



การทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C แบบหมุนตัดปลาย
Fatigue testing of Steel S45C by Rotating Bending at the End

ประเสริฐ วิโรจน์ชิวัน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี

งบประมาณ พ.ศ. 2563

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C แบบหมุนตัดปลาย
Fatigue testing of Steel S45C by Rotating Bending at the End



ประเสริฐ วิโรจน์ชิวัน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี

งบประมาณ พ.ศ. 2563

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

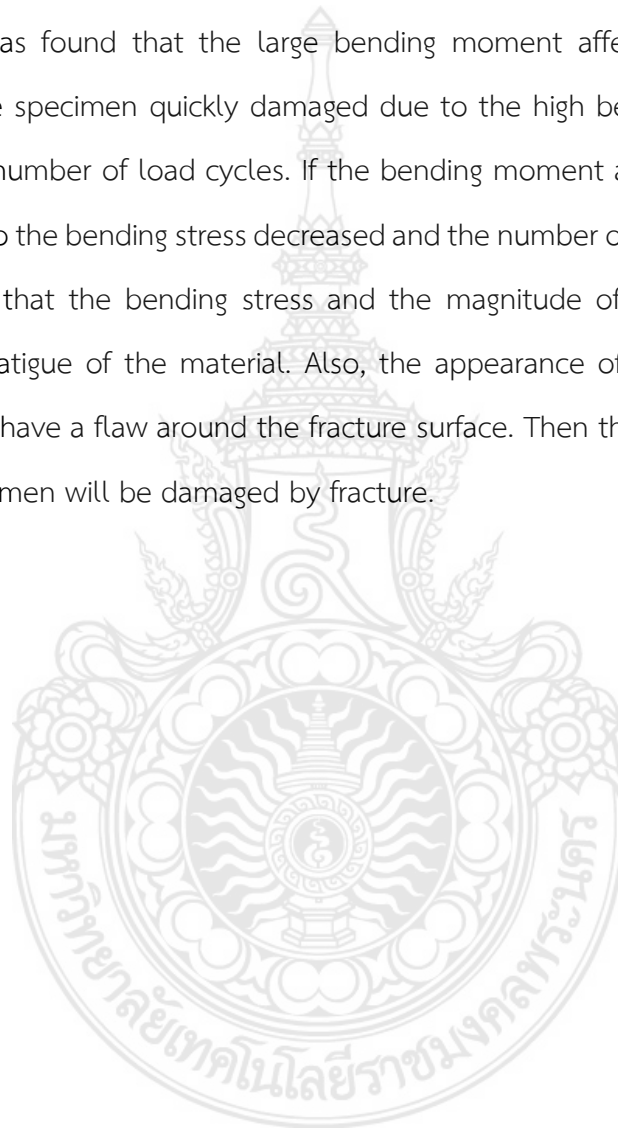
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบความต้านทานความล้าของวัสดุแบบใช้การหมุนตัดปลาย โดยทำการทดสอบวัสดุเป็นเหล็กกล้า S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน ขึ้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ใช้โมเมนต์ตัดที่แตกต่างกันในการทดสอบ จะพบว่าขนาดของโมเมนต์ตัดที่มากจะส่งผลต่อความล้าของขึ้นทดสอบ ทำให้ขึ้นทดสอบเกิดความเสียหายได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีค่าความเค้นดัดสูง และมีจำนวนรอบของภาระจะน้อย แต่ถ้าลดขนาดของโมเมนต์ตัดที่กระทำกับขึ้นทดสอบลง จะทำให้ค่าความเค้นดัดที่เกิดกับขึ้นทดสอบลดลง และจำนวนรอบของภาระจะเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเค้นดัดขนาดของโมเมนต์ตัดมีผลต่อความล้าของวัสดุ และลักษณะร่องรอยความเสียหายของขึ้นทดสอบจะเกิดจุดบกพร่องขึ้นที่ผิวโดยรอบของรอยแตกหัก จากนั้นจุดบกพร่องหรือร่องรอยความเสียหายนี้จะขยายใหญ่ขึ้นจนกระทั่งทำให้ขึ้นทดสอบก็จะเกิดความเสียหายจากการแตกหัก



ABSTRACT

This research is to test the fatigue endurance of the material by using end bending of specimen. The testing material is S45C steel and forming to the standard size for testing. The specimens, with a diameter of 8 mm, required a different bending moment. It was found that the large bending moment affects the fatigue of the specimen. The specimen quickly damaged due to the high bending stress and there were a small number of load cycles. If the bending moment acting on the specimen was reduced to the bending stress decreased and the number of load cycles increasing. It was shown that the bending stress and the magnitude of the bending moment affected the fatigue of the material. Also, the appearance of damage marks of the specimen will have a flaw around the fracture surface. Then the flaw will be enlarged until the specimen will be damaged by fracture.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากหลายท่าน ทั้งนักศึกษาในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และบุคคลภายนอก ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการทำโครงการวิจัยนี้ โดยได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ของคณะวิศวกรรมศาสตร์

ประเสริฐ วิโรจน์ชิวัน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีความล้า (Fatigue)	3
2.2 การทดสอบการล้า (Fatigue test)	8
2.3 ความเค้นดัด	11
2.4 เครื่องทดสอบความล้า R. R More	16
3. วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	17
3.2 การคำนวณค่าความเค้นดัดที่เกิดจากเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัดปลาย	23
4. ผลการวิจัย	
4.1 การทดสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ	25
4.2 การทดสอบความล้าแบบตัดปลาย	26
4.3 ร่องรอยความเสียหายของชิ้นทดสอบความล้าแบบตัดปลาย	27

สารบัญ (ต่อ)

5. สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัย	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
บรรณานุกรม	33
ภาคผนวก	34
ประวัติผู้เขียน	49



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความเค้นที่โลหะเกิดการวิบัติโดย cyclic load	10
4.1 ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างขึ้นทดสอบเหล็กกล้า S45C ชั้นที่ 1	25
4.2 ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างขึ้นทดสอบเหล็กกล้า S45C ชั้นที่ 2	25
4.3 ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างขึ้นทดสอบเหล็กกล้า S45C ชั้นที่ 3	26
4.4 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร	26



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พื้นผิวการแตกหักจากการลาของเหล็กกล้า1040	4
2.2 พื้นผิวเรียบจากการขัดสีของรอยแตกเริ่มต้น	4
2.3 กลไกในการเกิดการขับออกและการยุบเขาของแถบการเลื่อน	5
2.4 ผลการทดสอบการลา S-N curve	7
2.5 ความเค้นแบบต่าง ๆ ที่เกิดจาก cyclic load	9
2.6 ตัวอย่าง S-N Curve ของเหล็ก A517	11
2.7 S-N Curve ของอะลูมิเนียม	11
2.8 สัญลักษณ์และทิศทางของตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คาน	12
2.9 ทิศทางที่เป็นบวก (+) ของค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด	12
2.10 ค่าความเครียดและความเค้นดัดเชิงเส้น	13
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องหมายของโมเมนต์ดัดและเครื่องหมายของส่วนโค้ง	14
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องหมายของโมเมนต์ดัด และทิศทางของความเค้นตึงฉาก	15
2.13 รูปร่างของหน้าตัดสมมาตรทั้งสองด้าน	16
2.14 การทำงานเครื่องทดสอบความล้าแบบ R.R.Moore	16
3.1 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กด้วยเครื่องสปาร์ก รุ่น Thermo ARL 3460	17
3.2 (ก) รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบความล้ามาตรฐาน (ข) ชิ้นงานจริงตามแบบที่กำหนด	18
3.3 เครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนดัดปลาย	19
3.4 การติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนดัดปลาย	19
3.5 เครื่องทดสอบอยู่ในสภาพพร้อมการทดสอบ ไฟสีเขียวจะสว่างขึ้น	20
3.6 เครื่องทดสอบจะหยุดการทำงานอย่างอัตโนมัติเมื่อชิ้นทดสอบขาด	21
3.7 น้ำหนักที่ใช้แขวน เพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัด	22
3.8 จำนวนรอบหมุนของชิ้นทดสอบที่เกิดการแตกหัก	22
3.9 ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบความล้าแบบหมุนดัด	24
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและจำนวนรอบ (S-N curve)	27
4.2 ชิ้นทดสอบที่ 1 น้ำหนักที่กระทำ 80 N จำนวนรอบ 401,674 รอบ	27
4.3 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 1 และ Fig 2 ของชิ้นทดสอบที่ 1	28

สารบัญรูป (ต่อ)

4.4 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 3 ของชั้นทดสอบที่ 1	28
4.5 ชั้นทดสอบที่ 2 น้ำหนักที่กระทำ 140 N จำนวนรอบ 43,537 รอบ	29
4.6 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 1 และ Fig 2 ของชั้นทดสอบที่ 2	29
4.7 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 3 ของชั้นทดสอบที่ 2	30
4.8 ชั้นทดสอบที่ 3 น้ำหนักที่กระทำ 200 N จำนวนรอบ 13,213 รอบ	30
4.9 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 1 และ Fig 2 ของชั้นทดสอบที่ 3	31
4.10 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 3 ของชั้นทดสอบที่ 3	31



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คุณสมบัติทั่วไปของเหล็ก S45C

เหล็กกล้า S45C เป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (medium carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.2-0.5% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จัดเป็นกลุ่มเหล็กที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้าน ทั้งความแข็ง ความเหนียวและยังสามารถชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลทั่วไป มีการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ทั้งงานโครงสร้าง งานเครื่องจักรกล งานแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนประกอบแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น เพลาข้อเหวี่ยง ข้อต่อ ลูกกลิ้ง ลูกกรีด แกนไฮดรอลิก กระจบอกไฮดรอลิก

การชุบแข็งผิว

ในการชุบแข็งผิวสามารถทำได้ทั้งวิธีการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟ และชุบอินดักชั่น โดยการอาศัยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดความร้อนที่ผิวจากนั้นจึงทำการชุบแข็งเฉพาะผิว ซึ่งจะช่วยให้ผิวของเหล็กมีความแข็งขึ้น สามารถทนต่อการสึกหรอและความล้าได้ดี

เมื่อนำเหล็กกล้าชนิดนี้มาใช้งานเพื่อรองรับภาระต่าง ๆ ที่มากระทำเป็นเวลานาน อาจส่งผลให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผลิตจากเหล็กกล้าชนิดนี้ เกิดความเสียหาย นั่นคือชิ้นส่วนเกิดการแตกหัก เช่น เพลาของเครื่องจักรกล เป็นต้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการแตกหักของเพลานั้น อันเนื่องมาจากภาระหรือแรงที่มากระทำจะมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (yield strength) หรือต่ำกว่าความแข็งแรงเฉือนที่จุดคราก (yield shear strength) ความเสียหายนี้ เรียกว่า ความเสียหายเนื่องจากความล้า (fatigue failure) เผลาที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่ทำจากเหล็กกล้า S45C จะต้องมีการทดสอบความแข็งแรงหรือความคงทนของชิ้นส่วนนั้น ก่อนนำไปประกอบเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป ซึ่งในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมีหลายแบบ หนึ่งใน การทดสอบวัสดุชิ้นส่วนนั้น ๆ คือ การทดสอบความล้าของวัสดุ ซึ่งจะใช้เครื่องทดสอบความล้า ในการทดสอบความล้าของวัสดุจะมีอยู่สามวิธี คือ การดึงหรืออัด การดัด และการบิด การทดสอบความล้าด้วยการดึงนั้นใช้กับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่อยู่ภายใต้ภาระดึงที่มีการเปลี่ยนแปลง การทดสอบความล้าแบบดัดนั้นใช้กับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่อยู่ภายใต้ภาระดัดที่มีการเปลี่ยนแปลง

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาความล้าที่เกิดขึ้นกับเพลาลูกกลิ้งเหล็กกล้า S45C เพื่อให้รู้ถึงพฤติกรรมความเสียหายที่จะเกิดขึ้น เนื่องจากความล้าแบบดัด สำหรับใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค่าความต้านทานความล้าของเหล็กกล้า S45C เนื่องจากความเค้นดัดที่มีขนาดแตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะความเสียหายและวิเคราะห์ความเสียหายของเหล็กกล้า S45C เนื่องจากความเค้นดัดที่มีขนาดแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

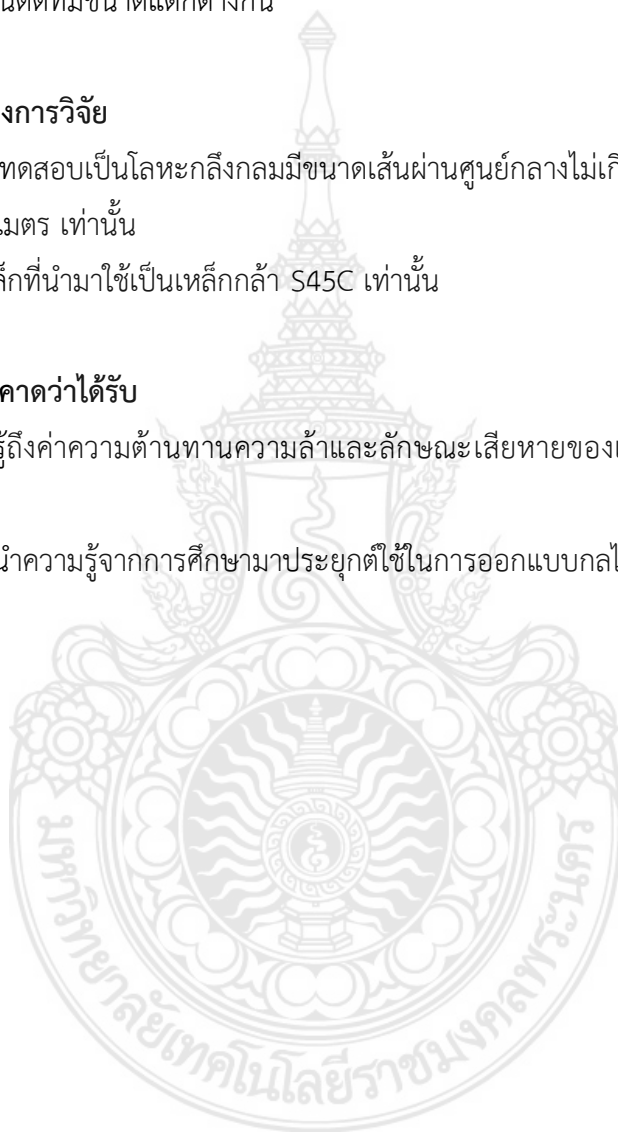
1.3.1 ขึ้นทดสอบเป็นโลหะกลึงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 8 มิลลิเมตร มีความยาวไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เท่านั้น

