บทที่ 6

การสรุปผลของวิทยานิพนธ์

เนื่องจากการออกแบบชุดเฟืองทดสอบใช้ขนาดความกว้างของฐานฟันเฟืองและขนาดของชุดเฟืองที่สามารถติดตั้งบนแท่นชุดทดสอบได้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบเพื่อให้สามารถสร้างรอยแตกร้าวที่ความยาวต่าง ๆ กันได้ ทำให้ขนาดของเฟืองสามารถส่งผ่านแรงได้มากกว่าขนาดภาระสูงสุดที่มอเตอร์ต้นกำลังของชุดทดลองสามารถทำงานได้ถึง 20 เท่า ประกอบกับทำการทดลองภายใต้สภาวะไม่มีสารหล่อลื่น ทำให้ผลการทดลองที่ได้อาจมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและความยาวรอยแตกร้าวของฟันเฟืองแตกต่างไปจากสภาวะที่ชุดเฟืองต้องรับภาระตามเงื่อนไขความแข็งแรงที่ออกแบบไว้บ้าง แต่คาดว่าผลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการตรวจสภาพชุดเฟืองในเครื่องจักรกลหมุนได้

6 – 1 <u>สรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน</u>

เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา ค่า RMS มีแนวโน้มที่คงที่เมื่อขนาดของรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดการสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงเฉพาะช่วงเวลาฟันซี่ที่แตกร้าวขบกันเท่านั้น เมื่อขนาดของการแตกร้าวเพิ่มขึ้นทำให้แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ณ ช่วงเวลาที่ฟันซี่ที่แตกร้าวนี้ขบกันในลักษณะของพัลส์ชั่วขณะ ซึ่งสามารถสังเกตพบได้เมื่อรอยแตกร้าวยาว 3.5 มม.ขึ้นไป สำหรับการวัดสัญญาณในทิศทางเดียวกันกับการขบกันของฟันเฟือง ซึ่งในการวิจัยนี้คือทิศแนวดิ่ง การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะโดยชุดสัญญาณ 100 ชุด สามารถช่วยลดขนาดของสัญญาณรบกวนลงได้ประมาณ 10 เท่า ทำให้สามารถสังเกตเห็นคาบการขบของเฟืองได้ชัดเจน สามารถพบการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดสัญญาณ ณ บริเวณจังหวะการขบกันของฟันซี่ที่แตกร้าวได้ตั้งแต่รอยแตกร้าวยาว 1.5 มม. และยังช่วยระบุได้ว่ารอยแตกร้าวเกิดขึ้นบนฟันซี่ไหน ที่ความยาวรอยแตกร้าวมาก ๆ พบว่ามีคาบการขบของฟันซี่ที่แตกร้าวนี้ที่นานขึ้นรวมทั้งมีองค์ประกอบความถี่สูงปะปนรวมอยู่ในจังหวะการขบนี้ด้วย คาดว่าน่าจะเป็นเพราะระยะพิตช์ที่เปลี่ยนไปจากการโก่งตัวของฟันที่มากขึ้น และความรุนแรงของการกระแทกขณะขบกันที่มากขึ้นเป็นตัวกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของชุดอุปกรณ์ทดลอง การสั่นสะเทือนด้วยองค์ประกอบความถี่เหล่านี้จึงปรากฏรวมอยู่ในจังหวะการขบของฟันซี่ที่แตกร้าวรวมทั้งจังหวะการขบที่ตามมาติด ๆ กัน

เนื่องจากลักษณะสัญญาณที่ปรากฏพัลส์ชั่วขณะเมื่อฟันซี่ที่แตกร้าวขบกัน พารามิเตอร์ Kurtosis และ Crest Factor จึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าว การเปลี่ยนแปลงค่าปรากฏชัดเจนในกรณีการวัดสัญญาณในทิศแนวดิ่ง โดยค่าที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่มีขนาดสูงกว่าค่าที่ได้จากการเก็บสัญญาณบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ แต่การกำหนดจุดสังเกตที่มีความสัมพันธ์กับขนาดรอยแตกร้าวควรใช้ค่า Kurtosis เท่ากับ 3 ของสัญญาณที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะเป็นเกณฑ์ เพราะค่าที่มากกว่า 3 บ่งชี้ถึงการปรากฏพัลส์ชั่วขณะในสัญญาณการสั่นสะเทือน สำหรับในการวิจัยนี้ค่า Kurtosis ที่ความยาวรอยแตกร้าว 3.5 มม. จึงจะมีค่าเกิน 3

แอมพลิจูดของ 1xGMF ในสัญญาณสเปกตรัม มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าลดลงเป็นอย่างมากสำหรับสภาวะการทดลอง ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ แต่ที่สภาวะการทดลอง ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ ค่าแอมพลิจูดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สรุปได้ว่าแอมพลิจูดที่ความถี่การขบกันของเฟืองนี้ไม่น่ามีความสัมพันธ์กับขนาดของรอยแตกร้าว เนื่องจากรอยแตกร้าวน่าจะมีผลต่อขนาดการสั่นสะเทือนรอบ ๆ จังหวะการขบกันของฟันซี่ที่แตกร้าวเท่านั้น โดยที่จังหวะการขบกันของฟันซี่อื่นยังคงมีการสั่นสะเทือนเหมือนชุดเฟืองที่ไม่มีความบกพร่องใด ๆ การที่แอมพลิจูดของ 1xGMF ลดลงเป็นอย่างมากในบางกรณี คาดว่าน่าจะเป็นผลจากคุณภาพการผลิตเฟืองและการติดตั้งชุดเฟือง หรือความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิตแบบอื่น ๆ ที่ยังไม่สามารถอธิบายได้

การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้างรอบ 1xGMF ในสัญญาณสเปกตรัม ไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของชุดแถบความถี่ข้าง 3 ฮาร์มอนิกแรกอย่างชัดเจนไม่ว่าจะเป็น SBP หรือ SBW แต่ก็สามารถสังเกตเห็นชุดแถบความถี่ข้างทั้งสองได้โดยที่ SBW ปรากฏชัดเจนเมื่อฟันเฟืองยังไม่มีรอยแตกร้าว แต่เมื่อฟันเฟืองมีรอยแตกร้าวแล้ว SBP ปรากฏเด่นชัดกว่าและสามารถสังเกตเห็นชุดแถบความถี่ข้างนี้ที่ฮาร์มอนิกสูง ๆ ได้ชัดเจนขึ้นเมื่อขนาดของรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น ชุดแถบความถี่ข้างเหล่านี้ปรากฏชัดเจนทางด้านความถี่ต่ำกว่า 1xGMF แถบความถี่ข้างฮาร์มอนิกที่มีความถี่ตรงกับความถี่ธรรมชาติและทำการวัดในทิศทางเดียวกันกับทิศที่ความถี่ธรรมชาตินี้มีแอมพลิจูดสูงเด่น จะมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อขนาดของรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น แสดงว่าความถี่ธรรมชาติมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ปัญหาของการแตกร้าว เนื่องจากการถูกกระตุ้นด้วยพัลส์ที่เกิดขึ้นขณะฟันซี่ที่แตกร้าวขบกัน การเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ช่วยในการแยกแยะชุดแถบความถี่ข้าง SBP และ SBW ออกจากกัน และยังช่วยให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดของ SBP ตามขนาดของรอย

แตกร้าวได้ดีกว่าการเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ ในขณะที่การเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ช่วยลดสัญญาณรบกวนลงได้เป็นอันมาก รวมทั้งสัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้างรอบ ๆ 1xGMF ของสัญญาณที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที จึงทำให้สามารถสังเกตเห็นชุดแถบความถี่ข้าง SBP ได้ นอกจากนี้ยังช่วยขจัดชุดแถบความถี่ข้าง SBW ซึ่งไม่น่าจะเกี่ยวข้องกับปัญหาการแตกร้าวของเฟืองขับ ทำให้การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้าง SBP ทำได้ง่ายขึ้น

การวิเคราะห์สัญญาณเซปส์ตรัมพบการเปลี่ยนแปลงค่าแกมนิจูดของ 1/P มีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดของรอยแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนกระทั่งที่ระดับความยาว 2.5 ม.ม. จากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงหรือไม่ก็แกมนิจูดมีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่แกมนิจูดของ 1/W มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากการมอดูเลตทางแอมพลิจูดด้วยสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับเฟืองขับมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อรอยแตกร้าวยังมีขนาดไม่มาก แต่เมื่อรอยแตกร้าวมีขนาดโตขึ้นการโก่งตัวขณะฟันซี่ที่แตกร้าวขบกันมีมากขึ้นรวมทั้งความคลาดเคลื่อนของระยะพิตช์หลังจากสร้างรอยแตกร้าวทำให้การมอดูเลตทางความถี่ด้วยสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับความถี่เฟืองขับมีขนาดเพิ่มขึ้น แกมนิจูดของ 1/P จึงลดลง การเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะทำให้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าแกมนิจูดของ 1/P ที่ขนาดรอยแตกร้าวยาวไม่มาก มีอัตราที่สูงขึ้นกว่าการเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่

6 – 2 <u>ความเป็นไปได้ในการใช้สัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัมในการวิเคราะห์การแตกร้าวของฟันเฟือง</u>

จากข้อสรุปดังกล่าวพบว่าควรทำการวิเคราะห์สัญญาณทั้ง 3 โดเมนร่วมกัน เพื่อประสิทธิผลในการระบุว่ามีการแตกร้าวเกิดขึ้น โดยการเก็บสัญญาณแต่ละครั้งเครื่องวิเคราะห์สามารถให้ข้อมูลของทั้ง 3 โดเมนได้พร้อม ๆ กัน ถ้าสัญญาณบนโดเมนเวลามีค่า RMS ไม่เปลี่ยนแปลงจากระดับปรกติ ในขณะที่ค่า Kurtosis หรือ Crest Factor มีขนาดสูงขึ้น มีความเป็นไปได้ว่าน่าจะมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น และถ้าสังเกตพบพัลส์ชั่วขณะที่มีคาบเท่ากับคาบการหมุนของเฟืองตัวใด แสดงว่ารอยแตกร้าวเกิดขึ้นบนเฟืองตัวนั้น แต่กว่าที่จะสังเกตพบพัลส์ชั่วขณะได้นั้น ขนาดของรอยแตกร้าวอาจจะโตเกินกว่าที่จะวางแผนซ่อมบำรุงได้ทันท่วงที การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้างรอบความถี่การขบกันของเฟืองในสัญญาณสเปกตรัม และพารามิเตอร์ 1/(ความถี่ของเฟืองตัวที่มีปัญหา) ในสัญญาณเซปส์ตัมช่วยบอกได้ว่าเกิดรอยแตกร้าวขึ้นบนเฟือง

ตัวใด การขบกันของฟันซี่ที่มีรอยแตกร้าวทำให้ความถี่ธรรมชาติถูกกระตุ้น ดังนั้นถ้าฮาร์มอนิกของชุดแถบความถี่ข้างใดพ้องกับความถี่ธรรมชาตินี้จะเกิดการเรโซแนนซ์มีการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดตามขนาดของรอยแตกร้าวอย่างชัดเจน ลักษณะเช่นนี้น่าจะช่วยยืนยันได้ว่าความบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นการแตกร้าวของฟันเฟือง การเก็บสัญญาณเพื่อหาความถี่ธรรมชาติควรทำการวัดทั้ง 2 ทิศทาง เพราะความถี่ธรรมชาติโหมดที่ปรากฏเรโซแนนซ์อาจจะไม่ได้อยู่ในทิศทางเดียวกับการขบกันของเฟืองก็ได้ ในขณะที่การวิเคราะห์สัญญาณเซปส์ตรัมที่คิวเฟรนซี่ 1/(ความถี่ของเฟืองตัวที่มีปัญหา) แนวโน้มค่าแกมนิจูดจะเพิ่มขึ้นในช่วงที่ขนาดรอยแตกร้าวยังยาวไม่มาก จนถึงระดับความยาวหนึ่งแล้วค่าจะลดลง ซึ่งสามารถใช้เป็นจุดสังเกตว่าขนาดของรอยแตกร้าวยังอยู่ในสภาพยอมรับได้หรือไม่ นอกจากนี้สัญญาณเซปส์ตรัมยังให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าแกมนิจูดที่ชัดเจนสำหรับการวัดทั้ง 2 ทิศทาง

ถ้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้สามารถเก็บสัญญาณด้วยกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ ควรทำการเก็บสัญญาณชนิดนี้ควบคู่ไปกับการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่โดยเลือกให้แสดงสัญญาณสเปกตรัมรอบ ๆ 1xGMF ด้วยขนาดของพิสัยที่จะช่วยให้สามารถแยกแยะชุดแถบความถี่ข้างอันเนื่องจากเฟืองแต่ละตัวออกจากกันได้ง่าย นอกจากนี้วิธีการนี้ยังช่วยให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าแกมนิจูดของ 1/(ความถี่เฟืองตัวที่มีปัญหา) มีอัตราการเพิ่มขึ้นในช่วงที่ขนาดรอยแตกร้าวยังยาวไม่มาก สูงกว่าแกมนิจูดที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่

การเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาแบบเข้าจังหวะ ช่วยให้สามารถทำการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นสะเทือนของสัญญาณบนโดเมนเวลาได้เป็นอย่างดีเนื่องจากสัญญาณรบกวนถูกลดขนาดลงเป็นอย่างมาก ทำให้สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดสัญญาณในช่วงเวลาที่ฟันซี่ที่แตกร้าวขบกัน ข้อดีของการเก็บสัญญาณด้วยวิธีนี้คือ สามารถรู้ได้ว่าฟันซี่ไหนเกิดรอยแตกร้าวขึ้นโดยการวัดระยะเวลาที่ปรากฏพัลส์แรก ซึ่งช่วงเวลานี้จะสัมพันธ์กับมุมของฟันซี่ที่แตกร้าวว่าห่างออกไปจากตำแหน่งที่เริ่มเก็บสัญญาณเท่าไร การเก็บสัญญาณด้วยวิธีนี้สามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้างและเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง ๆ ของสเปกตรัมออกไปได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังสามารถขจัดชุดแถบความถี่ข้างจากความถี่เฟืองตัวอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เฟืองที่อยู่บนเพลาเดียวกับที่ติดตั้งแทกโคมิเตอร์ออกไปได้ ดังนั้นการเฝ้าตรวจสภาพในทางปฏิบัติจึงต้องตั้งค่าคำนวณให้สัญญาณทริกเกอร์มีความถี่ตรงกับการหมุนของเพลาอื่น ๆ ด้วย ในขณะที่ยังไม่ทราบว่าเฟืองที่มีปัญหาคือเฟืองตัวใด สัญญาณเซปส์ตรัมของวิธีการนี้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแกมนิจูดที่คิวเฟรนซี่ 1/(ความถี่เฟืองตัวที่มีปัญหา) ในช่วงที่

ขนาดรอยแตกร้าวยังยาวไม่มาก สูงกว่าแกมนิจูดที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่

6 – 3 ข้อเสนอแนะและการศึกษาวิจัยต่อไป

1) ในปัจจุบันได้มีการทำการศึกษาการวิเคราะห์ด้วยวิธีเวฟเลท (Wavelet) สำหรับปัญหาการแตกร้าวของฟันเฟือง ผู้ที่สนใจทำการศึกษาวิธีเวฟเลทนี้สามารถติดต่อขอนำข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ผู้วิจัยได้เก็บบันทึกไว้มาทำการวิเคราะห์ต่อไปได้
2) การจำลองรอยแตกร้าวของฟันเฟืองก่อนการทดลองด้วยการใช้เครื่องทดสอบความล้าควรพยายามให้ฟันเฟืองมีการโย้ไปจากตำแหน่งเดิมน้อยที่สุด ถ้าเป็นไปได้ควรสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับการสร้างรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริงจากการขบกันของเฟืองที่ต้องส่งผ่านแรงเกินขีดจำกัดความล้า ซึ่งน่าจะได้รูปแบบของรอยแตกร้าวที่คล้ายกันสำหรับเฟืองแต่ละตัว รวมทั้งไม่มีการสึกหรอบนหน้าฟันบริเวณพิตช์ และเมื่อทำการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดเฟืองที่ติดตั้งบนชุดอุปกรณ์นี้น่าจะให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามขนาดความยาวรอยแตกร้าวที่ชัดเจน
3) ที่สภาวะ ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ภาระ 300 วัตต์ ซึ่งเป็นสภาวะที่ชุดเฟืองต้องส่งผ่านแรงมากที่สุด ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์มากกว่าสภาวะอื่น การเปลี่ยนแปลงความเร็วที่เกินกว่า 3 รอบต่อนาที มีผลต่อการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ทำให้ชุดสัญญาณไม่เข้าจังหวะกันอย่างสมบูรณ์ จึงต้องควบคุมภาระให้คงที่มากกว่านี้ด้วยการใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับขดลวดสนามของเครื่องปั่นไฟที่มีความสเถียรมากขึ้น และควรพัฒนาให้สามารถนำสัญญาณจากแทกโคมิเตอร์มาใช้เป็นตัวกำหนดอัตราการสุ่มตัวอย่างข้อมูล หรือที่เรียกว่า Order Tracking ซึ่งสามารถช่วยตัดปัญหาความเร็วรอบที่ไม่คงที่นี้ได้เป็นอย่างดี
4) เมื่อสามารถทำ Order Tracking ได้แล้ว ผู้วิจัยขอแนะนำให้ทำการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการดีมอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitude Demodulation) หรือเรียกอีกอย่างว่า การเอนวีโลป (Enveloping) และการดีมอดูเลตทางความถี่ (Phase Demodulation) ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้ควรใช้การเก็บสัญญาณด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะจึงจะให้ผลที่ดี