

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแสดงรูปร่างการสั่นในขณะทำงาน

STRUCTURAL ANALYSIS USING ODS TECHNIQUE

วินัย ตุ่มทอง^{1*} กฤษราวุฒิ ศิริแก้ว² อัมภยา รอดพ่าย² จิระพล ศรีเสริญผล²

¹สถาบันไทย – เยอรมัน 700/1 หมู่ 1 นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร ถ.บางนา-ตราด กม. 57 ต.คลองตำหรุ อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail: winai.t@tgi.mail.go.th, เบอร์โทรศัพท์: 0-3893-0100 Ext.1806, เบอร์โทรสาร: 0-3893-0120

บทคัดย่อ

ปัญหาการสั่นสะเทือนในโครงสร้างหรือเครื่องจักรที่กำลังทำงานบ่อยครั้งที่เกี่ยวข้องกับปัญหาเรโซแนนซ์ ทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงในขณะทำงาน การแสดงภาพเคลื่อนไหวของโครงสร้างหรือเครื่องจักรเป็นประโยชน์อย่างมากต่อนักวิเคราะห์ การเคลื่อนที่ของโครงสร้างหรือเครื่องจักรที่เกิดขึ้นนำไปสู่การแก้ไขปัญหาได้ตรงจุดมากยิ่งขึ้นหรือพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบให้ดียิ่งขึ้นได้ ซึ่งบทความนี้ได้อธิบายเทคนิคการแสดงรูปร่างการสั่นในขณะเครื่องจักรทำงาน (Operational Deflection Shapes, (ODS)) โดยเทคนิคนี้เป็นการแสดงการเคลื่อนที่ของจุดต่าง ๆ บนเครื่องจักรหรือโครงสร้างเทียบกับจุดอ้างอิงใด ๆ บนเครื่องจักรหรือโครงสร้าง และนำเสนอกรณีศึกษาจากการนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนของสแต็กของคูลลิ่งทาวเวอร์และแชสซีรถบรรทุก CB390

คำหลัก: รูปร่างการสั่นในขณะเครื่องจักรทำงาน, ภาพเคลื่อนไหว, คูลลิ่งทาวเวอร์, แชสซีรถบรรทุก

Abstract

Vibration problems in structures or operating machinery often involve resonance problem causes a severe vibration during operation. Animation display of the structure or machine's operating deflection shapes is often very helpful for analyst. The animation of the structure or machine leading to solving a problems or developing design. This article demonstrate to technique of Operational Deflection Shapes(ODS) by this technique shows the movement of a point on the machine or structure relative to any reference point on the machine or structure. And present a case study of applying this technique to the analysis of the vibration of the stack of Cooling Towers and bus chassis model CB390.

Keywords: Operational deflection shape, Animation, Cooling Towers, Bus chassis

1. บทนำ

การวิเคราะห์ปัญหาเครื่องจักรในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เทคโนโลยีการตรวจสัญญาณการสั่นสะเทือน นับว่ามีประโยชน์อย่างมาก ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่เกิดมาจากการหมุนของเพลลา เช่น การเสียสมดุลการหมุน การเยื้องศูนย์กลางการหมุน การหลวมคลอน การเกิดแผลที่แบร์ริง เป็นต้น การใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนมาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาของเครื่องจักรเกิดขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1950 [1] และถูกพัฒนาเรื่อยมาพร้อม ๆ กับวิวัฒนาการด้านคอมพิวเตอร์ ปัญหาของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมจะ

เกิดขึ้นในรูปแบบเฉพาะ จึงได้มีการรวบรวมปัญหาไว้เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหา แต่สำหรับบางปัญหา การวิเคราะห์เฉพาะสัญญาณการสั่นสะเทือนอาจจะเป็นเรื่องที่ยากต่อการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการแสดงรูปร่างการสั่นสะเทือนในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงานให้แสดงเป็นภาพเคลื่อนไหวหรือแถบสี เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาได้ง่ายยิ่งขึ้น [2] ซึ่งเรียกว่า “การแสดงรูปร่างการโก่งงอในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงาน (Operational Deflection Shapes-ODS)”