1.3.2 เหล็กที่นำมาใช้เป็นเหล็กกล้า S45C เท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รู้ถึงค่าความต้านทานความล้าและลักษณะเสียหายของเหล็กกล้า S45C เนื่องจากความล้าแบบดัด

1.4.2 ได้นำความรู้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบกลไกและชิ้นส่วนเครื่องจักรกล



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีความล้า (Fatigue)

ความล้าเป็นความเสียหายประเภทหนึ่งของวัสดุ เกิดจากการได้รับความเค้นแบบซ้ำเดิมหรือแบบเป็นวัฏจักรเป็นเวลานาน จำนวนรอบของการรับแรงที่ทำให้วัสดุแตกหัก จะขึ้นอยู่กับขนาดของความเค้นที่กระทำและเงื่อนไขอื่น ๆ ที่กระทำกับวัสดุ เช่น การดัดงอเสถียรตลอดจนขนาดด้วยอัตราเร็วค่าหนึ่ง พบว่าต้องทำการดัดงอนานกว่าด้วยจำนวนครั้งที่ยาวกว่า เมื่อเทียบกับการดัดงอ เสถียรตลอดเดียวกันด้วยอัตราการดัดงอที่เร็วขึ้นเป็นสองเท่า นั่นคือ แม้จะใช้ความเค้นเท่ากัน แต่ถาเพิ่มอัตราเร็วและองศาของการดัดงอจะทำให้วัสดุแตกหักเร็วขึ้น โดยไม่เกี่ยวข้องกับขนาดของความเค้นที่กระทำ

ชิ้นส่วนโลหะหลายประเภทที่นำไปใช้เพื่อการรับความเค้นแบบหมุนรอบหรือแบบซ้ำเดิม จนเกิดความเสียหายที่ความเค้นต่ำกว่าความเค้นปกติที่สามารถรับได้อย่างมาก ความเสียหายเหล่านี้ที่เกิดขึ้นภายใต้การรับความเค้นแบบเป็นวัฏจักรหรือแบบซ้ำเดิม เรียกว่า ความเสียหายจากการล้า (fatigue failures) ความเสียหายของชิ้นส่วนโลหะประเมินว่า 90% เกิดจากความล้า (Hosford, 2005) ยกตัวอย่าง ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีความเสียหายจากการล้า ความเสียหายจากการล้าของเพลาลูกเบี้ยวที่มีร่องบาก ดังรูปที่ 2.1 ปกติความเสียหายจากการล้าจะเริ่มเกิดที่จุดศูนย์รวมความเค้น เช่น ส่วนที่เป็นมุมหรือร่องบาก หรือบริเวณที่มีตำหนิหรือมีสิ่งเจือปนทางโลหะวิทยา จากจุดเริ่มแตก รอยแตกจะลุกลามไปยังด้านตรงข้ามของชิ้นส่วนภายใต้การหมุนหรือการรับความเค้นแบบซ้ำเดิม ในระหว่างขั้นตอนนี้ของกระบวนการลาบริเวณที่จับยึด (clamshell) หรือบริเวณขอบรอยบาก (beach mark) ของชิ้นส่วนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น สูดหายบริเวณที่เป็นพื้นที่หน้าตัดจะลดจนลงจนไม่สามารถรับความเค้นได้อีก จากนั้นชิ้นส่วนจะเกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ โดยปกติพื้นผิวรอยแตกมีสองบริเวณที่ต่างกัน กล่าวคือ บริเวณที่มีผิวเรียบซึ่งเกิดจากการขัดสีกันของผิวรอยแตกเริ่มต้น ดังรูปที่ 2.1 กลายเป็นรอยแตกลุกลามไปทั่วหน้าตัด และอีกบริเวณหนึ่งเป็นบริเวณพื้นผิวที่ขรุขระ ซึ่งเกิดจากการแตกหักของพื้นที่หน้าตัดที่เหลือรับความเค้นที่สูงเกินไปกว่าจะรับได้ ใน รูปที่ 2.2 รอยแตกจากการล้าจะลุกลามตลอดพื้นที่หน้าตัดก่อนเกิดการแตกหักในท้ายที่สุด



รูปที่ 2.1 พื้นผิวการแตกหักจากการล้าของเหล็กกล้า1040 [สิทธิชัย, 2545]



รูปที่ 2.2 พื้นผิวเรียบจากการขัดสี ของรอยแตกเริ่มต้น [สิทธิชัย, 2545]

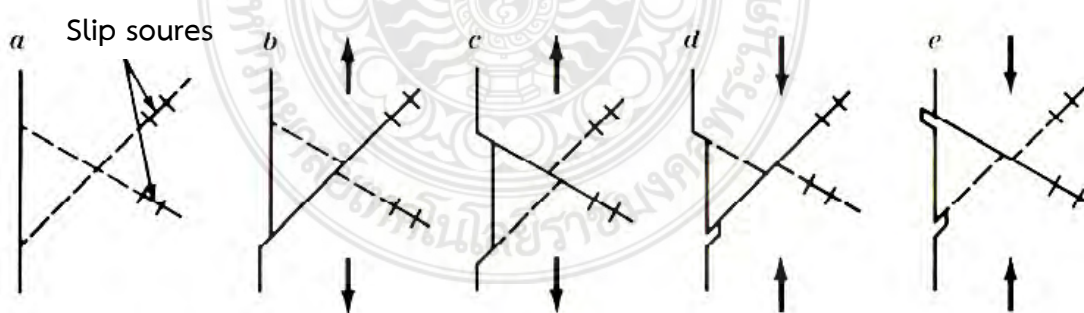
ชิ้นส่วนตะขอรถเครนชิ้นส่วนเครื่องจักรและผิวของเครื่องบินจะเกิดการแตกหักเสียหายจากการรับความเค้นแบบเวียนรอบปกติ ความเค้นที่เกิดเฉพาะบริเวณเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างถาวร ภายในชิ้นงานตลอดจนเกิดรอยร้าวและแตกหักหลังจากรับแรงสลับไปมาจำนวนหนึ่ง โดยเริ่มแรกจะเกิดรอยร้าวจากนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นรอบรอยร้าวจะทำให้วัสดุแตกหัก โดยเฉพาะในวัสดุเปราะภายใต้ความเค้นดึงจะทำให้เกิดความเข้มข้นความเค้นที่บริเวณปลายของรอยร้าว ทำให้รอยร้าวลุกลามจนชิ้นงานแตกหัก ช่วงที่รอยร้าวลุกลามวัสดุจะมีความเครียดแบบถาวร ความเสียหายจากการล้า สวนใหญ่เริ่มจากรอยแตกขนาดเล็ก (microscopic cracks) ซึ่งเกิดการ

ลูกกลมและขยายตัวจากความเค้นที่สะสมเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกินจุดแตกหักของวัสดุ รอยร้าวเหล่านี้มักเกิดจากแนวการเลื่อน (slip lines) ซึ่งเกิดขึ้นในวัสดุจากการรับความเค้นแบบซ้ำ ๆ และเกิดจากการดิสโลเคชันขนาดเล็ก โดยมีความบกพร่อง เช่น รอยขีดข่วนที่พื้นผิว ร่องบาก สิ่งเจือปนและจุดบกพร่องอื่น ๆ เป็นจุดกำเนิดของรอยร้าว

การนำชิ้นงานโลหะเหนียวเนื้อเดียวกันไปปรับความเค้นแบบหมุนรอบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นฐานในระหว่างกระบวนการล้าดังนี้

1. การเกิดจุดเริ่มต้นของรอยแตกหักเป็นขั้นเริ่มต้นของการเสียหายจากการล้า

2. การเติบโตของรอยแตกในรูปของแถบการเลื่อน จุดเริ่มต้นของรอยแตกที่เกิดจากการเสียรูปถาวรมาจากกระบวนการที่ไม่สามารถเกิดการเสียรูปย้อนรอยเดิมได้อย่างสมบูรณ์ การเสียรูปถาวรในทิศทางหนึ่งแล้วเกิดสลับในทิศทางกลับกัน เป็นเหตุทำให้พื้นผิวเกิดสันและร่อง เรียกว่า การขับออกของแถบการเลื่อน (slip band extrusion) และการยุบเข้าของแถบการเลื่อน (slip band intrusion) เกิด ขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบโลหะ ดังรูปที่ 2.3 เช่นเดียวกับความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะตลอดแถบการเลื่อนที่เกิดขึ้น ความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวและความเสียหายตลอดแถบการเลื่อนที่เกิดขึ้น เป็นเหตุทำให้เกิดรอยแตกที่บริเวณพื้นผิวหรือที่บริเวณใกล้พื้นผิว ซึ่งจะลุกลามเข้าไปในชิ้นทดสอบตลอดระยะนาบที่ได้รับความเค้นเฉือนสูงขั้นนี้เรียกว่า การเติบโตขั้นที่หนึ่ง (stage I) ของรอยแตกจากการล้าและอัตราการเติบโตของรอยแตกโดยปกติจะช้ามาก ประมาณ 10^{-10} m/cycle



รูปที่ 2.3 กลไกในการเกิดการขับออกและการยุบเข้าของแถบการเลื่อน [สิทธิชัย, 2545]

3. การเติบโตของรอยแตกบนระยะนาบที่ได้รับความเค้นเฉือนสูง ในระหว่างขั้นที่หนึ่งรอยแตกอาจเติบโตในโลหะหลายผลึก แต่จะมีขนาดเพียงสองถึงสามเกรนเท่านั้น ก่อนที่จะเปลี่ยนทิศทางไปใน

ทิศ ตั้งฉากกับความเค้นดึงสูงสุดบนชิ้นทดสอบโลหะ การเติบโตในขั้นที่สอง (stage II) รอยแตกจะเกิดการลุกลามด้วยอัตราค่อนข้างเร็ว เช่น 10^{-6} m/cycle จากนั้นร่องความล้า (fatigue striation) จะโตขึ้น อย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นรอยแตกขวางกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 2.1 ร่องการล้าเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ความเสียหายจากการล้า ในการกำหนดจุดเริ่มและทิศทางการลุกลามของรอยแตกจากความล้า

4. ความเสียหายแบบเหนียวสูงสุด (ultimate ductile failure) สิ้นสุดท้ายเมื่อรอยแตกครอบคลุมพื้นที่มากพอจนหน้าตัดของเนื้อโลหะที่เหลือไม่สามารถรองรับแรงที่กระทำ ชิ้นทดสอบ จะเกิดการแตกหักแบบเหนียว

ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงการล้าของโลหะ ความแข็งแรงการล้าของโลหะหรือโลหะผสมนอกจากได้รับผลกระทบจากองค์ประกอบทางเคมีของโลหะ แลยังได้รับผลกระทบจากตัวแปรอื่น ๆ ด้วยตัวแปรที่สำคัญที่สุดได้แก่

1. จุกรวมความเค้น (stress concentration) ความแข็งแรงการล้าจะลดลงอย่างมาก ถ้ามีจุดสะสมความเค้น เช่น รอยบาก ฟองอากาศ ร่องสลัก และการเปลี่ยนรูปของหน้าตัด ตัวอย่างเช่น ความเสียหายจากการล้า ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเริ่มเกิดจากร่องสลักในเพลลาเหล็ก ความเสียหายจากการล้าสามารถลดได้โดยการออกแบบอย่างระมัดระวัง โดยหลีกเลี่ยงรูปทรงที่จะทำให้เกิดการสะสมของความเค้น

2. ความหยาบของพื้นผิว (surface roughness) ปกติพื้นผิวสุดท้ายของชิ้นทดสอบโลหะที่มีความเรียบมากกว่ามีความแข็งแรงการล้าที่สูงกว่า เนื่องจากพื้นผิวหยาบจะมีการสะสมความเค้นซึ่งจะทำให้เกิดการเกิดรอยแตกจากการล้า

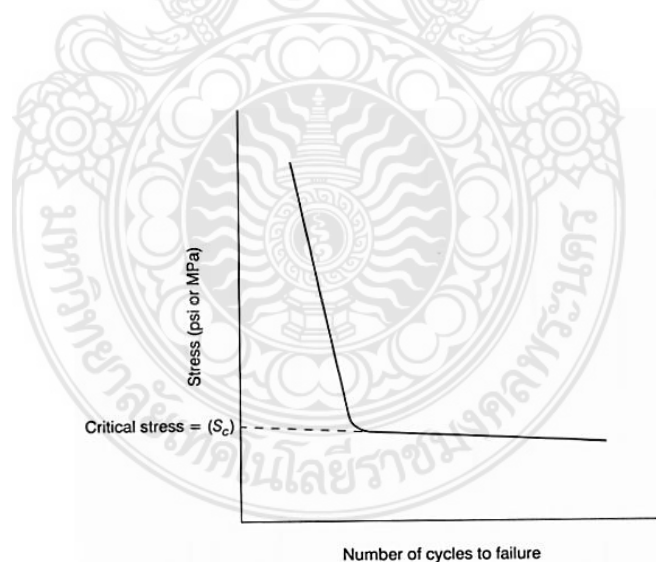
3. สภาพของพื้นผิว (surface condition) เนื่องจากความเสียหายจากการล้าสูงสุดเริ่มเกิดที่ผิวของโลหะ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นผิวจึงมีความสำคัญต่อความแข็งแรงการล้าของโลหะ ยกตัวอย่าง กระบวนการชุบผิวแข็ง เช่น carburizing และ nitriding ซึ่งจะทำให้พื้นผิวของเหล็กกล้าแข็งขึ้นส่งผลทำให้มีอายุการล้าเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม decarburizing จะทำให้พื้นผิวของเหล็กอ่อนลงและมีอายุการล้าลดลง เช่นเดียวกับการทำให้พื้นผิวของโลหะมีความเค้นตกค้างโดยการขึ้นรูปจะช่วยเพิ่มอายุการล้าได้

