บทที่ 6
สรุปผลวิทยานิพนธ์

6 – 1 สรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

1) การทดลองแบบไม่มีภาระ

- สัญญาณโดเมนเวลา Peak และ RMS มีค่ามากขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มมากขึ้นถึงระดับ 2.45 – ระดับ 4 ซึ่งปลายฟันมีการสึกไปแล้วถึง 66 % จากนั้นค่าค่อยๆลดลงเรื่อยๆ ส่วนค่า Crest Factor ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มมากขึ้น
- ค่าสัญญาณสเปกตรัม GMF SBP SBG และฮาร์มอนิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสัญญาณโดเมนเวลาแต่ยังไม่มีความแน่นอนของรูปแบบฮาร์มอนิกในทุกสัญญาณ
- ค่าสัญญาณเซปส์ตรัม 1/P มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มถึงระดับ 1 จากนั้นค่าค่อนข้างคงที่จนถึงระดับสึกหรอสุดท้าย ค่า 2/P และ 1/G ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มมากขึ้น

2) การทดลองแบบมีภาระ

- สัญญาณโดเมนเวลา Peak และ RMS มีค่ามากขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มมากขึ้น โดยค่า Peak มีการเปลี่ยนแปลงเด่นชัดกว่า ส่วนค่า Crest Factor ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มมากขึ้น
- ค่าสัญญาณสเปกตรัม GMF ,SBP ,SBG และฮาร์มอนิกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มมากขึ้น
- ค่าสัญญาณเซปส์ตรัม 1/P มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มถึงระดับ 2 – ระดับ 2.45 ซึ่งปลายฟันมีการสึกหรอ 40 – 45 % จากนั้นค่าจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ ค่า 2/P และ 1/G ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มมากขึ้น

3) สัญญาณโดเมนเวลามีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของสัญญาณต่อระดับการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด ส่วนสัญญาณเซปส์ตรัมมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของสัญญาณต่อระดับการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด

4) ผลของภาระที่มากขึ้นทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของสัญญาณต่อระดับการสึกหรอมากกว่าที่ภาระต่ำ เนื่องจากการมีภาระเป็นสภาวะการใช้งานจริงของเฟืองโดยทั่วไปดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้สัญญาณวิเคราะห์การสึกหรอของเฟือง โดยเลือกใช้ความสัมพันธ์ของสัญญาณและขั้นตอนในการวิเคราะห์ให้เหมาะสม

5) ความเร็วรอบมีผลโดยตรงต่อสัญญาณสเปกตรัมและเซปส์ตรัม ทำให้ตำแหน่งของสัญญาณ GMF SBP SBG 1/P 2/P และ 1/G เปลี่ยนไป และมีผลให้ระดับการสั่นสะเทือนสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น แต่ผลเนื่องจากภาระจะทำให้ระดับการสั่นสะเทือนสูงขึ้นมากกว่าและมีรูปแบบเฉพาะของความสัมพันธ์แต่ละสัญญาณ

6) สัญญาณสเปกตรัมมีความไวต่อตำแหน่งของทรานสดิวเซอร์มากที่สุด สัญญาณเซปส์ตรัมและโดเมนเวลามีความไวต่อตำแหน่งทรานสดิวเซอร์น้อยมาก เป็นเพราะสัญญาณสเปกตรัมเป็นสัญญาณความถี่ที่ความเร็วรอบบางค่าอาจกระตุ้นให้เกิดความถี่ธรรมชาติขึ้นได้ในบางแนวแกน สัญญาณสเปกตรัมจะแสดงค่าแอมพลิจูดที่สูงผิดปกติได้ที่ความถี่นั้น ในขณะที่สัญญาณโดเมนเวลาแสดงระดับสั่นสะเทือนโดยรวมที่ทุกๆ ความถี่ในช่วงเวลาที่วัดและสัญญาณเซปส์ตรัมแสดงความเป็นคาบของสัญญาณสเปกตรัมดังนั้นจึงไม่สามารถสังเกตเห็นผลของความถี่ที่ถูกกระตุ้นที่แนวแกนต่างๆที่วัดสัญญาณได้

7) ในกรณีที่เฟืองมีปัญหาการสึกหรอเพียงอย่างเดียวความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป ค่าสัญญาณไม่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ซึ่งสังเกตได้จากผลความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสามชนิดที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไม่ว่าจะเพิ่มหรือลดค่าสัญญาณไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเดิมไปมากนัก จึงพอสรุปได้ว่าถ้าวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแล้วพบการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณแบบทันทีทันใดแล้วแสดงว่าเฟืองอาจมีปัญหาอื่นเกิดขึ้น เช่น เฟืองแตกร้าว และ ฟันเฟืองหัก เป็นต้น

6 – 2 สรุปผลโพรไฟล์ของเฟืองที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ได้เตรียมเฟืองที่มีโพรไฟล์ต่างๆกันซึ่งแสดงถึงระดับการสึกหรอต่างๆกันนั้น เพื่อที่จะนำเฟืองที่มีการสึกหรอที่ระดับนั้นๆมาทดลองซ้ำกันหลายๆครั้งและหลายสภาวะการทดลองเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของการทดลอง โดยถือว่าเฟืองมีการสึกหรอเพิ่มขึ้นน้อยมากระหว่างการทดลอง เนื่องจากในการทดลองก่อนหน้านี้ของสมชาย [1] ได้ใช้เวลาในการทดลองทั้งสิ้น 2247 นาที เฟืองจึงมีการสึกหรอที่บริเวณปลายฟันไปประมาณ 35 –40 % ซึ่งการสึกหรอของสมชายนั้นตรงกับระดับการสึกหรอที่ 2 ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ และในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้มีการทดลองเพื่อให้เฟืองมีการสึกหรอค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาทำงานของเฟือง เฟืองแต่ละตัวใช้เวลาในการทดลองทั้งสิ้นไม่เกิน 1 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการทดลองของสมชายแล้วต้องใช้เวลามากกว่า 37 ชั่วโมงในการทำให้เฟืองสึกหรอเพิ่มขึ้น 40 % ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมติฐานเบื้องต้นได้ว่าเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแล้วเฟืองจะไม่มีการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่ผลของการวัดโพรไฟล์เฟืองปรากฏว่าที่บริเวณปลายฟันก็ยังเป็นไปตามสมมติฐานนี้ คือมีการสึกหรอเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่บริเวณโคนฟันนั้นมีการสึกหรอเพิ่มขึ้นมากโดยเฉพาะเฟืองที่ระดับสึกหรอสูงๆ ผลของโพรไฟล์ที่เปลี่ยนไปนี้ย่อมกระทบต่อผลการทดลองคือ ระดับการสึกหรอที่ใช้แสดงความสัมพันธ์นั้นไม่คงที่ตลอดการทดลอง แต่จากผลของค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จะพบว่าความเสียหายแบบการสึกหรอนั้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไป ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในลักษณะทันทีทันใด ดังนั้นผลของโพรไฟล์ที่เปลี่ยนไปจะทำให้ค่าระดับการสึกหรอที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ในแกนนอนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น (เลื่อนไปทางขวา) เล็กน้อย ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอาจจะเปลี่ยนแปลงไปบ้างเมื่อระดับสึกหรอเปลี่ยนแปลงไป แต่รูปแบบของความสัมพันธ์ที่เป็นจริงเมื่อคิดผลกระทบของโพรไฟล์ที่เปลี่ยนแปลงไปน่าจะมีรูปแบบใกล้เคียงกับผลของความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองนี้ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้ว

6 – 3 ความเป็นไปได้ในการใช้สัญญาณโดเมนเวลา สเปกตรัม และ เซปส์ตรัมในการวิเคราะห์การสึกหรอของเฟือง

จากข้อสรุปดังกล่าวพบว่าไม่มีวิธีการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณใดที่ให้ผลการวิเคราะห์ได้สมบูรณ์แบบ การใช้สัญญาณเซปส์ตรัมวิเคราะห์ปัญหาการสึกหรอของเฟืองดูเหมือนจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณมีจุดสูงสุดแล้วค่าจึงลดลงซึ่งอาจใช้จุดนี้เป็นจุดสังเกตของระดับสึกหรอที่เกินค่าที่ยอมรับได้(จุดสูงสุดอยู่ในช่วงระดับสึกหรอที่ 2 - 2.45 เทียบเท่า

กับการสึกหรอที่ปลายฟัน 40 – 45 % ของโพรไฟล์เต็ม) ค่าสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับเฟืองที่มีการสึกหรอมีค่าสัญญาณแยกออกจากค่าสัญญาณอื่นได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ค่าสัญญาณเซปส์ตรัมยังมีความเฉื่อยต่อตำแหน่งของทรานสดิวเซอร์ที่วัด ดังนั้นจึงสามารถวัดสัญญาณที่ตำแหน่งใดก็ได้ที่สะดวก แต่ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณเซปส์ตรัมก็ยังมีอยู่ เช่น มีความไวต่อระดับสึกหรอค่อนข้างน้อยที่ระดับภาระต่ำๆ จึงไม่เหมาะที่จะใช้วิเคราะห์การสึกหรอของเฟืองที่รับภาระต่ำๆ ดังนั้นวิธีวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนสำหรับชุดเฟืองที่มีปัญหาการสึกหรอวิธีที่ดีที่สุดคือใช้เทคนิกการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณชนิดต่างๆร่วมกัน เพื่อเสริมข้อดีและลดข้อด้อยของการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณชนิดต่างๆ

