บทที่ 1

บทนำ

1 – 1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

เฟือง (Gear) เป็นกลไกที่มีความสำคัญในการถ่ายทอดกำลังและส่งผ่านการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลหมุนเกือบทุกชนิด และเป็นส่วนที่มีโอกาสเสียหายได้ก่อนชิ้นส่วนอื่น ๆ ต้นเหตุของความเสียหายสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เกิดจากการติดตั้งและการปฏิบัติงานกับ เกิดจากคุณภาพของเฟือง การออกแบบ และการผลิต ที่ไม่ได้มาตรฐาน ปัญหาที่เกิดจากการติดตั้งและการปฏิบัติงานยกตัวอย่างเช่น เพลาแอ่น การเยื้องแนวแกน การหลุดหลวม ฟันมีรอยแตกร้าวหรือบิ่น และฟันแตกหัก เป็นต้น

เฟืองบางตัวสามารถปล่อยให้ทำงานจนเสียหายจึงค่อยเปลี่ยนหรือซ่อมได้ แต่บางตัวไม่สามารถปล่อยให้ระดับความเสียหายเกินกว่าที่กำหนดไว้ เช่น เฟืองที่ขับชิ้นส่วนที่ต้องทำงานตลอดเวลา หรือ เฟืองส่งกำลังขับเครื่องจักรซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ถ้าทำงานผิดพลาด ทำให้จำเป็นต้องทำการเฝ้าตรวจอย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้เพื่อที่จะได้ทำการบำรุงรักษาได้ทันท่วงที สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่ไม่อาจคาดเดาล่วงหน้า ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้นำระบบบำรุงรักษาตามสภาพ (Condition Based Maintenance) หรือการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) มาเป็นระบบจัดการการบำรุงรักษาเครื่องจักรเพิ่มมากขึ้น

การบำรุงรักษาตามสภาพนี้ทำให้รู้สภาพที่แท้จริงของเฟืองโดยไม่ต้องหยุดเครื่อง ช่วยให้สามารถประเมินได้ว่าสภาพของเฟืองอยู่ในสภาวะที่ยอมรับได้หรือไม่ มีแนวโน้มที่จะต้องทำการบำรุงรักษาเมื่อใด ช่วยให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้ เลือกระยะเวลาและช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการหยุดการดำเนินการ (Shut Down) เพื่อซ่อมบำรุง และมีเวลาพอที่จะต้องเตรียมอะไหล่และอุปกรณ์ที่ต้องใช้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการผลิต นอกจากนี้ยังประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ที่บางครั้งต้องซ่อมหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนโดยที่ชิ้นส่วนนั้น ๆ ยังอยู่ในสภาพใช้งานได้ดี การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์นั้นมีหลายวิธี การเฝ้าตรวจการสั่นสะเทือน (Vibration Monitoring) เป็นวิธีการหลักวิธีหนึ่งในระบบ

บำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องจักรกลหมุน เนื่องจากเครื่องจักรหมุนทั่วไปเมื่อทำงานไม่ว่าจะอยู่ในสภาพที่ดีเยี่ยมหรือเสียหายต่างมีการสั่นสะเทือนและเสียง (Noise) เสมอ เพียงแต่ว่าระดับของการสั่นสะเทือนและเสียงในเครื่องจักรที่อยู่ในสภาพที่ดีจะมีขนาดต่ำในระดับที่ยอมรับได้ เมื่อเครื่องจักรมีสภาพชำรุดหรือมีความบกพร่องเกิดขึ้นระหว่างทำงาน ระดับของการสั่นสะเทือนก็มักจะมีขนาดสูงขึ้นตามสภาพการชำรุดหรือบกพร่อง นอกจากนี้เครื่องจักรกลหมุนมีการทำงานในลักษณะเป็นคาบ (Periodic) ซึ่งให้สัญญาณในรูปแบบเฉพาะตัวของแต่ละชิ้นส่วนที่มีความเร็วรอบต่างกันทำให้สะดวกต่อการวิเคราะห์หาสาเหตุของความบกพร่องได้ การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นิยมเลือกใช้ในการตรวจสอบอาจอยู่ในรูปแบบ สัญญาณบนโดเมนเวลา (Time Domain) สเปกตรัม (Spectrum) หรือเซปส์ตรัม (Cepstrum)

