

## การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอทางไฟฟ้าจากกระปุกเฟืองทด ที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นภายใต้อิทธิพลของไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

สรพล ราษฎร์นัย<sup>1\*</sup>, ภาวิน ทวีชศรี<sup>1</sup>, และ ศรารุณี คลีสุวรรณ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

\*ติดต่อ: E-mail: s\_raadnui@yahoo.co.uk, โทรศัพท์: 0816251369

### บทคัดย่อ

การเกิดไฟฟ้ารั่วผ่านอุปกรณ์ทางกลและทางไฟฟ้า อาทิ แบตเตอรี่ มอเตอร์ และฟืนเฟืองเป็นหนึ่งในปัญหาในงานบำรุงรักษา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสามารถค้นหาสาเหตุและลักษณะอาการที่ผิดปกติให้ได้ตั้งแต่เนิ่นๆ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของไฟฟ้ากระแสสลับที่มีผลต่อการสึกหรอทางไฟฟ้าของกระปุกเฟืองทดที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่น งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของไฟฟ้ากระแสสลับที่ส่งผลต่อการสึกหรอของฟืนเฟืองคู่สัมผัสในระบบจำลอง โดยการวิเคราะห์ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าโดยรวมของกระปุกเฟืองทด ลักษณะของผิวฟืนเฟืองที่สึกหรอ รวมไปถึงสภาพของอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการสึกหรอภายใต้การทดสอบในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อสามารถวิเคราะห์ถึงระดับความรุนแรงของการสึกหรอ รูปแบบ/กลไกของการชำรุดและการวินิจฉัยถึงระดับความรุนแรงของการสึกหรอจากไฟฟ้ารั่วผ่านกระปุกเฟืองทดโดยการวิเคราะห์รูปพรรณสัณฐานของอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

**คำหลัก:** กระปุกเฟืองทด, การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอ, การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์, ไฟฟ้ารั่ว

## **Abstract**

Electrical pitting will continue to be one of the major causes for premature bearing, motor and gearbox failures. It should be taken seriously and diagnosed at an early stage. In this particular work, the electrical pitting from wear debris formed by oil-lubricated gearbox was tested. Using different techniques, this study methodologically assesses the effects of electrical currents and mechanical parameters combine with wear debris analysis. The oil-lubricated gearbox was tested using the AC field. Typical characteristics or morphologies of electrical pitting gear wear debris were observed. In addition, the electrical pitting wear regimes, which corresponded to the respective physical and electrical responses, such as; overall electrical signals, gear worn surfaces and the morphology of wear debris were assessed.

**Keywords:** Electrical Pitting, Gearboxes, Wear Debris Analysis

### **1. บทนำ**

การเกิดไฟฟ้ารั่วภายในกระปุกเฟืองทดอุตสาหกรรมอาทิไฟฟ้ารั่วผ่านแบริงและเฟืองคู่สัมผัสจะส่งผลร้ายอย่างมากต่อชุดกระปุกเฟืองทดและอาจส่งผลรวมไปถึงน้ำมันหล่อลื่นภายในและทำให้กระปุกเฟืองทดชำรุดเสียหายขั้นรุนแรงได้ในท้ายที่สุด [1 ถึง 4] อาการที่สามารถตรวจพบได้จากการวัดค่าของเสียง การวิเคราะห์ค่าระดับความสั่นสะเทือน การวัดค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นมักจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สาย

เกินไปและเป็นระยะของการชำรุดที่รุนแรงและเป็นระยะสุดท้ายของการชำรุด การตรวจพบได้ตั้งแต่เนิ่นๆของการเกิดไฟฟ้ารั่วจึงเป็นความท้าทายและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อภาคอุตสาหกรรมการผลิตทั้งในแง่ของฝ่ายผลิตและฝ่ายบำรุงรักษาเครื่องจักรกลเพื่อสามารถเตรียมแผนการรองรับทั้งด้านการวางแผนการผลิตและการวางแผนเพื่อการบำรุงรักษา หลักการทั่วไปในการวิเคราะห์การรั่วทางไฟฟ้าของกระปุกเฟืองทดตั้งแต่เนิ่นๆคือการต่อเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า (ออสซิลโลสโคป) เพื่อตรวจสอบหา

การรื้อไหลทางไฟฟ้าแต่วิธีการ  
ดังกล่าวต้องสิ้นเปลืองทรัพยากรทั้ง  
ในแง่ของค่าใช้จ่ายที่สูงเกินไปและ  
ใช้เครื่องมือที่ราคาแพง รวมไปถึง  
ต้องการผู้เชี่ยวชาญในการวินิจฉัย  
ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้