CST-24

บทความนี้นำเสนอกรณีศึกษาการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างปล่องลมระบายความร้อนและโครงสร้างของรถบัสโดยใช้เทคนิคการแสดงรูปร่างการโก่งงอในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงาน เพื่อนำไปสู่วิธีการลดการสั่น หรือออกแบบโครงสร้างให้มีความแข็งแรงพอเพียง

2. รูปร่างการโก่งงอในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงาน

เทคนิคการแสดงรูปร่างการโก่งงอในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงาน ต่อไปนี้เรียกว่า “ODS”

2.1. นิยามของ ODS

ODS เป็นการเคลื่อนที่ของจุดใด ๆ บนโครงสร้างหรือเครื่องจักรเทียบกับจุดอ้างอิงใด ๆ โดยการเคลื่อนที่นี้เป็นปริมาณทางเวกเตอร์ที่มีทั้งตำแหน่งและทิศทาง การเคลื่อนที่ของจุดที่ระบุในพิกัดใด ๆ ในทิศทางหนึ่ง เรียกว่าลำดับขั้นความอิสระ (Degree Of Freedom, (DOF)) [3]

2.2. ขั้นตอนการทดสอบของ ODS

ในขั้นตอนการทดสอบ ODS จำเป็นต้องมีแบบจำลองของโครงสร้างและข้อมูลสัญญาณการสั่นที่ประกอบไปด้วยขนาดการสั่นและเฟสที่ DOFs ต่าง ๆ

2.2.1 แบบจำลองของโครงสร้าง

การสร้างแบบจำลองของโครงสร้าง (Structure or Geometric Model) สำหรับการแสดงการเคลื่อนไหวสำหรับ ODS ในซอฟต์แวร์ โดยแบบจำลองนี้จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ คือ จุดข้อมูล (Data Point) ที่ใช้ในการแสดงการเคลื่อนไหว โดยการกำหนดค่าจากการวัดในรูปแบบฟังก์ชันของเวลาหรือความถี่เข้าไป

การกำหนดจำนวนและตำแหน่งของจุดข้อมูลในแบบจำลอง ODS (หรือจุดวัดการสั่นสะเทือนบนโครงสร้างจริง) ควรจะเพียงพอต่อการอธิบายลักษณะการดัดโค้งของระบบทางกลที่เกิดขึ้น หากกำหนดจำนวนจุดข้อมูลที่น้อยเกินไป อาจทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของจุดไม่เป็นไปตามรูปร่างของการโก่งงอที่แท้จริง ซึ่งจำนวนจุดข้อมูลเพียงพอต่อการแสดงการเคลื่อนไหวที่สมจริงหรือถูกต้องจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบทางกลที่กำลังพิจารณา ซึ่งมีความแตกต่างกันไป ในกรณีที่ยังไม่มีความรู้หรือความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างพลศาสตร์ดีพอ การเลือกจำนวนจุดข้อมูลในแบบจำลองให้เลือกจำนวนที่มากพอ

2.2.2 ข้อมูลสัญญาณการสั่น

ข้อมูลสัญญาณการสั่นในการทำ ODS แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ Time Domain ODS และ Frequency Domain ODS

- Time Domain ODS คือ ข้อมูลการสั่นที่ได้จากการวัดการสั่นในรูปแบบของโดเมนเวลาของตำแหน่งต่าง ๆ ณ เวลาเดียวกัน

- Frequency Domain ODS คือ ข้อมูลการสั่นที่ได้จากการวัดการสั่นในรูปแบบของโดเมนความถี่ของตำแหน่งต่าง ๆ ที่มีความถี่คงที่ [4-7]

2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ ODS

2.3.1 หัววัดการสั่น (Sensor) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หัววัดการสั่น

ในการทดสอบ ODS สิ่งที่สำคัญคือ สัญญาณการสั่นที่มีคุณภาพ ดังนั้นควรเลือกหัววัดการสั่นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ ส่วนมากเรานิยมใช้ ตัววัดความเร่ง (Accelerometer)

2.3.2 ตัวเก็บข้อมูล (Data Logger)

ตัวเก็บข้อมูลช่วยในการเก็บค่าสัญญาณเพื่อนำไปประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 Data Logger

2.3.3 โปรแกรมวิเคราะห์

โปรแกรมวิเคราะห์ช่วยในการนำข้อมูลการสั่นสะเทือนจากการวัดมาแสดงผลเป็นรูปร่างการสั่น ทำให้นักวิเคราะห์สามารถเข้าใจลักษณะการสั่นที่เกิดขึ้นและวิเคราะห์ปัญหาได้ดียิ่งขึ้น

CST-24

3. กรณีศึกษา

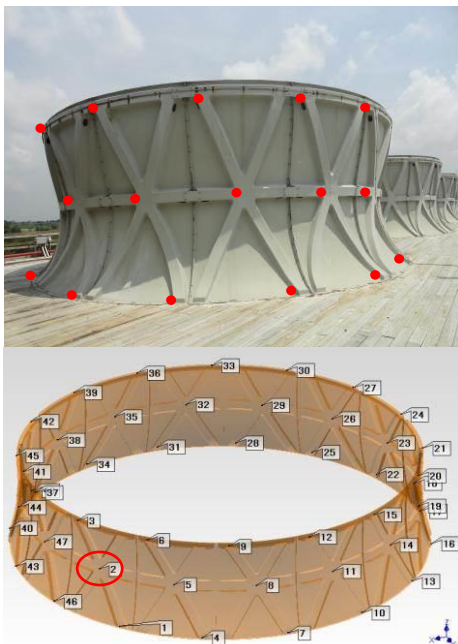
บทความนี้ได้นำเสนอกรณีศึกษา 2 ตัวอย่างที่ได้นำไปใช้ในการดูรูปร่างการสั่น คือ การแสดงรูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อน[8] และรูปร่างการสั่นของแซชชีสรีดบีส์รุ่น CB390

3.1 รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อน

ปล่องลมระบายความร้อนเกิดการสั่นอย่างรุนแรงที่ปล่องลม(Stack) จำนวน 2 ตัว จาก 8 ตัว หลังจากที่ได้มีการ Overhaul และปรับเปลี่ยนมุมมองขาของใบพัดลมเพื่อให้ประหยัดพลังงาน

ข้อมูลเบื้องต้น

- โครงสร้างฐานทั้งหมดทำมาจากไม้
- ตัวปล่องลมระบายความร้อนทำมาจากวัสดุผสม มีทั้งหมด 16 แผ่นประกอบกัน โดยยึดด้วยสกรู และมียางกันระหว่างกลางเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายปล่อง 11 เมตร และที่ตรงกลางปล่องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เมตร สูง 4.19 เมตร ยึดกับโครงสร้างฐานด้วยสกรู
- พัดลมติดตั้งตรงกลางของปล่องและมีใบพัดจำนวน 8 ใบ
- ความเร็วรอบพัดลม 2 Hz โดยประมาณ
- มอเตอร์อยู่ด้านนอกต่อผ่านเพลาลูกเบี้ยวของมอเตอร์ ด้วยอัตราทดเกียร์ 12.93:1
- ความเร็วรอบมอเตอร์ 25 Hz โดยประมาณ
- ความถี่ผ่านของใบพัด (Blade Pass Frequency, BPF) 15 Hz โดยประมาณ

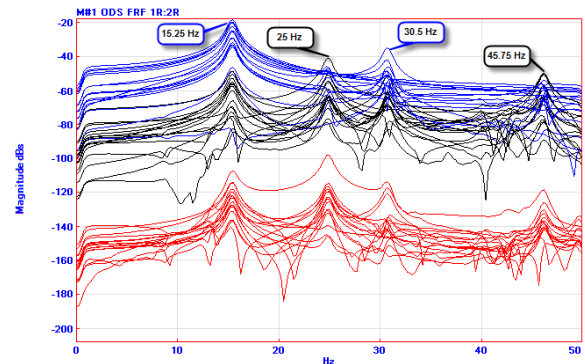


รูปที่ 3 แบบจำลองของปล่องลมระบายความร้อน

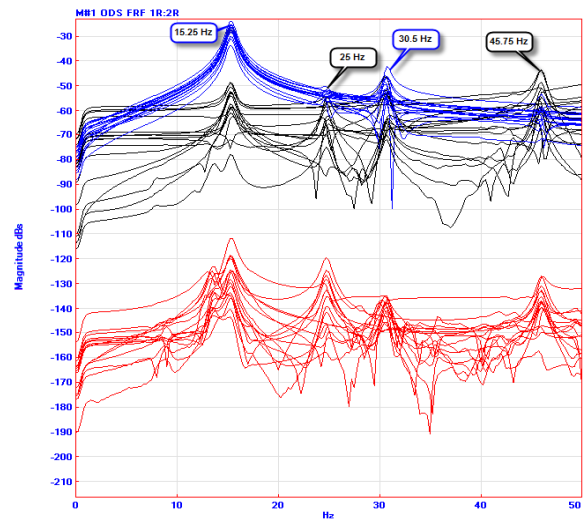
ในการทดสอบได้กำหนดจุดวัดทั้งหมด 48 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3

การวัดการสั่น

การเก็บข้อมูลการสั่นแบบ Frequency Domain ODS โดยใช้ตัววัดความเร่งทั้งหมด 4 ตัว โดยใช้ตัววัดความเร่งหนึ่งตัวเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งกำหนดไว้ที่ตำแหน่งที่ 2 และใช้ตัววัดความเร่ง 3 ตัว เป็นตัวเคลื่อนย้ายไปตำแหน่งต่างๆ การวัดจะวัดครั้งละ 3 จุดพร้อมกัน ทำการวัดค่าในแนวรัศมีของปล่องลมระบายความร้อน



รูปที่ 4 FRF ของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ H



รูปที่ 5 FRF ของปล่องลมระบายความร้อนตัวที่ C

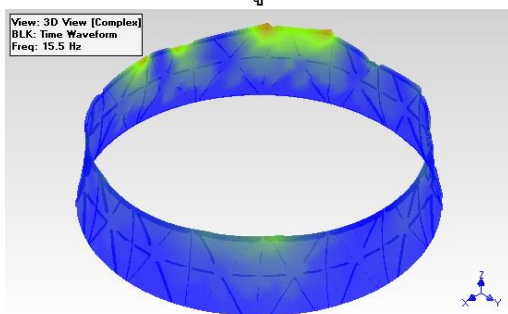
ผลการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการวัดค่าความเร่งของปล่องลมระบายความร้อนทั้งหมด 3 ตัว คือ ตัวที่ C และ ตัวที่ H (เกิดการสั่นรุนแรง) ตัวที่ B (ไม่เกิดการสั่น) จากผลการวัดที่ได้นำมาแสดงผลในรูปของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response Function, FRF) ในช่วง

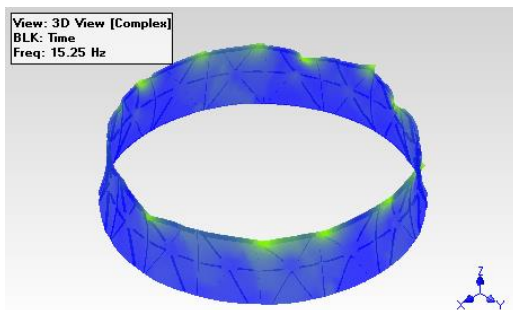
CST-24

ความถี่ 0-50 Hz พบว่า ตัวที่ C และตัวที่ H มีขนาดการสั่นรุนแรงที่ความถี่ตรงกับความถี่ของมอเตอร์และความถี่ผ่านของใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 4 –5 โดยเส้นสีน้ำเงินแสดงขนาดการสั่นของจุดวัดที่ขอบบนของปล่องลมระบายความร้อน เส้นสีดำแสดงขนาดการสั่นของจุดวัดที่ตรงกลางของปล่องลมระบายความร้อน และเส้นสีแดงแสดงขนาดการสั่นของจุดวัดที่ฐานของปล่องลมระบายความร้อน จากกราฟจะเห็นว่าการสั่นที่ขอบบนของปล่องจะมีการสั่นมากกว่าที่ฐาน

จากสัญญาณที่เกิดขึ้น แสดงเป็นรูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อน ดังรูปที่ 6-7



รูปที่ 6 รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อน
ตัวที่ H ที่ $f = 15.5$ Hz



รูปที่ 7 รูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อน
ตัวที่ C ที่ $f = 15.25$ Hz

ปล่องลมระบายความร้อนแสดงการสั่นที่รุนแรงที่ปลายปล่องด้านตรงข้ามกับมอเตอร์ ที่ความถี่ผ่านใบพัด (BPF) ประมาณ 15 Hz และฮาร์โมนิกส์ของความถี่ผ่านใบพัดที่ 30 Hz และ 45 Hz โดยประมาณ และที่ความถี่เดียวกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 25 Hz โดยประมาณ ซึ่งปัญหาที่พบคือ การติดตั้งชุดเกียร์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปล่องลม โดยเอียงไปในทิศทางแนวแกนฝั่งตรงข้ามกับมอเตอร์ ซึ่งหลังจากการแก้ไขปัญหาดังกล่าว การสั่นที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลง

3.2 รูปร่างการสั่นของแชสซีส์รถบรรทุก CB390

ศึกษาเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาแชสซีส์รถบรรทุก CB390 ให้ดียิ่งขึ้น

ข้อมูลเบื้องต้น

- วัสดุโครงสร้างหลักทั้งหมดทำมา Stainless steel RST4003 แบบกล่องหน้าตัด 40 mm x 80 mm หนา 4 mm ต่อกันโดยการเชื่อม

- เครื่องยนต์ 390 hp ยี่ห้อ MAN รุ่น D2066 LOH
Cylinders and arrangement : 6 Cylinders in line

Operation mode : 4-stroke diesel engine

Idle Speed : 500 – 600 rpm

Max. Power @ 1900 rpm : 390 Hp

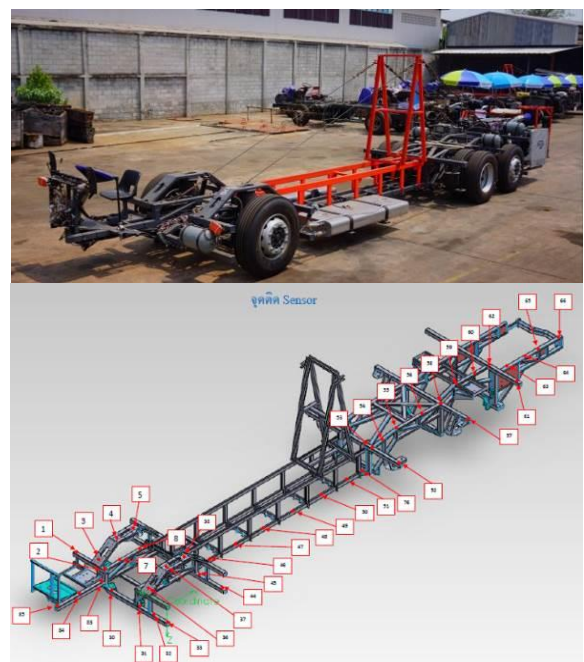
Max. Torque @ 1,000-1,400 rpm : 1,900 Nm.

1 รอบ ระเบิด 3 ครั้ง จังหวะการระเบิด จะทำให้เกิด

Forced Vibration

- ที่รอบเดินต่ำของเครื่องยนต์ 550 rpm

ในการทดสอบได้กำหนดจุดวัดทั้งหมด 88 จุด ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองของแชสซีส์รถบรรทุก CB390

การวัดการสั่น

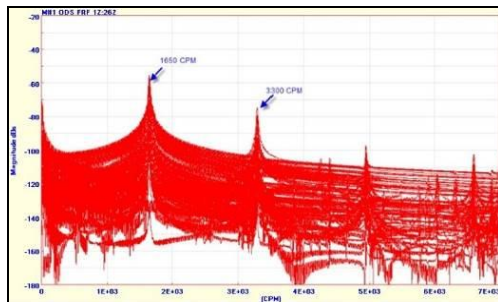
การเก็บข้อมูลการสั่นแบบ Frequency Domain ODS โดยใช้ตัววัดความเร่งทั้งหมด 4 ตัว โดยใช้ตัววัดความเร่งหนึ่งตัวเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งกำหนดไว้ที่ตำแหน่งที่ 26 และใช้ตัววัดความเร่ง 3 ตัว เป็นตัวเคลื่อนย้ายไปตำแหน่งต่างๆ

CST-24

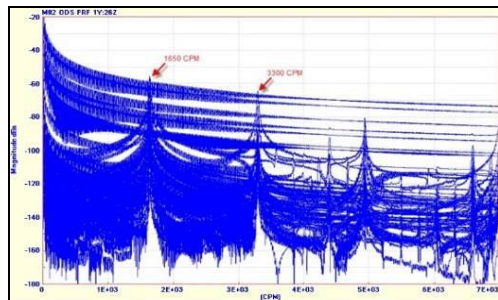
การวัดจะวัดครั้งละ 3 จุดพร้อมกัน ทำการวัดค่าทั้ง 3 แกน คือ แกน x, แกน y และ แกน z ในส่วนของแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน คือเครื่องยนต์ที่จุดระเบิด โดยกำหนดที่รอบเดินเบาซึ่งอ่านจากมิเตอร์ ที่ความเร็วคงที่ 550 รอบต่อนาที ที่จังหวะการระเบิด 3 ครั้ง จะได้ 1 รอบ ดังนั้นจะได้ ความถี่ที่เกิดจากการจุดระเบิดของรอบเดินเบา 1650 RPM

ผลการทดลอง

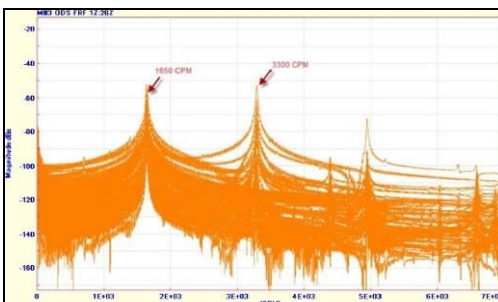
ผลการวัดค่าความถี่ของโครงสร้างแซลชีส์รบบรุ่น CB390 ที่ได้ นำมาแสดงผลในรูปของฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่(Frequency Response Function, FRF) ในช่วงความถี่ 0-500 Hz พบว่า ความถี่ที่ 1,650 RPM และ 3,300 RPM ซึ่งตรงกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์และ 2 เท่าของความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 9



(ก)



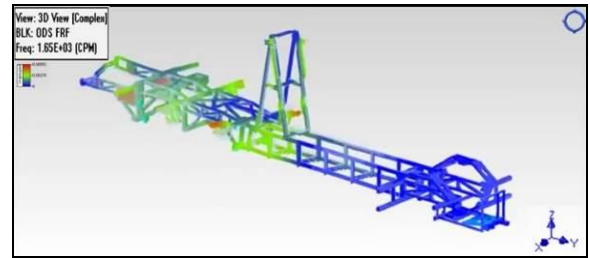
(ข)



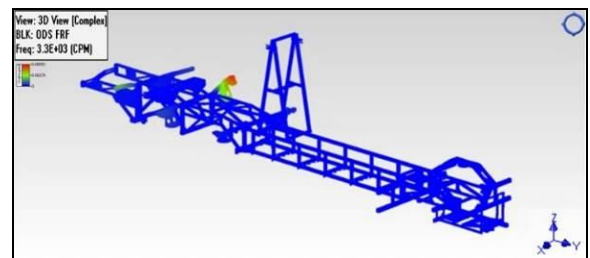
(ค)

รูปที่ 9 FRF ของแซลชีส์รบบ (ก) แกน X, (ข) แกน Y, (ค) แกน Z

จากสัญญาณที่เกิดขึ้น แสดงเป็นรูปร่างการสั่นของแซลชีส์รบบ ดังแสดงในรูปที่ 10-11



รูปที่ 10 รูปร่างการสั่นที่ ความถี่ 1650 CPM



รูปที่ 11 รูปร่างการสั่นที่ ความถี่ 3300 CPM

รูปร่างการสั่นที่ได้ เป็นประโยชน์ในการออกแบบเพื่อปรับปรุงโครงสร้างแซลชีส์ ให้มีขนาดการสั่นที่ลดลง หรือทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

4. สรุป

เทคโนโลยีการแสดงผลภาพเคลื่อนไหวในขณะโครงสร้างหรือเครื่องจักรกำลังทำงาน สามารถช่วยให้นักวิเคราะห์สามารถหาสาเหตุของการสั่นได้ รวมถึงเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างหรือเครื่องจักรให้ดียิ่งขึ้นได้

5. ข้อเสนอแนะ

การแสดงผลรูปร่างการสั่นในขณะเครื่องจักรกำลังทำงาน ต้องอาศัยซอฟต์แวร์และเครื่องมือสำหรับการเก็บค่าสัญญาณการสั่นซึ่งมีราคาแพง จึงไม่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป จะมีใช้ในมหาวิทยาลัยหรือสถาบันที่ให้คำปรึกษาด้านการวิเคราะห์สั่นบางแห่งเท่านั้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันไทย – เยอรมัน ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบริษัท อู๋เซดชัยอุตสาหกรรม จำกัด

CST-24

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dennis H.S., "INTRODUCTION TO VIBRATION TECHNOLOGY," November, 1994
- [2] DeMatteo, T., "Operational Deflection Shape and Modal Analysis Testing To Solve Resonance Problems," ODS & Modal, CSI RBM University 2001.
- [3] McHargue P.L. & Richardson M.H., "OPERATING DEFLECTION SHAPES FROM TIME VERSUS FREQUENCY DOMAIN MEASUREMENTS," Proceedings of 11th IMAC, February, 1993.
- [4] Richardson M.H., "Is It a Mode Shape, or an Operating Deflection Shape?," Sound & Vibration Magazine 30th Anniversary Issue, March, 1997.
- [5] Schwarz B.J. and Richardson M.H., "INTRODUCTION TO OPERATING DEFLECTION SHAPES," Proceedings of CSI Reliability Week, October, 1999.
- [6] Schwarz B.J. and Richardson M.H., "Display Operating Deflection Shapes from Nonstationary Data," Proceedings of sound and vibration, June, 2000.
- [7] Schwarz B.J. and Richardson M.H., "Measurements Required for Displaying Operating Deflection Shapes," Proceedings of 22nd IMAC, January 26, 2004.
- [8] Tumthong, W., Srisertpol, J. Klakerdpol, S., and Chaikitti, S., "Operational Deflection Shapes (ODS) of Stack Cooling," The 26th Mechanical Engineering Conference, CD ME-NETT26, CST2028, 5pp. October 24-27, 2012. Chiangrai, Thailand.