- สัญญาณโดเมนเวลาใช้บอกระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมเบื้องต้น
- สัญญาณสเปกตรัมใช้บอกที่มาของการสั่นสะเทือนที่มากกว่าปกติ ถ้าเป็นที่ความถี่ GMFของเฟืองคู่ใด อาจเกิดปัญหาอย่างใดอย่างหนึ่งที่ชุดเฟืองที่ขบกันที่ความถี่นั้น
- สัญญาณเซปส์ตรัมใช้บอกตำแหน่งเฟืองตัวที่มีความเสียหายในชุดเฟืองนั้น ซึ่งถ้าสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับความเร็วรอบของเฟืองตัวนั้นมีรูปแบบเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆถึงระดับหนึ่งแล้วลดลงเรื่อยๆแล้ว แสดงว่าเฟืองตัวนั้นมีการสึกหรอเกิดขึ้นจนถึงระดับที่มากแล้ว

6 – 4 ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป

สภาวะการทดลองมีผลต่อค่าสัญญาณเป็นอย่างมากจึงต้องควบคุมเป็นอย่างดีข้อเสนอแนะและข้อควรปรับปรุงในการทดลองต่อไปมีดังนี้

1) การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนควรรอให้ความเร็วรอบและระดับภาระค่อนข้างคงที่ ถ้าความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงมากระหว่างการทดลองค่าสัญญาณสเปกตรัมและเซปส์ตรัมจะมีค่าลดลงทันทีเนื่องจากสัญญาณทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับความเป็นคาบของสัญญาณ

2) ในการปรับภาระโดยเฉพาะที่ภาระสูงซึ่งในการทดลองคือ 340 วัตต์ ภาระจะมีการเปลี่ยนแปลงเร็วมาก เนื่องจากแรงตึงผ้าเบรกมากทำให้มีแรงเสียดทานเกิดขึ้นสูงจนผ้าเบรกไหม้แรงเสียดทานจะลดลง ซึ่งบางครั้งเมื่อผ้าเบรกไหม้แล้วอาจทำให้ภาระลดลงแบบทันทีทันใดถึง

100 วัตต์ได้ ดังนั้นก่อนวัดสัญญาณทุกครั้งต้องตรวจสอบว่าภาระยังอยู่ในค่าที่ใช้ทดลองหรือไม่

3) ตรวจสอบความแน่นของจุดเชื่อมต่อบ้างเมื่อทดลองไปได้สักสองสามการทดลองเพราะการสั่นสะเทือนอย่างต่อเนื่องทำให้ชุดทดลองมีการหลุดหลวมทางกลเกิดขึ้นได้

4) ดังนั้นในการทดลองต่อไปการควบคุมภาระให้คงที่ควรใช้ระบบภาระของชุดเฟืองที่มีสภาพเสถียรไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าภาระได้ง่าย โดยให้ภาระเป็นลักษณะของการใช้งานจริงมาเชื่อมต่อที่เพลาของเฟืองตาม เช่น ปั๊มป์ เป็นต้น

ในความเป็นจริงแล้วชุดเฟืองที่ใช้งานกันในภาคอุสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นชุดเฟืองทดหลายขั้น (Multi-Stage Gearbox) ซึ่งสามารถนำหลักการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอไปใช้ได้ โดยค่าสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับชุดเฟืองมีเพิ่มขึ้น คือ GMF1 GMF 2 ..... จำนวนสัญญาณเซปส์ตรัมที่เกี่ยวข้องกับเฟืองในระบบก็จะมีมากขึ้นตามจำนวนเฟืองที่มีในชุดเฟือง นอกจากนี้แล้วงานวิจัยนี้ยังช่วยให้เข้าใจลักษณะการสึกหรอของเฟืองมากขึ้น

ผลงานวิจัยนี้เสนอรูปแบบหนึ่งของความเสียหายของชุดเฟืองที่สามารถใช้สัญญาณสั่นสะเทือนวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเฟืองอาจไม่ได้มีการสึกหรอเพียงอย่างเดียว อาจมีปัญหาการแตกร้าว ฟันเฟืองหัก และ ปัญหาอื่นๆอีกหลายรูปแบบ

ดังนั้นเพื่อเพิ่มกรณีศึกษาของความเสียหายของชุดเฟืองจึงควรจะศึกษา " ความสัมพันธ์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับความเสียหายแบบอื่นๆที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้กับชุดเฟือง"
"การใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนระบุตำแหน่งของเฟืองที่เสียหายในชุดเฟืองทด(Gearbox) "
" การใช้เทคนิควิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบใหม่ เช่น เวฟเลท และ ไซโคลสเตชันนารี ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดเฟือง"