

Received: Mar 23, 2021

Revised: Apr 30, 2021

Accepted: Mar 10, 2021

## การวิเคราะห์เศษอนุภาคการสึกหรอของเฟืองตรง WEAR PARTICLE ANALYSIS OF SPUR GEAR

สนธิรัตน์ อินทสนธิ

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

Sontinan Intasonti

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

E-mail: intasonti@gmail.com

### บทคัดย่อ

เฟืองเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องจักรในภาคอุตสาหกรรมหรือสถานประกอบการ ข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับเฟืองอาจนำไปสู่การทำให้เครื่องจักรหยุดชะงักในการทำงานส่งผลให้เกิดการสูญเสียในการผลิต เทคนิควิธีการต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน, การวิเคราะห์ภาพถ่ายทางความร้อน, การวิเคราะห์สัญญาณช็อคพัลส์ และการวิเคราะห์คลื่นเสียงหรืออะคูสติกอีมิสชัน สำหรับการวินิจฉัยความผิดปกติของเฟืองได้รับการยอมรับเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เศษอนุภาคการสึกหรอสำหรับการวินิจฉัยและการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของเครื่องจักรนั้นยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น บทความนี้จะอธิบายถึงการตรวจสอบเชิงทดลองเกี่ยวกับเฟืองตรง ซึ่งกลไกการสึกหรอที่จำลองให้เกิดขึ้นนั้น ได้แก่ การสึกหรอที่เกิดขึ้นทางกลสภาวะปกติ, การถูกกัดกร่อนจากกรดและการสึกหรอจากสิ่งเจือปนของแข็ง ตัวอย่างหลังการทดสอบของเศษการสึกหรอถูกรวบรวมและประเมินโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเศษการสึกหรอกับการเสื่อมสภาพของเฟืองที่สึกหรอ ผลการวิจัยเบื้องต้นที่นำเสนอในงานนี้สามารถสรุปได้ว่าลักษณะการสึกหรอของเศษมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกลไกการสึกหรอที่แตกต่างกัน ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะตรวจสอบวินิจฉัยการสึกหรอของเฟืองจากการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาของเศษอนุภาคการสึกหรอ

**คำสำคัญ:** เฟืองตรง กลไกการสึกหรอ การวิเคราะห์เศษอนุภาคการสึกหรอ

### Abstract

The gearbox is an important machinery component in any industry. Any defect in gears could lead to machine downtime resulting in a loss of production. Techniques such as vibration, thermography, shock pulse monitoring and noise or acoustic emission for gear fault diagnosis are well established, however, the application of wear debris analysis to diagnosis and prognostic tool life is still in its infancy stage. This paper describes an experimental investigation on a pair of spur gear in which induced wear mechanisms were allowed to occur, namely; mechanical induced wear, acid-attacked corrosion and hard contaminant related wear. The tests samples of wear debris were collected and assessed through the utilization of an optical microscope in order to correlate and compare the debris morphology to wear degradation of the worn gears. Preliminary results presented in this work that wear debris characteristics exhibited a direct relationship with different wear mechanisms, Thus, it should be possible to detect, diagnose gear wear utilization of wear debris morphological analysis.

**Keywords:** Spur gear, Wear mechanism, Wear debris analysis

## บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันเฟืองเป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลังที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมหรือสถานประกอบการ ปัญหาอย่างหนึ่งสำหรับผู้ขาดความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับเรื่องเฟือง คือ การสึกหรอและความเสียหายต่างๆ บนเฟืองหลายครั้งที่ไม่ทราบถึงสาเหตุของความเสียหายดังกล่าวที่เกิดขึ้น จึงต้องทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายมากมายไปกับการแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อให้เครื่องจักรกลสามารถใช้งานต่อไปได้ ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์สาเหตุและปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้เกิดการชำรุดเสียหายของเฟืองจากรูปปร่างลักษณะพิเศษที่เกิดขึ้นว่าลักษณะพิเศษแบบต่างๆ เกิดจากสาเหตุใด เทคนิควิธีการต่างๆ เช่น การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน, การวิเคราะห์ภาพถ่ายทางความร้อน, การวิเคราะห์สัญญาณข้อผิดพลาดและการวิเคราะห์คลื่นเสียง สำหรับการวินิจฉัยความผิดปกติของเฟืองได้รับการยอมรับเป็นอย่างดี [1-4] อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เศษอนุภาคการสึกหรอสำหรับการวินิจฉัยและการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของเครื่องจักรยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น [5-6] จึงเป็นที่มาของการออกแบบและสร้างเครื่องจำลองการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนเฟืองและวิเคราะห์เศษการสึกหรอในสภาวะต่างๆ โดยการนำเศษไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อสามารถจำแนกประเภทและลักษณะที่แตกต่างกันของการสึกหรอ เพื่อนำไปใช้ได้ถูกต้องกับปัญหาในเครื่องจักรจริงในลำดับต่อไป

## ระเบียบการวิจัย

### การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของฟันเฟืองตรง

ออกแบบและจัดสร้างเครื่องต้นแบบดังภาพที่ 1 ถึงภาพที่ 4 เพื่อจำลองการทำงานคล้ายกับระบบภายในของเครื่องจักรกล และใช้เพื่อทดสอบการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับเฟืองตรง โดยใช้เฟืองตรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm หนา 25 mm จำนวนฟัน 25 ฟัน โมดูล 1.5 วัสดุทำจากเหล็ก S45C ความเร็วรอบของเพลา 250 rpm ความเร็วขอบของเฟือง 0.52 m/s ภาระกดบนโหลดแบบเบรกดุม 2 kg ภาระที่กระทำกับเฟือง 30.8 N ไซมอเตอร์ขนาด 36 W DC 24 V 500 rpm โดยที่ความเร็วขอบของเฟืองนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$v = \frac{\pi (D)(N)}{1000 (60)} \quad (1)$$

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วขอบของเฟือง มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที (m/s)

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟือง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

$N$  คือ ความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm : revolutions per minute)

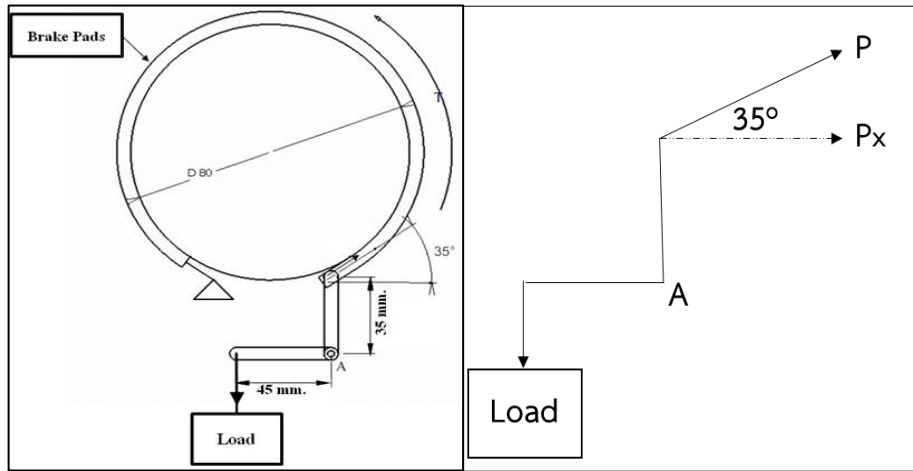
หมายเหตุ: สูตรที่ใช้คำนวณความเร็วขอบ คือ สูตรที่ใช้คำนวณความเร็วตัดนั่นเองที่หารด้วย 60 เพื่อเปลี่ยนเวลาเป็นวินาที (s) ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D$ ) = 40 mm และความเร็วรอบของเพลา ( $N$ ) = 250 rpm

จะได้

$$v = \frac{\pi (40)(250)}{1000 (60)} \\ = 0.52 \text{ m/s}$$

ดังนั้น ความเร็วขอบของเฟืองมีค่าเท่ากับ 0.52 m/s

ภาระทางกลที่กระทำกับเฟืองตรงแสดงไว้ดังภาพที่ 1 สามารถปรับค่าได้โดยใช้อุปกรณ์ถ่วงน้ำหนัก โดยค่าภาระที่สนใจได้กำหนดไว้ คือ 2 kg ทั้งนี้เพื่อทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของภาระทางกลที่มีต่ออนุภาคการสึกหรอทางกลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 ดังนี้



ภาพที่ 1 ภาระทางกลที่กระทำกับเฟืองตรง

$$M = F (S) \tag{2}$$

เมื่อ  $M$  คือ โมเมนต์ของแรง มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (Nm)  
 $F$  คือ แรง มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)  
 $S$  คือ ระยะทางตั้งฉากจากจุดหมุนถึงแนวแรง มีหน่วยเป็น เมตร (m)

หาค่า  $P$  จาก  $\sum M_A = 0$

$$[0.045 (2) (9.81)] - (0.035) P_x = 0$$

$$P_x = 25.23 \text{ N}$$

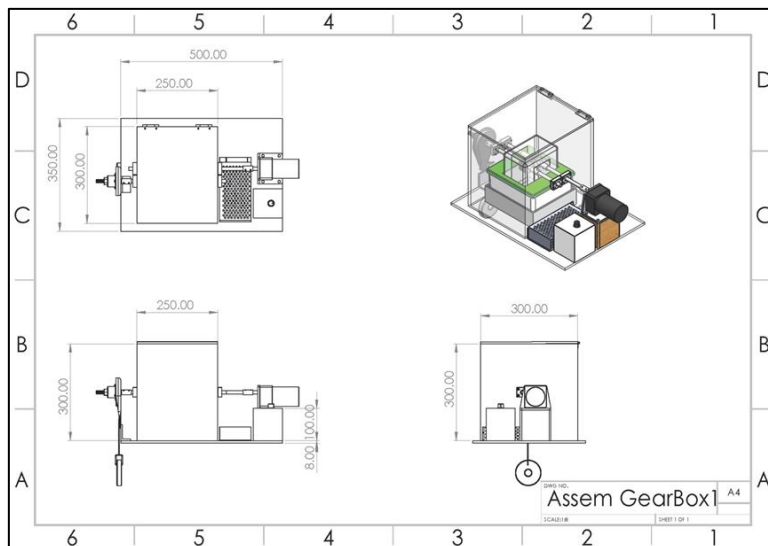
จาก  $P_x = P \cos \theta$

$$P = \frac{P_x}{\cos \theta}$$

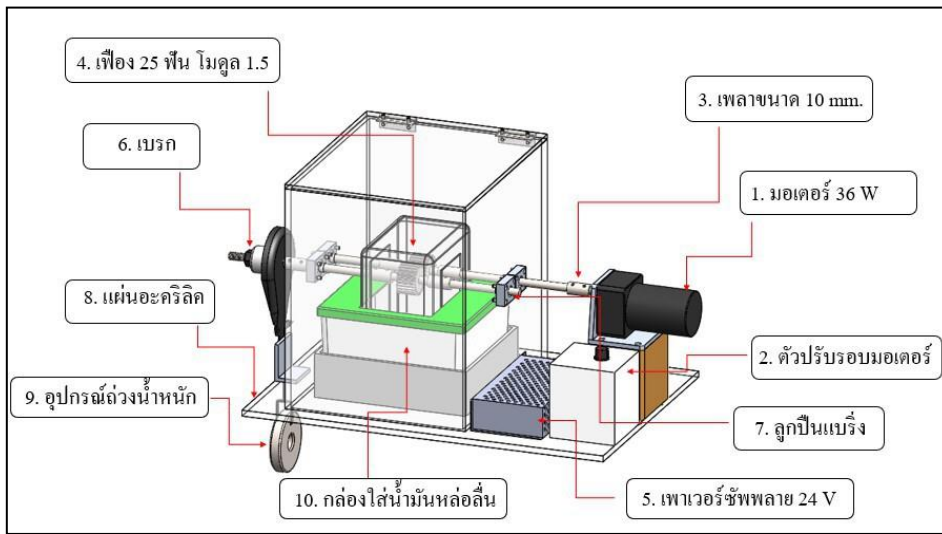
$$= \frac{25.23}{\cos 35^\circ}$$

$$= 30.8 \text{ N}$$

ดังนั้น ภาระทางกลที่กระทำกับเฟืองมีค่าเท่ากับ 30.8 N



ภาพที่ 2 ออกแบบเครื่องทดสอบการสึกหรอดันแบบโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องทดสอบการสึกหรอด้านแบบ



ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบการสึกหรอด้านแบบสำหรับการทดลอง

**การทดลอง**

1. ทดสอบใน 3 สภาวะ คือ เฟืองในสภาวะปกติ, มีสิ่งเจือปนของแข็ง (ฝุ่น, ทราย) ภายในระบบไหลเวียนสารหล่อลื่นและเฟืองถูกกัดด้วยกรด โดยในแต่ละสภาวะนั้นทดสอบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยทรายที่ใช้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 และสำหรับในสภาวะที่เฟืองถูกกัดด้วยกรดจะใช้กรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ความเข้มข้น 38 % แช่ไว้ในระยะเวลา 45 นาที ก่อนทำการทดสอบ สำหรับสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือ SAE 30
2. นำเฟืองที่ผ่านการทดสอบมาแล้วมาถ่ายภาพวีรรอยการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์และบันทึกภาพ
3. นำสารหล่อลื่นที่ปนกับเศษโลหะจากการสึกหรอแต่ละการทดลองมาทำการกรองโดยใช้กระดาษกรองละเอียด 0.45 ไมโครเมตร (ไมครอน) เพื่อแยกเศษอนุภาคการสึกหรอออกจากสารหล่อลื่น โดยเรียกวิธีนี้ว่า Filtergram Analysis
4. นำกระดาษกรองละเอียด 0.45 ไมโครเมตร (ไมครอน) ที่ผ่านการกรองแล้วไปส่องกล้องจุลทรรศน์และบันทึกภาพ

ตารางที่ 1 ลักษณะของอนุภาคของแข็งที่ใช้ในการศึกษา

อนุภาคของแข็ง (SiO <sub>2</sub> particles)	
ความหนาแน่น (Density)	2.2 g/ml
ความแข็ง (Hardness)	6–7 Mohs
ความแข็งแรงต่อการอัด (Compressive Strength)	1100 MPa
ขนาด (Particle Size)	250–300 µm







### สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองทั้งหมด 3 โหมดของการสึกหรอ พบว่าสภาวะไร้สารหล่อลื่นมีเศษของเฟืองจากการขบกันพื้นผิวเป็นคลื่นเกิดความเค้นที่เกินจุดครากเกิดความร้อนสูงทำให้ผิวที่แข็งน้อยกว่าหลุดออก เรียกว่า การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) สภาวะที่สารหล่อลื่นมีการเจือปนด้วยสิ่งสกปรก (ฝุ่น, ทราย) จะเกิดรอยขีดข่วนและจุดรอยไม่แน่นอนกระจายไปทั่ว เป็นเพราะทรายมีความแข็งกว่าแทรกตัวอยู่ระหว่างพื้นเฟือง เรียกว่า การสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear) ในสภาวะถูกกัดด้วยกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) พื้นผิวจะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์กัดจนโลหะผุกร่อนเป็นสีส้ม-ดำ จุดๆ ซึ่งเมื่อส่องกล้องจุลทรรศน์ดูโครงสร้างจะเห็นการเสีรูปผุกร่อนที่รุนแรงผิวหน้าเสียไปสมบัติทางกลลดลง เรียกว่า การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosion Wear)

จากการวิเคราะห์ตารางที่ 2 เมื่อทดสอบเฟืองในสภาวะไร้สารหล่อลื่นภาพผิวพื้นเฟืองหลังการทดลองมีลักษณะเป็นรอยไหม้สีดำ รอยไกล ถลอก บนผิวของพื้นเฟือง รูปร่างลักษณะเศษที่เกิดขึ้นเป็นเศษเหล็กที่เล็กมาก มีทรงกลมประปราย ในการทดสอบเฟืองในสภาวะในน้ำมันหล่อลื่นผสมสิ่งสกปรก (ฝุ่น, ทราย) ภาพผิวพื้นเฟืองหลังทดลองมีลักษณะเกิดการสึกหรอแบบตามร่องที่รุนแรง เศษอนุภาคที่เกิดขึ้นจะมีเศษโลหะเหล็กผสมกับเศษอนุภาคสิ่งปนเปื้อนและในการทดสอบเฟืองในสภาวะที่เฟืองถูกกัดด้วยกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ภาพผิวของพื้นเฟืองก่อนการทดลองมีการเกิดการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกอย่างรุนแรงมีรูพรุนที่ผิวของพื้นเฟืองเป็นจำนวนมาก ภาพผิวพื้นเฟืองหลังทดลองมีลักษณะมีการเกิดการสึกหรอแบบตามร่อง มีการหลุดร่อนบริเวณผิวที่ถูกกัดเป็นแถบขนาดใหญ่และสีเปลี่ยนเป็นสีออกคล้ำๆ รูปร่างลักษณะเศษที่เกิดขึ้นมีรูปร่างเป็นเม็ดๆ มีทรงกลมปะปน จากการศึกษาพฤติกรรมของการสึกหรอของพื้นเฟืองแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่ต่างกันทำให้ลักษณะผิวของพื้นเฟืองและเศษโลหะที่เกิดการสึกหรอขึ้นแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบลักษณะผิวรอยการสึกหรอของพื้นเฟืองและเศษที่เกิดขึ้นจากสภาวะที่แตกต่างกัน

สภาวะ	ภาพผิวพื้นเฟือง ก่อนการทดสอบ	ภาพผิวพื้นเฟือง หลังการทดสอบในเวลา 2 ชั่วโมง	ภาพเศษอนุภาคการสึกหรอ ที่เกิดขึ้น
ไร้สารหล่อลื่น			

มีสิ่งสกปรก (ฝุ่น, ทราย)			
กรดซัลฟิวริก (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	 ภาพหลังจากแช่กรดเป็นเวลา 45 นาที		

อย่างไรก็ตามในการทดลองของงานนี้นั้นจำนวนการทดลองยังมีน้อยซึ่งการทดลองควรมีการทำซ้ำในแต่ละสภาวะการเกิดและตรวจสอบว่าเหมือนกันหรือไม่อย่างไรเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น การทดลองนี้สามารถเพิ่มปัจจัยเงื่อนไขต่างๆ ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของเศษการสึกหรอเนื่องมาจากผลกระทบได้มากขึ้น เพื่อนำไปใช้อย่างถูกต้องกับเครื่องจักรจริงในลำดับถัดไปซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุและหาวิธีการป้องกันแก้ไขต่าง ๆ ได้ทันเวลานำไปสู่การลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลทำให้เครื่องจักรไม่หยุดชะงักก่อนเวลาที่กำหนดและส่งผลกระทบต่อการผลิตได้

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยปทุมธานี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ สถานที่และงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Elasha, F., Ruiz-Cárcel, C., Mba, D., Kiat, G., Nze, I., & Yebra, G. (2014). Pitting detection in worm gearboxes with vibration analysis. *Engineering Failure Analysis*, 42, 366-376.
- [2] Elforjani, M., Mba, D., Muhammad, A., & Sire, A. (2012). Condition monitoring of worm gears. *Applied Acoustics*, 73(8), 859-863.
- [3] Waqar, T., & Demetgul, M. (2016). Thermal analysis MLP neural network based fault diagnosis on worm gears. *Measurement*, 86, 56-66.
- [4] Resendiz-Ochoa, E., Saucedo-Dorantes, J. J., Benitez-Rangel, J. P., Osornio-Rios, R. A., & Morales-Hernandez, L. A. (2020). Novel Methodology for Condition Monitoring of Gear Wear Using Supervised Learning and Infrared Thermography. *Applied Sciences*, 10(2), 506.
- [5] Raadnui, S. (2020). Statistical and physical wear analysis of spur gear for maintenance diagnostics. *International Journal of COMADEM*, 61-67.
- [6] Darpe, A. K., & Hirani, H. (2020). Classification of stages of wear in spur gears based on wear debris morphology. In *PHM Society European Conference*. Vol. 5, No. 1, pp. 9-9.