

การตรวจสอบสถานะของคอมเพรสเซอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

Condition Monitoring of Compressor Using Principal Component Analysis (PCA) method

ทรงพล กลิ่นชะเอม¹ และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530, โทร/โทรสาร: 0-2988-3666 ต่อ 241

¹อีเมล Songpon_mechanical@hotmail.com ²อีเมล nporncha@mut.ac.th

Songpon Klincha-eam¹ and Pornchai Nivesrangsarn²

Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Mahanakorn University of Technology,

51 Cheum-Sampan road, Nong-Chok, Bangkok 10530 Tel/Fax: 0-2988-3666 ext.241,

¹E-mail: Songpon_mechanical@hotmail.com ²E-mail: nporncha@mut.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องคอมเพรสเซอร์โดยใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่สามารถตรวจวัดได้จากหัววัดการสั่นสะเทือน และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีการเก็บข้อมูล เพื่อพัฒนาใช้เป็นอุปกรณ์การทดลองสำหรับการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการ และนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบจริง สำหรับการศึกษาในคอมเพรสเซอร์อัดอากาศแบบลูกสูบเดี่ยว จะถูกใช้จำลองการทำงาน การทำงานที่เงื่อนไขต่างๆเช่น สถานะการทำงานปกติ ความเสียหายที่แฉวน ความเสียหายที่วาล์วด้านดูดและด้านส่ง ส่วนคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี เป็นคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ จะถูกใช้จำลองการทำงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ เช่นสถานะการทำงานปกติ ความเสียหายที่ใบพัด ความเสียหายที่วาล์วด้านดูดและวาล์วด้านส่ง สำหรับผลจากการศึกษาของคอมเพรสเซอร์ทั้งสองประเภทด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ PCA ของสัญญาณการสั่นสะเทือนพบว่า สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ได้สามารถให้ผลการทำนายที่ดิบินโดเมนเวลาหรือโดเมนมุมเพลซฮือ การศึกษาต่อไปยังจำเป็นต้องปรับปรุงเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนและเปรียบเทียบผลที่ได้กับสัญญาณอื่น ๆ เช่น สัญญาณความดัน เป็นต้น เพื่อเป็นการยืนยันถึงความถูกต้องของคำตอบอีกครั้งก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานการตรวจสอบจริง

คำสำคัญ : การตรวจสอบสถานะการทำงาน, คอมเพรสเซอร์, การตรวจสอบความเสียหาย, การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน, วิธีการแยกองค์ประกอบหลักของสัญญาณ (PCA)

Abstract

In this study, vibration signal was used to monitor state of compressors using vibration sensor in order to develop equipment for student used in laboratory and apply it to

monitor in real applications. Two types of compressors used in this study are reciprocating and rotary compressors. The reciprocating compressor is a typical single cylinder, air-compressor. Four conditions were used in this study e.g. normal, piston ring damage, suction valve damage and discharge valve damage conditions. The rotary compressor is a typical compressor used in a residential air-conditioning system. This compressor was used to demonstrate various conditions e.g. normal, suction and discharge valve damage and blade damage conditions. For signal analysis, Principal Component Analysis (PCA) method can be used to analyse vibration signals detected with various testing conditions of both compressors in time and crank angle domains. For future work, signal analysis techniques will be improved and developed and the detected signals should be compared with other signals such as pressure signal in order to verify accuracy of the results.

Keyword: Condition monitoring, Compressor, Fault detection, Vibration analysis, Principal Component Analysis (PCA)

1. บทนำ

คอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้การอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น ที่พักอาศัยและเครื่องที่ใช้ในระบบอัตโนมัติ การตรวจสอบสถานะการทำงานของคอมเพรสเซอร์ มีความจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรม เพื่อให้คอมเพรสเซอร์ทำงานได้เต็มความสามารถในการทำงานและเป็นการป้องกันความเสียหายรุนแรงที่อาจเกิดขึ้น การทำงานของคอมเพรสเซอร์จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกลและทางของไหลที่สอดคล้องกับวัฏจักรการ

ทำงานของคอมเพรสเซอร์ เช่น การเปิดและปิดของวาล์วทางด้านดูดและด้านส่ง [1-3] การเคลื่อนที่ของลูกสูบ การหมุนของเพลลา การอัดตัวของอากาศภายในห้องอัด เป็นต้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ มาใช้สำหรับตรวจวัดสัญญาณจากคอมเพรสเซอร์ เช่น กระแสไฟฟ้า มุมเพลลาข้อเหวี่ยง ความดัน การสั่นสะเทือน เสียง อคูสติกอิมพัลส์ เป็นต้น โดยได้ทำการศึกษารวบรวมสภาพของคอมเพรสเซอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ [1-3] คอมเพรสเซอร์แบบสกรู [4-5] และคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี [7] การตรวจสอบความเสียหายของเครื่องจักรกลจะใช้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของมุมเพลลาข้อเหวี่ยง เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับใช้ระบุกระบวนการที่เกิดขึ้นตามวัฏจักรการทำงาน [6-7] งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์จะใช้เซนเซอร์ที่กล่าวไว้ก่อนหน้าและเซนเซอร์วัดตำแหน่งของมุมเพลลาข้อเหวี่ยง จึงทำให้สามารถระบุกระบวนการทางกลและทางของไหลที่เกิดขึ้นในสัญญาณได้ เช่น การเปิดหรือปิดของวาล์วด้านดูดหรือด้านส่ง การเคลื่อนที่ของลูกสูบ และช่วงการทำงานของจังหวะอัดหรือจังหวะส่ง [1-7] สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณโดยทั่วไปจะวิเคราะห์บนโดเมนเวลาซึ่งนิยมใช้พารามิเตอร์เชิงสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเบ้ (skewness) ค่าความโด่ง (Kurtosis) ค่า RMS (Root Mean Square) และค่าพลังงานของสัญญาณ [6-7] เป็นต้น ซึ่งการใช้พารามิเตอร์ดังกล่าวเพียงค่าเดียวไม่สามารถใช้ทำนายสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์ได้ครบทุกเงื่อนไข