ความท้าทายที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน  
คือต้องการเทคนิคในการบำรุงรักษา  
เชิงพยากรณ์ที่สามารถระบุถึงการสึก  
หรือจากไฟฟ้ารั่วของชิ้นส่วนใน  
กระปุกเฟืองทดจากการที่ไฟฟ้ารั่ว  
ตั้งแต่เนิ่นๆและเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก  
และมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ  
ต้องการหาแนวทางใหม่ในการทำใน  
การนำไปประยุกต์ใช้ในงานการ  
บำรุงรักษาเชิงพยากรณ์สำหรับการ  
เกิดการรั่วของไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน  
ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางกลโดยเฉพาะ  
ฟันเฟือง โดยการวิเคราะห์จากร  
รูปพรรณสัณฐานของอนุภาคการสึก  
หรือ (Electrical pitting wear  
debris morphological analysis) ที่  
เกิดขึ้นจากการทดสอบการสึกหรือ  
ทางไฟฟ้ากระแสสลับที่รั่วผ่านชุด  
ฟันเฟืองในห้องทดลอง

## 3. ระเบียบวิธีวิจัย

ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้  
กำหนดขึ้นมาจากกลไกการสึกหรือ  
ในลักษณะของกระแสไฟฟ้าสลับที่รั่ว  
ผ่านผิวคู่สัมผัสของฟันเฟืองในชุด

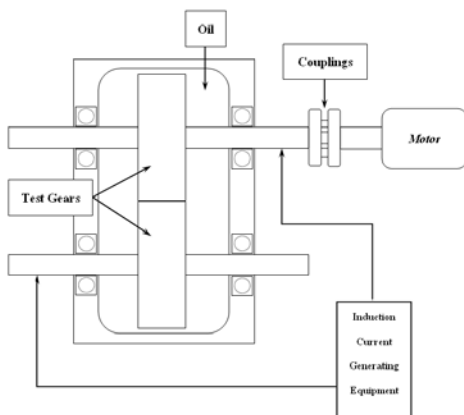
กระปุกเฟืองทดจำลอง ซึ่งได้แก่  
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่องลื่นใน  
ระดับต่างๆ โดยที่อนุภาคการสึกหรือ  
ที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลอง จะ  
สามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลใน  
การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรือที่ได้  
จากตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเพื่อนำไปสู่  
การวิเคราะห์ได้ถึงระดับความรุนแรง  
ของปัญหา (Problem Severity) และ  
สามารถวินิจฉัยปัญหา (Problem  
Diagnostic) และ/หรืออาจนำไปสู่  
การประเมินได้ถึงอายุขัยที่เหลืออยู่  
ของชุดอุปกรณ์ (Problem  
Prognostic or Remaining Useful  
Life (RUL) Assessment) เพื่อ  
ประโยชน์ในการบำรุงรักษาเชิง  
พยากรณ์ที่อาจสามารถมี  
ประสิทธิภาพและประสิทธิผลที่  
ทัดเทียมกับวิธีการบำรุงรักษาเชิง  
พยากรณ์โดยหลักการอื่น อาทิ การ  
วิเคราะห์ค่าสัญญาณทางไฟฟ้า  
(Electrical Signal Analysis) การ  
วิเคราะห์สัญญาณความสั่นสะเทือน  
และเสียง (Vibration and Noise  
Monitoring) หรือการวิเคราะห์ด้วย  
ภาพถ่ายความร้อน (Thermal  
Imaging Analysis)

### 3.1. อุปกรณ์และการดำเนินการ

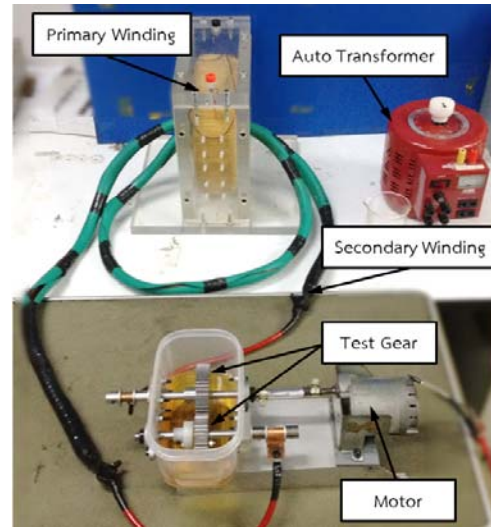
3.1.1 เตรียมชุดกระปุกเฟืองทด  
และชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุด  
กระปุกเฟืองทด ประกอบรวมกับ

มอเตอร์ เพื่อใช้เป็นเครื่องทดสอบการสึกหรอของฟันเฟืองที่มีการรื้อของกระแสไฟฟ้าสลับ โดยตัวเรือนของกระปุกเฟืองทดสอบทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนเพื่อบังคับเส้นทางของกระแสไฟฟ้าให้ผ่านฟันเฟืองคู่สัมผัสเท่านั้น

3.1.2 ต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับชุดเฟืองทดสอบ ดังไดอะแกรมตามรูปที่ 1 และภาพถ่ายแสดงลักษณะการทดสอบโดยรวมตามรูปที่ 2 โดยการใช้อิทธิพลตรวจสอบเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสไฟฟ้าสามารถไหลออกจากขั้วไฟฟ้าลงสู่ชุดเฟืองทดสอบคู่สัมผัสจำลองผ่านแกนเพลลาที่ต่อกับขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 1 ไดอะแกรมเครื่องทดสอบคู่สัมผัสเฟืองทดสอบภายใต้การรื้อผ่านของไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2 แสดงลักษณะเครื่องทดสอบที่ใช้ในการวิจัยและเครื่องมือวัดโดยรวม

3.2. ตัวแปรต้น (Independent Variables) ในการทดสอบที่เป็นปัจจัยหลักของการสึกหรอโดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เพื่อสร้างให้เกิดกระแสไฟฟ้าวในการจำลองครั้งนี้มีดังนี้

### 3.2.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ทำการสร้างและควบคุมค่าความต่างศักย์โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเข้าขดลวดปฐมภูมิเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ มาต่อเข้ากับเครื่องทดสอบให้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการไหลผ่านฟันเฟืองขณะทำงาน โดยปรับค่าความต่างศักย์ที่ 80 โวลต์ 130 โวลต์ ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าวผ่านเฟืองทดสอบ

คู่สัมผัสต่อการสึกหรอและต่อการ  
เกิดขึ้นของอนุภาคการสึกหรอ

3.2.2 ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้ารั่ว  
ผ่าน

ดำเนินการโดยการกำหนดเวลาใน  
การทดสอบพื้นเพื่อคู่สัมผัสแต่ละชุด  
เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของเวลา  
ในการทดสอบที่มีต่อเฟืองทดคู่สัมผัส  
ต่อการสึกหรอและต่อการเกิดขึ้นของ  
อนุภาคการสึกหรอที่ 20 และ 60  
นาที่ตามลำดับ

3.2.3 ภาระที่กระทำต่อเฟืองทดคู่  
สัมผัส

ดำเนินการโดยการกำหนดภาระที่  
กระทำต่อพื้นเพื่อคู่สัมผัสแต่ละชุด  
เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของค่า  
ภาระที่กระทำต่อเฟืองทดคู่สัมผัสต่อ  
การสึกหรอและต่อการเกิดขึ้นของ  
อนุภาคการสึกหรอที่ 20 และ 60 นิน  
ต้นตามลำดับโดยใช้โมเมนต์อาร์ม  
ยาว 4.5 เซนติเมตร (โดยที่ในการ  
ทดลองครั้งนี้ได้กำหนดให้ชนิดสาร  
หล่อลื่นเป็นค่าคงที่โดยการใช้น้ำมัน  
ไฮดรอลิคฐานน้ำมันแร่ความหนืด 32  
เซนติสโตค (cSt: Centistoke) และมี  
ระดับคุณภาพตามมาตรฐาน ISO  
VG 32 HM โดยที่กำหนดให้  
ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของ  
พื้นเฟืองคงที่อยู่ที่ 0.1 เมตรต่อวินาที  
โดยพื้นเฟืองที่ใช้เป็นพื้นเฟืองคู่  
สัมผัสเป็นเฟืองตรง 27 ฟัน และ 48

ฟัน ให้ได้อัตราทด 1:1.78 / โมดูล  
1.5 / หน้า 15 มม. โดยที่เฟืองคู่  
สัมผัสทั้งสองผลิตจากเหล็ก S45C  
ขึ้นรูปด้วยการกัด ไม่ผ่าน  
กระบวนการชุบแข็ง ความหยาบผิว  
เฉลี่ย 50 ไมครอน

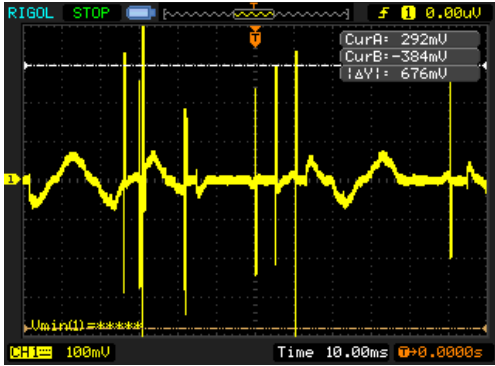
3.2 ตัวแปรตาม (Dependent  
variables) ที่ทำการวัดค่าคือค่าระดับ  
อุณหภูมิ ค่ากระแสไฟฟ้าและการ  
เกิดขึ้นของอนุภาคเศษโลหะจากการ  
สึกหรอ โดยที่ข้อมูลที่สนใจเพื่อ  
นำเสนอในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเฉพาะ  
ข้อมูลด้านรูปพรรณสัณฐานของ  
อนุภาคเศษโลหะจากการสึกหรอที่  
เกิดขึ้นจากไฟฟ้ารั่วเท่านั้น

## 4. ผลการวิจัย

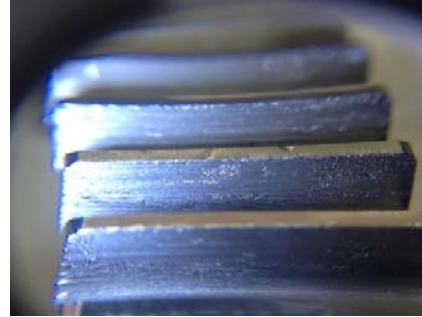
### 4.1. ลักษณะค่าสัญญาณการวัดทาง ไฟฟ้าโดยรวม

จากรูปที่ 3 และ 4 แสดงถึง  
ลักษณะของสัญญาณทางไฟฟ้าที่  
บันทึกได้จากออสซิลโลสโคปซึ่ง  
สามารถแสดงได้ถึงความแตกต่าง  
ระหว่างการเกิดกระแสไฟฟ้าสลับรั่ว  
ผ่านพื้นเฟืองอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเริ่มมี  
กระแสไฟฟ้ารั่วผ่านในลักษณะที่ไม่  
รุนแรง (รูปที่ 3) และขณะที่รุนแรง  
(รูปที่ 4)

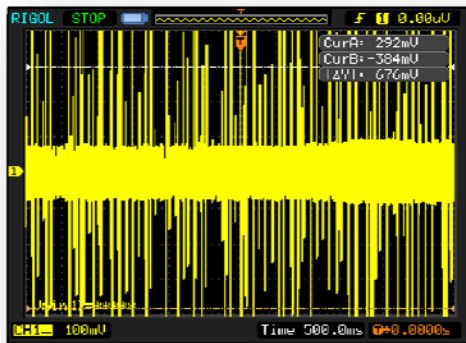




รูปที่ 3 สัญญาณเมื่อไฟฟ้ารั่วผ่านแบบไม่รุนแรง



รูปที่ 5 การสึกหรอแบบตามดทางไฟฟ้าระยะเริ่มเริ่มต้นของฟันเฟืองทดสอบ



รูปที่ 4 สัญญาณเมื่อไฟฟ้ารั่วผ่านแบบรุนแรง



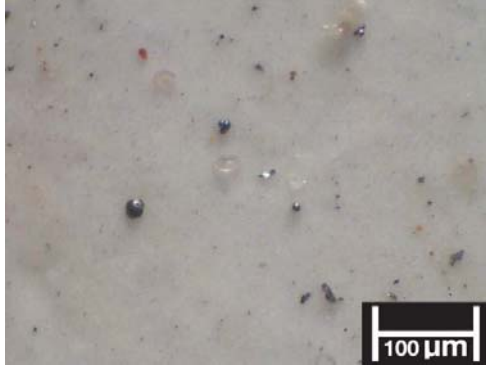
รูปที่ 6 การสึกหรอแบบตามดทางไฟฟ้าระยะรุนแรงของฟันเฟืองทดสอบ

#### 4.2. ลักษณะการสึกหรอที่เกิดที่ผิวฟันเฟืองคู่สัมผัส

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 จะเห็นว่าลักษณะของตามดที่เกิดจากการสึกหรอที่มีกระแสไฟฟ้ารั่วผ่าน (Electrical pitting) จะเริ่มเกิดขึ้นจากบริเวณเส้นสัมผัสและกระจายตัวออกเต็มหน้าสัมผัสของฟันเฟืองเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยที่ขนาดของความรุนแรงของการสึกหรอขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ที่ให้กับขดลวดปฐมภูมิ

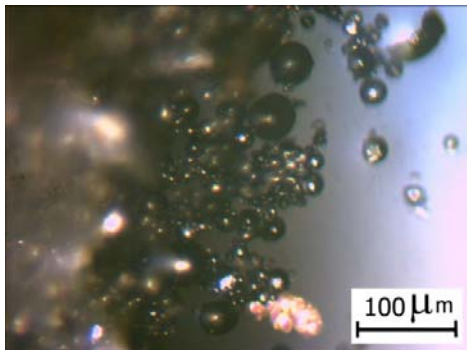
#### 4.3. อนุภาคการสึกหรอที่ได้จากสารหล่อลื่น

อนุภาคการสึกหรอที่ได้จากสารหล่อลื่นในช่วงการสึกหรอเริ่มต้นจะมีส่วนที่เกิดการสึกหรอจากไฟฟ้ารั่วผ่านกับส่วนที่เกิดจากการสึกหรอทางกลดังรูปที่ 7 โดยที่อนุภาคการสึกหรอส่วนใหญ่ ที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดเล็ก (Normal rubbing wear particles) และเม็ดทรงกลมสีดำ (Black spherical particles) ปริมาณไม่มากนัก



รูปที่ 7 อนุภาคการสึกหรอที่ได้จากสารหล่อลื่นในช่วงการสึกหรอเริ่มต้น

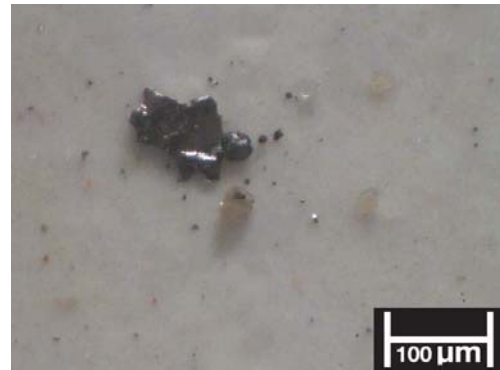
รูปที่ 8 แสดงลักษณะของอนุภาคการสึกหรอที่ได้จากสารหล่อลื่นในช่วงการสึกหรอที่รุนแรงระดับปานกลาง โดยที่อนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเม็ดกลมขนาดโตกว่า 10 ไมครอนเป็นจำนวนมาก



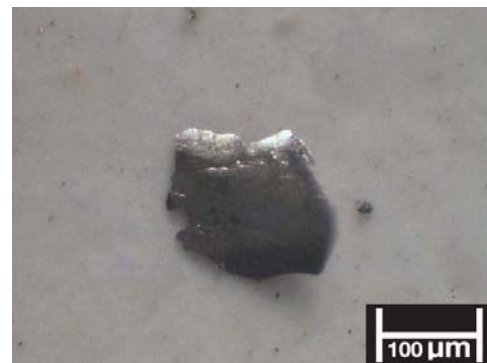
รูปที่ 8 อนุภาคการสึกหรอที่ได้จากสารหล่อลื่นในช่วงการสึกหรอรุนแรงปานกลาง

ในขณะที่ลักษณะของอนุภาคการสึกหรอที่ได้จากสารหล่อลื่นในช่วงการสึกหรอที่รุนแรงมากจะมีอนุภาคส่วนใหญ่ มีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่

(Fatigue chunk) และมีอนุภาคเม็ดกลมขนาดโตกว่า 10 ไมครอนปะปนอยู่ด้วยแต่มีปริมาณไม่มากเท่ากับระยะการสึกหรอแบบรุนแรงปานกลาง (ดังแสดงในรูป 9 ถึง 11)



รูปที่ 9 อนุภาคการสึกหรอที่ได้จากสารหล่อลื่นในช่วงการสึกหรอรุนแรง (แสดงถึงอนุภาคแบบทรงกลมกับอนุภาคจากการล้าตัว)



รูปที่ 10 อนุภาคการสึกหรอแบบล้าตัวที่ได้จากสารหล่อลื่นในช่วงการสึกหรอรุนแรง



รูปที่ 11 อนุภาคการสึกหรอที่ได้จากสารหล่อลื่นในช่วงการสึกหรอรุนแรง (แสดงอนุภาคทรงกลมและอนุภาคแบบลำตัว)

## 5. อภิปรายผล

5.1 จากการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เข้าขดลวดปฐมภูมิทำให้พบว่าทำให้กระแสไฟฟ้าจากขดลวดทุติยภูมิที่ไหลผ่านฟันเฟืองมีค่าสูงขึ้นและจะส่งผลให้เข้าไปสู่การสึกหรอที่รุนแรงมากขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าวัดโดยรวมของสัญญาณทางไฟฟ้า

5.2 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการที่มีกระแสไฟฟ้าสลับรั่วผ่านฟันเฟืองสามารถสังเกตได้โดยตรงจากการวิเคราะห์สภาพของผิวฟันเฟืองโดยจะสังเกตได้จากลักษณะของตามด (Pitts) ที่บริเวณเส้นสัมผัส (เกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นของการเกิดไฟฟ้ารั่วผ่าน) และขยายพื้นที่ออกไปบนผิวฟันเฟืองในระยะลุกลามหรือการสึกหรอแบบรุนแรงในภายหลัง

5.3 นอกเหนือจากการวิเคราะห์ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าโดยรวมและการ

วิเคราะห์สภาพผิวของฟันเฟืองแล้วนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ได้มุ่งประเด็นไปที่การวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอที่แขวนลอยอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเฟืองทดคู่สัมผัส จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งเป็นสามลักษณะ (แบ่งตามระยะของการเกิดไฟฟ้ารั่วสามระยะคือระยะเริ่มต้น ระยะการสึกหรอแบบรุนแรงปานกลางและระยะการสึกหรอแบบรุนแรงมาก) คือ อนุภาคแบบเม็ดทรงกลมสีดำขนาดเล็กและอนุภาคแบบแผ่นขนาดเล็กในระยะที่หนึ่งของการสึกหรอและตามมาด้วยอนุภาคเม็ดทรงกลมสีดำปริมาณและขนาดโตกว่า 10 ไมครอนจำนวนมากในระยะลุกลาม ท้ายที่สุดในระยะที่มีการสึกหรอรุนแรงมากจะพบอนุภาคการสึกหรอขนาดใหญ่ (Fatigue chunk) เกิดขึ้นซึ่งสื่อความหมายถึงการที่ฟันเฟืองทดคู่สัมผัสเข้าสู่ระยะสุดท้ายของการสึกหรอ

## 6. สรุปผลการวิจัย

จากผลงานวิจัยนี้พบว่าอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้นภายใต้การเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านฟันเฟืองคู่สัมผัสมีลักษณะรูปพรรณสัณฐานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของการเกิดไฟฟ้ารั่ว

และผลจากการวิเคราะห์อนุภาคการสึกหรอจากการวิจัยนี้ได้แสดงถึง



ความเป็นไปได้ขั้นต้นเพื่อนำไปต่อยอดในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล ทั้งนี้เนื่องจากสามารถทำการวิเคราะห์ได้ถึงระดับความรุนแรงของปัญหา การวินิจฉัยกลไกที่ทำให้เกิดปัญหาหรือแม้กระทั่งการประเมินอายุขัยที่เหลืออยู่ได้โดยไม่ต้องรื้อถอนระบบเพื่อการวิเคราะห์แยกเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์สภาพของผิวฟันเพื่อการหรือการต้องหยุดการใช้งานเพื่อการใช้กล้องบอโรสโคป (Boroscope) หรือการใช้อุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าอย่างเช่นออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่อาจเป็นไปได้ยากในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Raadnui and Kleesuwan S., “Electrical pitting wear debris analysis of grease-lubricated rolling element bearings”, *Wear* 271 (2011) 1707-1718

[2] E. Forlerer, R. Castillo Guerra and E. Ermini, “Used of topographic polymeric replica to characterize electric corrosion failure”, *Wear* 263 (2007) 1508-1512

[3] Y.C. Chiou, R.T. Lee and C.M. Lin, “Formation criterion and mechanism of electrical pitting on the lubricated surface under AC electric field”, *Wear* 236 (1999) 62-72

[4] Y.C. Chiou, R.T. Lee and S.M. Lin, “Formation criterion and mechanism of electrical damage on sliding lubricated contacts for steel pair under DC electric field”, *Wear* 266 (2009) 110-118