1) **สัญญาณบนโดเมนเวลา** แสดงการเคลื่อนที่ขึ้นลง ความเร็ว หรือความเร่งของการสั่นสะเทือนในช่วงระยะเวลาที่ทำการเก็บสัญญาณ ซึ่งอาจมีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย ความบกพร่องที่ทำให้เกิดการมอดูเลต (Modulation) และพัลส์ สามารถสังเกตเห็นได้ในสัญญาณบนโดเมนเวลา
2) **สเปกตรัม** คือ สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ที่ได้จากการแปลงแบบฟูริเยร์ (Fourier Transform) ของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา เป็นการวิเคราะห์สภาวะเป็นคาบ (Periodicity) ของสัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัมช่วยให้สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ ความถี่ที่เป็นต้นเหตุของความบกพร่อง
3) **เซปส์ตรัม** คือ สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนคิวเฟรนซี (Quefrency) ที่ได้จากการแปลงกลับแบบฟูริเยร์ของลอการิทึมของสเปกตรัม ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สภาวะเป็นคาบของสเปกตรัม เซปส์ตรัมช่วยให้การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้างในสัญญาณสเปกตรัมทำได้สะดวกขึ้น ชุดแถบความถี่ข้างนี้จะปรากฏในกรณีที่มีการมอดูเลตสัญญาณ

สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในสภาวะอุดมคติจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ที่มีคาบการขบกันของฟันเฟือง (Tooth Meshing Period) เป็นส่วนกลับของความเร็วรอบหมุนคูณด้วยจำนวนฟันหรือความถี่การขบกันของคู่เฟือง (Gear Meshing Frequency , GMF) แต่ในสภาพการทำงานจริงจะมีการเบี่ยงเบนของพื้นผิวฟันเฟืองไปจากโค้งอินโวลูท หรือความคลาดเคลื่อนการส่งผ่านการเคลื่อนที่สถิต (Static Transmission Error) ส่งผลให้เกิดแรงไม่คงที่ (Unsteady Force) ขึ้น แรงไม่คงที่นี้จะส่งผ่านจากเฟืองไปยังเพลา ชุดแบริ่ง และเคสซิ่งของ

ชุดเฟือง ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะต่างไปจากคลื่นไซน์ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพของเฟืองได้

กรณีที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Crack) บนฟันซี่หนึ่งของเฟือง ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นดัดที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กัน (Repeated Bending Stress) มีขนาดมากกว่าค่าขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) ของวัตถุที่ใช้ผลิตเฟืองตัวนั้น ความแข็งเกร็งที่น้อยกว่าของฟันซี่ที่มีรอยแตกร้าวจะเป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนรูปแบบของการสั่นสะเทือนเมื่อฟันซี่นี้ขบกับฟันของเฟืองที่คู่กัน สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาจะปรากฏเป็นพัลส์โดยที่พัลส์แต่ละลูกห่างกันเท่ากับคาบของการหมุนของเฟืองที่มีรอยแตกร้าว

วิธีการเก็บสัญญาณที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางและเป็นวิธีการที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบพกพา (Portable Analyzer) ใช้ในการเก็บและการแปลงสัญญาณ (Signal Processing) คือ การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ (Spectrum Averaging) แต่ทว่าสัญญาณบนโดเมนเวลาที่แสดงเป็นเพียงชุดสัญญาณสุดท้ายเพียงชุดเดียวจากจำนวนชุดสัญญาณทั้งหมดที่นำมาเฉลี่ยกัน ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์รูปแบบการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาได้ชัดเจน และไม่สามารถโยงความสัมพันธ์ของสัญญาณกับตำแหน่งของฟันเฟืองซี่ที่แตกร้าวได้ ในขณะที่สัญญาณสเปกตรัมยังปรากฏสัญญาณรบกวนหรือความถี่อันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนอื่นในเครื่องจักรกลอยู่มาก การวิเคราะห์ชุดแถบความถี่ข้างรอบความถี่ GMF ในสัญญาณสเปกตรัมอาจทำได้ยากอันเนื่องมาจากความละเอียดของโดเมนความถี่ที่ใช้วัดสัญญาณไม่เพียงพอ เพื่อที่จะให้สามารถแยกชุดแถบความถี่ข้างอันเนื่องมาจากเฟืองขับและเฟืองตามออกจากกันได้ง่ายขึ้นสามารถทำได้ด้วยการใช้กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ (Zoom Processing) ถ้าใช้การเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging) จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณบนโดเมนเวลาได้ชัดเจนและสามารถกำหนดตำแหน่งของฟันซี่ที่แตกร้าวได้ สัญญาณสเปกตรัมที่ได้สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนออกไปได้เป็นอย่างมากทำให้วิเคราะห์ความถี่ได้ง่ายขึ้น