4. สิ่งแวดล้อม (environment) ถ้าโลหะมีการรับความเค้นแบบหมุนรอบในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน การกัดกร่อนทางเคมีจะเร่งอัตราการลุกลามของรอยแตกจากการล้าการรวมกันของ

การกัดกร่อนกับการรับความเค้นแบบหมุนรอบของโลหะเรียกว่า การล้าจากการกัดกร่อน (corrosion fatigue)

ความเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหักจากการล้าจะกำหนดจากระดับความแตกต่าง และชนิดของความเค้น โดยความเค้นอาจเป็นความเค้นตามแนวแกน ความเค้นเฉือนบิด หรือดัดงอ ค่าความเค้นที่วัสดุเกิดการแตกหักจากการล้าเรียกว่า ความแข็งแรงการล้า (fatigue strength) ซีดจำกัดความเค้น (limiting stress) หรือความเค้นวิกฤต (critical stress) เป็นความเค้นในช่วงที่วัสดุสามารถรับแรงแบบซ้ำ ๆ โดยไม่แตกหักและไม่ขึ้นกับจำนวนรอบ ซึ่งเรียกว่า ซีดจำกัดความทนทาน (endurance limit)

การทดสอบความล้าเป็นการทดสอบที่ต้องใช้ระยะเวลายาว บางครั้งอาจเป็นเดือนหรือเป็นปี ปกติการทดสอบการล้าจะไม่ใช้ในระบบการควบคุมคุณภาพหรือการตรวจสอบ เนื่องจากต้องใช้เวลานาน และความพยายามค่อนข้างมากในการจัดเก็บข้อมูลที่จำเป็น โดยในการทดสอบความล้ามีเครื่องมือหลายชนิดแต่ทุกชนิดมีสองสิ่งๆที่เหมือนกัน คือ จำนวนรอบการหมุนต้องสามารถนับได้อย่างถูกต้อง จนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก และต้องสามารถบันทึกความเค้นที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้อย่างถูกต้อง ถ้ามีการทดสอบกับชิ้นทดสอบหลายชิ้นด้วยความเค้น



รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบการล้า (S-N curve) [สิทธิชัย, 2545]

จากรูปที่ 2.4 จะพบว่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นที่ค่อนข้างตรงสองเส้นมาบรรจบกันและถ้าทำการลากเส้นกราฟลงมาตัดกับแกนของความเค้นจะทำให้ได้ค่าขีดจำกัดความเค้น หรือความเค้นวิกฤต (S_c) ของวัสดุ

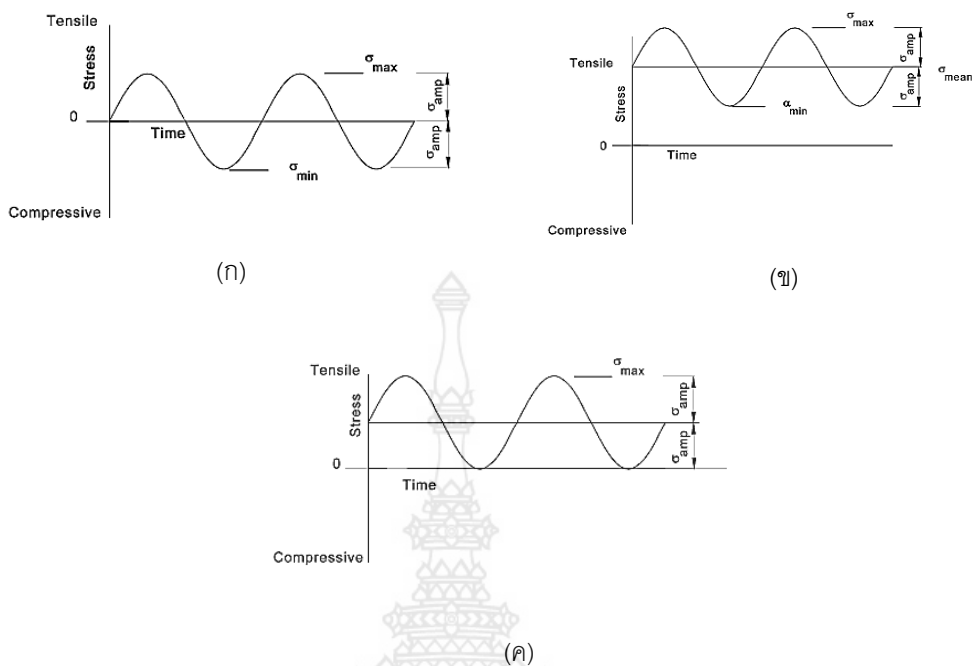
อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงการล้าของวัสดุ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของวัสดุจะลดลง ทำให้ความแข็งแรงการล้าและขีดจำกัดการล้า (endurance limit) ลดลง ด้วย นอกจากนี้ความแข็งแรงการล้าของโลหะยังได้รับผลกระทบจากสว่นประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เช่น การเติมธาตุผสมบางชนิดจะทำให้ความแข็งแรงการล้าของโลหะเพิ่มขึ้น รวมทั้งกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการทางความร้อนและการขึ้นรูปเย็นจะช่วยให้โลหะมีความแข็งแรงการล้าเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การทำผิวสุดท้ายของวัสดุให้เรียบหรือกระบวนการต่าง ๆ ที่ จะช่วยลดการเกิดของดิสโลเคชัน และลดจุดเริ่มเกิด หรือการขยายตัวของรอยแตกล้วนช่วยให้อายุการใช้งานความแข็งแรงการล้าเพิ่มขึ้น

2.2 การทดสอบการล้า (fatigue test)

ในบางกรณี โครงสร้างและเครื่องจักรกลจะถูกกระทำโดยแรงกระทำที่กระทำซ้ำไปซ้ำมาเป็นรอบโดยมีขนาดของแรงจะมีค่าที่ไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แต่มีรูปแบบที่ซ้ำเดิมในหนึ่งช่วงเวลา แรงกระทำในลักษณะดังกล่าวมักจะถูกเรียกว่า cyclic load การกระทำของแรงในลักษณะนี้จะทำให้ความเค้น (stress) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เมื่อ cyclic load กระทำต่อโครงสร้างเป็นเวลานานพอควรแล้ว แรงดังกล่าวอาจจะทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติได้ โดยการวิบัตินี้จะถูกเรียกว่า การล้า (fatigue)

จากรูปที่ 2.5 จะสามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ cyclic load ได้ดังต่อไปนี้

1. stress range เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นต่ำสุด



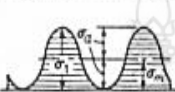

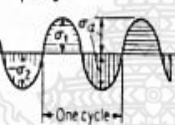


รูปที่ 2.5 ความเค้นแบบต่าง ๆ ที่เกิดจาก cyclic load [สิทธิชัย, 2545]

2. mean stress เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นต่ำสุด ค่า mean stress นี้จะเท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 2.5 (ก) หรือไม่เท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 2.5(ข) และรูปที่ 2.5(ค) ก็ได้
3. stress amplitude หรือ alternating stress เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าความเค้นสูงสุดหรือค่าความเค้นต่ำสุดกับค่าความเค้นเฉลี่ย
4. stress ratio หรือ range ratio เป็นอัตราส่วนของค่าความเค้นต่ำสุดกับค่าความเค้นสูงสุด

โดยทั่วไปแล้ว จะบ่งบอกลักษณะของ cyclic load ได้ 2 แบบ คือ บอกค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress) ร่วมกับ range ratio และบอกค่า mean stress ร่วมกับ alternating stress ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ค่าความเค้นที่โลหะเกิดการวิบัติโดย cyclic load เมื่อขึ้นทดสอบถูกทดสอบไปเป็นจำนวนรอบค่าหนึ่งจะถูกเรียกว่า ความแข็งแรงความล้า (fatigue strength) ของวัสดุ และวัสดุโดยส่วนใหญ่จะมีค่าความเค้นที่วัสดุนั้นสามารถรองรับได้โดยไม่เกิดการล้าเลย ซึ่งจะเรียกค่าความเค้นดังกล่าวว่า endurance limit ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6 เท่าของกำลังของวัสดุที่หาได้จากการทดสอบแบบ static

ตารางที่ 2.1 ค่าความเค้นที่โลหะเกิดการวิบัติโดย cyclic load [สิทธิชัย, 2545]

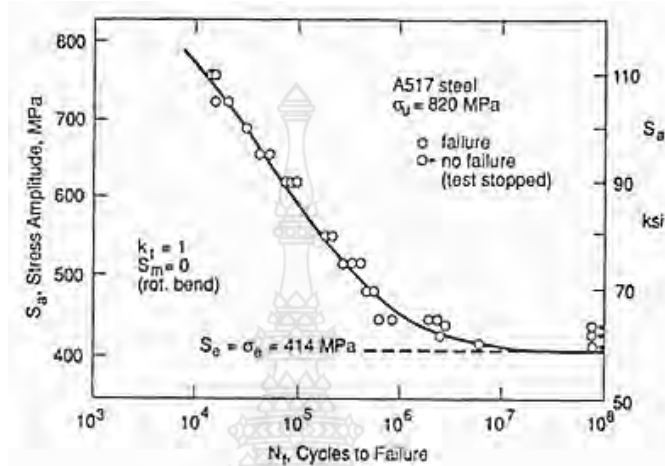
Type of stress variation		Range-ratio nomenclature		Mean-stress nomenclature	
Description	Diagram	Maximum stress	Range ratio	Mean stress	Alternating stress
Steady stress, σ_1		σ_1	$\frac{\sigma_1}{\sigma_1} = 1.0$	σ_m	0
Pulsating stress, between σ_1 and σ_2		σ_1	$0 < \frac{\sigma_2}{\sigma_1} < 1$	σ_m	$\pm \sigma_a$
Pulsating stress, between σ_1 and 0		σ_1	$\frac{0}{\sigma_1} = 0$	σ_m	$\pm \sigma_a$
Partly reversed stress, between σ_1 and σ_2 , where $-\sigma_1 < \sigma_2 < 0$		σ_1	$-1 < \frac{\sigma_2}{\sigma_1} < 0$	σ_m	$\pm \sigma_a$
Completely reversed stress, between σ_1 and σ_2 , where $\sigma_2 = -\sigma_1$		σ_1	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1.0$	0	$\pm \sigma_a = \sigma_1$

ในการทดสอบการล้า (fatigue test) จะนำข้อมูลของความเค้นที่เกิดขึ้นในขึ้นทดสอบกับจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบเกิดการวิบัติมาเขียนกราฟ โดยที่กราฟที่ได้จะถูกเรียกว่า S-N Curve ซึ่งกราฟดังกล่าวจะมีแกนตั้งแสดงค่าของความเค้นและมีแกนนอนแสดงจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบเกิด การวิบัติแบบล้า ซึ่งมักจะถูกวาด โดยใช้ scale แบบ logarithm ดังรูปที่ 2.6 จากรูป จะเห็นได้ว่า เหล็ก A 517 จะมีค่า endurance limit ที่ 414 MPa ซึ่งมีค่าประมาณ 50% ของกำลังประลัย (ultimate strength) ของเหล็ก

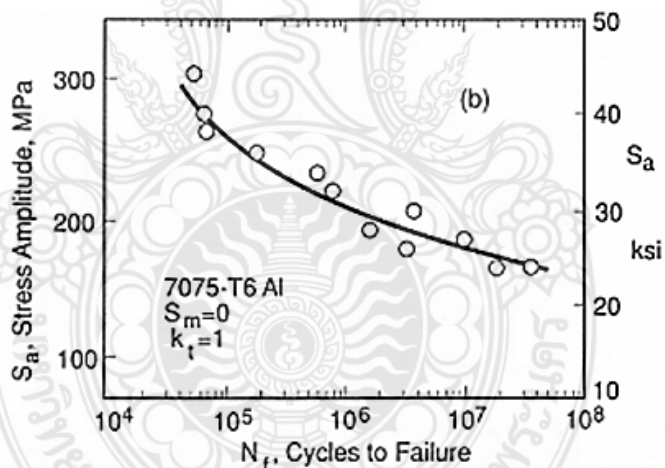
รูปที่ 2.7 แสดง S-N Curve ของอะลูมิเนียม ซึ่งในกรณีนี้ จะเห็นว่าอะลูมิเนียม ไม่มี endurance limit ที่ชัดเจน ซึ่งมาตรฐานการทดสอบจะกำหนดให้ endurance limit ของอะลูมิเนียม เป็นค่าของความเค้นที่ขึ้นทดสอบถูกกระทำโดย cyclic load เป็นจำนวนรอบมาก ๆ เช่น 10^7 หรือ 10^8 รอบ เป็นต้น ซึ่งจะใช้ค่าเท่าใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของวัสดุ

ในการออกแบบโครงสร้างและเครื่องจักรกล จะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการล้า (fatigue) ขึ้นในโครงสร้างและเครื่องจักรกล เมื่อโครงสร้างและเครื่องจักรกลดังกล่าวถูกกระทำโดย cyclic load เป็นจำนวนรอบมาก ๆ ดังนั้น เมื่อทราบ S-N Curve ของวัสดุแล้ว จะสามารถหาค่ากำลังรับความล้า (fatigue strength) ของวัสดุได้ และเมื่อหารค่า fatigue strength ด้วยค่าองค์ประกอบความ

ปลอดภัย (factor of safety) แล้วจะหาค่าความเค้นที่ยอมให้ (allowable stress) ที่จะใช้ในการออกแบบโครงสร้างและเครื่องจักรกล เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากการล้าได้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่าง S-N Curve ของเหล็ก A517 (สิทธิชัย, 2545)

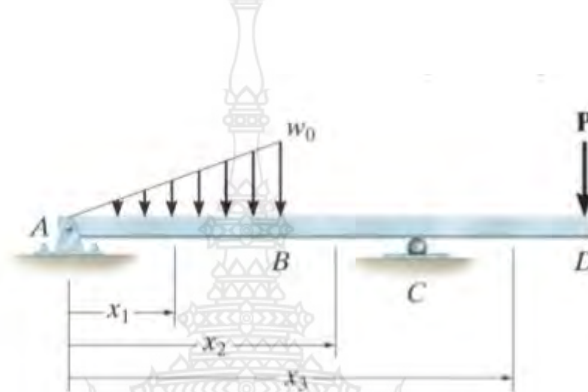


รูปที่ 2.7 S-N Curve ของอะลูมิเนียม [สิทธิชัย, 2545]

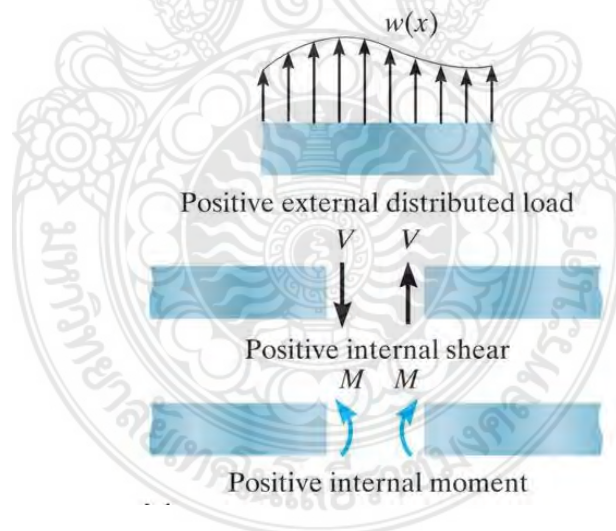
2.3 ความเค้นดัด (Bending Stress)

แผนภาพแรงเฉือนและแผนภาพโมเมนต์ (shear and moment diagrams) ส่วนใหญ่แล้วในการวิเคราะห์แผนภาพแรงเฉือนและแผนภาพโมเมนต์มักจะใช้ในการวิเคราะห์คาน (beam) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนทางกล ที่รับภาระกระทำตามขวางกับแนวแกนของคาน ภายใต้แรงกระทำ ตามขวางที่ตั้งฉากกับแนวแกนของคานจะทำให้เกิดแรงเฉือนดัด (shear force) และ โมเมนต์ดัดในคาน (bending moment) โดยแรงเฉือนจะทำให้เกิดค่าความเค้นเฉือน (shear stress) และโมเมนต์ดัดจะทำให้เกิด

ความเค้นดัด (bending stress หรือ flexural stress) ดังนั้นก่อนที่จะวิเคราะห์ความเค้นได้ จำเป็นต้องสามารถวาดแผนภาพแรงเฉือนและแผนภาพโมเมนต์ดัดให้ได้ก่อนเป็นอันดับแรก ในการสร้างสมการของแรงเฉือน (V) และสมการโมเมนต์ (M) ขั้นแรกจะต้องมีการกำหนดจุดเริ่มต้น และทิศทางที่เป็นบวก จากนั้นจึงกำหนดทิศทางและเครื่องหมายของแรงเฉือนและโมเมนต์ การกำหนดเครื่องหมายของแรงเฉือนและโมเมนต์แสดงดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 สัญลักษณ์และทิศทางของตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คาน [Hibbeler, 2008]



รูปที่ 2.9 ทิศทางที่เป็นบวก (+) ของค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด [Hibbeler, 2008]

ขั้นตอนการเขียนแผนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

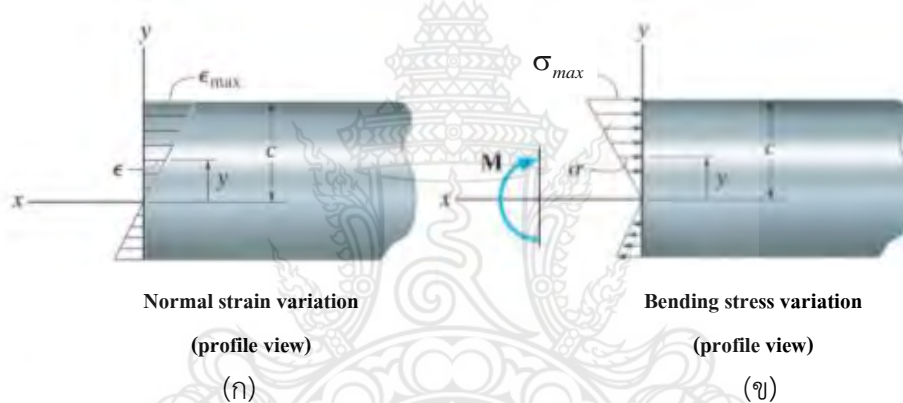
- 1) คำนวณแรงปฏิกิริยาและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่จุดยึดให้ครบทุกจุด
- 2) กำหนดจุดเริ่มต้น และกำหนดทิศทาง x ที่จะใช้ในการวิเคราะห์

3) เลือกหน้าตัดในแต่ละช่วงเพื่อทำการวิเคราะห์แรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น โดยทำการเขียนแผนผังการวิเคราะห์แรงอิสระ

4) เขียนแผนภาพแรงเฉือนและแผนภาพโมเมนต์ที่ขึ้นกับระยะทาง โดยถ้ามีเครื่องหมายเป็นบวกให้เขียนไว้ด้านบน ส่วนเครื่องหมายลบให้เขียนไว้ด้านล่าง

2.3.1 การคำนวณค่าความเค้นดัดในคาน (The flexure formula)

การคำนวณค่าความเค้นดัดในคาน จากการวิเคราะห์ในปัญหาแรงเฉือนในคานที่ผ่านมา และเมื่อสมมติให้พฤติกรรมของคานมีความเครียดเป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 2.10(ก) แล้วจะทำให้เกิดความเค้นที่เป็นเชิงเส้น (linear variation in normal stress) เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จะนำไปสู่ การหาค่าความเค้นดัดในสมการ (2.1) และสมการ (2.2)



รูปที่ 2.10 ค่าความเครียดและความเค้นดัดเชิงเส้น [Hibbeler, 2008]

$$\sigma = -\left(\frac{y}{c}\right)\sigma_{max} \quad (2.1)$$

โดยที่ σ คือ ค่าความเค้นดัด (N/m^2)

σ_{max} คือ ค่าความเค้นดัดสูงสุดที่เกิดบนเพลลา (N/m^2)

y คือ ระยะจากแกนสะเทินถึงระยะที่สังเกต (m)

c คือ ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวด้านนอกที่ยาวที่สุด (m)

$$\sigma_{max} = -\frac{My}{I} \quad (2.2)$$

โดยที่ M คือ โมเมนต์ดัด ณ จุดที่สนใจ ($N \cdot m$)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย ณ หน้าตัดที่สนใจ (m^4)

2.3.2 ความเค้นสูงสุดที่หน้าตัด (Maximum Stresses at a Cross Section)

ความเค้นดึงและความเค้นอัดที่มากที่สุดที่กระทำบนพื้นที่ใด ๆ จะเกิดขึ้นที่จุดที่อยู่ห่างจากแกนสะเทินมากที่สุด กำหนดให้ c_1 และ c_2 เป็นระยะห่างจากแกนสะเทินไปยังขอบบนสุดและขอบล่างสุดในทิศทางบวก y และลบ y ดังรูปที่ 2.11 ความเค้นดึงฉากสูงสุด σ_1 และ σ_2 จะเป็น

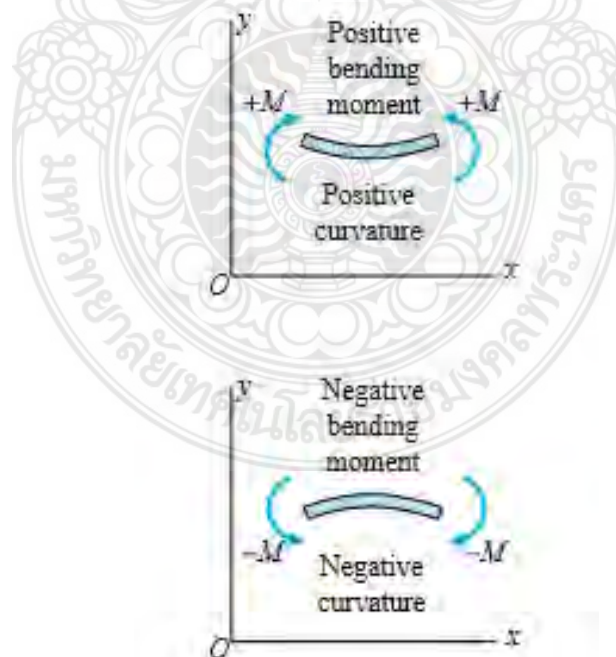
$$\sigma_1 = \frac{Mc_1}{I} = -\frac{M}{S_1} \quad (2.3ก)$$

$$\sigma_2 = \frac{Mc_2}{I} = -\frac{M}{S_2} \quad (2.3ข)$$

ซึ่ง

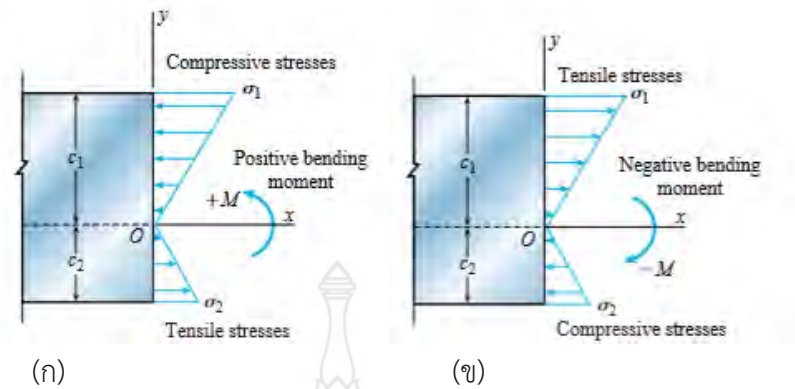
$$S_1 = \frac{I}{c_1} \quad (2.4ก)$$

$$S_2 = \frac{I}{c_2} \quad (2.4ข)$$



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องหมายของโมเมนต์ดัดและเครื่องหมายของส่วนโค้ง

[Gere and Goodno, 2009]



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องหมายของโมเมนต์ดัดและทิศทางของความเค้นตั้งฉาก
[Gere and Goodno, 2009]

รูปที่ร่างที่สมมาตรสองด้าน (doubly symmetric shapes) ถ้าหน้าตัดของคานสมมาตรกับแกน x และ y แล้วจะได้ว่า $c_1 = c_2 = c$ และความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นอัดสูงสุดจะมีขนาดเท่ากัน

$$\sigma_1 = \sigma_2 = -\frac{Mc}{I} = -\frac{M}{S} \quad (2.5)$$

ซึ่ง

$$S = \frac{I}{c} \quad (2.6)$$

สำหรับคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular cross section) กว้าง b สูง h ดังรูปที่ 2.13(ก) โมเมนต์ความเฉื่อยและมอดูลัสของหน้าตัดจะเป็น

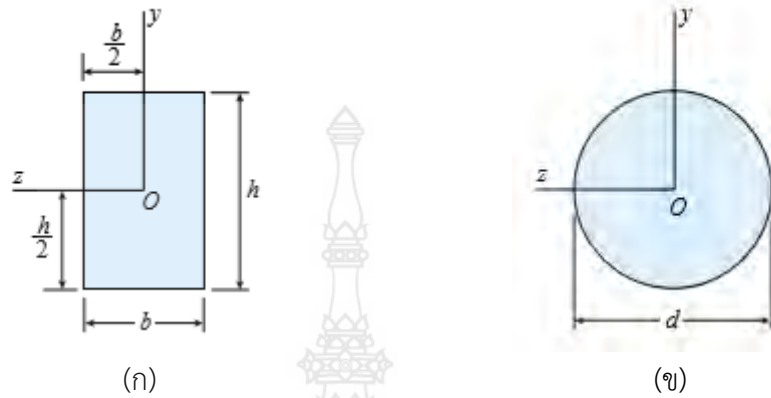
$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2.7)$$

$$S = \frac{bh^2}{6} \quad (2.8)$$

สำหรับคานหน้าตัดวงกลม (circular cross section) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d ดังรูปที่ 2.13(ข) จะเป็น

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (2.9)$$

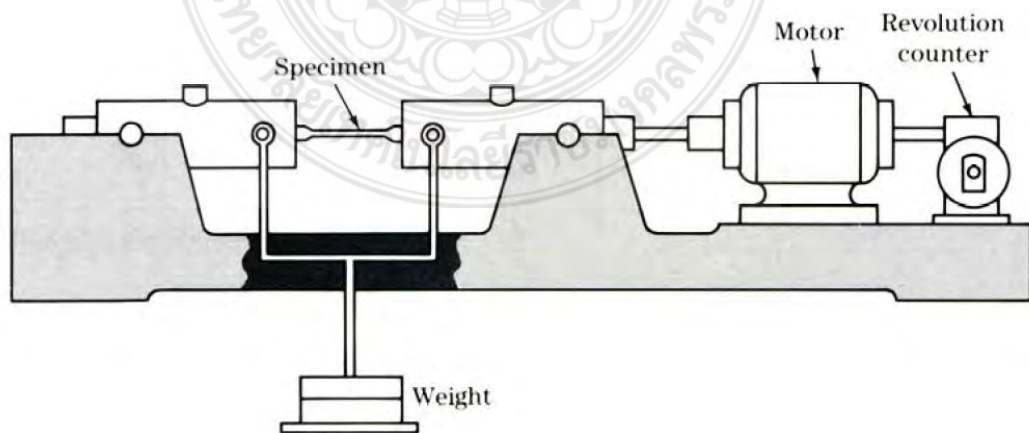
$$S = \frac{\pi d^3}{32} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.13 รูปร่างของหน้าตัดสมมาตรทั้งสองด้าน [Gere and Goodno, 2009]

2.4 เครื่องทดสอบความล้า R.R.Moore

การทดสอบความล้าสามารถทดสอบได้โดยการกำหนดความเค้นที่กระทำต่อวัสดุจะทำการทดสอบความล้ากับชิ้นทดสอบที่มีขนาดไม่ใหญ่มากในลักษณะของการหมุนแทนเหล็ก ซึ่งขณะที่หมุนชิ้นทดสอบจะได้รับแรงสลับกันระหว่างแรงกดกับแรงเค้นดึงในปริมาณที่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.14 ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบการล้าแบบตัด ของ R.R.Moore จะต้องทำการขีดเงาผิวชิ้นทดสอบจนถึงตรงแกนกลาง โดยข้อมูลจากการทดสอบจะนำมาบันทึกในรูปแบบของกราฟ S-N คือบันทึกแรงเค้น S เทียบกับจำนวนรอบการหมุน N ที่ทำให้วัสดุแตกหัก



รูปที่ 2.14 การทำงานเครื่องทดสอบความล้าแบบ R.R.Moore [Suryanarayana, 2011]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

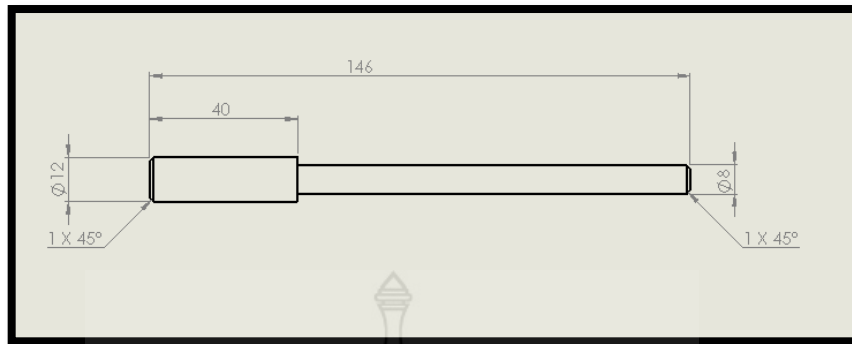
3.1.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความล้มและลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น รวมทั้งเครื่องทดสอบความล้มแบบต่าง ๆ และมาตรฐานการทดสอบความล้มของวัสดุ

3.1.2 ทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก S45C เพื่อพิสูจน์ว่าเป็นเหล็ก S45C จริง โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Optical Emission Spectrometer หรือ เครื่องสปาร์ก รุ่น Thermo ARL 3460 แสดงดังรูปที่ 3.1 วิธีทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน JIS G1253:2013



รูปที่ 3.1 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กด้วยเครื่องสปาร์ก รุ่น Thermo ARL 3460

3.1.3 จัดทำชิ้นทดสอบความล้มให้มีรูปร่างและขนาดตามแบบที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.2



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบความล้ามาตรฐาน

(ข) ชิ้นงานจริงตามแบบที่กำหนด

3.1.4 ขั้นตอนการทดสอบความล้าแบบหมุนตัดปลายของเหล็ก S45C ดังนี้

1) ทำการตรวจสอบความเรียบร้อยของเครื่องทดสอบความล้าแบบตัดปลาย เพื่อให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความล้าแบบดัดปลาย

- 2) กดสวิตช์ฉุกเฉิน (emergency switch) ให้อยู่ในตำแหน่ง ON
- 3) เปิดฝาครอบป้องกันอันตรายของเครื่องทดสอบ
- 4) นำชิ้นทดสอบมาติดตั้งกับเครื่องทดสอบ โดยใช้ประแจคลายนัทครอบของหัวจับ (collet) ออก จากนั้นทำการสอดปลายของชิ้นทดสอบด้านใหญ่เข้ากับหัวจับ ส่วนปลายอีกด้าน สอดเข้ากับแบร์ริง (floating bearing) ชั้นนัทครอบของหัวจับ เพื่อยึดชิ้นทดสอบให้แน่นด้วยประแจ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบความล้าแบบดัด

- 5) ปิดฝาครอบป้องกันอันตรายของเครื่องทดสอบ
- 6) ปิดสวิตช์ของเครื่องทดสอบให้อยู่ตำแหน่ง ON ของชุดควบคุม ไฟสีเขียวจะสว่างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5

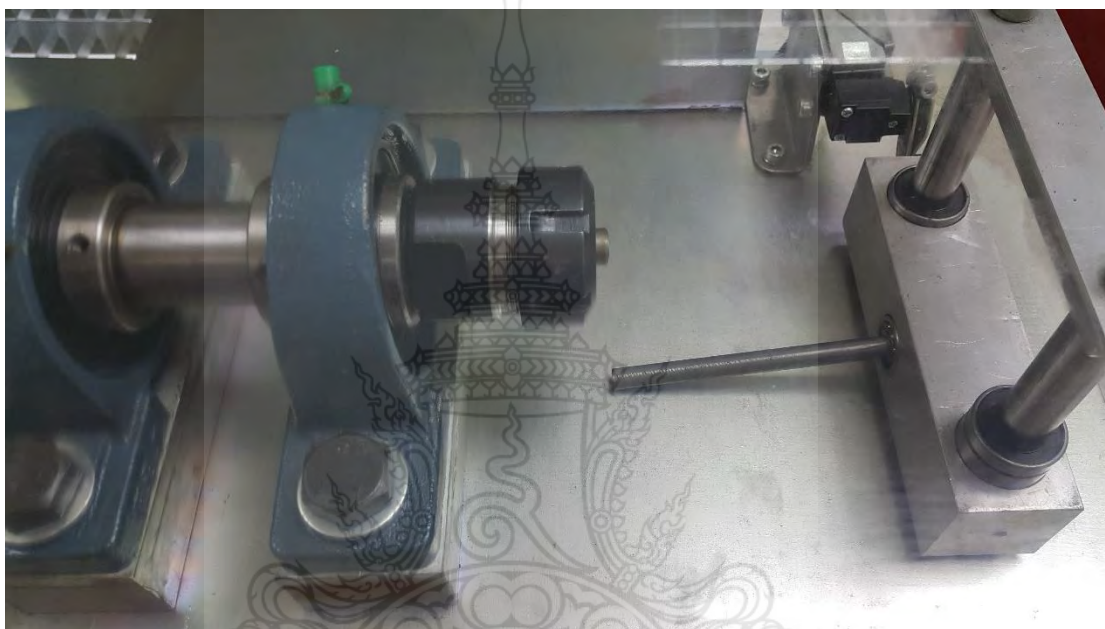


รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบอยู่ในสภาพพร้อมการทดสอบ ไฟสีเขียวจะสว่างขึ้น

- 7) ปิดสวิตช์ฉุกเฉินในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เพื่อให้อยู่ในตำแหน่ง OFF
- 8) นำน้ำหนักถ่วงมาแขวนเข้ากับปลายของชิ้นทดสอบ ตามสภาวะที่ได้กำหนดไว้ เพื่อให้ชิ้นทดสอบอยู่ภายใต้โมเมนต์ตัด ดังแสดงในรูปที่ 3.7

9) ทำการปรับตั้งตัวเลขที่หน้าปัดแสดงจำนวนรอบหมุนของเซ็นทดสอบของตัววัดรอบ (counter) ให้ตัวเลขเป็นศูนย์ (0) โดยกดที่ปุ่ม RESET ของชุดควบคุม

10) กดสวิตช์ START ของชุดควบคุม หลอดไฟแสดงสถานะสีเขียวจะสว่างขึ้น จากนั้นเครื่องทดสอบจะเริ่มทำงาน จนกระทั่งเมื่อเซ็นทดสอบขาด เครื่องทดสอบจะหยุดการทำงานอย่างอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ไฟแสดงสถานะจากสีเขียวจะเปลี่ยนเป็นสีแดง



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบจะหยุดการทำงานอย่างอัตโนมัติเมื่อเซ็นทดสอบขาด



รูปที่ 3.7 น้ำหนักที่ใช้แขวน เพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัด

- 11) บันทึกจำนวนหมุนของชั้นทดสอบ จากตัวนับรอบ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 จำนวนรอบหมุนของชั้นทดสอบที่เกิดการแตกหัก

12) นำชิ้นทดสอบที่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าไปทำการถ่ายรูป เพื่อดูร่องรอยความเสียหาย

3.2 การคำนวณค่าความเค้นดัดที่เกิดจากเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนดัดปลาย

การคำนวณค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการทดสอบความล้าแบบหมุนดัดปลายของเหล็กกล้า S45C หาได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{ความเค้นดัด } \sigma_b = \frac{Mc}{I}$$

$$\text{โดยที่ } M = W \times L = 120W \text{ N} \cdot \text{mm}$$

L คือ ระยะความยาวของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งแฉกก่อนนำหน้าหนัก ไปจนถึงจุดที่ชิ้นทดสอบเกิดความเสียหาย ซึ่งจะมีความยาว 120 mm

c คือ ตำแหน่งที่เกิดความเค้นดัดสูงสุดที่ผิวนอกของชิ้นทดสอบ โดยวัดจากจุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดชิ้นทดสอบไปยังผิวนอกสุด (mm)

$$\text{โดยที่ } c = \frac{d}{2}$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ คือ 8 mm

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm^4)

$$\text{โดยที่ } I = \frac{\pi d^4}{64}$$

เมื่อนำ $M, c,$ และ I แทนค่าลงในสมการความเค้นดัด จะได้

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{(WL)(d/2)}{\frac{\pi}{64} d^4} = \frac{32WL}{\pi d^3} \\ &= 2.387W \text{ 1/mm}^2 \end{aligned}$$

สมการที่ได้จะนำมาคำนวณค่าความเค้นดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ ภายใต้สภาวะการทดสอบความล้าแบบหมุนดัดปลาย ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบความล้าแบบหมุนดัดปลายแสดงดังรูปที่ 3.9 จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผล



รูปที่ 3.9 ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบความล้าแบบหมุนตัด



บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การทดสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ

4.1.1 ผลการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างชิ้นทดสอบความล้าที่ทำจากเหล็กกล้า S45C จำนวน 3 ชิ้น แสดงดังตารางที่ 4.1-4.3

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างชิ้นทดสอบเหล็กกล้า S45C ชั้นที่ 1

No.	Element (%)						
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
1	0.44510	0.61071	0.23696	0.01833	0.00326	0.00722	0.02862
	Cu	Mo	V	Ti	Al	W	As
	0.01201	0.00016	0.00054	0.00224	0.00182	0.00170	0.00418
	Sn	Co	Pb	B	Bi	Ca	Zn
	0.00187	0.00253	0.00070	0.00160	0.00017	0.00105	0.00047
	N						
	0.03476						

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างชิ้นทดสอบเหล็กกล้า S45C ชั้นที่ 2

No.	Element (%)						
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
2	0.43624	0.60738	0.23448	0.01693	0.00238	0.00783	0.02907
	Cu	Mo	V	Ti	Al	W	As
	0.01195	0.00025	0.00048	0.00218	0.00176	0.00152	0.00428
	Sn	Co	Pb	B	Bi	Ca	Zn
	0.00206	0.00251	0.00028	0.00161		0.00133	0.00049
	N						
	0.01482						

ตารางที่ 4.3 ส่วนผสมทางเคมีของตัวอย่างชิ้นทดสอบเหล็กกล้า S45C ชั้นที่ 3

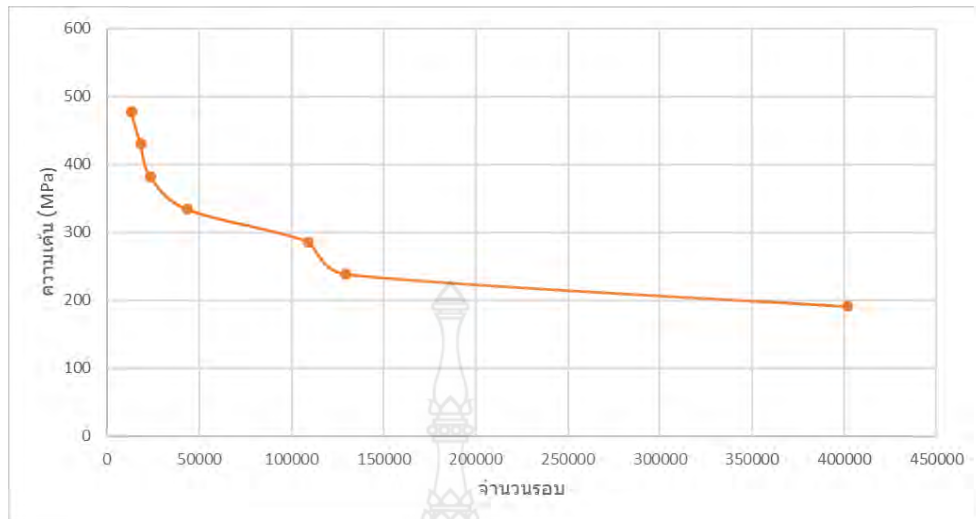
No.	Element (%)						
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
3	0.44279	0.65987	0.26276	0.01788	0.01175	0.00749	0.02750
	Cu	Mo	V	Ti	Al	W	As
	0.01064	0.00015	-	0.00180	0.00136	0.00116	0.0037
	Sn	Co	Pb	B	Bi	Ca	Zn
	0.00194	0.00233	-	0.00151	-	0.00096	0.00045
	N						
	0.73680						

4.2 การทดสอบความล้าแบบตัดปลาย

ผลการทดสอบความล้าและค่าความเค้นตัดที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบแบบตัดปลายของเหล็กกล้า S45C แสดงดังตารางที่ 4.4 เมื่อนำข้อมูลมาวาดกราฟ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและจำนวนรอบ (S-N curve) แสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

No.	Load (N)	Endurance (n)	Stress (MPa)	Failure
1	200	13,213	477.40	หัก
2	180	18,201	429.66	หัก
3	160	23,673	381.92	หัก
4	140	43,537	334.18	หัก
5	120	109,112	286.44	หัก
6	100	129,445	238.70	หัก
7	80	401,674	190.96	หัก



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและจำนวนรอบ (S-N curve)

4.3 ร่องรอยความเสียหายของชิ้นทดสอบความล้าแบบตัดปลาย

ลักษณะร่องรอยความเสียหายของชิ้นทดสอบความล้าแบบตัดปลายของเหล็กกล้า S45C ของตัวอย่างชิ้นทดสอบ จำนวน 3 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 4.2-4.10 ชิ้นทดสอบจะเกิดจุดบกพร่องขึ้นที่ผิวโดยรอบของรอยแตกหัก จากนั้นจุดบกพร่องหรือร่องรอยความเสียหายนี้จะขยายใหญ่ขึ้นจนกระทั่งทำให้ชิ้นทดสอบก็เกิดความเสียหายจากการแตกหัก



รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบที่ 1 น้ำหนักที่กระทำ 80 N จำนวนรอบ 401,674 รอบ

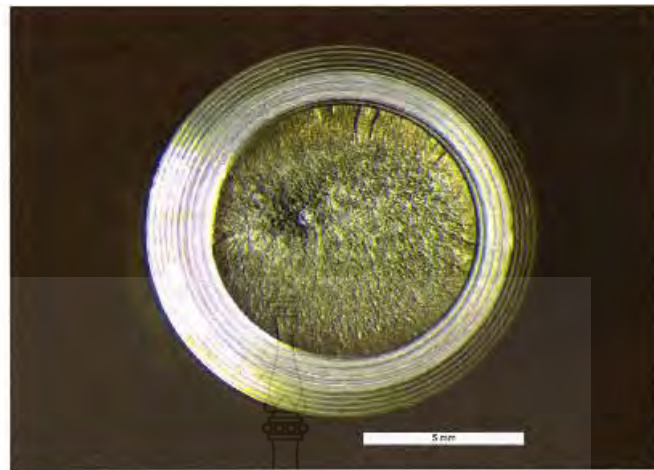
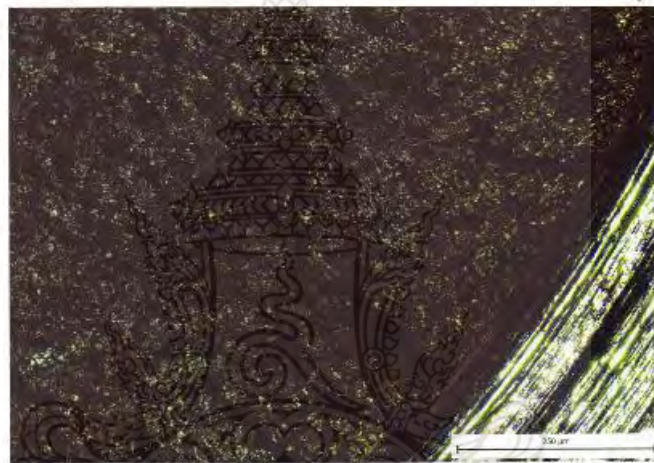


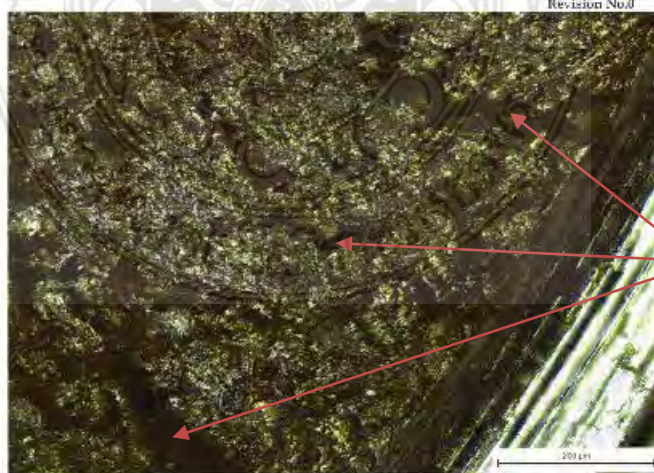
Fig. 1



Magnification 50X

Fig. 2

รูปที่ 4.3 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 1 และ Fig 2 ของชิ้นทดสอบที่ 1



Revision No.0

Magnification 100X

Fig. 3

รอยแตก

รูปที่ 4.4 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 3 ของชิ้นทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.5 ชั้นทดสอบที่ 2 น้ำหนักที่กระทำ 140 N จำนวนรอบ 43,537 รอบ

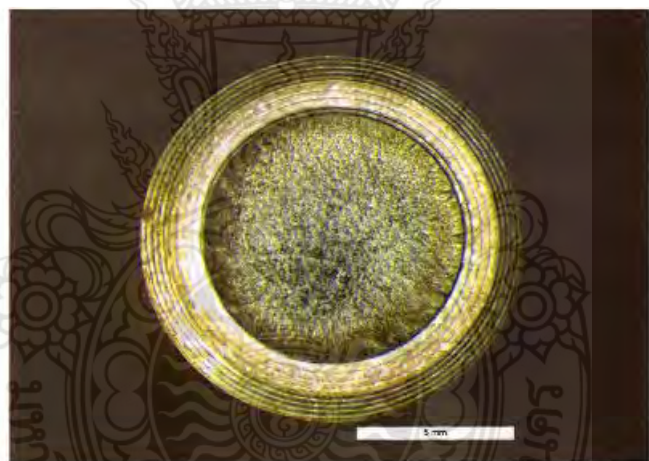
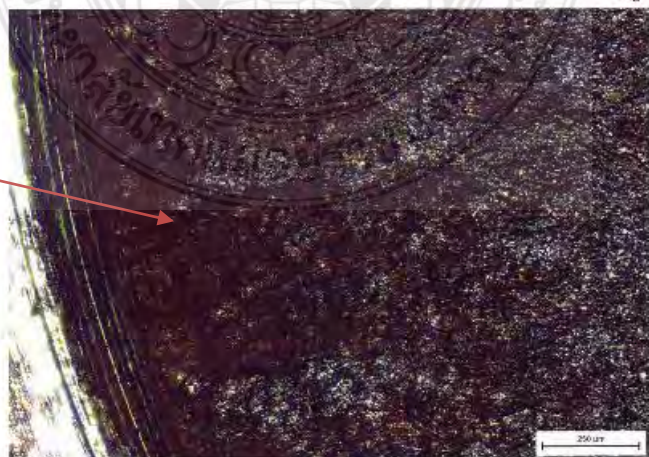


Fig. 1

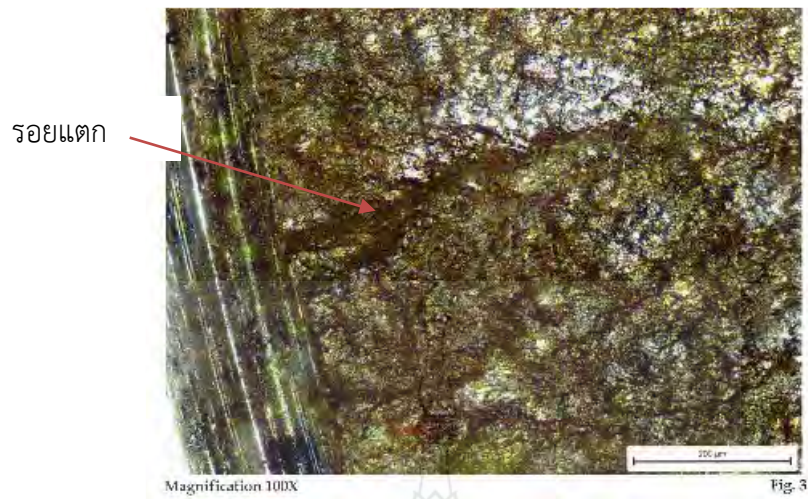
รอยแตก



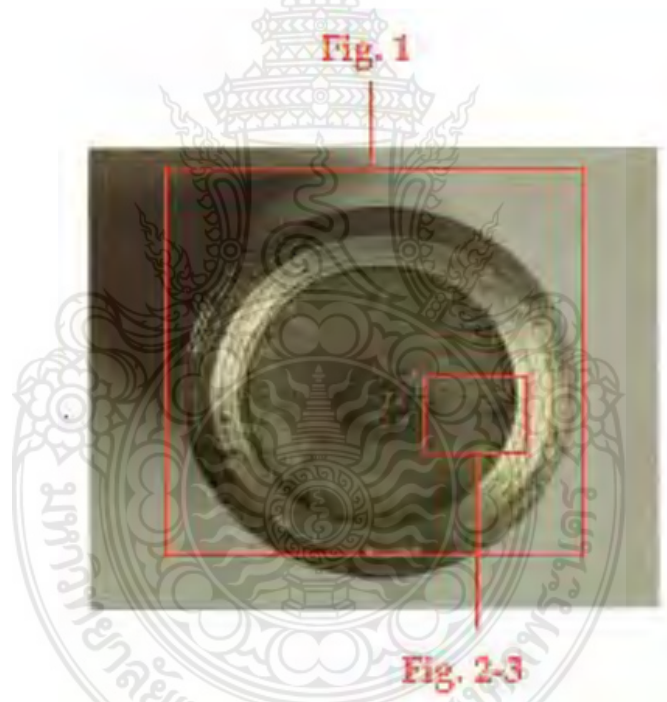
Magnification 50X

Fig. 2

รูปที่ 4.6 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 1 และ Fig 2 ของชั้นทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.7 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 3 ของชิ้นทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.8 ชิ้นทดสอบที่ 3 น้ำหนักที่กระทำ 200 N จำนวนรอบ 13,213 รอบ

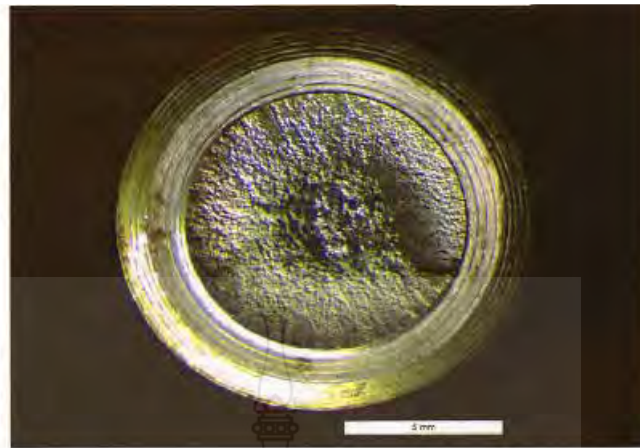
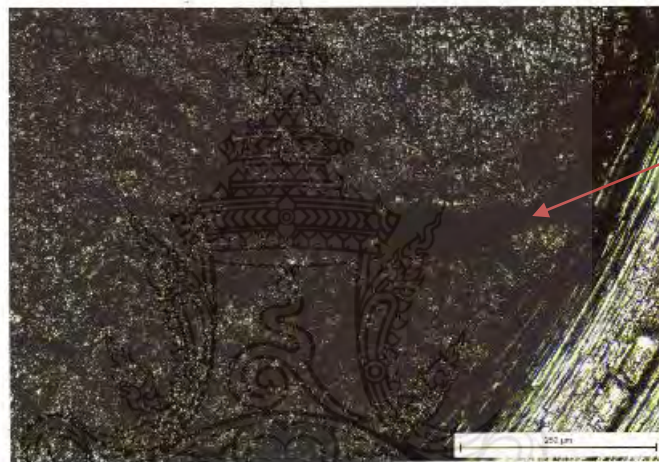


Fig. 1



รอยแตก

Magnification 50X

Fig. 2

รูปที่ 4.9 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 1 และ Fig 2 ของชิ้นทดสอบที่ 3



รอยแตก

Magnification 100X

Fig. 3

รูปที่ 4.10 รูปขยายของร่องรอยความเสียหายของตำแหน่ง Fig 3 ของชิ้นทดสอบที่ 3

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัย

จากการทดสอบความล้าของวัสดุแบบใช้การหมุนตัดปลาย ได้ทำการทดสอบวัสดุโลหะชนิดเหล็ก S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน ขึ้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ใช้โมเมนต์ตัดที่แตกต่างกันในการทดสอบ โมเมนต์ตัดที่แตกต่างกันนี้เกิดจากกอน้ำหนักที่มีขนาดแตกต่างกันแล้วนำไปแขวนกับขึ้นทดสอบ จะพบว่าขนาดของโมเมนต์ตัดที่มากจะส่งผลต่อความล้าของขึ้นทดสอบ ทำให้ขึ้นทดสอบเกิดความเสียหายได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีค่าความเค้นดัดสูง และมีจำนวนรอบในการทำงานจะน้อย แต่ถ้าลดขนาดของโมเมนต์ตัดที่กระทำกับขึ้นทดสอบลง โดยลดจำนวนน้ำหนักถ่วงให้น้อยลง จะทำให้ค่าโมเมนต์ตัดที่กระทำกับขึ้นทดสอบลดลง และจำนวนรอบหรืออายุการใช้งานจะเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าขนาดของโมเมนต์ตัดมีผลต่อความล้าของวัสดุซึ่งเหล็ก S45C ถ้านำไปออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่อยู่ภายใต้ความล้าแบบดัด จะต้องให้ค่าความเค้นน้อย ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนี้ไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าแบบหมุนตัด และลักษณะร่องรอยความเสียหายของขึ้นทดสอบจะเกิดจุดบกพร่องขึ้นที่ผิว จากนั้นจุดบกพร่องหรือร่องรอยความเสียหายนี้จะขยายใหญ่ขึ้นจนกระทั่งขึ้นทดสอบก็จะเกิดความเสียหายจากการแตกหัก ดังนั้นในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องอยู่ภายใต้ความล้าเนื่องจากโมเมนต์ดัด จะต้องไม่ให้มีโมเมนต์ดัดที่กระทำกับชิ้นส่วนมากเกินไป เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากความล้าจากการหมุนตัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบความล้าแบบหมุนตัดต่อไป อาจทำการทดสอบด้วยขึ้นทดสอบที่มีค่าความหยาบผิวที่แตกต่างกันหรือทำการทดสอบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบดังกล่าว ว่ามีผลต่ออายุการใช้งานของขึ้นทดสอบหรือไม่