การศึกษานี้จะจำลองการตรวจสอบสภาวะของคอมเพรสเซอร์ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งสามารถตรวจจับโดยใช้หัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) และสัญญาณวัดรอบด้วย Proximity sensor เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงตำแหน่งรอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์ เป็นต้น สัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณวัดรอบจะถูกบันทึกด้วยโปรแกรม LabVIEW การศึกษานี้จะใช้คอมเพรสเซอร์ 2 ชนิดคือ คอมเพรสเซอร์อัดอากาศแบบลูกสูบเดียว (ดังรูปที่ 2) ซึ่งเป็นคอมเพรสเซอร์สำหรับเครื่องปั๊มลมขนาดเล็ก และคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี (ดังรูปที่ 3) ซึ่งเป็นคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศในสถานที่พักอาศัยและสำนักงาน คอมเพรสเซอร์ทั้งสองชนิดจะจำลองการทำงานที่เงื่อนไขแตกต่างกัน เช่น สภาวะการทำงานปกติ และสภาวะการเสียหายที่เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนภายในของคอมเพรสเซอร์ซึ่งจะแสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อถัดไป

งานวิจัยที่ผ่านมา [7] ได้นำเสนอวิธีการในการตรวจสอบสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์ ด้วยการใช้สัญญาณเสียงและเปรียบเทียบผลที่ได้กับสัญญาณการสั่นสะเทือน เพื่อศึกษาถึงสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์จากสัญญาณทั้งสองแบบ พบว่าสัญญาณเสียงสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบได้ในบางกรณี แต่สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถให้ผลการตรวจสอบในการทำนายสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่ดีกว่าโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลา สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิควิธีการ

วิเคราะห์สัญญาณโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์บนโดเมนเวลา, โดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยง, และพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งวิธีวิเคราะห์ที่นิยมใช้ทั่วไปเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก หรือที่เรียกว่า Principal Component Analysis (PCA) ของสัญญาณ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้แยกความแตกต่างของข้อมูลหรือสัญญาณได้ โดยจะวิธีที่นำเสนอนี้มาทำการวิเคราะห์สัญญาณที่บันทึกได้จากคอมเพรสเซอร์ทั้งสองชนิด เพื่อใช้ทำนายหรือตรวจสอบความเสียหายที่จำลองขึ้นบนคอมเพรสเซอร์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ

2. การวิเคราะห์สัญญาณ

2.1 พารามิเตอร์ทางสถิติ

สัญญาณการสั่นสะเทือนจากการทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่บันทึกในรูปของแอมพลิจูดและเวลา สามารถวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติ ซึ่งพารามิเตอร์ทางสถิติที่นิยมใช้เช่น ค่า RMS (Root mean square) ค่าความแปรปรวน (Variance) ค่าความเบ้ (Skewness) ค่าความโด่ง (Kurtosis) ค่าพลังงานของสัญญาณ เป็นต้น ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติมีสมการการวิเคราะห์ดังนี้

ค่า RMS (Root Mean Square)

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}} \quad (1)$$

ค่าความแปรปรวน (Variance)

$$\text{var} = \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

ค่าความเบ้ (Skewness)

$$\text{skewness} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^3 \quad (3)$$

ค่าความโด่ง (Kurtosis)

$$\text{kurtosis} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 - 3 \quad (4)$$

ค่าพลังงานของสัญญาณ (Energy signal)

$$E_x = \int_0^T |x(t)|^2 dt \quad (5)$$

โดยที่ N คือ จำนวนข้อมูล, x_i คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ, $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ, และ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ

2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis)

วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นวิธีการระบุรูปแบบที่มีอยู่ในข้อมูล รวมทั้งเป็นวิธีการแสดงความคล้ายกันและความแตกต่างกันของข้อมูล การศึกษานี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าความแปรผันของข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีค่าของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันและความแปรผันมาก วิธีการนี้เป็นเทคนิคหนึ่งที่จะนำเสนอเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา และคำตอบที่ได้สามารถนำมาใช้ในการทำนายสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์ทั้งสอง

ชนิด วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ ขั้นตอนแรกจะนำข้อมูลหรือสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากการทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ มากำหนดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ที่มีจำนวนแถวเท่ากับ n และจำนวนหลักเท่ากับ p และนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \quad (6)$$

จากนั้นนำเมทริกซ์ข้อมูลดิบมาวิเคราะห์ด้วยการหาค่าการแปรผันร่วม (Covariance) ของข้อมูลหรือสัญญาณการสั่นสะเทือนของแต่ละเงื่อนไขการทำงานของคอมเพรสเซอร์ทั้งสองชนิด ดังนั้นเมทริกซ์ค่าการแปรผันร่วม (Covariance matrix) แทนด้วย S สามารถคำนวณจากสมการที่ (7)

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})^T \quad (7)$$

จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้คำนวณหาความสัมพันธ์ตามความแปรผันบน *Coordinate* ของการหาค่าการแปรผันร่วมของเงื่อนไขข้อมูลที้นำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบของแต่ละเงื่อนไขด้วยสมการดังนี้

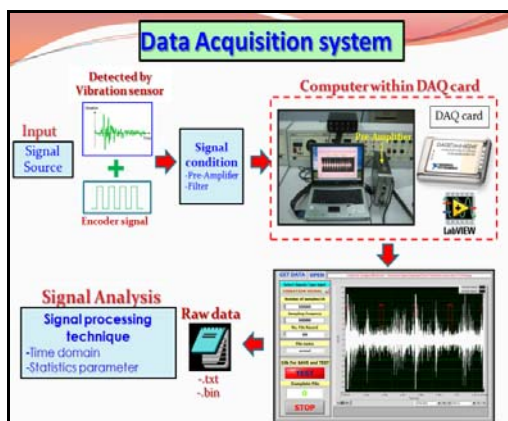
$$\mathbf{Z}_i = \Lambda^{-1/2} \mathbf{Q}^T (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}) \quad (8)$$

โดยที่เมทริกซ์ $\mathbf{Q}$ คือ Eigenvector จาก เมทริกซ์ค่าความแปรผันร่วม S , Λ คือ เมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal Matrix) ของความสัมพันธ์ระหว่าง Eigenvalues และ เมทริกซ์ค่าความแปรผันร่วม S และ $\mathbf{x}_i$ คือ ข้อมูลใด ๆ ที่นำมาวิเคราะห์

จากวิธีการดังกล่าวที่ได้นำเสนอขึ้น สามารถนำมาใช้วิเคราะห์สัญญาณที่ซับซ้อนต่อการอธิบายเทียบกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของชิ้นส่วนทางกลภายในเครื่องคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในการศึกษา

3. การทดลอง

การศึกษานี้จะจำลองการตรวจสอบสภาวะของคอมเพรสเซอร์ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถตรวจวัดโดยใช้หัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer) และสัญญาณวัดรอบด้วย Proximity sensor โดยสัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณวัดรอบจะถูกบันทึกด้วยโปรแกรม LabVIEW แพลตฟอร์มขั้นตอนการทำงานของระบบการเก็บข้อมูลการตรวจสอบสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์ทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 1



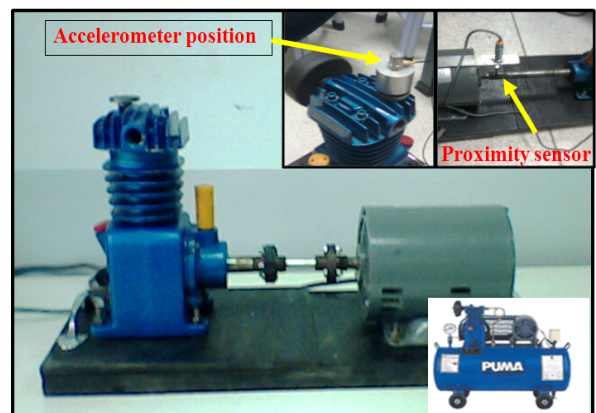
รูปที่ 1 ขั้นตอนของระบบการเก็บข้อมูล

การศึกษาการตรวจสอบสภาวะของคอมเพรสเซอร์นี้จะใช้คอมเพรสเซอร์ 2 ชนิดคือ คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ (ดังรูปที่ 2) และ คอมเพรสเซอร์แบบโรตารี (ดังรูปที่ 3) สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากการทดลองจะอยู่บนโดเมนเวลาและจะนำสัญญาณมาวิเคราะห์บนโดเมนมุมข้อเพลลาเหวี่ยง พารามิเตอร์ทางสถิติจะถูกใช้วิเคราะห์สัญญาณตามวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก เพื่อนำมาใช้ในการทำนายความเสียหายของคอมเพรสเซอร์ที่จำลองขึ้น

การจำลองสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเดี่ยวจะใช้เฉพาะตัวคอมเพรสเซอร์เท่านั้น โดยมีข้อกำหนดดังนี้ แรงดันสูงสุด 10 บาร์ แต่แรงดันใช้งานอยู่ที่ 8 บาร์ ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 0.25 Hp ความเร็วรอบสูงสุด 725 rpm และปริมาณลม 58 L/min เงื่อนไขการทดลองสำหรับการจำลองสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบมีรายละเอียดดังนี้คือ

- การทำงานที่สภาวะปกติ
- การจำลองความเสียหายที่แผ่นวาล์วด้านดูด
- การจำลองความเสียหายที่แผ่นวาล์วด้านส่ง
- การจำลองความเสียหายที่แหวนของลูกสูบ

ตำแหน่งติดตั้งของหัววัดการสั่นสะเทือนอยู่ที่ด้านบนของกระบอกสูบคอมเพรสเซอร์ พร้อมติดตั้ง Proximity sensor ที่ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงของการทำงานของคอมเพรสเซอร์ โดยตำแหน่งที่อ้างอิงคือ ตำแหน่งศูนย์ตายบนของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบดังรูปที่ 2



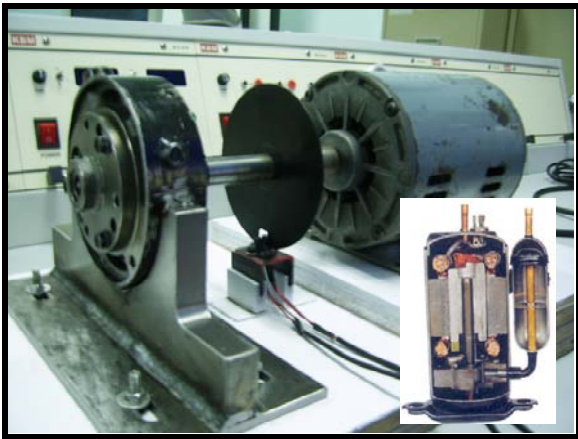
รูปที่ 2 ชุดการทดลองคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ

ชุดการทดลองของคอมเพรสเซอร์แบบโรตารีแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นคอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศขนาด 9000 BTU ขั้นตอนการทดลองจะนำเฉพาะตัวเรือนของคอมเพรสเซอร์มาศึกษาเท่านั้น เพื่อใช้สำหรับศึกษากระบวนการทำงานที่เกิดขึ้นในคอมเพรสเซอร์ โดยของไหลทำงานจะเป็นอากาศ และการศึกษาสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์มีเงื่อนไขดังนี้

- การทำงานที่สภาวะปกติ
- การจำลองความเสียหายที่วาล์วด้านดูด
- การจำลองความเสียหายที่วาล์วด้านส่ง
- การจำลองความเสียหายที่ใบพัด (Blade)

หัววัดการสั่นสะเทือนจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งของวาล์วด้านดูดซึ่งอยู่ด้านบนของคอมเพรสเซอร์ พร้อมด้วยสัญญาณอ้างอิงตำแหน่งโดยตำแหน่งที่ใช้ในการอ้างอิงจะเป็นตำแหน่งศูนย์ตายบนของคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี

สัญญาณการสั่นสะเทือนและสัญญาณอ้างอิงของมูมเพลลาข้อเหวี่ยงจะถูกบันทึกจากชุดทดลองทั้งสองของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง สัญญาณทั้งสองจะถูกบันทึกพร้อมกันด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งสัญญาณจะถูกเก็บเป็นไฟล์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป การทดลองทั้งสองกรณีจะใช้ความถี่ 100 kHz และข้อมูลซุ่ม 100000 จุด เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้

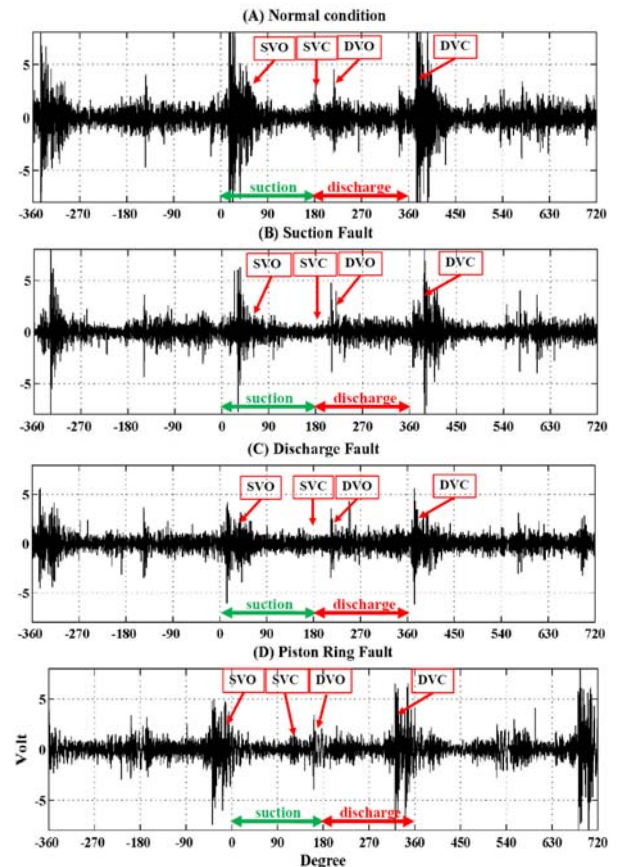


รูปที่ 3 ชุดการทดลองคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี

4. ผลการทดลอง

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากการทดลองทั้งหมดจะอยู่ในรูปของโดเมนเวลา และจะถูกแปลงให้อยู่ในโดเมนมูมเพลลาข้อเหวี่ยงโดยใช้สัญญาณอ้างอิงจากมูมเพลลาข้อเหวี่ยง ตัวอย่างของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเดี่ยวขณะทำงานที่ความเร็ว 1440 รอบต่อนาทีดังรูปที่ 4 จะมีแกนนอนเป็นมูมเพลลาข้อเหวี่ยงและแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณ โดยแต่ละสัญญาณแทนด้วยเงื่อนไขดังรูปที่ 4(A) คือ สภาวะปกติ 4(B) คือ ความเสียหายที่วาล์วด้านดูด 4(C) คือ ความเสียหายที่วาล์วด้านส่ง และ 4(D) คือ ความเสียหายที่แหวนลูกสูบ ตำแหน่ง 0 องศา คือตำแหน่งศูนย์ตายบนของลูกสูบ ดังนั้นช่วงจังหวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ ช่วง 0 – 180 องศา เป็นจังหวะการดูด และช่วง 180 – 360 องศาเป็นจังหวะอัด จากรูปที่ 4(A) เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นสู่จุดศูนย์ตายบนจะสังเกตเห็นว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเพิ่มขึ้น และจะพบเห็นที่ตำแหน่งเดิมของแต่ละรอบการทำงานของคอมเพรสเซอร์เนื่องจากเป็นช่วงจังหวะอัดอากาศที่แรงที่สุดในวัฏจักรการทำงานของคอมเพรสเซอร์ ซึ่งประกอบด้วยเปิดปิดของแผ่นวาล์วด้านส่ง และวาล์วด้านดูดเริ่มทำงานในวัฏจักรจังหวะต่อไป จังหวะการทำงานของเปิดปิดของวาล์วทั้งด้านดูดและด้านส่งสามารถแสดงดังรูป 4 โดยที่ วาล์ว

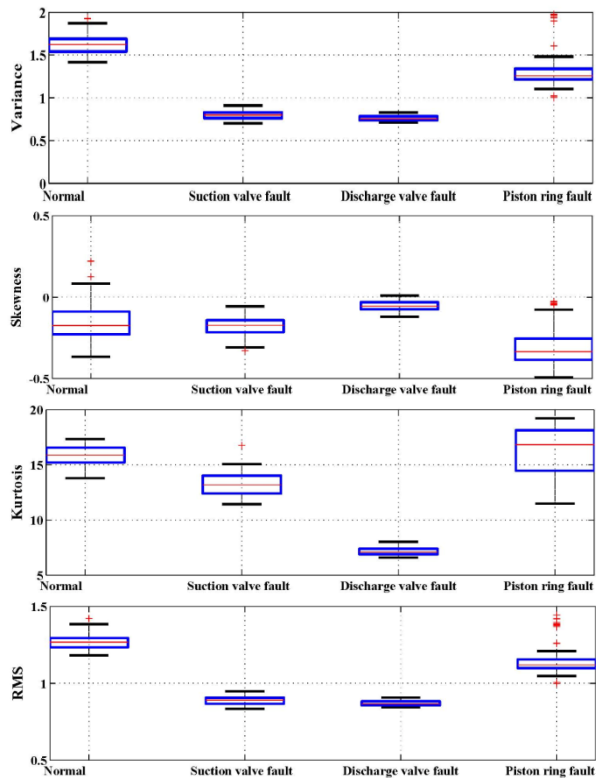
ด้านดูดเปิดแทนด้วย SVO วาล์วด้านดูดปิดแทนด้วย SVC วาล์วด้านส่งเปิดแทนด้วย DVO และวาล์วด้านส่งปิดแทนด้วย DVC



รูปที่ 4 สัญญาณการสั่นสะเทือนของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบบนโดเมนมูมเพลลาข้อเหวี่ยงที่สภาวะต่าง ๆ

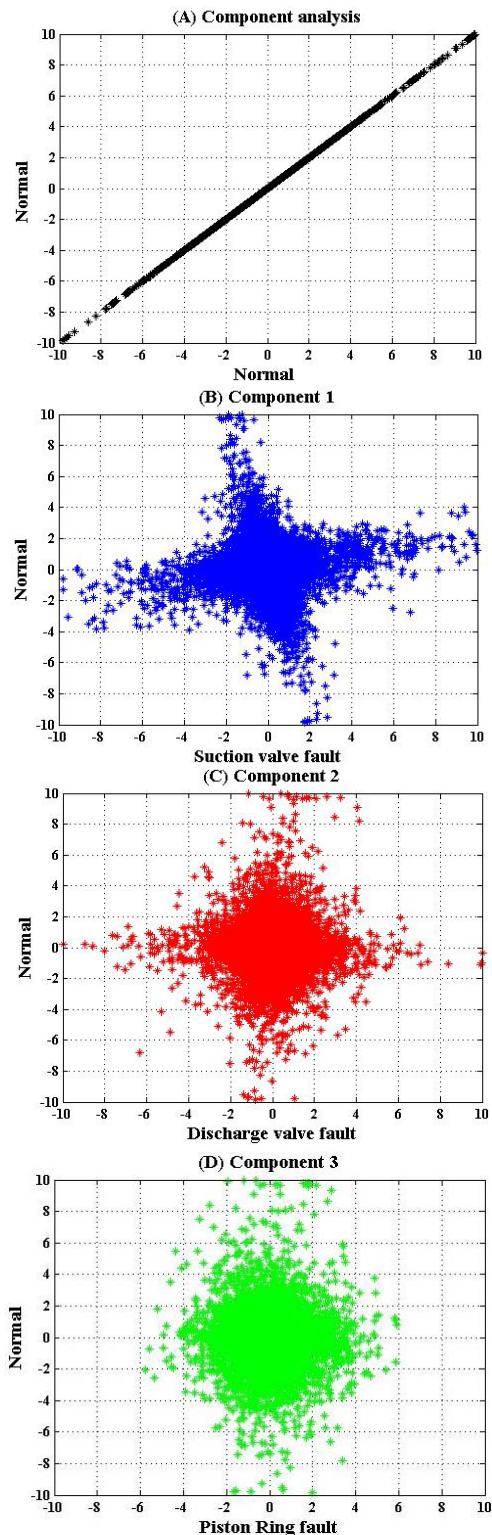
เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนกับลักษณะการทำงานของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ จะสังเกตพบว่าการเกิดหรือกระบวนการการทำงานของคอมเพรสเซอร์เป็นวัฏจักรการทำงานที่เกิดขึ้นซ้ำๆ จึงทำให้มองภาพโดยรวมของเหตุการณ์การทำงานของคอมเพรสเซอร์รวมทั้งกลไกหลักที่เกี่ยวข้องได้ชัดเจน การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาของสัญญาณทั้ง 4 เงื่อนไขดังรูปที่ 4 พบว่าสัญญาณช่วงจังหวะดูดมีรูปแบบที่คล้ายกันเพียงแต่ต่างกันที่แอมพลิจูดซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากสัญญาณที่บันทึกจากเงื่อนไขของคอมเพรสเซอร์ที่จำลองความเสียหายที่วาล์วด้านส่ง ซึ่งแอมพลิจูดมีค่าต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ นอกจากนี้สัญญาณของคอมเพรสเซอร์ที่มีความเสียหายที่แหวนลูกสูบดังรูปที่ 4(D) พบว่าจังหวะการทำงานของวาล์วเปลี่ยนไป 40-50 องศา เมื่อเทียบกับสัญญาณที่สภาวะปกติรวมทั้งองศาการทำงานของจังหวะอัดก็เพี้ยนไป การวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ เช่น ค่าความแปรปรวน ค่าความโด่ง ค่าความเบ้ และค่าพลังงานของสัญญาณ ดังรูปที่ 5 พบว่าค่าทางสถิติของแต่ละพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสัญญาณที่บันทึกได้จากการทดลองไม่สามารถแสดงให้เห็นความแตกต่างของเงื่อนไขของความเสียหายของคอมเพรสเซอร์ได้ชัดเจน ยกเว้นจะต้องใช้อย่าง

น้อย 2 พารามิเตอร์ขึ้นไปถึงจะแยกความแตกต่างของเงื่อนไขได้ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติโดยเฉลี่ย 1000 รอบการทำงาน จากคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ

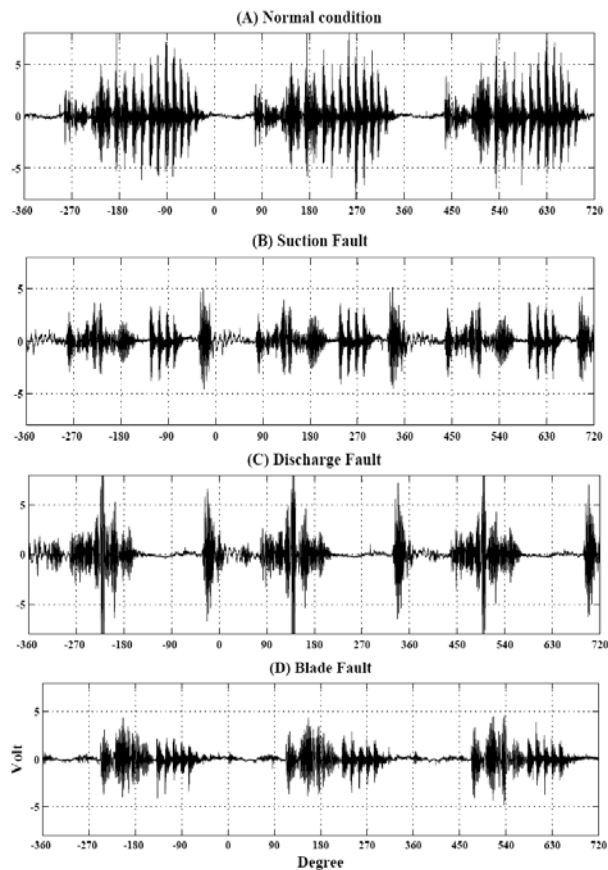
ค่าทางสถิติดังรูปที่ 5 ที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณที่บันทึกจากคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบสามารถใช้ทำนายสภาวะได้บางกรณีเท่านั้น จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักดังรูปที่ 6 เป็นอีกวิธีการหนึ่ง que แสดงถึง ความแปรผันของข้อมูลของสัญญาณการทำงานของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ ข้อมูลอ้างอิงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ คือสัญญาณการทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่สภาวะปกติซึ่งจะเป็นสัญญาณเปรียบเทียบกับสัญญาณจากการทดลองที่เงื่อนไขอื่น จึงทำให้สามารถทำนายสภาวะการทำงานและความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นกับคอมเพรสเซอร์ได้ การเปรียบเทียบความแปรผันของข้อมูลดังรูปที่ 6(A) เป็นกราฟการเปรียบเทียบสัญญาณที่สภาวะปกติเทียบกับสัญญาณที่สภาวะปกติเดียวกัน โดยที่แกนตั้งเป็นค่าเปรียบเทียบจึงทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความแปรผันไม่เกิดขึ้นเมื่อข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลเดียวกัน ดังนั้นเมื่อนำสัญญาณที่สภาวะการทำงานที่เงื่อนไขอื่นมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่สภาวะปกติตามวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจะพบว่า สัญญาณมีความแปรผันเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6(B) - 6(D) ซึ่งแทนด้วยเงื่อนไขความเสียหายที่วาล์วด้านดูด ความเสียหายที่วาล์วด้านส่ง และความเสียหายที่แหวนลูกสูบตามลำดับ กราฟผลการวิเคราะห์มีรูปแบบที่แตกต่างกันจึงสามารถแยกความแตกต่างของเงื่อนไขความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคอมเพรสเซอร์ได้ดีกว่าการวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ



รูปที่ 6 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ ด้วย PCA

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนมุมเฟลาข้อเหวี่ยงที่บันทึกจากคอมเพรสเซอร์โรตารีแสดงดังรูปที่ 7 โดยมีแกนนอนเป็นมุมเฟลาข้อเหวี่ยงและแกนตั้งเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณ สัญญาณที่แสดงในรูปที่ 7 แทนด้วยเงื่อนไขดังนี้ 7(A) คือ สภาวะปกติ 7(B)

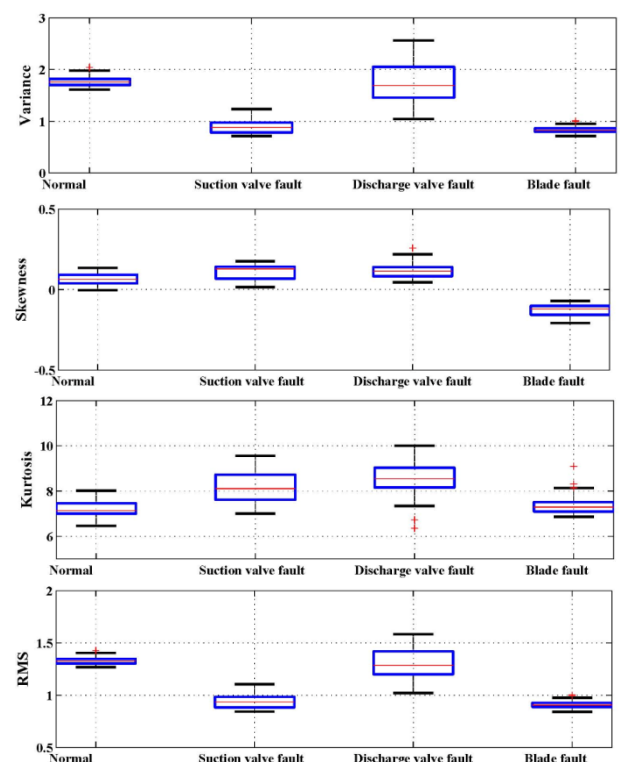
คือ ความเสียหายที่วาล์วด้านดูด 7(C) คือ ความเสียหายที่วาล์วด้านส่ง และ 7(D) คือ ความเสียหายที่ใบพัด (Blade) ตำแหน่งศูนย์ตายบนของการเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อโรเลอร์เคลื่อนที่ขึ้นสุดแทนด้วยตำแหน่ง 0 องศา ดังนั้นช่วงจังหวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 7 สัญญาณการสั่นสะเทือนของคอมเพรสเซอร์แบบโรตารีบนโดเมนมุมข้อเหวี่ยงที่สภาวะต่าง ๆ

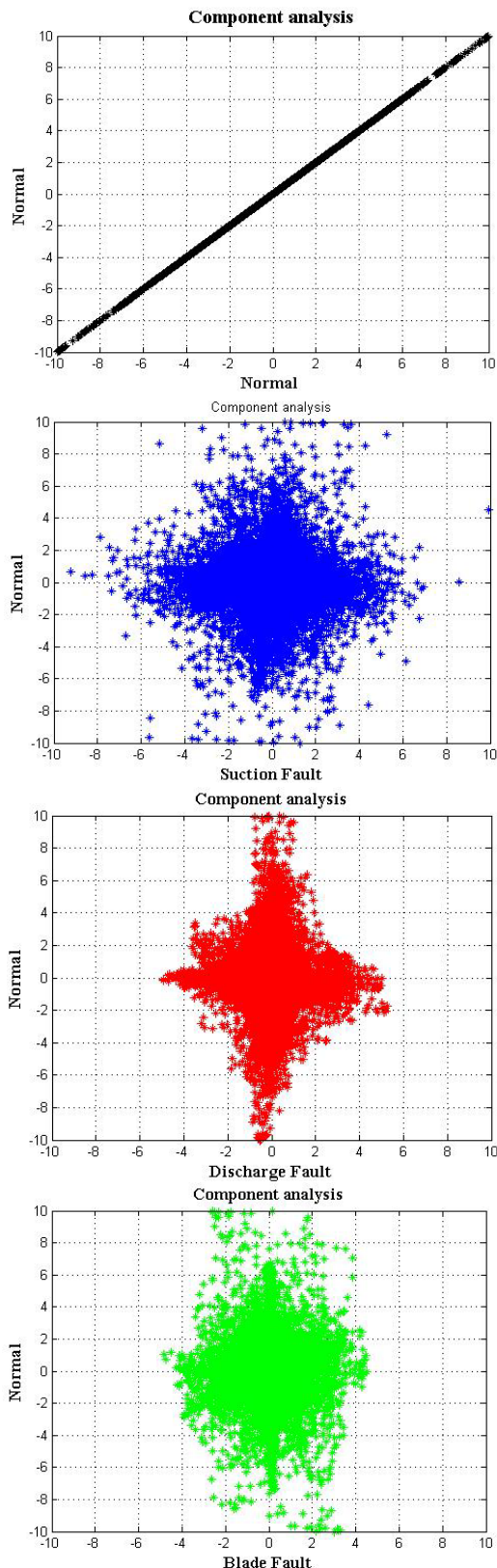
สัญญาณการสั่นสะเทือนดังรูปที่ 7(A) เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นที่สภาวะปกติ โดยที่จังหวะการดูดเริ่มต้นที่ 0 องศา และจะเริ่มอัดเมื่อโรเลอร์หมุนไปตั้งแต่ 90 องศา เป็นต้นไป จนกระทั่งถึงตำแหน่งประมาณ 300 องศาความดันในการอัดอากาศในห้องอัดจึงค่อยๆ ลดลง ซึ่งสัญญาณการสั่นสะเทือนดังรูปที่ 7(A) สามารถใช้อธิบายการทำงานของคอมเพรสเซอร์แบบโรตารีได้อย่างชัดเจน เนื่องจากคอมเพรสเซอร์แบบโรตารีจะมีการทำงานอย่างต่อเนื่องคือการดูดอากาศและอัดอากาศออกไปพร้อมๆ กันในทุกองศาที่ผ่านไปซึ่งสังเกตได้จากสัญญาณที่ปรากฏขึ้นเป็นช่วง ๆ คาดว่าในแต่ละช่วงที่อากาศในห้องอัดมีค่าความดันสูงกว่าแรงกดของวาล์วด้านส่งจึงทำให้อากาศอัดถูกดันออกไป แต่เมื่อวิเคราะห์การทำงานของคอมเพรสเซอร์ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนพบว่าสามารถบอกพฤติกรรมการทำงานของคอมเพรสเซอร์ได้ชัดเจน โดยเริ่มทำงานอย่างชัดเจนที่ 90 องศาในสภาวะปกติ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เงื่อนไขความเสียหายที่วาล์วด้านดูดดังรูปที่ 7(B) พบว่าช่วงองศาที่ 90-300 องศา แอมพลิจูดของสัญญาณและจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น

เนื่องจากการทำงานของวาล์วด้านส่งจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่สภาวะปกติ นอกจากนี้ยังปรากฏเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงองศาที่ 350 – 360 ซึ่งไม่ปรากฏในสัญญาณที่สภาวะปกติคาดว่าอาจจะเป็นการรั่วของอากาศในห้องอัดขณะที่เพลาลูกเบี้ยวเคลื่อนที่ใกล้กับจุดศูนย์ตายบนซึ่งเป็นช่วงที่อากาศใหม่จะถูกดูดเข้าห้องอัดการวิเคราะห์สัญญาณความเสียหายเกิดขึ้นที่วาล์วด้านส่ง ดังรูปที่ 7(C) จะพบว่าสัญญาณในช่วงอัดอากาศเกิดขึ้นในช่วงองศาที่ 180-300 หายไปเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่สภาวะปกติ ส่วนรูปที่ 7(D) สัญญาณการทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่มีความเสียหายขึ้นที่ตำแหน่งเสียหายที่ใบอัดอากาศจะพบว่าลักษณะของสัญญาณจะมีความคล้ายคลึงกับสัญญาณที่สภาวะปกติ แต่มีขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณลดลงทั้งช่วงดูดและช่วงอัด



รูปที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติโดยเฉลี่ยต่อ 1000 รอบการทำงานจากคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี

การวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติดังรูปที่ 8 พบว่าเมื่อใช้พารามิเตอร์เพียงค่าเดียวเช่น ค่า RMS ค่าความแปรปรวน ค่าความเบ้ หรือ ค่าความโด่ง ไม่สามารถใช้ทำนายความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่คอมเพรสเซอร์ได้ แต่เมื่อใช้พารามิเตอร์มากกว่าสองตัวขึ้นไปจะสามารถแยกความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้บางกรณี เช่น กรณีของใบพัดอัดความดันเสียหายของคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี เป็นต้น จากการวิเคราะห์สัญญาณที่กล่าวมานั้นผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานของคอมเพรสเซอร์และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณ จึงจะสามารถแยกความแตกต่างตามเงื่อนไขการทดลองที่จำลองขึ้น ซึ่งผู้ปฏิบัติงานที่ไม่มีคามชำนาญและทักษะจะไม่สามารถเข้าใจกับสิ่งที่เกิดขึ้นกับคอมเพรสเซอร์



รูปที่ 9 วิธีการวิเคราะห์สัญญาณของคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี ด้วย PCA

วิธีการวิเคราะห์หองค์ประกอบหลักสามารถนำมาใช้วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากคอมเพรสเซอร์โรตารีซึ่งจะ

ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 9 วิธีการนี้แสดงถึงความแปรผันของข้อมูลของสัญญาณการทำงานของคอมเพรสเซอร์แบบโรตารี ด้วยวิธีการหาความแปรผันของข้อมูลเทียบกับข้อมูลสัญญาณที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง การศึกษาข้อมูลอ้างอิงคือสัญญาณการทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่สภาวะปกติ จากผลการทดลอง รูปที่ 9(A) คือการเปรียบเทียบความแปรผันของข้อมูลของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่สภาวะปกติเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งกรณีนี้คือการเปรียบเทียบกับสัญญาณเดียวกัน ความแปรผันที่เกิดขึ้นจะเป็นเชิงเส้น เมื่อนำข้อมูลสัญญาณที่สภาวะการทำงานอื่นมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงก็จะพบว่า องค์ประกอบความแปรผันของสัญญาณที่เกิดขึ้นของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เงื่อนไขการเสียหายที่วาล์วด้านดูด การเสียหายที่วาล์วด้านส่ง และความเสียหายที่ใบพัดดังแสดงในรูปที่ 9(B), 9(C), และ 9(D) ตามลำดับ สามารถใช้ทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคอมเพรสเซอร์ได้ และสามารถระบุความเสียหายได้ใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง ตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบนโดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยง

5.สรุป

การตรวจสอบสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์ทั้งสองชนิด ด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือน จากผลการทดลองสามารถทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคอมเพรสเซอร์โดยการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาและโดเมนมุมเพลลาข้อเหวี่ยง และงานวิจัยครั้งนี้ได้แนะนำเทคนิควิธีการวิเคราะห์สัญญาณ ด้วยการใช้พารามิเตอร์ทางสถิติ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับคอมเพรสเซอร์ได้บางกรณีเท่านั้นโดยใช้พารามิเตอร์ตั้งแต่ 2 ค่าขึ้นไป วิธีการวิเคราะห์หองค์ประกอบหลักซึ่งเป็นวิธีการที่นำเสนอของบทความวิจัยนี้สามารถใช้แยกกลุ่มของข้อมูลที่เกิดความเสียหายที่เกิดขึ้นในคอมเพรสเซอร์แต่ละชนิดขณะทำงานได้เมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่สภาวะปกติ การศึกษาต่อไปยังจำเป็นต้องใช้เซ็นเซอร์อื่น ๆ เช่น เซ็นเซอร์วัดความดัน เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง เป็นต้น รวมทั้งเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณ ที่สามารถนำมาใช้เพื่ออธิบายเหตุการณ์ต่างๆ ที่สังเกตเห็นในสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากการทดลอง เพื่อพัฒนาเป็นวิธีการวิเคราะห์ของคอมเพรสเซอร์ทั้งสองชนิดต่อไป

7.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายอาทิตย์ บัณฑิตสิทธิ์และนายวิษณุ แซ่คู นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยเหลือในการพัฒนาชุดอุปกรณ์การทดลองและการเก็บข้อมูลจากการทดลองของการศึกษาครั้งนี้

8.เอกสารอ้างอิง

- [1] M. H. El-Ghamry, R. L. Reuben, and J. A. Steel, "The development of automates pattern recognition and statistical feature isolation techniques for the diagnosis of reciprocating machinery faults using acoustic emission",

Mechanical system and signal Processing, Vol.17, 2003, pp. 823-805.

- [2] J. D. Gill, R. M. Douglas, Y. S. Neo, R. L. Reuben, and J. A. Steel, "Examination of plate valve behavior in a small reciprocating compressor using acoustic emission", The 24th EWGAE conference on Acoustic Emission, France, 2000, pp. 138-133.
- [3] J. D. Gill, E. R. Brown, M. Twite, G. Horner, R. L. Reuben, and J. A. Steel, "Monitoring of a large reciprocating compressor, Proceeding of The 11th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management", COMADEM, Monash University, Australia, 1998.
- [4] R. M. Jones, Application note: CM3086, "Monitoring of screw compressor bearing and rotational elements", SKF Reliability systems, 2003.
- [5] T. Kim, "Feedforward neural networks for fault diagnosis and severity assessment of a screw compressor", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 9, No. 5, 1995, pp. 485-496.
- [6] P. Nivesrangsarn, J. A. Steel, and R. L. Reuben, "Source location of acoustic emission in diesel engine", Mechanical System and Signal Processing, Vol. 21, No. 2, 2007, pp. 1114-1103.
- [7] S. Klinchaeam, and P. Nivesrangsarn, "Condition monitoring of compressors using sound and vibration signals", The 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, ME-Nett , DRC-012, 2007
- [8] N. H. Pontoppidan, S. Sigurdsson, and J. Larsen, "Condition monitoring with mean field independent components analysis", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 19, 2005, pp. 1337-1347
- [9] Y. C. MA, and O. K. MIN, "Pressure calculation in a compressor cylinder by a modified new Helmholtz modeling", Journal of Sound and Vibration, Vol. 243, No. 5, 2001, pp. 775-796
- [10] C. J. LI, and X. YU, "High pressure air compressor valve fault diagnosis using feed forward and neural networks", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 9, 1995, pp. 527-536