ถึงแม้ว่าปัจจุบันสัญญาณสเปกตรัมเป็นการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม แต่ในการนำมาใช้วิเคราะห์การทำงานและวินิจฉัยหาสาเหตุของความบกพร่องในชุดเฟืองนั้น สเปกตรัมอาจจะไม่สามารถตรวจพบข้อบกพร่องในช่วงเริ่มต้นได้ ขณะที่เซปส์ตรัมอาจจะเหมาะสมมากกว่าสำหรับชุดเฟืองซึ่งสัญญาณการสั่นสะเทือนมีการมอดูเลต จึงเห็นสมควรที่จะศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนบน

โดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม กับระดับการเกิดรอยแตกร้าวของเฟือง เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนมาทำนายระดับการเกิดรอยแตกร้าวของเฟือง

1 – 2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

1) Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of The Meshing Vibration [1]

จุดประสงค์ เป็นการนำเสนอวิธีการแปลงสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processing) สำหรับการคำนวณการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ ของสัญญาณการสั่นสะเทือนเนื่องจากการขบกันของฟันเฟืองที่เก็บด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ เพื่อนำไปใช้ตรวจหาความบกพร่องเฉพาะที่ (Local Defect) ในระยะเริ่มต้น เช่น รอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า และยืนยันถึงความสำคัญของการมอดูเลตทางความถี่ที่มีต่อการตรวจหาความบกพร่องเฉพาะที่

รูปแบบการทดลอง ชุดเฟืองในใบพัดหลักของเฮลิคอปเตอร์ มีรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้าเกิดขึ้นบริเวณโคนฟันซี่หนึ่งของเฟืองขับแบบเฟืองเดือยหมู (Spiral Bevel Gear) ทำการเก็บสัญญาณจากชุดเฟืองนี้ในขณะที่บินอยู่ด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาทำการดีมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ โดยเลือกกรองเอาเฉพาะความถี่รอบ ๆ ฮาร์มอนิกของ GMF ที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุด แล้วใช้การแปลงแบบฮิลเบิร์ต (Hillbert Transform) เพื่อหาขนาดของการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ เปรียบเทียบสัญญาณบนโดเมนเวลาทั้ง 3 แบบ ซึ่งได้ทำการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ให้อยู่ในรูปองศาของการหมุนหนึ่งรอบ และทำการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่เก็บ ณ รอยแตกร้าวที่เพิ่งเริ่มเกิดขึ้น (ยาว 20 มม. ลึก 1.2 มม.) และเมื่อรอยแตกร้าวยาว 25 มม. ลึก 5 มม.

ผลการทดลอง เมื่อรอยแตกร้าวเพิ่งเริ่มต้นปรากฏ ขนาดของการมอดูเลตทางแอมพลิจูดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาด้วยค่าทางสถิติโมเมนต์อันดับที่ 4 หรือ เคอร์โทซิส (Kurtosis) ซึ่งใช้บอกถึงขนาดการแผ่กว้างของการกระจายตัวของแอมพลิจูดสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 2.5 ในขณะที่ขนาดของการมอดูเลตทางความถี่มีมุมเฟสเปลี่ยนไป – 60 องศา ณ ตำแหน่งฟันซี่ที่แตกร้าวขบกัน ค่าเคอร์โทซิสเท่ากับ 8.7 เมื่อรอยแตกร้าวมีขนาดเพิ่มขึ้นจนลึก 5 มม. สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของการมอดูเลตทางแอมพลิจูดชัดเจน ตำแหน่งฟันซี่ที่แตกร้าวขบกันมีขนาดลดลงจนเกือบเท่าศูนย์ ในขณะที่ขนาดของการมอดูเลตทางความถี่มีมุมเฟสเฟลี่ยนไป 360 องศาที่ตำแหน่งเดียวกัน

สรุปผลการทดลอง การมอดูเลตสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่เกิดขึ้นจากความบกพร่องเฉพาะที่ เช่น รอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า การวิเคราะห์ทำได้โดยการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะแล้วนำสัญญาณที่ได้มาทำการดีมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ ในขณะที่รอยแตกร้าวยังลึกไม่มากการมอดูเลตทางความถี่สามารถตรวจพบว่ามุมเฟส ณ ตำแหน่งที่เป็นฟันซี่ที่แตกร้าวตามหลังตำแหน่งอื่น ๆ เล็กน้อย ในขณะที่การมอดูเลตทางแอมพลิจูดยังไม่สามารถตรวจพบความผิดปรกติใด ๆ การที่มุมเฟสตามหลังก็เนื่องจากฟันซี่ที่แตกร้าวเมื่อรับแรงจะมีการโก่งตัวมากกว่าฟันซี่อื่น ๆ

2) Vibration Monitoring of Industrial Gearboxes Using Time Domain Averaging [2]

จุดประสงค์ เพื่อศึกษาความสามารถในการตรวจพบความบกพร่องของชุดเฟือง (Gear Box) โดยการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging)

รูปแบบการทดลอง เก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดเฟืองในเครื่องบดถ่านหินชนิดต่าง ๆ ที่ใช้อยู่ในโรงไฟฟ้าโดยการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะแล้วนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไปด้วยการดีมอดูเลต (Demodulation) เพื่อพิจารณาการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ นอกจากนี้ยังนำสัญญาณที่เก็บด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะมากำจัดความถี่ GMF และฮาร์มอนิก ทุกความถี่เท่าที่จะทำได้ แล้วนำสัญญาณบนโดเมนเวลาทั้ง 4 แบบมาพิจารณาด้วยค่าเคอร์โทซิส

ผลการทดลอง ตำแหน่งที่ฟันเสียหายขบกันจะทำให้ปรากฏแอมพลิจูดที่สูงเด่นกว่าตำแหน่งอื่นอย่างชัดเจนทั้งในสัญญาณบนโดเมนเวลาที่ได้จากการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ สัญญาณที่ถูกกำจัดความถี่ GMF และสัญญาณที่ทำการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ ซึ่งจะให้ค่าเคอร์โทซิสสูงกว่า 3 แสดงว่าสัญญาณมีลักษณะสุ่มและมีพัลส์ปรากฏในสัญญาณ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสัญญาณที่เก็บด้วยการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะพบสัญญาณรบกวนช่วงความถี่กว้าง (White Noise) มีขนาดสูงขึ้น ความเบี่ยงเบนของสัญญาณบนโดเมนเวลาที่ต่างไปจากกรณีเฟืองที่ไม่มีปัญหานอกจากจะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของความเสียหายแล้วยังขึ้นอยู่กับชนิดของชุดเฟือง และภาระในขณะที่วัดสัญญาณด้วย

สรุปผลการทดลอง การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาที่ได้จากการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะและกระบวนการวิเคราะห์ที่ประยุกต์ขึ้นสามารถให้รายละเอียดของปัญหาได้มากกว่าการวิเคราะห์สเปกตรัมทั่ว ๆ ไป ซึ่งผู้วิเคราะห์จะต้องพยายามจดจำและสังเกตรูปแบบของการสั่นสะเทือน แม้ว่าความบกพร่องหลายชนิดจะสามารถตรวจพบด้วยวิธีการวิเคราะห์

สัญญาณสเปกตรัมและเซปส์ตรัมแบบทั่ว ๆ ไป แต่การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะช่วยให้สามารถตรวจพบการแตกหักของฟันเฟืองได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นและยังสามารถระบุตำแหน่งของฟันซี่ที่มีปัญหาได้

3) Dynamic Modelling of Gear Systems for Condition Monitoring and Diagnostics [3]

จุดประสงค์ เป็นการนำเสนอการจำลองพารามิเตอร์แบบลัมพ์ไม่เชิงเส้น (Non-linear Lumped Parameter Model) ของชุดเฟือง เพื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการสั่นสะเทือนแบบบิด (Torsional Vibration) อันเนื่องมาจากความผิดปรกติชนิดต่าง ๆ

รูปแบบการทดลอง สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปแบบของ มวล ความแข็งเกร็งในการบิดของเพลา ความแข็งเกร็งในการขบกันของเฟืองที่แปรเปลี่ยนตามเวลา แล้วยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนแบบบิดที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของแบบจำลองกับสัญญาณที่วัดจากชุดทดลองจริง โดยทำการเปรียบเทียบที่สภาวะไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับเฟืองและเมื่อมีรอยแตกร้าวขึ้นบนฟัน 1 ซี่ ในแบบจำลองเมื่อฟันซี่ที่แตกร้าวขบกัน ความแข็งเกร็งของการขบกันของเฟืองมีค่าลดลง สำหรับชุดทดลองได้ทำการสร้างรอยแตกร้าวเริ่มต้นขึ้นมาก่อนที่จะติดตั้งเฟืองโดยอาศัยกลไกที่สามารถสร้างภาระความล้าแก่ฟันเฟืองได้ใกล้เคียงกับภาระที่กระทำต่อฟันเฟืองขณะขบกันจริง การสั่นสะเทือนแบบบิดวัดโดยการติดตั้งตัวตรวจรู้ชนิดความเร่ง (Accelerometer) 2 ตัวบนเฟืองในแนวสัมผัสวงกลมอยู่ตรงกันข้ามบนแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง สัญญาณถูกส่งผ่านชุดแหวนเลื่อน (Slip Ring Set) มายังเครื่องวิเคราะห์ เก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ แล้วนำสัญญาณทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบกันทั้งบนโดเมนเวลา โดเมนความถี่ และโดเมนเวลา-ความถี่โดยการแปลงแบบเวฟเลท (Wavelet Transform) ทดลองที่ความถี่ GMF เท่ากับ 700 Hz

ผลการทดลอง สำหรับการเปรียบเทียบที่สภาวะไม่มีความเสียหาย ผลที่ได้จากระเบียบวิธีทางตัวเลขให้ผลคล้ายกับผลที่ได้จากชุดทดลอง ทั้งสัญญาณบนโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ สำหรับการเปรียบเทียบที่สภาวะฟันมีรอยแตกร้าวให้ผลดังนี้

ก. การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในชุดทดลอง : สัญญาณบนโดเมนเวลาไม่สามารถตรวจพบการมีอยู่ของฟันซี่ที่แตกร้าวได้โดยง่าย เมื่อทำการวิเคราะห์เวฟเลทสามารถพบตำแหน่งของฟันซี่ที่แตกร้าว เนื่องจากฟันซี่ที่แตกร้าวทำให้เกิดปรากฏการณ์แบบชั่วครู่ซึ่งเวฟเลทสามารถตรวจพบได้ ในกรณีนี้ผลของรอยแตกร้าวสามารถตรวจพบได้ในช่วงความถี่ที่

ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 2 ของ GMF เมื่อพิจารณาการตัดขวางเวฟเลทที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถสังเกตพบปรากฏการณ์ชั่วครู่ได้ชัดเจนเมื่อตัดขวางที่ความถี่ 830 Hz

ข. การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในแบบจำลอง : สัญญาณบนโดเมนเวลาตรวจพบการมีอยู่ของฟันซี่ที่แตกร้าวได้ยากเช่นกัน เมื่อทำการวิเคราะห์เวฟเลทสัญญาณที่ปรากฏสามารถสังเกตการมีอยู่ของรอยแตกร้าวได้ไม่ชัดเจนเท่ากรณีสัญญาณจากชุดทดลอง เมื่อทำการตัดขวางเวฟเลทที่ความถี่เดียวกันพบว่าสัญญาณมีรูปแบบที่แตกต่างจากสัญญาณที่ได้จากชุดทดลอง แต่อย่างไรก็ตามการตัดขวางเวฟเลทของสัญญาณในแบบจำลองนี้ก็สามารถตรวจพบตำแหน่งที่มีรอยแตกร้าวได้ชัดเจน

