



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาอนุภาคสารปนเปื้อนและสารหล่อลื่น
เพื่อประเมินสภาพเครื่องจักรกลหนักแบบสมบูรณ์

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล ราชภูริคุ้ม

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษานโยบายสารปนเปื้อนและสารหล่อลื่น
เพื่อประเมินสภาพเครื่องจักรรถหนักแบบสมบูรณ์

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. ชูพล ราชภูริ์นัย

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Abstract

Project Code: PDF/44/2541

Project Title: TOTAL EVALUATION OF HEAVY
MACHINERY CONDITIONS THROUGH CONTAMINANT
AND USED OIL PROPERTIES

Investigator: Associate Professor Surapol RAADNUI (Ph.D.)

E-mail Address: srr@kmitnb.ac.th

Project Period: 2 Years

Wear of machinery, earth moving vehicles in this particular work, is an anticipated consequence of surface contact between interacting engines' parts such as shafts, bearings, gears and bushings which occurs even in properly lubricated systems. As component loading, system investments and maintenance cost have risen, so that the need for highly reliable and longlasting systems has become very important. Engine condition evaluation techniques utilizing used oil/wear debris/contaminant analysis are highlighted. The most important aspects research carried out in this work were: multivariate monitoring chart for used oil analysis results' assessment, Filter Debris Analysis (FDA), Failure Root Cause Analysis (FRCA).

Keywords: Used Oil Analysis, Wear Debris, Contaminant

การศึกษาอนุภาคสารปนเปื้อนและสารหล่อลื่นเพื่อประเมินสภาพเครื่องจักรกลหนักแบบสมบูรณ์

การสึกหรอของเครื่องจักร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเครื่องจักรหนักงานดินเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการสึกหรอที่บริเวณจุดสัมผัสของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่มีการเคลื่อนที่เช่น เพลา รอกเลื่อน ฟันเฟือง หรือลูกสูบแบบต่างๆ โดยที่ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการหรือชนิดของสารหล่อลื่นที่ดีเพียงใดก็ตาม อนึ่งจากการที่ภาระการใช้งาน ราคาของเครื่องจักร เครื่องยนต์และค่าใช้จ่ายในการซ่อมและบำรุงรักษาที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบเครื่องจักรกลหนักที่มีความน่าเชื่อถือสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าในอดีต เทคนิคในการประเมินสภาพเครื่องยนต์ของเครื่องจักรกลหนักโดยวิธีการวิเคราะห์สารหล่อลื่น การวิเคราะห์สิ่งสกปรก การวิเคราะห์เศษโลหะจากการสึกหรอเพื่อทำการประเมินสภาพเครื่องยนต์ได้ถูกดำเนินการวิจัยอย่างเป็นระบบ โดยหลักการสำคัญที่ได้ทำการวิจัยและพัฒนาขึ้นคือ แผนภูมิการติดตามสภาพน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ชนิดหลายตัวแปร การวิเคราะห์ไส้กรองน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและการวิเคราะห์หารากของสาเหตุการชำรุดอย่างเป็นระบบ

คำหลัก : การวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว การวิเคราะห์เศษโลหะและสิ่งสกปรก

จุดเริ่มต้นหรือที่มาของผลงานวิจัย/พัฒนา

เนื่องจากการที่ในปัจจุบันนี้การทำการติดตามสภาพเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์โดยการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นยังไม่แพร่หลายในประเทศไทยมากนัก และผู้ที่มีความรู้ทางด้านนี้ยังมีไม่มากนัก นอกเหนือไปจากนั้นในประเทศต่างๆทั่วโลกก็ยังมีผู้เชี่ยวชาญในงานทางด้านนี้น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาอื่นๆ ดังนั้นปัจจุบันนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยนั้นก็ยังไม่สามารถนำเอาเทคโนโลยีในการติดตามสภาพเครื่องยนต์เพื่อทำการประเมินสภาพเครื่องจักร/เครื่องยนต์มาใช้ประโยชน์อย่างสูงสุดได้

จากการค้นคว้าข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง [1] มีการรวบรวมข้อมูลไว้ว่าแต่ละประเทศนั้นแม้ว่าจะเป็นประเทศที่พัฒนาแล้วก็ตามนั้น อย่างน้อย 10% ของผลผลิตมวลรวมประชาชาติ (GROSS NATIONAL PRODUCT: GNP) จะต้องใช้ไปสำหรับการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล/อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต ซึ่งจากหลักฐานดังกล่าวนี้เป็นตัวเลขที่สามารถทำให้ประเมินได้อย่างหยาบ ๆ ว่าประเทศต่าง ๆ ต้องสูญเสียเงินตราอย่างมหาศาลในการซ่อมเครื่องจักร ซึ่งนักวิชาการการซ่อมบำรุงได้เล็งเห็นความสำคัญในด้านนี้จึงได้เร่งพัฒนาศาสตร์ในด้านการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วเพื่อนำเอาผลการวิเคราะห์นั้นมาทำการประเมินสภาพของเครื่องจักร/เครื่องยนต์ในแง่ของการ "พยากรณ์" แทนที่จะรอให้เครื่องจักรชำรุดแล้วค่อยดำเนินการแก้ไข ข้อดีของการดำเนินการในเชิงพยากรณ์คือ

- คาดคะเนเวลาก่อนที่เครื่องจักรจะชำรุดได้โดยประมาณ
- คาดคะเนได้ว่าชิ้นส่วนใดกำลังจะชำรุด ซึ่งจะทำได้สามารถจัดเตรียมอะไหล่สำหรับการซ่อมได้ก่อนข้างถูกต้องและมีหลักการ
- จัดเตรียมวางแผนการใช้ทรัพยากรในการซ่อมได้อย่างมีระบบ (แรงงาน-เครื่องมือ-งบประมาณ-วิธีการ-อะไหล่)
- สามารถทำการดำเนินการต่างๆ โดยจัดกับแผนการผลิตน้อยที่สุด
- หลีกเลี่ยงการชำรุดอย่างต่อเนื่องโดยเปรียบได้กับ "การตัดไฟเสียแต่ต้นลม"
- สามารถหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุในบางกรณีของการทำงานกับระบบที่เกี่ยวข้องหรือมีผลอย่างมากต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ควบคุมเครื่องจักรหรือผู้โดยสาร เช่น ในอากาศยาน เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยหน่วยงานที่ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการใช้เทคโนโลยีทางด้านการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วของรถชนแร็กไนค์ที่เป็นรถขนส่งขนาดใหญ่ในราคาคันละประมาณ 15 ล้านบาทที่มีใช้อยู่ในการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่เหมืองแม่เมาะเป็นจำนวน 45 คัน ซึ่งหากว่าไม่ดำเนินการการซ่อมบำรุงในลักษณะของการพยากรณ์การบำรุงรักษาแล้วนั้น งบประมาณและการจัดสรรวางแผนทรัพยากร ในการซ่อมบำรุงแทบที่จะเป็นไปได้เลย และผลร้ายที่สุดที่จะเกิด

ขึ้นกับประเทศโดยส่วนรวมก็คือการที่โรงไฟฟ้าไม่สามารถดำเนินการผลิตไฟฟ้าได้เนื่องจากการขาดแร่ลิกไนต์และจะทำให้สูญเสียเป็นอย่างมากต่อประเทศโดยส่วนรวม

แม้ว่าในปัจจุบันการไฟฟ้าฝ่ายผลิตจะสามารถใช้ประโยชน์จากการนำผลการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นมาใช้ประโยชน์แล้วก็ตาม แต่การนำผลการวิเคราะห์น้ำมันมาแสดงผลและวิเคราะห์ในรูปแบบของแผนภูมินั้นนับว่ายังไม่เหมาะสมและมักจะใช้ประสบการณ์ในการแปลความหมายและนำเอาข้อมูลที่มีอยู่ในคู่มือหรือที่มีการให้ข้อมูลสืบต่อกันมาจากวิศวกรในอดีต ซึ่งสิ่งเหล่านี้ยังต้องการการศึกษาวิจัยอย่างมีระบบเพื่อที่จะสามารถทำให้ได้วิธีการนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่สามารถทำให้เป็นการง่ายต่อผู้วิเคราะห์, ต้องเป็นแผนภูมิที่ง่ายต่อความเข้าใจในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร, ต้องสามารถแสดงผลการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ได้มากกว่า 3 ตัวแปรในแผนภูมิเดียวกัน, ต้องเป็นแผนภูมิที่ประหยัดเนื้อที่การใช้กระดาษและเนื้อที่ในเครื่องประมวลผล (คอมพิวเตอร์) และต้องสามารถนำเอาแผนภูมิดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ได้กับผลการวิเคราะห์สภาพเครื่องจักรเชิงพยากรณ์ในรูปแบบอื่นๆ ได้เช่นผลการวิเคราะห์สัญญาณความสั่นสะเทือน (Vibration Analyzer) หรือการวิเคราะห์ความสกปรกในน้ำมัน (Contamination Control) เป็นต้น

โดยสรุปนั้นจะเห็นได้ว่าผู้วิจัยมีความต้องการจะนำเอาผลของการวิเคราะห์สภาพน้ำมันที่จะเรียกว่า "ข้อมูลดิบ" เพื่อนำมาประเมินผลและสร้างแผนภูมิที่ใช้ในการติดตามสภาพเครื่องจักร/เครื่องยนต์ โดยที่หวังว่าจะได้ประโยชน์สูงสุดในแต่ละอย่าง ๆ ต่อไปนี้

- การแปลผลจากแผนภูมิที่มีการสังเกตได้ง่าย ๆ ถึงแนวโน้มการชำรุด
- การคาดคะเนถึงสาเหตุของการชำรุดจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่สามารถมองเห็นจากแผนภูมิ
- ลดเนื้อที่หรือทรัพยากรที่ต้องใช้ในการนำเสนอแผนภูมิ
- สร้างความเข้าใจพื้นฐานสำหรับเป็นแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ต่อเครื่องจักรกลต่างในอนาคต เพื่อทำให้มีการลดต้นทุนในส่วนของการผลิตลง

วัตถุประสงค์ของโครงการ

- สร้างแผนภูมิตดตามสภาพเครื่องจักรในการบันทึกผลการวิเคราะห์น้ำมันชนิดหลายตัวแปร
- วิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะการกระจายทางสถิติและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษา
- พัฒนาแผนภูมิชนิดหลายตัวแปรเพื่อใช้เป็นต้นแบบของแผนภูมิสำหรับการแสดงผลจากการวัดค่าสำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการพยากรณ์การบำรุงรักษาด้วยวิธีอื่น ๆ

ภูมิหลังของวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับผลงานวิจัย/พัฒนา

การใช้แผนภูมิเพื่อทำการแสดงผลการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในปัจจุบันยังไม่เคยมีการดำเนินการ ในลักษณะของแผนภูมิหลายตัวแปร (MULTIVARIATE MONITORING CHARTS) มาก่อนเลย ผลงานวิจัยที่สามารถอ้างอิงถึงได้ในกรณีของการใช้งานโดยทั่วไปในระดับนานาชาติจะเป็นเพียงลักษณะของแผนภูมิตดตามสภาพชนิดตัวแปรเดียว (UNIVARIATE MONITORING CHARTS) ได้แก่:

- Univariate Monitoring charts ของบริษัท BRITISH PETROLEUM [2]
- Histogram แสดงการกระจายของค่าข้อมูลดิบของ Dr. A.R. Massoudi [3]
- Univariate Monitoring charts ของกลุ่มงานวิจัยด้าน Wear Analysis ในประเทศเบลเยียม [4]
- การประยุกต์ใช้เทคนิคด้านการสร้างแผนภูมิควบคุมชนิดตัวแปรเดียวสำหรับผลการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นที่เคยถูกเสนอผลงานในการประชุมนานาชาติในประเทศสหรัฐอเมริกา [5]

จากการค้นคว้าตรวจสอบด้านเอกสารพบว่ายังไม่เคยมีการพิจารณาถึงการสร้างแผนภูมิตดตามสภาพแสดงผลการวิเคราะห์น้ำมันชนิดหลายตัวแปรมาก่อนเลย

ข้อเสียหรือข้อบกพร่องของผลงานอื่นๆที่มีข้อมูลในปัจจุบัน

1. ใช้เพียงตัวแปรหนึ่งตัวในแต่ละแผนภูมิทำให้:
 - สิ้นเปลืองเนื้อที่และทรัพยากร
 - ยากต่อการแปลความหมายเนื่องจากหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ยาก
 - ยุ่งยากต่อการแปลความหมาย
2. ไม่มีการวิเคราะห์ข้อมูลดิบอย่างเป็นระบบและนำเสนออย่างเหมาะสม

ผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดทำ/พัฒนาสร้างแผนภูมิที่มีการลดและการแก้ไขข้อบกพร่องของแผนภูมิแบบดั้งเดิมที่มีข้อมูลในการติดตามสภาพผลการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นดังนี้

- แสดงผลในแผนภูมิเดียวจากการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรหลายค่าโดยพล็อตเปรียบเทียบกันแกนเวลา
- ทำการวิเคราะห์ข้อมูลดิบอย่างมีระบบเพื่อหารูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลเพื่อสามารถทำให้หารูปแบบการกระจายตัวทางสถิติที่เหมาะสมแล้วนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการกระจายแต่ละแบบ แล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์มากำหนดเป็นช่วงต่างๆในแผนภูมิตดตามสภาพ
- สามารถแปลความหมายจากแผนภูมิได้ง่าย

- ลดปริมาณเนื้อที่ของทรัพยากรที่ต้องใช้ในการนำเสนอผลงาน
- นำแผนภูมิไปใช้ประโยชน์ต่อการแสดงผลจากการวิเคราะห์จากเครื่องมือแบบอื่นๆ ที่ใช้ในการทำการซ่อมบำรุงแบบการพยากรณ์

ผลงานวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นผลงานที่ได้ถูกนำไปใช้จริงๆ ในงานการประเมินสภาพเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ของรถขนแร่ขนาดใหญ่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และสามารถที่จะนำไปใช้ในการกิจการด้านการซ่อมบำรุงของเครื่องจักรที่ใช้สารหล่อลื่นใดๆก็ได้ เพียงแต่ต้องมีการบันทึกข้อมูลดิบอย่างมีระบบและต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าขอบเขตและรูปแบบของการกระจายตัวของข้อมูล ประโยชน์ที่จะได้รับจากการใช้นั้นทำให้สามารถประเมินสภาพเครื่องจักรได้อย่างสะดวกและง่ายต่อการเข้าใจโดยหลักการ "อาณาเขตของรูปกราฟยิ่งโตมากเท่าใด เครื่องจักรจะยิ่งมีสภาพที่เสื่อมหรือใกล้ที่จะชำรุดมากเท่านั้น" (THE BIGGER, THE WORSE OF MACHINE'S CONDITION)

คุณสมบัติเด่นของงานวิจัยการสร้างแผนภูมิติศตามสภาพเครื่องจักรจากการติดตามผลการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นคือ

- ยังไม่เคยมีการคิดค้นแผนภูมิในลักษณะนี้มาก่อน
- แปลผลและเข้าใจได้ง่าย
- ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ง่าย ในกรณีที่มีข้อมูลย้อนหลังไปในอดีต
- ใช้แผนภูมิเพียงแผนภูมิเดียวในการบันทึกค่าของตัวแปรหลายๆตัวใน การวัดค่าคราวเดียวกัน
- ประหยัดทรัพยากรในการนำเสนอผลการวิเคราะห์น้ำมัน
- สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการบันทึก-แสดงผล-วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในระบบการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ได้อีก

หลักการ วิธีการ และกรรมวิธี ของการวิจัย/พัฒนา

การจัดการระบบการทำการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ในเหมืองแม่เมาะที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในที่นี้ นั้น มีการทำการสุ่มตัวอย่างน้ำมันและมีการทำการวิเคราะห์น้ำมัน แต่ยังคงขาดรูปแบบการประเมินผล-แสดงผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสมและไม่ชัดเจน ดังนั้นในการวิจัยในที่นี้จึงต้องการที่จะทำการรวบรวมข้อมูลดิบ-แยกแยะประเภทของข้อมูล-การวิเคราะห์ข้อมูล-ประเมินผล-สร้างแผนภูมิติศหลายตัวแปรสำหรับรถบรรทุกขนส่งแร่ขนาดใหญ่จำนวน 45 คันของเหมืองแม่เมาะ โดยที่ต้องการจะนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลดิบมาเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตที่ระบุจากบริษัทผู้ผลิตรถดังกล่าวสำหรับช่วง/ขอบเขตที่จะยอมรับหรือไม่ยอมรับสภาพของน้ำมันหล่อลื่น

จากความรู้เบื้องต้นในงานการซ่อมบำรุงที่ว่า การที่จะมีระบบในเครื่องจักรกลใด ๆ ที่มีความน่าเชื่อถือ (RELIABILITY) ของระบบเครื่องจักรกลใด ๆ ให้มีค่าสูงๆ นั้นต้องมีปัจจัยหลัก ๆ ต่อไปนี้

- การออกแบบที่ดี
- การเลือกใช้วัสดุที่ดีมีคุณภาพ
- กระบวนการผลิตหรือกระบวนการประกอบที่ดี
- การใช้งานที่ถูกต้องวิธี
- การบำรุงรักษาที่ดีเหมาะสม
- ใช้งานภายใต้สภาพสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม

จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรในฝ่ายของผู้ใช้คือ การใช้งาน-การบำรุงรักษา-การควบคุมสภาพแวดล้อม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลดิบเพื่อทำการเปรียบเทียบหาข้อแตกต่างระหว่างค่าขอบเขตระบุจากบริษัทผู้ผลิตกับค่าที่ประเมินจากการทำงานจริง ๆ ในประเทศไทยที่เหมือนแม่เมาะ ขั้นตอนการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

- รวบรวมข้อมูล
- แยกแยะข้อมูล
- จัดรวบรวมเป็นฐานข้อมูลในรูปแบบของไฟล์ข้อมูลที่เหมาะสมต่อการประมวลผลซอฟต์แวร์ทางสถิติ
- ศึกษาการกระจายตัวของข้อมูลดิบ
- ทำนนวนหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรที่มีการวิเคราะห์
- นำตัวแปร-รูปแบบการกระจาย-พารามิเตอร์มาจัดสร้างแผนภูมิกฎเกณฑ์หลายตัวแปร
- ทดลองใช้ในการติดตามสภาพเครื่องจักร
- เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีการเดิมที่ใช้ใช้ในการ ไฟฟ้า
- ประเมินข้อดี-ข้อเสียของทั้งสองวิธี
- ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง
- จัดทำแผนภูมิเป็นรูปแบบมาตรฐาน
- นำไปใช้งานจริง
- จัดพิมพ์ผลงานวิจัย
- นำเสนอผลงานในที่ประชุมนานาชาติ
- นำเสนอผลงานต่อที่ประชุมผู้บริหารของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ประโยชน์ที่จะได้รับจากผลงานวิจัย และพัฒนา ที่ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคม ความมั่นคง และ การพัฒนาประเทศ

ประโยชน์ที่จะ ได้รับจากผลงานวิจัยคือ

- ลดโอกาสการเกิดการชำรุดอย่างฉุกเฉินของเครื่องยนต์รถยนต์ขนาดใหญ่
- ช่วยในการเพิ่มขีดความสามารถ/ความพร้อมใช้งาน/ความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร
- สนับสนุนการทำการซ่อมบำรุงแบบพยากรณ์ ซึ่งจะทำให้ค่าซ่อมบำรุงลดลง
- สร้างฐานความรู้ใหม่ให้กับวงการอุตสาหกรรม
- ลดการใช้ทรัพยากรในการนำเสนอผลการวิเคราะห์น้ำมัน
- ลดมลภาวะจากการที่เครื่องจักรจะเสื่อมโทรมหรือหกล้ม หากไม่มีการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์
- สามารถสนับสนุนให้การ ไฟฟ้ามีระบบการขนส่งแร่ที่มีความพร้อมใช้งานที่น่าเชื่อถือ และเป็นทางหนึ่งที่จะสนับสนุนไม่ให้มีการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าอย่างฉุกเฉิน

เอกสารอ้างอิง

1. OECD Glossary, 1965
2. Handbook for Lubricants' analysis, British Petroleum Co. Ltd., 1980
3. Contamination analysis, Proceeding of Condition Monitoring'91, Erding, Germany
4. Wear Analysis, Tribotesting Journal, March 1991
5. Statistical Quality Control techniques for Used oil analysis, Lubrication Engineering Journal, 1980

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (REPRINTS ตามแนบ)

- S. Raadnui, "Machinery health monitoring and maintenance tribology research at King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok", *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, 2003, vol. 8, No.1, pp. 135-145
- S. Raadnui, "Plain bearing used debris analysis", *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, 2002, vol. 7, Special Issue: SITC 2002, pp. 273-276
- S. Raadnui, "Worn surface evaluation", *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, 2002, vol. 7, Special Issue: SITC 2002, pp. 161-166

MACHINERY HEALTH MONITORING AND MAINTENANCE TRIBOLOGY RESEARCH AT KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK

S. RAADNUI*

Machinery Health Monitoring and Tribology Laboratory
Department of Production Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Pibulsongkram Road, Dusit, Bangkok, 10800, THAILAND
e-mail: srr@kmitnb.ac.th

The King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok (KMITNB), founded in 1959 with the support of the government of the Federal Republic of Germany, is one of the premier higher education institutions in Thailand with a strong base in applied sciences, technology and engineering. The faculty of engineering, the largest of the four faculties of the institute, was founded with an aim to provide a range of professional engineering education service to meet the community and industry at the early phase of industrialization in Thailand. The degrees were established to fill a need for better-educated engineers in the practice of engineering as well as in research and development.

