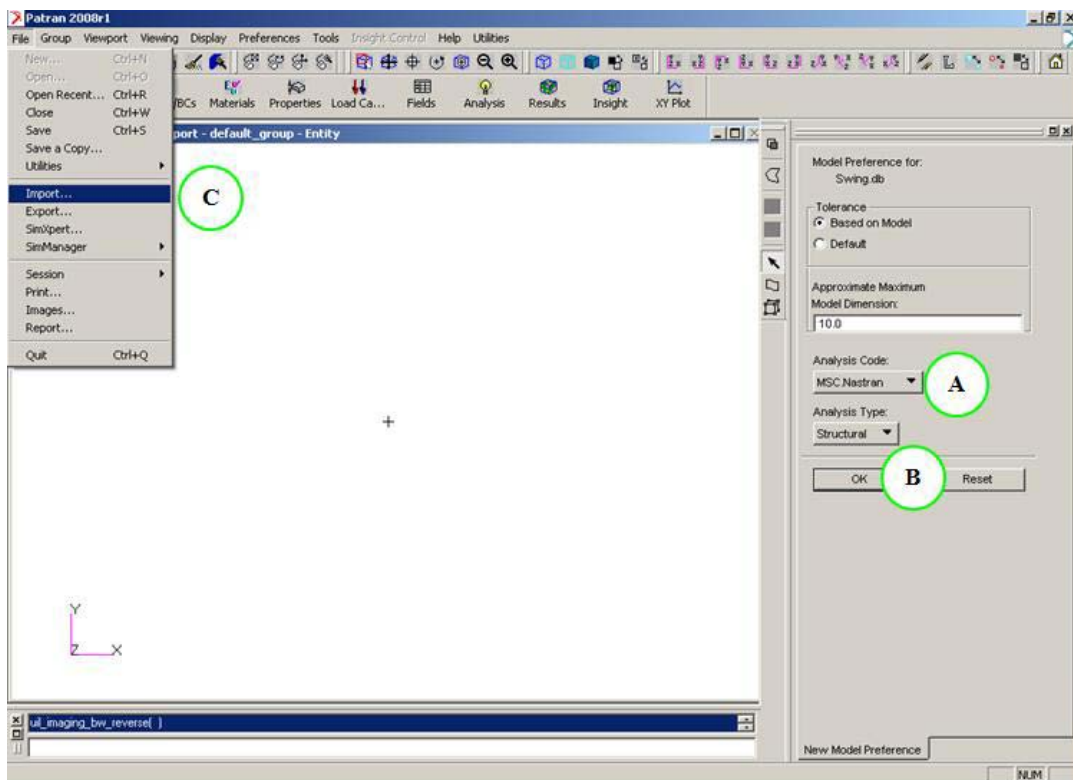
ขั้นตอนการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลลาสวิง

ฉ.1 เปิดโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ประเภท Pre-Processing ชื่อ Patran ขึ้นมา เริ่มสร้างไฟล์ใหม่ ขึ้นมาก่อนโดย ไปที่ File/ new หน้าต่าง New Database จะปรากฏขึ้นมา ให้ใส่ชื่อไฟล์เข้าไป ในที่นี้ใช้ชื่อว่า Swing หลังจากนั้นกด OK โปรแกรมจะทำการสร้างไฟล์ขึ้นมาชื่อว่าSwing.db



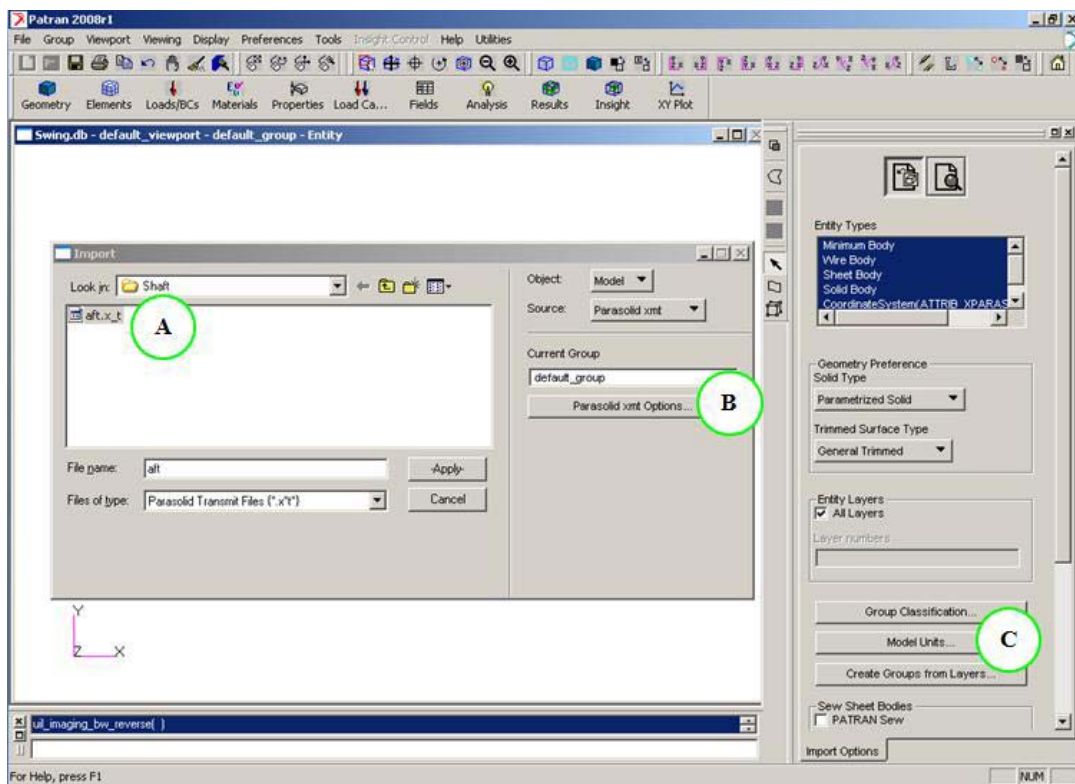
รูป ฉ.1 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.1

ฉ.2 เลือกโปรแกรมไฟไนต์เลิเมนต์ประเภท Post-Processing ชื่อ Nastran ในช่อง Analysis Code ในส่วนของ Analysis Type เลือกเป็น Structural กด OK จากนั้นทำการนำเข้าแบบจำลองของเพลาสวิงโดยไปที่ File/Import



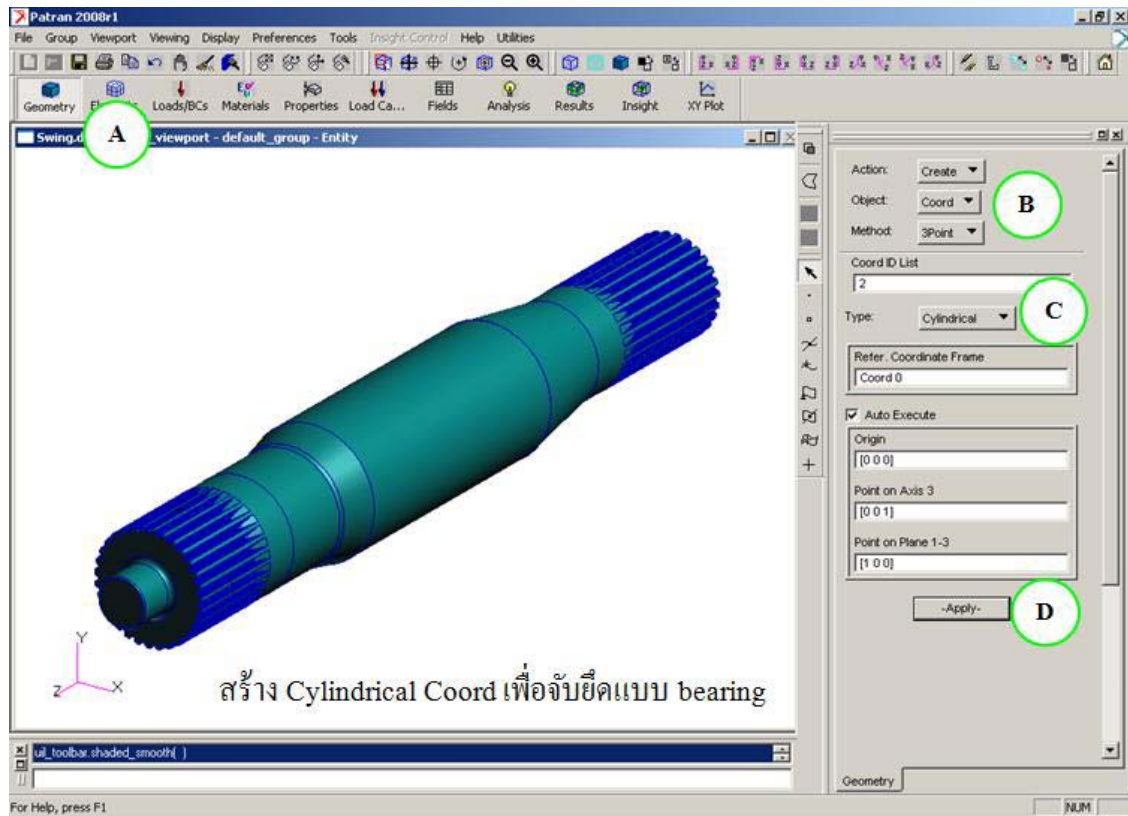
รูป ฉ.2 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.2

ฉ.3 ตรวจสอบแบบจำลองของเพลาสวิง พบว่าเป็น CAD ไฟล์ ที่ถูก save เป็นไฟล์กลางประเภท Parasolid นามสกุลไฟล์เป็น .xmt กด Apply โดยขึ้นส่วนของแบบจำลองเพลาสวิงได้แยกประเภทไว้ใน ช่อง Entity Types



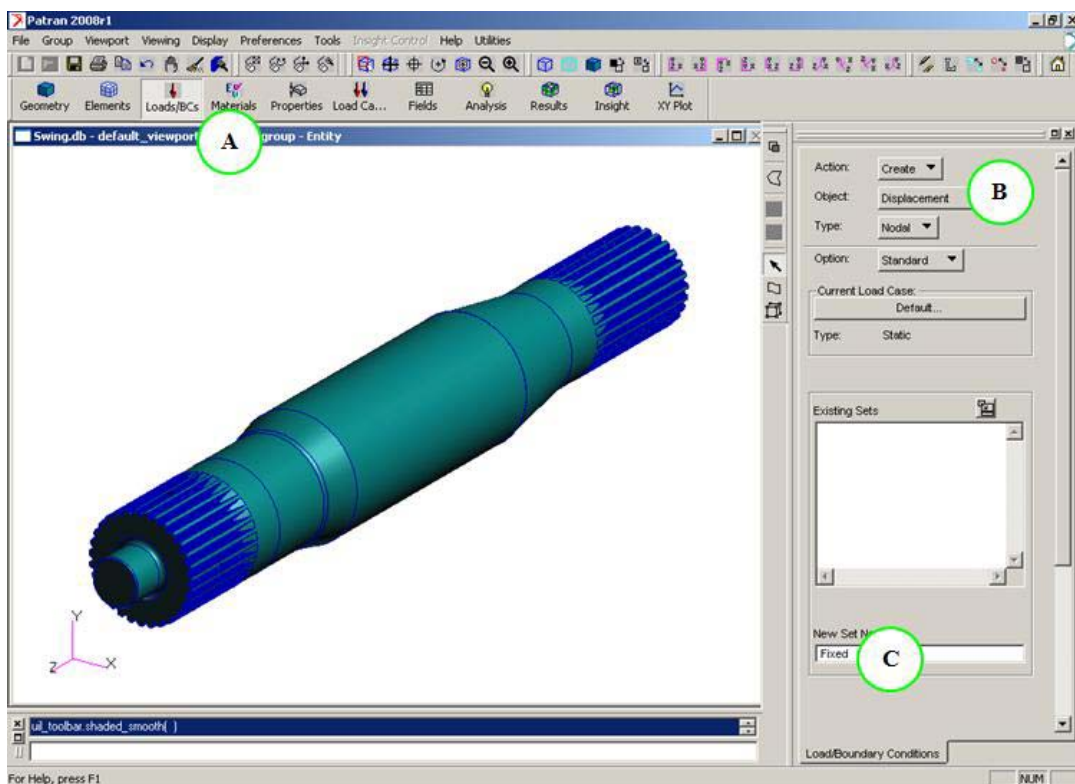
รูป ฉ.3 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.3

ฉ.4 ระบุตำแหน่งโดยทำการวางแผนและระนาบให้กับเพลานใน Function Geometry



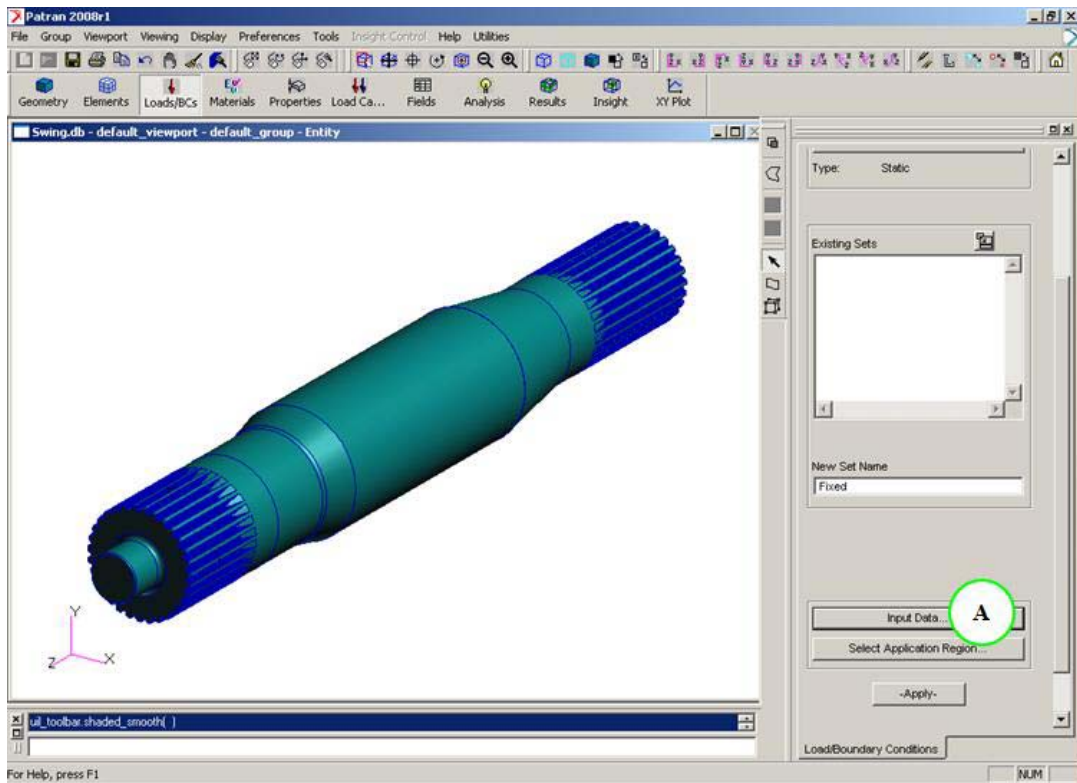
รูป ฉ.4 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.4

ฉ.5 ไปที่ฟังก์ชัน Load & Boundary Condition บังคับระยะการเคลื่อนตัวของ Node ตั้งชื่อที่
New Set Name ว่า Fixed



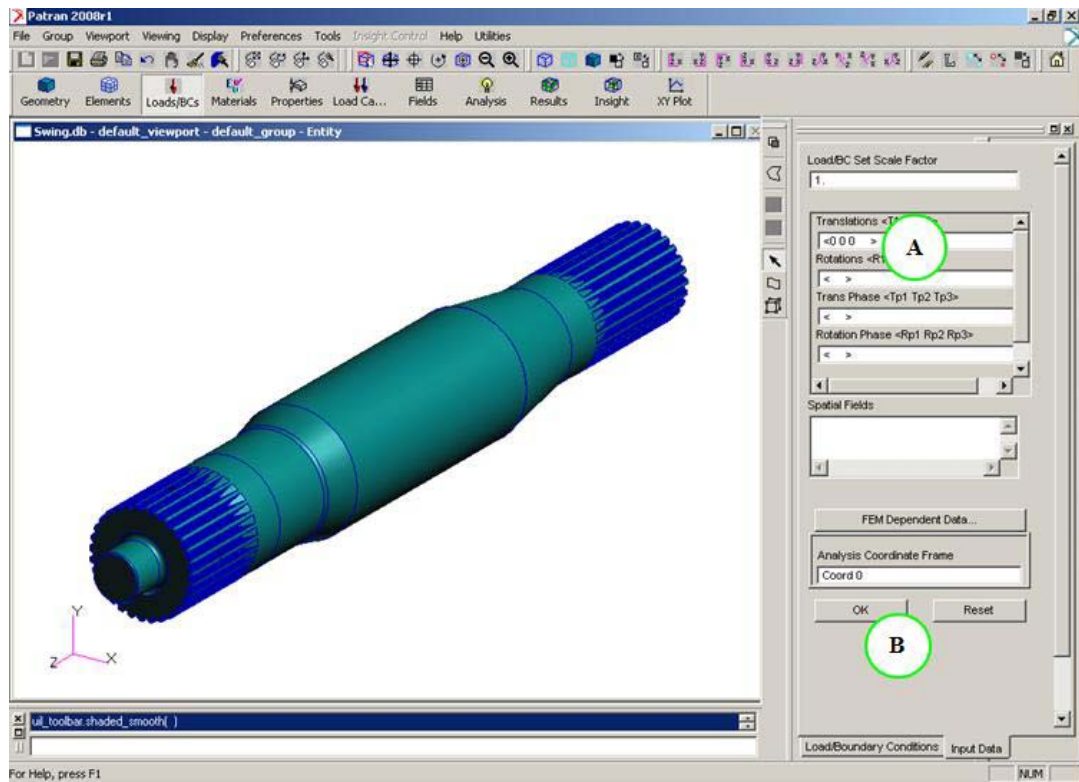
รูป ฉ.5 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.5

ฉ.6 ทำการใส่เงื่อนไขการจับยึดโดยเข้าไปใน Fixed แล้วกดปุ่ม Input Data



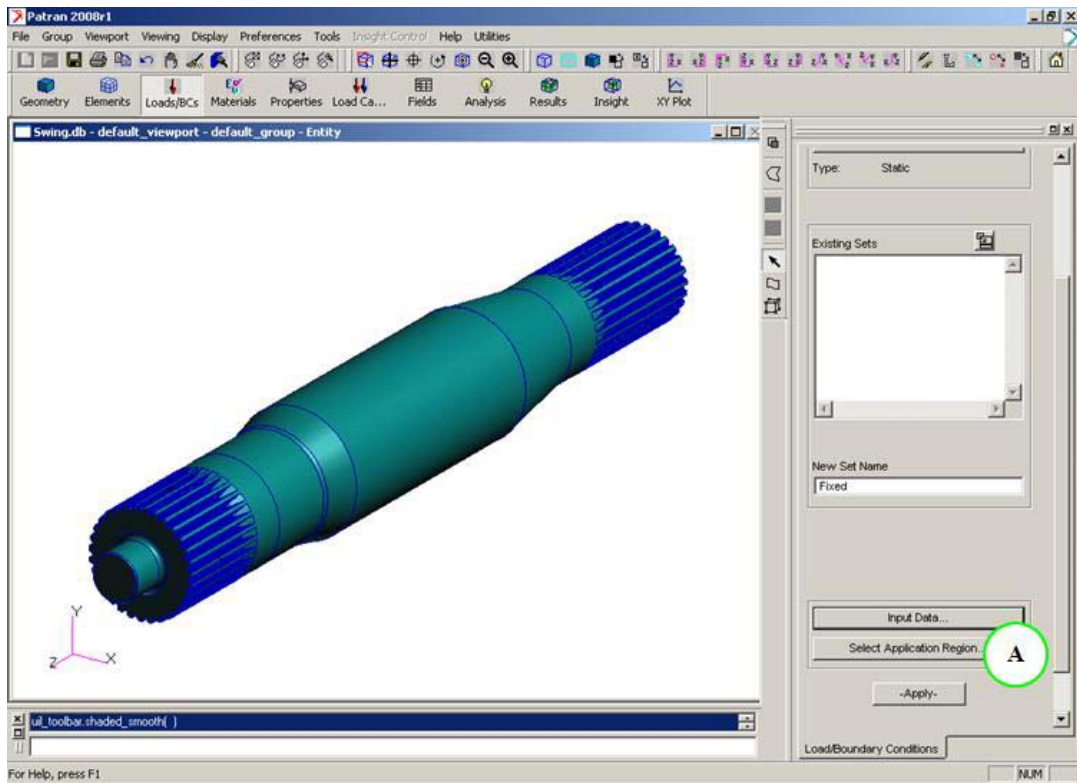
รูป ฉ.6 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.6

ฉ.7 ภาวะเงื่อนไขจับยึด Translations <0,0,0> ทำให้เพลาสวิงไม่สามารถเคลื่อนที่ในทุกแนวแกน



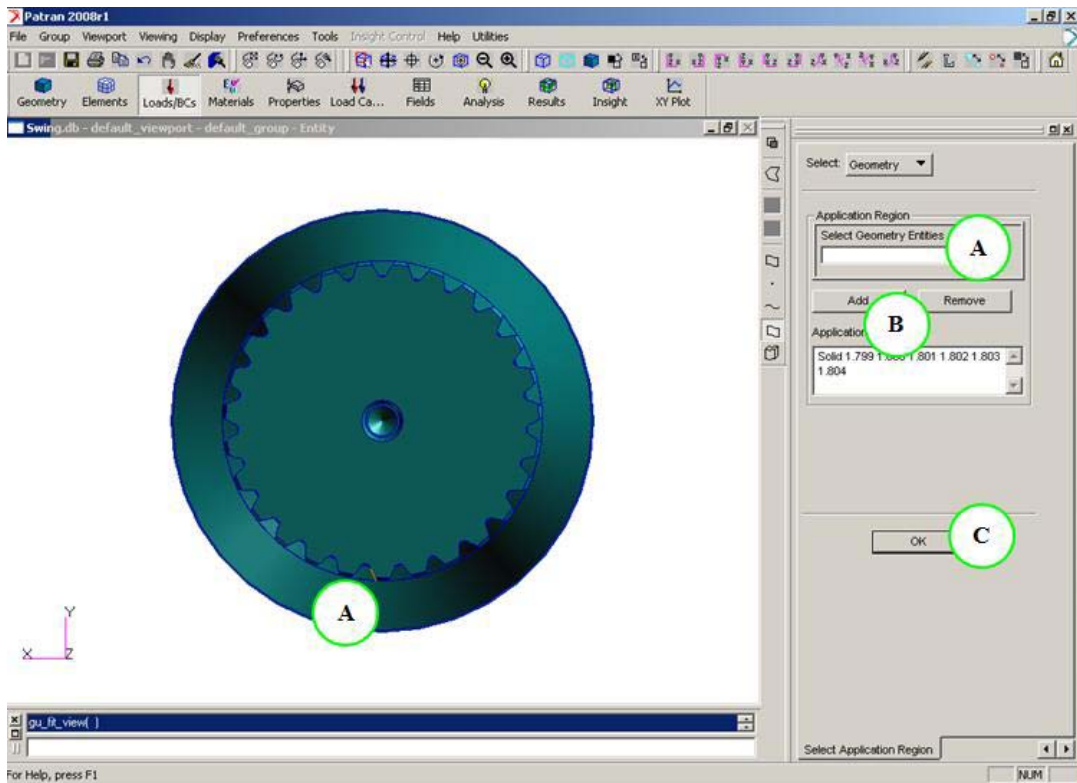
รูป ฉ.7 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.7

ณ.8 กดปุ่ม Select Application Region เพื่อเข้าไปเลือกบริเวณจับยึด



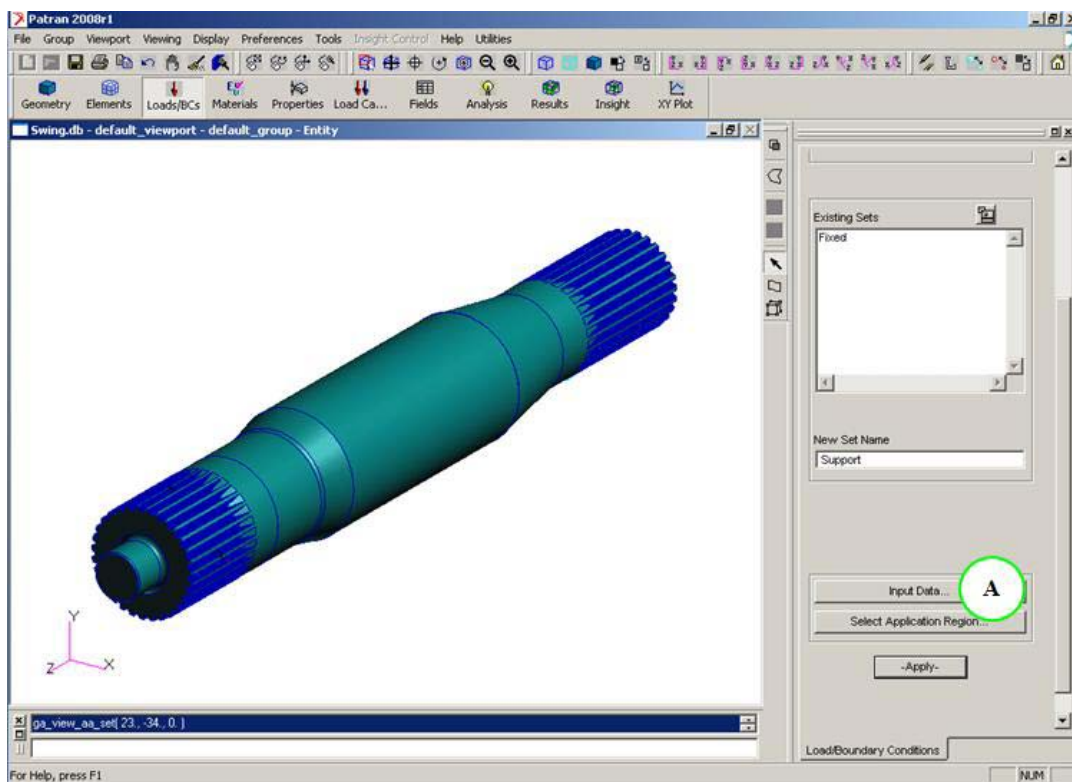
รูป ณ.8 ภาพประกอบคำบรรยาย ณ.8

ฉ.9 ในช่อง Select กำหนดเป็น Geometry เลือกบริเวณที่จะทำการจับยึดแล้วกด Add เพื่อให้ Node ที่เกี่ยวข้องถูกเลือกเข้าไปใน Application Region จากนั้นกด OK และ Apply



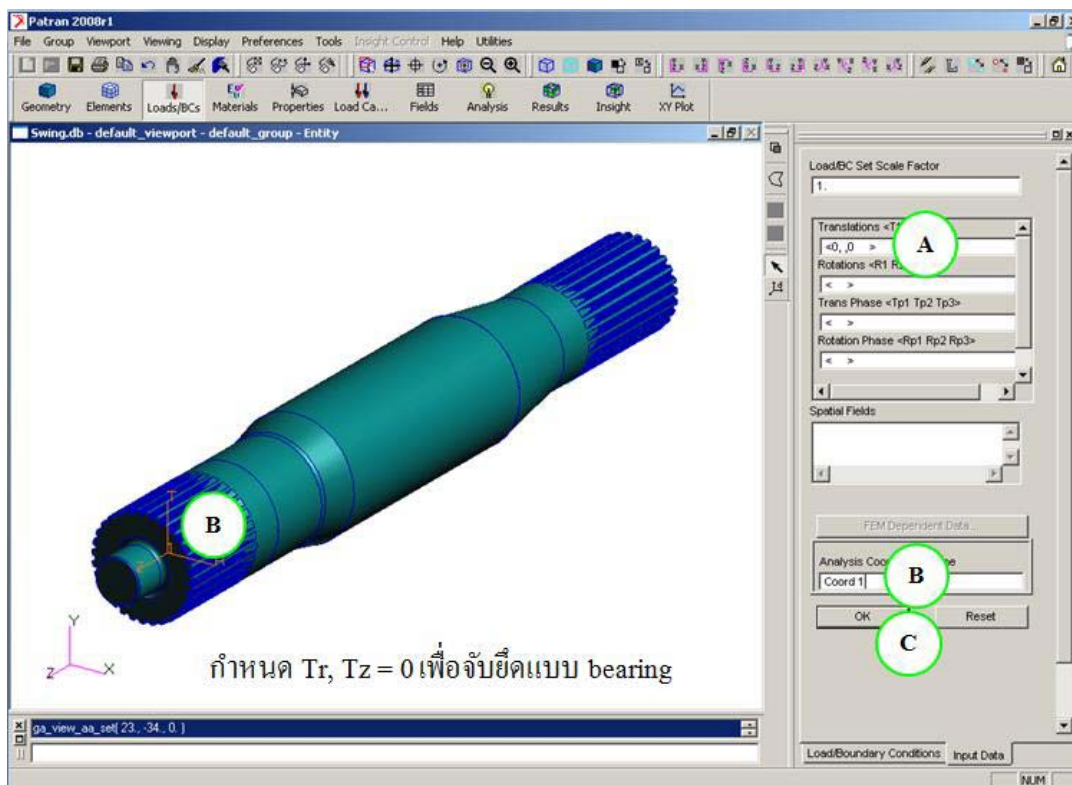
รูป ฉ.9 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.9

ณ.10 กลับมายัง Load & Boundary Condition อีกครั้ง เพิ่มภาระจับยึดแบบเบร้ง ในที่นี้ใช้ชื่อว่า Support จากนั้นเลือก Input Data เพื่อเข้าไปป้อนข้อมูล



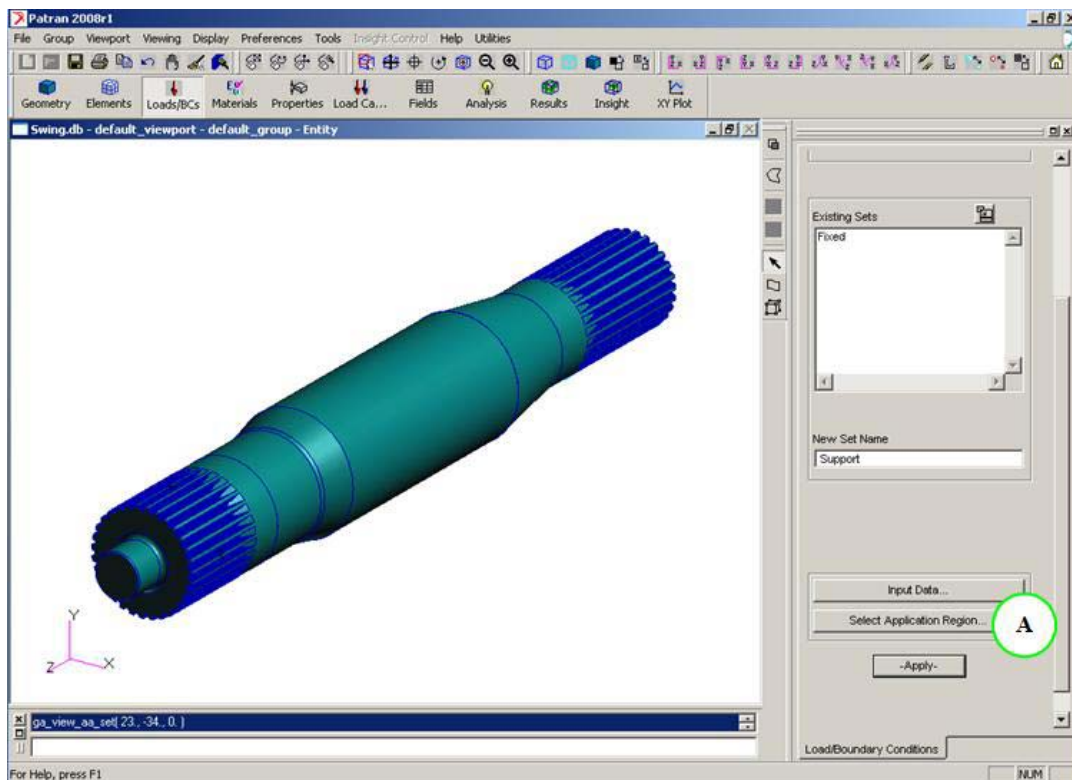
รูป ณ.10 ภาพประกอบคำบรรยาย ณ.10

ฉ.11 ในช่อง Translation ใส่ $\langle 0,0 \rangle$ คือไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y แต่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ได้ เลือก Analysis Coordinate Frame เป็น Coordinate 1 จากนั้นกดปุ่ม OK



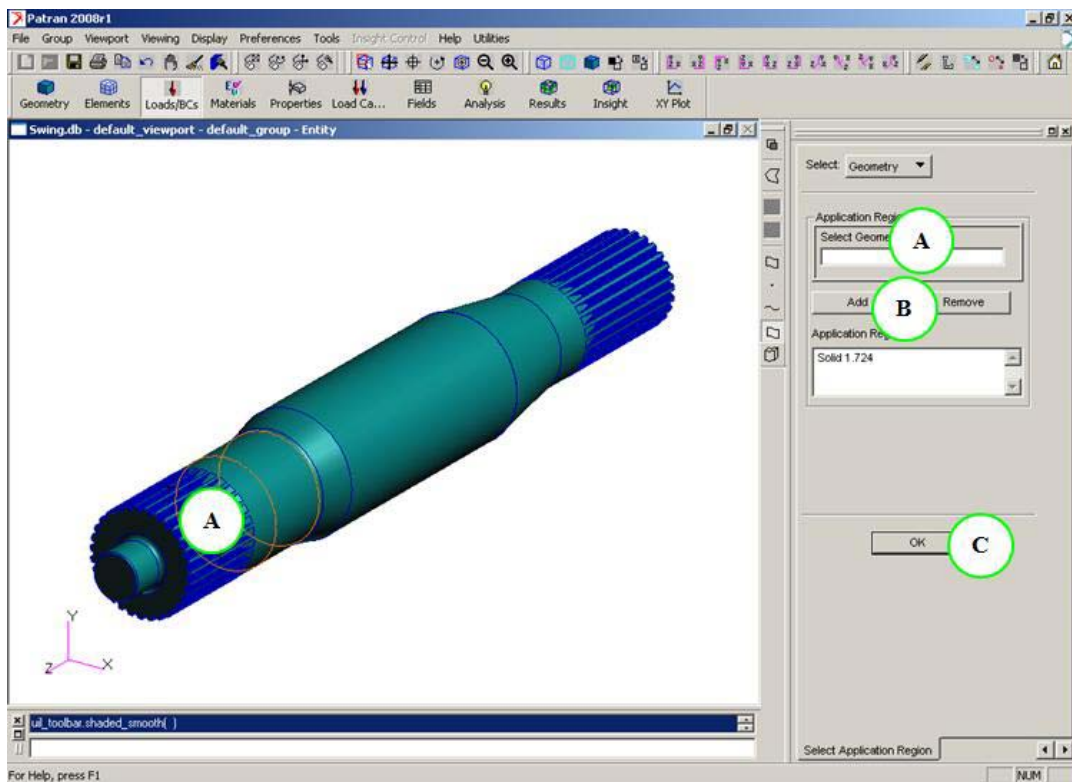
รูป ฉ.11 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.11

ฉ.12 ไปที่ Select Application Region เพื่อทำการเลือกบริเวณจับยึด



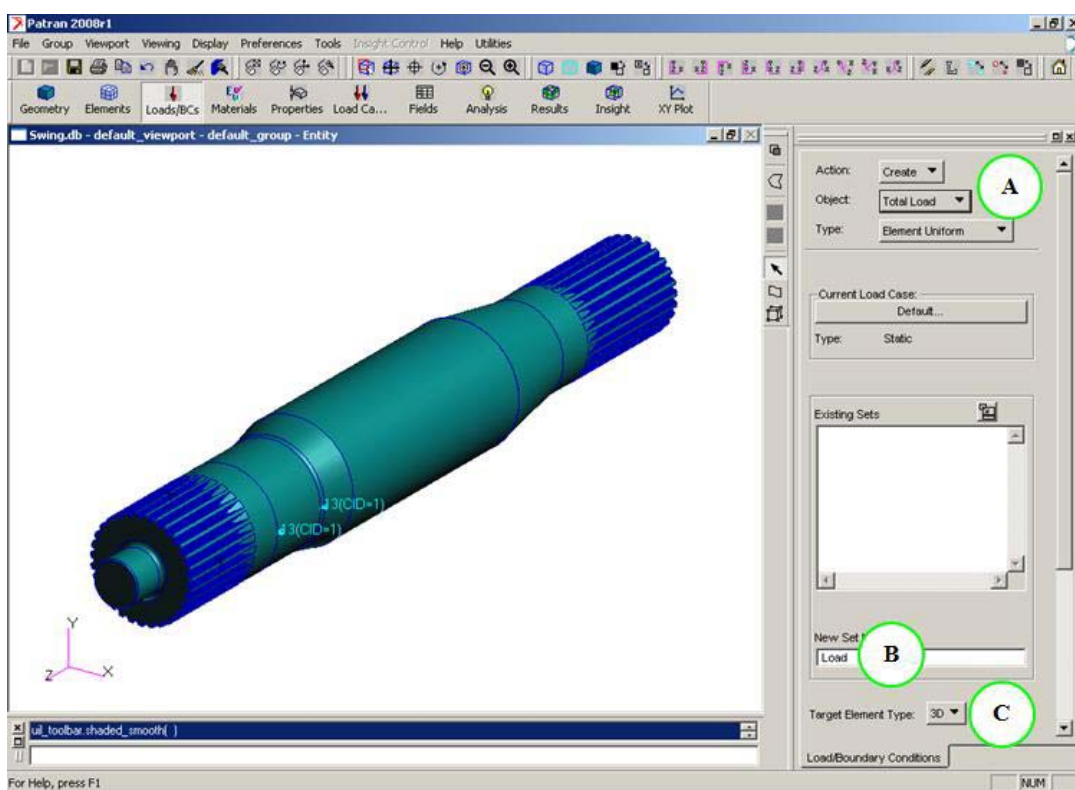
รูป ฉ.12 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.12

ฉ.13 เลือกบริเวณจับยึดจากนั้นกด Add เพื่อให้เข้ามาใน Application Region สังเกตเห็นได้ว่า บริเวณที่เลือกจะไม่ใช่ Node แต่เป็น Solid Body แทน จากนั้นกด OK และกดปุ่ม Apply



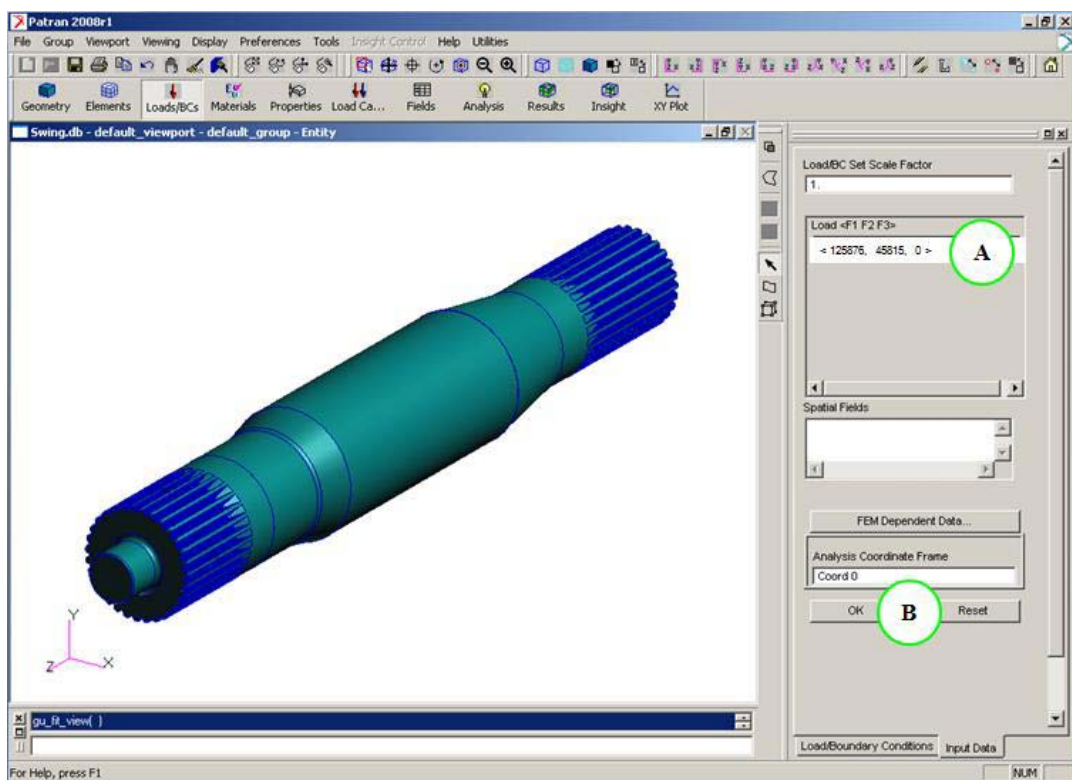
รูป ฉ.13 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.13

ฉ.14 กลับมาที่ Load/Boundary Condition ใส่ภาระแรงแบบ Total Load ใน Input Data โดยเลือก Type แบบ Element Uniform ให้กับ Support ตั้งชื่อว่า Load ส่วน Target Element Type ให้เลือกเป็น 3D กดปุ่ม Select Application Region เลือกบริเวณ Support จากนั้นกด Apply



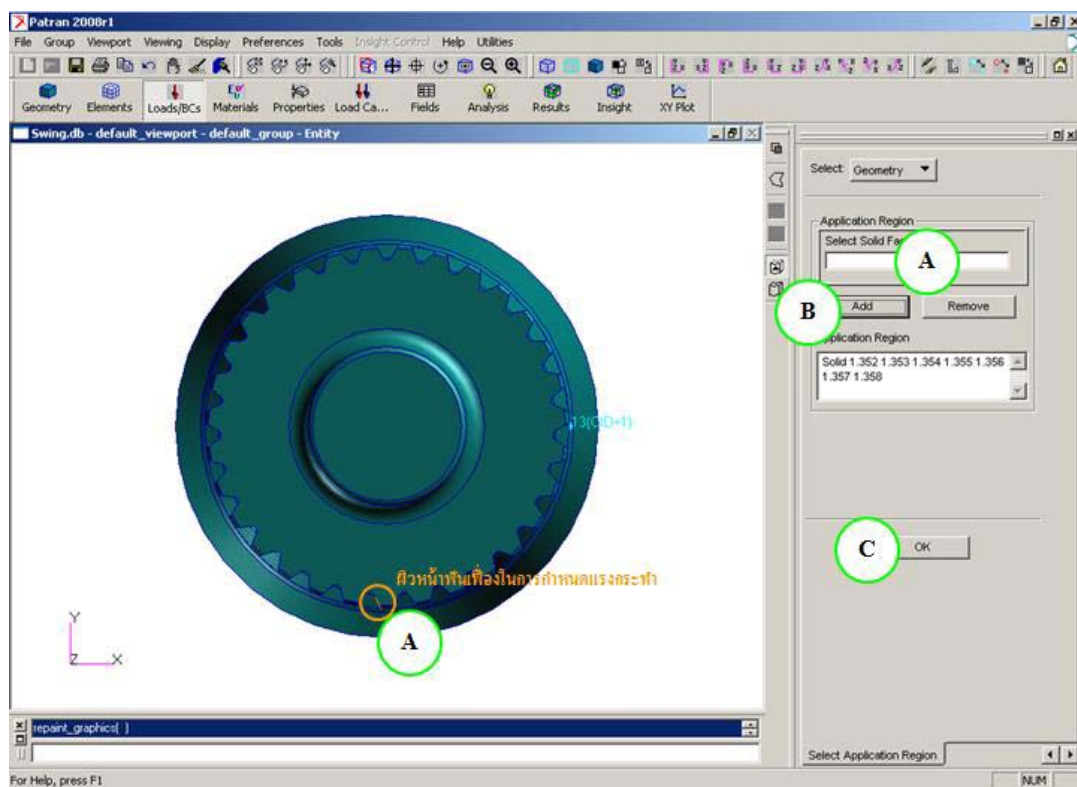
รูป ฉ.14 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.14

ฉ.15 กลับมาที่ Load/Boundary Condition ใส่ภาระแรงกระทำให้กับเพลาดโดยกรอกค่าแรงในช่องโหลด เป็น $\langle 125876, 45815, 0 \rangle$ Analysis Coordinate frame ให้เลือก Coordinate 0 กด OK



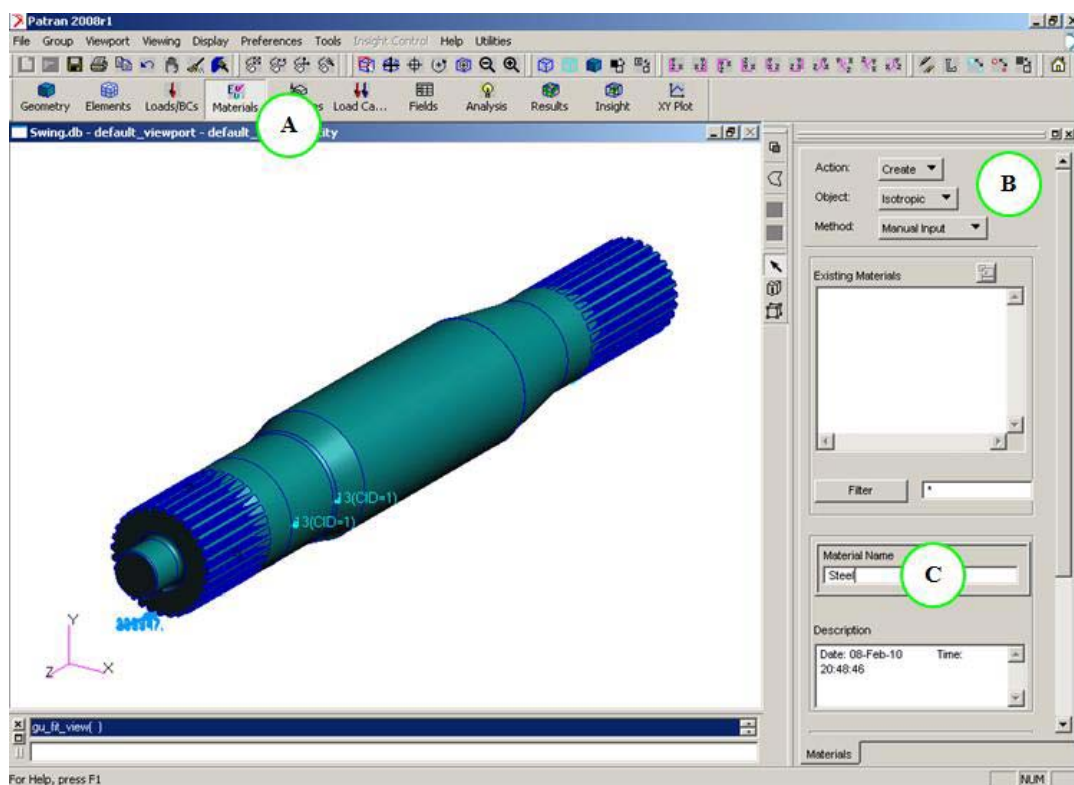
รูป ฉ.15 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.15

ณ.16 ไปที่ Select Application Region เลือกผิวหน้าพื้นเพื่อใช้ในการกำหนดแรงกระทำ กด Add เพื่อรับค่านั้นเข้ามา จากนั้นกด OK แล้วกด Apply



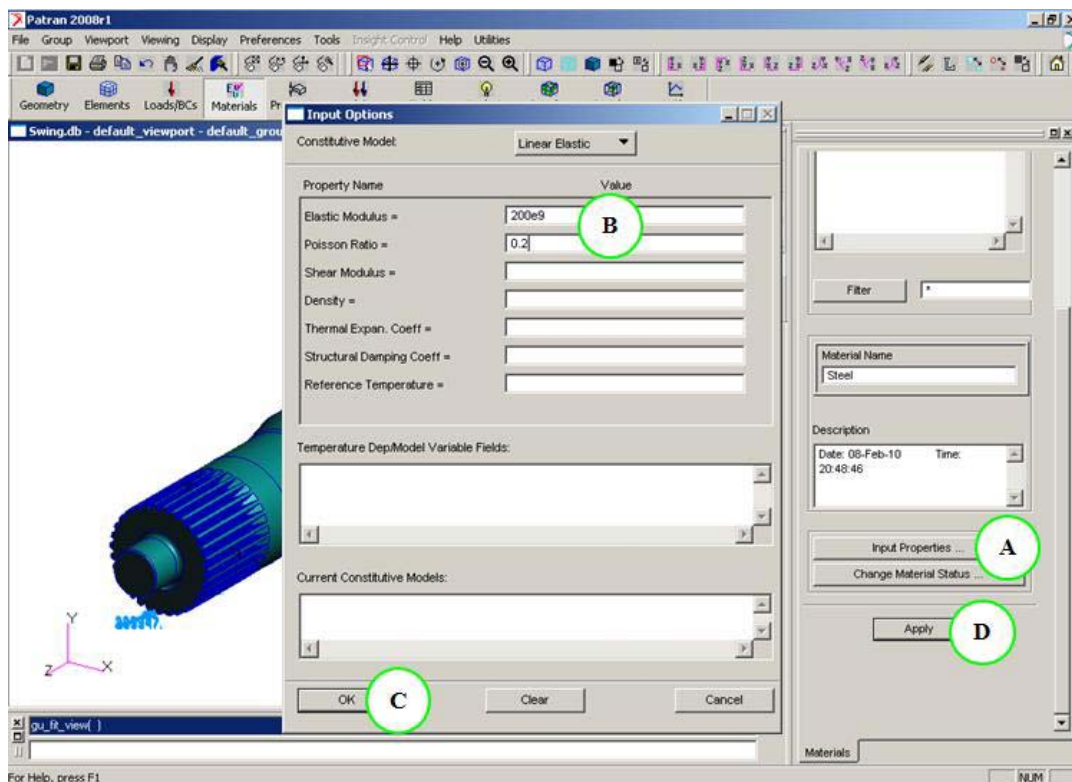
รูป ณ.16 ภาพประกอบคำบรรยาย ณ.16

ณ.17 จากนั้นไปที่ Function materials เลือก material เป็นแบบ Isotropic ตั้งชื่อ material ว่าsteel โดยสมบัติของวัสดุให้เลือกเป็นกำหนดเอง



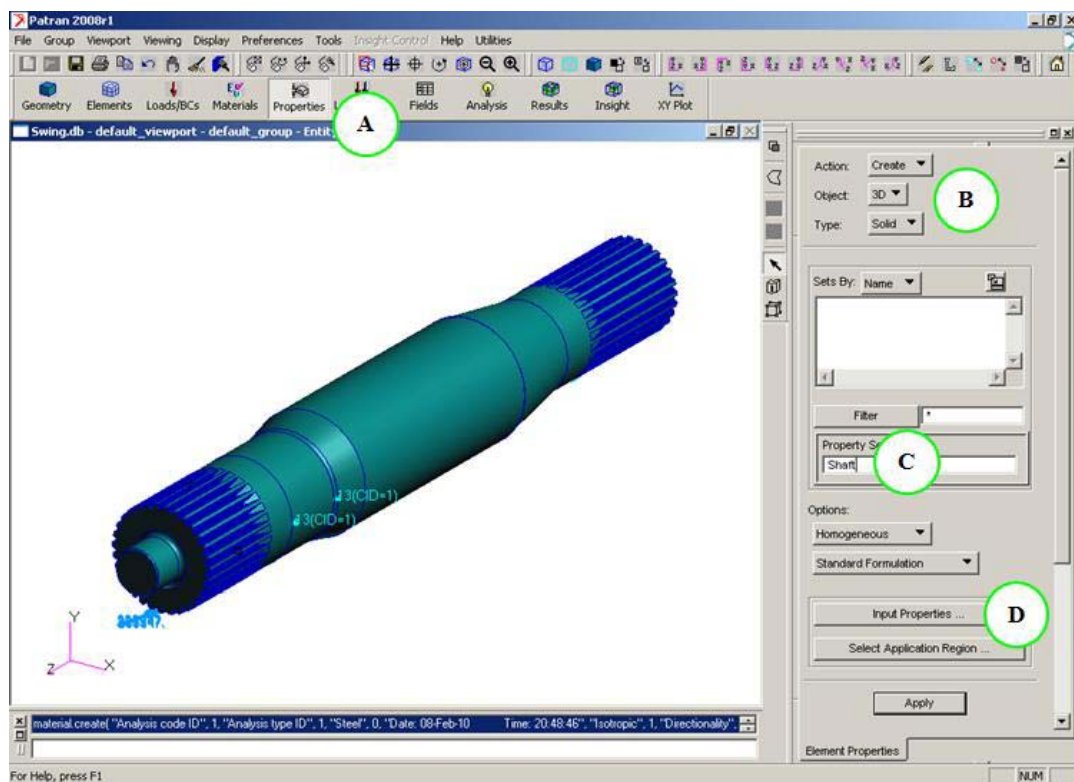
รูป ณ.17 ภาพประกอบคำบรรยาย ณ.17

ฉ.18 ทำการกรอกค่าสมบัติของวัสดุได้แก่ Elastic Modulus และ Poisson Ratio ใน Input Option จากนั้นกด OK แล้วกดปุ่ม Apply



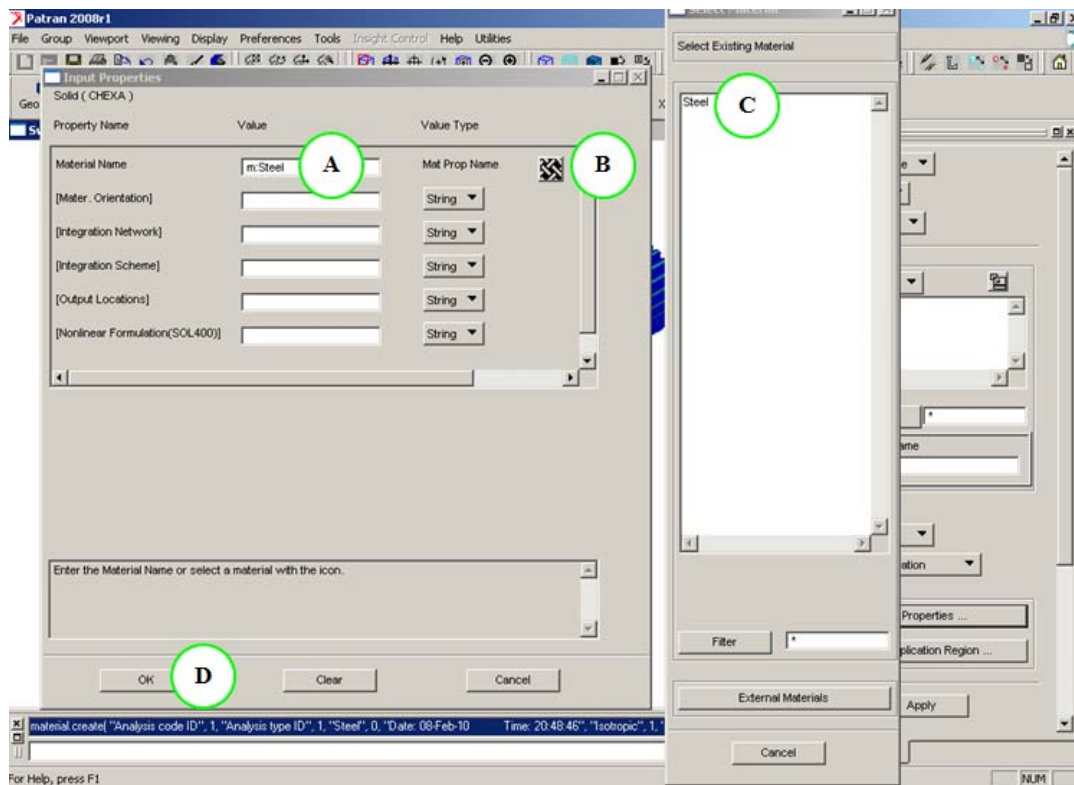
รูป ฉ.18 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.18

ฉ.19 ไปที่ Function Properties เลือกเป็น 3D Solid แบบ Homogeneous และเลือกการคำนวณ เป็นแบบ Standard Formulation ตั้งชื่อว่า Shaft



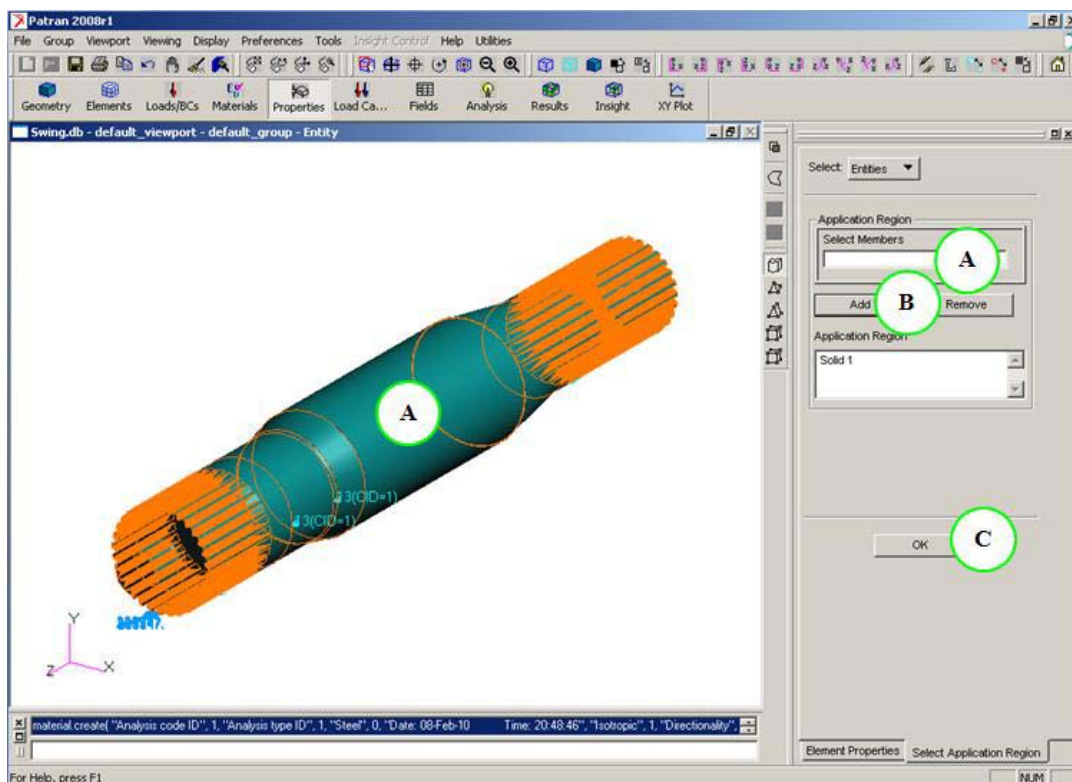
รูป ฉ.19 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.19

ฉ.20 ทำการนำเข้าวัสดุที่ใส่รายละเอียดไว้ใน Material ที่ตั้งชื่อว่า Steel กด OK



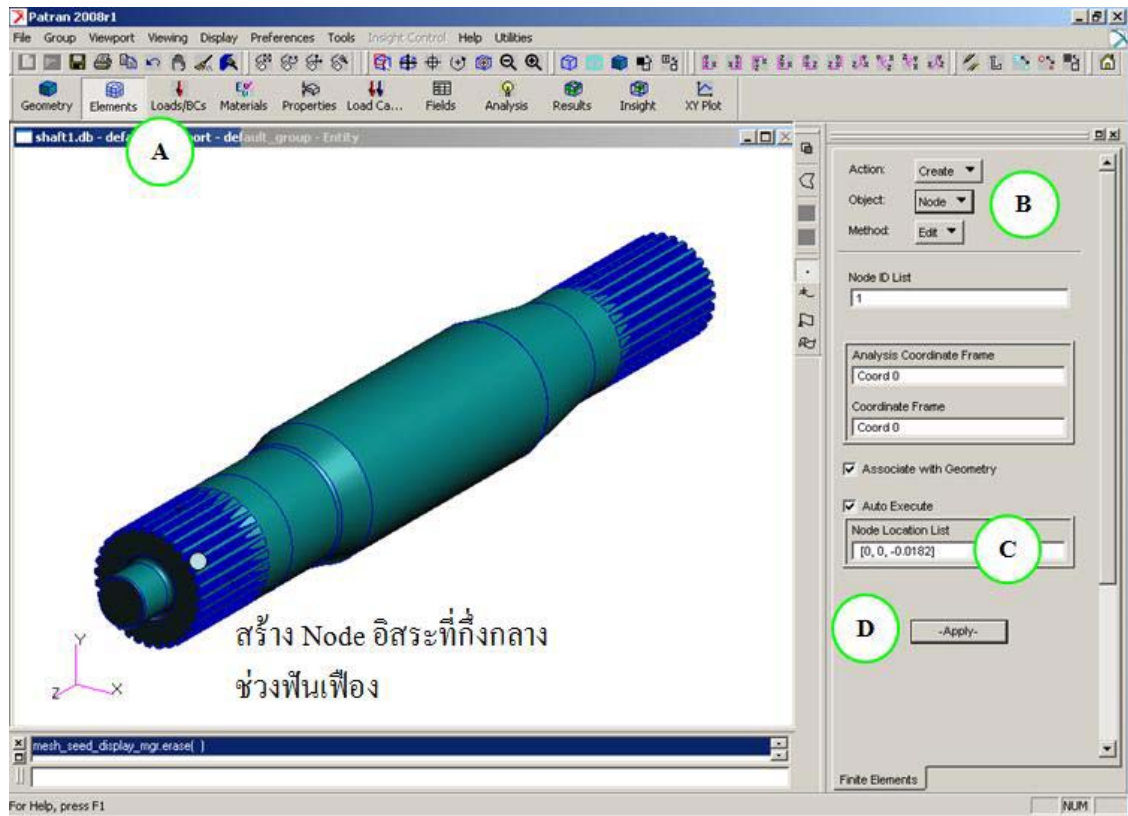
รูป ฉ.20 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.20

ฉ.21 ที่ Function Properties เข้าไปใน Select Application Region ใส่สมบัติวัสดุให้เพลลาทั้งตัว โดยการ Drag mouse ครอบเพลลาสวิง กด Add แล้วกดปุ่ม OK แล้วกดApply



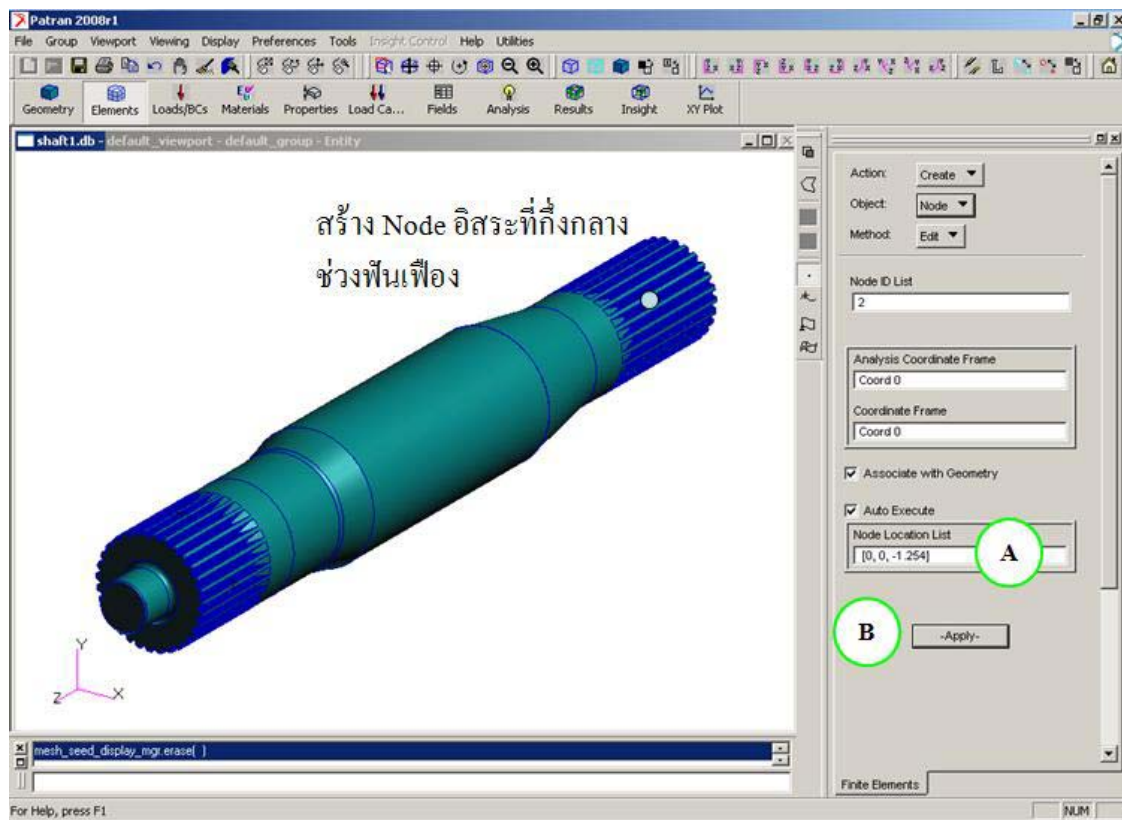
รูป ฉ.21 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.21

ณ.22 กลับมาที่ Function Element สร้าง Node อีสาระที่กึ่งกลางช่วงฟันสไปลด์ด้านซ้าย



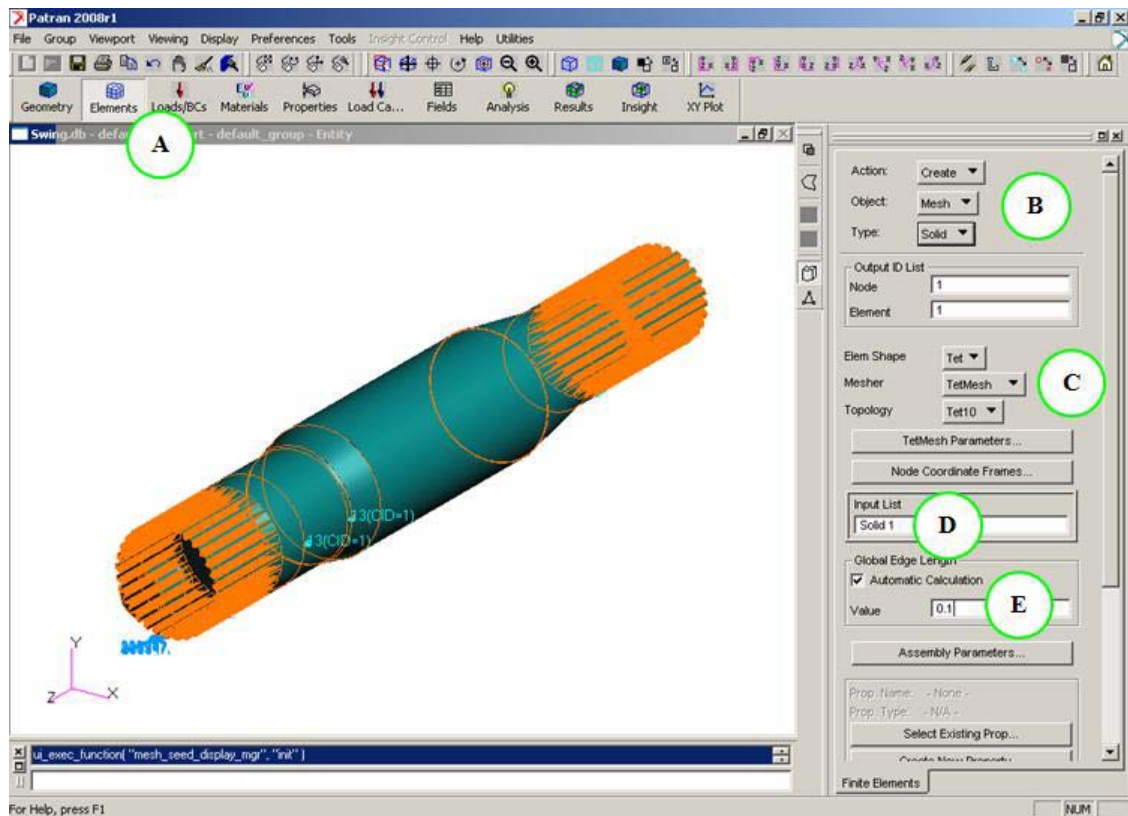
รูป ณ.22 ภาพประกอบคำบรรยาย ณ.22

ฉ.23 ที่ Function Element เช่นเดิม สร้าง Node อีกระยะที่กึ่งกลางช่วงฟันสไปลันต์ด้านขวา



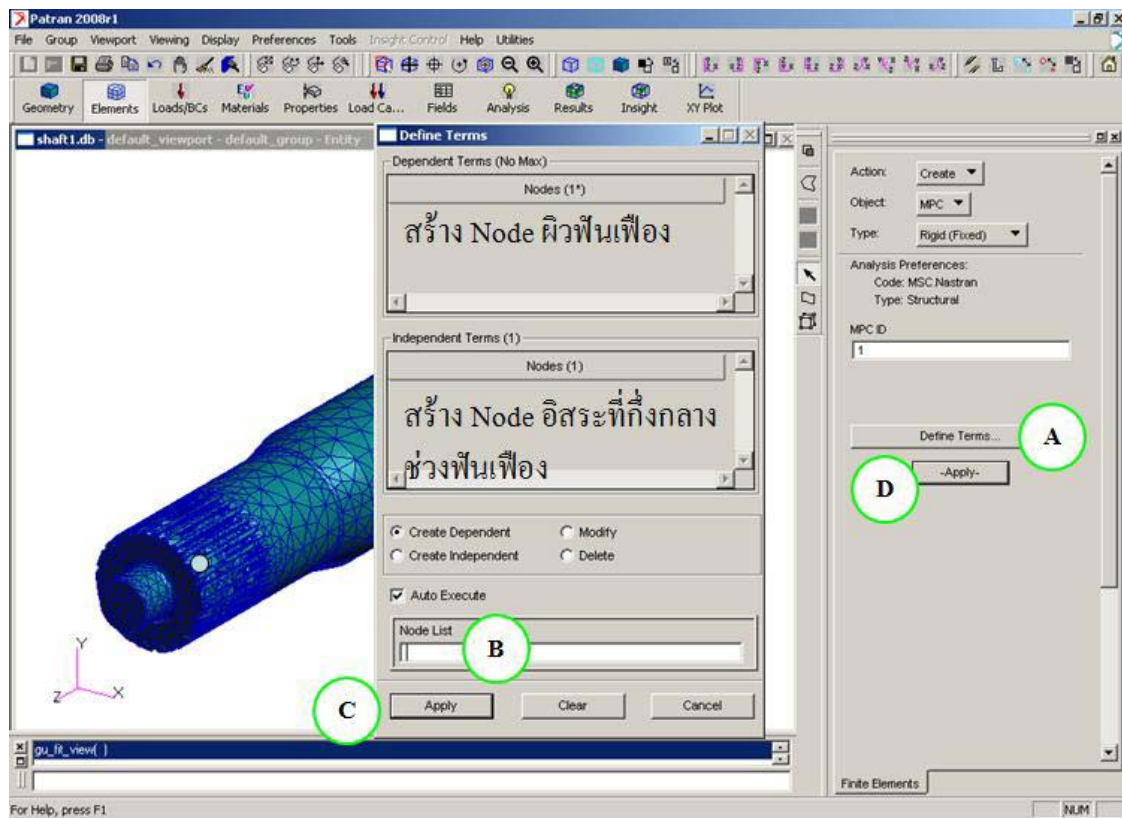
รูป ฉ.23 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.23

ฉ.24 ที่ Function Element เลือก action เป็น create ส่วน Object เป็น mesh และ Type เป็น Solid ทำการ สร้างเมฆแบบ Tet 10 กด Apply



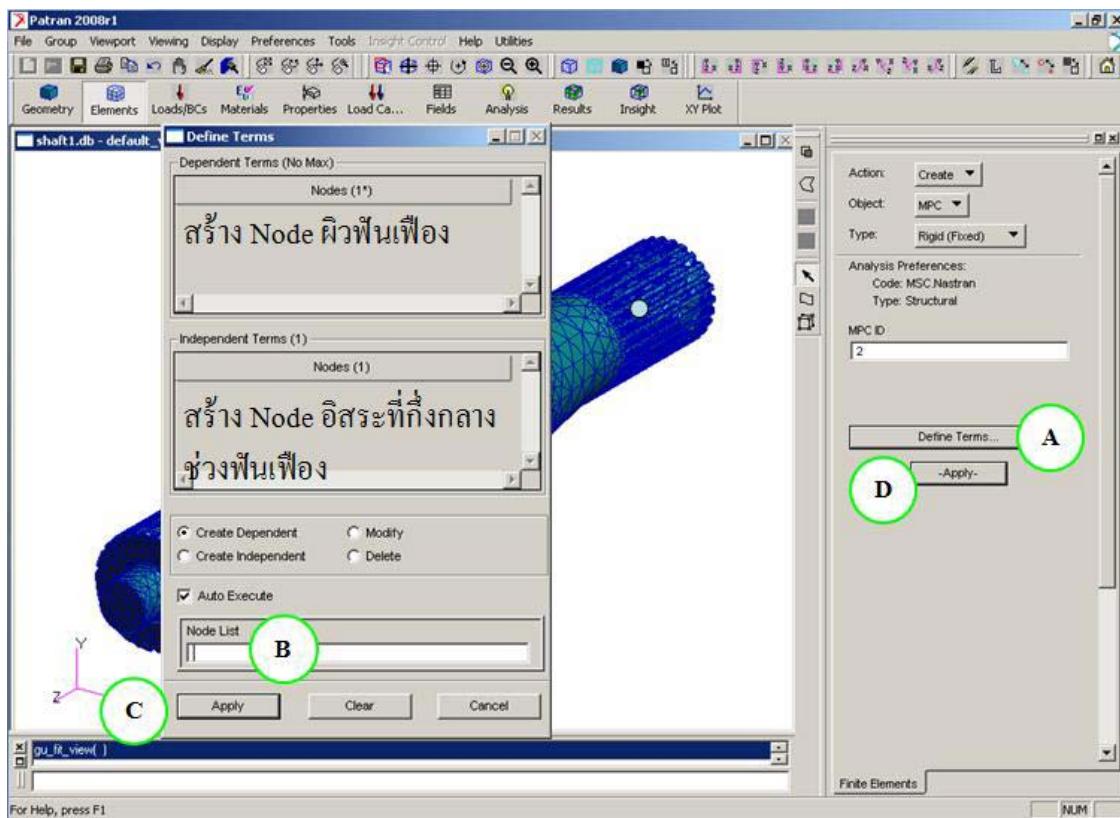
รูป ฉ.24 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.24

ฉ.25 ที่ Function Element ทำการสร้าง MPC Node ที่สไปลน์ด้านซ้าย



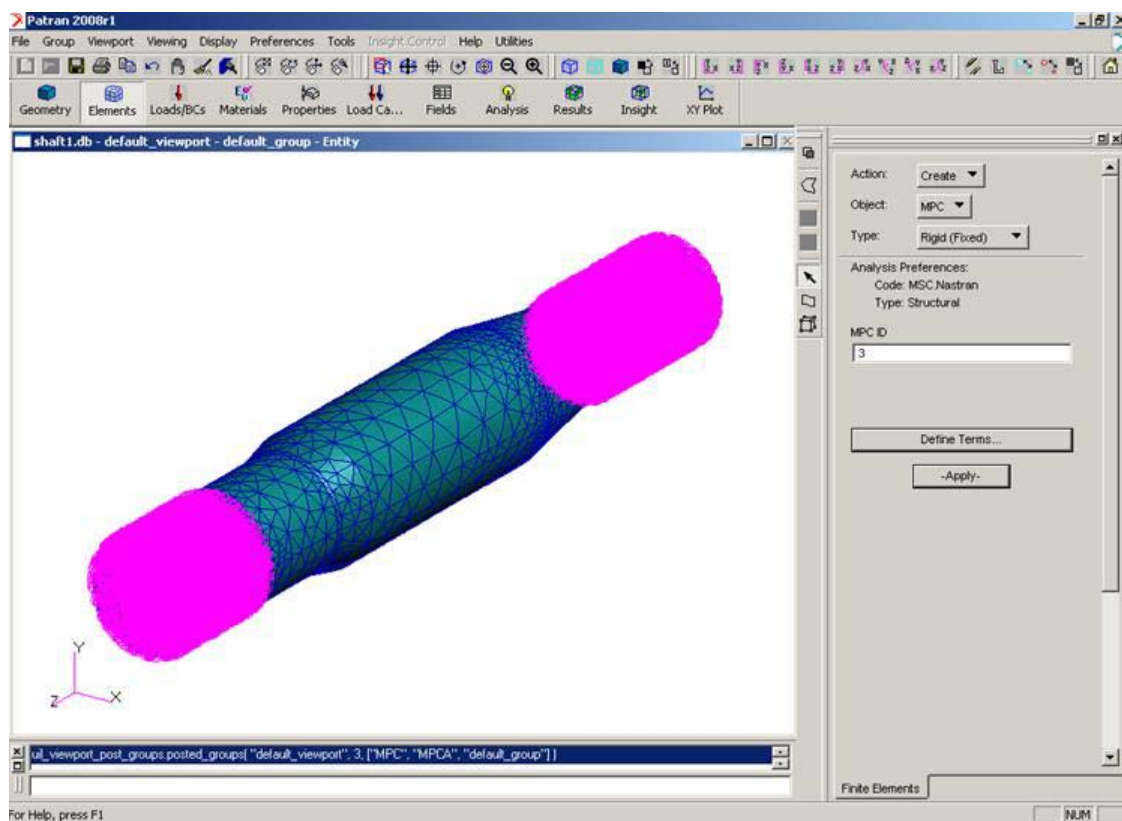
รูป ฉ.25 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.25

ฉ.26 ที่ Function Element ทำการสร้าง MPC Node ที่สไปลนด้านขวา



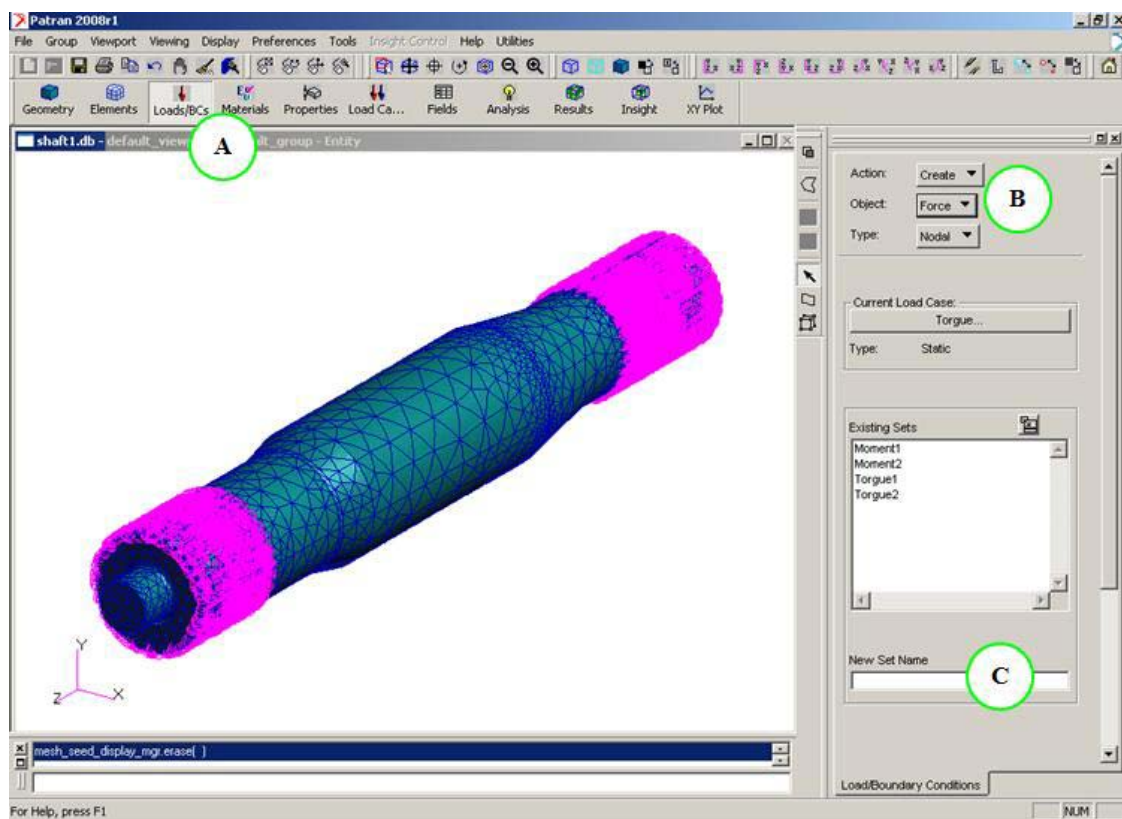
รูป ฉ.26 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.26

ฉ.27 ในFunction Element ที่Action เลือก Create ส่วนObject เลือก MPC Type เป็น Rigid (Fixed) กด Apply



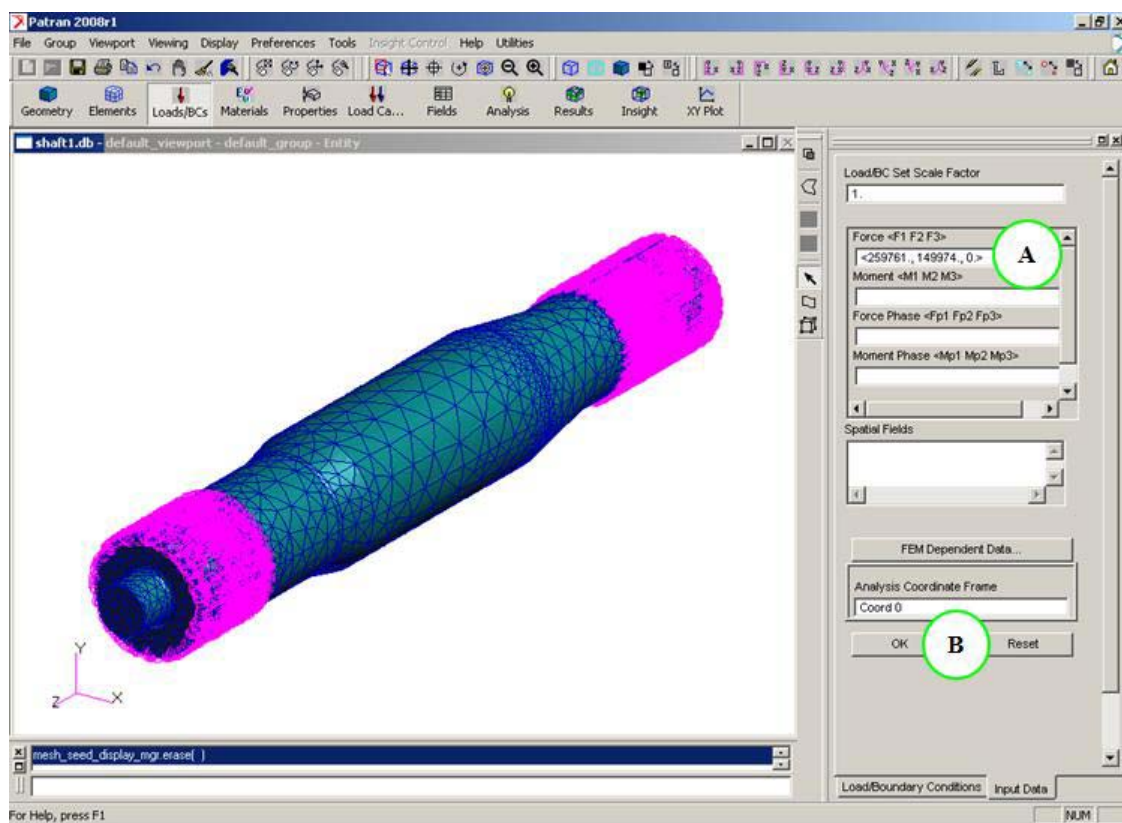
รูป ฉ.27 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.27

ฉ.28 ที่ Load/boundary Condition เลือก Action เป็น Create ให้ Object เป็น force และ Type เป็น Nodal ตั้งชื่อ New Set Name ตามเงื่อนไขภาระแรงดังต่อไปนี้ Moment1, Moment2, Torque1, Torque2



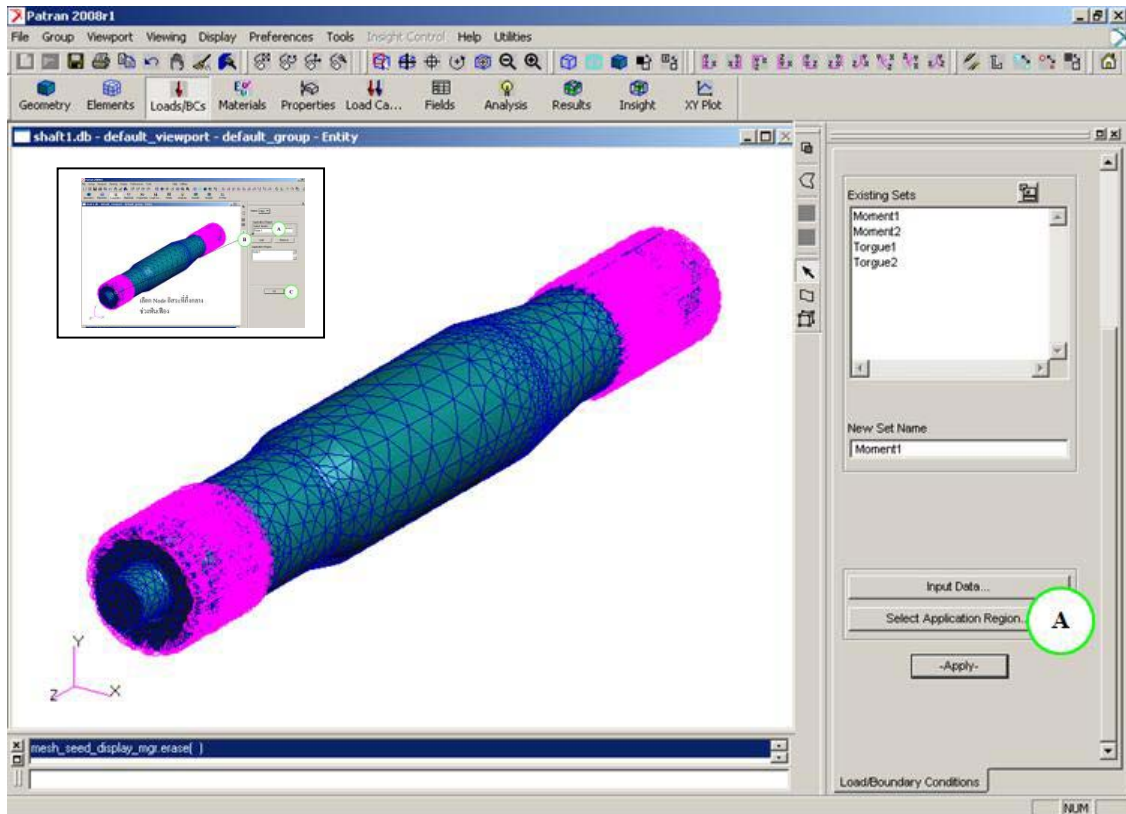
รูป ฉ.28 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.28

ฉ.29 ใส่ภาระกระทำให้กับ set name moment1 กด OK แล้วกด Apply



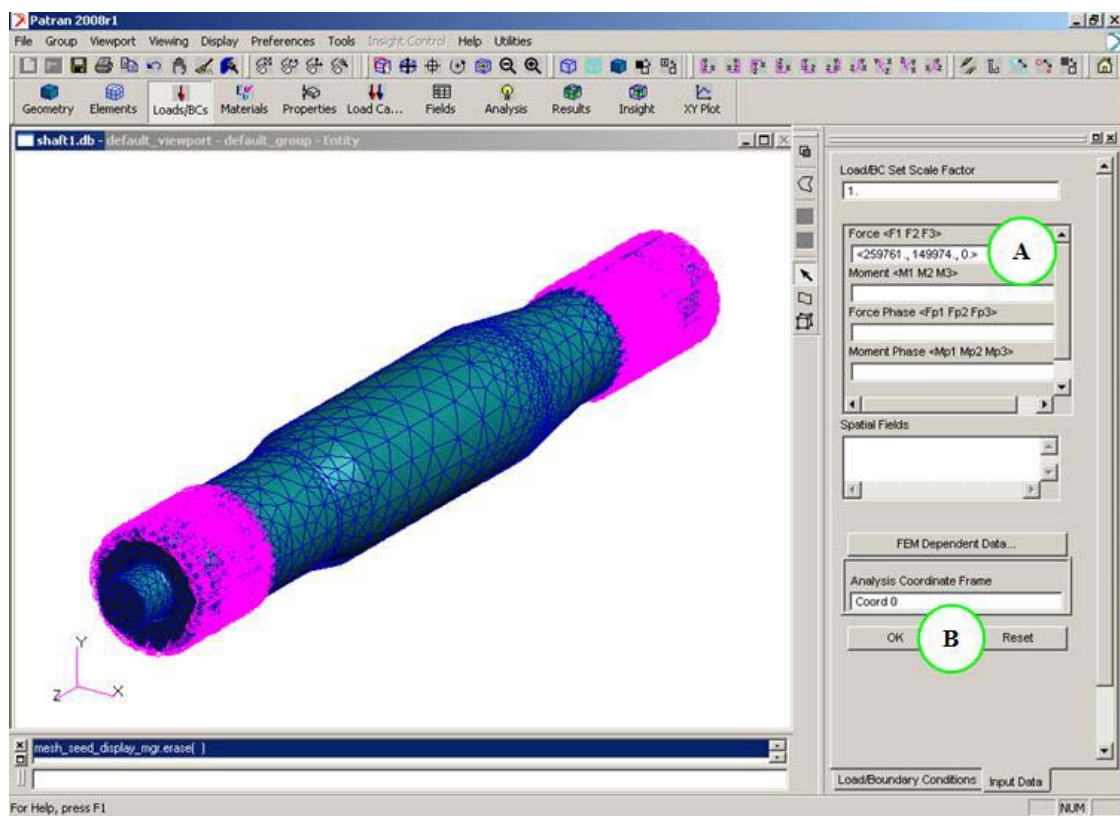
รูป ฉ.29 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.29

ฉ.30 เลือกบริเวณรับภาระแรงของ set name moment1 เลือก Node1 กด Apply



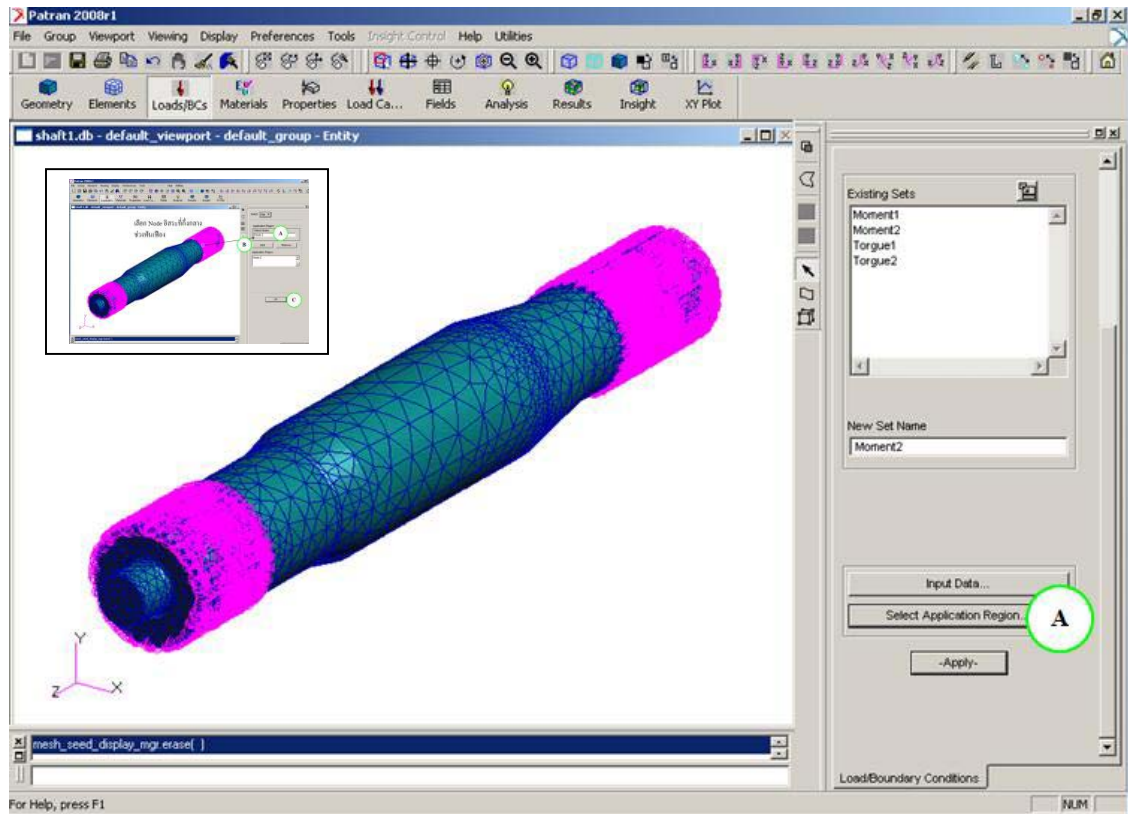
รูป ฉ.30 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.30

ฉ.31 ใส่ภาระกระทำให้กับ set name moment 2 กด OK แล้วกด Apply



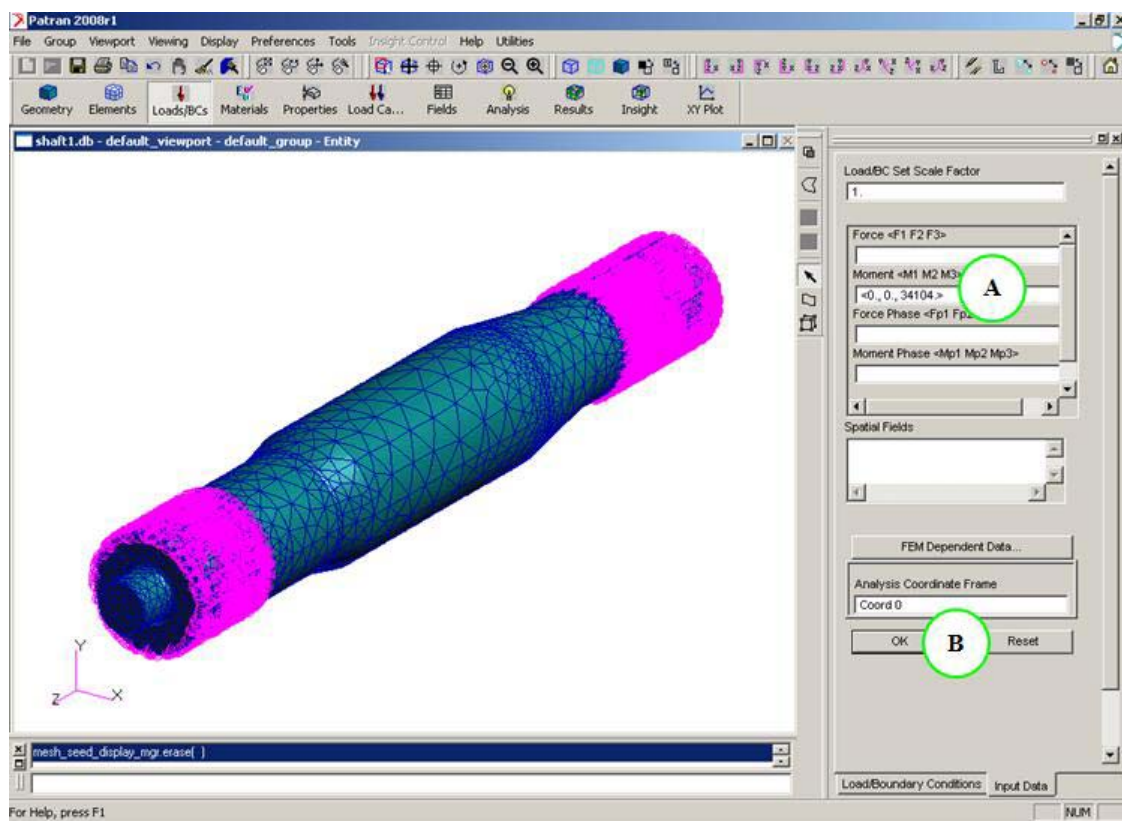
รูป ฉ.31 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.31

ฉ.32 เลือกบริเวณรับภาระแรงของ set name moment 2 เลือก Node 2 กด Apply



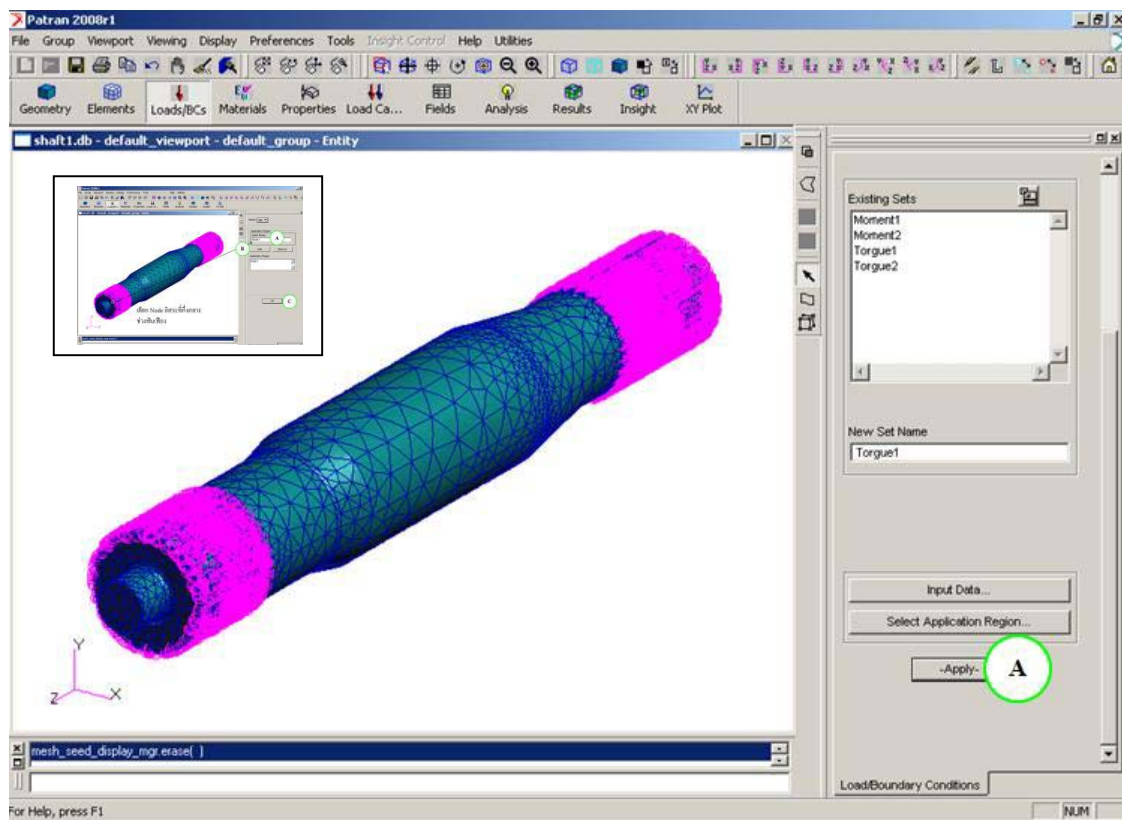
รูป ฉ.32 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.32

ฉ.33 ใส่ภาระกระทำให้กับ set name Torque 1 กด OK แล้วกด Apply



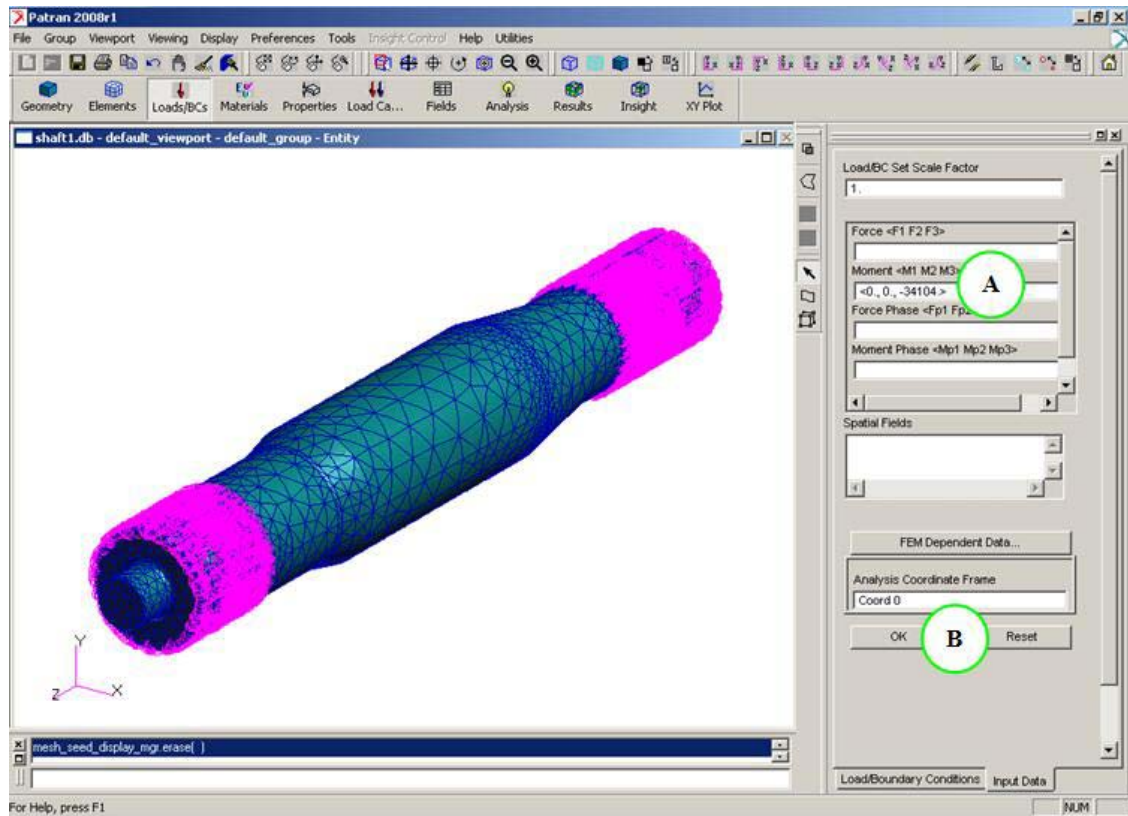
รูป ฉ.33 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.33

ฉ.34 เลือกบริเวณรับภาระแรงของ set name Torque 1 เลือก Node 1 กด Apply



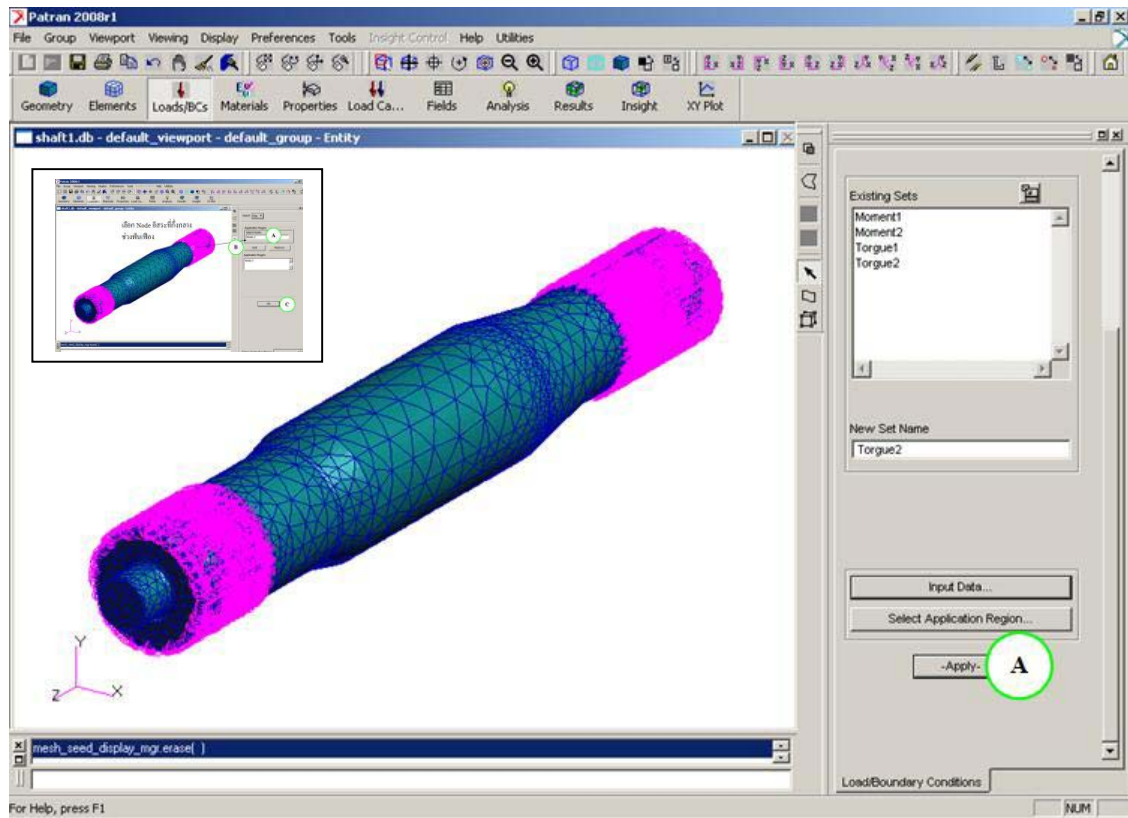
รูป ฉ.34 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.34

ฉ.35 ใส่ภาระกระทำให้กับ set name Torque 2 กด OK แล้วกด Apply



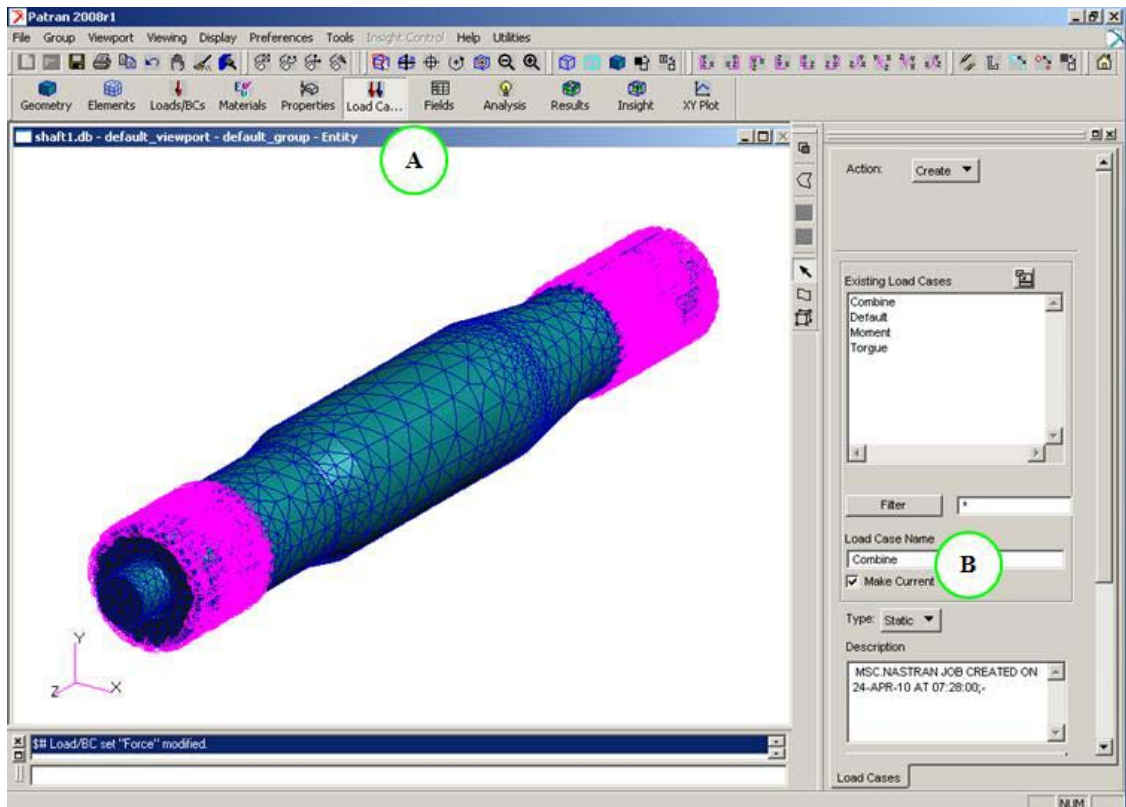
รูป ฉ.35 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.35

ฉ.36 เลือกบริเวณรับภาระแรงของ set name Torque 2 เลือก Node 2 กด Apply



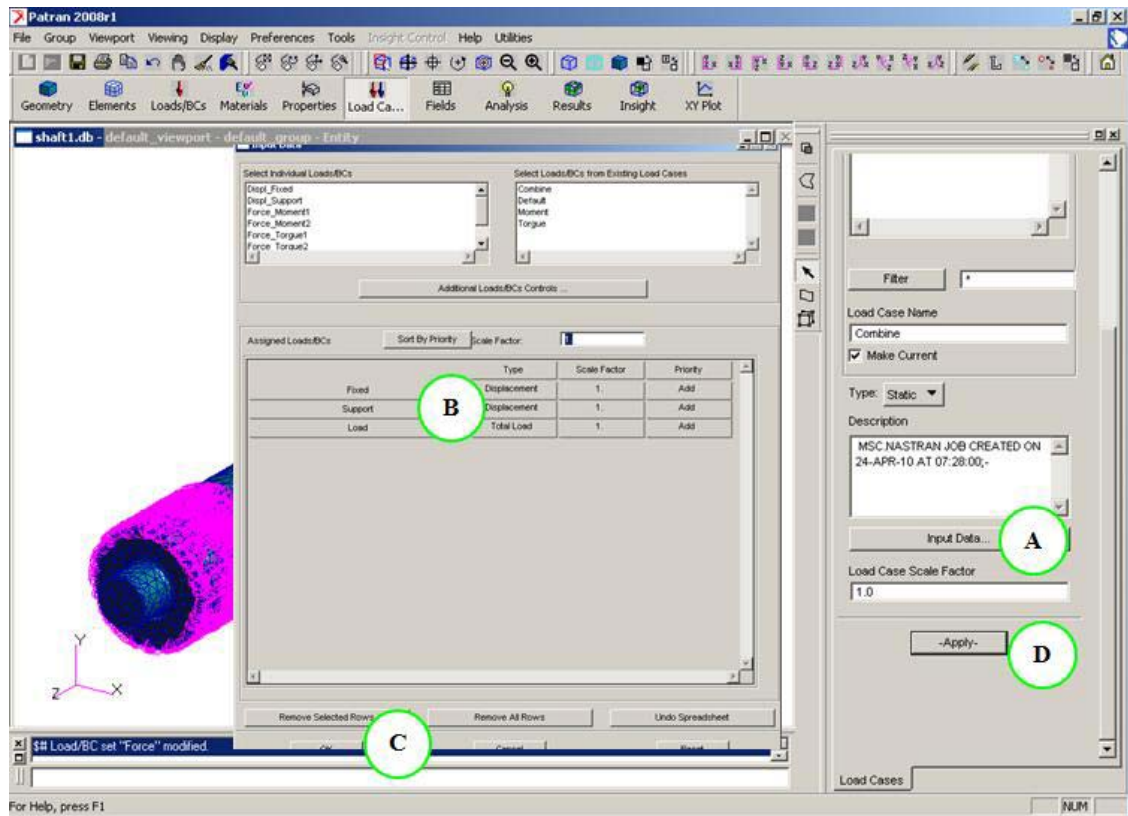
รูป ฉ.36 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.36

ณ.37 ไปที่ Function Load Case สร้าง case ที่จะทำการศึกษา อันได้แก่ pure torsion, pure bending และ Combine load



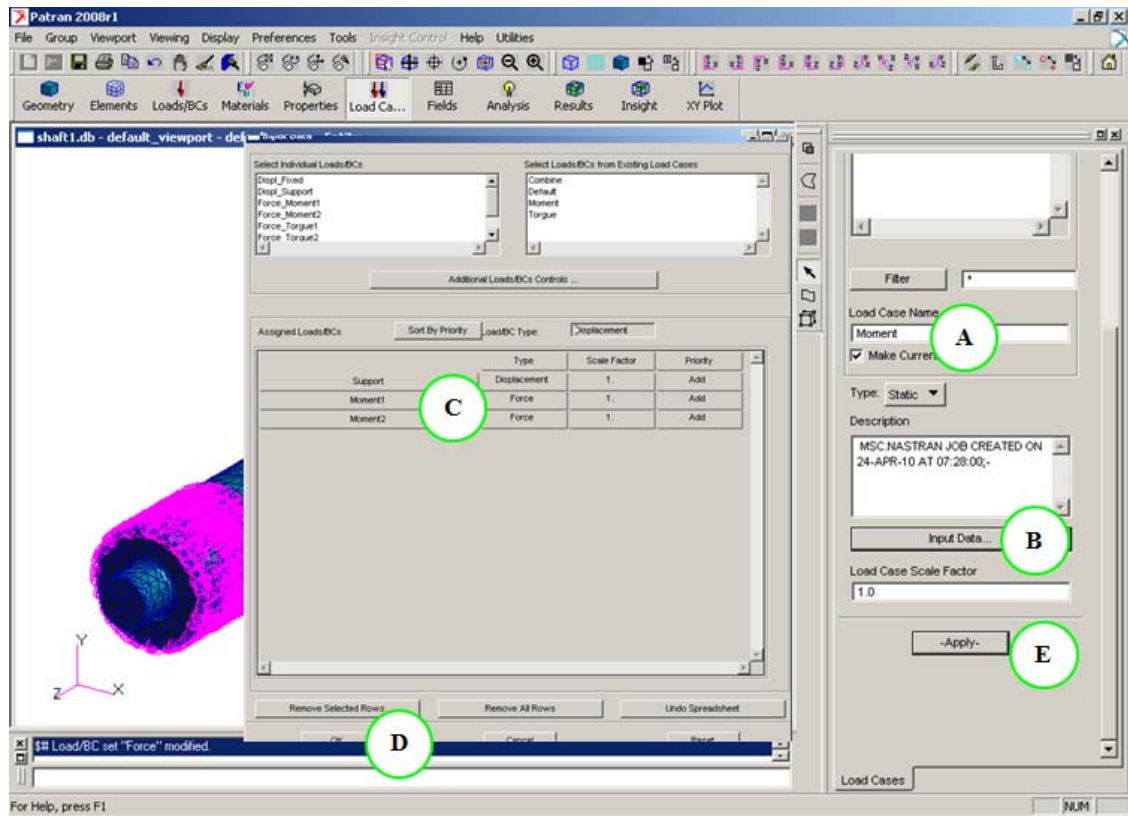
รูป ณ.37 ภาพประกอบคำบรรยาย ณ.37

ฉ.38 เช็ค Data ในกรณี Combine load



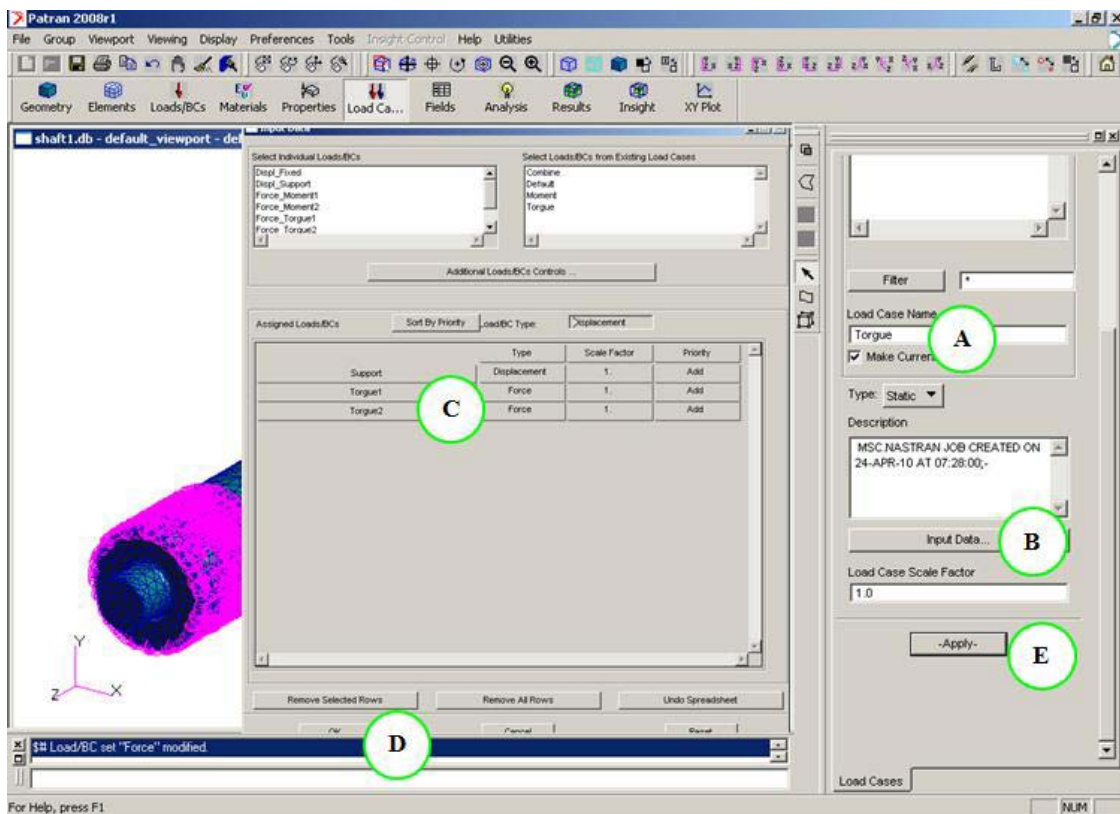
รูป ฉ.38 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.38

ฉ.39 เช็ค Data ในกรณี Pure bending



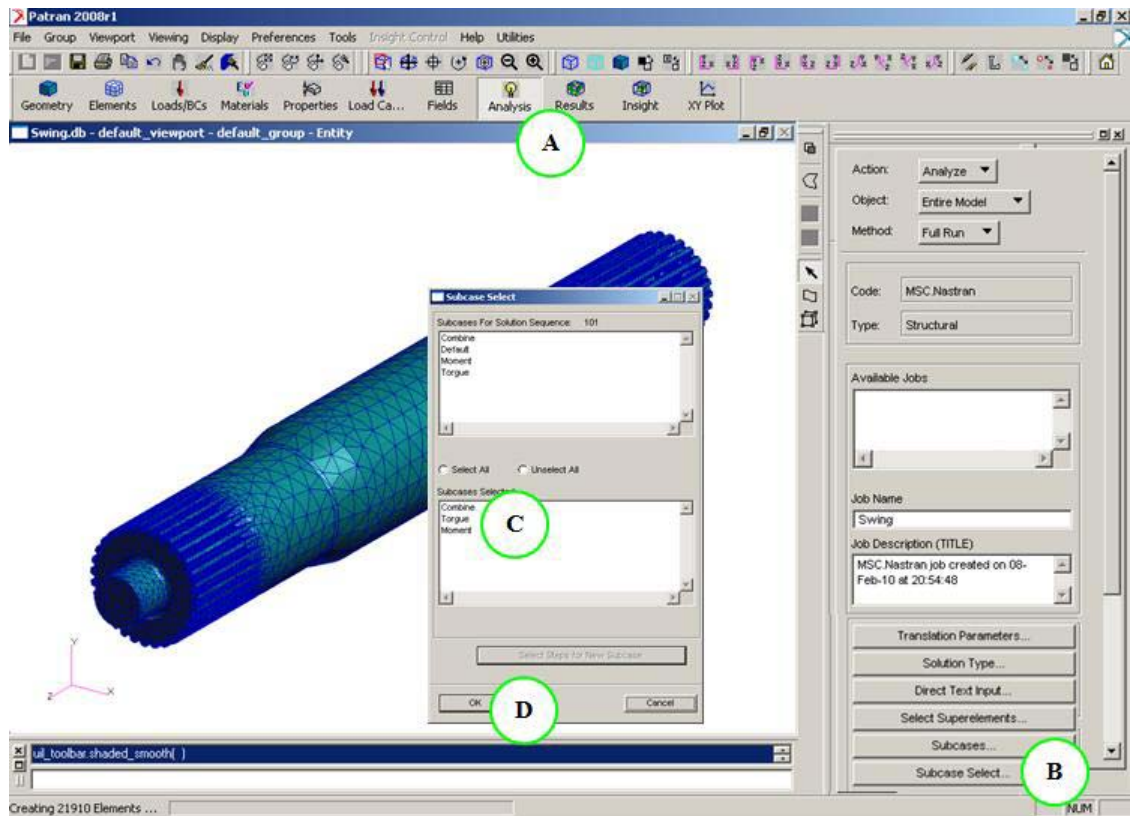
รูป ฉ.39 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.39

ฉ.40 เช็ค Data ในกรณี Pure Torsion



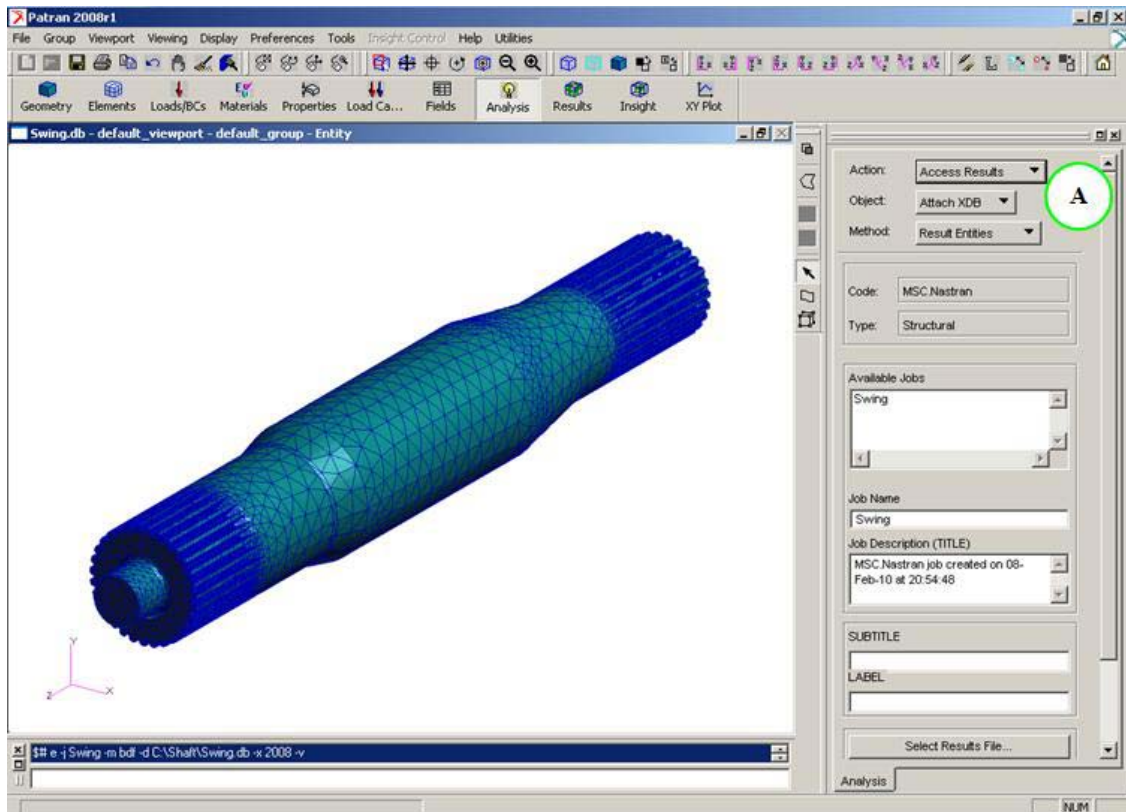
รูป ฉ.40 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.40

ฉ.41 ไปที่ Function Analysis ทำการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี



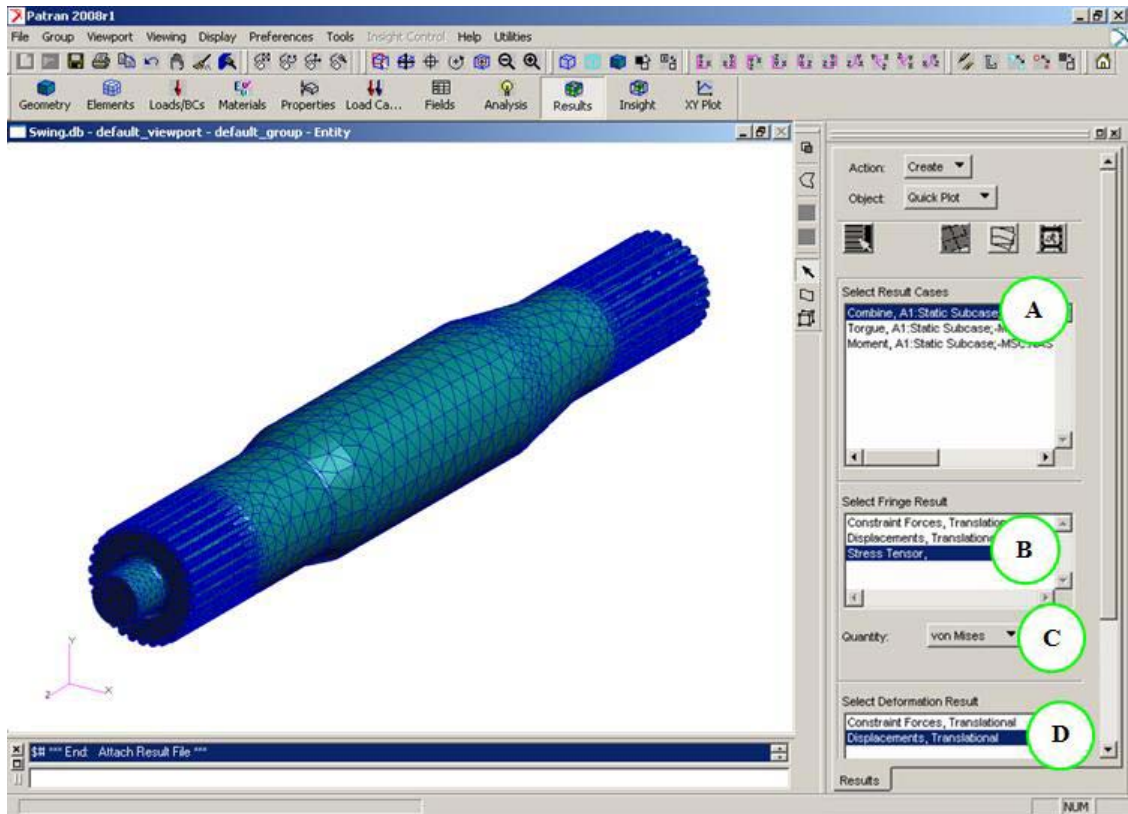
รูป ฉ.41 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.41

ฉ.42 วิเคราะห์ผลด้วย Nastran แล้วดึงผลลัพธ์มาแสดงในPatran



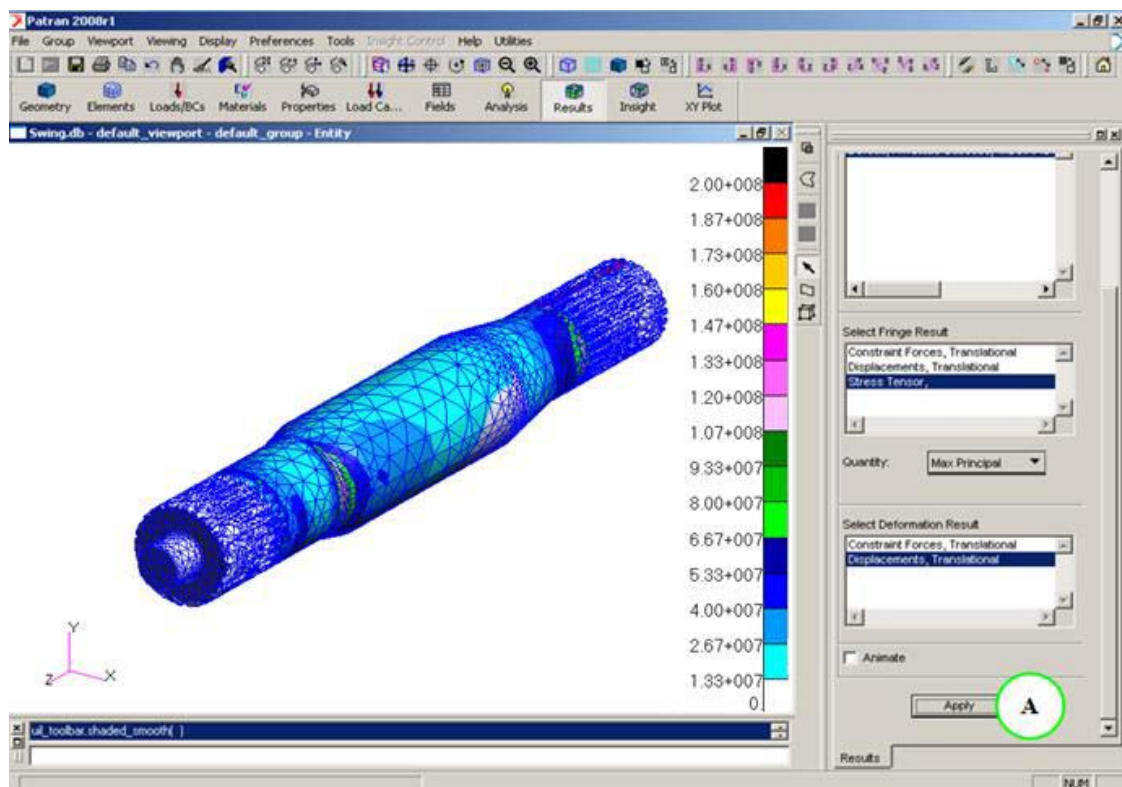
รูป ฉ.42 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.42

ฉ.43 เลือกแสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นตามแต่กรณี



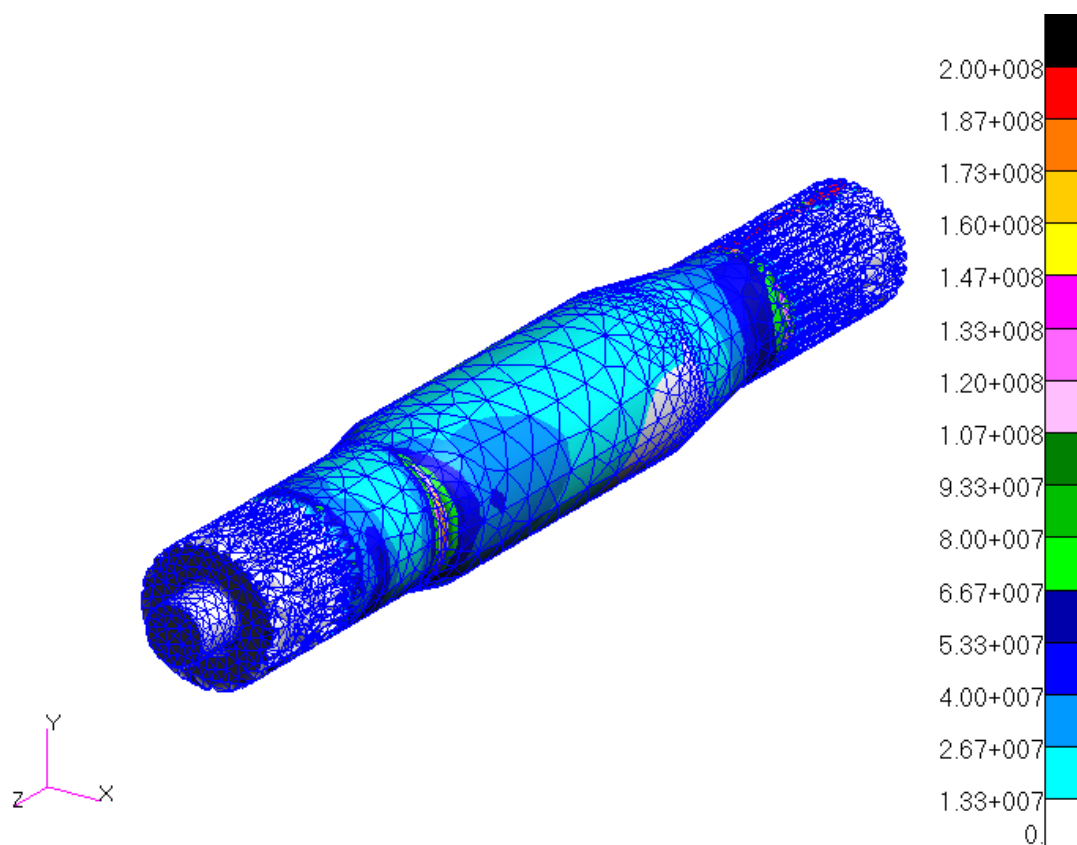
รูป ฉ.43 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.43

ฉ.44 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น default



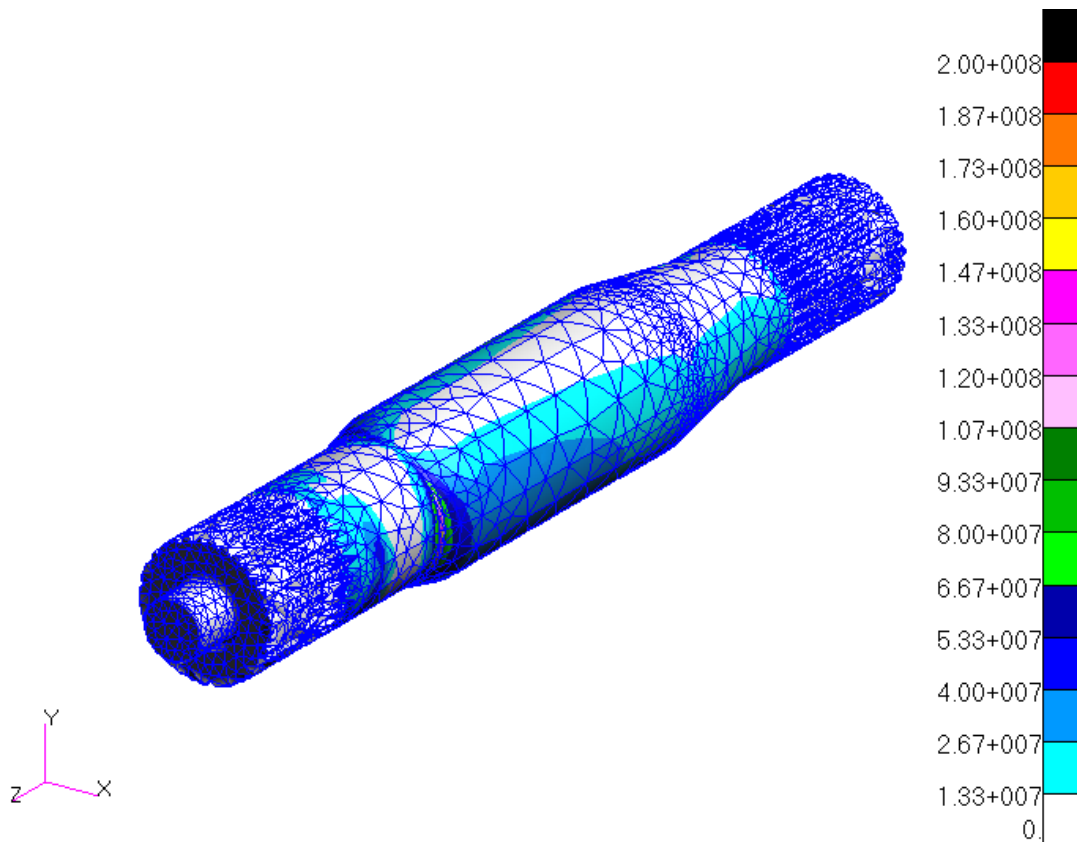
รูป ฉ.44 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.44

ณ.45 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นกรณี Combine load



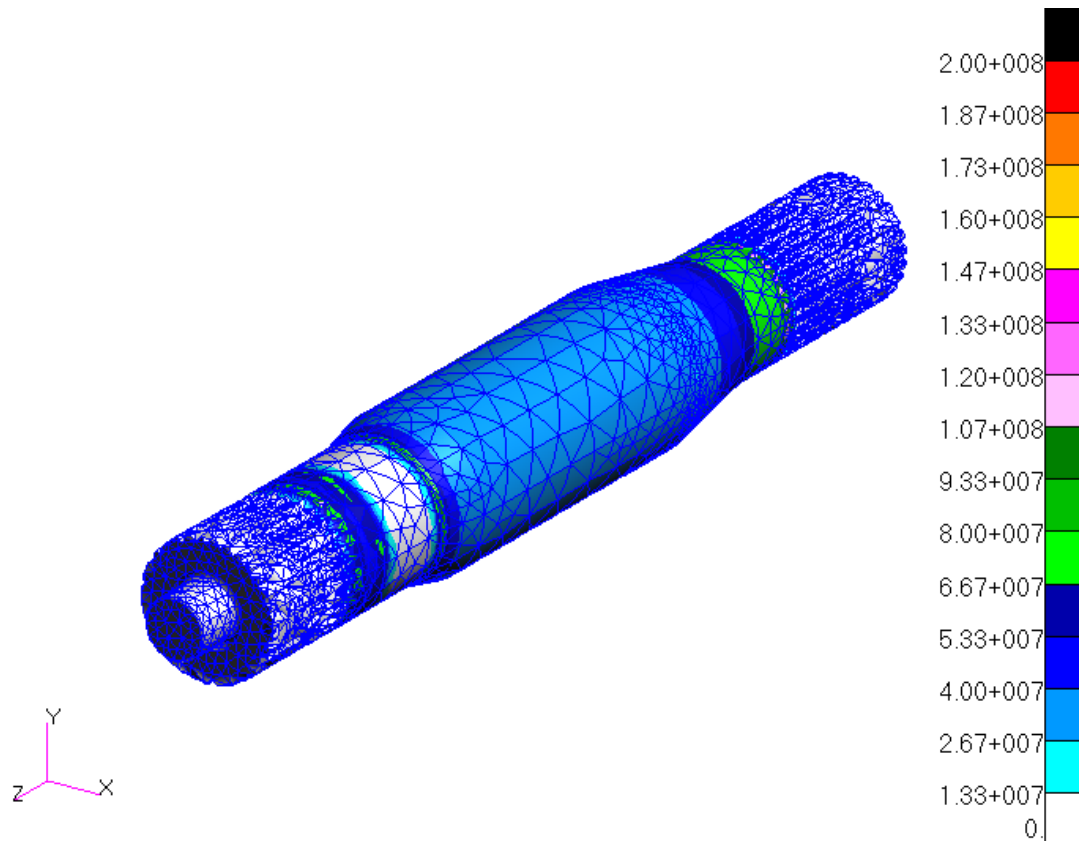
รูป ณ.45 ภาพประกอบคำบรรยาย ณ.45

ณ.46 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นกรณี Pure bending



รูป ณ.46 ภาพประกอบคำบรรยาย ณ.46

ฉ.47 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นกรณี Pure Torsion

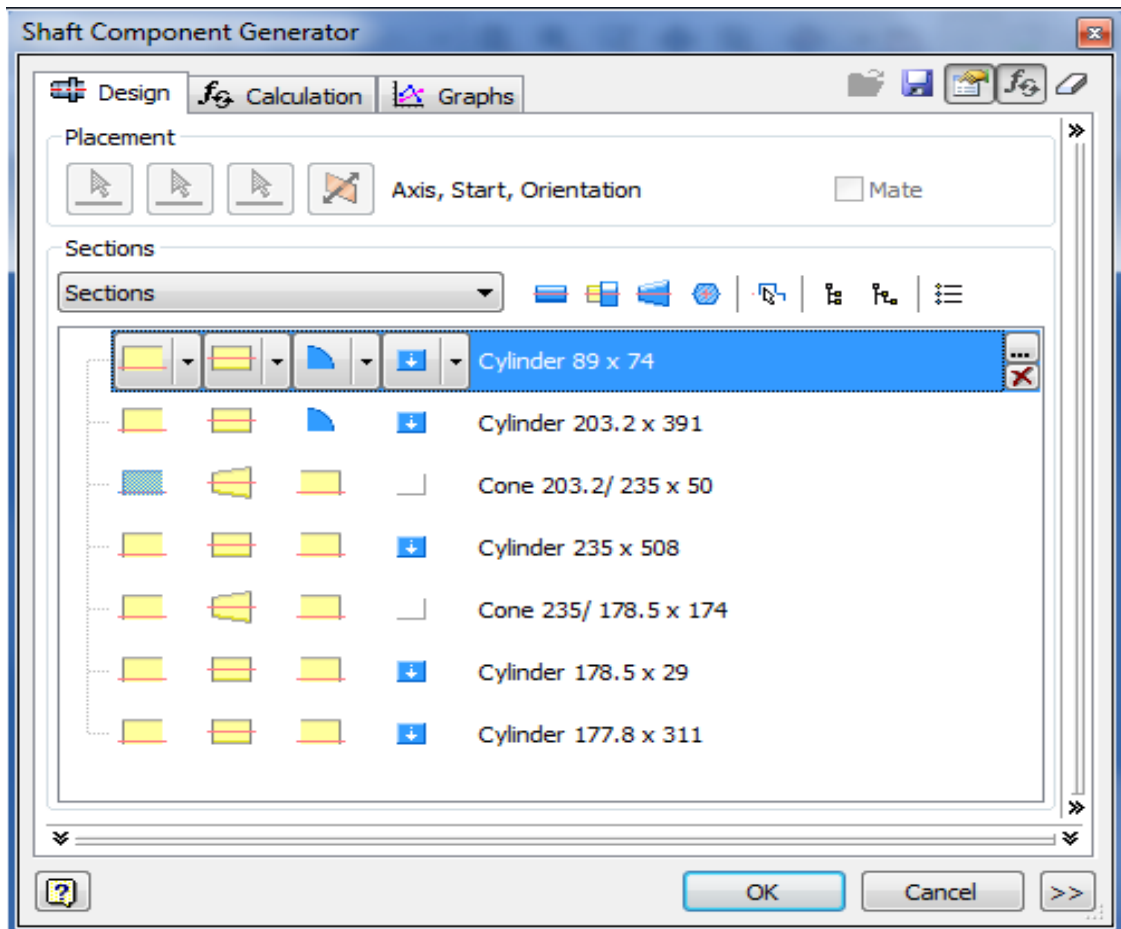


รูป ฉ.47 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.47

ภาคผนวก ญ

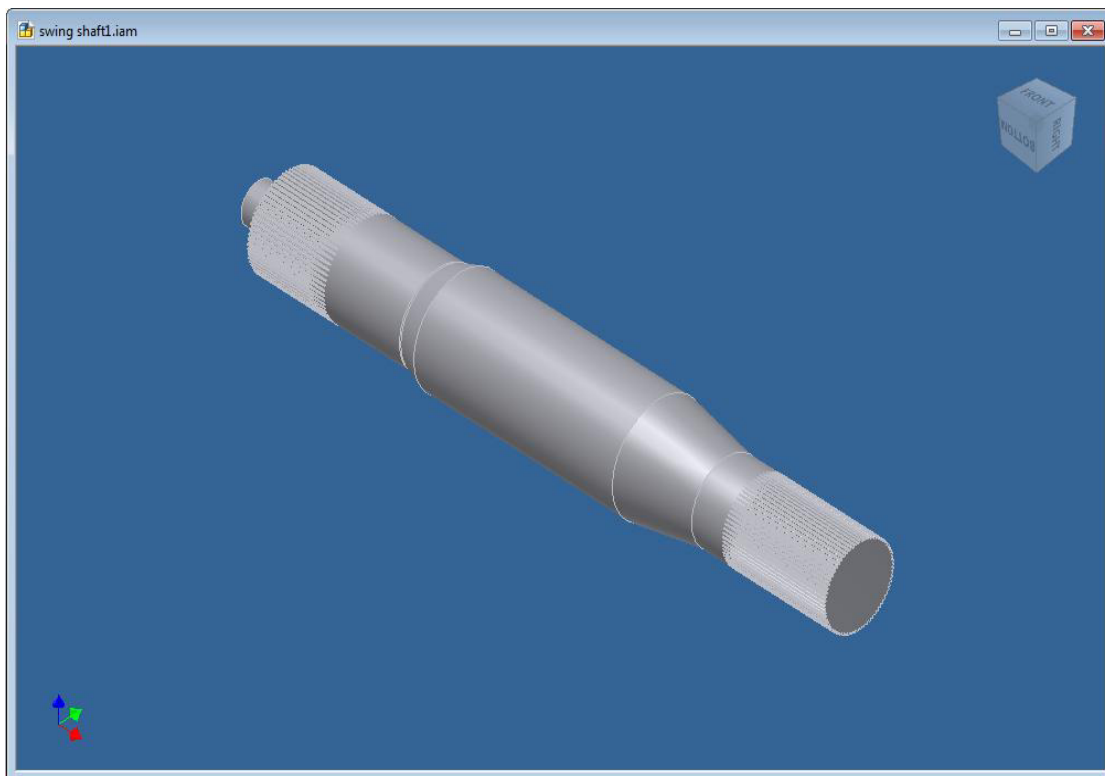
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Shaft Component Generation วิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลาสวิง

ญ.1 เปิดโปรแกรม Shaft Component Generation เข้าสู่ Mode Design ทำการสร้างเพลลาโดยกรอกค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง และความยาวของเพลลาพร้อมทั้งกำหนดรูปร่างของเพลลาสวิง



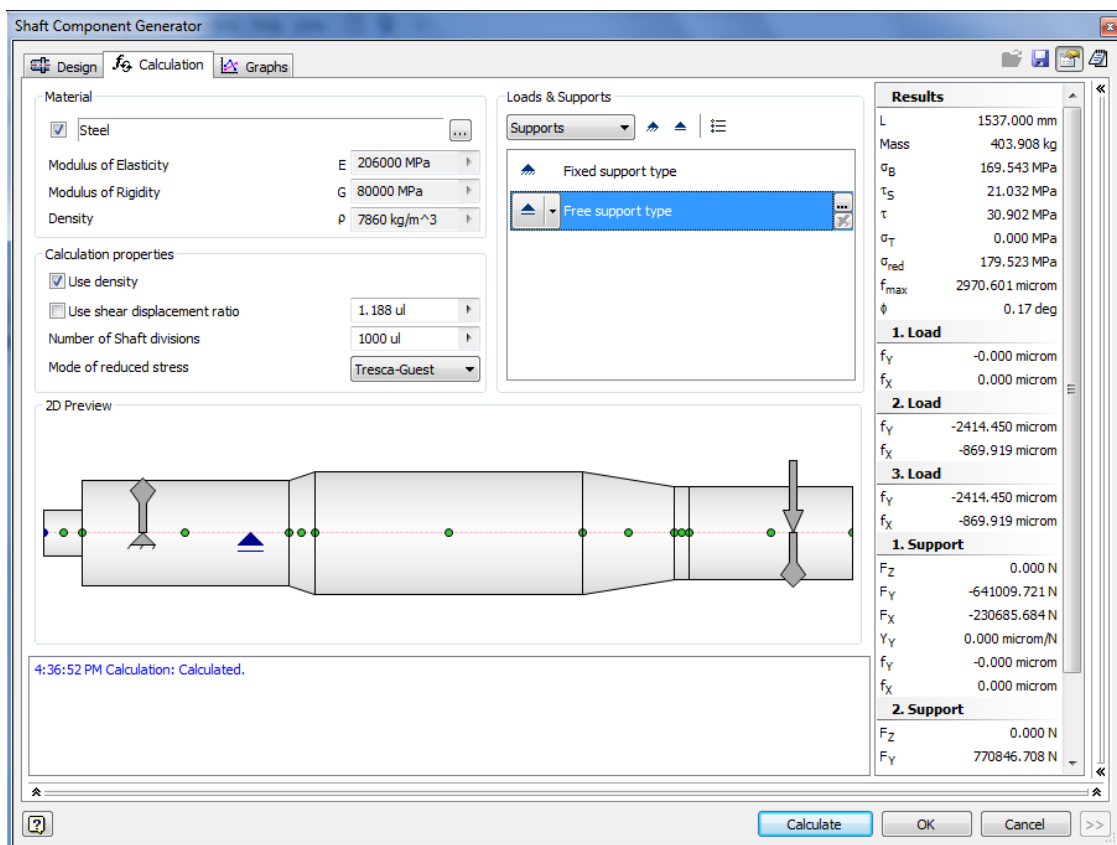
รูป ญ.1 ภาพประกอบคำบรรยาย ญ.1

ญ.2 แบบจำลองเพลาสวิงที่ได้พร้อมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์



รูป ญ.2 ภาพประกอบคำบรรยาย ญ.2

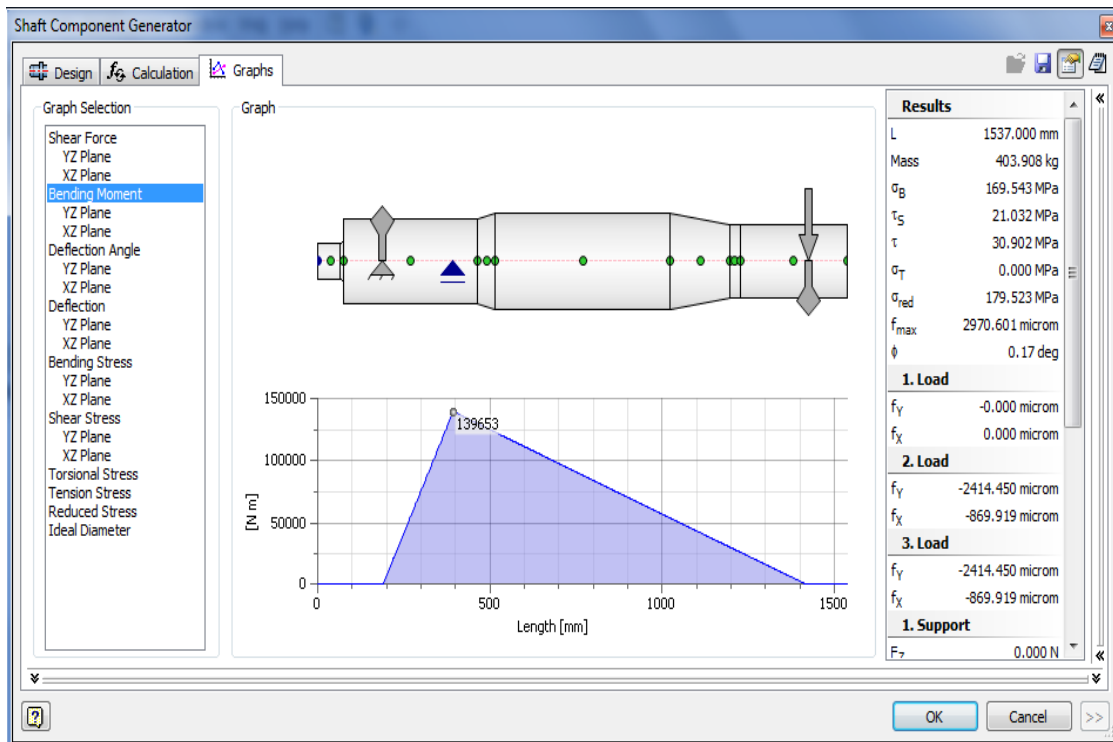
ญ.3 เข้าสู่โหมด Calculation ใต้อสมบัติวัสดุ ระบุบริเวณจับยึด และภาระโหลด



รูป ญ.3 ภาพประกอบคำบรรยาย ญ.3

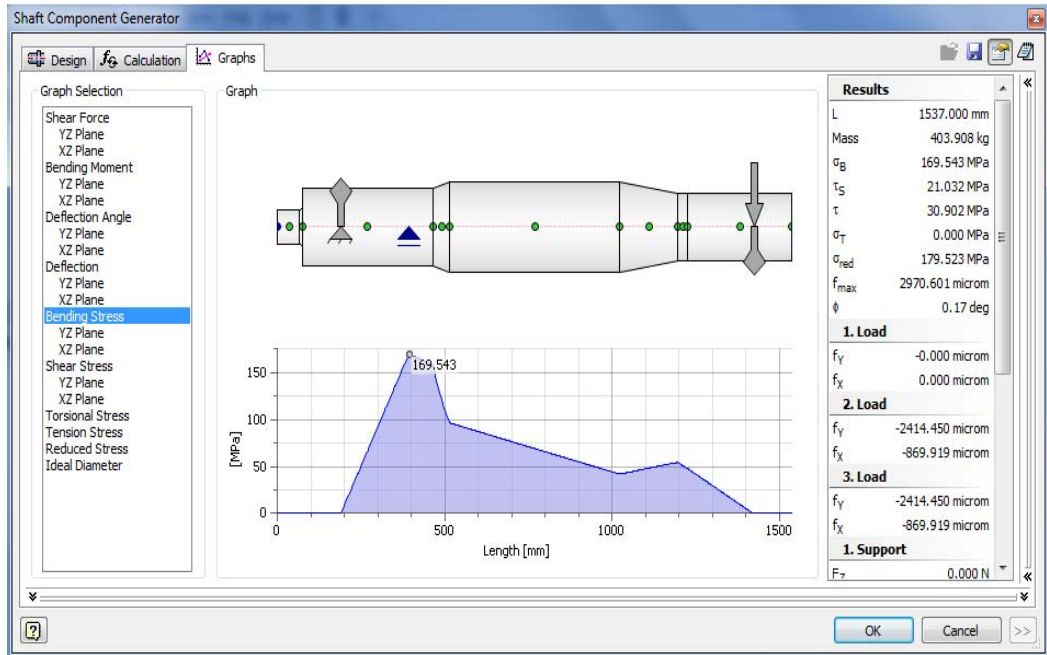
ญ.4 เข้าสู่โหมด Graph เพื่อดูผลการวิเคราะห์เฉพาะในส่วนที่ต้องการ

☞ **Graph Bending Moment**



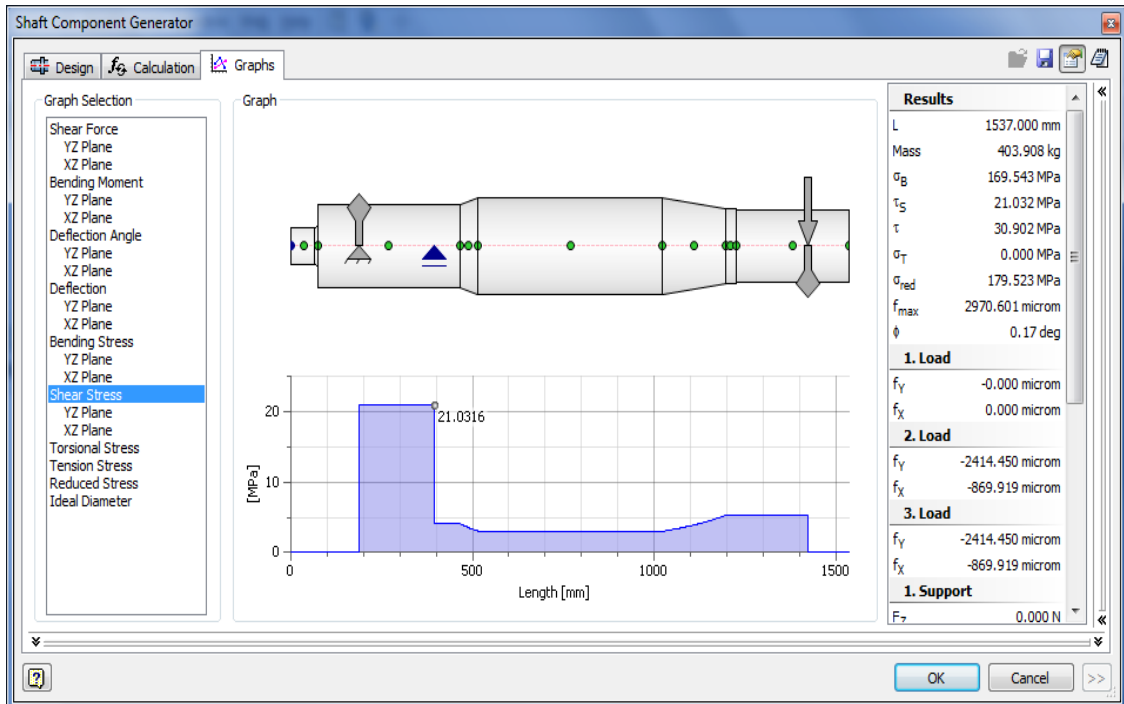
รูป ญ.4 ภาพประกอบคำบรรยาย ญ.4 Graph Bending Moment

☒ **Graph Bending Stress**



รูป ๓.๔ ภาพประกอบคำบรรยาย ๓.๔ Graph Bending Stress

☒ Graph Shear Stress

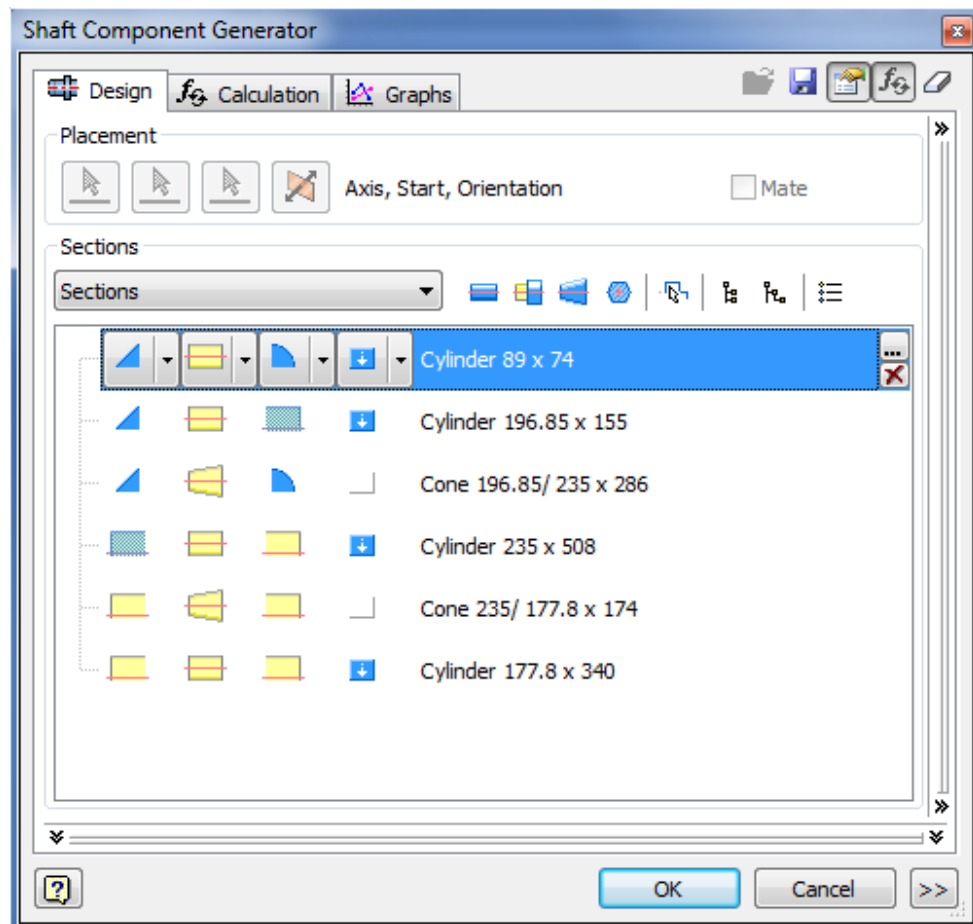


รูป ฃ.4 ภาพประกอบคำบรรยาย ฃ.4 Graph Shear Stress

ภาคผนวก ฎ

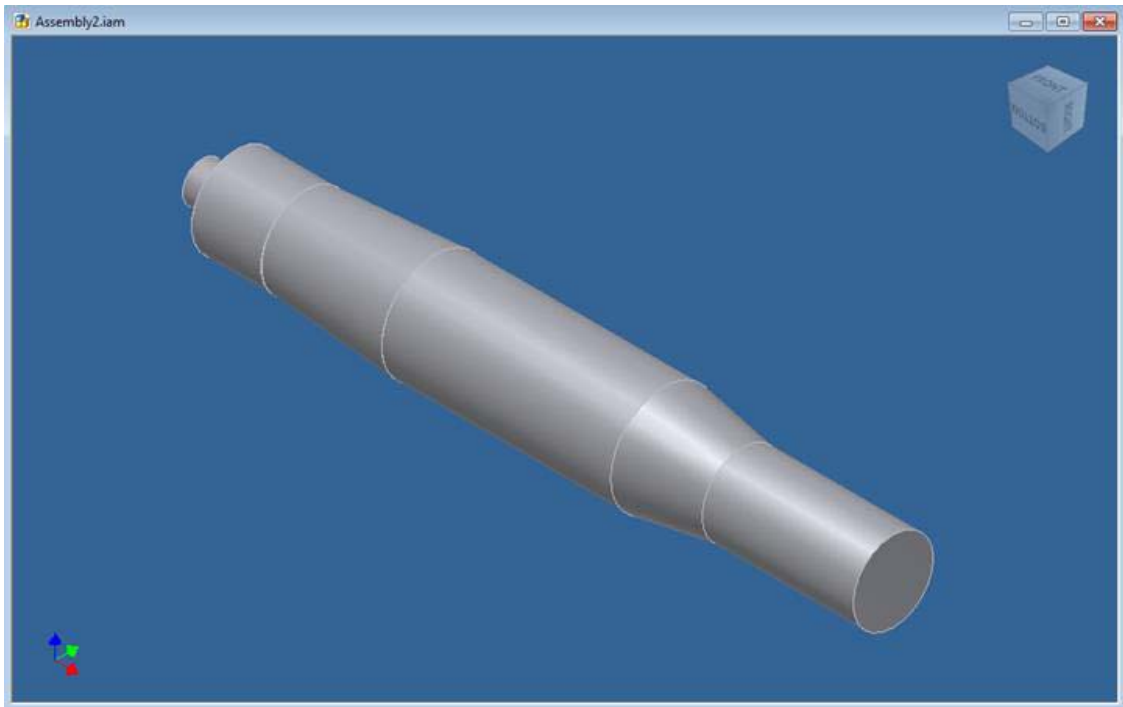
การใช้โปรแกรม Shaft Component Generation วิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลาสวิงตัวใหม่

ฉ.1 เปิดโปรแกรม Shaft Component Generation เข้าสู่ Mode Design ทำการสร้างเพลลาโดยกรอกค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง และความยาวของเพลลาพร้อมทั้งกำหนดรูปร่างของเพลลาสวิง



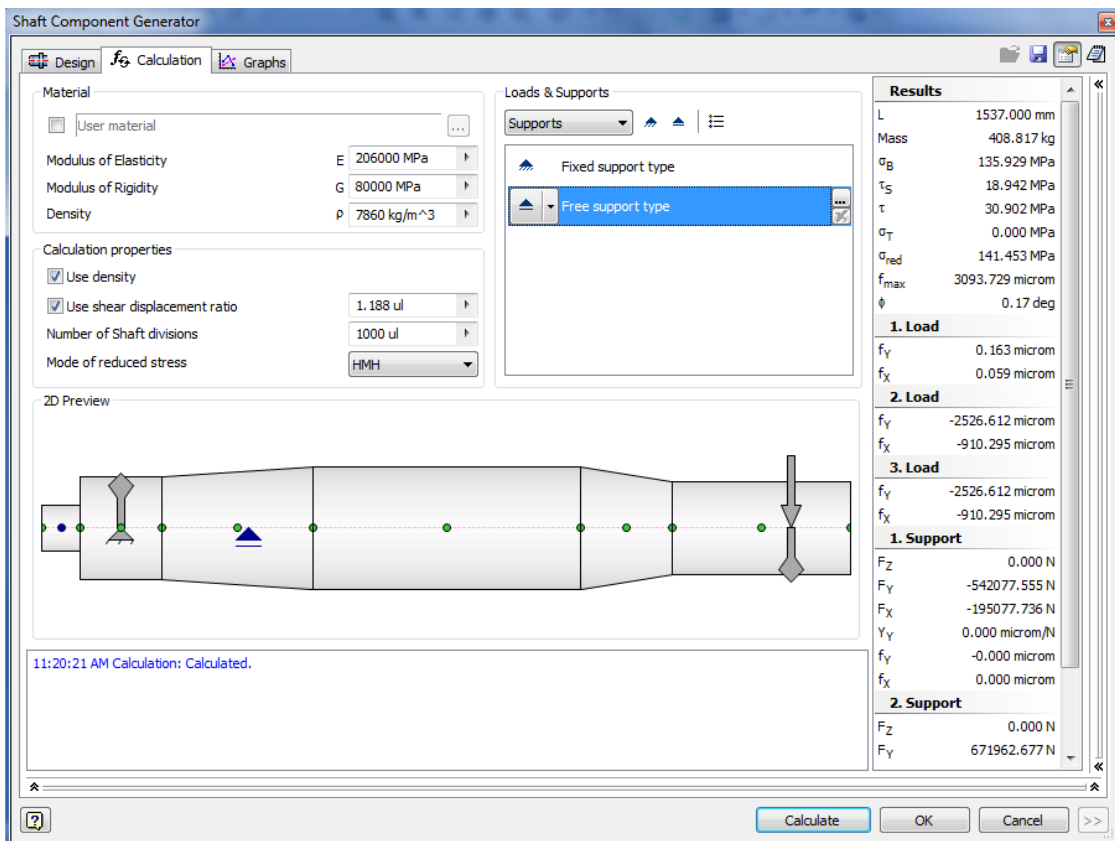
รูป ฉ.1 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.1

ฉ.2 แบบจำลองพลาสติกวงที่ได้พร้อมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์



รูป ฉ.2 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.2

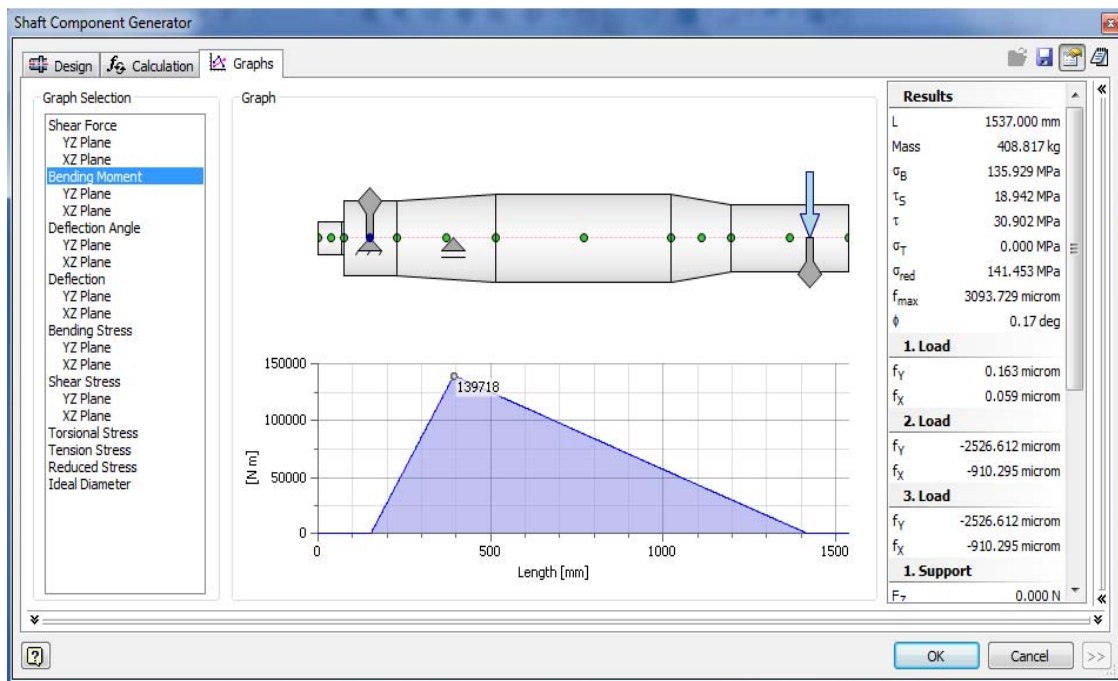
รูป 3.3 เข้าสู่โหมด Calculation ใต้อัปเดตวัสดุ ระบุบริเวณจับยึด และภาระโหลด



รูป 3.3 ภาพประกอบคำบรรยาย รูป 3

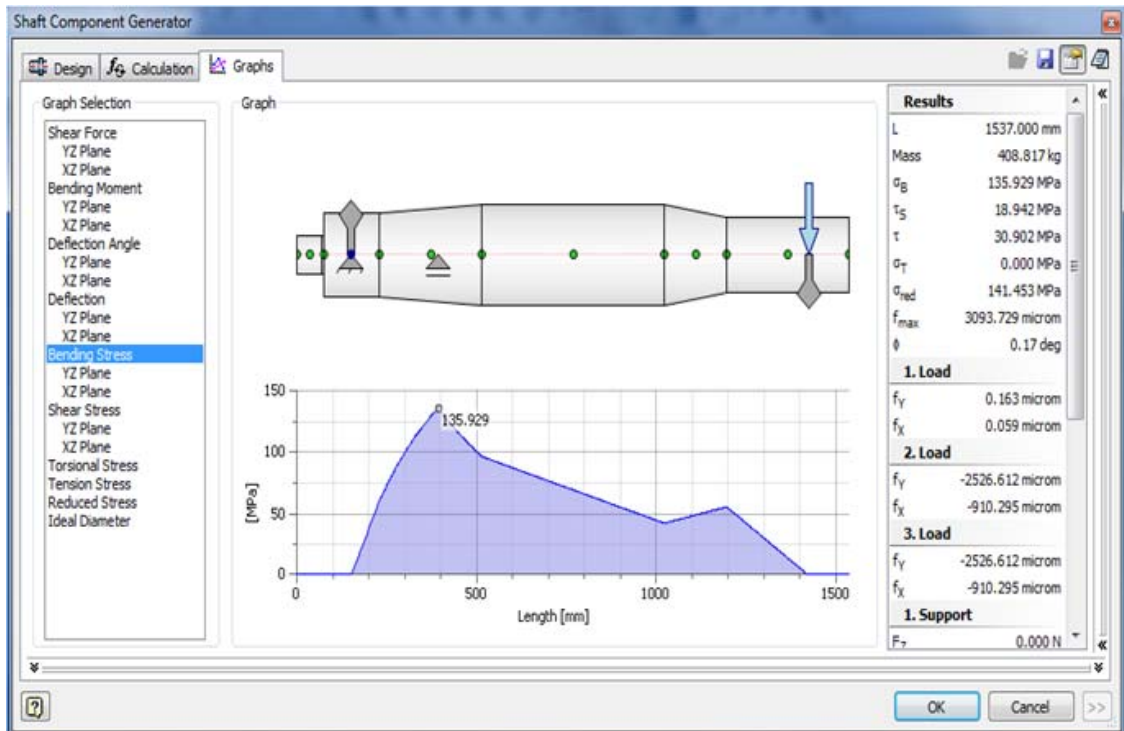
ฉ.4 เข้าสู่โหมด Graph เพื่อดูผลการวิเคราะห์เฉพาะในส่วนที่ต้องการ

☞ Graph Bending Moment



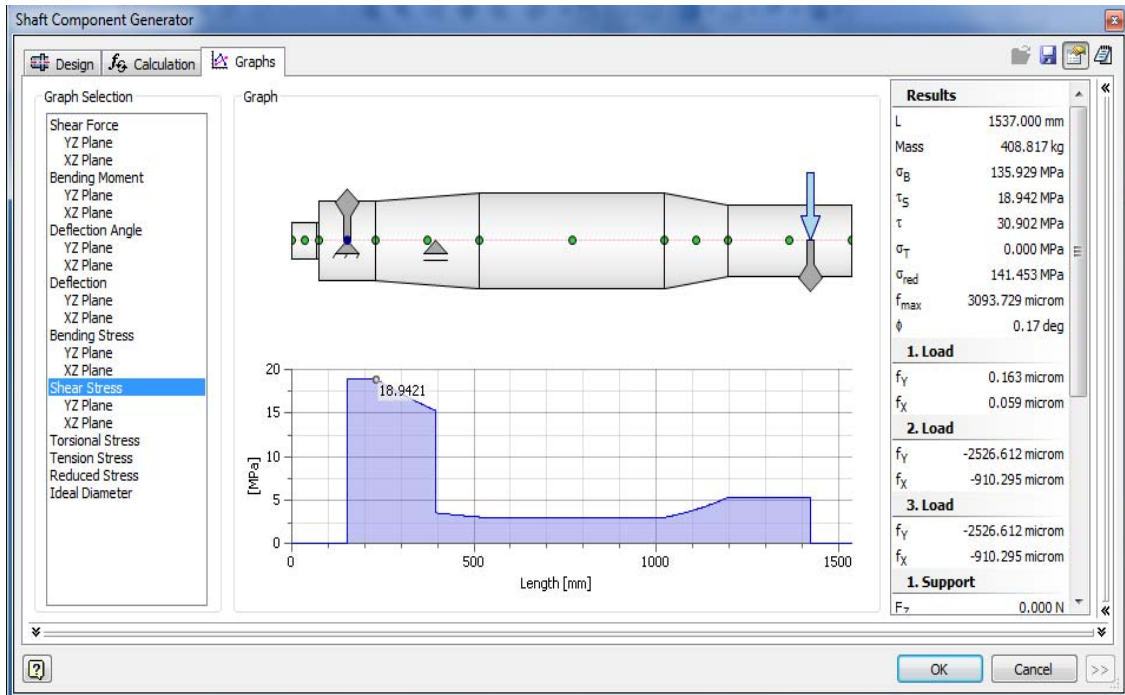
รูป ฉ.4 ภาพประกอบคำบรรยาย ฉ.4 Graph Bending Moment

☒ Graph Bending Stress



รูป ๓.๔ ภาพประกอบคำบรรยาย ๓.๔ Graph Bending Stress

☒ Graph Shear Stress



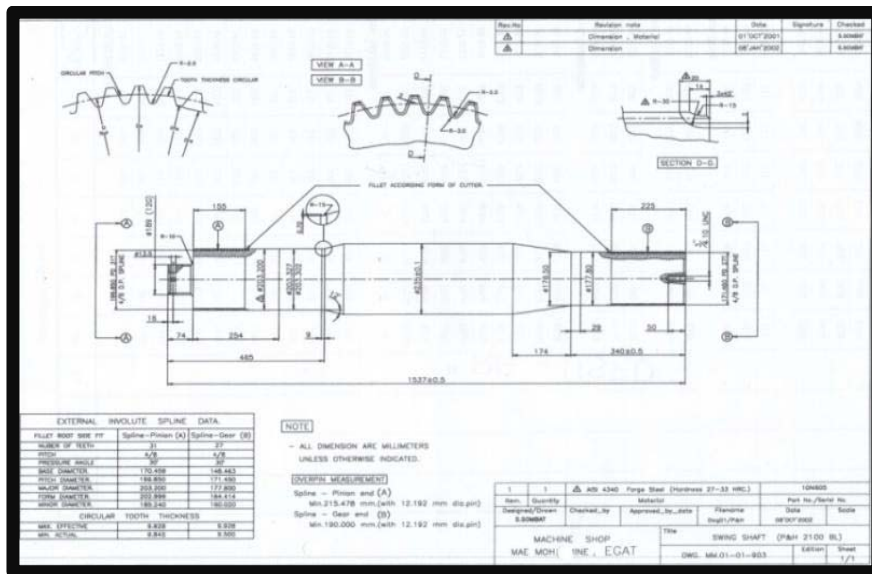
รูป ๓.๔ ภาพประกอบคำบรรยาย ๓.๔ Graph Shear Stress

ภาคผนวก ก

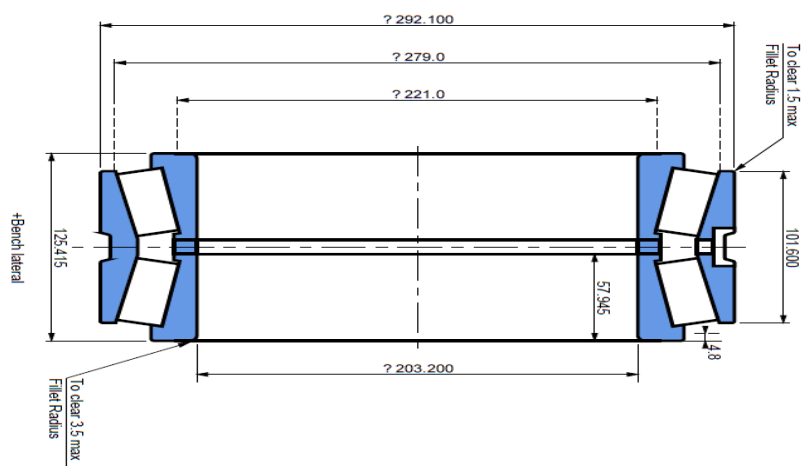
Technical Drawing ของเพลาส่วิ่งและระบบส่วิ่ง

Technical Drawing ของเพลาสวิง และระบบสวิงมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

☞ Drawing ของเพลาสวิง Support ของเพลาสวิงและตำแหน่งของSupport

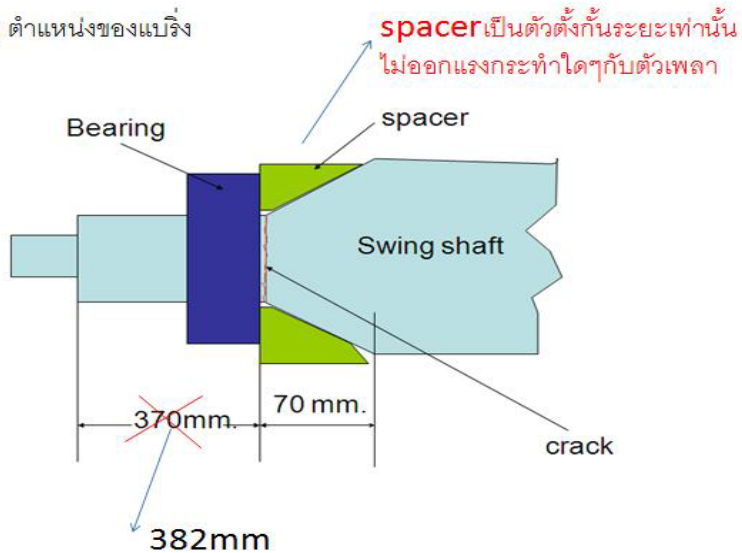


รูป ฎ.1 Drawing ของเพลาสวิง



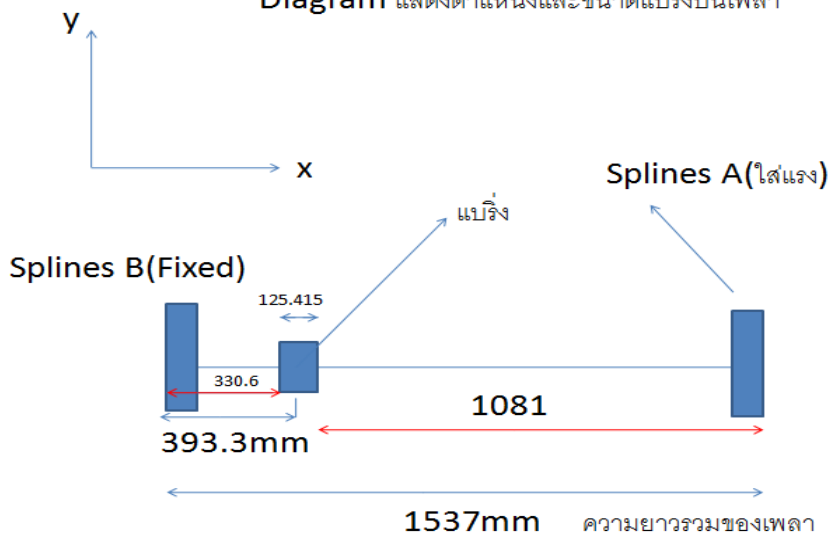
รูป ฎ.2 Tapered Roller bearing

Drawing ตำแหน่งของแบร์ริง

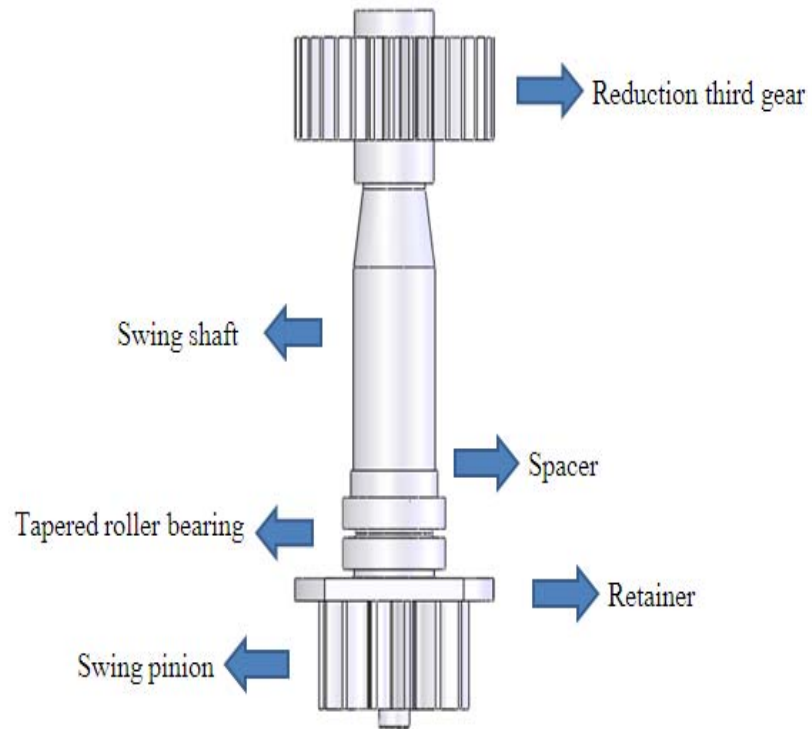


รูป ฎ.3 ตำแหน่งของแบร์ริง view 1

Diagram แสดงตำแหน่งและขนาดแบร์ริงบนเพลลา



รูป ฎ.4 ตำแหน่งของแบร์ริง view 2



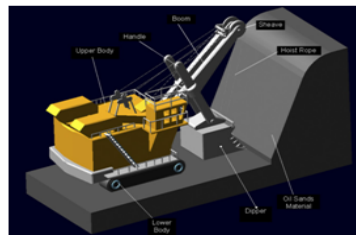
รูป ๓.๕ ส่วนประกอบต่างๆของเพลาสวิง

ภาคผนวก ฐ

ข้อมูลเบื้องต้นของรถชุดไฟฟ้าและระบบส่งกำลังแบบหมุนเหวี่ยง

ข้อมูลเบื้องต้นของรถขุดไฟฟ้าแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลทางเทคนิค



รถขุดไฟฟ้า P&H2100BL

สมรรถนะ 750 ลบ.ม/ชม

- น้ำหนัก 480 เมตริกตัน
- ผู้ผลิต KOBE STEEL JAPAN
- ราคา 350 ล้านบาท(ปัจจุบัน)
- จำนวน 6 คัน

ปริมาณการใช้อะไหล่
ประมาณปีละ 15-20 ล้านบาท

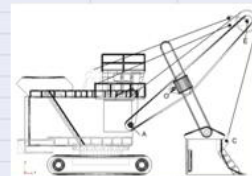
บริษัทผู้ผลิตเครื่องจักร ไม่แนะนำให้ซ่อม
กรรมวิธีการซ่อม ไม่มี มาตรฐานการเชื่อม ไม่
ครอบคลุมเหล็ก ความแข็งแรงสูงๆ ความ
แข็งแรงของลวดเชื่อมจำกัด(น้อยกว่าของ
เหล็ก) Residual Stress
- อายุของอะไหล่ที่ซ่อมบางชนิด ุ้เทียบเท่า
อะไหล่แท้
- อายุ ที่ซ่อมบาง ชนิดไม่เป็นที่น่าพอใจ กรณีที่
Torque สูงๆ เมื่อเกิด Over Capacity

Case Fatigue 27 ครั้ง

2. ข้อมูลแสดงสมรรถนะการใช้งาน

Life Prediction เชิงระบบ

น้ำหนักบรรทุก	77 ตัน	36.5 ลบ.เมตร/คัน	
งานดิน	4 ปังก์/คัน	1.95 ตัน/ลบเมตร	71.175 ตัน/เที่ยว
งานถ่าน	4 ปังก์/คัน	1.46 ตัน/ลบเมตร	53.29 ตัน/เที่ยว
ถ้ามอเตอร์หมุน		515 รอบ	
swing shaft หมุน	12 4534 rpm	รอบ/นาที	
	0.207556667 rps	รอบ/วิ	
ถ้ามอเตอร์หมุน		1400 รอบ	
swing shaft หมุน	33 854 rpm	รอบ/นาที	
	0.564233333 rps	รอบ/วิ	
ถ้ามอเตอร์หมุน		2 821167 รอบ	
ถ้ามอเตอร์หมุน	5 วินาที	1.128467	
	2 วินาที	0.84635	
	1.5 วินาที		
วัดจริง		ถ้ามอเตอร์หมุน	515 รอบ
รถขุดหมุนรอบตัวเอง	3 rpm	1.1176215 rpm	
1 รอบ	0.333333333 min	0.8947573 min	
1 รอบ	20 sec.	53.685437 sec.	
1/4 รอบ	5 sec.	13.421359 sec.	
วัดจริง	7.5 sec.	7.5 sec.	



3.รูปภาพประกอบแสดงขนาดจริงของรถขุดไฟฟ้า



รูป รฐ.1 แสดงขนาดและรูปร่างของรถขุดไฟฟ้า

4.ข้อมูลเบื้องต้นการทำงานของระบบสวิง

ไฟฟ้าแรงสูง 22 กิโลโวลต์ วิ่งเข้าหม้อแปลงแปลงไฟเหลือ 6000 โวลต์ วิ่งเข้า Generator แปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงส่งเข้า Main motor จ่ายไปยัง Swing motor ส่งกำลังผ่านเกียร์คู่เฟลาบั้งคับ Swing ring gear ซึ่งทำงานสัมพันธ์กับ Roller bearing สั่งหมุนดัด upper revolving frame ยังผลให้สามารถควบคุมการทำงานบั้งคับทิศทางความเร็วแรงในการหมุนเหวี่ยงของรถขุดไฟฟ้า โดยมีภาพประกอบระบบส่งกำลังและระบบควบคุมดังแสดงต่อไปนี้

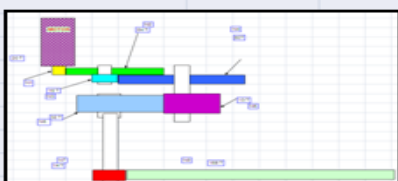


รูป รุ.2 ภาพประกอบระบบส่งกำลังและระบบควบคุม

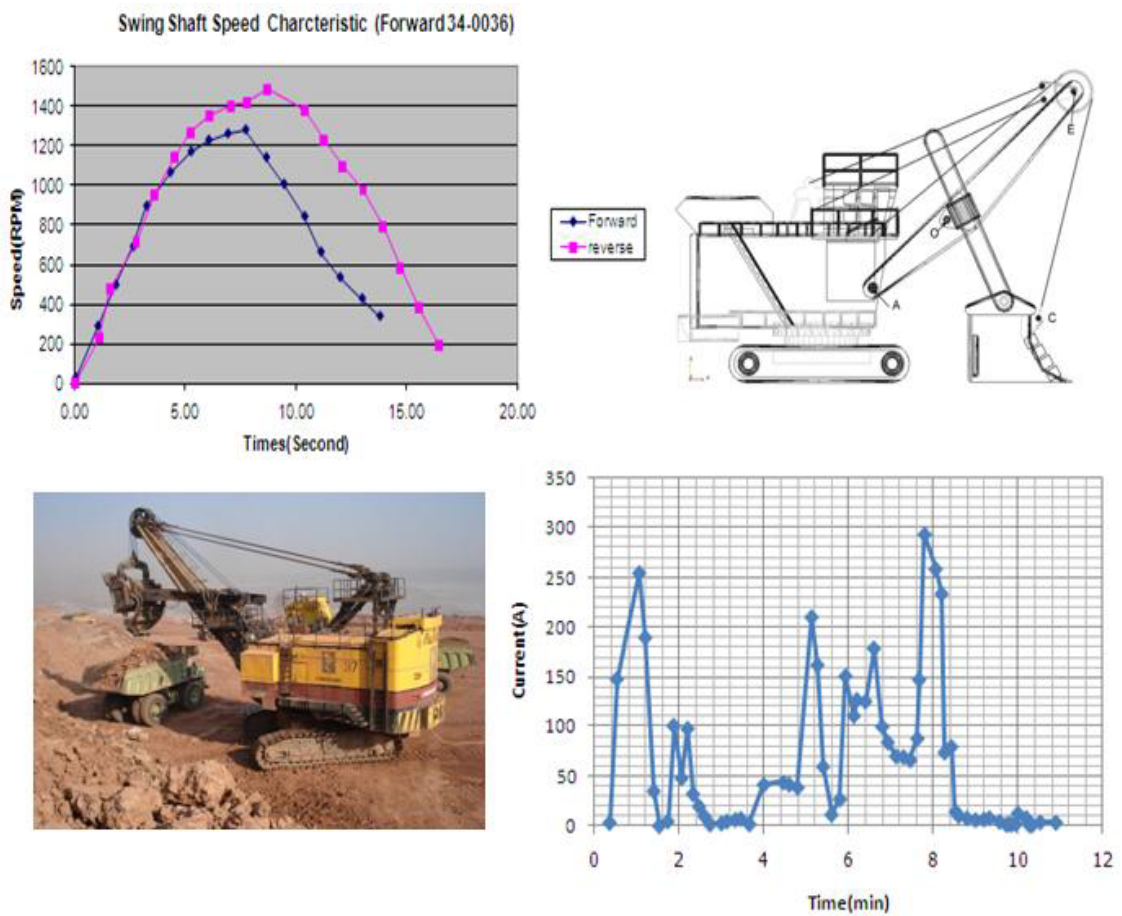
Excel แสดงการคำนวณการส่งถ่ายแรงของระบบส่งกำลังแบบหมุนเหวี่ยงใช้ค่าจาก Name plate

	Motor	95 hp	Motor	95					
	rpm	515	rpm	1500					
	Torque	968.8364 lb.ft	Torque	3991.605973 lb.in=	332.6338311 lb.ft				
	max. Torque ที่มอเตอร์ทำได้ 200% =	1937.6728 lb.ft =	2623.1827 N.m						
Part Name	P/N	Teeth		RPM	Torque	lb.ft	lb.in	kg.m	N.m
Motor Pinion	1N1537F1	Z1	20	N1	1500 T1	332.6338311	3991.605973	45.90346869	450.313
First Reduction Gear	1P1501	Z2	84	N2	357.14286 T2	1397.06209	16764.74509	192.7945685	1891.31
First Reduction Shaft	1P1502F1	Z3	15	N3	357.14286 T3	1397.06209	16764.74509	192.7945685	1891.31
Second Reduction Gear	1P1222	Z4	60	N4	89.285714 T4	5588.248362	67058.98034	771.1782739	7565.26
Second Reduction Shaft R4180F1		Z5	13	N5	89.285714 T5	5588.248362	67058.98034	771.1782739	7565.26
Third Reduction Gear	1N1388F1	Z6	32	N6	36.272321 T6	13755.68828	165068.2593	1898.284982	18622.2
Swing Pinion	1N1276	Z7	14	N7	36.272321 T7	13755.68828	165068.2593	1898.284982	18622.2
Swing Gear		Z8	156	N8	3.2552083 T8	153277.6694	1839332.032	21152.31837	207504

ประสิทธิภาพการสูญเสียของมอเตอร์และกำลังที่ได้จริง

สูตร กำลังของมอเตอร์ DC								
				$P(H) = \frac{V \cdot I \cdot \text{eff}}{746} \quad \text{hp}$				
เมื่อ V = Voltage I = Current eff = Motor efficiency								
การทำงานจริง Volt จะคงที่ แต่ Torque ที่เปลี่ยนแปลง เกิดจากการจ่าย กระแสมากหรือน้อย								
spec	HP	V	I	eff %	rpm	Torque N.m	max. Torque % rated torque	HP
Swing Motor	95	115	715	86	515	1314.8	200	
			60	86	515			
			300	86	515			
			1000	86	515			
			700	86	515			
			800	86	515			
Crowd Motor	110	230	420	87.5	400	1959.3	200	
Propel Motor	175	230	660	87.5	450	2770	150	

ตัวอย่างกราฟกระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์และความเร็วรอบของมอเตอร์ 1 ใน 36 เงื่อนไขการทำงานของรถขุดทั้ง 6 ตัว



รูป ฐ.3 ตัวอย่างกราฟกระแสและความเร็วรอบของมอเตอร์

การถอดประกอบเพลาสวิง



รูป รฐ.4 การถอดประกอบเพลาสวิง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายศิวะ ลิทธิพงษ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120092	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนค่าเล่าเรียน ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ พ.ศ.2551 และ พ.ศ.2552
- ทุนผู้ช่วยวิจัย ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

- ผู้ช่วยวิศวกรฝ่ายตรวจสอบระบบรอกเครน บริษัท พอลลูเท็ค จำกัด ปี 2548 – 2550
- วิศวกรออกแบบ/เขียนแบบ บริษัท เอสพีอี พลาสติก จำกัด ปี 2550-2552
- วิทยากรพิเศษ บรรยายหัวข้อ “การวิเคราะห์การชำรุดและการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล”

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Sitthipong, S. et al. FATIGUE LIFE ASSESSMENT OF WELD SURFACING OF AISI 4340. The 2nd SOUTH-EAST ASIA INTERNATIONAL WELDING CONGRESS (section6 Design & Fabrication). 25-26 February 2010 Bangkok, Thailand. Paper NO 52, Page 467-471.