บรรณานุกรม

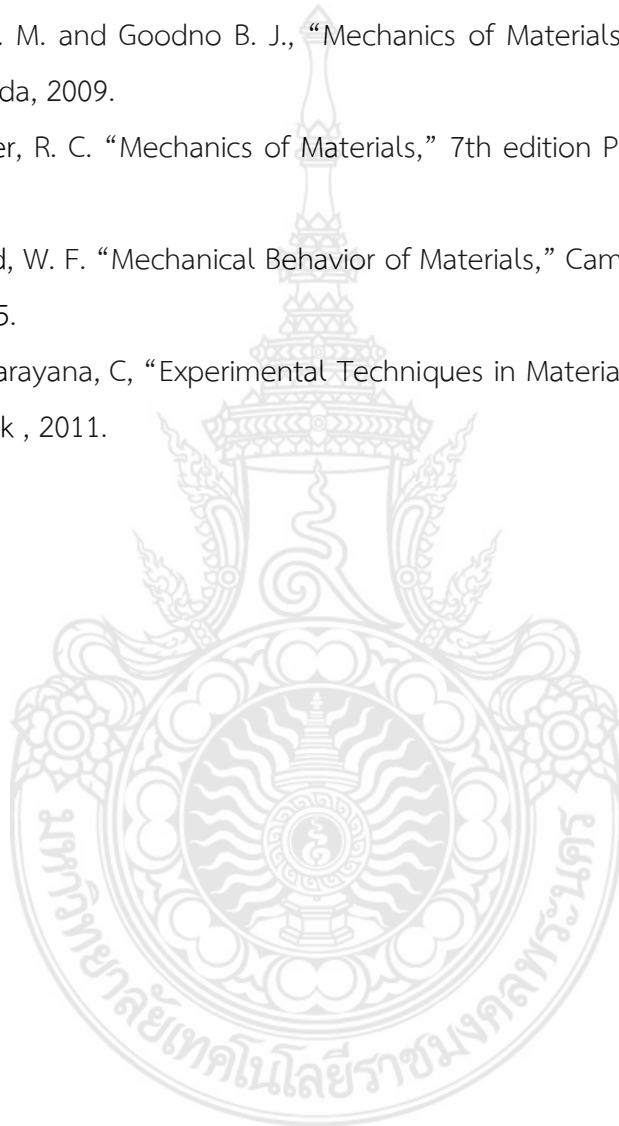
สิทธิชัย แสงอาทิตย์. การทดสอบวัสดุ: บรรยาย (Material Testing: Lecture). เอกสารประกอบการสอนวิชาการทดสอบวัสดุ (Material Testing). สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2545.

Gere, J. M. and Goodno B. J., “Mechanics of Materials,” 7th edition Cengage Learning: Canada, 2009.

Hibbeler, R. C. “Mechanics of Materials,” 7th edition Prentice Hall: Singapore, 2008.

Hosford, W. F. “Mechanical Behavior of Materials,” Cambridge University Press: New York, 2005.

Suryanarayana, C, “Experimental Techniques in Materials and Mechanics” CRC Press, New York , 2011.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายงานการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า S45C





LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
 299 Moo 2, Suksawad Road, Naikhlongbangplakot, Phra Samut Chedi,
 Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
 www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Chemical Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร Page 1 of 1
 Address : Report No. CH-20-11-047
 Revision No. 0

Test Product	LOAD 80N CYLES 401,674	Material Characterization	N/A
Project Name	N/A	Test Method	JIS G1253 : 2013
Project No.	N/A	Standard of Test	N/A
Material Specification	N/A	Equipment / Serial No.	ARL Optical Emission Spectrometer Model 3460
Dimension	N/A	Characterization	Normal and free from defect on the surface
Date Received	20 November 2020	Ambient Temperature	24.0 °C
Date Tested	25 November 2020	Relative Humidity	40 %RH

Item No.	Test No.	Chemical Analysis (%)														Remark
		C	Mn	Si	P	S*	Ni*	Cr	Cu	Mo*	V*	Ti	Al*	W*	As*	
1	4251/20 CH	0.44510	0.61071	0.23696	0.01833	0.00326	0.00722	0.02862	0.01201	0.00016	0.00054	0.00224	0.00182	0.00170	0.00418	
		Sn*	Co*	Pb*	B	Bi*	Ca*	Zn*	N*							
		0.00187	0.00253	0.00070	0.00160	0.00017	0.00105	0.00047	0.03476							

Additional details : -

The expanded uncertainty reported is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor, provide a confidential reveal of approximately 95%

** Not TISI Accredited

Reported by : *Jantarat Konggapee*
 (Miss.Jantarat Konggapee)
 Laboratory Manager
 Date *26/11/20*

Approved by : *Pavaret Preedawiphat*
 (Mr.Pavaret Preedawiphat)
 Director
 Date *26/11/20*

- Notes** 1. The above results are valid exclusively for tested samples as mentioned in this report.
 2. Partial publicity of the results on testing is prohibited without the written permission from LPN MRC LABORATORY.
 3. This report shall not be reproduced in whole or in part without the written approval of LPN MRC LABORATORY.



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
 299 Moo 2, Suksawad Road, Naiklongbangplakot, Phra Samut Chedi,
 Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
 www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Chemical Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Page 1 of 1

Address :

Report No. CH-20-11-048

Revision No. 0

Test Product	LOAD 140N CYLES 43,537	Material Characterization	N/A
Project Name	N/A	Test Method	JIS G1253 : 2013
Project No.	N/A	Standard of Test	N/A
Material Specification	N/A	Equipment / Serial No.	ARL Optical Emission Spectrometer Model 3460
Dimension	N/A	Characterization	Normal and free from defect on the surface
Date Received	20 November 2020	Ambient Temperature	24.0 °C
Date Tested	25 November 2020	Relative Humidity	40 %RH

Item No.	Test No.	Chemical Analysis (%)														Remark
		C	Mn	Si	P	S*	Ni*	Cr	Cu	Mo*	V*	Ti	Al*	W*	As*	
1	4252/20 CH	0.43624	0.60738	0.23448	0.01693	0.00238	0.00783	0.02907	0.01195	0.00025	0.00048	0.00218	0.00176	0.00152	0.00428	
		Sn*	Co*	Pb*	B	Ca*	Zn*	N*								
		0.00206	0.00251	0.00028	0.00161	0.00133	0.00049	0.01482								

Additional details : -

The expanded uncertainty reported is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor, provide a confidential reveal of approximately 95%

** Not TISI Accredited*

Reported by : *Jantararat Konggapee*

(Miss.Jantararat Konggapee)

Laboratory Manager

Date 26/11/20

Approved by : *Pavaret Preedawiphat*

(Mr.Pavaret Preedawiphat)

Director

Date 26/11/20

Notes 1. The above results are valid exclusively for tested samples as mentioned in this report.

2. Partial publicity of the results on testing is prohibited without the written permission from LPN MRC LABORATORY.

3. This report shall not be reproduced in whole or in part without the written approval of LPN MRC LABORATORY.



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
 299 Moo 2, Suksawad Road, Naiklongbangplakot, Phra Samut Chedi,
 Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
 www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Chemical Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 Address :

Page 1 of 1
 Report No. CH-20-11-049
 Revision No. 0

Test Product	LOAD 200N CYLES 13,213	Material Characterization	N/A
Project Name	N/A	Test Method	JIS G1253 : 2013
Project No.	N/A	Standard of Test	N/A
Material Specification	N/A	Equipment / Serial No.	ARL Optical Emission Spectrometer Model 3460
Dimension	N/A	Characterization	Normal and free from defect on the surface
Date Received	20 November 2020	Ambient Temperature	24.0 °C
Date Tested	25 November 2020	Relative Humidity	40 %RH

Item No.	Test No.	Chemical Analysis (%)														Remark
		C	Mn	Si	P	S*	Ni*	Cr	Cu	Mo*	Ti	Al*	W*	As*	Sn*	
1	4253/20 CH	0.44279	0.65987	0.26276	0.01788	0.01175	0.00749	0.02750	0.01064	0.00015	0.00180	0.00136	0.00116	0.00370	0.00194	
		Co*	B	Ca*	Zn*	N*										
		0.00233	0.00151	0.00096	0.00045	0.73680										

Additional details : -

The expanded uncertainty reported is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor, provide a confidential reveal of approximately 95%

** Not TISI Accredited

Reported by : 

(Miss.Jantar Konggapee)

Laboratory Manager

Date 26/11/20

Approved by : 

(Mr.Pavaret Freedawiphat)

Director

Date 26/11/20


Notes 1. The above results are valid exclusively for tested samples as mentioned in this report.

2. Partial publicity of the results on testing is prohibited without the written permission from LPN MRC LABORATORY.

3. This report shall not be reproduced in whole or in part without the written approval of LPN MRC LABORATORY.

ISO/IEC 17025 Accredited Laboratory

F-PIM-002/7 V0, 19 มกราคม 2552



ภาคผนวก ข

ลักษณะความเสียหายจากความล้มเนื่องจากการตัดปลายของเหล็กกล้า S45C



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
 299 Moo 2, Suksawad Road, Naiklongbangplakot, Phra Samut Chedi,
 Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
 www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Page 1 of 3

Address :

Report No. MI-20-11-015

Revision No.0

Test Product	LOAD 80N CYCLES 401,674	Material Characterization	N/A
Test No.	4251/20 MI	Test Method	ASTM E407-07
Project Name	N/A	Standard of Test	N/A
Project No.	N/A	Etchant Reagent	N/A
Material Specification	N/A	Temperature	Room temperature
Dimension	N/A	Time of Etching	10 Seconds
Date Received	21 November 2020	Surface Preparation	Polishing with sand paper 240, 400, 600, 1000, 1200, 2000, 1 µm Diamond paste
Date Tested	24 November 2020		

Test Location:

Fig. 1



Fig. 2-3

Additional details :

Reported by : *Jantarat*
 (Miss. Jantarat Konggapee)
 Laboratory Manager
 Date : 26/11/20

Approved by : *Pavaret*
 (Mr. Pavaret Preechawiphat)
 LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER
 Director
 Date : 26/11/20

Notes

1. The above results are valid exclusively for tested samples as mentioned in this report.
2. Partial publicity of the results on testing is prohibited without the written permission from LPN LABORATORY.
3. This report shall not be reproduced in whole or in part without the written approval of LPN LABORATORY.



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
299 Moo 2, Suksawad Road, Naikhlongbangplakot, Phra Samut Chedi,
Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Page 2 of 3

Address :

Report No. MI-20-11-015

Revision No.0

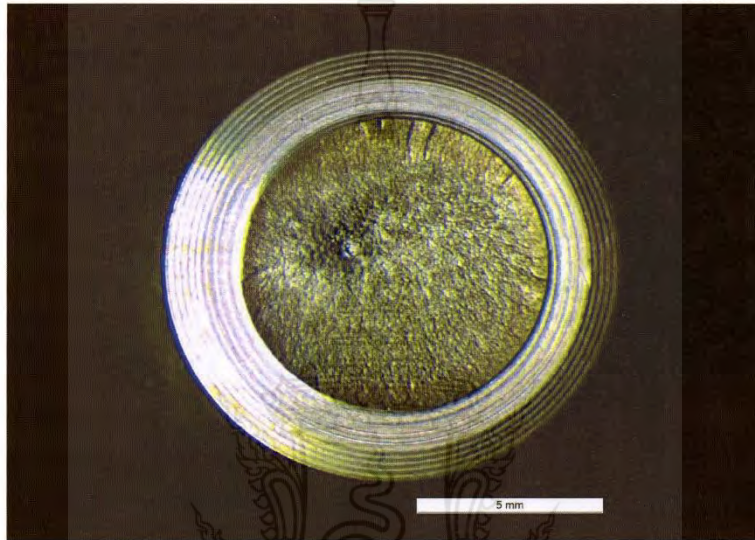


Fig. 1

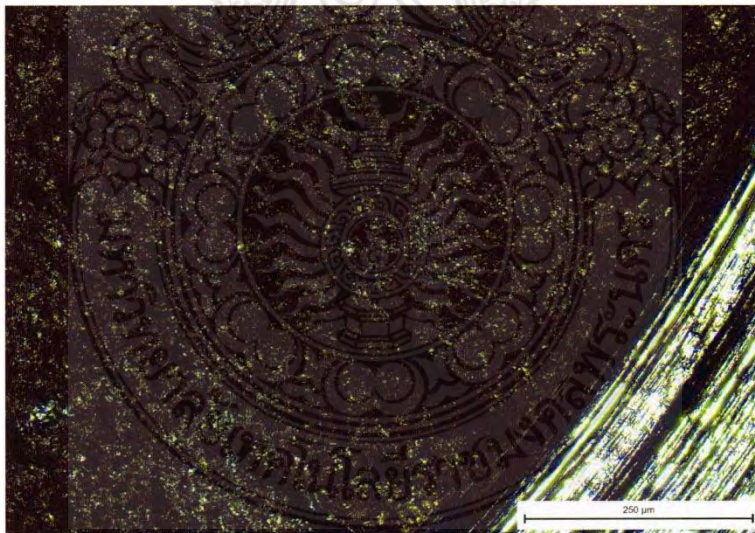


Fig. 2

Magnification 50X

F-WTM-030,V1.12/06/53



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
 299 Moo 2, Suksawad Road, Naiklongbangplakot, Phra Samut Chedi,
 Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
 www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

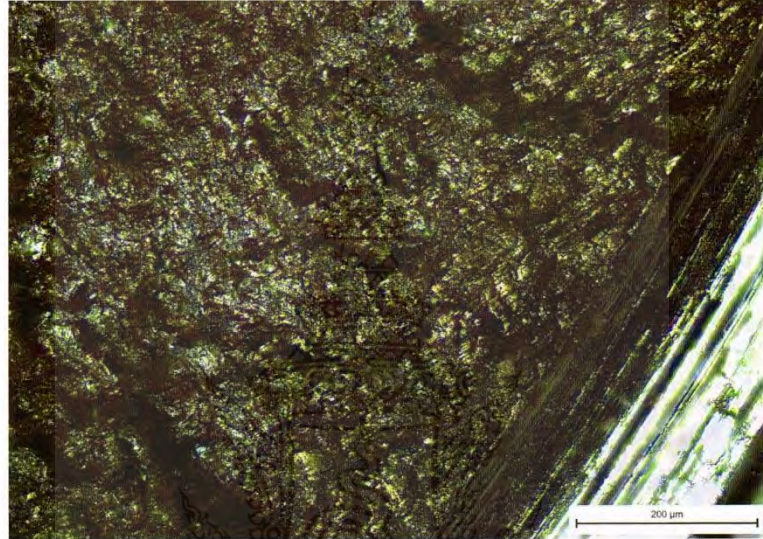
Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Page 3 of 3

Address :

Report No. MI-20-11-015

Revision No.0



Magnification 100X

Fig. 3



F-WTM-030,V1 12/06/53



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
 299 Moo 2, Suksawad Road, Naikhlongbangplakot, Phra Samut Chedi,
 Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
 www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Page 1 of 3

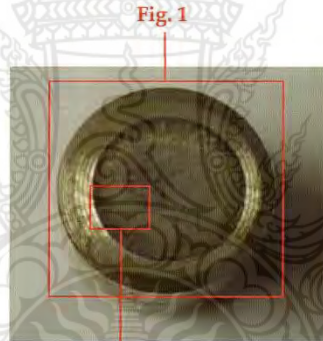
Address :

Report No. MI-20-11-016


Revision No.0

Test Product	LOAD 140N CYCLES 43,537	Material Characterization	N/A
Test No.	4252/20 MI	Test Method	ASTM E407-07
Project Name	N/A	Standard of Test	N/A
Project No.	N/A	Etchant Reagent	N/A
Material Specification	N/A	Temperature	Room temperature
Dimension	N/A	Time of Etching	10 Seconds
Date Received	21 November 2020	Surface Preparation	Polishing with sand paper 240, 400, 600, 1000, 1200,2000,1 µm Diamond paste
Date Tested	24 November 2020		

Test Location:



Additional details :

Reported by : 
 (Miss. Jantarat Konggaee)
 Laboratory Manager
 Date : 26/11/20

Approved by : 
 (Mr. Pavaret Preecdawiphath)
 LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER
 Director
 Date : 26/11/20

- Notes**
1. The above results are valid exclusively for tested samples as mentioned in this report.
 2. Partial publicity of the results on testing is prohibited without the written permission from LPN LABORATORY.
 3. This report shall not be reproduced in whole or in part without the written approval of LPN LABORATORY.



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
299 Moo 2, Suksawad Road, Naikhlongbangplakot, Phra Samut Chedi,
Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
Address :

Page 2 of 3
Report No. MI-20-11-016
Revision No.0

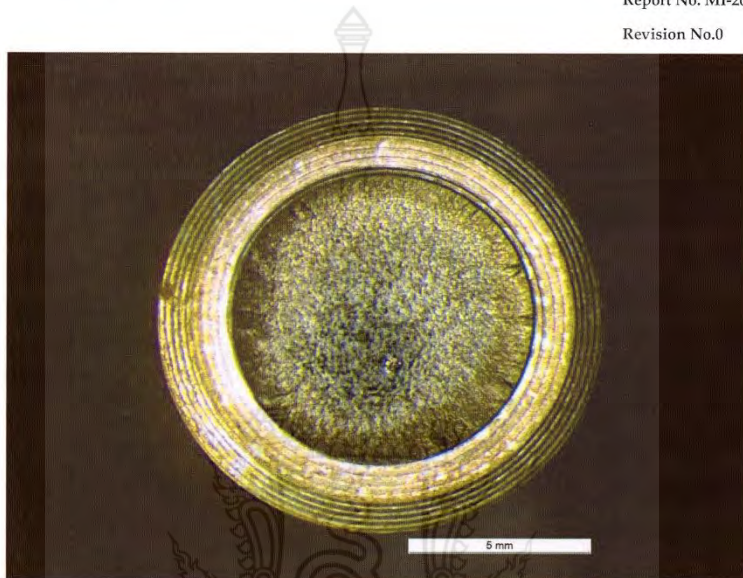
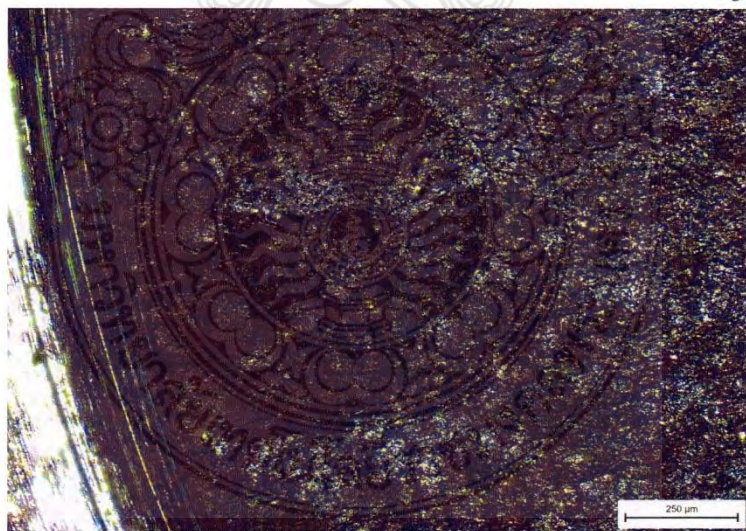


Fig. 1



Magnification 50X

Fig. 2

F-WTM-030,V1 12/06/53



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
 299 Moo 2, Suksawad Road, Naikhlongbangplakot, Phra Samut Chedi,
 Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
 www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

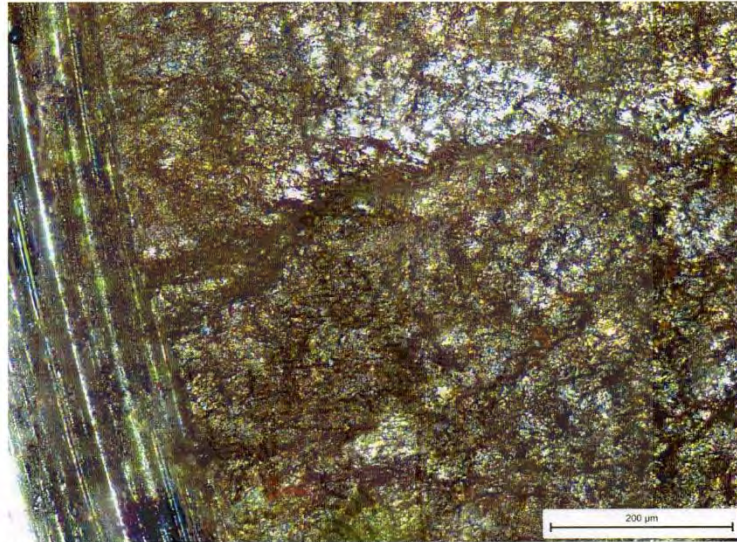
Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Page 3 of 3

Address :

Report No. MI-20-11-016

Revision No.0



Magnification 100X

Fig. 3



F-WTM-030,V1 12/06/53



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
 299 Moo 2, Suksawad Road, Naiklongbangplakot, Phra Samut Chedi,
 Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
 www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Page 1 of 3

Address :

Report No. MI-20-11-017

Revision No.0

Test Product	LOAD 200N CYCLES 13,213	Material Characterization	N/A
Test No.	4253/20 MI	Test Method	ASTM E407-07
Project Name	N/A	Standard of Test	N/A
Project No.	N/A	Etchant Reagent	N/A
Material Specification	N/A	Temperature	Room temperature
Dimension	N/A	Time of Etching	10 Seconds
Date Received	21 November 2020	Surface Preparation	Polishing with sand paper 240, 400, 600, 1000, 1200,2000,1 μm Diamond paste
Date Tested	24 November 2020		


Test Location:


Fig. 1



Fig. 2-3

Additional details :

Reported by : 
 (Miss. Jantarat Konggapee)
 Laboratory Manager
 Date : 26/11/20

Approved by : 
 (Mr. Pavaret Preedawiphat)
 Director
 Date : 26/11/20

Notes

1. The above results are valid exclusively for tested samples as mentioned in this report.
2. Partial publicity of the results on testing is prohibited without the written permission from LPN LABORATORY.
3. This report shall not be reproduced in whole or in part without the written approval of LPN LABORATORY.



LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
299 Moo 2, Suksawad Road, Naiklongbangplakot, Phra Samut Chedi,
Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Page 2 of 3

Address :

Report No. MI-20-11-017

Revision No.0

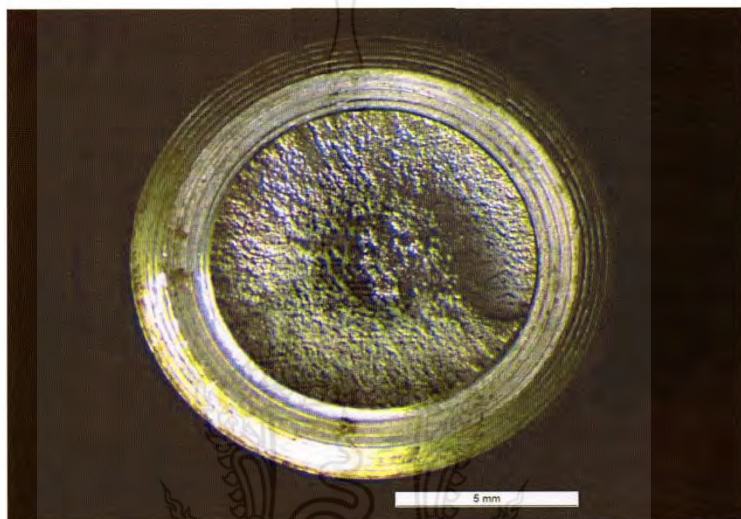
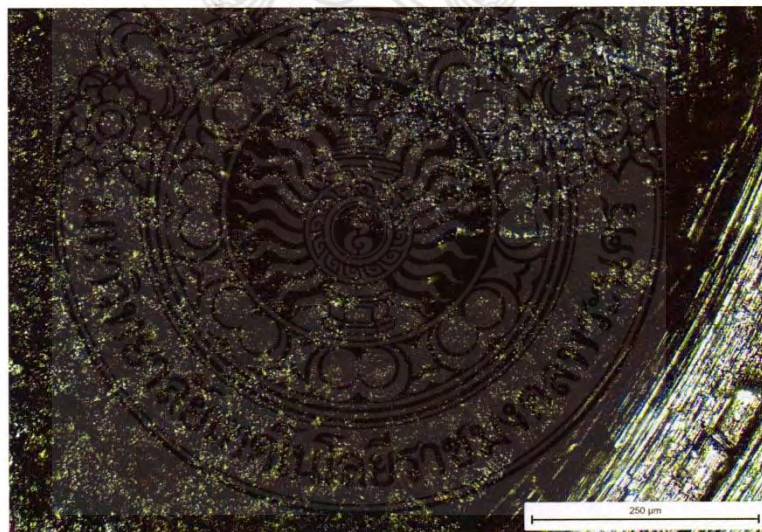


Fig. 1



Magnification 50X

Fig. 2

F-WTM-030,V1 12/06/53



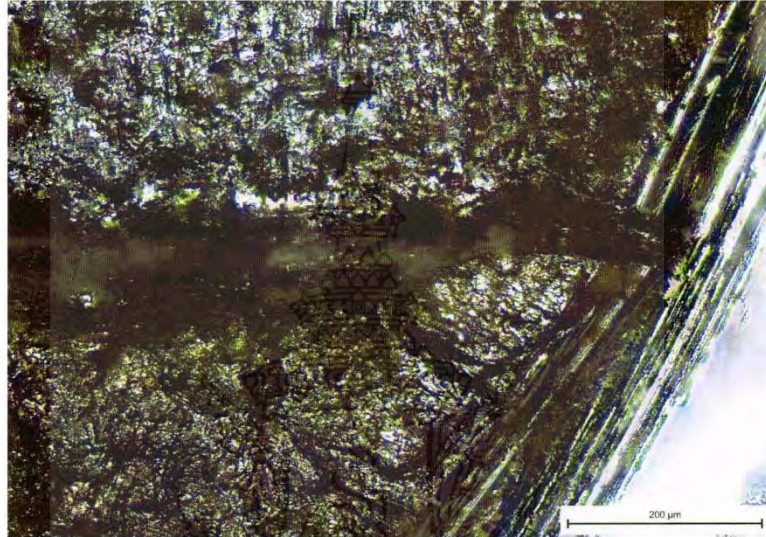
LPN METALLURGICAL RESEARCH CENTER (THAILAND) CO., LTD.
299 Moo 2, Suksawad Road, Naikhlongbangplakot, Phra Samut Chedi,
Samut Prakan 10290 Thailand Tel. +66 2 815 4118-9, Fax. +66 2 815 4120
www.lpnmrc.co.th, E-mail : lpnmrc@lpnmrc.co.th



Microstructure Analysis Report

Customer : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
Address :

Page 3 of 3
Report No. MI-20-11-017
Revision No.0



Magnification 100X

Fig. 3



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน
(ภาษาอังกฤษ) MR. PRASERT WIROTCHEEWAN

วัน เดือน ปีเกิด -19 กันยายน 2508

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10800

โทรศัพท์.028363000

e-mail address : prasertwirot@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาเอก	ปร.ด. (วิศวกรรมอุตสาหการ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2554
ปริญญาโท	วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2539
ปริญญาตรี	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล	2537
ปริญญาตรี	ค.อ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2531