The Machinery Health Monitoring and Tribology Laboratory (MHM and Tribo. Lab.) forms part of the Production Engineering Department, Faculty of Engineering. Currently, machinery health monitoring research is combined with tribology studies. In general terms, the current activities of the condition monitoring and tribology research group include:

- condition monitoring studies relating to oil and wear debris analysis,
- hydraulic failure studies as related to contaminants,
- routine oil, wear debris and contamination analysis for industry,
- developments of new and improved condition monitoring techniques, especially used oil, wear debris and contamination analysis,
- fundamental of friction, lubrication and wear studies,
- maintenance strategy studies for productivity improvement.

Key words: health monitoring, machinery, tribology.

1. Machinery health monitoring research

1.1. Multivariate monitoring chart for used oil analysis results assessment

Regular examination of the oil from an engine crankcase can give vital information on two quite different fronts. Firstly, simple routine tests for physical and chemical properties of the oil indicate whether or not it is fit to perform its function. Secondly, since mechanical wear is inherent in all engines with the generation of metallic particulate matter, examining of these suspended wear particles spectrographically or morphologically gives means of monitoring engine condition. As most used oil analysis data normally obey the normal distribution law, statistical parameters and control limits can be extracted which if exceeded suggest that the engine oil should be changed. The Utilizing of Upper and Lower Control Limit (UCL: mean value plus three standard deviations, LCL: mean value minus three standard deviations), multivariate monitoring chart can be established. Figs. 1 and 2 illustrate typical examples of these charts. As simple as in the implementation of statistical process control chart, once the value of parameter(s) reaches UCL/LCL (in some specific parameters i.e. oil viscosity) or goes beyond its limits, this can be interpreted as "abnormal" condition of the engine (Raadnui, 1998a; 1999a, b; 2000a; Raadnui and Roylance, 1998; Raadnui and Subunpawong, 1997).

* To whom correspondence should be addressed

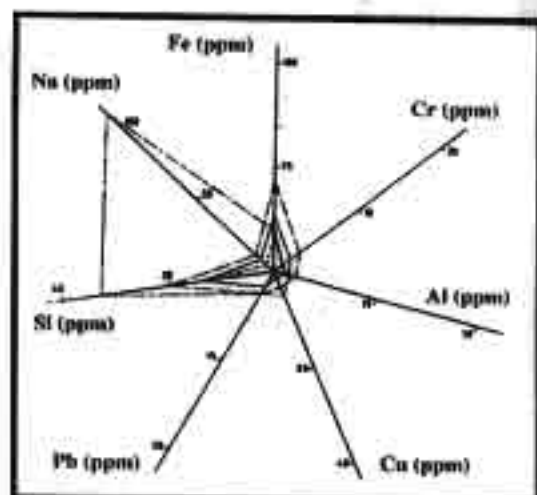


Fig.1 Multivariate monitoring chart for physical/chemical used oil properties.

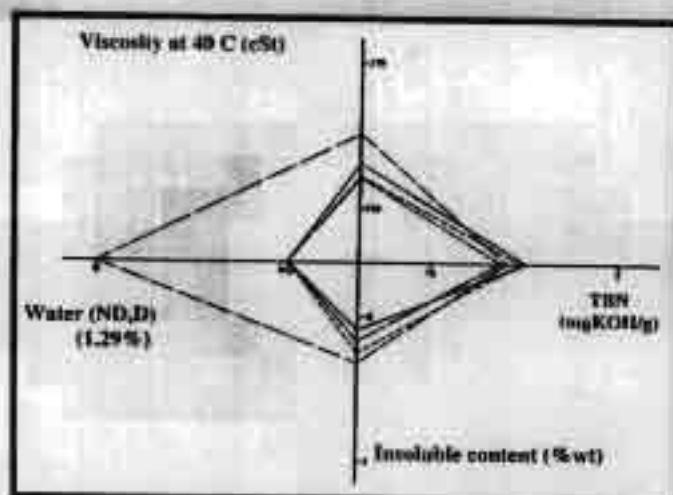


Fig.2 Multivariate monitoring chart for elemental analysis of used oil.

1.2. Filter debris analysis (FDA)

It has long been recognized that wear debris and contaminant trapped by oil filter are invaluable to condition monitoring analysts. Filters of lube oil of earth moving vehicles were collected and consequently contaminants and wear debris were extracted and assessed visually under a conventional microscope and, in some cases, a scanning electron microscope (SEM). Two sets of oil filters from different engine operating modes, namely, run-in and overhaul period, were assessed to demonstrate the distinction between debris characteristics. The filters to be analyzed are cut by a special tool to prevent additional metallic particles from its housing. Debris is separated from the oil filter media by submerging the oil filter in proprietary solvent and applying ultrasonic cleaning for 15 minutes. The debris is then captured on a $0.4\mu\text{m}$ absolute, polycarbonate Millipore filter using a vacuum to expedite the filtration process. Figures 3 and 4 show typical debris characteristic found on the Millipore filters. Elongated wear particles are generally found in the filter collected from run-in period. On the other hand, chunky and/or spherical type wear particles are normally presented in those collected from overhaul period (Raadnui, 1999a; 2000a).

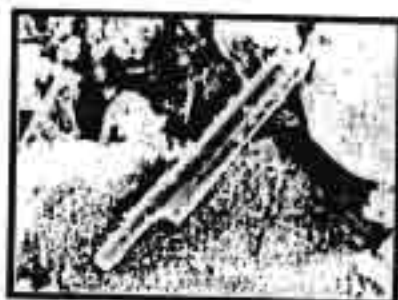


Fig.3. Elongated wear particle.



Fig.4. Spherical wear particle.

1.3. Used grease wear debris analysis

Due to normal wear and friction, it is not uncommon to find small amounts of debris in used grease samples. An excessive amount of debris in used grease samples can indicate a possible failure. In addition, wear debris morphology can be used to identify wear mode/mechanism that generated them. Generally, detectable failures are those caused by component wear and gradual accumulation of contaminants such as dirt, dust,

debris and moisture. By analyzing wear particles and contaminants in the used grease samples, problems may be identified early, before a catastrophic bearing failure occurs (Raadnui 2000b; Raadnui and Gradnium, 2001).

1.3.1. Wear debris analysis of used grease from simulative four-ball sliding wear tester

A series of tests was undertaken using a conventional four-ball machine. In a simple sliding mode, the wear debris characteristics before and after scuffing were determined in term of their morphological aspects. Tests were conducted as related to the test of standard preparation and procedure – IP 239/85 (1992). At the end of each successive test run, used grease was carefully collected on labeled glass slides and grease sample bottles. Wear debris from each test was inspected qualitatively and photomicrographs of representative wear debris in each wear regimes were taken. Figures 5 and 6 illustrate typical wear debris characteristic found in the mild and severe sliding wear mode respectively.



Fig.5. Mild sliding wear debris.



Fig.6. Severe sliding wear debris.

1.3.2. Wear debris analysis of used grease from simulative four-ball rolling wear tester

In this aspect, using the same four-ball machine, rolling contact pitting fatigue tests were carried out. Tests were performed as per standard test preparation and procedure – IP 300/82 (1987). Some of the rolling wear tests were stopped prior to pitting failure of the top ball so that representative "pre-failure" wear debris can be collected for comparison with those from "after pitting failure". Upon completion of each test, the used grease sample was collected and subsequently analyzed under an optical microscope. Figures 7 and 8 represent typical wear particles from "before" and "after" pitting of the top ball.



Fig.7. Before pitting wear debris.



Fig.8. After pitting wear debris.

1.3.3. Wear debris analysis of used grease from simulative plain bearing wear tester

There have been several publications in the study of effects of wear variables on systematic sliding wear of materials. However, there are wide ranges of parameters and also rather complicated standard wear testers. Hence, the studies of the sliding wear behavior of sliding bearing materials i.e. babbit materials are conducted utilizing a convention lathe. A typical arrangement is shown in Fig.9 below. A schematic diagram of contacting surfaces that can be performed on this particular test rig is shown in Fig.10.

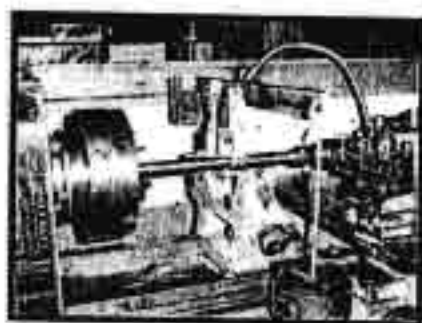


Fig.9. Plain bearing test rig.

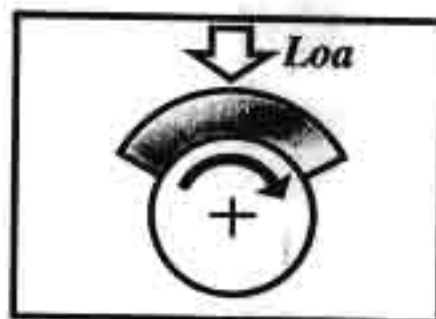


Fig.10. Schematic diagram of test rig.

In this section, the journal bearing wear debris characteristics is investigated. The narrow sleeve specimen is used for the simulation of sliding bearing wear. The load of the bearing applied on the deadweight arm mechanism permits the bearing mean pressure to go up to $5MPa$. The rotational speeds are set within the range of 300 to $1000rpm$. The sleeve material is either aluminum, brass or bronze. The journal is made of mild carbon steel and is ground to the roughness of $Ra = 1\mu m$. The test lubrication regimes can be either dry or boundary lubrication condition. After each test series, the used grease is collected and consequently wear debris is extracted and analyzed under either a light power microscope or a high power magnification through Scanning Electron Microscope (SEM). Typical wear particles from mild and severe wear regimes are shown in Figs.11 and 12 respectively (Raadnui, 2002a).

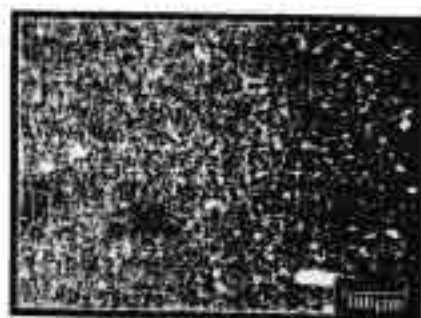


Fig.11. Mild adhesive wear debris.



Fig.12. Severe adhesive wear debris.

1.4. Magnetic chip detector (MCD) wear particle analysis

In power transmission such as gearboxes, engine crankcases or final drives, a failure of one part will cause a chain reaction of secondary failure. If an "impending failure" can be identified at an early stage, then suitable preventive measures can be planned in advance. This identification is the objective of the MCD through ferrous wear debris monitoring at strategic positions in the lubrication system. A typical MCD and ferrous wear particles from passenger car are shown in Figs.13 to 15 (Raadnui, 2002b, c).

Fig.13. Condition of an MCD located in the final drive after $10000 km$.



Fig.14. Combined rolling and sliding wear particle.



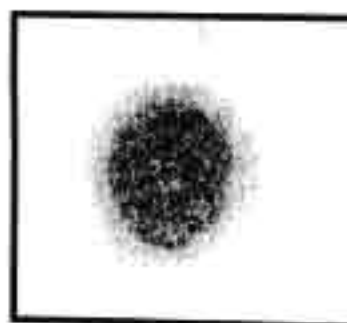
Fig.15. Severe sliding wear particle.

1.5. Inclined planar chromatography method

This newly developed technique (application to the U.S. Patent office filed) is a quick and simple test used to estimate the general condition of lubricant. It involves placing one or two drops of used engine oil on an inclined blotter paper (either 240M grade or Whatman No.4 filter paper). The oil drops spread out and dry, the large particles remain within a center corona. Further dispersion leads to oil penetration and filtration through the paper. A sharply defined corona around the oil-wetted area indicates the presence of sludge. A good degree of correlation is found between a conventional blotter test method and an inclined planar chromatography method as shown in Figs.16 and 17 respectively (Raadnui, 2002d, e).



a) Poor dispersancy.



b) Good dispersancy.

Fig.16. Typical result of an oil spot test (conventional method).



a) Poor dispersancy.



b) Good dispersancy.

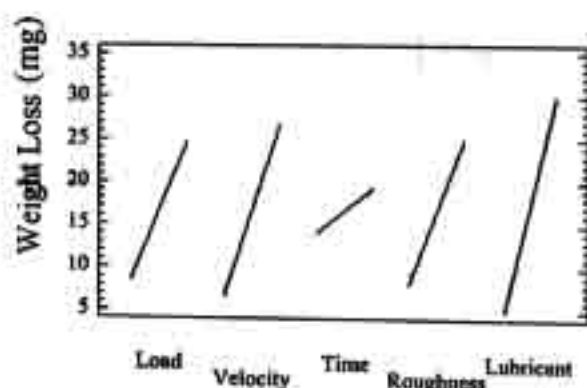
Fig.17. Typical result of an oil spot test (new method).

2. Maintenance tribology research

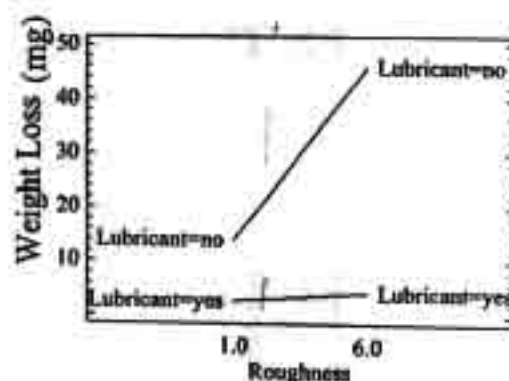
In this part, some recent applications and developments in Maintenance Tribology will be briefly reported.

2.1. Fundamental tribology research

Wear of machine elements or tools is one of the most common problems encountered in industry today. Of the different mechanisms of wear, namely, adhesive, abrasive, fatigue and tribochemical reaction (as per DIN 50320), the first two wear mechanisms are approximately 50 to 75% of all wear in industrial metal components. Statistical methods have been employed in our fundamental wear research. The important advantage of the application of mathematical statistics in the study of complicated wearing systems is, among others, the complete and reliable information obtained for both the effects of the main wear factors and the existing interaction between factors and also a reduction in the number of experiments and expenditures. In short, adhesive and abrasive wear test series were performed and the results were statistically assessed. The experiments have been carried out according to special factorial designs that have varied the levels of five most important cause variables in each wear mechanism. Within the confined area of the test rigs, main factors and interaction of adhesive and abrasive wear behavior are presented in Figs.18 and 19 respectively (Raadnui, 1998b; 1999c; 2000c; Raadnui and Watanasriyakul, 2000).

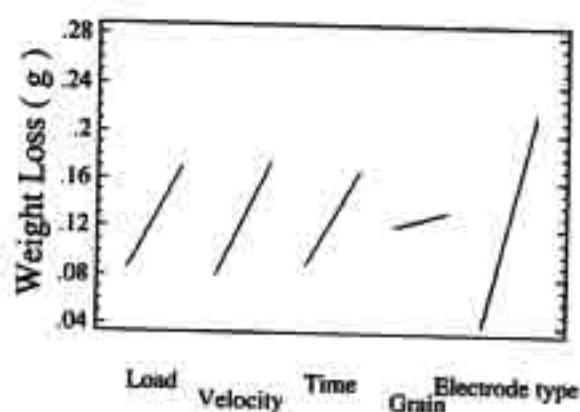


a) Main effect on adhesive wear.

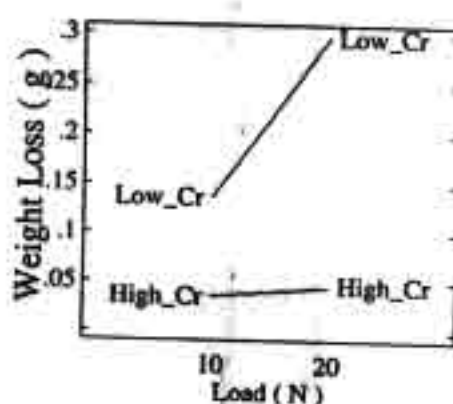


b) Interaction effect on adhesive wear.

Fig.18. Main and interaction effect of factors on adhesive wear process.



a) Main effect on abrasive wear.



b) Interaction effect on abrasive wear.

Fig.19. Main and interaction effect of factors on abrasive wear process.

2.2. Utilization of statistical exploratory data analysis for fundamental tribology research

2.2.1. The classification of machined surfaces

Surface roughness parameters can be measured by a variety of typical surface roughness testers available in the market. Parameters obtained from the measuring devices are numerous, and, in turn, are used to represent the characteristic of the surfaces under investigation. In this part of work, an initiative to utilize a statistical-based technique to classify the differences between major machining processes on finished surfaces is proposed. Preliminary results of classification of machined surfaces commonly used in industry, namely, planing, milling, grinding and turning processes are shown in Figs.20 and 21 respectively (Raadnui, 2000d; 2001).

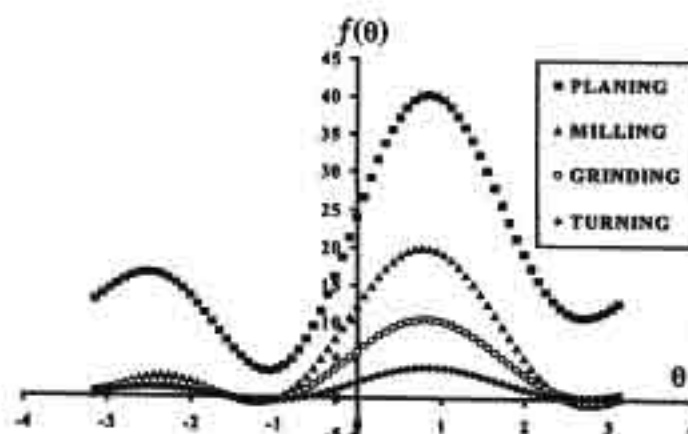


Fig.20. Classification of different machined surfaces by Andrews' plot.

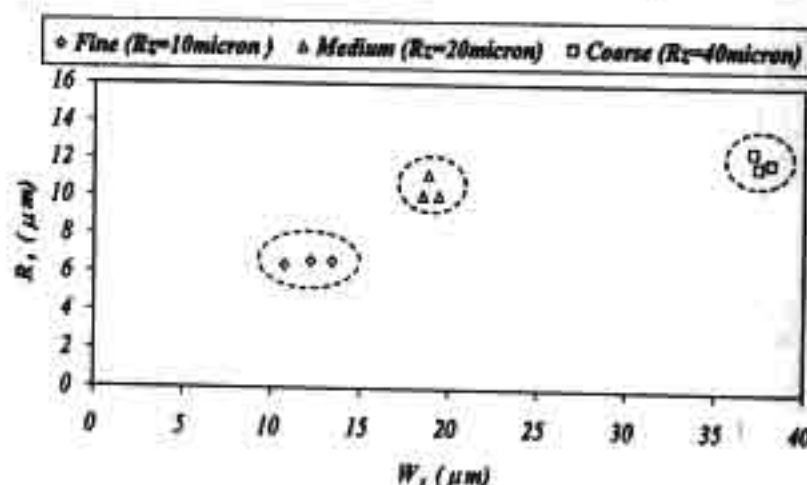


Fig.21. Classification of milling surfaces by a 2-dimensional plot.

2.2.2. Off-line condition monitoring of worn surfaces

Microscopic observation has greatly contributed to identify and/or classify worn surfaces of tribomaterials. Words, sketches and photographs used in expressing surface characteristics are by all means qualitative and depend on human sense. It would therefore, be beneficial to be able to translate these "qualitative" properties into a somewhat "quantitative" aspect. Hence, the quantitative classification of typical adhesive, abrasive and rolling fatigue worn surfaces is proposed. The relationship between

conventional quantitative surface roughness parameters and physical properties of typical worn surfaces are assessed. The more fundamental exploratory statistical data analysis is employed. Typical results are shown in Fig.22 (Raadnui, 2002f, g).

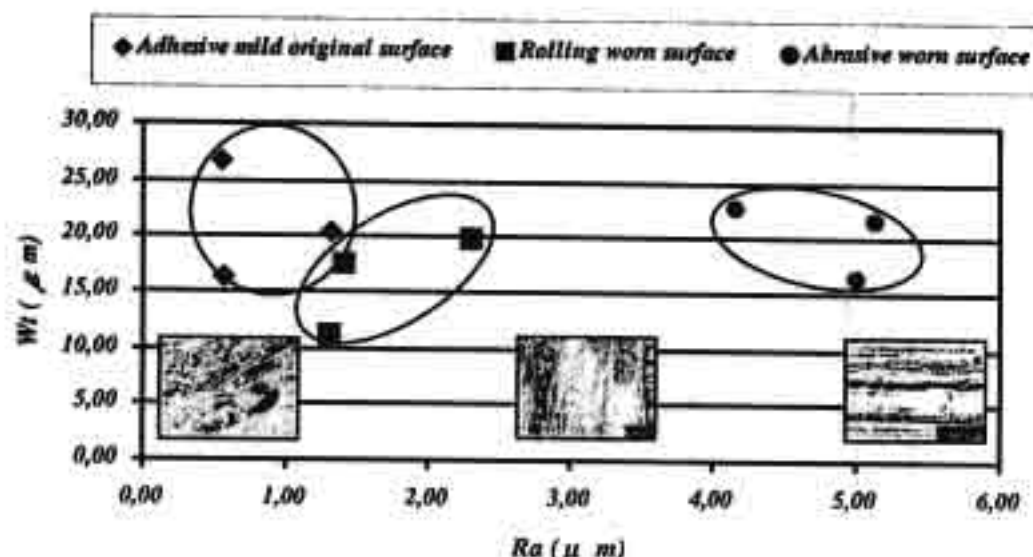


Fig.22. Worn surface classification of specific worn surfaces by two-dimensional plot.

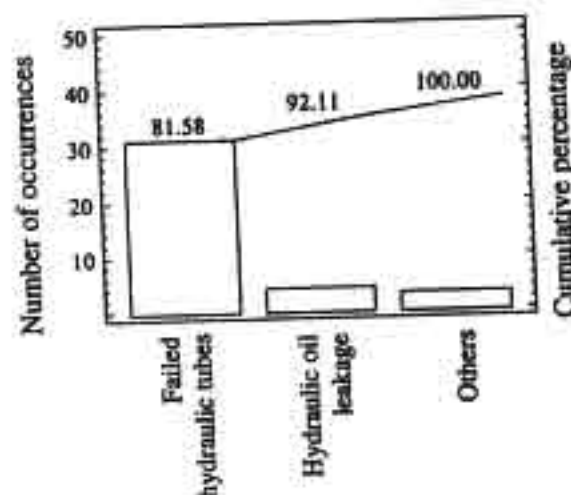
2.3. Maintenance research activities

2.3.1. Maintenance for reliability improvement

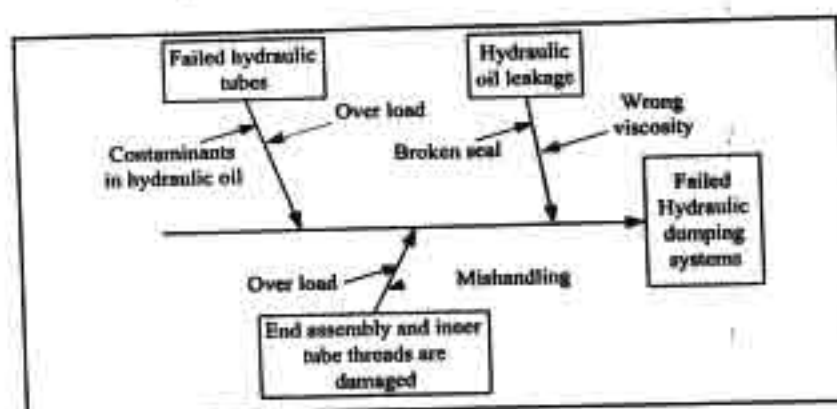
The analysis of reliability of mechanical components, which form part of mechanical repairable systems, is a vital part of reliability engineering. Component reliability analysis is based mainly on the observation of time to failure of components in service. The information obtained proves to be useful for the following identification of problem area: aiding engineering investigation of failure modes and/or causes of failure, specifying reasonable preventive maintenance period and replacement strategies, quantifying spare parts requirements and reliability assessment for the system under investigation. In this specific part, the employment of Weibull statistics, Pareto diagram and fish-bone diagram are fully utilized as shown in Tab.1 and Fig.23 (Raadnui, 1999d).

Table 1. Shape and scale parameters of selected subsystems
(Parameters are extracted from field data within three years period).

Subsystem	Scale parameter (MTBF: α) (hours)	Shape parameter (β)
Engine	1035	0.817
Hydraulic dumping system	1217	0.660
Air starter	2720	1.045
Planetary	3063	0.670
Final drive	1673	0.763
Steering pump	1500	0.690
Transmission	2104	0.783
Hydraulic control valve	2624	0.900



a) Pareto diagram for root cause analysis.



b) Cause and effect analysis (fish-bone diagram).

Fig.23. Failure analysis of hydraulic dumping system.

2.3.2. Maintenance for productivity improvement

In performing preventive maintenance activities of industrial machinery, in general, perhaps "Maintenance Resource Management" is one of the most important issues for maintenance managers. "4M" is commonly known as the four fundamental industrial resources, in particular "Maintenance Resources" here, namely, Man, Machines (or Tools), Materials (or Spare parts) and Money (or Maintenance Budget). Generally, there is evidence in the literature, of the application of the Predetermined Time System (PTS) technique in man-hour estimation in performing repetitive working activities of operators in production environments. However, there are few reports on the employment of such technique in maintenance field. Here, the PTS technique is implemented. Selected basic preventive maintenance activities are assessed. Generally, work content is divided into work elements. Consequently, standard tables consist of predetermined time for manual operations i.e. Reach, Move, Grasp, Turn, Position etc. are applied to estimate the normal and standard time in performing some commonly performed maintenance jobs for industrial machinery. In this way, maintenance works are more manageable. Hence, maintenance productivity can be controlled and improved (Raadnui, 2000e, f; Raadnui and Thummanusati, 1998).

Acknowledgment

The Thailand Research Fund (TRF), under the grant number PDF/44/2541, has supported this work.

References

- Raadnui S. (1998a): *Tribological research at King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.* – Proceedings of the 1st Asia International Conference on Tribology, vol.2, Beijing, China, October 12-15, 1998, pp.428-431.
- Raadnui S. (1998b): *Evaluation of operating variables that significantly affect wear of hard facing surfaces utilization fractional factorial experimental design.* – Proceedings of the 11th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 1998), vol.2, Tasmania, Australia, December 8-11, 1998, pp.713-716.
- Raadnui S. (1999a): *The analysis of debris in used oil filters.* – Presented at the 54th Annual Meeting of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE), Las Vegas, Nevada, USA, May 23-27, 1999 (presentation only).
- Raadnui S. (1999b): *Maintenance Tribology Research: Its activities at King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.* – Poster Session, the 12th International Conference on Wear of Materials (WOM 1999), Atlanta, USA, April 25-29, 1999, (presentation only).
- Raadnui S. (1999c): *Statistical approach for experimental analysis of sliding wear behaviour of bearing materials.* – Proceedings of the 12th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 1999), Sunderland, England, July 8-11, 1999, pp.153-157.
- Raadnui S. (1999d): *Statistical failure analysis: its significance in reliability improvements of earth moving machinery.* – Proceedings of the 53rd Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology (MFPT), Virginia, USA, April 19-22, 1999, pp.209-216.
- Raadnui S. (2000a): *Condition monitoring of earth moving vehicles – a novel approach.* – Proceedings of the 3rd International Conference on Quality, Reliability and Maintenance, Oxford, United Kingdom, March 30-31, 2000, pp.159-162.
- Raadnui S. (2000b): *The analysis of debris in used grease samples.* – Proceedings of the 13th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2000), Houston, USA, December 3-8, 2000, pp.971-979.
- Raadnui S. (2000c): *Statistical design and analysis of experiments as applied for wear of engineering materials studies.* – Proceedings of the Section on Physical and Engineering Sciences, American Statistical Association (ASA), Virginia, USA, June 02-04, 1999, pp.275-278.
- Raadnui S. (2000d): *The classification of machined surfaces.* – Proceedings of the International Tribology Conference, vol.1, Nagasaki, Japan, October 29 – November 02, 2000, pp.229-233.
- Raadnui S. (2000e): *Predetermined Time System (PTS) as applied for man hour estimation of some basic preventive maintenance activities.* – Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Conference on Systems Integrity and Maintenance, Nangjing, China, August 23-25, 2000, pp.331-336.
- Raadnui S. (2000f): *Simplified maintenance activities for productivity improvement.* – Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology (MFPT), Virginia, USA, May 01-04, 2000, pp.697-704.
- Raadnui S. (2001): *The quantitative description of machined surfaces.* – Presented at the 2001 Quality and Productivity Research Conference, American Statistical association (ASA) Texas, USA, May 22-25, 2001 (presentation only).
- Raadnui S. (2002a): *Plain bearing used grease debris analysis.* – Proceedings of the 2nd International Tribology Conference (SITC 2002), Zielona Góra, Poland, August 25-28, 2002, pp.273-276.
- Raadnui S. (2002b): *Magnetic chip detector wear particle analysis for industrial machinery condition evaluation.* – Proceedings of the 2nd International Tribology Conference (SITC 2002), Zielona Góra, Poland, August 25-28, 2002, pp.419-423.
- Raadnui S. (2002c): *Magnetic chip detector (MCD) wear particle analysis.* – Presented at the 57th Annual Meeting of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE), Houston, Texas, USA, May 19-23, 2002, (presentation only).
- Raadnui S. (2002d): *Low cost debris analysis for industrial machinery condition evaluation.* – Proceedings of the 2nd Asia International Conference on Tribology (ASIATrib 2002), Jeju Island, Korea, October 21-24, 2002, pp.465-466.

- Raadnui S. (2002e): *Low cost machinery health monitoring through used lubricant analysis*. – Proceedings of the 2nd International Conference on Situation and Perspective of Research and Development in Mechanical Industry, Krusevac-Vrnjacka Banja, Yugoslavia, September 02-04, 2002, pp.534-539.
- Raadnui S. (2002f): *Off-line condition monitoring of worn surfaces*. – Proceedings of the 4th International Conference on Quality, Reliability and Maintenance, Oxford, United Kingdom, March 21-22, 2002, pp.211-214.
- Raadnui S. (2002g): *Worn surface evaluation*. – Proceedings of the 2nd International Tribology Conference (SITC 2002), Zielona Góra, Poland, August 25-28, 2002, pp.161-166.
- Raadnui S. and Gradnium P. (2001): *Used grease analysis: early detection of bearing failures*. – Poster Session (P38), the 13th International Conference on Wear of Materials (WOM 2001), Vancouver, Canada, April 22-26, 2001 (presentation only).
- Raadnui S. and Roylance B.J. (1998): *The utilization of multivariate statistical analysis techniques for wear evaluation from wear debris and used oil analysis data*. – Proceedings of the 52nd Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology (MFPT), Virginia, USA, March 30 – April 03, 1998, pp.473-482.
- Raadnui S. and Subunpawong P. (1997): *Multivariate monitoring chart for used oil analysis results' assessment*. – Presented at the 52nd Annual Meeting of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE), Kansas City, Missouri, USA, May 18-22, 1997 (presentation only).
- Raadnui S. and Thummanusati S. (1998): *Thai-Style Productive Maintenance (TPM)*. – Presented at the 53rd Annual Meeting of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE), Kansas City, Missouri, USA, May 17-21, 1998 (presentation only).
- Raadnui S. and Watanasriyakul S. (2000): *Abrasive wear resistance behaviour and cost analysis as a basis for hardfacing electrode selection*. – Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Tribology (NORDTRIB 2000), vol.2, Porvoo, Finland, June 11-14, 2000, pp.444-453.

Received: May 15, 2002

Revised: August 15, 2002

WORN SURFACE EVALUATION

S. RAADNUI

Department of Production Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Pibulsongkram Road, Bang-Sue, Bangkok, 10800, THAILAND
e-mail: srr@kmitnb.ac.th

Microscopic observation by human unaided eyes has greatly contributed to identify and/or classify worn surfaces of tribomaterials. Words, codes, sketches and photographs used in expressing surface characteristics by all means qualitative and depend on human a sense, which inadequately varies from time to time and from person to person. It would be, therefore, beneficial to be able to translate these "qualitative" properties into somewhat "quantitative" aspect. In this paper, an author seeks his own initiative to utilize a statistical - based mean to classify/identify the differences between worn surfaces from different wear mechanisms i.e. abrasive, adhesive, rolling and reciprocating wear in particular. The relationship between conventional quantitative surface roughness parameters and physical properties of worn surfaces are assessed. The more fundamental exploratory statistical data analysis is employed.

Key words: worn surface.

1. Introduction

In tribology it has become common knowledge that surface roughness plays a significant part in boundary and mixed lubrication regimes. Precisely, the understandings of this behavior are vital in many applications such as friction, lubrication and wear diagnosis from failure parts in particular. Therefore characterization of surface roughness has been developed over the last 70 years. The profilometer techniques are used to quantify and standardize measurements; hence, the use of statistical parameters has been proposed. As early in 1930s, researchers started to characterize surface roughness. The insensitivity of conventional surface roughness analysis to differentiate meaning surfaces has been recognized for sometimes (Nowicki, 1985; Klimczak, 1992, and Michalski and Pawlus, 1993). One manifestation of this problem is that, despite an existence and wide spread use of surface roughness measuring methods over half a century, there is a paucity of studies providing correlation with behavior or worn surface creative mechanism-(s). It is believed that systematic approach utilization the more fundamental exploratory statistical data analysis should provide a more complete understanding of the worn surface features.

2. Methods

In general, conventional surface roughness testers have used stylus of smaller radii ($\approx 2\mu\text{m}$) upon which a smaller load than $5\mu\text{N}$ is applied. The stylus is (usually, but not necessarily always) moved horizontally along the specimen. After the stylus slides some chosen distance, the average height of the stylus tip during the trace is calculated to determine the datum. Then various quantities can be calculated, such as the simple average of the height of the surface features that rise above the datum, referred to as R_a , or the Root-Mean-Square (RMS) of these height, referred to as the R_q , as many as 20 other quantities.

Abrasive wear tests are carried out using an abrasive belt wear tester (Fig.1(a)). The specimens of plain carbon steels (27.0mm x 76.2mm x 9.6mm) are used. The mean initial surface roughness is at $1.0\mu\text{m}$ (in R_a value). Experiments are performed to produce typical abrasive worn surfaces.

Roughness of worn surface after each test is measured. Typical original and worn surface micrographs of the specimen are shown in Figs.1(b) and 1(c) respectively.

Adhesive wear tests are carried out on a journal bearing wear test rig utilization of a conventional lathe (Fig.2(a)). The specimens of bronze (G-CuSn5ZnPb) are used. The mean initial surface roughness is at $10.0\mu\text{m}$ (in Ra value). Experiments are performed to produce typical adhesive worn surfaces. Roughness of worn surface after each test is measured. Typical original and worn surface micrographs of the specimen are shown in Figs.2(b) and 2(c) respectively.

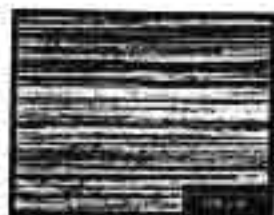


Fig.1(a). Abrasive wear tester.

1(b). Original surface.

1(c). Typical worn surface.



Fig.2(a). Adhesive wear tester.

2(b). Original surface.

2(c). Typical worn surface.

Similar test rig for adhesive wear is used for performing rolling wear test (Fig.3(a)). Slight modification of specimen holding mechanism has been made. This led to be able to allow two rollers (low carbon steels, $\varnothing 12\text{mm} \times 10\text{mm}$) mounted and rolling contact configuration can be achieved. Original and worn surface features are shown in Figs.3(b) and 3(c).



Fig.3(a). Rolling wear tester.

3(b). Original surface.

3(c). Typical worn surface.

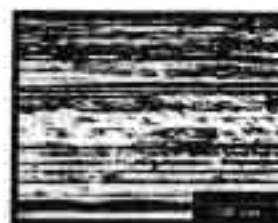
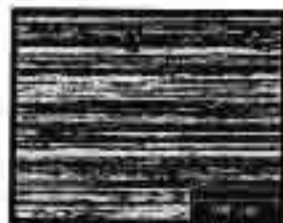


Fig.4(a). Reciprocating wear tester.

4(b). Original surface.

4(c). Typical worn surface.

In case of reciprocating wear test, a conventional planning machine is used (Fig.4(a)). Experiments are carried out to produce typical reciprocating worn surfaces. The specimen of plain carbon steel is used (50mm x 200mm x 7mm). Surface roughness parameters both before and after the test are recorded. Representative original and worn surface after the test are presented as in Figs.4(b) and 4(c) respectively.

At least three repeated traces of 5mm long are made at random location in perpendicular orientations of the worn surfaces. A Hommel Tester T20A (Hommelwerke GmbH) with a TTK 300 stylus (5 μ m radius of spherical tip) was used. Prior to the tests, the roughness tester was calibrated and the accuracy of preliminary measurements exceeded 99%. The conventional statistical parameters such as the arithmetic mean deviation, R_a ; the root-mean-square deviation, R_q ; average peak-to-valley roughness; R_z etc. that are commonly used were chosen for analysis. In this study, the utilization of exploratory statistical analysis techniques was employed to characterize typical worn surfaces.

3. Results and discussion

The relationship between any of the available parameters and the function of tribological parts is scarcely known by anyone (Ludema, 1993). In addition, the measurement of surface roughness has not yet been accomplished to everyone's satisfaction. Thus, the choice of parameter is quite arbitrary, except for communication of data with other. Since it is impossible to completely characterize a surface with a single parameter, and on the other hand, it is too cumbersome to analyze all the parameters available at the output of the surface roughness tester. A combination of selected parameters is normally used to examine and quantify the specimen surfaces (or worn surfaces). For effective analysis of worn surface roughness or waviness, the profile generated by the measuring instruments needs to be evaluated according to internationally recognized mathematical formulas, call parameters. The purpose of using a parameter is to apply a number that can characterize a certain aspect of the worn surface and hence remove the need for subjective operator assessment. Generally, parameters can be separated into four basic types, namely, amplitude, spacing, hybrid and extended parameters. In order to characterize a worn surface using parameters, at least two parameters must be chosen, including at least one of the types listed.

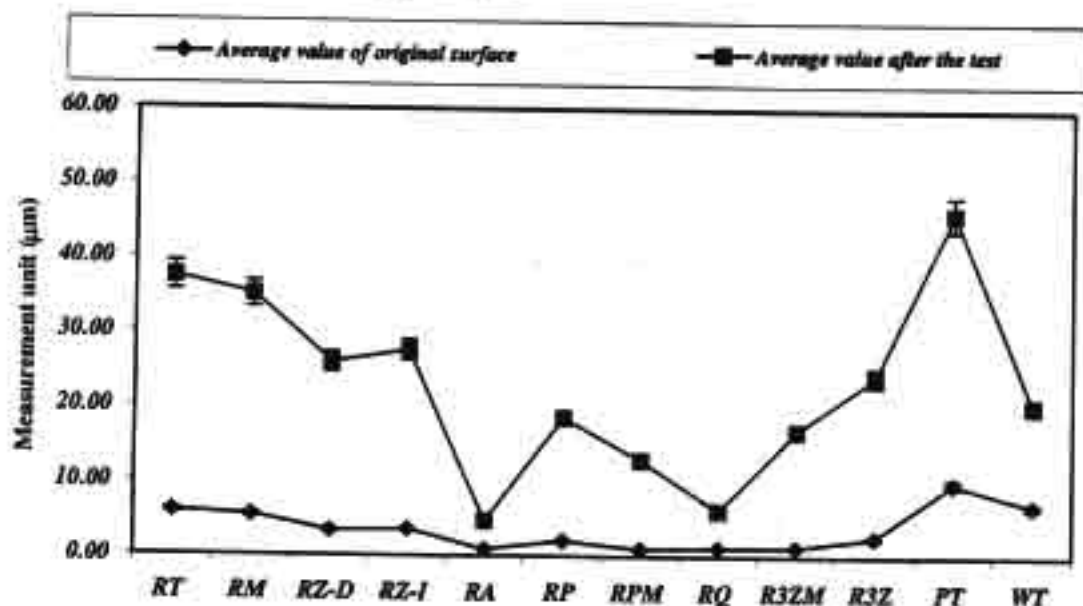


Fig.5. A plot of roughness parameters of abrasive wear tests.

As previously shown, typical worn surfaces in Figs.1(c), 2 (c), 3(c) and 4(c) these surfaces are easily identified by unaided eyes. It is basically from an arial view that the differences become obvious. However, human sense, particularly, visual and touch commonly involve. In this paper, in

contrast, exploratory data analysis techniques are used instead. This type of approach would enable us to exclude human sense interaction in worn surface identification, evaluation and/or classification process. Figures 5 to 8 shows the plots of all provided roughness parameters both before and after tests from abrasive, adhesive, rolling and reciprocating wear tests respectively. It can be seen that some certain distinctive characteristics are obvious, abrasive, rolling and reciprocating worn surface roughness parameters in particular. In addition, parameters for classification and/or identification of worn surfaces either for within or among worn surface data groups can be picked up i.e. R_t , R_a , P_t and W_t in particular. Consequently, the influential parameters such as the combination of W_t vs. R_a is chosen to demonstrate a potential for worn surface evaluation. Figure 9 presents the plot where one should be able to see some distinctive regions that belong to certain modes or generating wear mechanisms.

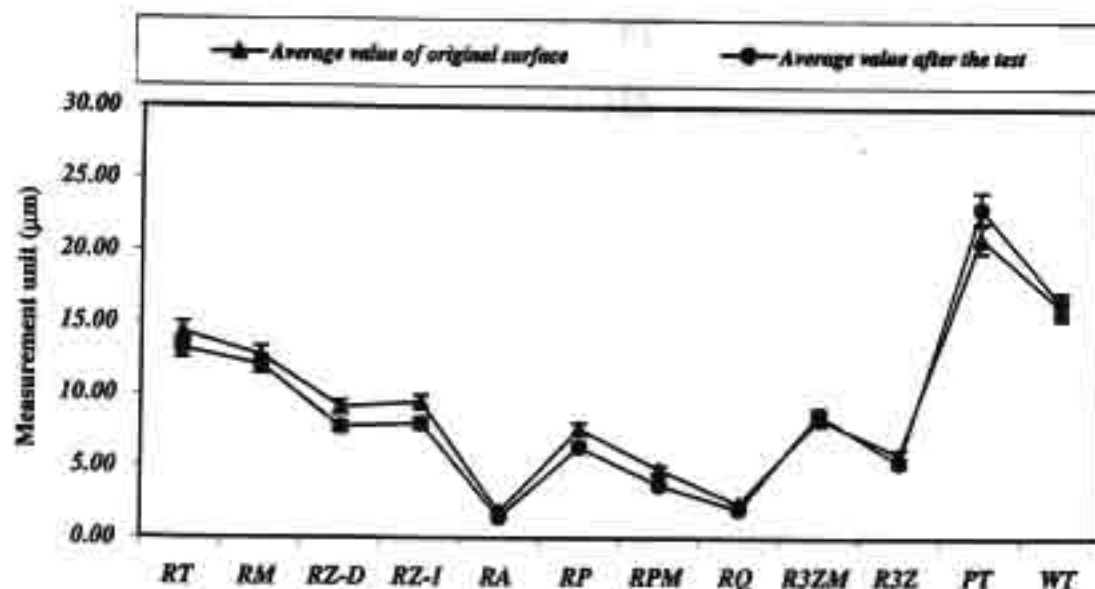


Fig.6. A plot of roughness parameters of adhesive wear tests.

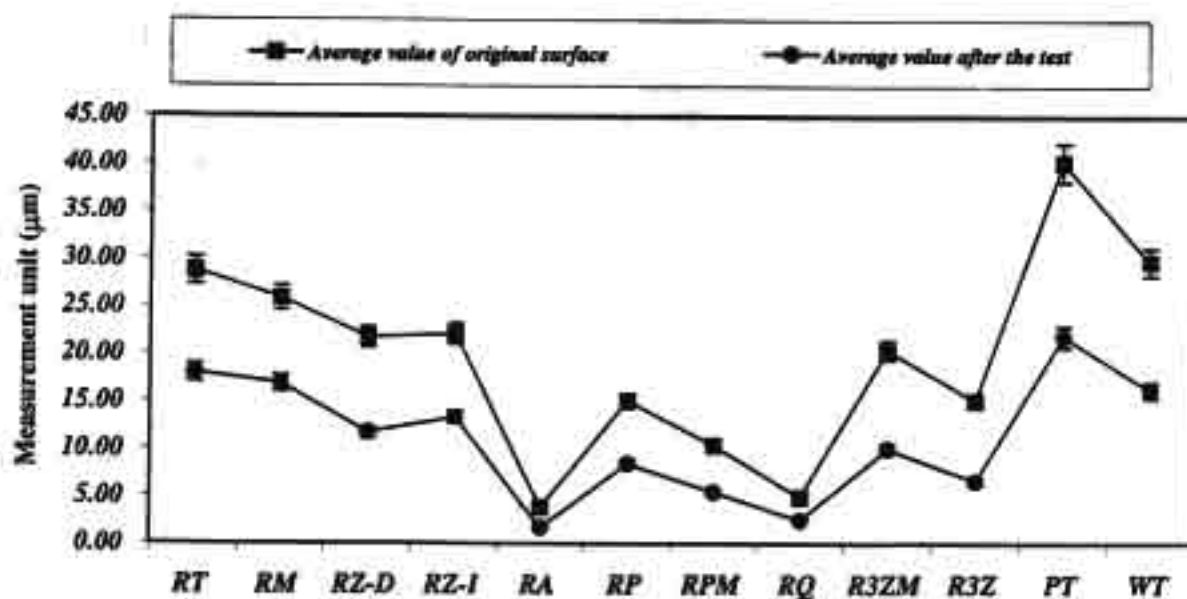


Fig.7. A plot of roughness parameters of rolling wear tests.

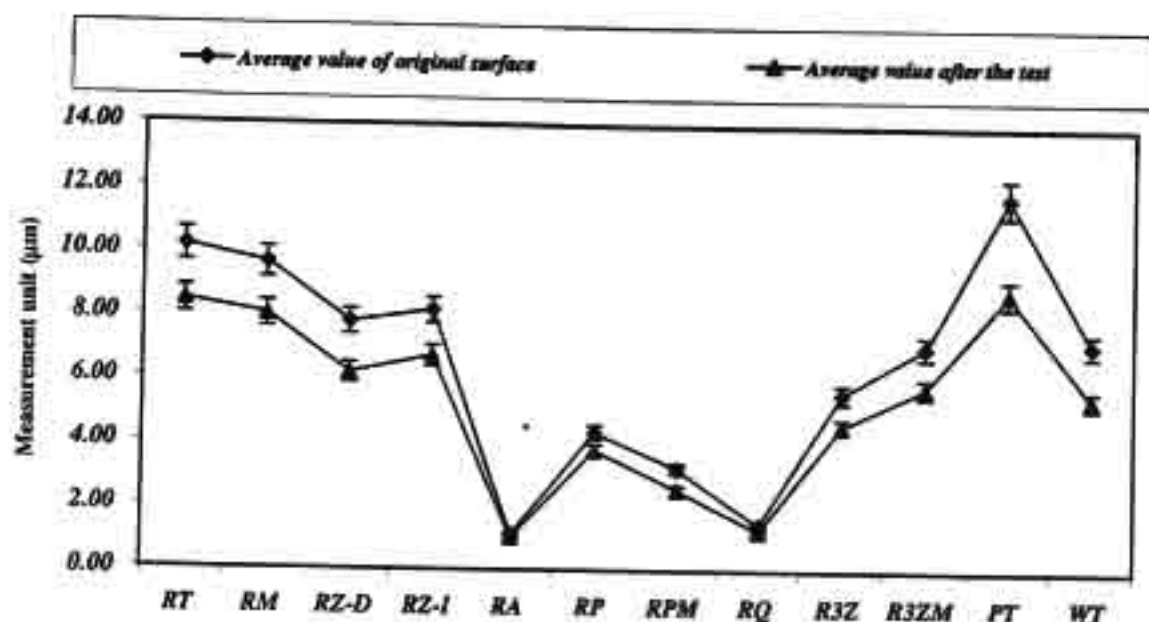


Fig.8. A plot of roughness parameters of reciprocating wear tests.

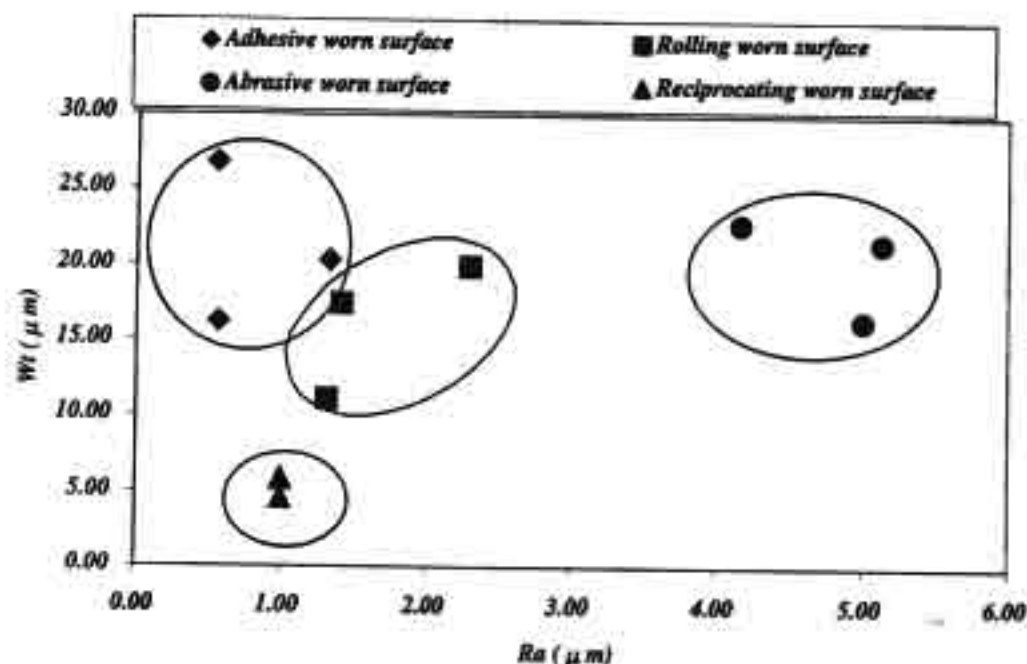


Fig.9. Two-dimensional plot of surface roughness parameters.

4. Conclusions

The preliminary examination of most data, in this work, is facilitated by the use of diagrams. Diagrams prove nothing, but bring outstanding features readily to the eye. From the above research work, it can be concluded that:

Surface roughness parameters are plethora, it has been demonstrated that some particular parameters are significantly useful for classification of typical worn surfaces.

Utilization of a more fundamental exploratory statistical data analysis is proved to be important in worn surface evaluation.

It should be possible in the future to develop an automatic worn surface evaluation/classification utilizing surface roughness parameters.

Acknowledgments

The Thailand Research Fund (TRF) (under the grant number of PDF/44/2541) and Thailand Toray Science Foundations (TTSF) have supported this work.

References

- Klimczak T. (1992): *Origins, magnitude and statistical significance of differences between roughness parameters of two- and three-dimensional characteristics*. – Wear, vol.156, pp.19-31.
- Ludema K.C. (1993): *Friction, Wear and Lubrication, A Textbook in Tribology*. – New York: CRC Press.
- Michalski J. and Pawlus P. (1993): *Characterization of the shape of the roughness profile ordinate distribution of honed cylinder surfaces*. – Wear, vol.161, pp.135-143.
- Nowicki B. (1985): *Multiparameter representation of surface roughness*. – Wear, vol.102, pp.161-176.

PLAIN BEARING USED GREASE DEBRIS ANALYSIS

S. RAADNUI

Department of Production Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Pibulsongkram Road, Bang-Sue, Bangkok, 10800, THAILAND
e-mail: srr@kmitnb.ac.th

Due to normal friction and wear, even in properly lubricated moving machine elements, it is not uncommon to find small amounts of debris in used lubricants. The wear debris analysis technique has been applied for monitoring machine condition for quite sometimes. However, most of the works reported to date have been focussed for oil - lubricated machinery. Actually, very little primary material of the application of used grease analysis technique for plain bearings is to be found in the periodical literature.

The identification of the cause of damage or failure in plain bearings is crucial before remedial action can be taken to prevent further damage. The first step is a visual examination of the wear debris and/or contaminants in the used grease samples. In addition, this step can then be followed up by visualization of the damaged parts, if applicable. Once failure has been initiated, the origin mechanism may lead to other failure mechanisms and it is essential to identify the original cause. In this particular work, "systematic used grease wear debris analysis" is proposed. Preliminary results are presented and discussed.

Key words: plain bearing, debris analysis.

1. Introduction

There have been several publications in the study of effects of wear variables on systematic sliding wear of materials (Bayer, 1975; Begelinger and De Gee, 1972 and 1974; Raadnui 1999 and 1999). However, only few research publications report on the analysis of journal bearing wear behaviour (Strzelecki and Wojcicki, 1999; and Duchowski *et al.*, 2000). In addition, as there are wide ranges of parameters and also rather complicated standards wear testers. Hence, the simple studies of sliding wear behavior of journal bearing to be explored materials are conducted in this particular work, utilization of conventional lathe. The structure of "conformal" contact tribosystem accommodates the characteristics of journal bearings. Principally, the journal bearing of an engine or industrial machine elements comprise the sleeve with the bearing material on the inner surface of the steel housing. The counterpart is the journal made from hardened steel of good quality. The paper introduces the experimental investigations of specimens in the form of partial bearing material lubricated with grease and a journal made of steel. The generated wear debris of different lubrication regimes i.e. boundary and mixed lubrication are examined.

2. Test rig

In this section, the investigations of the journal bearing wear debris characteristics are conducted. The narrow sleeve specimen (90°) is used throughout for the simulation of journal bearing wear. The load of the bearing is applied via a deadweight arm mechanism permits the bearing mean pressure up to 5MPa. The schematic diagram of the test rig and test rig arrangement is shown in Fig.1. The rotational speed is set within the range of 300 to 1000rpm.

The materials of sleeves are aluminum, bronze and brass. The journal is made of harden steel with diameter of 25mm. The mineral base oil with lithium soap grease (NLGI No.2) without EP additives is used as the lubricant of the bearings. The test lubrication regimes can be either dry, boundary or mixed lubrication. After each test, the used grease is collected and consequently wear debris is extracted and analyzed under light microscope or high power magnification through Scanning Electron Microscope (SEM). In addition, worn surface are also assessed microscopically.

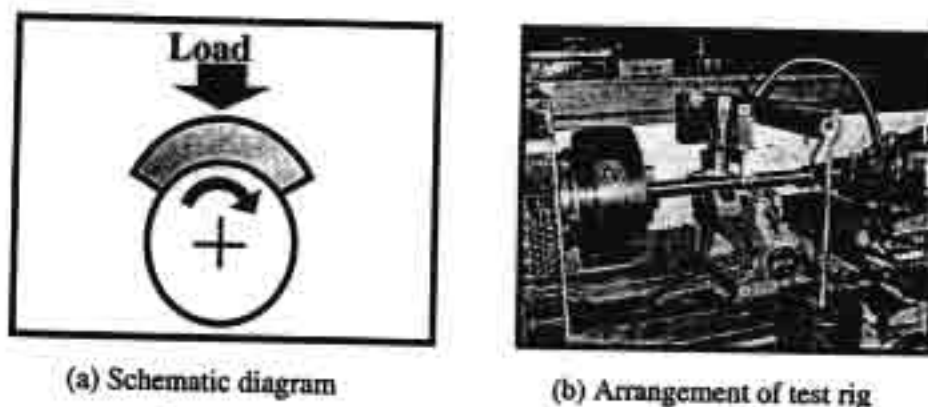


Fig.1. Test rig arrangement.

3. Results of experimental investigation

The investigations of bearing material were made on three friction pairs, namely, steel-bronze, steel-aluminum, and steel-brass bearing materials. The journal was made of S45C carbon steel and harden up to 55HRC. The operating surface of the journal was ground to the surface roughness parameter of $Ra = 0.6\mu\text{m}$ (the roughness of operating surface of sleeve $Ra = 2\mu\text{m}$). After each test series, the journal and sleeve were disassembled from the test rig, the used grease are collected and the specimens are degreased with an proprietary solvent. The roughness and weight of specimens are measured. At the beginning of each series of investigations the same parameters of initial conditions of measurements were measured. The comparison of the worn recorded of three combination friction pairs is shown in Figs.2 to 4.

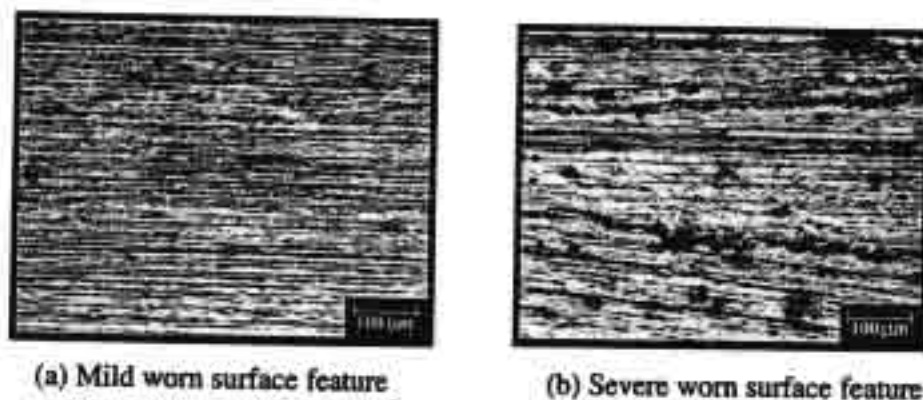


Fig.2. Worn surface of sleeve material (brass).

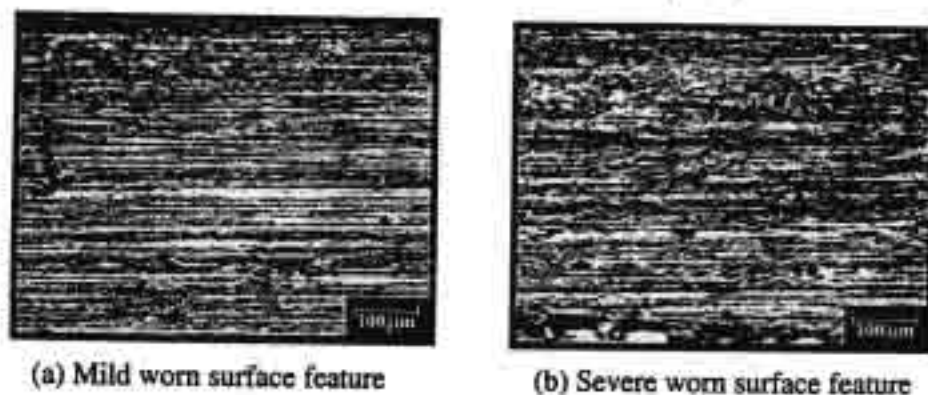


Fig.3. Worn surface of sleeve material (bronze).

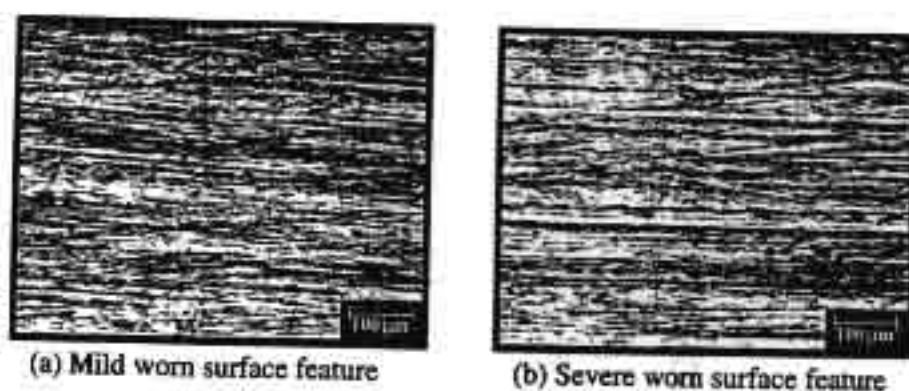


Fig.4. Worn surface of sleeve material (aluminum).

For the analysis of wear debris characteristics, it has been found out that in these specific test conditions, three different regimes of lubrication were taken place, namely, run-in period, boundary and mixed lubrication. Typical debris feature from each regime is shown in Figs.5 to 7, respectively.

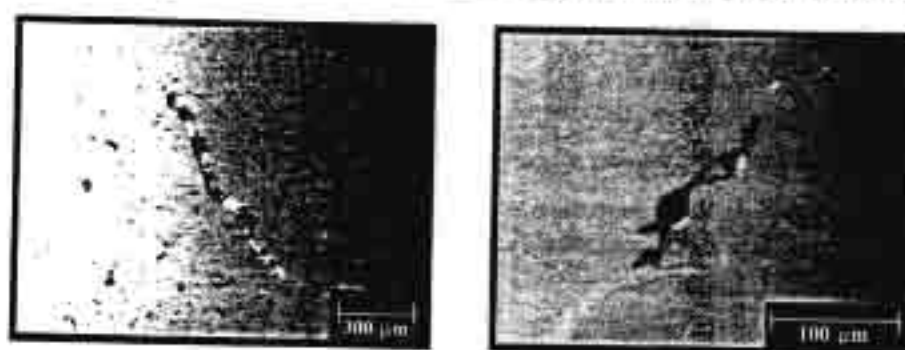


Fig.5. Elongated wear particles during running-in period.

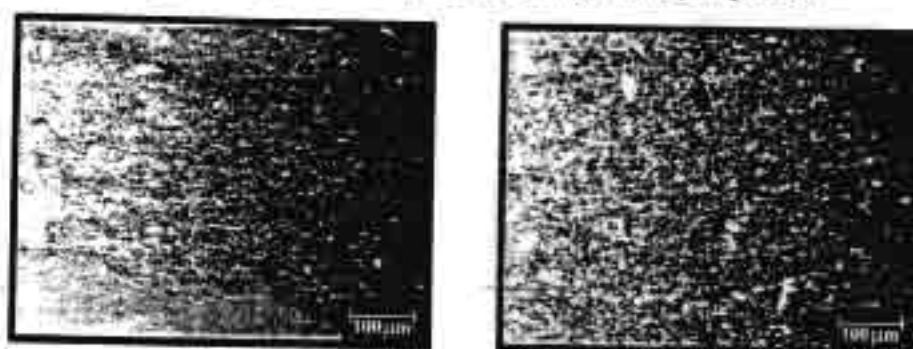


Fig.6. Normal rubbing wear particles from mixed lubrication regime.

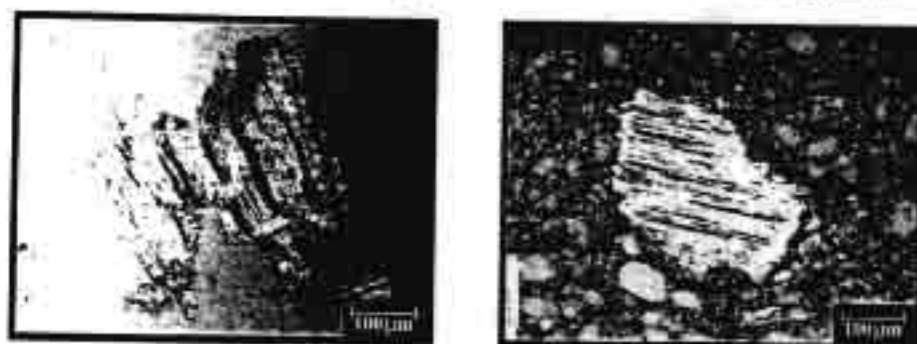


Fig.7. Severe adhesive wear particles from boundary lubrication regime.

4. Conclusions

All sleeve materials exhibit similar characteristics at the same values of bearing parameters i.e. during run-in, mild and severe wear mode.

Similar worn surface features presented for the test condition prevailed, namely, mild and severe adhesive worn surfaces.

Wear debris features correlated well with the worn surface characteristics of bearing sleeves.

Acknowledgments

The Thailand Research Fund (TRF) (under the grant number of PDF/44/2541) and Thailand Toray Science Foundations (TTSF) have supported this work.

References

- Bayer R.G. (1975): *The influence of lubrication rate on wear behaviour*. – Wear, vol.35, pp.35-40.
- Begelinger A. and De Gee A.W.J. (1972): *Boundary lubrication of sliding concentrated steel contacts*. – Wear, vol.22, pp.337-357.
- Begelinger A. and De Gee A.W.J. (1974): *Thin film lubrication of sliding point contact of AISI 52100 steel*. – Wear, vol.28, pp.103-114.
- Duchowski J.K. Collins K.G. and Dmochowski W.M. (2000): *Experimental evaluation of filtration requirements for journal bearings operating under different contaminant levels*. – Lubrication Engineering, June 2002, pp.34-39.
- Raadnui S. (1999): *Statistical approach for experimental analysis of sliding wear behaviour of bearing materials*. – Proceedings of the 12th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, July 7-9, Sunderland, England, pp.153-157.
- Raadnui S. (1999): *Statistical design and analysis of experiments as applied for wear of engineering materials studies*. – Proceedings of the Section on Physics and Engineering Sciences, American Statistical Association (ASA), pp.275-278.
- Strzelecki S. and Wojcicki R. (1999): *Measurement of tribological characteristics in the research of journal bearing materials*. – Lubrication Engineering, June 1999, pp.31-35.

