

บทที่ 4

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

1.1 ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการสร้าง แบบจำลองการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่แตกต่างกัน 2 แบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- แบบจำลองที่หัวอ่านอยู่ที่ตำแหน่งด้านในของแผ่นดิสก์
- แบบจำลองที่หัวอ่านอยู่ที่ตำแหน่งด้านนอกของแผ่นดิสก์

ขั้นตอนนี้จะสร้าง แบบจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับสร้างรูปทรงต่างๆของแบบจำลอง แบ่งอิเลิเมนต์ และกำหนดชนิดของ

อิเลิเมนต์ ก่อนที่จะแปลงเป็นไฟล์ข้อมูลในรูปแบบต่างๆ เพื่อที่จะส่งต่อไปยังโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ เช่น โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT เป็นต้น

ต่อจากนั้นทำการคำนวณผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับการไหล ของของไหล ซึ่งสามารถใช้กับแบบจำลองของของไหลที่มีสมบัติ ทางกายภาพได้หลายแบบ เช่น ของไหลที่สามารถอัดตัวได้และไม่สามารถอัดตัวได้ ของไหลที่มีความหนืดและไม่หนืด ของไหลที่ ไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน เป็นต้น โปรแกรม FLUENT ช่วยให้วิศวกรจำลองการไหล การถ่ายเทมวลและพลังงาน และส่วนที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ไหล เช่น การไหลแบบปั่นป่วนการเกิดปฏิกิริยา และการไหลของของไหลหลายสถานะ ซึ่งเราจะทำการศึกษาถึง ความดัน ความเร็ว และเส้นทางการไหลของอากาศภายใน

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เคยมีผู้ทำมาแล้วเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง แล้วทำการคำนวณโดยใช้แบบจำลองการไหลที่ขึ้นกับเวลา หรือ Large Eddy Simulation (LES) Turbulence model ในการหาสัมประสิทธิ์ของแรงที่กระทำต่อขาของหัวอ่าน/เขียนที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศ แล้วบันทึกค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้เพื่อนำมาวิเคราะห์การสั่นสะเทือนต่อไป

1.2 สร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือนของหัวอ่าน/เขียน ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับระเบียบวิธีทางไฟไนต์อิเลิเมนต์ โปรแกรม ANSYS นี้สามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมได้หลายด้าน เช่น การวิเคราะห์โครงสร้าง, การวิเคราะห์ความร้อน, การวิเคราะห์การไหล, การวิเคราะห์ การสั่นสะเทือน

รวมถึง การวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่ผู้ใช้สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันระหว่างแต่ละด้านของงานเชิงวิศวกรรมได้ เช่น การวิเคราะห์ด้านความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้าง หรือ การวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าได้

ต่อจากนั้นจะมีการศึกษาความถี่ธรรมชาติของหัวอ่าน/เขียนข้อมูล และนำความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานจริงที่ได้จากการวัดโดยเครื่อง LDV (Laser Dropper Vibrometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับวัด ความถี่ในการสั่นสะเทือน, ความเร็ว และระยะทางในการเคลื่อนที่ ด้วยวิธี ที่ไม่มีการสัมผัสกับวัตถุที่ถูกวัด เครื่อง Laser Dropper Vibrometer จะใช้ ลำแสง เลเซอร์ เป็นตัววัดสัญญาณ โดยที่เครื่องนี้สามารถที่จะวัดความถี่ในการสั่นสะเทือนได้ตั้งแต่ ความถี่ต่ำที่มีค่าเข้าใกล้ 0 Hz จนถึง 24 MHz และสามารถวัดระยะทางได้ในหน่วย เล็กๆ เช่น นาโนเมตร ไปจนถึง หน่วยเมตร

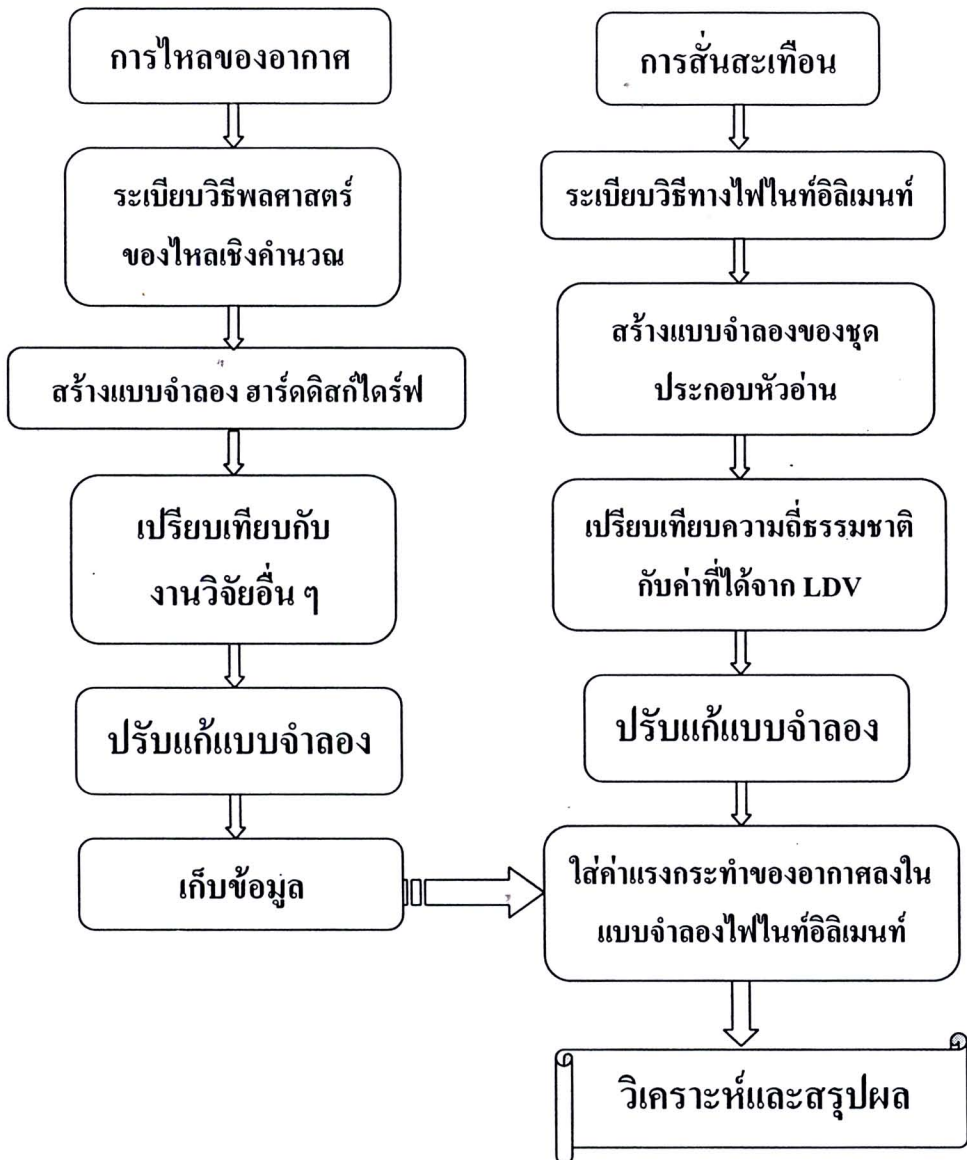
1.3 กำหนดค่าของแรงที่ได้จากแบบจำลองการไหลของอากาศ ลงในแบบจำลองของการสั่นสะเทือนซึ่งเราสามารถแบ่งรูปแบบการไหลของอากาศออกได้สองชุด โดยใช้ค่าแรงยก 2 ชุด ที่ได้จาก แบบจำลองการไหลคือ 1) ตำแหน่งของหัวอ่านล่างสุดและบนสุด 2) ตำแหน่งของหัวอ่านส่วนกลาง เมื่อหัวอ่านอยู่ที่ตำแหน่ง ด้านในของแผ่นดิสก์เนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าผลกระทบในการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งของหัวอ่านที่อยู่ด้านใน มีผลกระทบมากกว่าอย่างชัดเจน

1.4 ศึกษาการสั่นสะเทือนของหัวอ่านในแนวสูงต่ำ (หรือ fly-high) ที่ได้จากแบบจำลองการสั่นสะเทือน

1.5 สรุปผลการวิจัย



เราสามารถแสดงแผนผังการดำเนินงานได้ดังนี้



ภาพที่ 26 แสดงแผนผังการดำเนินการวิจัย

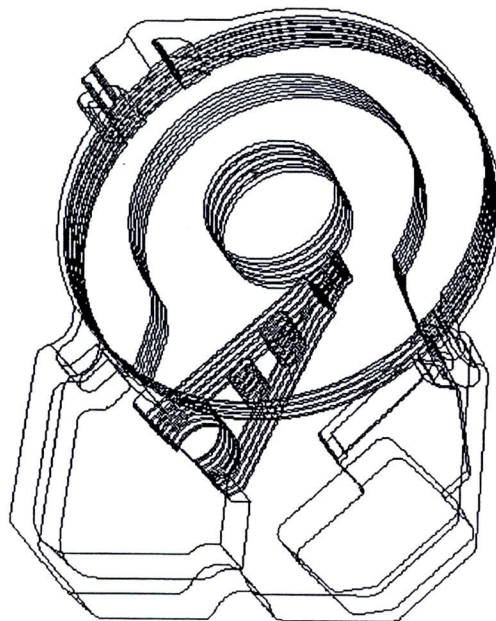
2. การศึกษาการไหลของอากาศด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

2.1 การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT

การวิจัยนี้ได้ทำการสร้างโมเดลจำลองการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว แบบ 10 หัวอ่านเขียนข้อมูล ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป GAMBIT โดยอ้างอิงถึงขนาดฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เท่ากับขนาดฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีขายจริงตามท้องตลาด การสร้างแบบจำลอง

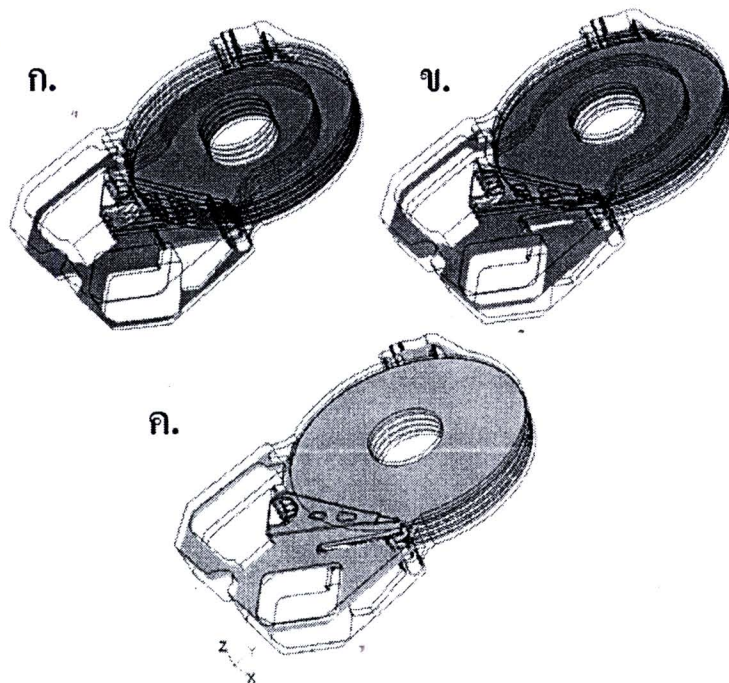
การไหลนี้สร้างขึ้นจากการกำหนดจุดพิกัดในตำแหน่งต่างๆของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แล้วทำการวาดเส้นเพื่อเชื่อมต่อจุด เพื่อให้เป็นรูปร่าง 3-มิติ ดังแสดงในภาพที่ 27

เมื่อทำการสร้างส่วนประกอบต่างๆ ภายในตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เรียบร้อยแล้วจะต้องทำการสร้างปริมาตร ของอากาศโดยการนำเอาปริมาตรของส่วนประกอบต่างๆ เช่น แผ่นมีเดีย ชุดประกอบหัวอ่าน/เขียน ตัวกั้นอากาศ (Air shroud) และแม่เหล็ก ไปหักออกจากปริมาตรของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากนั้นจะได้ปริมาตรของอากาศโดยมีปริมาตรของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นเสมือนกำแพงที่อยู่กั้นที่ (Wall) เป็นตัวสกัดกั้นการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



ภาพที่ 27 แก้วโครงลายเส้นของแบบจำลองฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ซึ่งการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แบบ 10 หัวอ่าน/เขียนนี้ เราจะแยกการพิจารณารูปแบบการไหลของอากาศเป็นสามรูปแบบ คือ รูปแบบแรกคือ การไหลของอากาศที่ไหลผ่านหัวอ่าน/เขียนตัวล่างสุดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งเป็นหัวอ่าน/เขียนที่ไม่มีตัวกั้นอากาศ รูปแบบที่สองคือ การไหลของอากาศที่ไหลผ่านหัวอ่านตัวระหว่างกลางซึ่งเป็นหัวอ่าน/เขียนที่มีตัวกั้นอากาศ และมีอิทธิพลของแผ่นที่อยู่ติดกันเพิ่มขึ้นมา รูปแบบแรกคือ การไหลของอากาศที่ไหลผ่านหัวอ่าน/เขียนตัวบนสุด ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับหัวอ่าน/เขียนตัวที่อยู่ล่างสุด



ภาพที่ 28 ก., ข., ค. แสดงภาพตัดของระนาบของหัวอ่านด้านล่างสุด หัวอ่านตรงกลาง และหัวอ่านตัวบนสุด ตามลำดับ

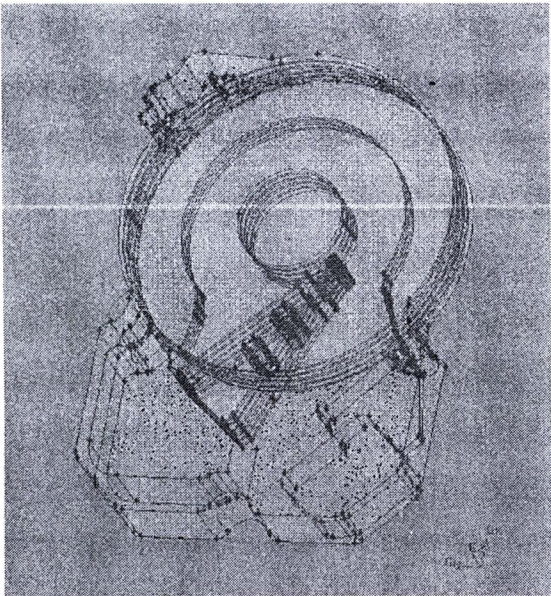
2.2 การกำหนดเมช (Mesh) ของแบบจำลองการไหลของอากาศ

การวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดขนาดของเมชขึ้นมาสามค่า แล้วทำการหาขนาดของเมชที่เหมาะสมโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณของเมชแต่ละขนาด คือ 0.021, 0.023, 0.025 นิ้ว พบว่า เมื่อขนาดของเมชมีขนาดเท่ากับ 0.021 นิ้วค่าของข้อมูลที่ได้ไม่ต่างจากค่าของข้อมูลที่ได้จากเมชขนาด 0.023 นิ้วเลย แต่เมชขนาด 0.025 นิ้ว ไม่สามารถใช้ได้เพราะขนาดของเมชมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของอากาศในส่วนที่แคบๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนั้น ขนาดของเมชที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาด 0.023 นิ้ว เพราะขนาดของเมชที่ใหญ่กว่าจะใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า โดยมี

รายละเอียดดังตารางที่ 3 โดยที่มีจำนวนอิเลิเมนต์ทั้งหมดประมาณ 2,500,000 อิเลิเมนต์ และหลังจากทำการเมชแบบจำลองทั้งหมดแล้วจะได้ แบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 29

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของเมช

หัวข้อ	การกำหนด
ขนาดของเมช (นิ้ว)	0.023,0.01(Head)
อิเลิเมนต์	Tetrahedral
ชนิดของอิเลิเมนต์	Tgrid



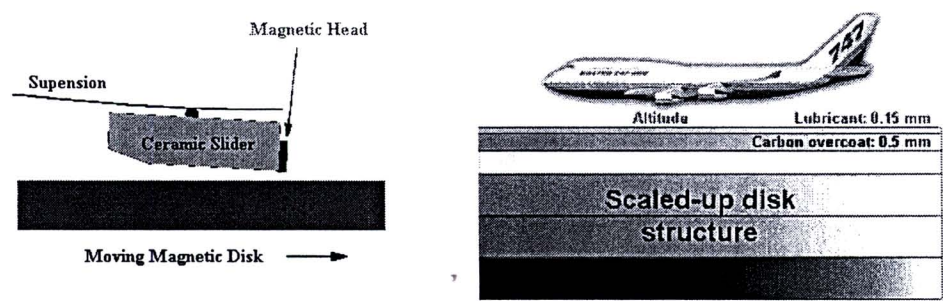
ภาพที่ 29 แสดงแบบจำลองการไหลของอากาศที่ทำการเมชแล้ว

2.3 การกำหนดขอบเขตสถานะเงื่อนไขของแบบจำลองการไหลของอากาศ

การวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตสถานะ ให้ผิวของอุปกรณ์ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทุกชิ้น มีสถานะเป็นผนัง ยกเว้นผิวของแผ่นมีเดีย ที่จะถูกกำหนดให้มีสถานะเป็นผนังเคลื่อนที่ โดยหมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 7200 รอบต่อนาที โดยจะทำการศึกษาถึงการไหลของอากาศ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนอยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งด้านนอกของแผ่นมีเดีย และตำแหน่งด้านในของแผ่นมีเดีย

การกำหนดขอบเขตสถานะเงื่อนไขของแบบจำลองการไหลของอากาศนี้จะทำโดยโปรแกรมวิเคราะห์การไหลของอากาศสำเร็จรูป Fluent แล้วทำการวิเคราะห์ผล โดยในเบื้องต้นจะใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน RNG K-epsilon เพื่อดูรูปแบบการไหลวน และค่าของความดันและความเร็ว เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองที่ใช้ ซึ่งเราจะตรวจสอบแบบจำลองได้โดยการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เคยศึกษามาก่อนหน้า

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อการลอยตัวของหัวอ่าน/เขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ดังภาพที่ 30 ดังนั้นเราจึงสนใจเพียงผลกระทบของแรงยก (Lift force) ที่กระทำกับหัวอ่าน/เขียนข้อมูลเท่านั้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากแรงยกจะมีค่ามากกว่าแรงฉุด-ลาก (Drag force) มาก และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเมื่อหัวอ่าน/เขียนข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่งด้านนอกของแผ่นมีเดีย (OD) แรงกระทำที่เกิดจากการไหลของอากาศจะจะมีผลให้เกิดการสั่นสะเทือนน้อยกว่าขณะหัวอ่าน/เขียนข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่งด้านในของแผ่นมีเดีย (ID)



Lift force >> Drag force

ภาพที่ 30 แสดงภาพการลอยตัวของหัวอ่าน/เขียน

ดังนั้นเราจะทำการวิเคราะห์ผลของแรงยกที่เกิดจากผลของการไหลของอากาศขณะที่หัวอ่าน/เขียนข้อมูลอยู่ด้านในของแผ่นมีเดียด้วยแบบจำลองการไหลที่ขึ้นกับเวลา หรือ Large- Eddy Simulation (LES) Turbulence model ดังมีรายละเอียดการกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าการกำหนดเงื่อนไขต่างๆที่ใช้คำนวณในโปรแกรม FLUENT

หัวข้อ	การกำหนด
Solver	Segregated
Formulation	Implicit
Time	Unsteady
Unsteady Formulation	2 nd -Order Implicit
Turbulence Model	Large Eddy Simulation, LES
Sub-grid Scale Model	Smagorinsky – Lilly
Pressure – Velocity Coupling	SIMPLEC
Discretization	Low Diffusion Second Order
Convergence Criteria	1.00E-6
Time Step Size (s)	8.00E-6
Total Time Steps	32000Time Steps (0.25 sec, 15 revolution)

2.4 ผลที่ได้จากแบบจำลอง

ผลที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน Large Eddy Simulation (LES) Turbulence model จะแสดงให้เห็นทราบถึงค่า สัมประสิทธิ์ของแรงยกที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศภายใน ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแรงยกที่ขึ้นกับเวลาได้ ต่อจากนั้นแรงยกที่ขึ้นกับเวลานี้จะถูกนำไปใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตเพื่อวิเคราะห์ในเรื่องของการสั่นสะเทือนของชุดประกอบขาหัวอ่าน/เขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต่อไป

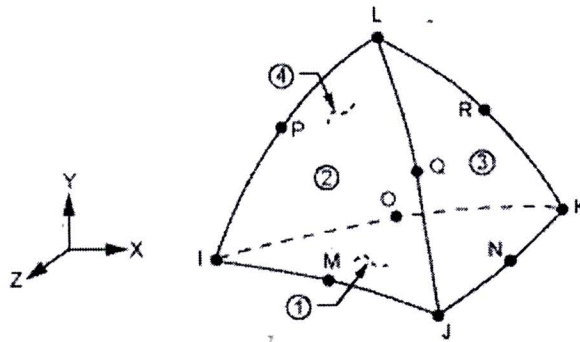
3. การศึกษาการสั่นสะเทือนด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 การสร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน/เขียน (HSA)

แบบจำลองการสั่นสะเทือนของหัวอ่าน ในงานวิจัยนี้ได้ถูกสร้างขึ้น โดยการ
ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS ซึ่งจะมีส่วนประกอบดังนี้คือส่วนของแขนหัวอ่าน (Arm), ส่วนของ
Suspension, สายไฟ, ขดลวด และหัวอ่าน/เขียน (Slider) และจะไปประกอบกันเป็น ชุดประกอบ
หัวอ่าน/เขียนข้อมูลแบบ 10 หัวอ่าน/เขียนข้อมูล

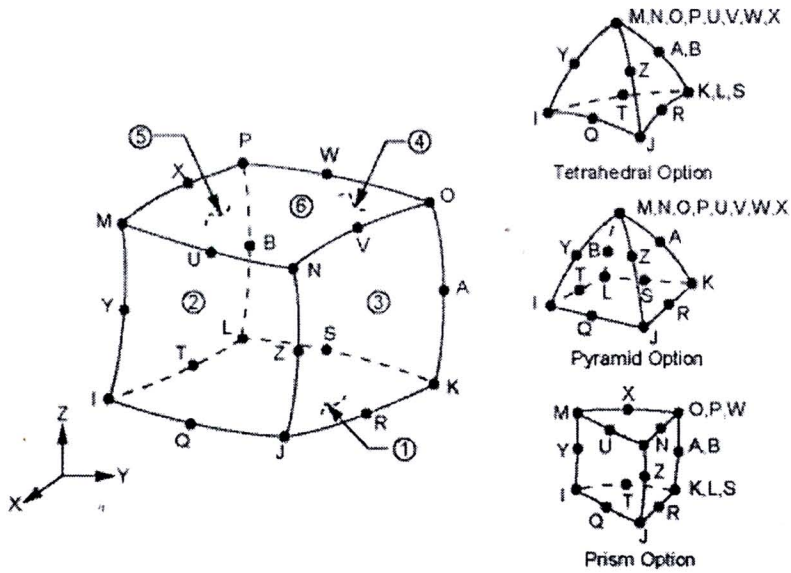
3.2 การกำหนดชนิดอีลิเมนต์และการสร้างเมช

งานวิจัยนี้ได้ใช้ชนิดอีลิเมนต์ส่วนใหญ่เป็น อีลิเมนต์ ชนิด Solid 187 ซึ่งเป็น
อีลิเมนต์ชนิด 3 มิติ รูปทรงกรวยสามเหลี่ยม (Tetrahedral) มีจุดเชื่อมต่อ (node) 10 จุดเชื่อมต่อ จะมี
การเคลื่อนที่ทั้งหมด 3 องศาอิสระ คือการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, (UX), การเคลื่อนที่ในแนวแกน
Y, (UY), และการเคลื่อนที่ใน แนวแกน Z, (UZ)



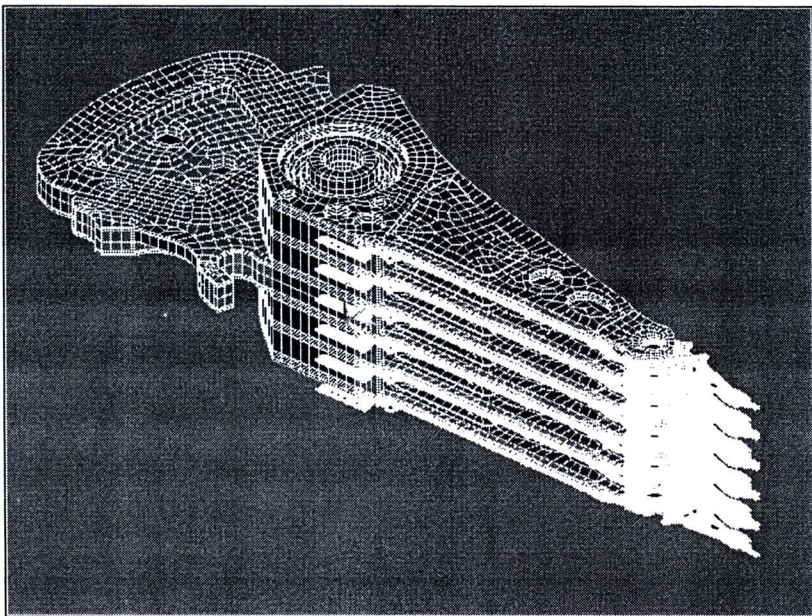
ภาพที่ 31 อีลิเมนต์ ชนิด Solid 187

ส่วนอีลิเมนต์อีกชนิดหนึ่งคือ Solid 186 อีลิเมนต์ชนิดนี้เป็นอีลิเมนต์แบบ 3 มิติ
มีรูปทรงได้หลากหลายรูปทรง เช่น รูปทรงลูกบาศก์ จะมีจุดต่อ 20 จุดต่อ, รูปทรงกรวยสามเหลี่ยม,
รูปทรงพีระมิด, รูปทรงปริซึม แต่ละจุดต่อจะมีการเคลื่อนที่ทั้งหมด 3 องศาอิสระ คือการเคลื่อนที่
ในแนวแกน X, (UX), การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y, (UY), และการเคลื่อนที่ใน แนวแกน Z, (UZ)



ภาพที่ 32 อิลิเมนต์ ชนิด Solid 186

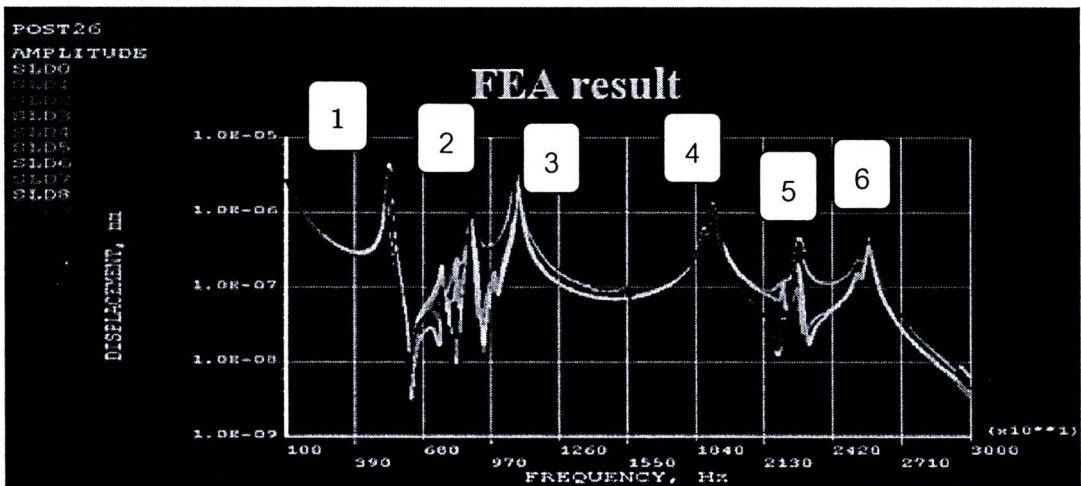
ซึ่งหลังจากที่ทำการเมชแล้วจะมีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองโดยการนำความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากชิ้นงานจริงโดยเครื่อง Laser Doppler Vibrometer แล้วทำการปรับแต่งอิลิเมนต์จนกว่าจะมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงจะได้จำนวนอิลิเมนต์ที่เหมาะสมคือ 650,000 อิลิเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 33



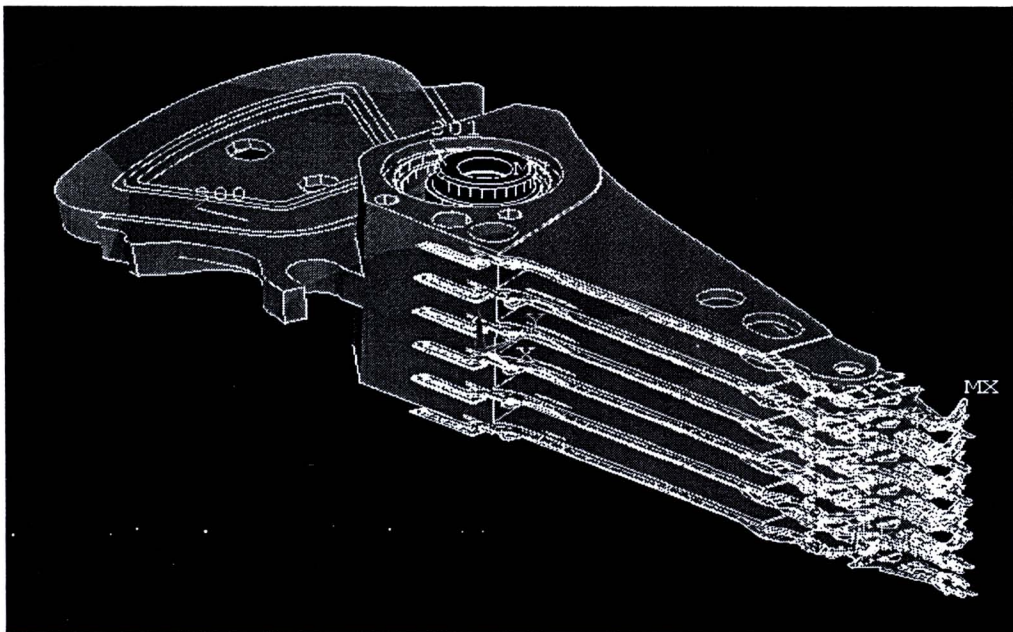
ภาพที่ 33 หัวอ่านที่ทำการเมชแล้ว

3.3 การหาความถี่ธรรมชาติของหัวอ่าน

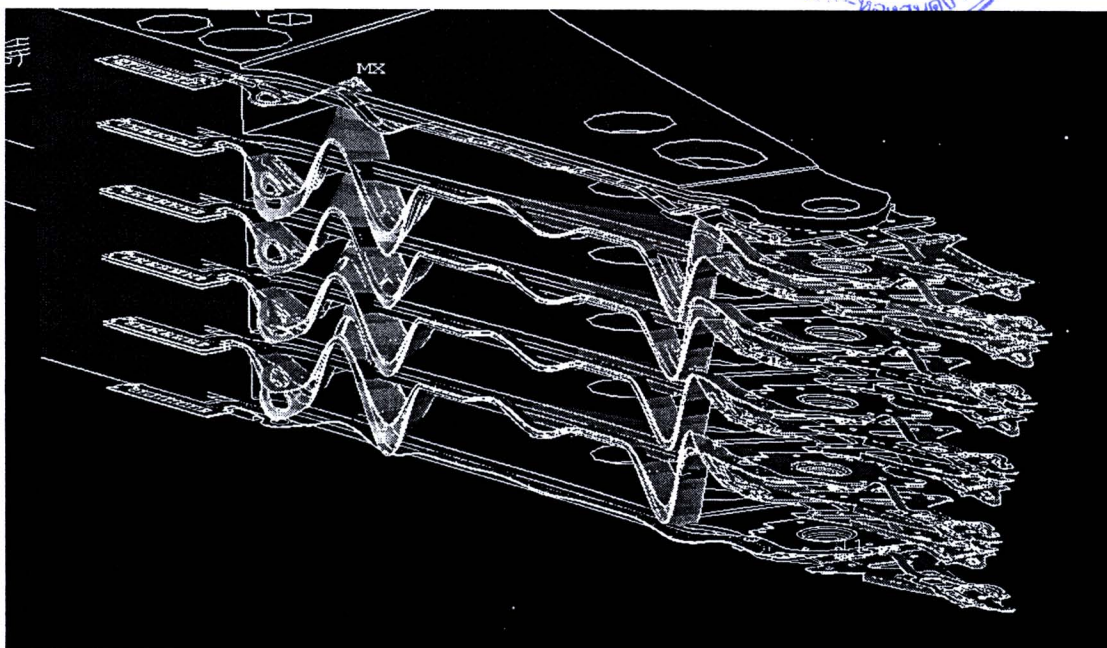
ความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองของชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนที่ได้จะมีจำนวนมากมายหลายโหมด แต่ความถี่ธรรมชาติที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจะมีอยู่ด้วยกันอยู่หกโหมดหลักๆ ซึ่งความถี่ธรรมชาติ 6 โหมด หลักๆ จะถูกแสดงค่าออกมาเป็นกราฟของ Bode ดังแสดงในภาพที่ 34-40



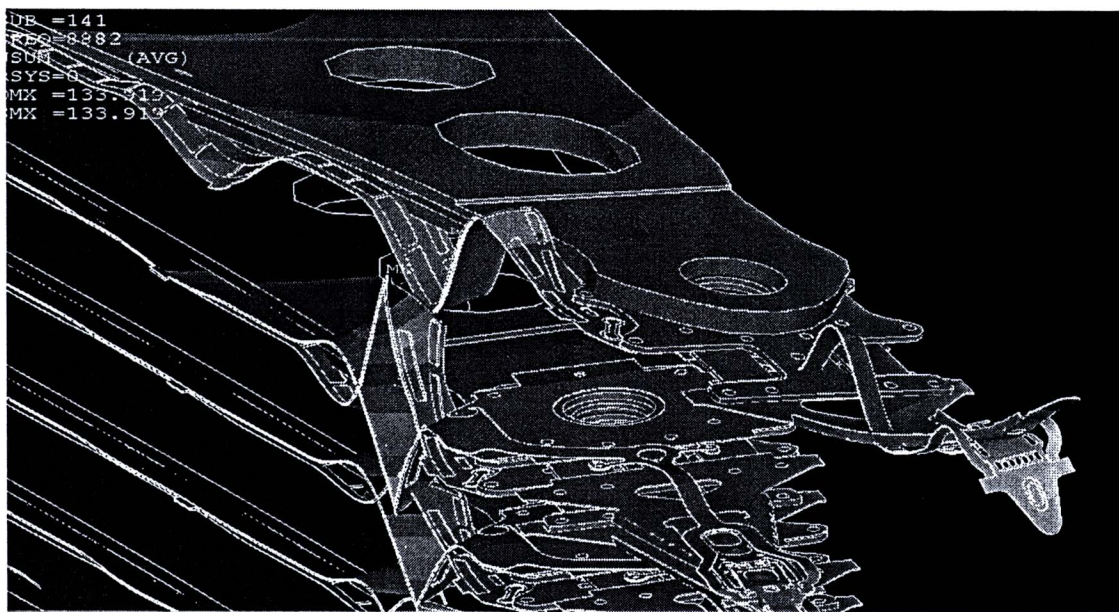
ภาพที่ 34 แสดงกราฟของ bode ของการสั่นสะเทือนของโมเดล



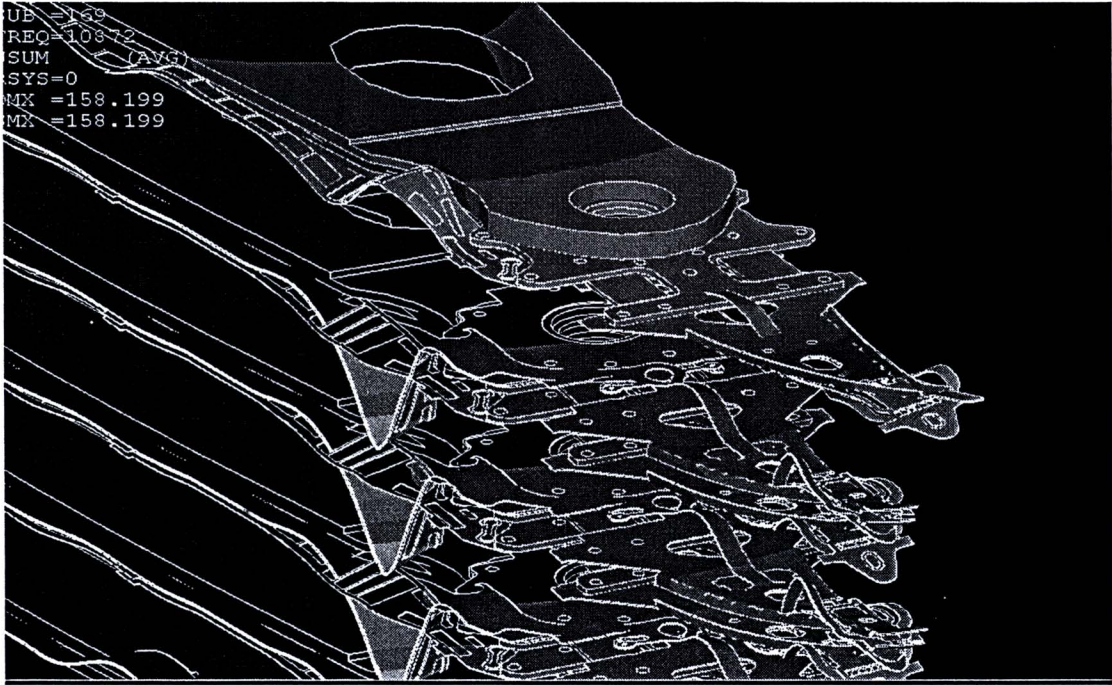
ภาพที่ 35 โหมดแรก HSA 1st System mode Frequency 5.356 kHz



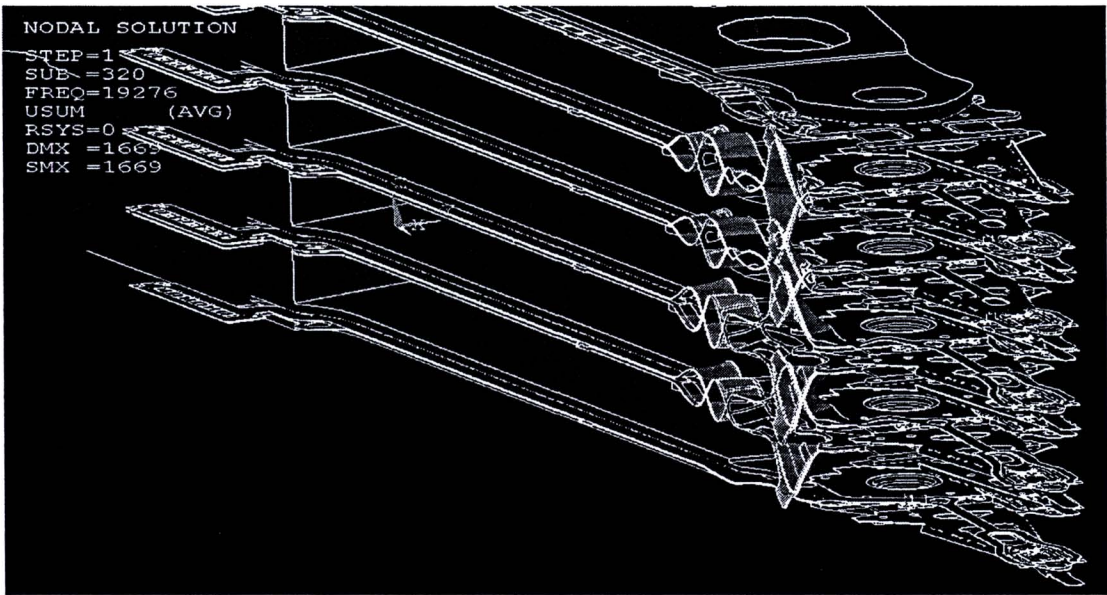
ภาพที่ 36 โหมดที่สอง Arm 1st Torsion +FOS bending at Elbow and End Frequency 7.452 kHz



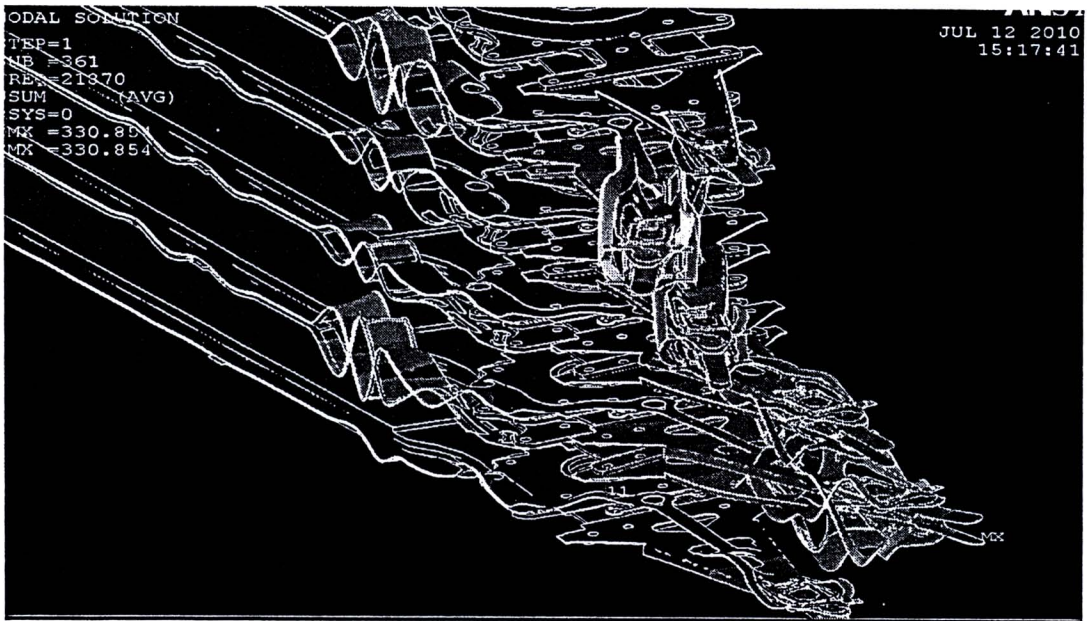
ภาพที่ 37 โหมดที่สาม Arm Torsion (Scissors) + FOS 2nd Bending at Elbow and Middle Frequency 8.882 kHz



ภาพที่ 38 โหมดที่ 2nd HSA System mode Frequency 10.872 kHz

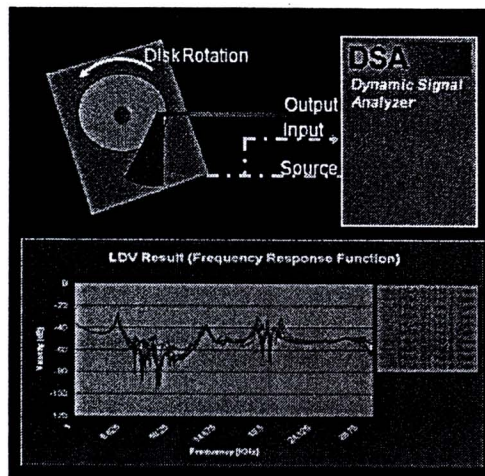


ภาพที่ 39 โหมดที่ห้า Higher order FOS tosion Frequency 19.276 kHz



ภาพที่ 40 โหมดที่หก HGA Sway Frequency 21.870 kHz

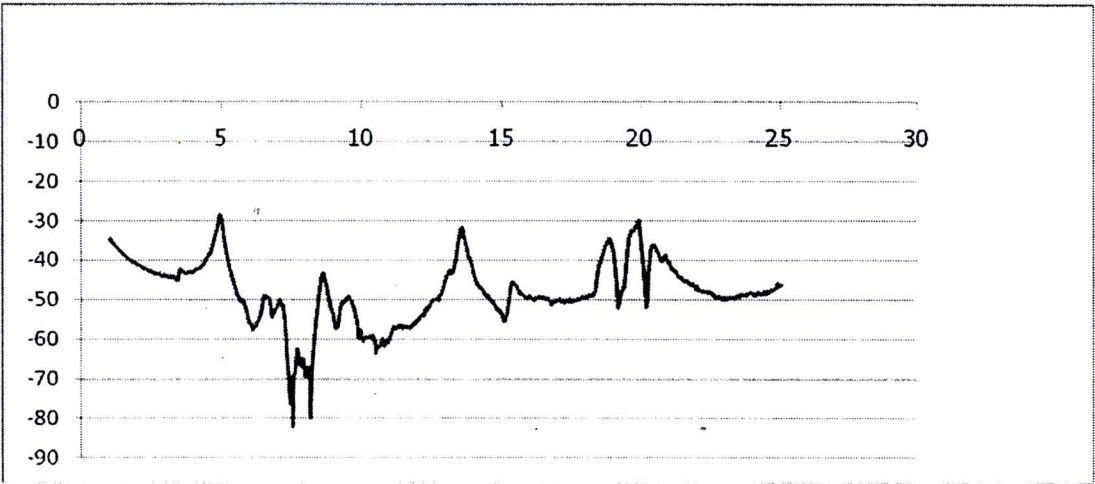
3.4 การเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองกับงานจริง



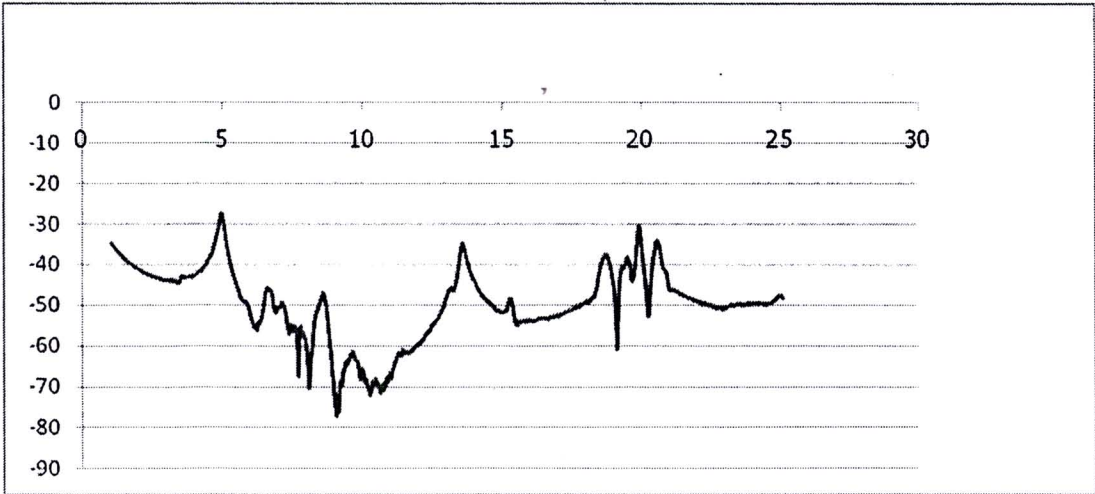
ภาพที่ 41 แสดงรูปแบบการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่อง LDV

การวัดการสั่นสะเทือนจากชิ้นงานจริง ได้มีการวัดค่าการสั่นสะเทือนจาก หัวอ่าน/เขียนข้อมูลทั้งสิบหัว ด้วยเครื่อง Laser Doppler Vibrometer (LDV) โดยการวัดแบบจุดเดียว (Single-point) ทำได้โดยการป้อนกระแสไฟเข้าไปที่ขั้วลวดของชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนเพื่อกระตุ้น

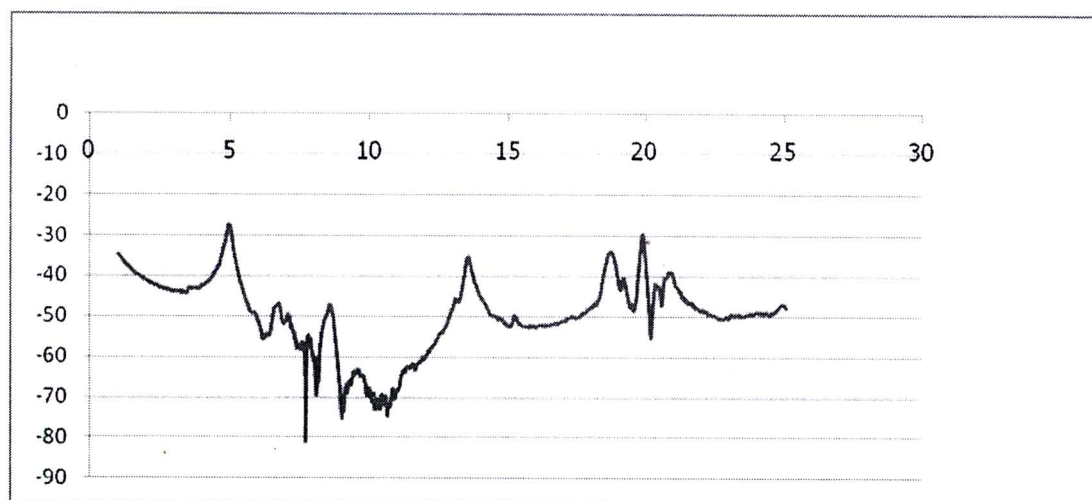
การสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน/เขียน ให้แสดงการสั่นสะเทือนของความถี่ธรรมชาติ
ในโหมดต่างๆ ออกมา ซึ่งค่าที่ได้สามารถแสดงเป็นกราฟ bode ของทั้งสปีดหัวอ่าน/เขียน
เมื่อดูจากกราฟที่ได้นั้นจะพบว่าการสั่นสะเทือนของชุดประกอบหัวอ่าน/เขียน
ที่ได้ทั้งสปีดหัวอ่าน/เขียน มีลักษณะการสั่นสะเทือนที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในภาพที่ 42-51



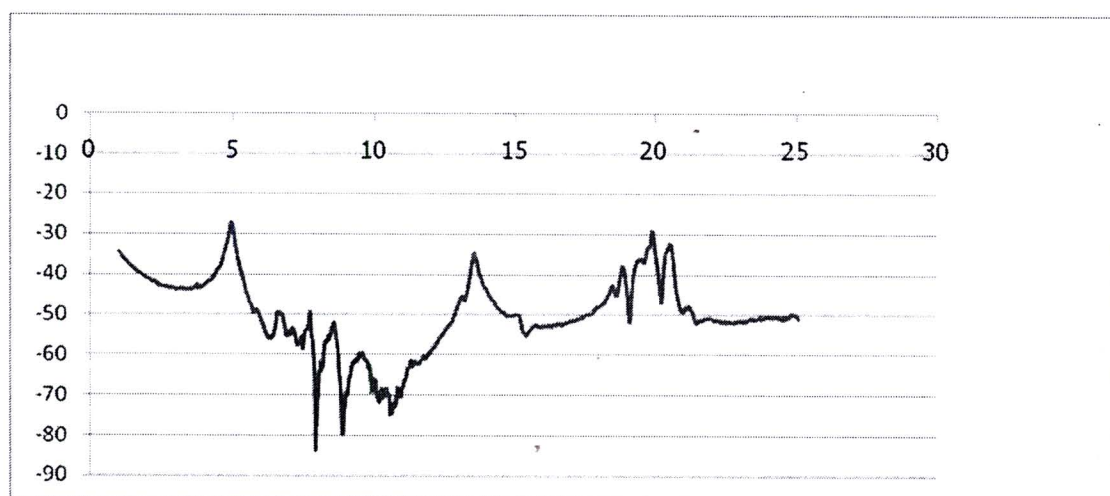
ภาพที่ 42 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 1



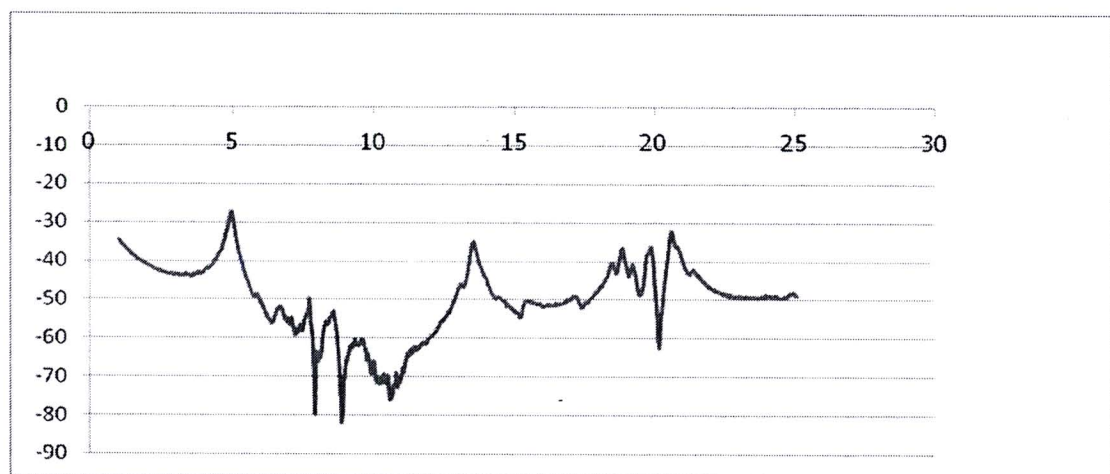
ภาพที่ 43 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 2



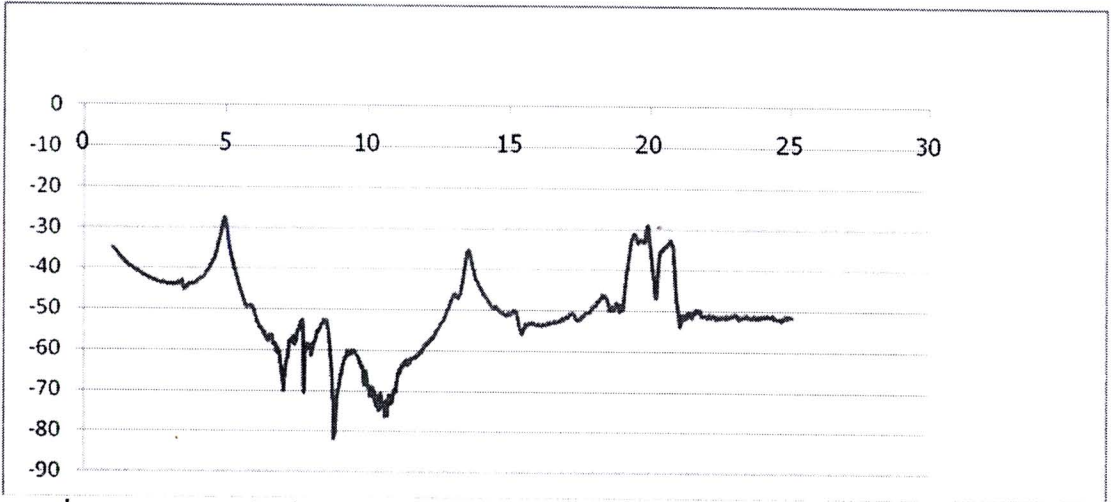
ภาพที่ 44 ภาพแสดงการสัมพันธ์ที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 3



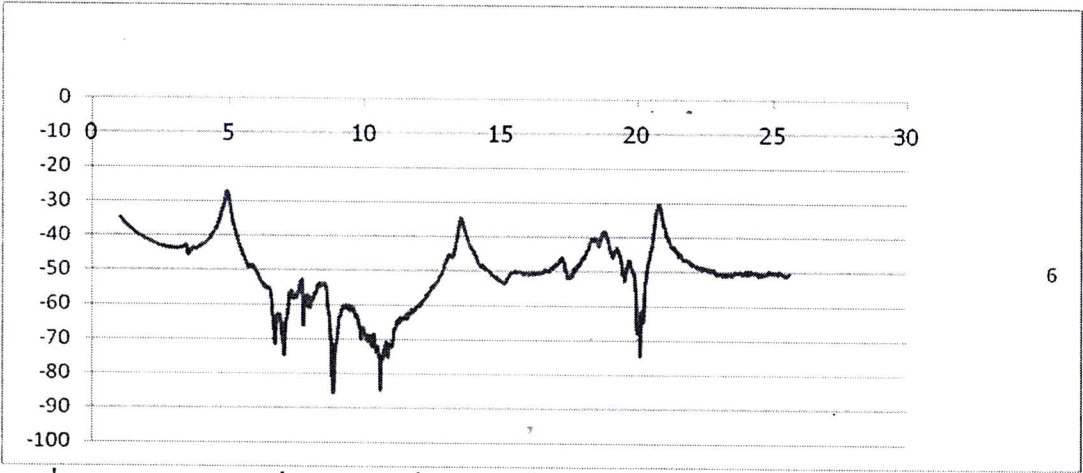
ภาพที่ 45 ภาพแสดงการสัมพันธ์ที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 4



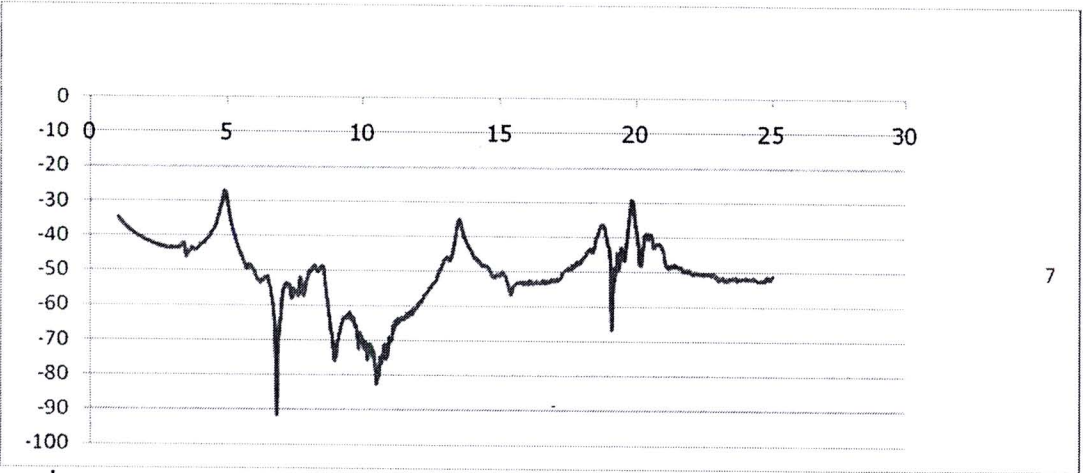
ภาพที่ 46 ภาพแสดงการสัมพันธ์ที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 5



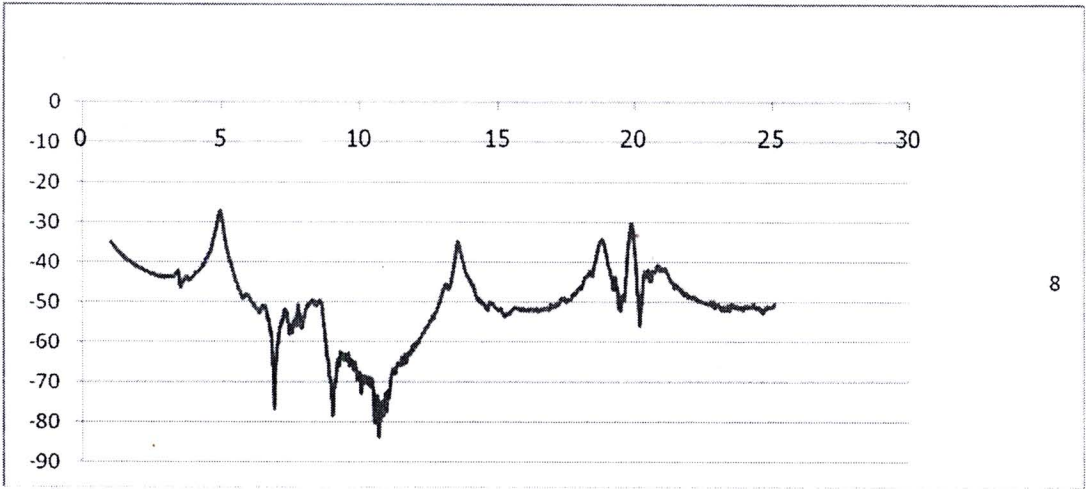
ภาพที่ 47 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 6



ภาพที่ 48 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 7

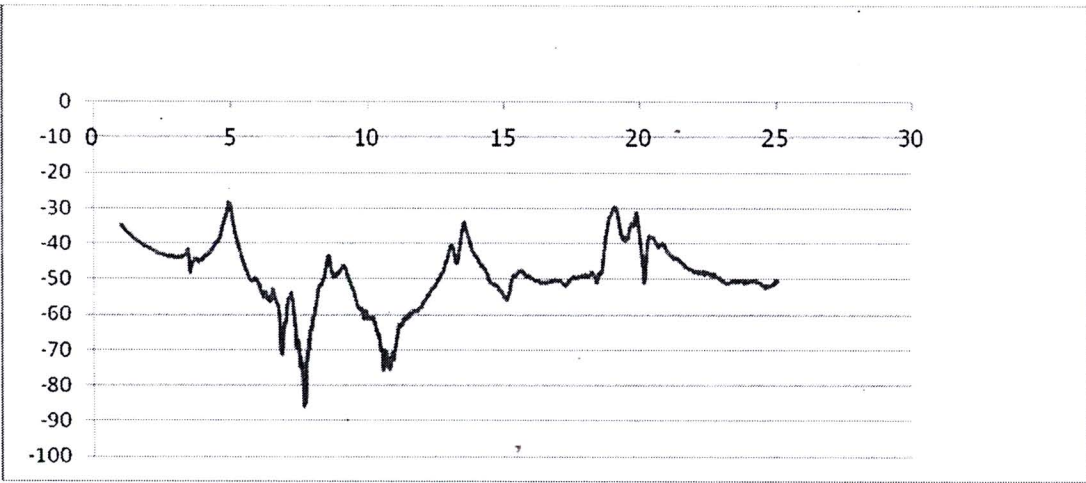


ภาพที่ 49 ภาพแสดงการสั่นสะเทือนที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 8



8

ภาพที่ 50 ภาพแสดงการผันสะเทือนที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 9



ภาพที่ 51 ภาพแสดงการผันสะเทือนที่วัดจากเครื่อง LDV ของหัวอ่านเขียนตัวที่ 10

จากการเปรียบเทียบโหมดหลักๆ หกโหมดของการผันสะเทือนที่ได้จากการวัดจากงานจริงโดยเครื่อง LDV และ กราฟของการผันสะเทือนที่ได้จากระเบียบวิธีทางฟิสิกส์อิลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางฟิสิกส์อิลิเมนต์ กับชิ้นงานจริง มีความถี่ธรรมชาติของแต่ละโหมดเท่าๆ กัน และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางฟิสิกส์อิลิเมนต์ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์การผันสะเทือนแทนชิ้นงานจริงได้