สรุปผลการทดลอง สัญญาณการสั่นสะเทือนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ให้ผลเหมือนกับชุดทดลองจริงเมื่อใช้กับสภาวะฟันเฟืองไม่มีความเสียหาย เมื่อทำการวิเคราะห์ที่สภาวะฟันเฟือง 1 ซี่มีรอยแตกร้าวได้นำการวิเคราะห์เวฟเลทมาพิจารณาด้วย แต่ทว่าการตรวจพบตำแหน่งของฟันซี่ที่แตกร้าวในกรณีสัญญาณจากแบบจำลองไม่เด่นชัดเหมือนกับกรณีสัญญาณจากชุดทดลอง ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากการจำลองความแข็งเกร็งของฟันซี่ที่แตกร้าวขณะขบกันทำได้ไม่ดีพอ

4) Cepstrum Analysis Predicts Gearbox Failure [4]

รูปแบบการทดลอง วิเคราะห์สภาพของชุดเฟืองตรงโดยใช้สัญญาณสเปกตรัม เซปส์ตรัม อะคูสติกอีมิสชัน (Acoustic Emission) และการวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยให้ชุดเฟืองทำงานจนเกิดความเสียหาย (Run to Failure) มีซี่ฟันของเฟืองขับหักไป 3 ซี่ เนื่องจากความล้า รวมระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ 497 ชั่วโมง เฟืองทำงานในลักษณะรับภาระเกินพิกัด (Overload) ตลอดการทดลอง

จุดประสงค์ เปรียบเทียบความสามารถของเซปส์ตรัมในการวิเคราะห์สภาพชุดเฟืองกับวิธีอื่น ๆ ได้แก่ สเปกตรัม อะคูสติกอีมิสชัน และการวิเคราะห์เชิงสถิติ

ผลการทดลอง การวิเคราะห์เซปส์ตรัมสามารถระบุแนวโน้มความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ 13 ชั่วโมงล่วงหน้า ในขณะที่การวิเคราะห์สเปกตรัมสามารถบอกความเสียหายได้ 4 ชั่วโมงล่วงหน้า ส่วนการวิเคราะห์อะคูสติกอีมิสชันและค่าพารามิเตอร์ทางสถิติไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ามากนักจึงไม่น่าจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้

สรุปผลการทดลอง ถ้าเป็นการทำงานตามสภาวะปกติ (Normal Load) แล้ว การวิเคราะห์เซปส์ตรัมน่าจะใช้บอกความเสียหายของชุดเฟืองได้ล่วงหน้าหลายวัน

5) **การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง** (An Analysis of The Relationship Between Vibration Signal and Gear Wear Level) [5]

จุดประสงค์ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบและค่าพารามิเตอร์จากสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ระดับการสึกหรอต่าง ๆ ของเฟือง เปรียบเทียบผลของภาระ และผลของความเร็วรอบ

รูปแบบการทดลอง ทำการจำลองการสึกหรอ 6 ระดับตามรูปแบบการสึกหรอที่ได้จากการวัดโพรไฟล์ฟันเฟืองจากการทดลองของสมชาย [6] หารูปแบบการสึกหรอโดยใช้วิธีการถดถอยเชิงพหุนามสร้างสมการพหุนามกำลังสองเป็นตัวแทนการสึกหรอของเฟือง จากนั้นนำเฟืองมาตะไบให้ได้ตามรูปแบบการสึกหรอที่ระดับต่าง ๆ ตามต้องการ นำเฟืองมาทดลองโดยเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ วิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม

ผลการทดลอง สัญญาณบนโดเมนเวลา พบว่าค่า Peak มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้น ในสัญญาณสเปกตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ 1xGMF 2xGMF และ 3xGMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้น ค่าแอมพลิจูดของชุดแถบความถี่ข้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ผลของสัญญาณเซปส์ตรัมพบว่าค่าแกมนิจูดที่คิวเฟรนซีเท่ากับคาบการหมุนของเฟืองขับ (1/P) มีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงช่วง 30-50% ของความหนาฟัน จากนั้นค่าแกมนิจูดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงค่าการสึกหรอสูงสุดที่ทดลอง

สรุปผลการทดลอง จากรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของฟันเฟือง พบว่าการวิเคราะห์เซปส์ตรัมเป็นวิธีที่ชัดเจนที่สุดในการวิเคราะห์สภาพชุดเฟือง ซึ่งอาจใช้ค่าแกมนิจูดสูงสุดที่คิวเฟรนซี่เท่ากับคาบการหมุนของเฟืองตัวนั้นเป็นเกณฑ์กำหนดระดับที่สามารถยอมรับได้

1 – 3 <u>สมมติฐานการทดลอง</u>

1) การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า รอยแตกร้าวที่จำลองขึ้นมีลักษณะและทิศทางคล้ายกับการแตกร้าวจากการรับภาระที่เกินขีดจำกัดความทนทานในสภาวะใช้งานจริง
2) สัญญาณการสั่นสะเทือนทั้งบนโดเมนเวลา สัญญาณสเปกตรัม และสัญญาณเซปส์ตรัม มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความยาวรอยแตกร้าวเพิ่มมากขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1 – 4 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเฟืองที่มีการแตกร้าวอันเนื่องจากความล้าที่มีระดับความยาวต่าง ๆ ด้วยสัญญาณบนโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม เพื่อเป็นพื้นฐานของการใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนมาทำนายระดับการเกิดรอยแตกร้าวอันเนื่องจากความล้าของเฟือง

1 – 5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟือง
2) ทดลอง ตรวจวัด และ วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนจากชุดเฟืองซึ่งมีความยาวรอยแตกร้าวที่ระดับต่าง ๆ เปรียบเทียบผลที่ได้จากสัญญาณในแต่ละโดเมน ผลของภาระ และผลของความเร็วรอบเฟืองขับ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้ การเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ (Spectrum Averaging) กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ (Zoom Processing) และการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging)
3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการเกิดรอยแตกร้าว

1 – 6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการสั่นสะเทือนและการแปลงแบบฟูริเยร์
2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้จากชุดเฟือง
3) ศึกษาวิธีการสร้างรอยแตกร้าวอันเนื่องจากความล้าโดยอาศัยเครื่องทดสอบความล้า
4) ศึกษาหลักการของกระบวนการจัดการสัญญาณ (Signal Processing) โดยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT (Fast Fourier Transform)
5) ศึกษาหลักการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ และกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่
6) ศึกษาความสามารถและข้อจำกัดของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ วิธีวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน และการเก็บบันทึกข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือน
7) สร้างอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการสร้างรอยแตกร้าวด้วยเครื่องทดสอบความล้า และดำเนินการสร้างรอยแตกร้าวให้ได้ความยาวต่าง ๆ ตามที่กำหนด

8) ปรับปรุงชุดทดลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองให้มีระยะห่างระหว่างเพลาที่เหมาะสมกับขนาดเฟืองที่เลือกใช้ ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถยนต์เพื่อใช้เป็นตัวสร้างภาระให้กับชุดเฟือง
9) ทดลองเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองที่ยังสมบูรณ์และที่ได้สร้างรอยแตกร้าวระดับต่าง ๆ
10) เปรียบเทียบผลจากสัญญาณแต่ละโดเมนที่ได้จากการเก็บสัญญาณแต่ละวิธี รวมทั้งเปรียบเทียบผลของความเร็วรอบเฟืองขับและภาระ
11) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการเกิดรอยแตกร้าว
12) อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

1 – 7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนแปลงตามระดับการเกิดรอยแตกร้าวที่มีความชัดเจนของสัญญาณในแต่ละระดับ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับทำนายระดับการเกิดรอยแตกร้าวของเฟืองเบื้องต้นได้
2) เป็นแนวทางในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อนำมาใช้ตรวจสอบสภาพการทำงานของชุดเฟืองในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย