

การศึกษาสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนด้วยวัสดุเพื่อใช้ในฐานะวางชิ้นงานสำหรับกระบวนการขัดสี
ความเที่ยงตรงสูง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Study of vibration damping properties of materials for using as fixture in high-
precision grinding process



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติการหน่วงแสงสั้นสะท้อนด้วยวัสดุเพื่อใช้ใน
	ฐานวางชิ้นงานสำหรับกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง
โดย	นายศิรวิทย์ ดวงทวี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธัชชาย เหลืองวรานันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธัชชาย เหลืองวรานันท์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.หทัย พานิชการ)	

ศิววิทย์ ดวงทวี : การศึกษาสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนด้วยวัสดุเพื่อใช้ในฐานวางชิ้นงานสำหรับกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง. (Study of vibration damping properties of materials for using as fixture in high-precision grinding process) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ธัชชาย เหลืองวรานันท์

แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงเป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลให้คุณภาพผิวของชิ้นงานเซรามิกชนิด ALTiC ที่ถูกขัดสีลดลง โดยที่การควบคุมแรงสั่นสะเทือนนั้นอาจหมายถึงการควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงานเซรามิกชนิด ALTiC ที่จะได้จากกระบวนการขัดสีนั้นๆ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามบติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนของวัสดุที่ใช้ทำฐานวางชิ้นงานในกระบวนการดังกล่าว ซึ่งจะช่วยให้มีการลดลงหรือยับยั้งแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ ในงานวิจัยนี้ได้มีการเลือกใช้วัสดุโลหะที่มีใช้อย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรมและสามารถนำมาใช้เพื่อทำฐานวางชิ้นงานได้ ได้แก่ อะลูมิเนียม ทองแดงอัลลอยด์ และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยที่ทำการทดสอบเพื่อวัดค่า damping ratio ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกถึงสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน นอกจากนี้ยังได้เลือกวัสดุพอลิเมอร์ (Polymer) ทางการค้ามาใช้ร่วมกับวัสดุโลหะ (เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304) ในรูปแบบของวัสดุผสมโดยคาดว่าจะได้ผลของค่า damping ratio ที่สูงมากขึ้น หรือมีการหน่วงแรงสั่นสะเทือนที่ดีขึ้น สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ซิลิโคน (silicone rubber), เทอร์โมเซตโพลียูรีเทน (thermosetting polyurethane), เทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (thermoplastic polyurethane, TPU) และ ไนลอนโพลีเอไมด์ 12 (Nylon 12) ที่ความแข็งต่างกัน 2 ชนิด ในการทดลองเพื่อหาค่า damping ratio จะใช้ชิ้นงานที่มีขนาด 6 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร x 120 มิลลิเมตร ทำการให้แรงกระทำต่อชิ้นงานและตรวจวัดในช่วงของค่าความถี่ตอบสนองของชิ้นงานนั้นๆ แล้วจึงนำค่าแรงสั่นสะเทือนที่ได้มาคำนวณหาค่า damping ratio ต่อไป ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยพบว่าวัสดุโลหะที่ได้ค่า damping ratio สูงที่สุด คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีค่าเท่ากับ 0.0398 และ วัสดุผสมพอลิเมอร์ชนิด TPU มีค่า damping ratio สูงที่สุดที่ 0.0802 และยังคงสูงที่สุดจากวัสดุทั้งหมดที่นำมาทดลอง และเมื่อนำไปใช้ในฐานวางชิ้นงานจริงยังพบว่าฐานวางชิ้นงานที่เสริมด้วยพอลิเมอร์ชนิด TPU ให้ผลค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดหรือมีคุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีที่สุด โดยมีค่า 1.28 นาโนเมตร และมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความหยาบผิว เท่ากับ 1.59 นาโนเมตร

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5870248021 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD: High-precision grinding, Vibration damping, Vibration, surface roughness,
damping ratio

Sirawit Duangtawee : Study of vibration damping properties of materials for using as
fixture in high-precision grinding process. Advisor: Assoc. Prof. Tachai Luangvaranunt,
Ph.D.

Vibration during high-precision grinding process always occurs and causes surface defects which reduce product quality or surface roughness of ALTiC, a kind of engineering ceramics. To control the vibration is a mean to control the surface roughness of ALTiC from the process. This research focuses on studying vibration damping properties of fixture materials, damping capability of fixture material reduces vibration during high-precision grinding. Conventional fixture materials are metals; therefore, various commercial engineering metallic materials such as aluminum, copper alloys and stainless steel had been chosen to be investigated. This research studies their damping property, namely 'damping ratio' value to be used as fixture material. Several commercial polymers are also combined with metallic alloy (stainless steel AISI304) to create composite fixture, expecting a better damping property. Silicone rubber, thermosetting polyurethane (TPU), polyurethane (PU) and two type of Nylon12 (40 and 70 Shore D hardness) were used to make polymer-metal composite materials. Test specimen is in form of a cantilever beam having a size of 6 mm x 20 mm x 120 mm. A forced vibration was triggered, and the free vibration afterward was monitored at a range of frequency. The resulting free vibration is used to calculate the damping ratio value. A higher value means better damping capability of the material. Primary results show that the best metallic alloy for vibration damping is stainless steel grade AISI304, having damping ratio of 0.0398. In polymer-metal composite materials, the highest damping ratio is 0.0802 in TPU-metal composite. For using as fixture in the process, the fixture reinforced with TPU had the best surface roughness of ALTiC pieces which average roughness value as 1.28 nm and RMS roughness value as 1.59 nm.

Field of Study: Metallurgical and Materials Student's Signature

Engineering

Academic Year: 2018 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธาดาย เหลืองวรานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้ ทั้งยังให้โอกาสอันดีต่างๆและประสบการณ์ในการทำงานอันจะเป็นประโยชน์ต่อตัวข้าพเจ้าในภายภาคหน้า รวมไปถึง รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา และ ดร.หทัย พานิชการ ที่ท่านสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และสำหรับคำแนะนำในการปรับปรุงงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำสอน และกำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดช่วงที่ทำการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

ข้าพเจ้าขอขอบคุณการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการเรียนปริญญาโทและงานวิจัยผ่านทางทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ภายใต้การดำเนินการของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณจักรกฤษ สุภาวสุทธิ์ คุณจิตติพงษ์ แดงดีบ และทีมงาน Precision Grinding จาก บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้อย่างดียิ่ง ไม่ว่าจะเป็นการอนุเคราะห์ให้ยืมชุดอุปกรณ์เซนเซอร์ Accelerometer และเครื่องจักรความขัดสีเที่ยงตรงสูง รวมถึงบริการการตรวจวัดความหยาบผิวด้วยเครื่องมือ AFM และถ่ายภาพผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ยังได้ให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าได้เรียนรู้การทำงานและร่วมทำงานกับวิศวกรที่มีความสามารถ ซึ่งเป็นผลให้ข้าพเจ้าได้พัฒนาตนเองให้มีความสามารถในการทำงานที่ติ่มากยิ่งขึ้นไป

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ดร.จตุพล โอภาไพบูลย์ คุณวิศรุต เพ็งเลา คุณกำพล ลีลาฤดี คุณสีปสกุล ยศพิทักษ์ คุณกมลพัชร ศรีทอง คุณจุฑาเมตต์ จารุรัชตพันธ์ และเพื่อนนิสิตปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาและการช่วยเหลือตลอดจนเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงลงได้

ท้ายที่สุดต้องขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าผู้สนับสนุนหลักและกำลังใจอันสำคัญในการทำงานวิจัยฉบับนี้

ศิริวิทย์ ดวงทวี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ปริพหกรรมการเคลื่อนที่.....	5
2.1 สมการการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน (Equation of Vibrational Motion) [1].....	5
2.1.1 Free Vibration	6
2.1.2 Forced Vibration	7
2.1.3 Viscous Damped Vibration	9
2.2 กลไกการหน่วงแรงสั่นสะเทือนในวัสดุ (Damping mechanisms in Materials) [2, 3].....	16
2.3 กลไกการหน่วงแรงสั่นสะเทือนใน High-damping materials (Hidamets) [4]	19
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.4.1 งานวิจัย “Measuring of Vibration Damping Properties of Materials” [5]	20

2.4.2 งานวิจัย “Influence of redmud on the mechanical, damping and chemical resistance properties of banana/polyester hybrid composites” [6]	21
2.4.3 งานวิจัย “Torsional and axial damping properties of the AZ31B-F magnesium alloy” [7].....	22
2.4.4 งานวิจัย “Damping and mechanical properties of composite composed of polyurethane matrix and preplaced aggregates” [8].....	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	24
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3.1.1 เซ็นเซอร์ Accelerometer และชุดแปลงสัญญาณดิจิทัล-อนาล็อก (DAC)	24
3.1.2 คอมพิวเตอร์พร้อมซอฟต์แวร์ LabVIEW 2011 และ MATLAB R2013b.....	25
3.1.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.1.4 ชิ้นงานทดสอบสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน [9].....	27
3.1.5 ฐานวางชิ้นงานในการทดสอบกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง	28
3.2 กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ Brass [10]	28
3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวัดความแข็งของวัสดุโลหะตัวอย่าง	28
3.4 ขั้นตอนการทดลองการทดลองสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน.....	29
3.5 ขั้นตอนการทดลองการทดสอบฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง	32
3.6 Block-diagram ของ LabVIEW 2011	34
3.7 MATLAB 2013b Source Code.....	35
3.7.1 Frequency domain source code.....	35
3.7.2 Time domain source code	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	37
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวัดความแข็งของวัสดุโลหะตัวอย่าง	37
4.2 ผลการทดลองวัสดุโลหะสำหรับสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน และทดสอบใช้ทำฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง	39

4.2.1 ทดลองวัสดุโลหะสำหรับสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน.....	39
4.2.2 ทดสอบใช้วัสดุโลหะทำฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง	45
4.3 ผลการทดลองวัสดุผสมโพลีเมอร์สำหรับสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน และทดสอบใช้ทำฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง	51
4.3.1 ทดลองวัสดุผสมโพลีเมอร์สำหรับสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน	51
4.3.2 ทดสอบใช้วัสดุเสริมพอลิเมอร์ในฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง ...	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	64
บรรณานุกรม.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	92



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงผลการวัดค่า damping factor และ อัตราส่วนระหว่าง Axial damping factor ต่อ Shear damping factor ของแมกนีเซียมอัลลอยด์ AZ31B-F	22
ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมของวัสดุผสมที่ใช้ในการทดลอง	23
ตารางที่ 2.3 แสดงค่า Damping ratio ที่ได้จากการทดลองกับวัสดุผสมที่แตกต่างกัน.....	23
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่ใช้ในการทดลอง	26
ตารางที่ 3.2 แสดงชนิดของวัสดุเสริมโพลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	26
ตารางที่ 3.3 สารกักตุนพลังงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุแต่ละชนิด	29
ตารางที่ 3.4 แสดงน้ำหนักกดทดสอบด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness บนโลหะแต่ละชนิด ...	29
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงขนาดเกรนเฉลี่ยและความแข็งของวัสดุโลหะ	37
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่ต่ำ.....	39
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่สูง.....	40
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ย Damping ratio ของวัสดุโลหะที่การตอบสนองทุกช่วงความถี่	41
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยของ Amplitude percent loss (APL) ที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ทำจากโลหะต่างชนิดกัน.....	46
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness.....	49
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Average edge roughness และ RMS edge roughness.....	50
ตารางที่ 4.8 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุเสริมโพลิเมอร์ที่การตอบสนองทุกช่วงความถี่.....	51
ตารางที่ 4.9 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุเสริมโพลิเมอร์ที่การตอบสนองความถี่ต่ำ.....	52
ตารางที่ 4.10 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุเสริมโพลิเมอร์ที่การตอบสนองความถี่สูง.....	53
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าเฉลี่ย Damping ratio ของวัสดุที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด	54

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ย Amplitude percent loss ที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุเสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน และ Stainless steel 440C 55

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness จากฐานวางเสริมวัสดุพอลิเมอร์ และ Stainless steel 440C 56

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Average sidewall roughness และ RMS edge roughness จากฐานวางเสริมวัสดุพอลิเมอร์ และ Stainless steel 440C 58

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าเฉลี่ย sidewall roughness จากฐานวางชิ้นงานทั้งหมดในการทดลอง..... 60

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าเฉลี่ย edge roughness จากฐานวางชิ้นงานทั้งหมดในการทดลอง..... 62



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 Free-body diagram แสดงแรงที่เกิดขึ้นอย่างง่าย ในกรณีของ Free vibration	6
รูปที่ 2.2 Free-body diagram แสดงแรงที่เกิดขึ้นอย่างง่าย ในกรณีของ Forced vibration	8
รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการสั่นสะเทือนอิสระที่มีการหน่วง.....	9
รูปที่ 2.3 Free-body diagram แสดงแรงที่เกิดการสั่นสะเทือนอิสระที่มีการหน่วง.....	9
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการหน่วงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น	14
รูปที่ 2.6 แสดงค่า Damping Ratio ของชิ้นงานแผ่นโลหะขนาดต่างกัน ของวัสดุเหล็กกล้า และ Stainless steel 430.....	21
รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งการทดสอบการหน่วงแรงสั่นสะเทือนของชิ้นงานจากงานวิจัย	21
รูปที่ 3.1 (a) IEPE Accelerometers (b) NI cDAQ-9188 CompactDAQ Ethernet chassis (c) NI 9234 4-Channel 24-Bit IEPE.....	24
รูปที่ 3.2 แสดงหน้าต่างควบคุมการทำงานของโปรแกรม LabVIEW.....	25
รูปที่ 3.3 รูปตัวอย่างชิ้นงานทดสอบวัสดุโลหะ	27
รูปที่ 3.4 รูปตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแบบ Sandwich-beam โดยที่บริเวณสี่เทาจะทำจากวัสดุ Stainless steel 304 บริเวณสี่เขียวทำจาก Aluminum และ บริเวณสี่เหลืองเป็นตัวอย่างพอลิเมอร์ ที่ทดสอบ	27
รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการหน่วงแรงสั่นสะเทือน	30
รูปที่ 3.6 รูปตัวอย่างแสดงวิธีการ Half-Power bandwidth [3]	31
รูปที่ 3.7 รูปภาพแสดงกระบวนการวัดสี่ความถี่โดยตรงสูง	33
รูปที่ 3.8 กราฟแอมพลิจูดต่อเวลาของการสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการวัดสี่ความถี่โดยตรงสูง ..	33
รูปที่ 3.9 แสดง Block diagram ที่ในการใช้โปรแกรม LabVIEW 2011 เพื่ออ่านค่าและบันทึกข้อมูล	34
รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งและขนาดเกรนเฉลี่ยของ Brass และ Brass annealed .	38
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่ต่ำ	40

รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่สูง.....	41
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองทุกช่วงความถี่	42
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟระหว่าง Grain size กับ damping ratio ของวัสดุโลหะ.....	43
รูปที่ 4.6 แสดงกราฟระหว่างค่า Elastic modulus กับ damping ratio ของวัสดุโลหะ	43
รูปที่ 4.7 แสดงกราฟระหว่าง Vickers hardness กับ damping ratio ของวัสดุโลหะ	44
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟระหว่างความหนาแน่นกับ damping ratio ของวัสดุโลหะ	44
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟแอมพลิจูดต่อเวลา ของแรงสั่นสะเทือนขณะที่ทำการขัดสีชิ้นงาน	45
รูปที่ 4.10 แสดงผลของกราฟ Percent Loss ต่อตำแหน่งเปรียบเทียบที่ห่างจากตำแหน่งติดตั้ง เซนเซอร์ accelerometer ของฐานวางโลหะ.....	46
รูปที่ 4.11 แสดงบริเวณที่วัดความหยาบผิว ระหว่าง Edge roughness และ Sidewall roughness	47
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบ Average sidewall roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางโลหะต่างๆ	48
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบ RMS sidewall roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางวัสดุโลหะต่างๆ	48
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบ Average edge roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางวัสดุโลหะต่างๆ	49
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบ RMS edge roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากชิ้นงานวัสดุโลหะต่างๆ....	50
รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองทุกช่วงความถี่	51
รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่ต่ำ	52
รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่สูง	53
รูปที่ 4.19 แสดงผลของกราฟ Percent Loss ต่อตำแหน่งเปรียบเทียบที่ห่างจากตำแหน่งติดตั้ง เซนเซอร์ accelerometer ของฐานวางวางเสริมวัสดุพอลิเมอร์.....	56
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบ Average sidewall roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้ วัสดุเสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน	57

รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบ RMS sidewall roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุ
เสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน 57

รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบ Average edge roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุ
เสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน 59

รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบ RMS edge roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุ
เสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน 59

รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่า Average sidewall roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานต่างๆ
..... 61

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่า RMS sidewall roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานต่างๆ .. 61

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่า Average edge roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานต่างๆ.. 63

รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่า RMS edge roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานต่างๆ 63



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในสังคมเมืองทั่วทุกทวีปของโลกที่มีการพัฒนาทั้งทางด้านเศรษฐกิจและเทคโนโลยี หากเมื่อเปรียบเทียบทั้งการผลิตและการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในชีวิตประจำวันในช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา นั้น จะพบว่ามีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นแบบก้าวกระโดดในทุกปี เนื่องจากการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไปอย่างรวดเร็วและสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับวิถีชีวิตของมนุษย์อย่างสอดคล้องและกลมกลืน ทั้งยังเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยผลักดันให้มนุษย์สามารถประดิษฐ์นวัตกรรมใหม่ได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้กลายเป็นปัจจัยที่สำคัญในสังคมเมืองในปัจจุบันที่เต็มไปด้วยเทคโนโลยี และมีความจำเป็นเพื่อใช้สร้างสรรค์นวัตกรรมแก่โลกในอนาคตต่อไป

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ภายในประเทศนับเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญมากอุตสาหกรรมหนึ่ง ที่มีมูลค่าการส่งออกถึง เป็นอันดับ 2 ของประเทศ หนึ่งในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั้งปริมาณการส่งออกและมูลค่าการส่งออกสูง นั่นก็คือ ฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ที่มีหน้าที่ในการเก็บข้อมูลรูปแบบดิจิทัลลงบนแผ่นบันทึกด้วยหลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้า และด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันสามารถทำให้ฮาร์ดดิสก์ขนาด 3.5 นิ้ว สามารถบันทึกข้อมูลดิจิทัลได้มากถึง 16 เทระไบต์ต่อฮาร์ดดิสก์ หรือ เทียบได้กับแผ่นบันทึกสื่อที่แพร่หลายอย่างดีวีดี (DVD) จำนวนกว่า 3400 แผ่น ฮาร์ดดิสก์จึงเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลดิจิทัลที่สามารถบันทึกข้อมูลต่อหน่วยได้ปริมาณมหาศาล ทำให้มีราคาต่อพื้นที่เก็บข้อมูลที่ค่อนข้างน้อย ทั้งยังมีความเสถียรในการบันทึกข้อมูลที่สูงด้วยกลไกแขนจับหัวอ่านที่ทำงานได้อย่างเที่ยงตรงและรวดเร็ว

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันซึ่งผลิตด้วยวัสดุเซรามิกความแข็งสูงมาก เนื่องจากชิ้นส่วนหัวอ่านนั้นมีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีขนาด 1mm x 1mm x 0.5mm โดยประมาณ ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กมาก ทั้งยังทำจากวัสดุความแข็งสูงที่มีเพียงเพชรเท่านั้นที่สามารถตัดและขัดสีเนื้อวัสดุดังกล่าวได้แล้ว นอกจากนี้ต้องการความหนาผิวเฉลี่ยที่น้อยถึงระดับนาโนเมตร หรือ เล็กกว่าหน่วยเซนติเมตรถึง 10 ล้านเท่า เพื่อให้การทำงานของฮาร์ดดิสก์มีประสิทธิภาพสูงได้ ประกอบกับเทคโนโลยีการปลูกวงจรในระดับไมครอนบนชิ้นส่วนหัวอ่านและความสามารถในการนำความร้อนที่ต่ำของวัสดุเซรามิก ทำให้ไม่สามารถใช้กระบวนการขัดสีด้วยเลเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงแต่ให้ความ

ร้อนสูงอันจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับวงจรบนชิ้นส่วนหัวอ่านได้ ทางเลือกหนึ่งที่สามารถกระทำได้คือ การใช้กระบวนการขัดสีทางกลด้วยความแม่นยำสูง ซึ่งจะใช้เวลาที่มีเม็ดเพชรสำหรับการขัดสีเพื่อขัดให้เนื้อวัสดุหลุดออกและได้ขนาดตามที่ต้องการที่แม่นยำ พร้อมกับฉีดสารหล่อลื่นระหว่างกระบวนการ เพื่อลดความร้อนและพาความร้อนที่เกิดจากการขัดสีเนื้อวัสดุออกจากชิ้นงาน แต่กระนั้นก็ยังพบกับปัญหาที่ผลิตภาพนั้นยังไม่สูงมากเพียงพอ เนื่องจากค่าความหยาบผิวที่รอยขัดสีและค่าความหยาบผิวที่ขอบชิ้นงานยังมีค่าที่กระจายตัวสูงและทำให้ความเชื่อมั่นในการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ลดลง ทางทฤษฎีการขัดสีทางกล แรงสั่นสะเทือนเป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของรอยขัดสีบนชิ้นงาน ดังนั้นแล้วจึงมีการศึกษาการหน่วงแรงสั่นสะเทือนขึ้น ซึ่งฐานวางชิ้นงานในเครื่องจักรเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการขัดสีนี้โดยตรง หากว่าสามารถเข้าใจถึงสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนของวัสดุและเลือกวัสดุที่มีสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนได้ดีเยี่ยมมาใช้ทำฐานวางชิ้นงาน คาดว่าจะสามารถปรับปรุงกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงให้มีทั้งคุณภาพและผลิตภาพที่สูงขึ้น ทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนากระบวนการขัดสีลักษณะดังกล่าวในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนและพฤติกรรมการหน่วงแรงสั่นสะเทือนของโลหะ Aluminum, Brass, Copper และ Stainless steel 304

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนและเข้าใจพฤติกรรมการหน่วงแรงสั่นสะเทือนของการเสริมวัสดุพอลิเมอร์ซิลิโคน (Silicone), เทอโมพลาสติกโพลียูรีเทน (TPU), Vestamid® EX9200, Vestamid® S40-E3 และ Sorbothane®

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลของการหน่วงแรงสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนไปจากการปรับปรุงวัสดุทำฐานวางชิ้นงานกับความเรียบผิวของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

เตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติการหน่วงการสั่นสะเทือนรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยเครื่องกลึงทางกลระบบ CNC ดังนี้

1.3.1 ชิ้นงานโลหะแผ่นความหนาต้นและปลายชิ้นงานไม่เท่ากัน ความกว้าง 120mm ความยาว 20 mm ความหนาที่ต้นชิ้นงาน 2mm และ ความหนาที่ปลายชิ้นงาน 6mm

ประกอบด้วย Aluminum Brass และ Copper จำนวน 3 ชิ้น/ชนิด และ Stainless steel 304 จำนวน 2 ชิ้น

1.3.2 ชิ้นงาน Stainless steel 304 ขนาด 120mm x 20mm x 2mm จำนวน 2 ชิ้น และ ชิ้นงาน Aluminum ขนาดเท่ากับ 20mm x 20mm x 4mm จำนวน 1 ชิ้น

1.3.3 ชิ้นงานพอลิเมอร์ขนาดเท่ากับ 100mm x 20mm x 4mm ประกอบด้วย Silicone, TPU, Vestamid® EX9200, Vestamid® S40-E3 และ Sorbothane® จำนวน 3 ชิ้น/ชนิด

1.3.4 ตัดชิ้นส่วนวัสดุโลหะโลหะ Aluminum, Brass, Copper, Stainless steel 304 และ Stainless steel 440C เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบวัสดุ แล้วจึงนำไปเตรียมชิ้นงานด้วยเรซินหล่อเย็นชนิดใส ดังนี้

1.3.1.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ประกอบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ImageJ

1.3.1.2 ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีด้วย Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

1.3.1.3 ตรวจสอบความแข็งของวัสดุด้วย Micro Vickers Hardness Test

1.3.5 ทำฐานวางชิ้นงานด้วยเครื่องกลึงทางกระบะ CNC จากโลหะ Aluminum Brass Stainless steel 304 และ Stainless steel 440C

1.3.6 ทำชิ้นงานเสริมสำหรับฐานวางชิ้นงานจากพอลิเมอร์ ได้แก่ TPU, Silicone และ Sorbothane® ขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 59.0mm x 4.7mm x 4.0mm จำนวน 9 ชิ้นต่อชนิดพอลิเมอร์

1.3.7 ทำการทดสอบการหน่วงแรงสั่นสะเทือนอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E756-10 ด้วย ชิ้นงานในข้อ (1.3.1.1) (1.3.1.2) และ (1.3.1.3) โดยให้แรงกับชิ้นงานทดลองด้วยค้อนเหล็กกล้าพร้อม กับเก็บข้อมูลแรงสั่นสะเทือนและค่าความถี่ที่เกิดขึ้นด้วย Accelerometer ที่ทำงานร่วมกับวงจร แปลงสัญญาณและคอมพิวเตอร์

ตัวแปรต้น : ชนิดของวัสดุที่ทดสอบ

ตัวแปรตาม : แรงสั่นสะเทือน ความถี่ของการสั่นสะเทือน การหน่วงแรงสั่นสะเทือน

ตัวแปรควบคุม : ขนาดแรงกระทำต่อชิ้นงาน ขนาดของชิ้นงานทดสอบ

1.3.8 ทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองข้างต้น ด้วยโปรแกรม MATLAB R2013b เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูดเทียบกับเวลา และ แมกนิจูดเทียบกับความถี่ จากนั้นจึงนำผลทั้งหมดมาใช้ในการคำนวณหาการหน่วงการสั่นสะเทือนของแต่ละวัสดุ

1.3.9 ทำการทดลองกระบวนการตัดสี่ความถี่ตรงสูง ด้วยเครื่องจักร MTI250 พร้อมทั้งติดตั้ง Accelerometer เพื่อเก็บค่าแรงสั่นสะเทือนขณะกระบวนการ โดยมีตัวแปรดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น : ชนิดของฐานวางชิ้นงาน, ชนิดของพอลิเมอร์ที่เสริมในฐานวางชิ้นงาน

ตัวแปรตาม : แรงสั่นสะเทือน ความหยาบผิวของชิ้นงานที่ถูกตัดสี่

ตัวแปรควบคุม : ขนาดและชนิดของใบมีดตัด ความเร็วรอบ อัตราการไหลของสารหล่อ-เย็น ชนิดของวัสดุที่ถูกตัดสี่ ชนิดของสารยึดประสานระหว่างฐานวางชิ้นงาน

1.3.10 ทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองข้างต้น ด้วยโปรแกรม MATLAB R2013b เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูดเทียบกับเวลา และ แมกนิจูดเทียบกับความถี่ จากนั้นจึงนำผลทั้งหมดมาใช้ในการคำนวณหาการหน่วงการสั่นสะเทือนของแต่ละวัสดุ

1.3.11 ทำการเก็บชิ้นงานจากการทดลองกระบวนการตัดสี่ความถี่ตรงสูงที่ได้ทั้งหมดแล้วนำไปตรวจสอบคุณภาพด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic-Force Microscope, AFM)

1.3.12 นำข้อมูลการหน่วงแรงสั่นสะเทือน ค่าแรงสั่นสะเทือนระหว่างการตัดสี่ความถี่ตรงสูง ประกอบกับข้อมูลคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการตัดสี่ดังกล่าว เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างการหน่วงการสั่นสะเทือนและคุณภาพของชิ้นงานที่ถูกตัดสี่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเข้าใจถึงสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนของวัสดุ เพื่อการเลือกใช้วัสดุทำฐานจับชิ้นงานได้อย่างเหมาะสม

1.4.2 สามารถปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานที่ถูกตัดสี่ด้วยความถี่ตรงสูง จากการปรับปรุงสมบัติการหน่วงการสั่นสะเทือนจากการเปลี่ยนวัสดุฐานวางชิ้นงาน

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 สมการการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน (Equation of Vibrational Motion) [1]

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุหนึ่งๆ พื้นฐานการวิเคราะห์นั้นเริ่มจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's Laws of Motion) ทั้ง 3 ข้อ ซึ่งได้แก่

- กฎข้อที่หนึ่ง กล่าวไว้ว่า “อนุภาคหนึ่งๆ อยู่นิ่งกับที่หรือเคลื่อนที่ในทิศทางหนึ่งไปด้วยความเร็วค่าคงที่ค่าหนึ่ง จะยังคงสถานะนั้นอยู่ตลอดไป หากไม่ได้รับแรงกระทำภายนอกที่ไม่สมดุล”
- กฎข้อที่สอง กล่าวไว้ว่า “อนุภาคหนึ่งๆ ถูกกระทำด้วยแรงกระทำภายนอกที่ไม่สมดุล \vec{F} อนุภาคนั้นจะมีความเร่ง \vec{a} ซึ่งมีทิศทางเดียวกับกระทำที่ไม่สมดุลนั้น และขนาดของความเร่งจะเป็นสัดส่วนกับแรงกระทำที่ไม่สมดุลนั้น” เมื่อ m คือ มวลของอนุภาคนั้น อาจเขียนเป็นสมการว่า

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$$

- กฎข้อที่สาม กล่าวไว้ว่า “แรงกระทำและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสองอนุภาค จะมีทิศทางที่ตรงกันข้ามต่อกัน แต่มีขนาดที่เท่ากันและมีทิศทางยังคงอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ” ให้ \vec{N} คือ แรงปฏิกิริยา อาจเขียนเป็นสมการได้ว่า

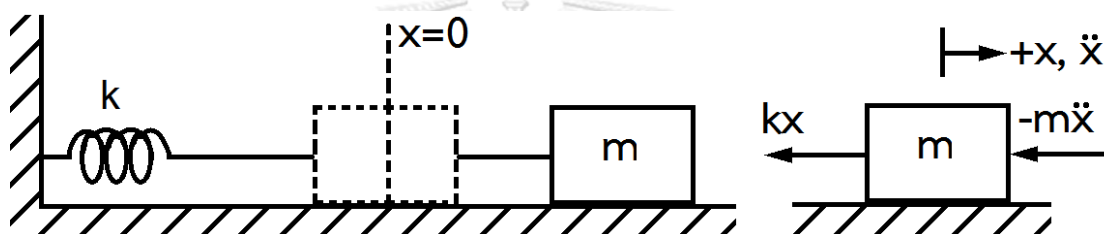
$$\vec{F} = -\vec{N}$$

รูปแบบหนึ่งของการเคลื่อนที่ที่พบเห็นได้ในธรรมชาติ คือ การสั่นสะเทือน ซึ่งนิยามว่า เป็นการเคลื่อนที่แบบคาบ (Periodic Motion) ของวัตถุหรือระบบหนึ่ง ซึ่งจะเคลื่อนที่กลับไปมาจากตำแหน่งสมดุลหรือตำแหน่งเริ่มต้นของวัตถุหรือระบบนั้นๆ และมีการจำแนกการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- ลักษณะการสั่นสะเทือน ได้แก่ การสั่นสะเทือนอิสระ (Free Vibration) อันเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงหรือ และการสั่นสะเทือนจากแรงกระทำ (Forced Vibration)
- ลักษณะการหน่วงการสั่นสะเทือน (Vibration Damping) ได้แก่ การสั่นสะเทือนโดยไม่มีการหน่วง (Undamped Vibration) และ การสั่นสะเทือนโดยมีการหน่วง (Viscous Damped Vibration)

2.1.1 Free Vibration

เมื่อจะอธิบายสมการการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือน ลักษณะการสั่นสะเทือนอย่างง่ายที่จะนำมาใช้อธิบายสมการนั้น คือ การสั่นสะเทือนอิสระโดยไม่มีการหน่วง (Undamped Free Vibration) จาก รูปที่ 2.1 ซึ่งมีองค์ประกอบของ กล้องทรงสี่เหลี่ยมที่มีมวล m ยึดติดกับสปริงที่มีค่านิจของสปริง k และมีมวลน้อยมาก เมื่อทำการให้แรงเพื่อดึงกล้องทรงสี่เหลี่ยมออกไปเป็นระยะทาง x การเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นเมื่อปล่อยกล้องดังกล่าว สปริงจะดึงกล้องกลับไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของแรงที่ดึงกล้องนั้นด้วย Elastic restoring force และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งเข้าหาและผ่านตำแหน่งสมดุลที่ $x = 0$ จนเมื่อถึงตำแหน่งที่สปริงหดตัวมากที่สุดจากการเคลื่อนที่ของกล้องทรงสี่เหลี่ยม สปริงจะผลักกล้องทรงสี่เหลี่ยมกลับเข้าหาตำแหน่งสมดุล และจะเป็นเช่นนี้เรื่อยๆ หากว่าพื้นผิวที่กล้องถูกวางอยู่นั้นไร้แรงเสียดทาน



รูปที่ 2.1 Free-body diagram แสดงแรงที่เกิดขึ้นอย่างง่าย ในกรณีของ Free vibration

พิจารณา Free-body diagram ของทรงสี่เหลี่ยมยึดติดกับสปริง จากกฎข้อที่สองและสามของนิวตัน จะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของการเคลื่อนที่ข้างต้นได้ว่า

$$\Rightarrow \Sigma F_x = ma; -kx = m\ddot{x} \quad 2-1$$

จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่า ความเร่งเป็นสัดส่วนของค่าการกระจัดของกล้องทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์เช่นนี้ จะเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิคอย่างง่าย (Simple-harmonic motion) โดยอาจจัดอยู่ในรูปแบบสมการทั่วไปได้ว่า

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad 2-2$$

โดยที่ค่าคงที่ ω_n จะเรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) หรือนิยามได้ว่า

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 2-3$$

จากสมการ (2-1) ซึ่งเป็น Homogeneous second-order linear differential equation รวมอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์คงที่ค่าหนึ่ง เมื่อหาผลลัพธ์ด้วยวิธีการสมการอนุพันธ์ จะได้ผลลัพธ์ทั่วไป

$$x = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t \quad 2-4$$

โดยที่ A และ B เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรตสมการ และจะสามารถหาค่าความเร็วและความเร่งจากการหาอนุพันธ์ของสมการ (2-4) ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$v = \dot{x} = \omega_n A \cos \omega_n t - \omega_n B \sin \omega_n t \quad 2-5$$

$$a = \ddot{x} = -\omega_n^2 A \sin \omega_n t - \omega_n^2 B \cos \omega_n t \quad 2-6$$

$$a = -\omega_n^2 x$$

จากสมการ (2-4) สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของ Simple sinusoidal motion โดยการกำหนดให้ $A = C \cos \phi$ และ $B = C \sin \phi$ ซึ่งจะได้ว่า

$$x = C \sin(\omega_n t + \phi) \quad 2-7$$

เมื่อทำการร่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการกระจัด จะพบว่า C คือ ค่าการกระจัดสูงสุดหรือค่าแอมพลิจูดสูงสุดของการสั่นสะเทือน และ มุม ϕ คือ Phase angle ที่แสดงว่ากราฟดังกล่าวนั้นเลื่อนจากจุดกำเนิดในปริมาณเท่าใด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ A และ B ดังนี้

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{B}{A}$$

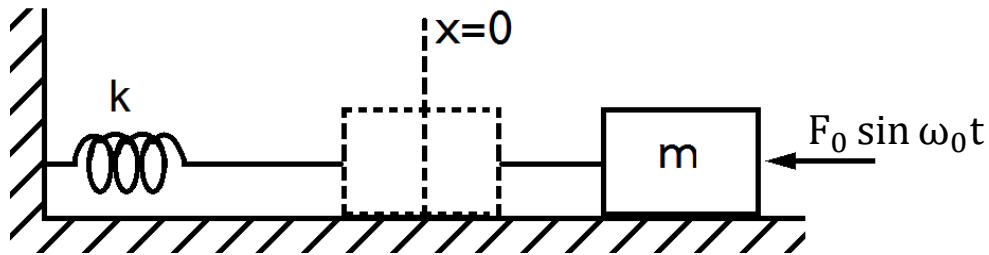
กราฟฟังก์ชัน sine จะมีคาบ (τ , Period) นิยาม เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบและความถี่ (f , frequency) ของการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นส่วนกลับของคาบ เป็นดังนี้

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

2.1.2 Forced Vibration

การสั่นสะเทือนที่พบในงานวิศวกรรมหรือตามแวดล้อมที่มีเครื่องจักรกลนั้น มักจะเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระทำ (Forced vibration) และเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์หาแรงกระทำที่เป็นต้นเหตุให้เกิดการสั่นสะเทือนในงานทางวิศวกรรมได้นั้น การศึกษาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระทำโดยไม่มีภาระหน่วง (Undamped Forced vibration) จึงเป็นพื้นฐานสำคัญอย่างหนึ่งที่จะทำให้เข้าใจและแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นต่อไปได้



รูปที่ 2.2 Free-body diagram แสดงแรงที่เกิดขึ้นอย่างง่าย ในกรณีของ Forced vibration

พิจารณารูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงภาพกล่องทรงสี่เหลี่ยมยึดติดกับสปริง และได้รับแรงกระทำเป็นระยะ (Periodic force) $F = F_0 \sin \omega_0 t$ โดยที่ F_0 แทนขนาดของแรง และ ω_0 คือ ความถี่ของแรงกระทำ (Forcing frequency) เมื่อกล่องทรงสี่เหลี่ยมเลื่อนตำแหน่งเป็นระยะ x ดังรูปที่ 2.2 จะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของกล่องดังกล่าวได้ดังดังนี้

$$\begin{aligned} \Rightarrow F_x^+ &= ma; & F_0 \sin \omega_0 t - kx &= m\ddot{x} \\ & & \ddot{x} + \frac{k}{m}x &= \frac{F_0}{m} \sin \omega_0 t \end{aligned} \quad 2-8$$

สมการที่ได้นี้ เป็น nonhomogeneous second-order differential equation ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น Complementary solution X_c ร่วมกับ Particular solution X_p ซึ่งผลลัพธ์ X_c ได้จากการให้ฝั่งขวาของสมการ (2-8) เท่ากับศูนย์ และทำการแก้ homogeneous equation จะได้ผลลัพธ์ดังในสมการ (2-4) ดังนี้

$$x_c = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t \quad 2-9$$

และในทำนองเดียวกันเมื่อการเคลื่อนที่นี้มีลักษณะแบบคาบ ผลลัพธ์ X_p จึงเป็น

$$x_p = C \sin \omega_0 t \quad 2-10$$

เมื่อแทนค่าอนุพันธ์อันดับสองของสมการ (2-10) และค่า X_p ลงในสมการ (2-8) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} -\omega_0^2 C \sin \omega_0 t + \frac{k}{m} (C \sin \omega_0 t) &= \frac{F_0}{m} \sin \omega_0 t \\ C &= \frac{F_0/m}{(k/m) - \omega_0^2} = \frac{F_0/k}{1 - (\omega_0/\omega_n)^2} \end{aligned} \quad 2-11$$

ทำการแทนค่าสมการ (2-11) ลงใน (2-10) จะได้ว่า

$$x_p = \frac{F_0/k}{1 - (\omega_0/\omega_n)^2} \sin \omega_0 t \quad 2-12$$

และจะสรุปได้ผลลัพธ์ทั่วไป ดังนี้

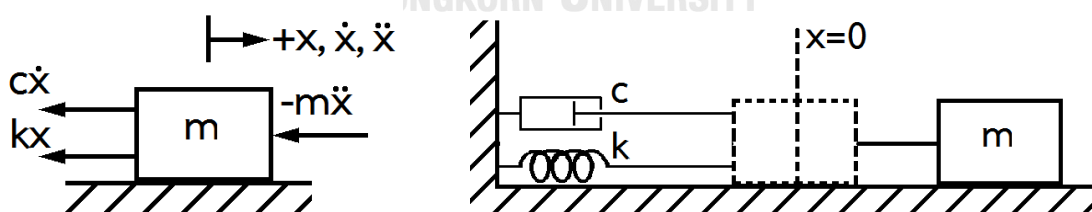
$$x = x_p + x_c = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t + \frac{F_0/k}{1 - (\omega_0/\omega_n)^2} \sin \omega_0 t \quad 2-13$$

จากค่า x ที่ได้ในสมการ (2-13) สามารถอธิบายการสั่นสะเทือน 2 แบบ ที่รวมกันอยู่ ได้แก่ การสั่นสะเทือนอิสระ หรือส่วนของค่า x_c ซึ่งแปรผันกับความถี่ธรรมชาติ (ω_n) และการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระทำ $F_0 \sin \omega_0 t$ หรือส่วนของค่า x_p ซึ่งแปรผันกับความถี่ของแรงกระทำ (ω_0) โดยที่หากในระบบดังรูปที่ 2.2 คำนึงถึงแรงเสียดทานที่กระทำต่อกล่องทรงสี่เหลี่ยมด้วยนั้น จะพบว่า ส่วนของการสั่นสะเทือนอิสระจะถูกหน่วงและมีปริมาณลดลงไปตามหน่วยเวลา หรือมีลักษณะเป็น Transient ในขณะที่แรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระทำยังคงอยู่แม้เวลาเปลี่ยนแปลงไป หรือมีลักษณะของ Steady-state

จากสมการที่ (2-13) จะเห็นได้ว่า แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระทำแปรผันกับค่าอัตราส่วนความถี่ (Frequency ratio, ω_0/ω_n)

2.1.3 Viscous Damped Vibration

ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยยกเว้นผลของการหน่วงการสั่นสะเทือนทำให้สามารถคำนวณและวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้ง่ายมากขึ้น ทั้งยังได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่ไม่คลาดเคลื่อนมากนักในบางกรณี แต่กรณีนั้นทางปฏิบัติแล้ว การสั่นสะเทือนจะมีปริมาณที่ลดลงไปตามเวลาจากผลของการหน่วงจากปัจจัยแวดล้อม ดังนั้นแล้วจึงควรคำนึงถึงแรงหน่วง (Damping force) ที่เกิดขึ้นและนำไปวิเคราะห์รวมกันกับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.4 Free-body diagram แสดงแรงที่ รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการสั่นสะเทือนอิสระที่มีการหน่วงเกิดการสั่นสะเทือนอิสระที่มีการหน่วง

ในหลายๆกรณี การหน่วงเกิดจากแรงต้านของสสารที่มีสถานะเป็นของไหล อย่างเช่น น้ำ น้ำมัน หรือ อากาศ เป็นต้น ซึ่งจะพบว่าความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ในของไหลเหล่านั้นแปรผันโดยตรงกับแรงต้านที่เกิดขึ้นกับวัตถุนั้นๆ แรงต้านนี้จึงถูกเรียกว่า แรงหน่วงหนืด (Viscous damping force)

ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในงานทางวิศวกรรมและพบเห็นได้บ่อย คือ กระจบออสบหน่งร่ง (Dashpot Damper) ที่ถ่ยในกระจบออสบหน่งนั้นจะบรจูน้ำมันที่มีควมหนืดสูงหรือมีส่วนของการอัดอากศด้วย ทำให้นมมำใช้งนในการหน่งได้ ดังรูปที่ 2.4 ให้ c คือ ค่ำสมประสิทธิ์การหน่ง (Coefficient of Viscous Damping) มีหน่วยเป็น นิวตันเมตรต่อวินาที (N-m/s) จะเขียนสมการร่งหน่งหนืดของกระจบออสบหน่งจะมีสมการร่งหน่งอุปกรณนี้ได้ว่า

$$F = c\dot{x}$$

จากรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการสั่นสะเทือนอิสระที่มีการหน่ง (Viscous damped free vibration) ประกอบด้วกล่งทรงสี่เหลี่ยม มวล m ด้านหนึ่งยึดติดกับสปริงที่มีค่านิจของสปริง k ถูกดึงยึดออกมาเป็นระยะ x จากตำแหน่งสมดุ และฝั่งตรงขำของกล่งถูกยึดติดกับกระจบออสบหน่งร่งที่มีค่ำสมประสิทธิ์การหน่ง c ซึ่งเมื่อพิจารณาแผนภพแสดงร่งของรูปที่ 2.5 ที่ได้จากรูป 2.4 ร่งต้านจกสปริง (Spring force) kx และ ร่งหน่งจกกระจบออสบหน่งร่ง $c\dot{x}$ นั้นมีทิศของร่งไปในท่งเดียวกัน แต่ตรงกันขำกับทิศการเคลื่อนที่ของกล่งทรงสี่เหลี่ยม สมการเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ว่า

$$\Rightarrow \Sigma F_x = ma; \quad -kx - c\dot{x} = m\ddot{x}$$

$$kx + c\dot{x} + m\ddot{x} = 0 \quad 2-14$$

รูปแบบสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสอง (Linear, second-order, homogeneous, differential equation) คือ $x(t) = Ce^{\lambda t}$ โดยที่ e คือ ลอการิธึมธรรมชาติ (Natural Logarithm) และ λ คือ ค่ำเจาะจง (Eigenvalue) ซึ่งเมื่อรวมเข้ากับสมการ (2.4) จะสมการได้ดังนี้

$$m\lambda^2 e^{\lambda t} + c\lambda e^{\lambda t} + k e^{\lambda t} = 0$$

$$e^{\lambda t}(m\lambda^2 + c\lambda + k) = 0$$

$$e^{\lambda t} \neq 0; \quad m\lambda^2 + c\lambda + k = 0$$

$$\text{จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้} \quad \lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad 2-15$$

แทนค่ำผลลัพธ์ในสมการที่ได้เข้าไปในสมการ (2-15) จะได้ว่า

$$x_1(t) = C_1 e^{\lambda_1 t}, \quad x_2(t) = C_2 e^{\lambda_2 t} \quad 2-16$$

และเมื่อรวมผลลัพธ์ (2-17) เข้าด้วยกัน จะได้ดังนี้

$$x(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$x(t) = C_1 e^{\left[-\frac{c}{2m} + \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right]t} + C_2 e^{\left[-\frac{c}{2m} - \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right]t} \quad 2-17$$

เมื่อ ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) จะนิยามค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงวิกฤต (Critical damping coefficient, C_c) จากผลลัพธ์ของสมการข้างต้น ได้ดังนี้

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0$$

$$C_c = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n \quad 2-18$$

ให้ C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง สำหรับระบบที่มีการหน่วงแรงสั่นสะเทือน ค่าอัตราการหน่วง (Damping ratio, ξ) จะนิยามว่า อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงต่อสัมประสิทธิ์การหน่วงวิกฤต หรือ แสดงได้ดังนี้

$$\xi = \frac{C}{C_c} \quad 2-19$$

และเขียนสมการ (2-15) ใหม่ได้ว่า

$$x(t) = C_1 e^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} + C_2 e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} \quad 2-20$$

และจากการนิยามค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงวิกฤต จะพบคำตอบ 3 แบบ ที่บ่งบอกถึงลักษณะการหน่วงแรงสั่นสะเทือนที่แตกต่างกัน ได้แก่

- **Critically Damped System** ($C = C_c$) จะได้ผลลัพธ์ของค่า $\lambda_1 = \lambda_2 = -\frac{c}{2m}$
 $\lambda_1 = \lambda_2 = -\omega_n$ หรือเกิดการหน่วงวิกฤต (Critical Damping) เป็นผลให้พบแรงสั่นสะเทือนในปริมาณที่น้อยมากหรือแทบจะไม่พบแรงสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเลยในระบบนั้นๆ และได้สมการของการหน่วงวิกฤตดังนี้

$$x = (A + Bt)e^{-\omega_n t}$$

เมื่อใช้เงื่อนไขขอบเขต $x(t=0) = x_0$ และ $\dot{x}(t=0) = \dot{x}_0$ จะได้ผลลัพธ์ค่าคงที่ $A = x_0$ และ $B = \dot{x}_0 + \omega_n x_0$ และได้สมการผลลัพธ์ เป็น

$$x = [x_0 + (\dot{x}_0 + \omega_n x_0)t]e^{-\omega_n t} \quad 2-21$$

- **Overdamped System** ($C > C_c$) ผลลัพธ์ค่าของ λ_1 และ λ_2 จะเป็นจำนวนจริง ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการจะอยู่ในรูปของผลลัพธ์ทั่วไป ดังต่อไปนี้

$$\lambda_1 = (-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \omega_n < 0$$

$$\lambda_2 = (-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}) \omega_n < 0$$

สมมติค่า λ_2 มีค่าน้อยกว่า λ_1 มาก สมการ (2-15) จะเปลี่ยนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$x(t) = Ae^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} + Be^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} \quad 2-22$$

การเคลื่อนที่ซึ่งสอดคล้องกับสมการนี้ จะเป็นการเคลื่อนที่ที่ไร้การสั่นสะเทือน (Nonvibrating motion) เนื่องจากมีการหน่วงการสั่นสะเทือนที่มาก จากตัวอย่างในรูปที่ 2.4 กล้องที่ผูกติดกับสปริงและกระบอกสูบหน่วงแรง เมื่อทำการดึงเลื่อนตำแหน่งกล้องออกจากตำแหน่งสมดุลและปล่อยให้เคลื่อนที่แล้ว กล้องจะถูกดึงกลับไปยังตำแหน่งสมดุลเดิมและหยุดลงในทันที ซึ่งในกรณีนี้ จะเรียกการหน่วงในลักษณะนี้ว่า Overdamping

- **Underdamped System** ($C < C_c$) ในกรณีนี้ผลของการหน่วงในระบบน้อยกว่ากรณี Critically Damped System ได้ผลลัพธ์ค่า λ_1 และ λ_2 เป็นจำนวนเชิงซ้อน สมการดังนี้

$$\lambda_1 = (-\xi + i\sqrt{1 - \xi^2}) \omega_n$$

$$\lambda_2 = (-\xi - i\sqrt{1 - \xi^2}) \omega_n$$

จากผลลัพธ์ ค่า λ_1 และ λ_2 สมการ (2-18) จะเปลี่ยนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x(t) &= C_1 e^{(-\xi + i\sqrt{1 - \xi^2})\omega_n t} + C_2 e^{(-\xi - i\sqrt{1 - \xi^2})\omega_n t} \\ &= e^{-\xi\omega_n t} [C_1 e^{(i\sqrt{1 - \xi^2})\omega_n t} + C_2 e^{(-i\sqrt{1 - \xi^2})\omega_n t}] \\ &= e^{-\xi\omega_n t} [(C_1 + C_2) \cos \sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t \\ &\quad + i(C_1 - C_2) \sin \sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= e^{-\xi\omega_n t} [C'_1 \cos \sqrt{1-\xi^2} \omega_n t + C'_2 \sin \sqrt{1-\xi^2} \omega_n t] \\
&= X_0 e^{-\xi\omega_n t} \sin(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t + \phi_0) \\
&= X e^{-\xi\omega_n t} \cos(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n - \phi)
\end{aligned}
\tag{2-23}$$

เมื่อใช้เงื่อนไขเริ่มต้น $x(t=0) = x_0$ และ $\dot{x}(t=0) = \dot{x}_0$ จะได้ผลลัพธ์ค่า

$$C'_1 = x_0 \text{ และ } C'_2 = \frac{\dot{x}_0 + \xi\omega_n x_0}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \text{ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สมการ (2-15) ดังนี้}$$

$$\begin{aligned}
x(t) = e^{-\xi\omega_n t} [&x_0 \cos(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t) \\
&+ \left(\frac{\dot{x}_0 + \xi\omega_n x_0}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \right) \cdot \sin(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t)]
\end{aligned}$$

2-24

$$\text{โดยที่ } X = X_0 = \sqrt{C'_1{}^2 + C'_2{}^2} = \frac{\sqrt{x_0^2 \omega_n^2 + \dot{x}_0^2 + 2x_0 \dot{x}_0 \xi \omega_n}}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}$$

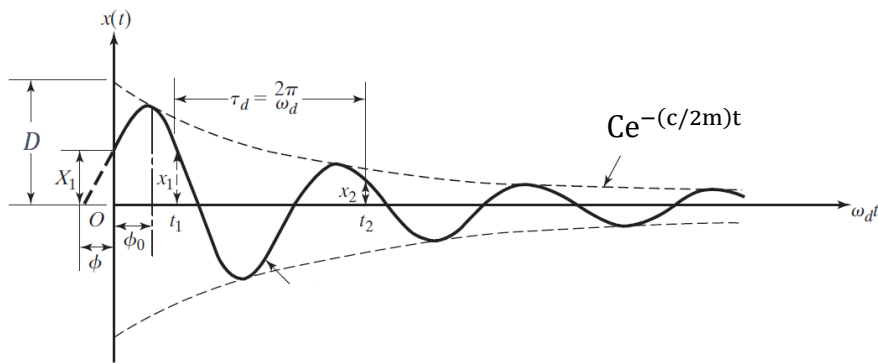
$$\phi_0 = \tan^{-1} \frac{C'_1}{C'_2} = \tan^{-1} \frac{x_0 \omega_n \sqrt{1-\xi^2}}{\dot{x}_0 + \xi\omega_n x_0}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{C'_2}{C'_1} = \tan^{-1} \frac{\dot{x}_0 + \xi\omega_n x_0}{x_0 \omega_n \sqrt{1-\xi^2}}$$

ค่า ω_d คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของการหน่วง (Damped natural frequency) ของระบบ ซึ่งมีค่า

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} = \omega_n \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2} = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \tag{2-25}$$

เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 2.6 ค่า D ซึ่งเป็น initial limit of motion จะค่อยๆ ลดลงในแต่ละรอบของการสั่นสะเทือน และถูกจำกัดค่าให้อยู่ภายในขอบเขตของเส้นโค้ง Exponential ที่มีฟังก์ชันเป็น $\pm Ce^{-(c/2m)t}$



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการหน่วงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

สมมติให้ค่า t_1 และ t_2 เป็นค่าเวลาของแอมพลิจูดที่ต่อเนื่องกัน แทนค่าดังกล่าวในสมการ (2-24) และเทียบอัตราส่วนกัน จะได้ว่า

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{X e^{-\xi \omega_n t_1} \cos(\omega_d t_1 - \phi)}{X e^{-\xi \omega_n t_2} \cos(\omega_d t_2 - \phi)}$$

ซึ่งค่า $t_2 = t_1 + \tau_d$ โดยที่ค่า $\tau_d = 2\pi/\omega_d$ ทำให้ได้ว่า

$$\cos(\omega_d t_2 - \phi) = \cos(2\pi + \omega_d t_1 - \phi) = \cos(\omega_d t_1 - \phi)$$

และได้ค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดเป็น

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{e^{-\xi \omega_n t_1}}{e^{-\xi \omega_n (t_1 + \tau_d)}} = e^{\xi \omega_n \tau_d} \quad 2-26$$

ทำให้สามารถหาค่า Logarithmic decrement (δ) จากอัตราส่วนในสมการ (2-27) ดังนี้

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \ln(e^{\xi \omega_n \tau_d}) = \xi \omega_n \tau_d = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{2\pi c}{\omega_d 2m} \quad 2-27$$

หรือหากว่าแอมพลิจูดห่างกัน n ลูกคลื่น จะสามารถหาค่า Logarithmic decrement ได้ดัง

สมการ (2-28)

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{1+n}} \right) \quad 2-28$$

จากสมการที่ (2-27) สามารถหาความสัมพันธ์ของ Logarithmic decrement และ Damping ratio ได้ ดังนี้

$$\delta^2 = \frac{4\pi^2\xi^2}{1-\xi^2}$$

$$\frac{1-\xi^2}{\xi^2} = \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi/\delta)^2}}$$

2- 29

ในกรณีทั่วไปของการสั่นสะเทือนโดยมีตัวแปรอิสระเดียว จะเกิดขึ้นเมื่อระบบหนึ่งมีแรงกระทำเข้ามาพร้อมด้วย ทำให้เกิดการหน่วงขึ้นตามมาจากการสั่นสะเทือนนั้น ซึ่งเรียกว่า การสั่นสะเทือนจากแรงกระทำที่มีการหน่วง (Viscous damped forced vibration) เราจึงอาจพิจารณาได้จากรูปที่ 2.4 ที่มีแรงกระทำเป็นระยะ $F_0 \sin \omega_0 t$ และรวมเข้ากับสมการที่ (2-15) ที่เป็นสมการเคลื่อนที่ซึ่งมีแรงหน่วงจึงได้เป็นสมการการเคลื่อนที่ใหม่ได้ดังนี้

$$kx + c\dot{x} + m\ddot{x} = F_0 \sin \omega_0 t \quad 2- 30$$

เมื่อสมการ (2-30) เป็น nonhomogeneous second-order differential equation ดังสมการ (2-8) ผลลัพธ์ทั่วไปที่ได้จึงแบ่งเป็น complementary solution และ particular solution ได้ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ Forced vibration โดยที่ complementary solution ได้ผลลัพธ์ 3 แบบ เช่นเดียวกับกรณี Viscous damped free vibration ดังสมการ (2-22) (2-23) และ (2-24) ซึ่งขึ้นกับค่า λ_1 และ λ_2 ที่ได้จากสมการ (2-15) ทั้งนี้ complementary solution เป็นส่วนของการสั่นสะเทือนอิสระที่เกิดขึ้นในระบบและจะถูกหน่วงหายไปตามเวลา ขณะที่ particular solution ที่เป็นส่วนการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระทำเป็นระยะและจะยังคงอยู่ต่อไป จึงอธิบายได้ว่าเป็น steady-state vibration ของระบบนั้นๆ เมื่อแรงกระทำและ steady-state motion มี harmonic ต่อกัน particular solution จะอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$x_p = A' \sin \omega_0 t + B' \cos \omega_0 t \quad 2- 31$$

จากสมการ (2-31) ทำการหาอนุพันธ์ลำดับที่ 1 (\dot{x}_p) และ อนุพันธ์ลำดับที่ 2 (\ddot{x}_p) และทำการแทนค่าลงในสมการ (2-30) จะได้ว่า

$$\dot{x}_p = \omega_0 A' \cos \omega_0 t - \omega_0 B' \sin \omega_0 t$$

$$\begin{aligned}\ddot{x}_p &= -\omega_0^2 A' \sin \omega_0 t - \omega_0^2 B' \cos \omega_0 t \\ (-A'm\omega_0^2 - cB'\omega_0 + kA') \sin \omega_0 t + \\ &(-B'm\omega_0^2 - cA'\omega_0 + kB') \cos \omega_0 t = F_0 \sin \omega_0 t\end{aligned}$$

จากสมการที่ได้ เป็นฟังก์ชันของเวลาและค่าคงที่ $\sin \omega_0 t$ และ $\cos \omega_0 t$ ทำให้สามารถแก้สมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}-A'm\omega_0^2 - cB'\omega_0 + kA' &= F_0 \\ -B'm\omega_0^2 - cA'\omega_0 + kB' &= 0\end{aligned}$$

เมื่อ $\omega_0^2 = k/m$;

$$\begin{aligned}A' &= \frac{(F_0/m)(\omega_n^2 - \omega_0^2)}{(\omega_n^2 - \omega_0^2)^2 + (c\omega_0/m)^2} \\ B' &= \frac{-F_0(c\omega_0/m)^2}{(\omega_n^2 - \omega_0^2)^2 + (c\omega_0/m)^2}\end{aligned}$$

จากสมการ (2-31) สามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปสมการได้ว่า

$$x_p = C' \sin(\omega_0 t - \phi') \quad 2-32$$

ทำให้ได้ผลลัพธ์ค่า C' และ ϕ' ดังนี้

$$C' = \frac{F_0/k}{\sqrt{[1 - (\omega_0/\omega_n)^2]^2 + [2(c/c_c)(\omega_0/\omega_n)]^2}}$$

$$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{2(c/c_c)(\omega_0/\omega_n)}{1 - (\omega_0/\omega_n)^2} \right]$$

2.2 กลไกการหน่วงแรงสั่นสะเทือนในวัสดุ (Damping mechanisms in Materials) [2, 3]

สมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุนั้น สามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนรูปผลลัพธ์ (Resultant deformation) ของวัสดุตามกฎของฮุก (Hook's law) หรือก็คือ ความเครียดผลลัพธ์ (Resultant strain) เป็นสัดส่วนต่อความเค้นผลลัพธ์ (Resultant stress) แต่กระนั้น Hook's law ไม่ได้คำนึงถึงผลของปริมาณเวลาที่เกิดความเค้นและความเครียด โดยการสมมติให้เกิดแรงกระทำและ Resultant strain เกิดขึ้นที่เฟสตรงกัน (In phase) ซึ่งเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีอัตราการ

ให้แรง (Loading rate) ที่ต่ำมากเท่านั้น แต่ในความเป็นจริง วัสดุมีการตอบสนองด้วยความยืดหยุ่นที่ไม่ขึ้นกับเวลา และ ความยืดหยุ่นที่เกิดกับความเครียดล่าช้าต่อแรงกระทำ (Lag strain behind applied load) ดังนั้นแล้วความเครียดที่เกิดขึ้นจึงแบ่งได้ 2 ส่วน คือ ความเครียดยืดหยุ่น (Elastic strain, ϵ_e) และ ความเครียดที่ไม่เป็นผลจากความยืดหยุ่น (Anelastic strain, ϵ_a)

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_a \quad 2-33$$

$$\epsilon_e = \epsilon_i [1 - \exp(-\frac{t}{\tau})] \quad \text{ขณะรับแรง}$$

$$\epsilon_a = \epsilon_i \exp(-\frac{t}{\tau}) \quad \text{ขณะไม่รับแรง}$$

โดยที่ t คือ เวลา τ คือ characteristic relaxation constant ϵ_i คือ ความเครียดเริ่มต้นที่เกิดจากการให้แรงที่ $t = 0$

เมื่อได้รับ Cyclic Loading การสลายพลังงาน (relaxation of energy) ใน 1 รอบของ Cyclic Loading จำเป็นต้องอาศัยระยะเวลาหนึ่ง กราฟความเค้น-ความเครียด ที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะเป็นวงล้อมปิด (Hysteresis loop) โดยพื้นที่ภายใน Hysteresis loop แสดงถึงพลังงานที่ถูกกระจายหายไปในช่วง 1 รอบการให้พลังงาน และ Dynamic hysteresis ที่ความเค้นต่ำนี้ นิยามถึง Anelasticity หรือ การหน่วง (Damping) โดยที่สมบัติการหน่วงนั้น อาจแสดงได้โดยค่า Specific Damping Capacity (SDF, ψ) ที่เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ถูกกระจายออกไปใน 1 รอบ ต่อพลังงานที่ถูกสะสมไว้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงค่าสูงสุด นิยามได้ดังนี้

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}$$

โดยที่

$$\Delta W = \oint \sigma d\epsilon$$

$$W = \int_{\omega t=0}^{\omega t=\pi/2} \sigma d\epsilon$$

สำหรับ periodic stress ที่เกิดขึ้นต่อวัสดุที่มีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปตามสมการ (2-33) จะได้ค่าความเครียด และ ความเค้น ดังนี้

$$\sigma = \sigma_0 \exp(i\omega t)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp[i(\omega t - \phi)]$$

โดยที่ σ_0 และ ε_0 คือ ขนาดความเค้น และ ความเครียด ตามลำดับ , $\omega = 2\pi f$ คือ ความถี่รอบวง , f คือ ความถี่ของการสั่นสะเทือน , ϕ คือ มุมเฟสที่ ความเครียดล่าช้ากว่าความเค้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่ของวัสดุจะมีลักษณะ Anelastic ทำให้ค่า ϕ ไม่เท่ากับศูนย์ และได้ค่าค่ามอดูลัสเชิงซ้อน ดังนี้

$$E^* = E' + iE'' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos\phi + i\sin\phi) \quad 2-34$$

โดยที่ storage modulus คือ $E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos\phi$ และ loss Modulus คือ

$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin\phi$ และจะได้อัตราส่วนของทั้ง2ค่าดังกล่าว หรือ loss factor (η) และ loss tangent (ϕ) เพื่อใช้แสดงสมบัติของการหน่วง ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \tan\phi \quad 2-35$$

นอกจากค่าดังกล่าว ยังมีการใช้ค่า Inverse Quality factor (Q^{-1}) ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$Q^{-1} = \frac{f_2 - f_1}{f_r} = \frac{\Delta f_{HPB}}{f_r} \quad 2-36$$

โดยที่ f_1 และ f_2 คือ Half-power bandwidth frequency และ f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดต่อความถี่ (Frequency domain plot) ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในวัสดุ ซึ่งความกว้างในช่วงความถี่เรโซแนนซ์บ่งบอกถึงความสามารถในการหน่วงแรงสั่นสะเทือนของวัสดุได้ สำหรับกรณีที่วัสดุมีค่า $\eta < 0.1$ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหน่วงแรงต่างๆ (ψ, η, ϕ, δ , และ Q^{-1}) จะเกี่ยวข้องกันดังนี้

$$\psi = 2\pi\eta = 2\pi \tan\phi \approx 2\pi\phi \approx 2\delta \approx 2\pi Q^{-1}$$

$$\delta = \pi Q^{-1} = \pi \left(\frac{\Delta f_{HPB}}{f_r} \right) \quad 2-37$$

เมื่อ $\eta < 0.1$ ทำให้ $\eta \approx Q^{-1}$ ประกอบกับสมการ (2-29) และ (2-37) จึงหาความสัมพันธ์ระหว่าง ξ และ Q^{-1} ได้ดังนี้

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi/\pi Q^{-1})^2}}$$

เมื่อ $\eta < 0.1$ ทำให้ $\eta \approx Q^{-1}$ และ $\sqrt{1+(2\pi/\pi Q^{-1})^2} \approx 2/Q^{-1}$

$$\xi = \frac{1}{2} Q^{-1}$$

2- 38

2.3 กลไกการหน่วงแรงสั่นสะเทือนใน High-damping materials (Hidamets) [4]

Hidamets เป็นวัสดุโลหะกลุ่มหนึ่งซึ่งมีความสามารถในการดูดซับหรือกระจายพลังงานทางกล ภายในวัสดุนี้ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Hidamets บางชนิดอาจมีช่วงของค่าความถี่ตอบสนอง และช่วงอุณหภูมิใช้งานที่กว้าง แต่มักจะถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมอื่นๆ หรือ มีสมบัติทางกลที่ดี แต่ช่วงความถี่ตอบสนองเฉพาะหรืออุณหภูมิการใช้งานเฉพาะ ปัจจุบันในทางวิศวกรรมได้มีการใช้งาน Hidamets เพื่อประโยชน์ต่างๆ เช่น ลดแรงสั่นสะเทือนและคลื่นรบกวนซึ่งจะทำให้ลดปัญหาความล้าของชิ้นส่วนภายในเครื่องจักร หรือ เพิ่มคุณภาพการทำงานของเครื่องมือตัด (Cutting tools)

ในการแบ่งกลุ่มย่อยของวัสดุ Hidamets นี้ จะขึ้นอยู่กับกลไกในการเกิดการหน่วงของวัสดุ และข้อจำกัดในการเกิดการหน่วงของวัสดุ โดยทุกกลุ่มย่อยจะมีข้อจำกัดในร่วมกันอย่างหนึ่งคือหากมีการให้กรรมวิธีทางความร้อนจะเกิดความไม่เสถียรของค่าการหน่วงขึ้น สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มย่อยได้แก่

I. Hidamets ซึ่งมีโครงสร้างผสมปริมาณสูง (highly heterogeneous structure)

ในกรณีของวัสดุผสมที่เกิดในธรรมชาติและวัสดุผสมที่มีการดัดแปลง มีกลไกหลักในการหน่วงจากการเกิดการแปรรูปถาวรของเฟสที่อ่อนกว่า (local plastic deformation of soft phase) บริเวณรอยต่อระหว่างเฟส ตัวอย่างสำหรับวัสดุผสมที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ เช่น เหล็กหล่อ (โดยมีกลไกหลักในการหน่วงมาจากปริมาณดิสโลเคชัน (dislocation) ในแกรไฟต์) Lead Bronze หรือ pseudo-alloys เป็นต้น ในส่วนวัสดุผสมที่มีการดัดแปลง (รวมถึง Cellular metal) สามารถดัดแปลงและเลือกรวมคุณสมบัติต่างๆ ได้อย่างมาก

II. Hidamets ที่สามารถเกิด thermoelastic martensite

มีกลไกในการหน่วงจาก hysteretic movement ระหว่างรอยต่อของเฟส หรือ twin boundaries, การเกิด stacking fault หรือ dislocation ในโครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่กระนั้น ก็ยังคงมีข้อจำกัดของกลไกได้แก่ martensitic transformation temperature และ กรรมวิธีทางความร้อนที่ไม่สามารถทำได้ รวมทั้งความถี่ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปเมื่อความถี่สูงขึ้นจะทำให้ค่าการหน่วงต่ำลง

III. Hidamets ที่อาศัยคุณสมบัติ magnetic domains

มีกลไกหลักในการหน่วง คือ magneto-mechanical hysteresis หรือ ความเค้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของ magnetic domain walls เกิดขึ้นที่ค่าความเค้นเฉือนหรือความเครียดเฉือนต่ำ และเกิดการกระจายของพลังงานในลักษณะ Hysteresis โดยที่ข้อจำกัดของกลไกนี้ คือ การหน่วงจะลดลงเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หรือ สัมผัสกับสนามแม่เหล็ก แต่ข้อดีคือ Hidamets ในกลุ่มนี้ที่เป็น Fe-based alloys มีราคาถูกเมื่อเทียบกับ Hidamets กลุ่มอื่นๆ และ มีสมบัติทางกลที่ดี

IV. Hidamets ที่เกิดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ง่าย (easily moveable dislocation)

อาศัยการเคลื่อนที่ของ dislocation เป็นกลไกหลักในการหน่วงแรง ซึ่งวัสดุในกลุ่มนี้ได้แก่ austenitic steels บางชนิด และ Mg-based alloy ที่เป็นโลหะน้ำหนักเบา ทั้งยังมีค่าการหน่วงที่สูงมาก แต่กระนั้นในการใช้งานจริงมีข้อจำกัดที่วัสดุนี้มีค่า Yield strength ที่ต่ำมาก

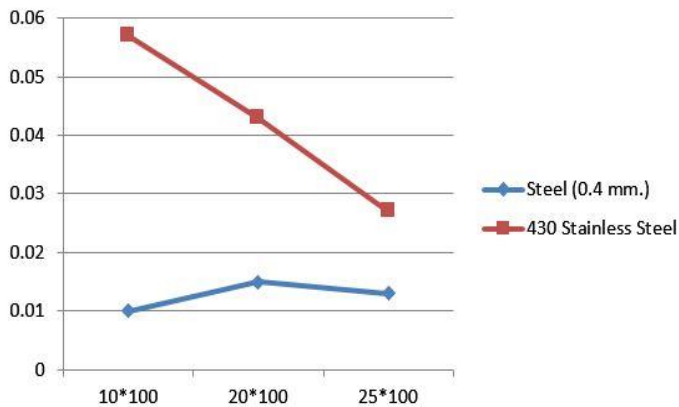
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 งานวิจัย “Measuring of Vibration Damping Properties of Materials” [5]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อวัดสมบัติการหน่วงการสั่นสะเทือนจากชิ้นงานแผ่นบางที่ทำจากวัสดุโลหะต่างๆ อันได้แก่ Aluminum, Brass, Copper, Low Carbon steel และ Stainless steel 430 โดยที่ควบคุมความยาวและความหนาของแผ่นโลหะให้มีความใกล้เคียงกัน แต่มีขนาดกว้างต่างกัน พบว่า ค่า Damping ratio มีแนวโน้มลดลงเมื่อความกว้างของชิ้นงานแผ่นโลหะมีความกว้างมากขึ้น และวัสดุที่มีค่า Damping ratio สูงที่สุดคือ Stainless steel 430 ซึ่งมีค่า 0.27 ถึง 0.57 แปรผกผันตามความกว้างของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังได้ทดลองจับคู่วัสดุแผ่นโลหะ 2 ชนิดที่ต่าง

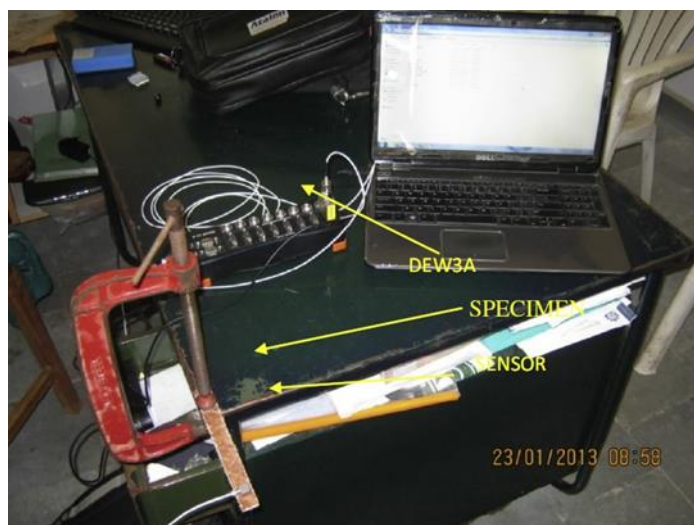
ประกบกันและวัดค่า Damping ratio ที่ได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ ไม่พบว่าสามารถปรับปรุงค่า Damping ratio ให้สูงขึ้นหรือมีการหน่วงแรงสั่นสะเทือนที่ดีขึ้นได้



รูปที่ 2.6 แสดงค่า Damping Ratio ของชิ้นงานแผ่นโลหะขนาดต่างกัน ของวัสดุเหล็กกล้า และ Stainless steel 430

2.4.2 งานวิจัย “Influence of redmud on the mechanical, damping and chemical resistance properties of banana/polyester hybrid composites” [6]

Redmud หรือ หางแร่ Bauxite เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งผู้ทำวิจัยได้นำ Redmud มาเป็นวัสดุเสริมแรงเพิ่มเติมในลักษณะผงอนุภาค สำหรับวัสดุผสมที่มีเนื้อพื้นเป็นพอลิเมอร์ชนิด Polyester และมีวัสดุเสริมแรงแบบเส้นใยด้วยเส้นใยจากต้นกล้วย (Banana Fiber) โดยผสมอนุภาค Redmud ในช่วงส่วนผสมระหว่าง 2% ถึง 10% โดยน้ำหนัก รวมทั้งขนาดอนุภาคที่ 4 μm , 6 μm และ 13 μm และทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุผสมที่ได้นี้ รวมถึงสมบัติการหน่วงแรงของวัสดุผสมนี้



รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งการทดสอบการหน่วงแรงสั่นสะเทือนของชิ้นงานจากงานวิจัย [5]

2.4.3 งานวิจัย “Torsional and axial damping properties of the AZ31B-F magnesium alloy” [7]

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุแมกนีเซียมอัลลอยด์ชนิด AZ31B-F ที่มีสมบัติทางกลต่อน้ำหนักสูงและยังสามารถหน่วงแรงสั่นสะเทือนได้ดี มาทำการตรวจวัดสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งพบว่า เมื่อใช้วิธีการ Stress-strain controlled test จะพบความแตกต่างระหว่างการหน่วงแรงสั่นสะเทือนตามแนวแกน และการหน่วงแรงสั่นสะเทือนจากการบิด เมื่อทดสอบที่ความเค้นสูง สำหรับการทดสอบ Free Vibration analysis พบความแตกต่างระหว่างค่า Axial damping factor และ Shear damping factor ซึ่งสำหรับวัสดุที่ได้นำมาทดสอบนี้ พบค่าอัตราส่วนระหว่าง Axial damping factor ต่อ Shear damping factor มีค่าโดยประมาณ 0.6 ตารางที่ 2.1 แสดงผลการวัดค่า damping factor และ อัตราส่วนระหว่าง Axial damping factor ต่อ Shear damping factor ของแมกนีเซียมอัลลอยด์ AZ31B-F [7]

Experimental AZ31B-F damping factors and respective ASDR.

	η Axial	η Shear	η Axial (FRF and Nyquist)/ η Shear (ASDR)
FRF and Nyquist	0.00661	0.011	0.60
Linear regression	-	0.011289	0.59
Area method	-	0.011192	0.59

2.4.4 งานวิจัย “Damping and mechanical properties of composite composed of polyurethane matrix and preplaced aggregates” [8]

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาวัสดุทางเลือกสำหรับการทำแผ่นคอนกรีตเพื่อใช้ในการก่อสร้างพื้นหรือผนังอาคาร โดยที่ต้องการให้มีสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนที่ดีในขณะที่สมบัติทางกลต่างๆ ยังคงสูงเท่าเดิมหรือลดลงอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ โดยที่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงจากน้ำปูน (Cement paste) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทน (Polyurethane) แบ่งตัวอย่างทดลองได้ดังตาราง 2.2 โดยที่วิธีการผสมปูนซีเมนต์แบบ Preplaced mixing คือ การฉีดอันน้ำปูนลงในแบบที่วางก้อนหินแกรนิตหยาบไว้ก่อนแล้ว ขณะที่ Normal Mixing คือการกวนผสมดังที่ทำในอุตสาหกรรมการก่อสร้างอาคารในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมของวัสดุผสมที่ใช้ในการทดลอง

Materials and manufacturing process.

Mixture	Materials			Manufacturing method
	Matrix	Coarse aggregate	Sand	
C-G-P	Cement paste	Inclusion	-	Preplaced
PU-P	Polyurethane paste	-	-	-
PU-G-P	Polyurethane paste	Inclusion	-	Preplaced
PU-G-M	Polyurethane paste	Inclusion	-	Normal mixing
PU-G-S-M	Polyurethane paste	Inclusion	Inclusion	Normal mixing

จากผลการทดสอบสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนด้วยค่าอัตราการหน่วง (Damping Ratio) และ สมบัติทางกลอื่น ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงอัด (Compressive Strength) และความแข็งแรงต่อการโค้งงอ (Flexural Strength) ซึ่งแสดงได้ดังตาราง 2.3 พบว่า เมื่อเปลี่ยนจากน้ำปูนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิด Polyurethane ได้ผลของความแข็งแรงต่อแรงอัดลดลงเหลือประมาณ 1 ใน 5 ส่วนของปูนซีเมนต์ที่ทำจากน้ำปูนแบบเดิม แต่ได้ผลความแข็งแรงต่อการโค้งงอเพิ่มจากเดิมถึง 20% และ ค่าอัตราการหน่วงเพิ่มขึ้นเป็น 12 เท่าของปูนซีเมนต์ที่ทำจากน้ำปูนแบบเดิม

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า Damping ratio ที่ได้จากการทดลองกับวัสดุผสมที่แตกต่างกัน

Damping properties.		Mechanical properties.		
Mixture	Measured damping ratio (%)	Mixture	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)
C-G-P	1.42 ± 0.29	C-G-P	44.8 ± 2.15	3.49 ± 0.08
PU-P	17.05 ± 0.46	PU-P	-	-
PU-G-P	18.05 ± 0.11	PU-G-P	7.49 ± 0.18	5.35 ± 0.24
PU-G-M	17.00 ± 0.66	PU-G-M	7.61 ± 0.10	5.40 ± 0.18
PU-G-S-M	16.25 ± 0.22	PU-G-S-M	7.88 ± 0.31	5.51 ± 0.20



บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนและสมบัติการหน่วงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำ ซึ่งสมบัติการหน่วงการสั่นสะเทือนนั้นไม่อาจมีเครื่องมือที่ทำการวัดค่าได้โดยตรง จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เราจึงอาจใช้การวัดค่าที่มีความสัมพันธ์กับผลของการหน่วงการสั่นสะเทือน

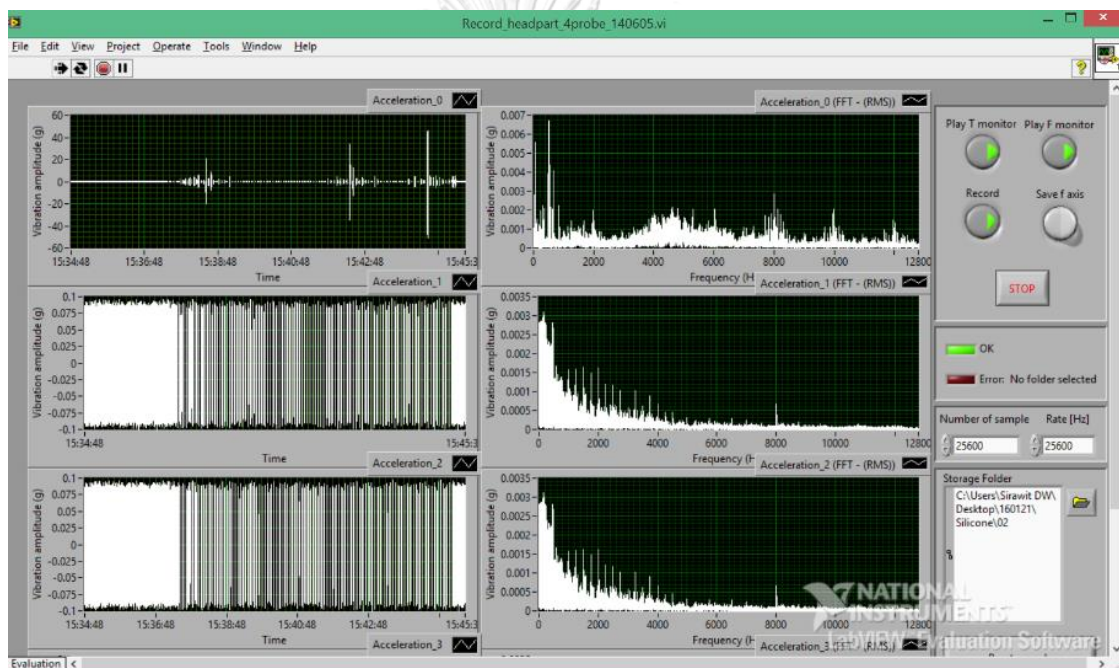
3.1.1 เซ็นเซอร์ Accelerometer และชุดแปลงสัญญาณดิจิทัล-อนาล็อก (DAC)

เซ็นเซอร์ Accelerometer ใช้เพื่อวัด Amplitude ของการสั่นสะเทือนโดยจะใช้ร่วมกับชุดแปลงสัญญาณ DAC ซึ่งแปลงจากสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์ Accelerometer ไปเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นจึงเก็บและบันทึกข้อมูลลงบนคอมพิวเตอร์



3.1.2 คอมพิวเตอร์พร้อมซอฟต์แวร์ LabVIEW 2011 และ MATLAB R2013b

คอมพิวเตอร์จะต่อพ่วงกับชุดแปลงสัญญาณ DAC และสั่งการทำงานชุดแปลงสัญญาณรวมทั้งการบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม LabVIEW 2011 อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการทดลอง ทำให้ได้ข้อมูลในรูปแบบของ Time Domain ซึ่งจะได้ค่า Amplitude ในหน่วย g และ เวลา ในหน่วย วินาที พร้อมกับข้อมูลของ Frequency Domain ซึ่งจะได้ค่า Amplitude ในหน่วย g และ ความถี่ ในหน่วย เฮิรซ์ (Hertz, Hz) โดยข้อมูลทั้งสองรูปแบบจะบันทึกในไฟล์ประเภท .csv ซึ่งสามารถนำข้อมูลดังกล่าว ประมวลผลผ่านโปรแกรม MATLAB R2013b ให้ได้ผลลัพธ์ในการนำไปคำนวณหาสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือนต่อไปได้



รูปที่ 3.2 แสดงหน้าต่างควบคุมการทำงานของโปรแกรม LabVIEW

3.1.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุวัตถุดิบชนิดโลหะ เป็นโลหะที่ผ่านกระบวนการแปรรูป (Wrought product) แบบรีดแผ่นมาก่อนทั้งหมด จึงได้ทำการตัดแบ่งวัสดุไปทำการตรวจสอบด้วย EDS เพื่อตรวจสอบหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะต่างๆได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ ส่วนของวัสดุเสริมโพลิเมอร์ เป็นดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่ใช้ในการทดลอง

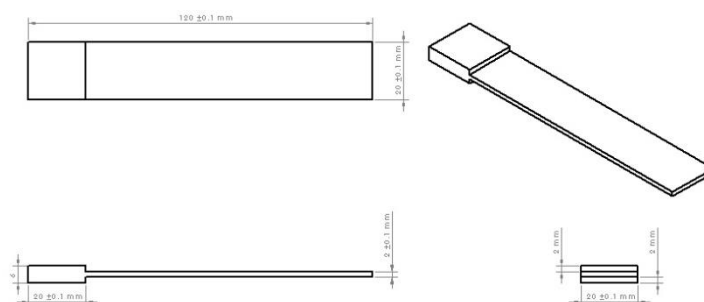
Atomic% Materials	%Al	%Cu	%Fe	%Zn	%Ni	%Cr	%Pb	%Si
1. Aluminum	100.00	-	-	-	-	-	-	-
2. Brass	-	58.74	-	39.92	-	-	1.34	-
3. Copper	-	100.00	-	-	-	-	-	-
4. SS304	-	-	71.29	-	7.64	20.05	-	1.02
5. SS440C	-	-	83.16	-	-	16.84	-	-

ตารางที่ 3.2 แสดงชนิดของวัสดุเสริมโพลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Materials	Type of Polymer
1. Silicone rubber	Elastomer ซึ่งประกอบด้วย Si รวมเข้ากับ C, H, O
2. Thermoplastic Polyurethane (TPU)	-
3. Vestamid® EX9200	Polyamide 12 elastomer (PEBA = polyether block amide), <u>Shore hardness D = 68</u>
4. Vestamid® E40-S3	Polyamide 12 elastomer (PEBA = polyether block amide), <u>Shore hardness D = 40</u>
5. Sorbothane®	Thermoset, Polyether-based, Polyurethane material

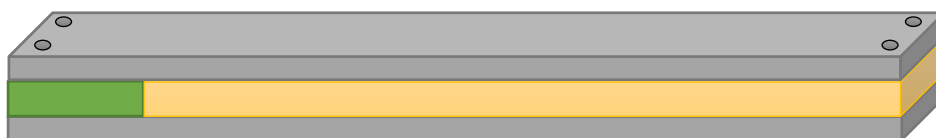
3.1.4 ชิ้นงานทดสอบสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน [9]

สำหรับชิ้นงานทดสอบที่ทำจากวัสดุโลหะจะนำวัสดุตั้งต้นไปกลึงเป็นแผ่นทรงสี่เหลี่ยม ความกว้าง 120mm ความยาว 20mm ความหนาที่ต้นชิ้นงาน 2mm และ ความหนาที่ปลายชิ้นงาน 6mm ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 รูปตัวอย่างชิ้นงานทดสอบวัสดุโลหะ

แต่ในส่วนของชิ้นงานวัสดุพอลิเมอร์จะใช้ชิ้นงานในลักษณะวัสดุคอมโพสิต แบบ Sandwich-Beam เนื่องจากความแข็งแรงในวัสดุพอลิเมอร์มีค่าน้อยมากและทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าได้ โดยจะมีแผ่นStainless steelบางขนาด 120mm x 20mm x 2mm จำนวน 2 แผ่น ประกบแผ่นวัสดุพอลิเมอร์ขนาด 100mm x 20mm x 4mm สำหรับทดสอบ ให้อยู่ตรงกลางร่วมกับแผ่นโลหะอะลูมิเนียมทรงจตุรัสขนาด 20mm x 20mm x 2mm และขันยึดด้วยสกรูขนาด M2 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2mm) ดังภาพ 3.4 แผ่นโลหะอะลูมิเนียมทรงจตุรัสจะทำหน้าที่ขวางไม่ให้ชั้นกรุแน่นจนบีบแผ่นพอลิเมอร์มากจนทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าได้



รูปที่ 3.4 รูปตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแบบ Sandwich-beam โดยที่บริเวณสีเทาจะทำจากวัสดุ Stainless steel 304 บริเวณสีเขียวทำจาก Aluminum และ บริเวณสีเหลืองเป็นตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ทดสอบ

3.1.5 ฐานวางชิ้นงานในการทดสอบกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

สำหรับวัสดุโลหะ จะนำวัสดุวัตถุดิบไปเข้ากระบวนการขัดสีถึงความคมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC-Machining) ตามแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน ประกอบด้วยวัสดุโลหะ Aluminum, Brass, Stainless steel 304 และ Stainless steel 440C แต่สำหรับวัสดุพอลิเมอร์นั้นจะไม่ใช้พอลิเมอร์ทำ ฐานวางชิ้นงานโดยตรงเนื่องจากฐานวางชิ้นงานต้องการความแข็งที่ผิวและความแข็งเกร็งสูง ทั้งยังสามารถทนต่อสารหล่อเย็นที่ใช้ในเครื่องขัดความเที่ยงตรงสูงด้วย จึงใช้ฐานวางชิ้นงานในรูปแบบของ Composite-structure ที่ทำจาก Stainless steel 440C ผลิตด้วย CNC-Machining แล้วจึงใช้พอลิเมอร์เสริมเข้าไประหว่างช่องว่างของฐานวางชิ้นงานเพื่อดูดซับแรงสั่นสะเทือน

3.2 กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ Brass [10]

3.2.1 นำชิ้นงานทดสอบชนิดBrass พร้อมกับตัวอย่างเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาควางบน แท่นอะลูมินา แล้วจึงนำเข้าเตาอบ

3.2.2 ตั้งอัตราการให้ความร้อน 4.7 °C/นาที เริ่มที่ 35 °C จนถึง 450 °C พร้อมกับปล่อยแก๊ส อาร์กอนภายในเตาป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

3.2.3 รอชิ้นงานเย็นในเตาอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวัดความแข็งของวัสดุโลหะตัวอย่าง

3.3.1 นำวัสดุโลหะมาตัดแบ่งขนาด 10*10*6 mm แล้วจึงนำมาขึ้นรูปตัวเรือนด้วยเรซินใสชนิด หล่อเย็น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 mm

3.3.2 นำชิ้นงานมาทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่ขนาด 80 ถึง 1500 สำหรับ วัสดุ กลุ่มเหล็ก และ ใช้ขนาด 800 ถึง 2000 สำหรับวัสดุนอกกลุ่มเหล็ก

3.3.2 นำชิ้นงานวัสดุกลุ่มเหล็กมาขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 3 ไมครอน และ 1 ไมครอน ตามลำดับ ในส่วนของวัสดุนอกกลุ่มเหล็กจะใช้ ดินขัดงานเครื่องประดับชนิดอะลูมินา ดิน ขัดงานเครื่องประดับชนิดเหล็กออกไซด์ และ ผงเพชรขนาด 1 ไมครอน ตามลำดับ

3.3.3 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียดมาทำการกัดกรดเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคดังนี้

ตารางที่ 3.3 สารกัดผิวชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุแต่ละชนิด

ชนิดโลหะ	สารกัดผิวชิ้นงาน (Etchant)
Aluminum	Keller's Etch
Copper, Brass Wrought และ Brass Annealed	Copper No.1 (Nitric Acid)
Stainless steel 304	Glyceregia
Stainless steel 440C	Nital 4%

3.3.4 นำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพร้อม กับบันทึกภาพดิจิทัลด้วยกล้องดิจิทัลอุปกรณ์ Dino-Lite® และคอมพิวเตอร์ ผ่านโปรแกรม DinoCapture 2.0 โดยโลหะแต่ละชนิด ชนิดละ 5 ภาพ นำภาพถ่ายที่ได้มาวัดขนาดเกรนด้วยโปรแกรม ImageJ

3.3.5 นำชิ้นงานทั้งหมดไปวัดความแข็งด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness ด้วยค่าแรงกดตั้ง ตารางที่ 3.4 โดยใช้ Hold time 10 วินาที ในทุกการทดสอบ แล้วทำการคำนวณความแข็งจากความกว้างรอยกดแล้วบันทึกค่า ทำการวัดความแข็งทั้งหมด 5 จุดต่อชิ้นงาน โดยที่เว้นระยะห่างระหว่างจุดกดประมาณ 200 um

ตารางที่ 3.4 แสดงน้ำหนักกดทดสอบด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness บนโลหะแต่ละชนิด

Materials	Aluminum	Brass	Copper	SS304	SS440C
Load (gf)	100	100	100	300	500

3.4 ขั้นตอนการทดลองการทดลองสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน

3.4.1 ทำการติดตั้งปากกาจับชิ้นงานกับโต๊ะระดับที่ฐานมั่นคงและมีน้ำหนักมาก

3.4.2 ตั้งโต๊ะแยกโต๊ะระดับ เพื่อทำการติดตั้งเซนเซอร์ชุดประมวลผล DAC เซนเซอร์ คอมพิวเตอร์ และเซนเซอร์ Accelerometer

3.4.3 ติดตั้งฐานรองเซนเซอร์ Accelerometer สำหรับชิ้นงานทดสอบโลหะ ให้ติดตั้งด้วยกาว Cyanoacrylate ห่างจากขอบชิ้นงานทดสอบโลหะประมาณ 25 mm และ สำหรับชิ้นงานทดสอบวัสดุผสม ให้ติดตั้งบนชิ้นงานแผ่น Stainless steel ประมาณ ห่างจากขอบ

ของแผ่นดังก่อว ปรมาณ 20 mm แล้วจึงนำมาประกอบเข้ากับ แผ่นกั้นAluminum และแผ่นพอลิเมอร์ จนครบทุกชิ้น

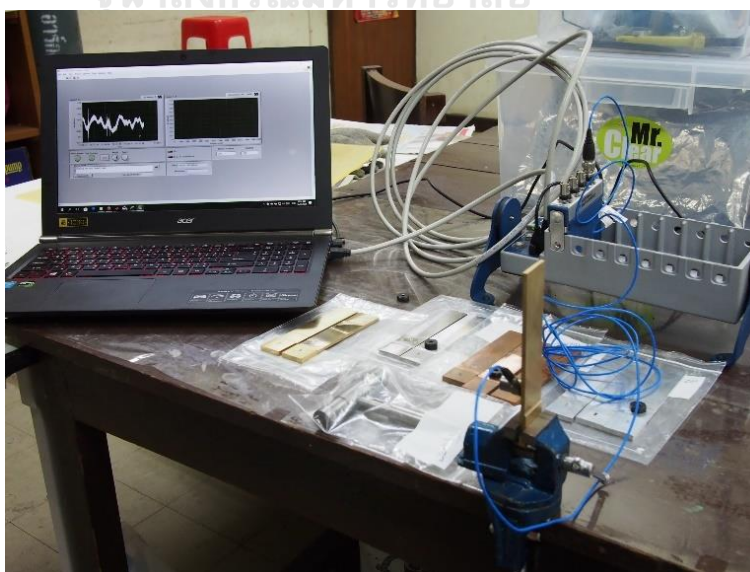
3.4.4 เชื่อมต่อเซนเซอร์ Accelerometer เข้ากับ ชุดแปลงสัญญาณ DAC แล้วจึงเชื่อมต่อ คอมพิวเตอร์และชุดแปลงสัญญาณ DAC ผ่านสาย LAN จากนั้นจึงทำการต่อกระแสไฟ เข้าแก่อุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อเปิดใช้การทำงาน

3.4.5 ทำการเปิดใช้โปรแกรม NIMAX เพื่อเชื่อมต่อการทำงานชุดแปลงสัญญาณ DAC เข้ากับ คอมพิวเตอร์ แล้วจึงเปิดใช้โปรแกรม LabVIEW 2011 เพื่อเก็บข้อมูลจาก Accelerometer

3.4.6 ติดตั้งเซนเซอร์ Accelerometer ลงบนฐานรองเซนเซอร์ที่ติดตั้งบนชิ้นงานทดสอบแล้ว จากนั้นจึงติดตั้งชิ้นงานทดสอบเข้ากับปากกาชิ้นงานให้แน่นสนิทพอดี โดยให้ขอบล่างของ ปากกาจับชิ้นงานพอดีกับปลายชิ้นงาน-ทดสอบ และขอบบนของปากกาจับชิ้นงาน ไม่ สัมผัสกับเซนเซอร์ Accelerometer

3.4.7 ทำการให้แรงที่ปลายของชิ้นงานทดสอบ แล้วสังเกตผลที่เกิดขึ้นจากการให้แรง จากนั้นให้ เว้นช่วงเวลาประมาณ 5 วินาที จึงทดสอบให้แรงที่ปลายชิ้นงาน ทำซ้ำเช่นนี้จนครบ 20 รอบ และทำการบันทึกค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

3.4.8 ทำซ้ำขั้นตอน 3.4.6 ถึง 3.4.7 จนครบทุกประเภทของชิ้นงานทดสอบ



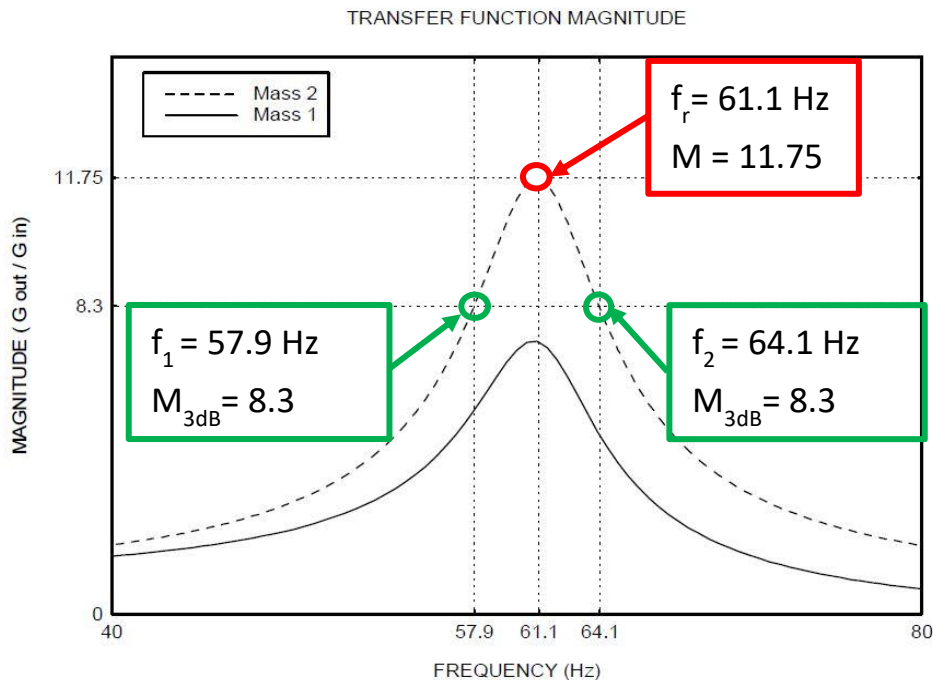
รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการหน่วงแรงสั่นสะเทือน

3.4.9 นำไฟล์ข้อมูลที่บันทึกได้ ผ่านโปรแกรม MATLAB R2013b เพื่อคำนวณค่าการหน่วง แรงสั่นสะเทือนที่วัดได้ ในรูปของกราฟ Time domain และ Frequency domain

3.5.10 ทำการคำนวณค่า Damping ratio จากกราฟ Frequency domain ด้วยการหา ตำแหน่งความถี่ยอดสูง แล้วจึงใช้วิธีการ Half-Power bandwidth โดยการนำค่าแมกนิจูด (M) ที่ค่าความถี่นั้นมาหา “-3db Magnitude” ($M_{3dB} = M/\sqrt{2}$) ในการหา ความถี่รอบข้างของยอดสูงนั้น (f_1 และ f_2) ดังรูปที่ 3.5 แล้วจึงแทนค่าในสมการ (2-38) เพื่อหาค่า Damping ratio ได้ดังตัวอย่างจากรูปที่ 3.5 ดังนี้

$$\xi = \frac{1}{2} Q^{-1} = \frac{f_2 - f_1}{f_r} = \frac{64.1 - 57.9}{2 \cdot (61.1)} = 0.0507$$

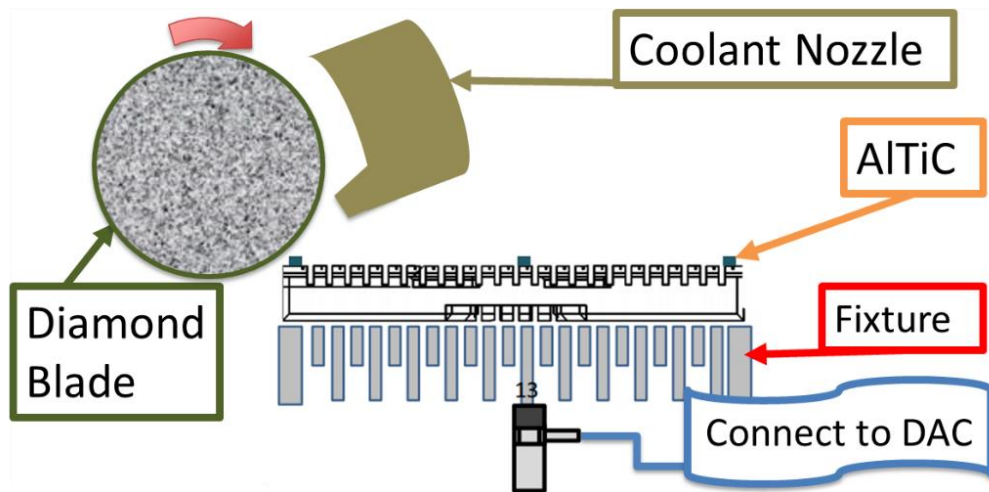
3.5.11 ทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 3.5.10 กับทุกข้อมูลการทดลอง และหาค่าเฉลี่ยของ Damping ratio ที่ได้ต่อไป



รูปที่ 3.6 รูปตัวอย่างแสดงวิธีการ Half-Power bandwidth [3]

3.5 ขั้นตอนการทดลองการทดสอบฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

- 3.5.1 ทำการติดตั้งชิ้นงานเซรามิกความแข็งสูงด้วยกาวร้อน ลงบนฐานวางชิ้นงานของเครื่องขัดสีด้วยความเที่ยงตรงสูงที่ถูกถอดแยกออกมา แล้วรอจนฐานวางชิ้นงานเย็นตัวเพื่อให้กาวแข็งตัว
- 3.5.2 ตั้งโต๊ะแยก เพื่อทำการติดตั้งเซนเซอร์ชุดประมวลผล DAC และคอมพิวเตอร์
- 3.5.3 ติดตั้งฐานรองเซนเซอร์ Accelerometer บริเวณกึ่งกลางของ ฐานวางชิ้นงานโลหะต่างๆ ที่ติดตั้งชิ้นงานเซรามิกความแข็งสูงแล้วด้วย กาวอุตสาหกรรม Loctite 480 และรอให้กาวแข็งตัว
- 3.5.4 เชื่อมต่อเซนเซอร์ Accelerometer เข้ากับ ชุดแปลงสัญญาณ DAC แล้วจึงเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์และชุดแปลงสัญญาณ DAC ผ่านสาย LAN จากนั้นจึงทำการต่อกระแสไฟเข้าแก่อุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อเปิดใช้การทำงาน
- 3.5.5 ทำการเปิดใช้โปรแกรม NIMAX เพื่อเชื่อมต่อการทำงานชุดแปลงสัญญาณ DAC เข้ากับคอมพิวเตอร์ แล้วจึงเปิดใช้โปรแกรม LabVIEW 2011 เพื่อเก็บข้อมูลจาก Accelerometer
- 3.5.6 ทำการติดตั้งเซนเซอร์ Accelerometer เข้ากับฐานรองเซนเซอร์ที่อยู่บนฐานวางชิ้นงานชนิดต่างๆแล้วจึงนำฐานวางชิ้นงานดังกล่าว แล้วเข้าไปติดตั้งในเครื่องขัดความเที่ยงตรงสูง
- 3.5.7 สำหรับการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานพอลิเมอร์เสริมลงในฐานวางชิ้นงาน จะเป็นลักษณะของ Composite Structure โดยการเสริมวัสดุพอลิเมอร์เข้าไปตามช่องว่างของฐานวางชิ้นงานที่ทำจาก Stainless steel 440C โดยไม่ใช้สารช่วยยึดติดระหว่างพอลิเมอร์และฐานวางชิ้นงาน แล้วจึงติดตั้งฐานรองเซนเซอร์ Accelerometer บริเวณกึ่งกลางของ ฐานวางชิ้นงานที่เสริมด้วยชิ้นงานพอลิเมอร์แล้ว
- 3.5.8 เริ่มกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง พร้อมกับเริ่มการบันทึกค่าด้วยโปรแกรม LabVIEW 2011 และสังเกตแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง



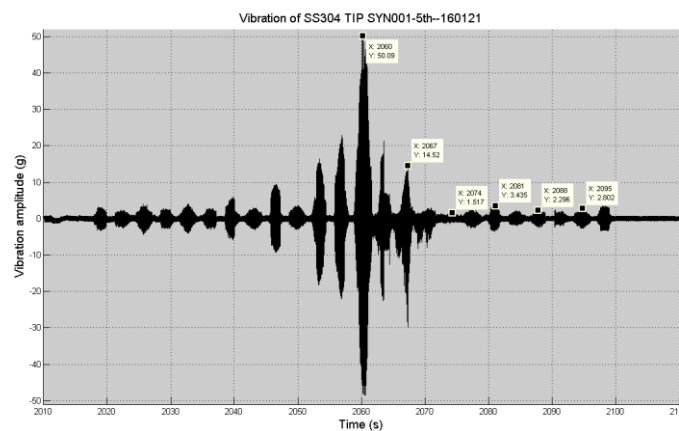
รูปที่ 3.7 รูปภาพแสดงกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

3.5.9 เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการขัดสีด้วยความเที่ยงตรงสูงแล้ว จึงหยุดการเก็บค่าของโปรแกรม LabVIEW 2011 แล้วจึงถอดฐานวางชิ้นงานที่ชิ้นงานเซรามิกความแข็งสูงมากถูกตัดทั้งหมด ออกจากเครื่องจักร จากนั้นจึงถอนการติดตั้ง Accelerometer ออกจากฐานวางชิ้นงาน

3.5.10 ใช้โปรแกรม MATLAB 2013b ในการประมวลผลข้อมูลให้อยู่ในรูปของกราฟ Time domain หรือ กราฟแอมพลิจูดต่อเวลา

3.5.11 ทำซ้ำขั้นตอน 3.5.6 ถึง 3.5.9 จนครบทุกประเภทของฐานวางชิ้นงาน

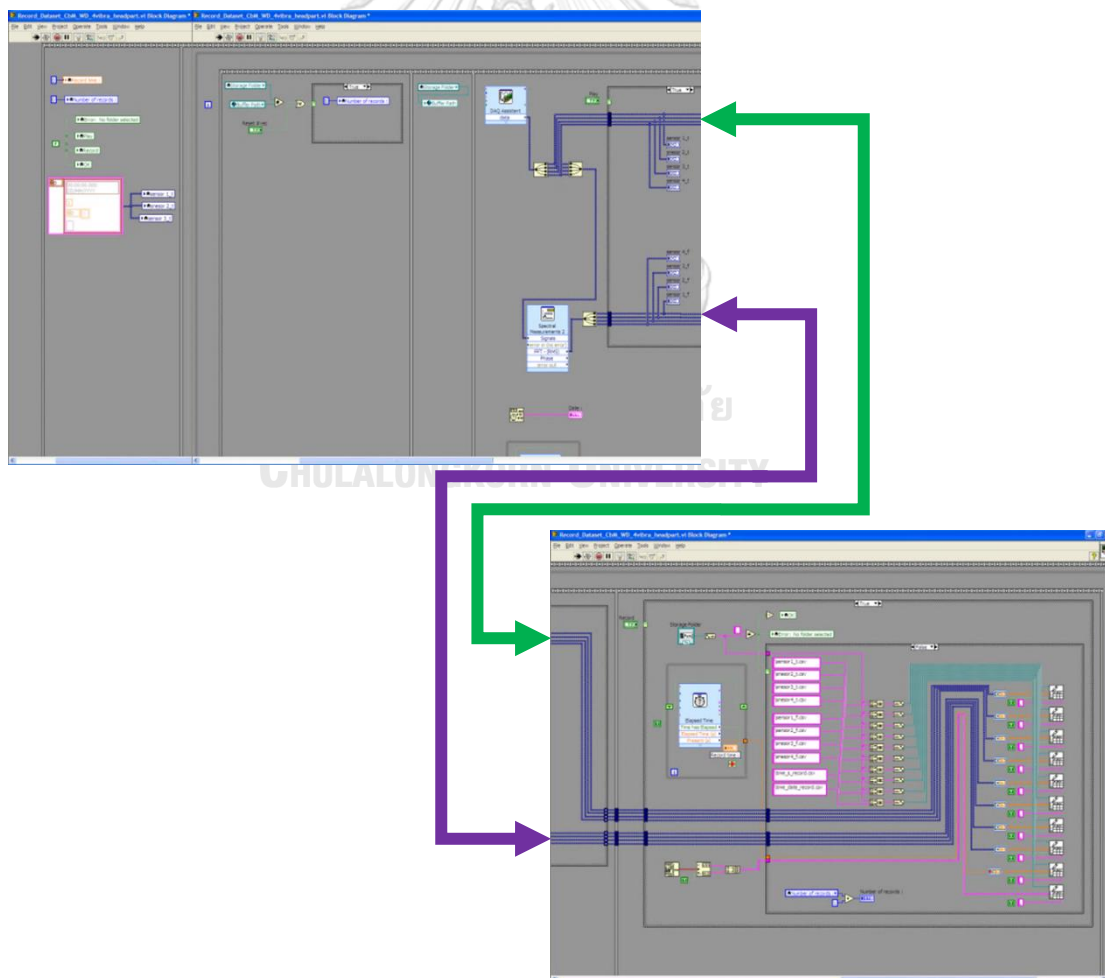
3.5.12 นำชิ้นงานเซรามิกความแข็งสูงมากถูกตัดแล้ว ออกจากฐานวางชิ้นงาน แล้วจึงสุ่มเลือกตัวอย่างเพื่อนำไปวัดคุณภาพด้วย AFM และ SEM อย่างละ 3 ชิ้น



รูปที่ 3.8 กราฟแอมพลิจูดต่อเวลาของการสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

3.6 Block-diagram ของ LabVIEW 2011

ในการบันทึกค่าแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์ accelerometer จำเป็นต้องใช้โปรแกรม LabVIEW 2011 เพื่อให้สามารถอ่านค่าจากเซนเซอร์และบันทึกค่าลงในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ได้ โดยหลักการทำงานของโปรแกรม LabVIEW 2011 จะใช้ในลักษณะของการสร้าง Block Diagram แทนการเขียนรหัสคำสั่งทางคอมพิวเตอร์ ซึ่ง Block Diagram จะแทนที่อุปกรณ์หรือเครื่องมือวัด และโยงเส้นเชื่อมต่อเข้าหากัน (ซึ่งเสมือนสายไฟ) เพื่อให้คล้ายคลึงกับการเชื่อมต่ออุปกรณ์จริง และง่ายต่อความเข้าใจของผู้ใช้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ Block Diagram ในการอ่านค่าและแปลงค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำต่อเซนเซอร์ accelerometer และแปลงผลที่ได้เป็นชุดตัวเลขแบบตารางแมทริกซ์ของค่าการสั่นสะเทือนในหน่วยความเร่ง g และบันทึกในรูปแบบไฟล์ .csv โดยที่มีจำนวนหลักเท่ากับความถี่ที่อ่านวัดค่า และ จำนวนแถวแทนด้วยเวลา 1 วินาที



รูปที่ 3.9 แสดง Block diagram ที่ในการใช้โปรแกรม LabVIEW 2011 เพื่ออ่านค่าและบันทึกข้อมูล

3.7 MATLAB 2013b Source Code

3.7.1 Frequency domain source code

```
clear all, clc,close all;
f=load('C:\Users\XXX\F-Axis 12800.csv');
a1=load('C:\Users\XXX\sensor01_f.csv');
a2=load('C:\Users\XXX\sensor01_f.csv');
a3=load('C:\Users\XXX\sensor01_f.csv');
an=cat(1, a1, a2, a3);
%% plot frequency domain
figure
mm=mean(an);
mx=max(an);
plot(f,mm);
subplot(1,1,1,'FontSize',12)
title('Frequency of XXX','FontSize',16)
ylabel('Vibration Amplitude (g)','FontSize',16)
xlabel('Frequency (Hz)','FontSize',16)
hold on
grid
xlim([0 12800]);
```

3.7.2 Time domain source code

```

clear all; clc; close all;
Am=load('D:\XXX\sensor01_f.csv');
tFull=load('D:\XXX\time_s_record.csv');
STR=12800; % sample to read
%% Extract dataset
Ams=Am; [c,d]=size(Ams); a=1; b=c; time=tFull;
%Use this line when select all row of dataset
a=1; b=c; Ams=Am(a:b,:); time=tFull(a:b,:);
%% Plot t continuous
figure
subplot(1,1,1,'Color',[0.8 0.8 0.8])
hold on
for i=a:b-1
tRow=time(i+1)-time(i); %Time of this row
tRes=tRow/STR; % Time resolution(s)
t=time(i):(tRes):((tRow+time(i))-tRes);
plot(t,Ams(i,:),'Color','black'); % Plot time VS amplitude of acceleration(g)
end
axis tight;
grid
title('Amplitude vs Time XXX','FontSize',14)
ylabel('Vibration amplitude (g)','FontSize',14)
xlabel('Time (s)','FontSize',14)

```

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวัดความแข็งของวัสดุโลหะตัวอย่าง

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดค่าความแข็งของโลหะที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาก่อน (ยกเว้น Stainless steel 440C ที่ได้จากการหลอมขึ้นรูป) ได้ผลแสดงดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงขนาดเกรนเฉลี่ยและความแข็งของวัสดุโลหะ

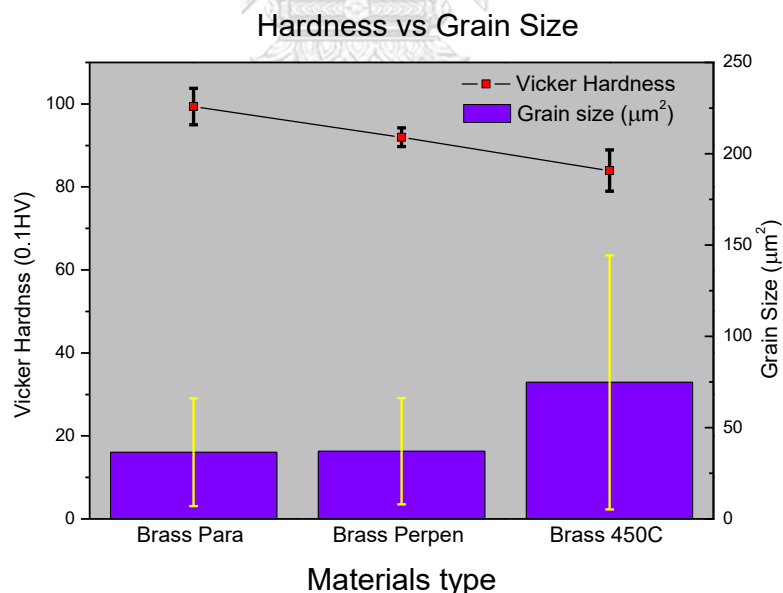
ลำดับที่	วัสดุ	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm^2)	ค่าเป็ยงเบนมาตรฐาน	ความแข็งเฉลี่ย (HV)	ค่าเป็ยงเบนมาตรฐาน
1	Aluminum ขวางแนวรีด	7245.51	3099.14	57.76	1.15
2	Aluminum ขนานแนวรีด	8899.69	2796.52	58.02	1.59
3	Brass ขวางแนวรีด	36.52	29.49	91.98	2.28
4	Brass ขนานแนวรีด	37.07	29.12	100.64	3.42
5	Brass อบอ่อนที่ 450°C	74.80	69.64	81.54	3.46
6	Copper ขวางแนวรีด	329.48	276.34	69.60	2.30
7	Copper ขนานแนวรีด	376.86	301.12	67.70	3.83
8	Stainless steel 304 ขวางแนวรีด	342.18	310.70	157.30	3.03
9	Stainless steel 304 ขนานแนวรีด	344.22	310.40	197.28	7.62
10	Stainless steel 440C	59.02	55.57	565.58	14.12

พิจารณา Aluminum, Copper, Brass และ Stainless steel 304 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางการรีด และ โครงสร้างจุลภาคขนานแนวการรีด พบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยของโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางการรีด จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดเกรนเฉลี่ยของโครงสร้างจุลภาคขนานแนวการรีด แต่สำหรับค่าความแข็ง Aluminum และ Copper มีค่าความแข็งของโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางการรีดไม่แตกต่างกันกับค่าความแข็งของโครงสร้างจุลภาคขนานแนวการรีดอย่างมีนัยยะสำคัญ ในขณะที่ Brass และ Stainless steel 304 มีค่าความแข็งของโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางการรีดสูงกว่าค่าความแข็งโครงสร้างจุลภาคขนานแนวการรีด

ซึ่งสอดคล้องกันกับการแปรผกผันของขนาดเกรนต่อค่าความแข็งของวัสดุ โดยมีข้อสังเกตของลักษณะ ส่วนผสมทางเคมีดังตาราง 3.1 ซึ่ง Aluminum และ Copper นั้นไม่พบธาตุผสมเจือในเนื้อวัสดุ แต่ Brass และ Stainless steel 304 พบธาตุผสมปริมาณสูงได้แก่ 20%Ni และ 7.6%Cr

พิจารณา Brass ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป และ Brass ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 450°C (เพื่อให้ได้ผลในการเพิ่มขนาดเกรน) เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า ขนาด เกรนเฉลี่ยของโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเกรนเฉลี่ยของ โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปทั้งสองแนว และเมื่อวัดค่าความแข็งของ Brass ที่ผ่าน กรรมวิธีทางความร้อน พบว่ามีค่าลดลงจากเดิมอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกันกับการแปรผกผัน ของขนาดเกรนต่อค่าความแข็งของวัสดุเช่นกัน

สำหรับตัวอย่าง Stainless steel 440C อันเป็นวัสดุของฐานรองชิ้นงานเดิมนั้น ได้มาจากการหล่อขึ้นรูปแล้วจึงผ่านกระบวนการขัดสีด้วยความร้อนและการให้กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อ ปรับปรุงโครงสร้างจึงไม่พบแนวการรีดขึ้นรูปเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค มีสมบัติความแข็ง นั้นสูงที่สุดจากวัสดุทั้งหมดที่ทดสอบจากลักษณะโครงสร้างมาร์เทนไซต์



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งและขนาดเกรนเฉลี่ยของ Brass และ Brass annealed

4.2 ผลการทดลองวัสดุโลหะสำหรับสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน และทดสอบใช้ทำฐานวาง ชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

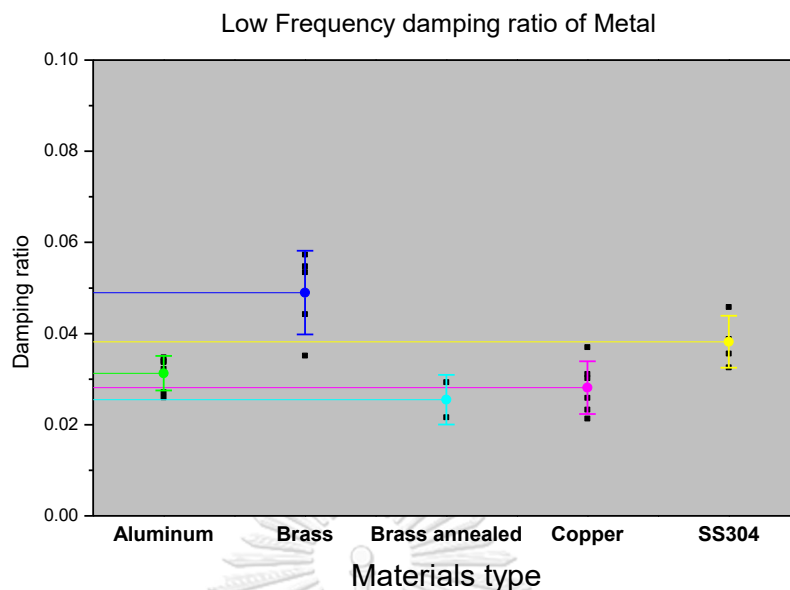
4.2.1 ทดลองวัสดุโลหะสำหรับสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน

การทดลองสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน จะได้ผลลัพธ์ของค่า Damping ratio จากข้อมูลของกราฟ Frequency Domain หรือ กราฟแมกนิจูดเทียบกับความถี่ประกอบกับสมการ (2-38) ซึ่งค่า Damping ratio ที่มาก สอดคล้องกับสมบัติในการหน่วงแรงสั่นสะเทือนที่มากกว่า แต่กระนั้นวัสดุแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่อค่าความถี่เฉพาะ และอาจพบค่าความถี่ที่ใช้ในการคำนวณหา Damping ratio มากกว่า 1 ค่า จึงอาจแบ่งพิจารณา ค่าของ Damping ratio ตามความถี่ตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในวัสดุ โดยกำหนดให้ช่วงความถี่ต่ำคือ ช่วงความถี่ 0-400 Hz และ ช่วงความถี่สูง คือ ช่วงความถี่มากกว่า 400 Hz

เมื่อพิจารณาการตอบสนองย่านความถี่ต่ำ จากรูปที่ 4.2 และ ตารางที่ 4.2 วัสดุโลหะที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยสูงที่สุด คือ Brass (Wrought) มีค่า 0.0490 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0092 และวัสดุโลหะที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ Brass annealed (ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 450°C [10]) มีค่า 0.0255 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0054

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุโลหะที่
การตอบสนองความถี่ต่ำ

วัสดุ	Damping ratio	SD
1. Aluminum	0.0313	0.0038
2. Brass (Wrought)	0.0490	0.0092
3. Brass annealed	0.0255	0.0054
4. Copper	0.0281	0.0058
5. Stainless steel 304	0.0382	0.0057

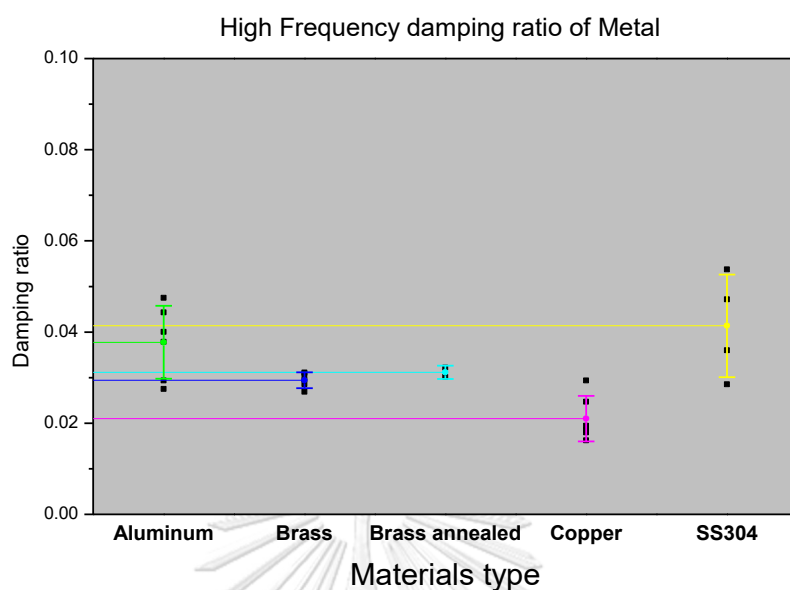


รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่ต่ำ

จากรูปที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.3 ที่การตอบสนองย่านความถี่สูง วัสดุโลหะที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยสูงที่สุด คือ Stainless steel 304 มีค่า 0.0414 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0113 และ วัสดุโลหะที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ Copper มีค่า 0.0210 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0050

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุโลหะที่ การตอบสนองความถี่สูง

วัสดุ	Damping ratio	SD
1. Aluminum	0.0378	0.0080
2. Brass (Wrought)	0.0294	0.0017
3. Brass annealed	0.0312	0.0014
4. Copper	0.0210	0.0050
5. Stainless steel 304	0.0414	0.0113

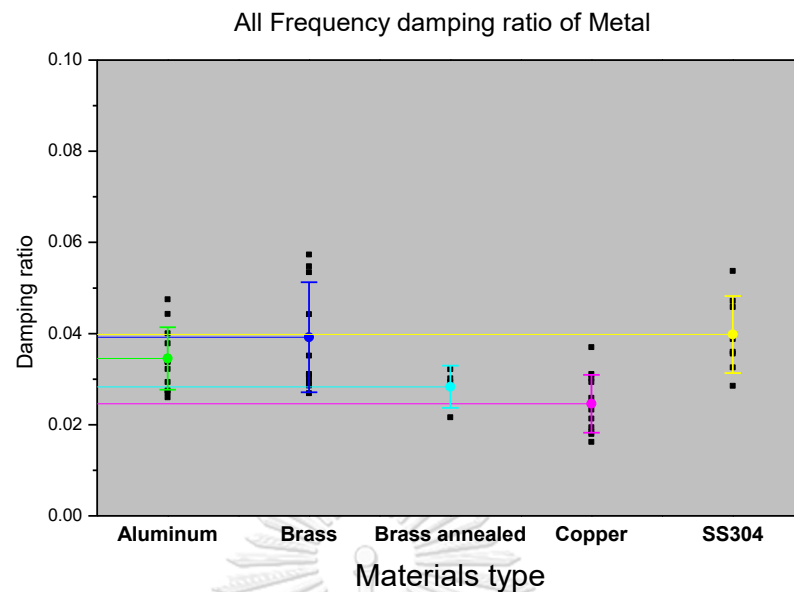


รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่สูง

จากการทดสอบชิ้นงานโลหะ เมื่อรวมผลของทุกช่วงความถี่ จะได้ผลดัง ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4 โดยที่วัสดุโลหะที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยสูงที่สุด คือ Stainless steel 304 มีค่า 0.0398 และวัสดุโลหะที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ Copper มีค่า 0.0246

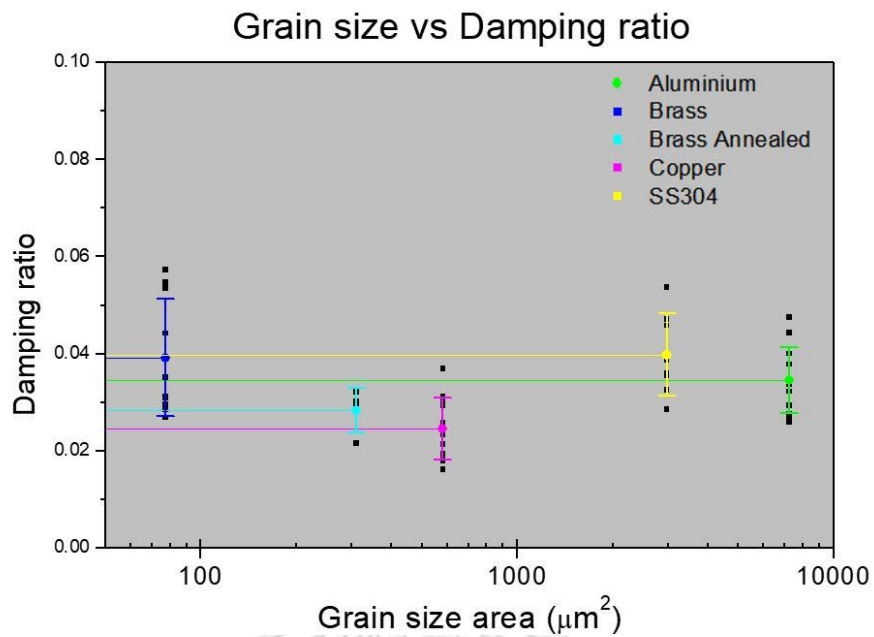
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ย Damping ratio ของวัสดุโลหะที่การตอบสนองทุกช่วงความถี่

วัสดุ	Damping ratio	SD
1. Aluminum	0.0345	0.0069
2. Brass (Wrought)	0.0392	0.0121
3. Brass annealed	0.0283	0.0046
4. Copper	0.0246	0.0064
5. Stainless steel 304	0.0398	0.0084

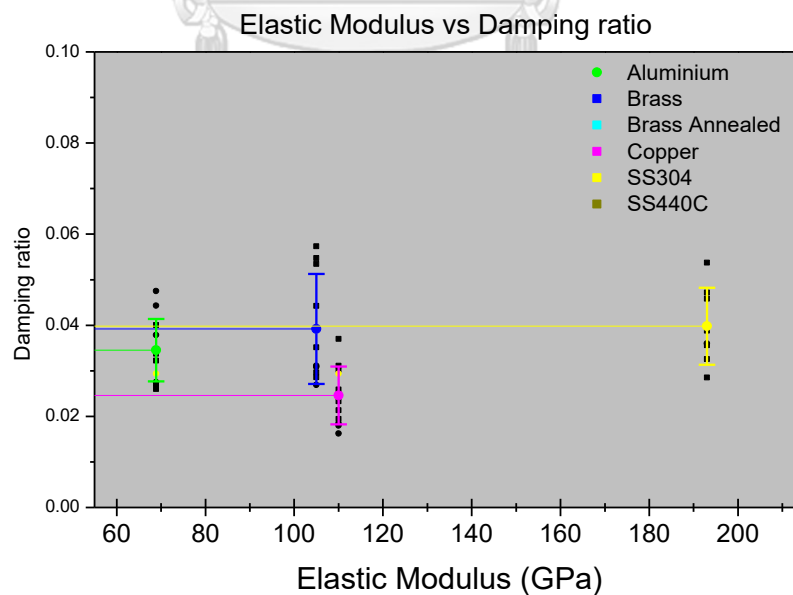


รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองทุกช่วงความถี่

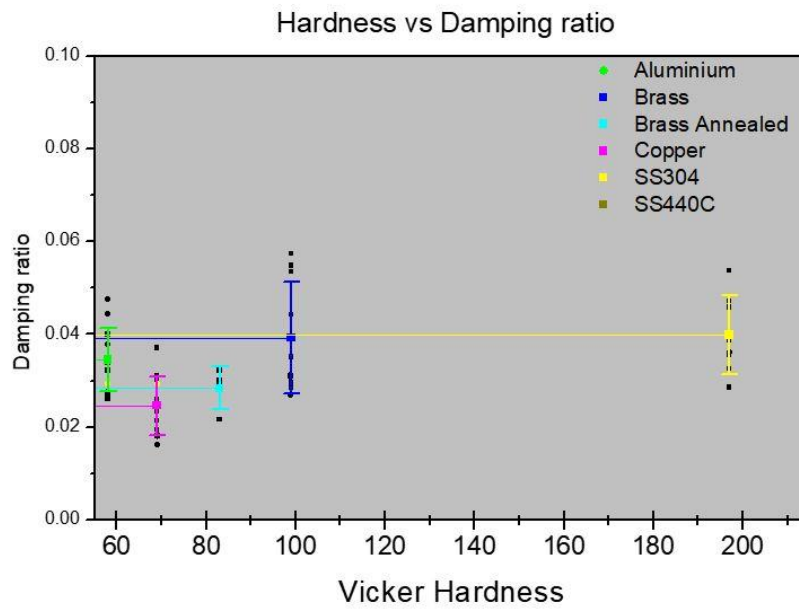
จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ Grain size กับ ค่า damping ratio ของวัสดุโลหะ ดังรูปที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบ grain size วัสดุโลหะที่ต่างกันกับ damping ratio ของวัสดุโลหะ ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนระหว่างทั้งสองค่า แต่เมื่อเลือกเปรียบเทียบใน โลหะชนิดเดียวกันระหว่าง Brass (Wrought) และ Brass annealed ที่ผ่านการให้กรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C [10] ร้อน พบว่า ค่า Damping ratio เฉลี่ยมีค่าลดลงจาก 0.03493 เป็น 0.02937 ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณจุดบกพร่องในเนื้อโลหะ [4] เช่น ลดปริมาณ dislocation จากกรรมวิธีทางความร้อนที่เหมาะสม ทำให้ลดผลของกลไกการหน่วงจากการเคลื่อนที่ของ dislocation เมื่อรับแรงกระทำ การเพิ่มขนาดของเกรน ทำให้มีปริมาณขอบเกรนน้อยลง ซึ่งขอบเกรนนั่นเป็นจุดบกพร่องในเนื้อโลหะที่มีผลในกลไกการหน่วงแรงในเนื้อโลหะ เป็นต้น



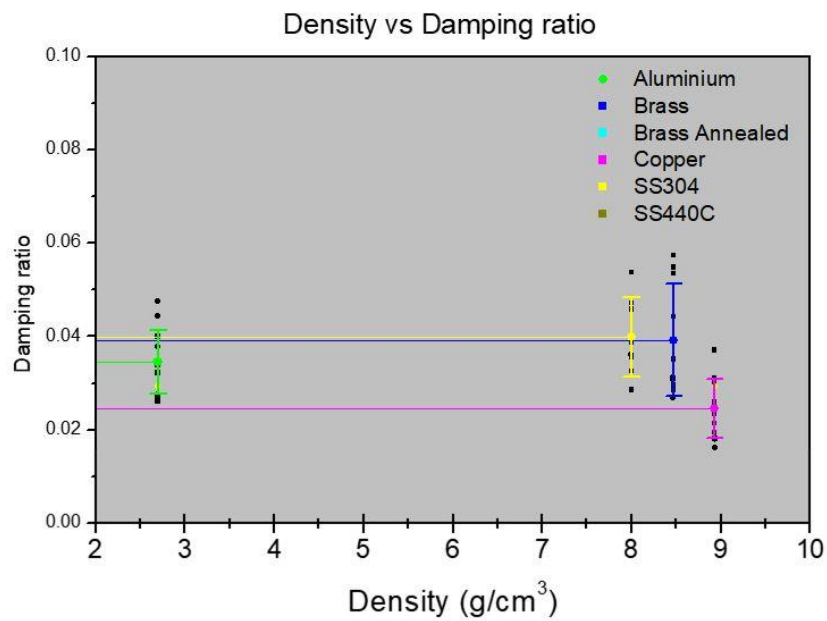
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟระหว่าง Grain size กับ damping ratio ของวัสดุโลหะ เมื่อนำค่า Damping ratio ที่คำนวณได้ มาทำการเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆของวัสดุโลหะ ได้แก่ ความหนาแน่น (density), Elastic Modulus และ Vickers Hardness ดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ไม่พบแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างค่า damping ratio ของวัสดุโลหะ และสมบัติเหล่านี้



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟระหว่างค่า Elastic modulus กับ damping ratio ของวัสดุโลหะ



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟระหว่าง Vickers hardness กับ damping ratio ของวัสดุโลหะ



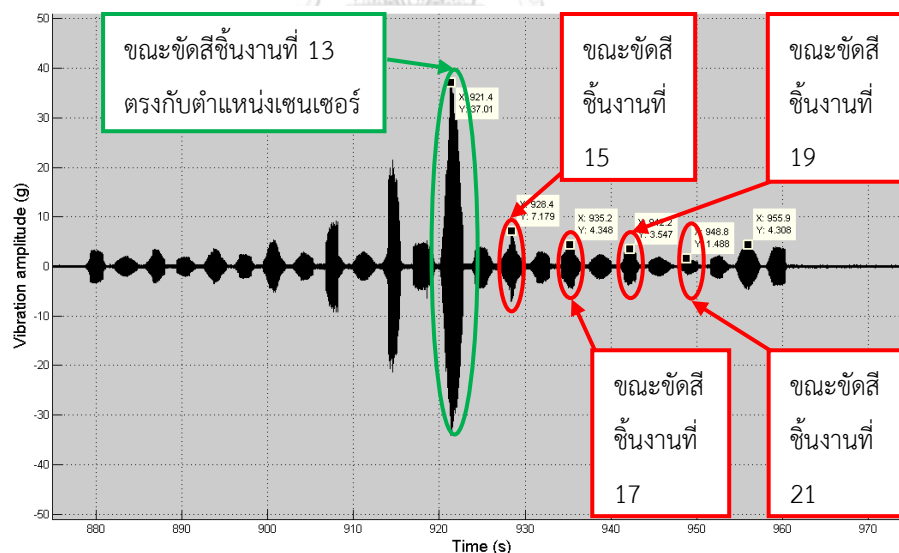
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟระหว่างความหนาแน่นกับ damping ratio ของวัสดุโลหะ

4.2.2 ทดสอบใช้วัสดุโลหะทำฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

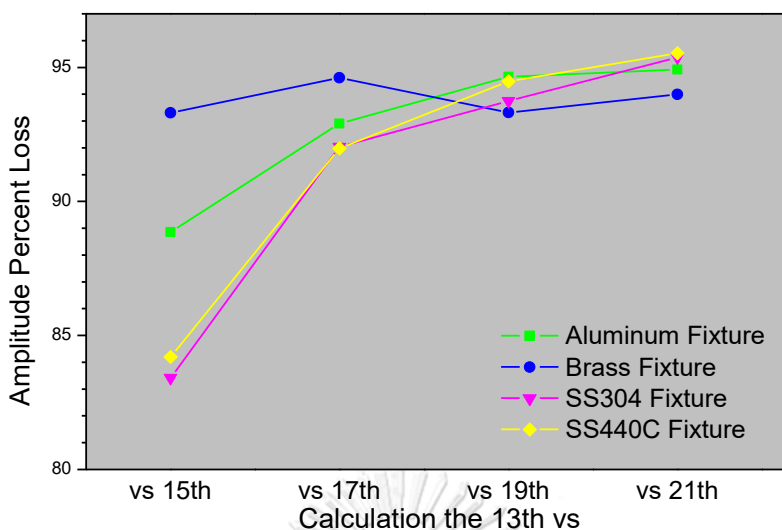
ในการทดสอบใช้งานจริง โดยการนำโลหะอื่นๆ มาทำฐานวางชิ้นงานจริงเพื่อใช้ในกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งวัสดุเดิมของฐานวางชิ้นงาน คือ Stainless steel 440C ซึ่งเป็น Martensitic Stainless steel และ วัสดุโลหะที่สนใจนำมาทำฐานวางชิ้นงาน จากผลการทดลองใน 4.2.1 จึงได้เลือก Aluminum, Brass และ Stainless steel 304 ส่วน Copper นั้นมีค่า Damping ratio ที่น้อยที่สุดจากผลการทดลองหัวข้อ 4.2.1 จึงไม่ได้เลือกใช้ในการทดลองต่อในส่วนนี้

เนื่องจากฐานวางชิ้นงานนั้น ต้องวางชิ้นงานเพื่อขัดสี 24 ชิ้นงานต่อการขัดสี 1 รอบ จึงต้องมีมิติและรูปทรงที่แม่นยำสูง จึงไม่สามารถนำไปปรับปรุงโครงสร้างโลหะด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ เพราะ การให้ความร้อนสูงแก่ฐานวางชิ้นงานโลหะจะมีผลในการเปลี่ยนรูปทรงมิติของฐานวางโลหะได้

นอกจากนั้นแล้วยังมีการบันทึกค่าการสั่นสะเทือน และประมวลผลในรูปกราฟ Time domain หรือ กราฟแอมพลิจูดเทียบกับเวลา โดยการติดเซนเซอร์ Accelerometer ไว้กึ่งกลางของฐานวางชิ้นงาน ซึ่งตรงกับชิ้นงานลำดับที่ 13 ในขณะที่เครื่องขัดความเที่ยงตรงสูงทำการขัดสีชิ้นงานจริงบนฐานวางชิ้นงานที่ทำจากโลหะต่างๆ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟแอมพลิจูดต่อเวลา ของแรงสั่นสะเทือนขณะที่ทำการขัดสีชิ้นงาน



รูปที่ 4.10 แสดงผลของกราฟ Percent Loss ต่อตำแหน่งเปรียบเทียบที่ห่างจากตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ accelerometer ของฐานวางโลหะ

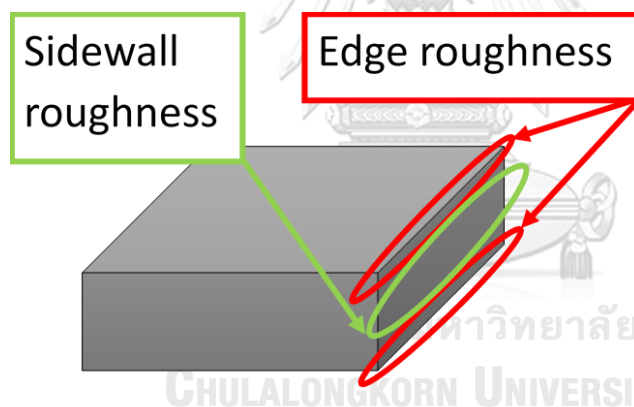
จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 Amplitude Percent Loss (APL) คือ เปอร์เซ็นต์ที่แอมพลิจูดลดลง เปรียบเทียบ ณ ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ accelerometer หรือตำแหน่งชิ้นงานที่ 13 ต่อแอมพลิจูดขณะขัดสีชิ้นงานตำแหน่งไป หากค่า APL มีค่าสูง แรงสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านมาตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์ยิ่งลดลงมาก พบว่าค่าเฉลี่ยของ APL ที่เกิดการขัดสีในชิ้นงานที่ 13 เปรียบเทียบกับตำแหน่งชิ้นงานที่ 15 ฐานวางชิ้นงาน Brass มีค่าเฉลี่ยของ APL สูงที่สุดที่ 93.31 และ ฐานวาง Stainless steel 304 มีค่าเฉลี่ยของ APL น้อยที่สุดเท่ากับ 83.42 และมีค่าใกล้เคียงกับ ฐานวาง Stainless steel 440C ที่มีค่าเฉลี่ยของ APL เท่ากับ 84.203

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยของ Amplitude percent loss (APL) ที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ทำจากโลหะต่างชนิดกัน

ชนิดวัสดุของฐานวางชิ้นงาน	Amplitude percent loss เทียบต่อตำแหน่งชิ้นงานที่ 13			
	ชิ้นงานที่ 15	ชิ้นงานที่ 17	ชิ้นงานที่ 19	ชิ้นงานที่ 21
1. Aluminum	88.86	92.91	94.65	94.92
2. Brass	93.31	94.62	93.32	93.99
3. Stainless steel 304	83.42	92.04	93.75	95.38
4. Stainless steel 440C	84.20	91.98	94.48	95.53

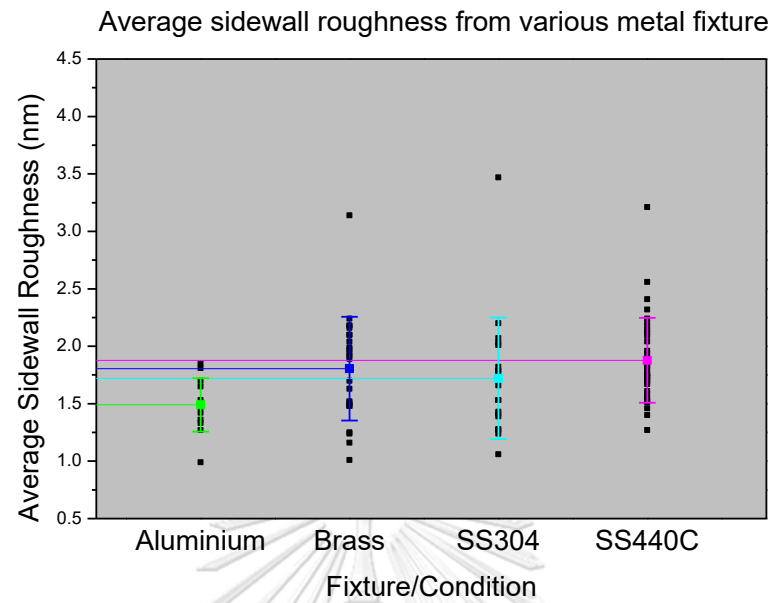
แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ APL ระหว่างชนิดฐานวางโลหะ ขณะขัดสีผ่านตำแหน่งชิ้นงานที่ 17, ตำแหน่งชิ้นงานที่ 19 และ ตำแหน่งชิ้นงานที่ 21 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งในทุกๆวัสดุ จะมีค่าเฉลี่ยของ APL ในช่วง 94 ถึง 95

ในส่วนของการตรวจสอบความหยาบผิวของชิ้นงาน จะตรวจสอบบนหน้าขัดสีของชิ้นงานที่ถูกขัดสีด้วยใบมีด จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ความหยาบผิวหน้าตัดข้าง (Sidewall roughness) และความหยาบผิวขอบ (Edge roughness) โดยจะแตกต่างกันที่บริเวณที่ทำการวัดความหยาบผิวที่รูปที่ 4.8 และ เมื่อวัดค่าความหยาบผิวแล้วจะได้เป็นค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (mean roughness) เนื่องจากวัดค่าเป็นบริเวณที่สนใจ ซึ่งจะทำการเฉลี่ย 2 แบบ ทำให้ได้ ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (Average roughness) และ ค่าเฉลี่ยกำลังสองความหยาบผิว (Root Mean Square roughness, RMS roughness) ทำให้ได้ค่าความหยาบผิวทั้งสิ้น 4 ค่า ได้แก่ Average sidewall roughness, RMS sidewall roughness, Average edge roughness และ RMS edge roughness ได้ผลดังนี้

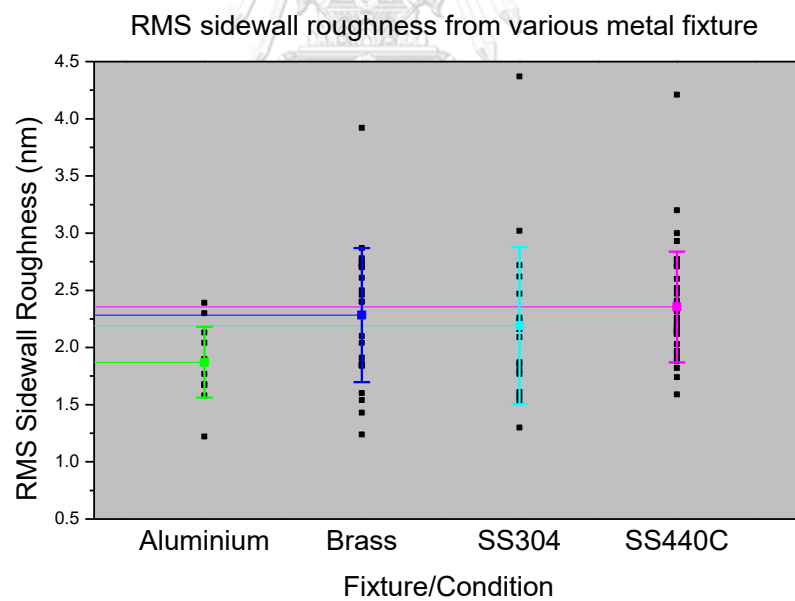


รูปที่ 4.11 แสดงบริเวณที่วัดความหยาบผิว ระหว่าง Edge roughness และ Sidewall roughness

จากผลการวัดค่า mean roughness แบบต่างๆ ค่า mean roughness ที่น้อยกว่าบ่งบอกถึงคุณภาพของชิ้นงานที่ดีกว่า สำหรับค่าเฉลี่ยของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางโลหะต่างๆ พบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายกัน สำหรับชิ้นงานที่ได้ค่าเฉลี่ยของ Average- sidewall roughness และ RMS sidewall roughness น้อยที่สุด ได้จากฐานวาง Aluminum ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.49 และ 1.87 นาโนเมตร ตามลำดับ และชิ้นงานที่ได้ค่าเฉลี่ยของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness มากที่สุด ได้จากฐานวางชิ้นงาน Stainless steel 440C ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.88 และ 2.35 นาโนเมตร ตามลำดับ



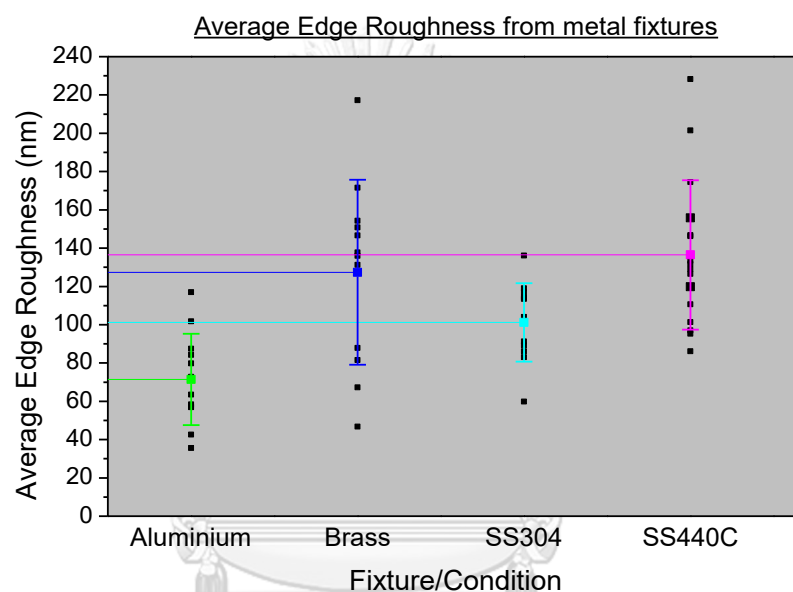
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบ Average sidewall roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางโลหะต่างๆ



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบ RMS sidewall roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางวัสดุโลหะต่างๆ

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Average sidewall roughness 49 และ RMS sidewall roughness

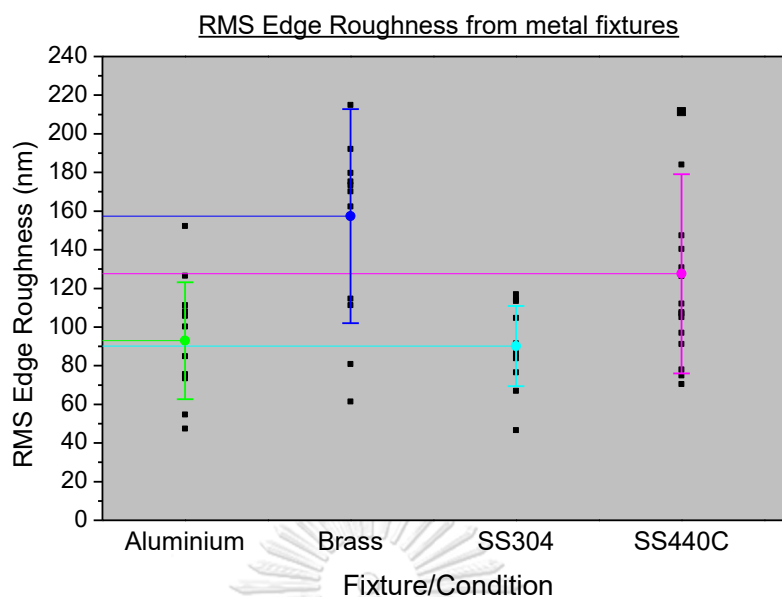
ชนิดวัสดุของฐานวางชิ้นงาน	Average sidewall roughness	SD	RMS sidewall roughness	SD
1. Aluminum	1.49	0.24	1.87	0.32
2. Brass	1.81	0.46	2.28	0.60
3. Stainless steel 304	1.72	0.54	2.19	0.71
4. Stainless steel 440C	1.88	0.37	2.35	0.49



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบ Average edge roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางวัสดุโลหะต่างๆ

สำหรับชิ้นงานที่ได้ค่าเฉลี่ยของ Average edge roughness น้อยที่สุด ได้จากฐานวาง Aluminum ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 71.42 นาโนเมตร ชิ้นงานที่ได้ค่าเฉลี่ยของ Average edge roughness มากที่สุด ได้จากฐานวางชิ้นงาน Stainless steel 440C ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 136.49

สำหรับชิ้นงานที่ได้ค่าเฉลี่ยของ RMS edge roughness น้อยที่สุด ได้จากฐานวางชิ้นงาน Stainless steel เกรด 304 ได้เท่ากับ 90.12 นาโนเมตร และชิ้นงานที่ได้จากฐานวาง Aluminum ซึ่งมีค่าน้อยใกล้เคียงกัน ได้ค่า 92.94 นาโนเมตร ส่วนชิ้นงานที่ได้ค่าเฉลี่ยของ RMS edge-roughness มากที่สุด ได้จากฐานวางชิ้นงาน Brass ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 157.74 นาโนเมตร และชิ้นงานที่ได้จากฐานวาง Stainless steel 440C ซึ่งมีค่าที่มากรองลงมา ได้ค่า 127.57 นาโนเมตร สามารถเปรียบเทียบได้จากกราฟในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบ RMS edge roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากชิ้นงานวัสดุโลหะต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบค่า roughness ทั้งหมดแล้วพบว่า มีแนวโน้มที่ชิ้นงานที่ได้จากฐานวาง Aluminium ได้ค่าเฉลี่ย mean roughness น้อยที่สุดในฐานวางโลหะ และชิ้นงานที่ได้จากฐานวาง Stainless steel 440C ได้ค่าเฉลี่ย mean roughness มากที่สุดในฐานวางโลหะ แต่ทั้งนี้ในส่วนของค่าเฉลี่ย RMS edge roughness ทั้งค่าที่น้อยที่สุดและมากที่สุด ได้จากฐานวางชิ้นงาน Stainless steel เกรด 304 และ Brass ตามลำดับ คาดว่าเป็นผลมาจากการเปลี่ยนชนิดโลหะของฐานวาง ชิ้นงานส่งผลกระทบต่อตัวแปรอื่นๆภายในกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง ทำให้ผลของค่าเฉลี่ย RMS edge roughness มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง แสดงได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Average edge roughness และ RMS edge roughness

ชนิดวัสดุของฐานวางชิ้นงาน	Average edge roughness	SD	RMS edge roughness	SD
1. Aluminum	71.42	23.85	92.94	30.22
2. Brass	127.39	48.27	157.38	55.40
3. Stainless steel 304	101.22	20.52	90.12	20.74
4. Stainless steel 440C	136.49	39.01	127.57	51.52

4.3 ผลการทดลองวัสดุผสมโพลิเมอร์สำหรับสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน และทดสอบใช้ทำฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

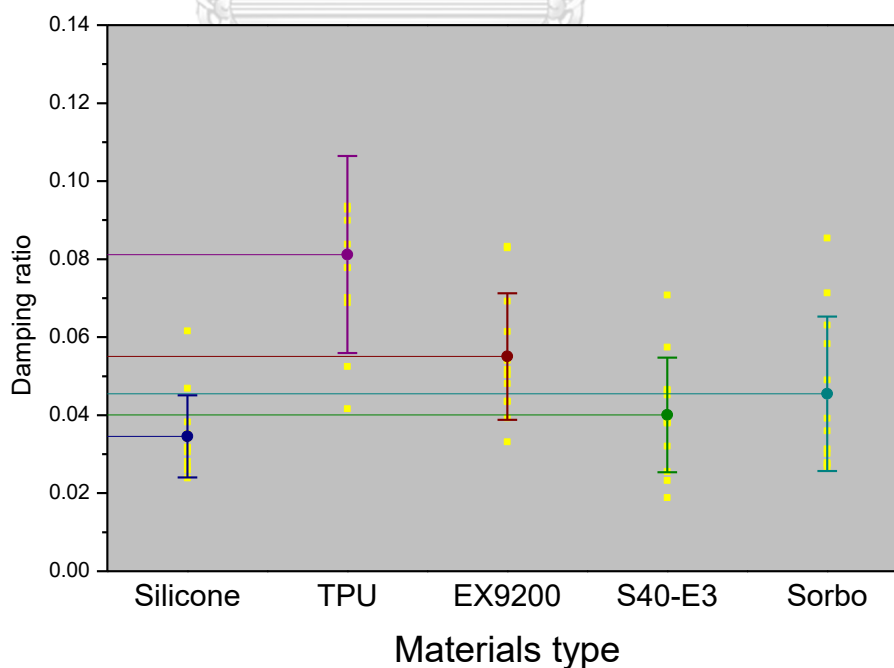
4.3.1 ทดลองวัสดุผสมโพลิเมอร์สำหรับสมบัติการหน่วงแรงสั่นสะเทือน

สำหรับชิ้นงานทดสอบการหน่วงแรงสั่นสะเทือนวัสดุโพลิเมอร์ จะแตกต่างจากชิ้นงานโลหะที่เป็นวัสดุโลหะเนื้อเดียวกัน ชิ้นงานทดสอบมีลักษณะของวัสดุผสมที่มีโลหะเป็นวัสดุเนื้อพื้น (metal matrix composite) และมีวัสดุเสริมเป็นโพลิเมอร์ เมื่อบันทึกค่าจากการทดลอง จึงคำนวณค่า Damping ratio และแยกพิจารณาช่วงความถี่ต่างๆ เช่นเดียวกับวัสดุโลหะ ในหัวข้อที่ 4.2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุเสริมโพลิเมอร์ที่การตอบสนองทุกช่วงความถี่

วัสดุ	Damping ratio	SD
1. Silicone	0.0296	0.0045
2. TPU	0.0802	0.0314
3. Vestamid® EX9200	0.0481	0.0110
4. Vestamid® S40-E3	0.0414	0.0162
5. Sorbothane®	0.0376	0.0146

All Frequency damping of various materials



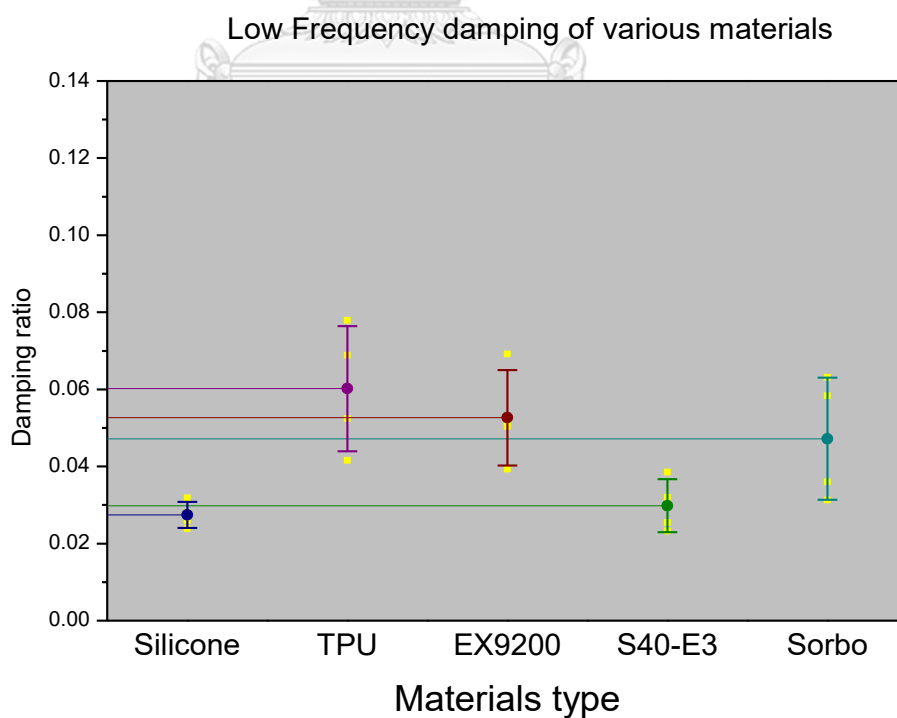
รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองทุกช่วงความถี่

เมื่อรวมผลของทุกช่วงความถี่ จะได้ผลดัง ตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.16 โดยที่วัสดุเสริมพอลิเมอร์ ที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยสูงที่สุด คือ TPU มีค่า 0.0812 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0252 และวัสดุเสริมพอลิเมอร์ ที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ Silicone มีค่า 0.0296 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0045

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุเสริมพอลิเมอร์ที่การตอบสนองความถี่ต่ำ

วัสดุ	Damping ratio	SD
1. Silicone	0.0274	0.0034
2. TPU	0.0602	0.0163
3. Vestamid® EX9200	0.0526	0.0124
4. Vestamid® S40-E3	0.0298	0.0069
5. Sorbothane®	0.0472	0.0159

ที่การตอบสนองย่านความถี่ต่ำ วัสดุเสริมพอลิเมอร์ ที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยสูงที่สุด คือ TPU มีค่า 0.0602 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0163 วัสดุเสริมพอลิเมอร์ ที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ Silicone มีค่า 0.0274 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0034

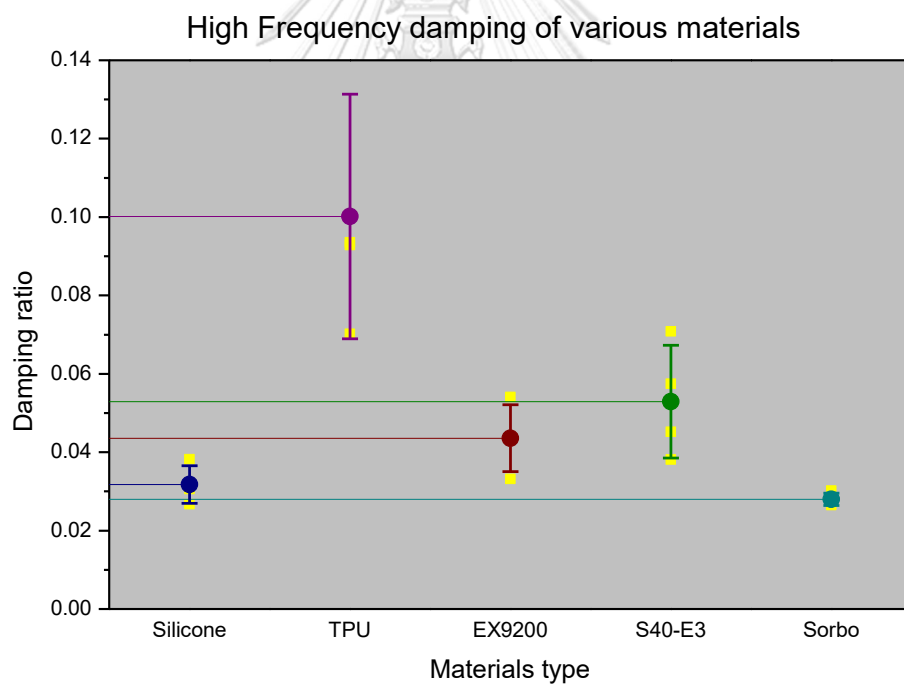


รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่ต่ำ

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า Damping ratio ของวัสดุเสริมพอลิเมอร์ที่การตอบสนองความถี่สูง

วัสดุ	Damping ratio	SD
1. Silicone	0.0318	0.0048
2. TPU	0.1001	0.0312
3. Vestamid® EX9200	0.0436	0.0085
4. Vestamid® S40-E3	0.0529	0.0144
5. Sorbothane®	0.0280	0.0016

ที่การตอบสนองย่านความถี่สูงวัสดุเสริมพอลิเมอร์ ที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยสูงที่สุด คือ TPU มีค่า 0.1001 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0312 วัสดุเสริมพอลิเมอร์ ที่มีค่า Damping ratio เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ Sorbothane® มีค่า 0.0280 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0016



รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบ Damping ratio ระหว่างวัสดุโลหะที่การตอบสนองความถี่สูง

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าเฉลี่ย Damping ratio ของวัสดุที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

	Materials	Damping ratio	SD
วัสดุกลุ่มโลหะ	1. Aluminum	0.0345	0.0069
	2. Brass (Wrought)	0.0392	0.0121
	3. Brass annealed	0.0283	0.0046
	4. Copper	0.0246	0.0064
	5. Stainless steel 304	0.0398	0.0084
	6. Stainless steel 440C	-	-
วัสดุผสมพอลิเมอร์	7. Silicone	0.0296	0.0045
	8. TPU	0.0802	0.0314
	9. Vestamid®EX9200	0.0481	0.0110
	10. Vestamid®S40-E3	0.0414	0.0162
	11. Sorbothane®	0.0376	0.0146

เมื่อนำค่า damping ratio ของวัสดุที่ทำการทดสอบทั้งหมดมาพิจารณา โดยรวมการตอบสนองทุกความถี่ พบว่ากลุ่มวัสดุผสมพอลิเมอร์ มีแนวโน้มของค่า damping ratio สูงกว่า วัสดุในกลุ่มโลหะ เนื่องจากชิ้นงานวัสดุผสมพอลิเมอร์มีวัสดุสองชนิดรวมอยู่ด้วยกันระหว่างโลหะ (Stainless steel 304) และพอลิเมอร์ จึงมีช่วงรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดที่เป็นเสมือนจุดบกพร่องในวัสดุเนื้อเดียวที่มีผลให้เกิดการหน่วงแรงสั่นสะเทือนมากขึ้น [4] โดยที่วัสดุที่มีค่าเฉลี่ยของ damping ratio สูงที่สุด 5 ลำดับแรก คือ วัสดุผสมพอลิเมอร์ TPU, วัสดุผสมพอลิเมอร์ Vestamid®EX9200, วัสดุผสมพอลิเมอร์ Sorbothane®, วัสดุผสมพอลิเมอร์ Vestamid®S40-E3 และ วัสดุโลหะเนื้อเดียว Stainless steel 304 ตามลำดับ

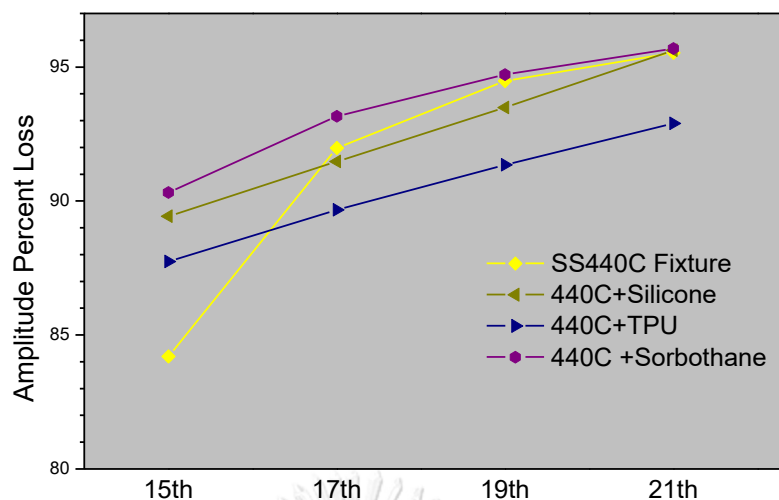
4.3.2 ทดสอบใช้วัสดุเสริมพอลิเมอร์ในฐานวางชิ้นงานกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูง

ในการทดลองใช้งานจริง ได้นำวัสดุเสริมพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Silicone TPU และ Sorbothane® เข้าไปเสริมในส่วนช่องว่างของฐานวางชิ้นงานโลหะ Stainless steel 440C แต่ในส่วนของพอลิเมอร์ Vestamid® EX9200 และ Vestamid® S40-E3 ไม่ได้เลือกใช้เป็นวัสดุเสริม เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่แข็งและไม่สามารถกลึงขึ้นรูปให้พอดีกับช่องว่างของฐานวางได้

นำค่าการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้ มาประมวลผลในรูปกราฟ Time domain จึงหาค่า APL ดังในหัวข้อ 4.2.2 หากค่า APL มีค่าสูง แรงสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านมาตำแหน่งที่ติดตั้งเซอร์ยิ่งลดลง มากจึงได้ผลดังตารางที่ 4.11 ซึ่งได้นำฐานวาง Stainless steel 440C มาเปรียบเทียบกับกัน พบว่าค่าเฉลี่ยของ APL ที่เกิดการขัดสีในชิ้นงานที่ 13 เปรียบเทียบกับตำแหน่งชิ้นงานที่ 15 ฐานวางชิ้นงานที่เสริมด้วย Sorbothane® มีค่าเฉลี่ยของ APL สูงที่สุดที่ 90.32 และ ฐานวางที่ไม่ได้เสริมด้วยวัสดุพอลิเมอร์ จะมีค่าเฉลี่ยของ APL น้อยที่สุดเท่ากับ 84.20 และเมื่อเปรียบเทียบค่า APL ขณะขัดสีผ่านตำแหน่งชิ้นงานที่ 17, ตำแหน่งชิ้นงานที่ 19 และ ตำแหน่งชิ้นงานที่ 21 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ ยกเว้นฐานวางชิ้นงานที่เสริมTPU ที่อาจจะมียค่าเฉลี่ย APL ต่ำกว่าเล็กน้อย

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ย Amplitude percent loss ที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุเสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน และ Stainless steel 440C

ชนิดวัสดุของฐานวาง ชิ้นงาน	Amplitude percent loss เทียบต่อตำแหน่งชิ้นงานที่ 13			
	ชิ้นงานที่ 15	ชิ้นงานที่ 17	ชิ้นงานที่ 19	ชิ้นงานที่ 21
1. Stainless steel 440C	84.20	91.98	94.48	95.53
2. Silicone	89.43	91.47	93.48	95.62
3. TPU	87.74	89.67	91.35	92.90
4. Sorbothane®	90.32	93.16	94.72	95.69



Calculation the 13th vs

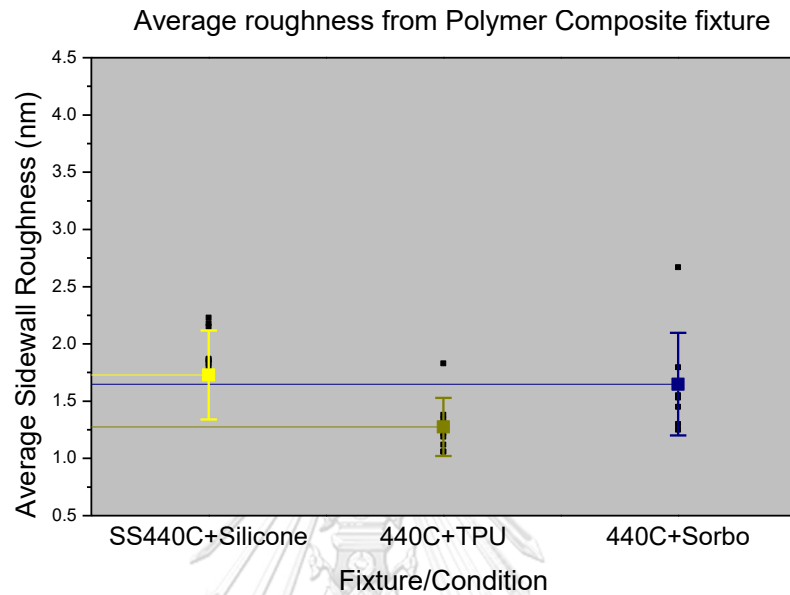
รูปที่ 4.19 แสดงผลของกราฟ Percent Loss ต่อตำแหน่งเปรียบเทียบที่ห่างจากตำแหน่งติดตั้ง เซนเซอร์ accelerometer ของฐานวางวางเสริมวัสดุพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness จากฐานวางเสริมวัสดุพอลิเมอร์ และ Stainless steel 440C

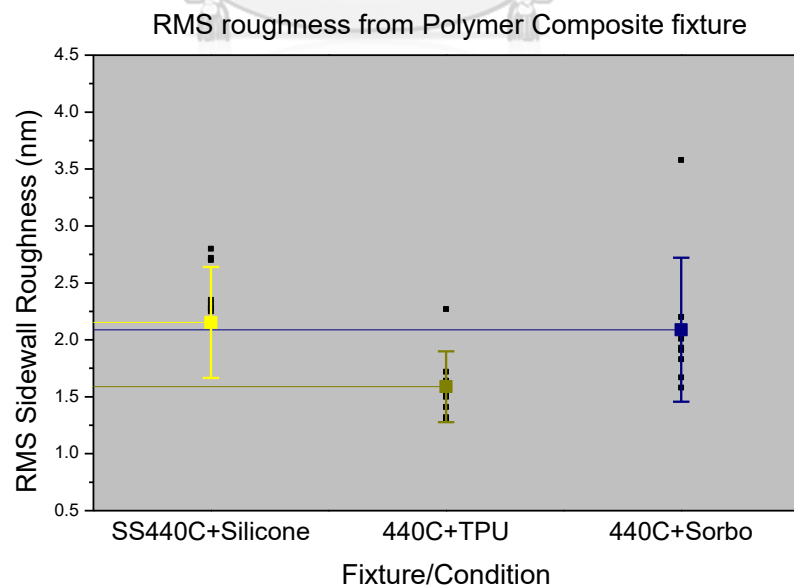
ชนิดวัสดุของฐานวางชิ้นงาน	Average sidewall roughness (nm)	SD	RMS sidewall roughness (nm)	SD
1. Stainless steel 440C	1.88	0.37	2.35	0.49
2. Stainless steel 440C เสริม Silicone	1.73	0.39	2.15	0.49
3. Stainless steel 440C เสริม TPU	1.28	0.25	1.59	0.31
4. Stainless steel 440C เสริม Sorbothane®	1.65	0.45	2.09	0.63

จากผลการวัดค่า mean roughness แบบต่างๆ ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางเสริมวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยที่ค่า mean roughness ที่น้อยกว่าบ่งบอกถึงคุณภาพของชิ้นงานที่ดีกว่า สำหรับค่าเฉลี่ยของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness ที่น้อยที่สุด เป็นชิ้นงานที่ได้จากฐานวางฐานวางเสริมวัสดุ TPU ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.28 และ 1.59 นาโนเมตร ตามลำดับ

และชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยของ Average sidewall roughness และค่าเฉลี่ยของ RMS sidewall roughness มากที่สุด ได้จากฐานวางชิ้นงาน Stainless steel 440C ที่ไม่มีการเสริมวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.88 และ 2.35 นาโนเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบ Average sidewall roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุเสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

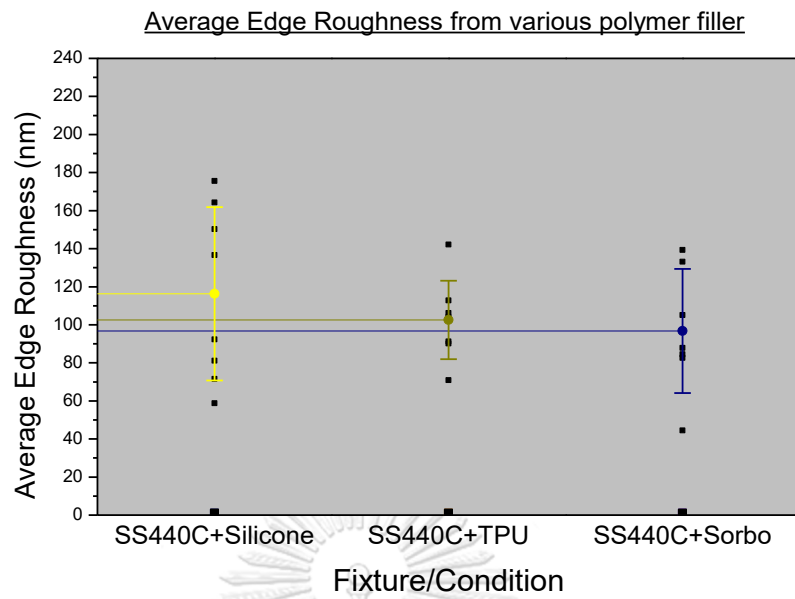


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบ RMS sidewall roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุเสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

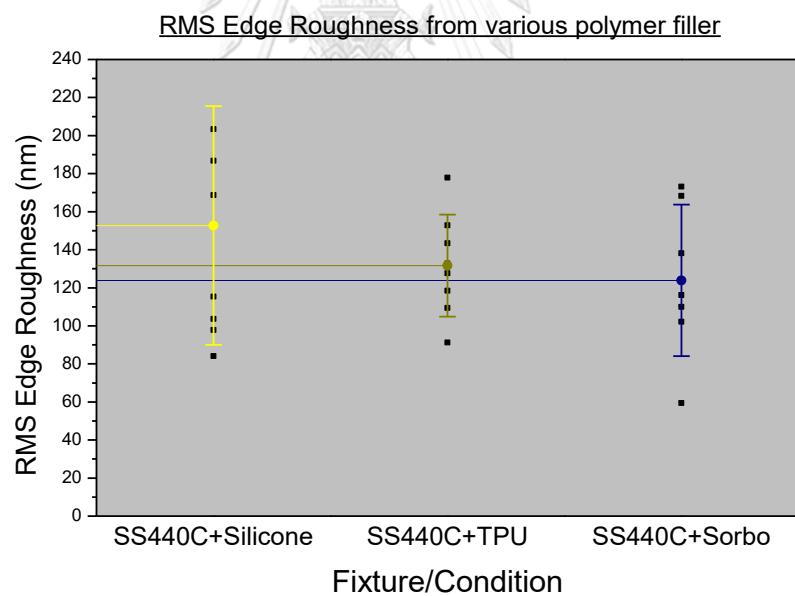
ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Average sidewall roughness และ RMS edge roughness จากฐานวางเสริมวัสดุพอลิเมอร์ และ Stainless steel 440C

ชนิดวัสดุของฐานวางชิ้นงาน	Average edge roughness (nm)	SD	RMS edge roughness (nm)	SD
1. Stainless steel 440C	136.49	39.01	127.57	51.52
2. Stainless steel 440C เสริม Silicone	116.28	45.53	152.74	62.67
3. Stainless steel 440C เสริม TPU	102.58	20.60	131.70	26.83
4. Stainless steel 440C เสริม Sorbothane®	96.72	32.60	123.89	39.78

เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของ Average edge roughness ชิ้นงานจากฐานวางที่เสริมด้วย Sorbothane® ให้ค่าน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 96.72 นาโนเมตร และ ชิ้นงานที่มาจากฐานวาง Stainless steel 440C ที่ไม่มีการเสริมวัสดุพอลิเมอร์ มีค่าเฉลี่ยที่ 136.49 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในการเปรียบเทียบนี้ แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของ RMS edge roughness พบว่า ชิ้นงานจากฐานวางที่เสริมด้วย Silicone มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด เท่ากับ 152.74 นาโนเมตร และ ค่าเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด คือ ชิ้นงานที่ได้จากฐานวางเสริมด้วย Sorbothane® มีค่าเท่ากับ 123.89 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ชิ้นงานจากฐานวาง Stainless steel 440C ที่ไม่มีการเสริมวัสดุพอลิเมอร์ เท่ากับ 127.57 นาโนเมตร



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบ Average edge roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุเสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน



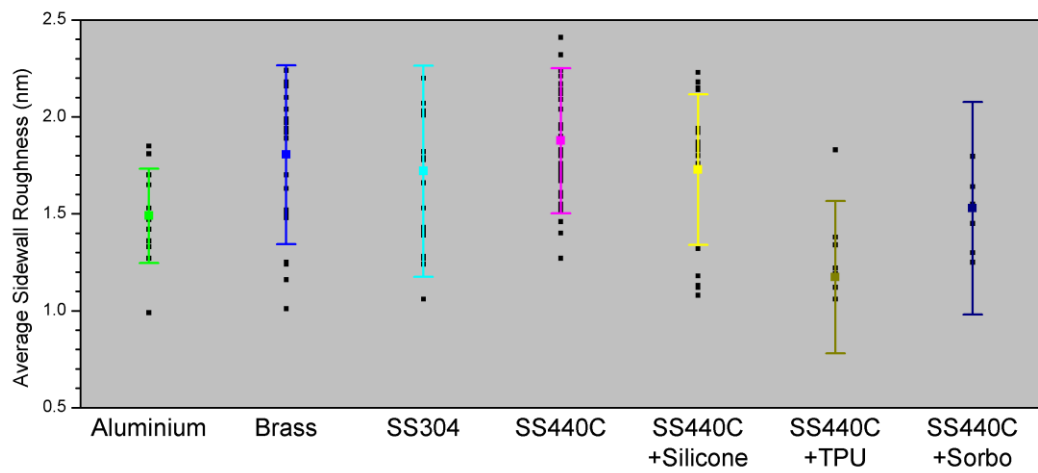
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบ RMS edge roughness ระหว่างชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานที่ใช้วัสดุเสริมพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าเฉลี่ย sidewall roughness จากฐานวางชิ้นงานทั้งหมดในการทดลอง

ชนิดวัสดุของฐานวางชิ้นงาน	Average sidewall roughness (nm)	SD	RMS sidewall roughness (nm)	SD
1. Aluminum	1.49	0.24	1.87	0.32
2. Brass	1.81	0.46	2.28	0.60
3. Stainless steel 304	1.72	0.54	2.19	0.71
4. Stainless steel 440C	1.88	0.37	2.35	0.49
5. Stainless steel 440C เสริม Silicone	1.73	0.39	2.15	0.49
6. Stainless steel 440C เสริม TPU	1.28	0.25	1.59	0.31
7. Stainless steel 440C เสริม Sorbothane®	1.65	0.45	2.09	0.63

เมื่อพิจารณาผลความหยาบผิวของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางทั้งหมดที่ทำการทดลอง ซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 4.15 พบว่าชิ้นงานที่ได้จากฐานวางเสริมวัสดุ TPU ให้ผลค่าเฉลี่ยของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.28 และ 1.59 นาโนเมตรตามลำดับ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ได้จากฐานรองที่เสริมวัสดุพอลิเมอร์มีแนวโน้มได้ผลของค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ต่ำกว่าฐานรองที่ทำจากวัสดุโลหะทั้งหมด ยกเว้นแต่เพียงฐานรอง Aluminum ซึ่งเมื่อประกอบกับผลจากค่า damping ratio ที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 4.11 ก็พบว่ากลุ่มวัสดุผสมพอลิเมอร์มีแนวโน้มของค่า damping ratio ที่สูงกว่ากลุ่มวัสดุโลหะ จึงอาจบอกได้ว่ากลไกการหน่วงแรงสั่นสะเทือนโดยอาศัยช่วงรอยต่อระหว่างโลหะและพอลิเมอร์ในฐานวางชิ้นงานมีผลในการลดค่าเฉลี่ย Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness

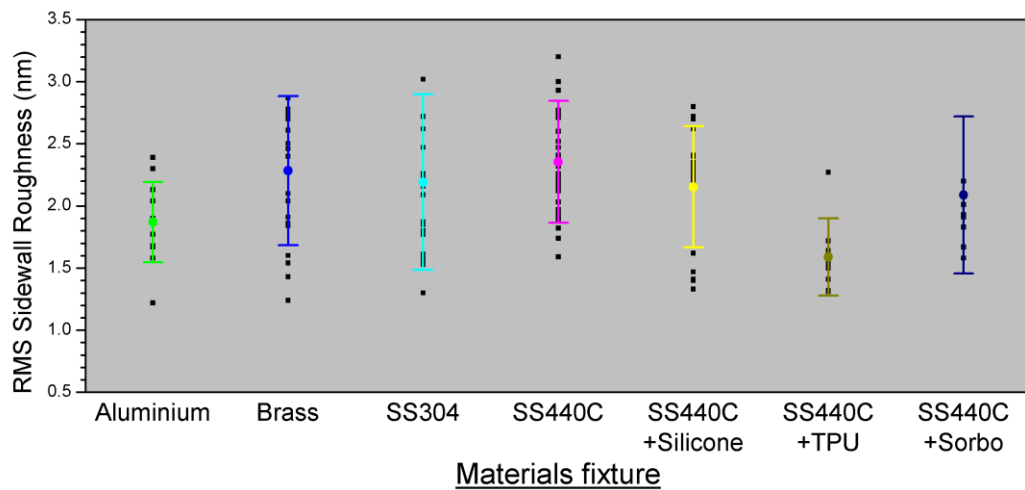
Average sidewall roughness from various fixture



Materials fixture

รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่า Average sidewall roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานต่างๆ

RMS sidewall roughness from various fixture



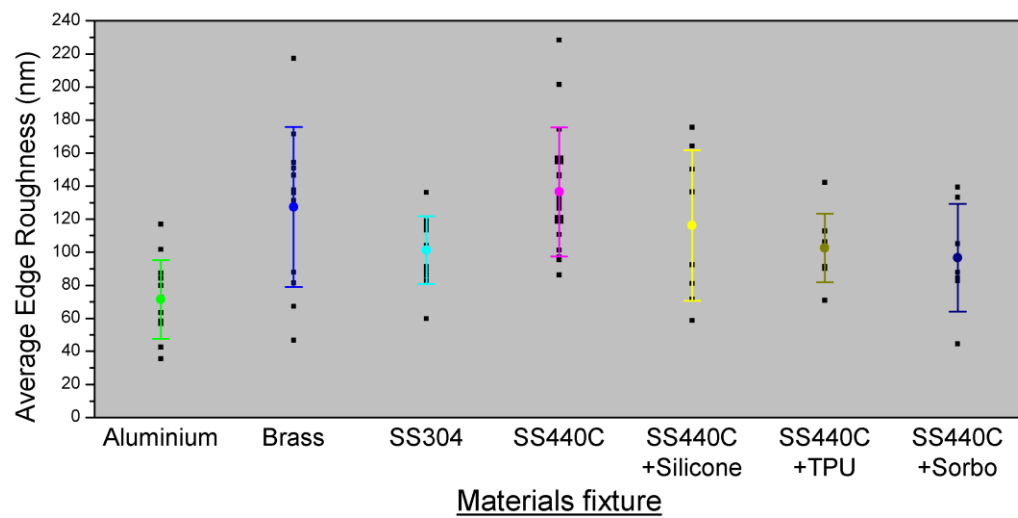
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่า RMS sidewall roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานต่างๆ

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าเฉลี่ย edge roughness จากฐานวางชิ้นงานทั้งหมดในการทดลอง

ชนิดวัสดุของฐานวางชิ้นงาน	Average edge roughness (nm)	SD	RMS edge roughness (nm)	SD
1. Aluminum	71.42	23.85	92.94	30.22
2. Brass	127.39	48.27	157.38	55.40
3. Stainless steel 304	101.22	20.52	90.12	20.74
4. Stainless steel 440C	136.49	39.01	127.57	51.52
5. Stainless steel 440C เสริม Silicone	116.28	45.53	152.74	62.67
6. Stainless steel 440C เสริม TPU	102.58	20.60	131.70	26.83
7. Stainless steel 440C เสริม Sorbothane®	96.72	32.60	123.89	39.78

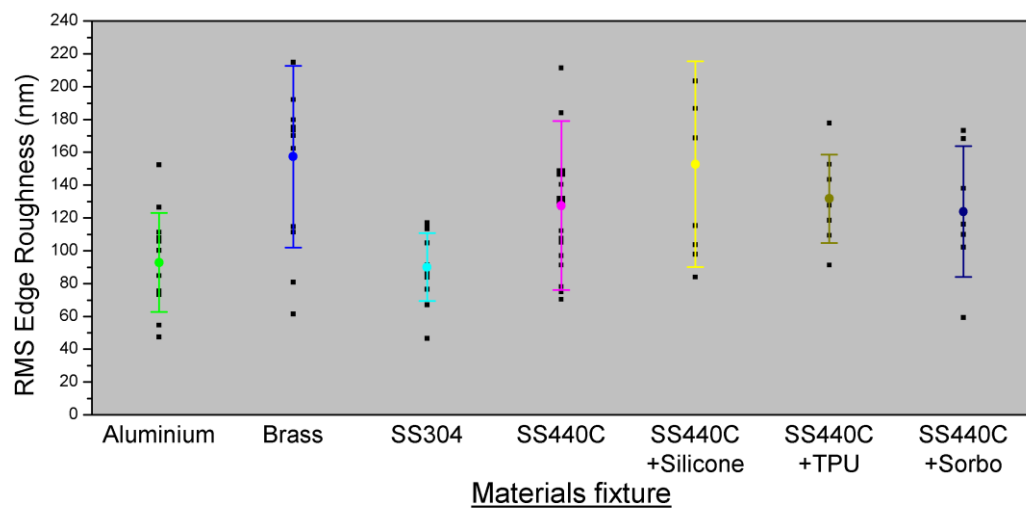
เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness ดังตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยของ Average edge roughness ที่ต่ำที่สุด พบในกลุ่มชิ้นงานที่ได้จากฐานวาง Aluminum ซึ่งมีค่า 71.42 นาโนเมตร และ ค่าเฉลี่ยของ RMS edge roughness ที่ต่ำที่สุดพบในกลุ่มชิ้นงานที่ได้จากฐานวาง Stainless steel 440C มีค่าเท่ากับ 127.57 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่า Damping ratio ของวัสดุดังตารางที่ 4.11 ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนต่อค่า Damping ratio เนื่องจากกลไกในการแตกหักบริเวณขอบของชิ้นงาน ALTiC ที่เป็นเซรามิกนั้นมีความซับซ้อนและการศึกษาในปัจจุบันยังไม่สามารถอธิบายกลไกดังกล่าวได้อย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุ ALTiC นี้ต่อไปเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความหนาเบียดดังกล่าว

Average Edge Roughness from various fixture



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่า Average edge roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานต่างๆ

RMS Edge Roughness from various fixture



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่า RMS edge roughness ของชิ้นงานที่ได้จากฐานวางชิ้นงานต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองการหน่วงแรงสั่นสะเทือนในวัสดุโลหะ โดยหาค่า damping ratio พบว่า
 - ที่การตอบสนองความถี่ต่ำ วัสดุโลหะที่มีค่า damping ratio สูงที่สุด คือ Brass Wrought และ ค่า damping ratio ต่ำที่สุด คือ Brass annealed
 - ที่การตอบสนองความถี่สูง วัสดุโลหะที่มีค่า damping ratio สูงที่สุด คือ Stainless steel เกรด 304 และ ค่า damping ratio ต่ำที่สุด คือ Copper
 - เมื่อรวมทุกช่วงความถี่ วัสดุโลหะที่มีค่า damping ratio สูงที่สุด คือ Stainless steel 304 และ ค่า damping ratio ต่ำที่สุด คือ Copper
 - เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย grain size ต่อค่า damping ratio ในวัสดุต่างชนิดกัน ไม่พบแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบในวัสดุเดียวกันระหว่าง Brass Wrought และ Brass annealed พบว่าค่า damping ratio มีค่าลดลง เมื่อค่าเฉลี่ย grain size เพิ่มขึ้น เป็นผลของกรรมวิธีทางความร้อนลดจุดบกพร่องในชิ้นงานโลหะซึ่งส่งผลต่อการหน่วง และมีผลในการลดค่า damping ratio
 - เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ได้แก่ ความแข็งวัสดุ ความหนาแน่น และ Elastic modulus ไม่พบแนวโน้มต่อค่า damping ratio
2. จากผลการทดลองการหน่วงแรงสั่นสะเทือนในวัสดุผสมระหว่าง Stainless steel 304 และ พอลิเมอร์ต่างๆ ได้แก่ Silicone rubber, TPU, Vestamid® EX9200, Vestamid® E40-S3 และ Sorbothane® โดยหาค่า damping ratio พบว่า
 - ที่การตอบสนองความถี่ต่ำ วัสดุผสมพอลิเมอร์ที่มีค่า damping ratio สูงที่สุด คือ TPU และ ค่าต่ำที่สุด คือ Silicone
 - ที่การตอบสนองความถี่สูง วัสดุผสมพอลิเมอร์ที่มีค่า damping ratio สูงที่สุด คือ TPU และ ค่าต่ำที่สุด คือ Sorbothane®
 - เมื่อรวมทุกช่วงความถี่ วัสดุผสมพอลิเมอร์ที่มีค่า damping ratio สูงที่สุด คือ TPU และ ค่าต่ำที่สุด คือ Silicone
3. เมื่อพิจารณาค่า damping ratio ของวัสดุที่ทำการทดสอบทั้งหมดมาพิจารณา โดยรวมการตอบสนองทุกความถี่ พบว่ากลุ่มวัสดุผสมพอลิเมอร์ มีแนวโน้มของค่า damping ratio สูงกว่า

วัสดุในกลุ่มโลหะ เนื่องจากกลไกการหน่วงแรงในช่วงรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดที่เป็นเสมือนจุดบกพร่องในวัสดุเนื้อเดียวมีผลให้เกิดการหน่วงแรงสั่นสะเทือนมากขึ้น [4] โดยที่วัสดุที่มีค่าเฉลี่ยของ damping ratio สูงที่สุด 5 ลำดับแรก คือ วัสดุผสมพอลิเมอร์ TPU, วัสดุผสมพอลิเมอร์ Vestamid® EX9200, วัสดุผสมพอลิเมอร์ Sorbothane®, วัสดุผสมพอลิเมอร์ Vestamid® S40-E3 และ วัสดุโลหะเนื้อเดียว Stainless steel 304

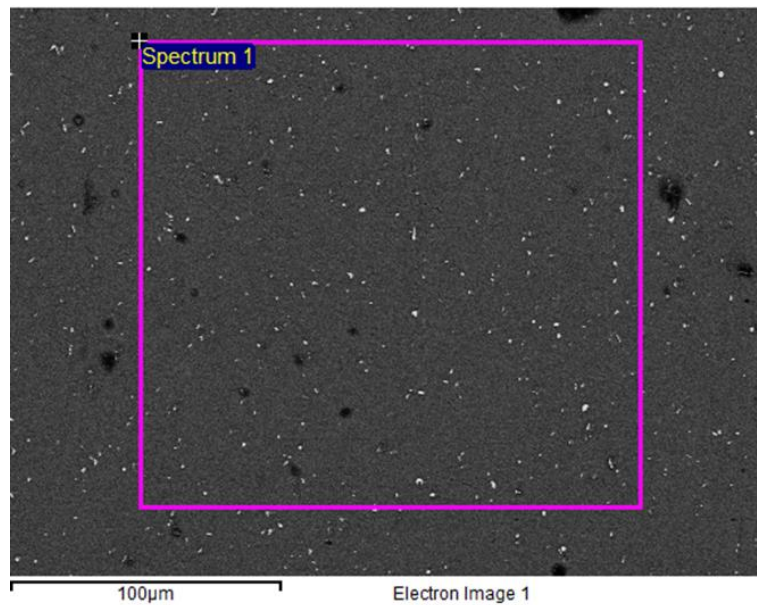
4. เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของ Average sidewall roughness , RMS sidewall roughness พบว่าชิ้นงานที่ได้จากฐานรองที่เสริมวัสดุพอลิเมอร์มีแนวโน้มได้ผลของค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ต่ำกว่าฐานรองที่ทำจากวัสดุโลหะ ซึ่งสอดคล้องกับ ผลของค่า Damping ratio ที่สูงขึ้นจะมีค่าเฉลี่ยของ Average sidewall roughness และ RMS sidewall roughness ที่ต่ำลง เนื่องจากการหน่วงแรงสั่นสะเทือนโดยอาศัยช่วงรอยต่อระหว่างโลหะและพอลิเมอร์ในฐานวางชิ้นงาน
5. เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของ Average edge roughness และ RMS edge roughness พบว่าไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนต่อค่า Damping ratio เนื่องจากกลไกในการแตกหักบริเวณขอบของชิ้นงาน ALTiC ที่เป็นเซรามิกนั้นมีความซับซ้อนและการศึกษาในปัจจุบันยังไม่สามารถอธิบายกลไกดังกล่าวได้อย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุ ALTiC นี้ต่อไปเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความหยาบผิวดังกล่าว

บรรณานุกรม

- [1] S. S. Rao, *Mechanical vibrations*: Addison-Wesley Longman, Incorporated, 1986.
- [2] J. Zhang, R. J. Perez, and E. J. Lavernia, "Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials," *Journal of Materials Science*, vol. 28, pp. 2395-2404, 1993.
- [3] T. Irvine. (2005, 5/7). *THE HALF POWER BANDWIDTH METHOD FOR DAMPING CALCULATION*.
Available: www.vibrationdata.com/tutorials2/half_power_bandwidth.pdf
- [4] M. S. Blanter, I. S. Golovin, H. Neuhäuser, and H. R. Sinning, *Internal Friction in Metallic Materials: A Handbook*: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [5] S. D. Chachawarn Kimhay, "Measuring of Vibration Damping Properties of Materials," Bachelor, Department of Metallurgical Engineering, Chulalongkorn University, 2014.
- [6] V. Arumuga prabu, M. Uthayakumar, V. Manikandan, N. Rajini, and P. Jeyaraj, "Influence of redmud on the mechanical, damping and chemical resistance properties of banana/polyester hybrid composites," *Materials & Design*, vol. 64, pp. 270-279, 2014.
- [7] V. Anes, Y. E. Lage, M. Vieira, N. M. M. Maia, M. Freitas, and L. Reis, "Torsional and axial damping properties of the AZ31B-F magnesium alloy," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 79, pp. 112-122, 2016.
- [8] K. S. Lee, J.-I. Choi, S.-K. Kim, B.-K. Lee, J.-S. Hwang, and B. Y. Lee, "Damping and mechanical properties of composite composed of polyurethane matrix and preplaced aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 145, pp. 68-75, 2017.
- [9] *ASTM E756-05(2017), Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [10] *ASM Handbook, Heat Treating* vol. 4: ASM International, 1991.

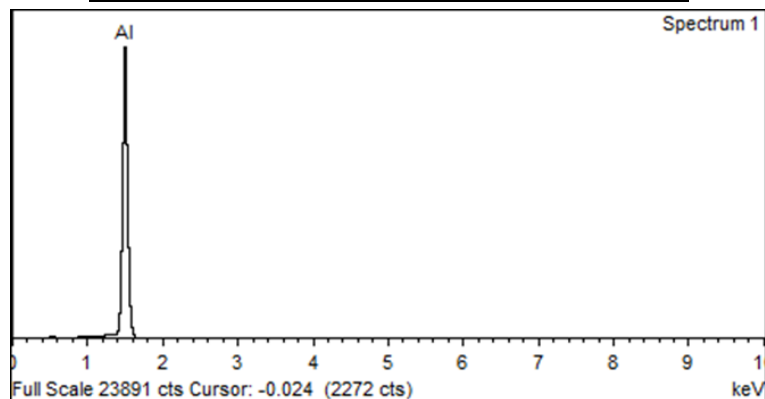
การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานตั้งต้น

ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานตั้งต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

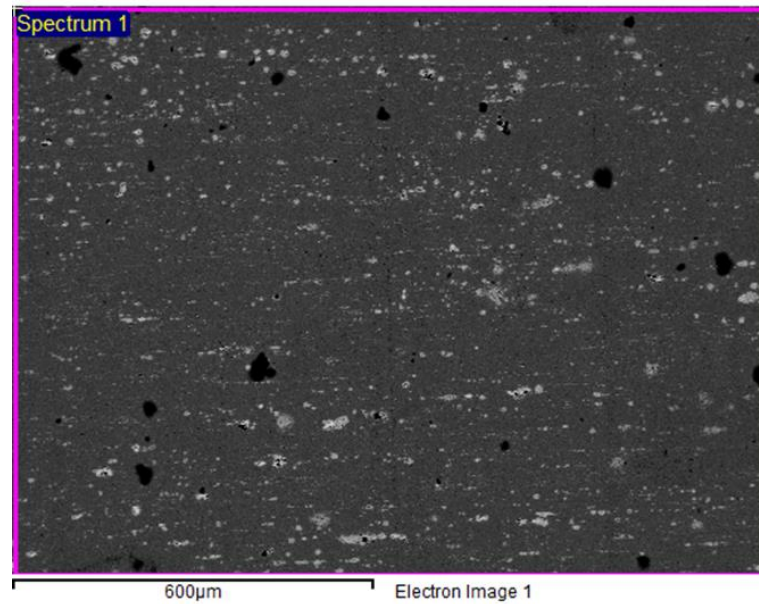


รูปที่ ก- 1 แสดงภาพจาก SEM และพื้นที่ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะ Aluminum

Element	Weight%	Atomic%
Al K	100.00	100.00
Totals	100.00	

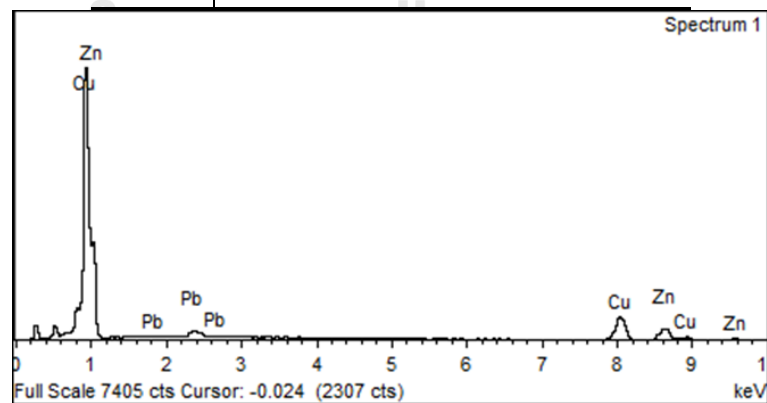


รูปที่ ก- 2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะ Aluminum

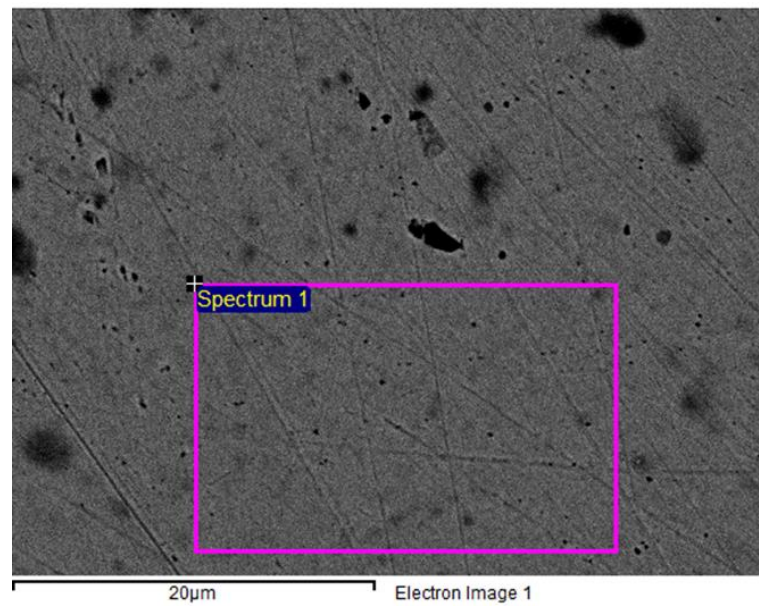


รูปที่ ก- 3 แสดงภาพจาก SEM และพื้นที่ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะ Brass

Element	Weight%	Atomic%
Cu K	56.39	58.74
Zn K	39.42	39.92
Pb M	4.20	1.34
Totals	100.00	

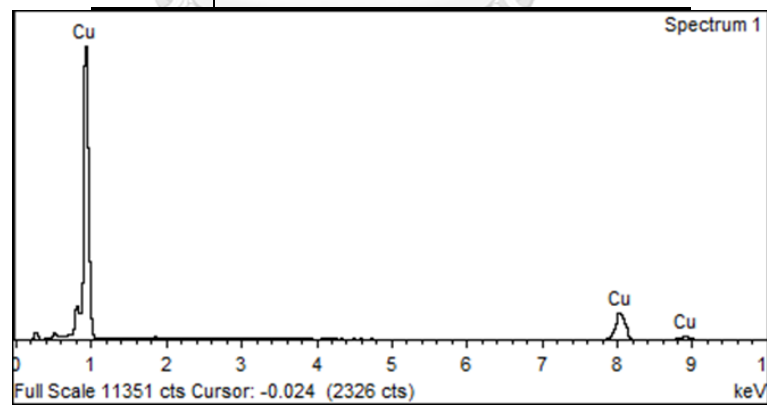


รูปที่ ก- 4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะ Brass

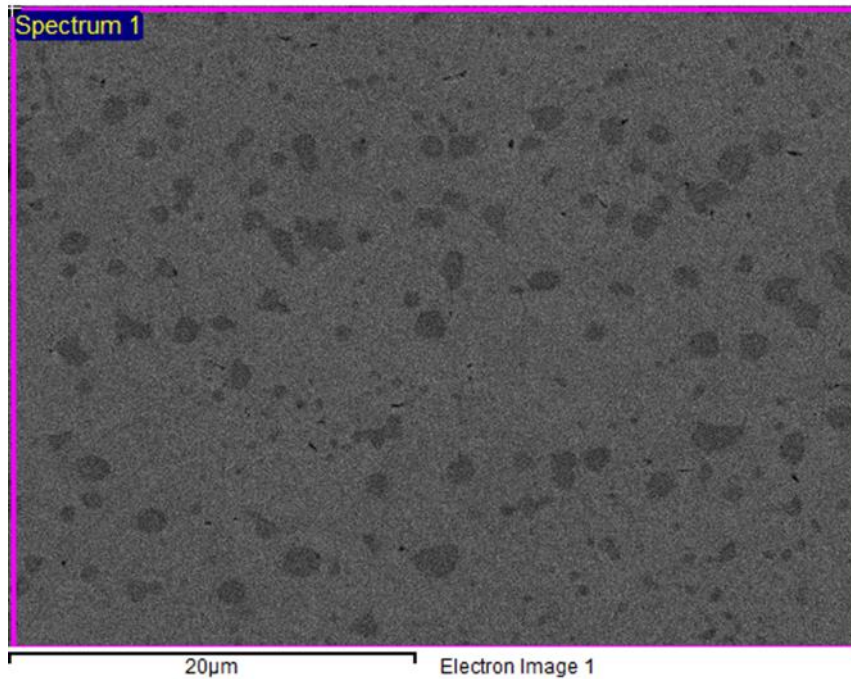


รูปที่ ก- 5 แสดงภาพจาก SEM และพื้นที่ที่ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะ Copper

Element	Weight%	Atomic%
Cu K	100.00	100.00
Totals	100.00	

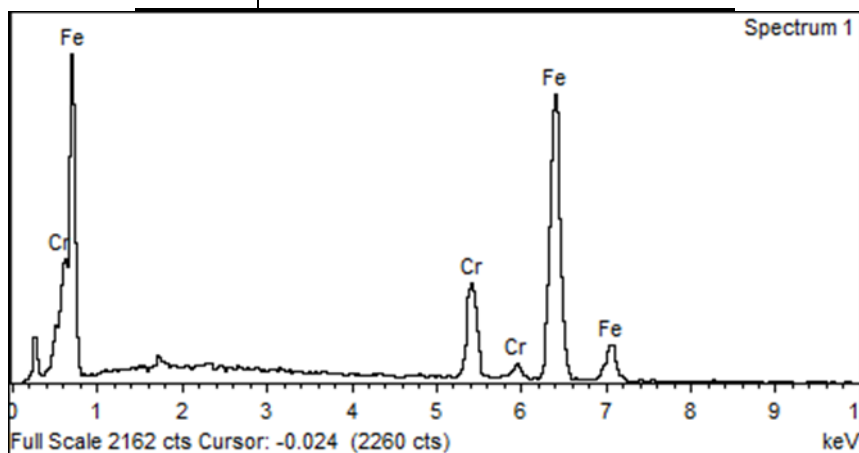


รูปที่ ก- 6 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะ Copper



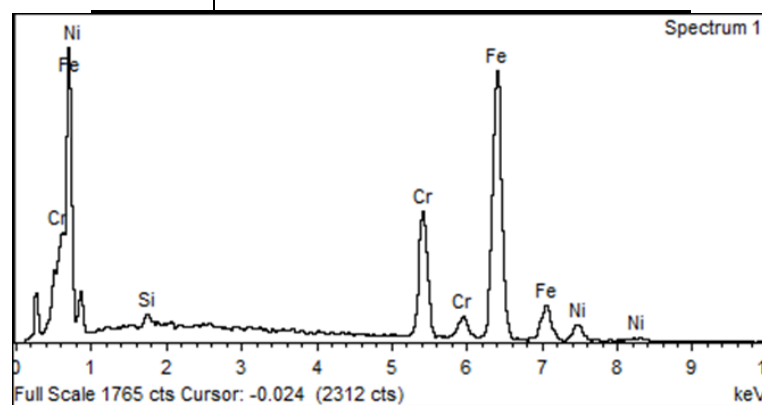
รูปที่ ก- 7 แสดงภาพจาก SEM และพื้นที่ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของ
Stainless steel เกรด 440C

Element	Weight%	Atomic%
Cr K	15.87	16.84
Fe K	84.13	83.16
Totals	100.00	



รูปที่ ก- 8 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะ Stainless steel เกรด 440C

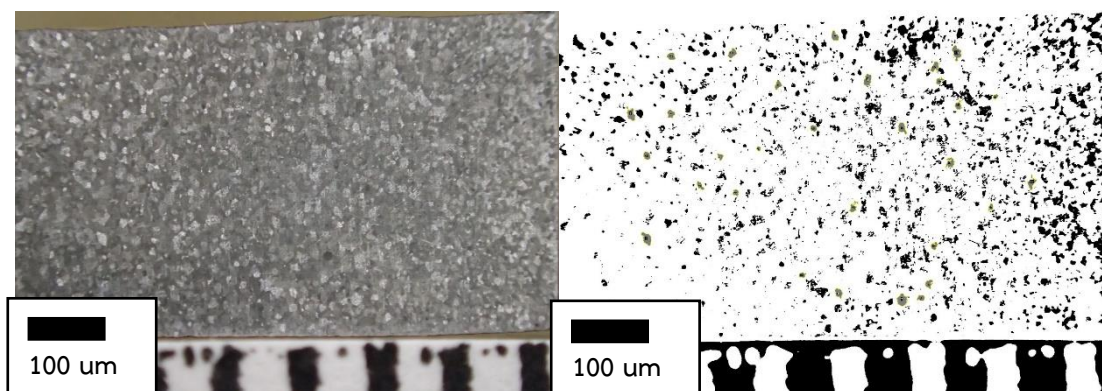
Element	Weight%	Atomic%
Si K	0.52	1.02
Cr K	18.95	20.05
Fe K	72.38	71.29
Ni K	8.15	7.64
Totals	100.00	



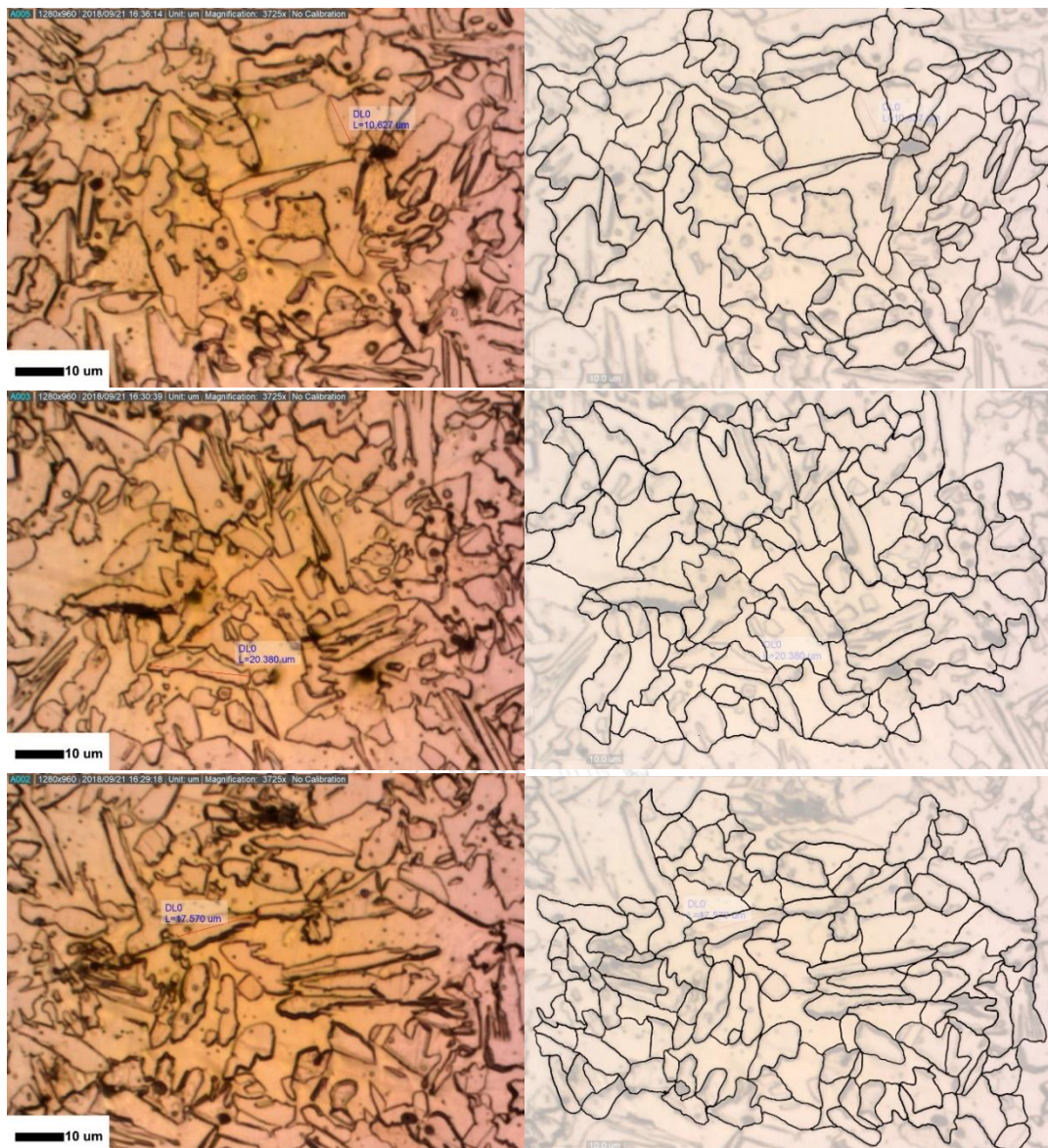
รูปที่ ก- 9 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะ Stainless steel เกรด 304

ภาพโครงสร้างจุลภาคของวัสดุโลหะที่ใช้ในการทดลอง

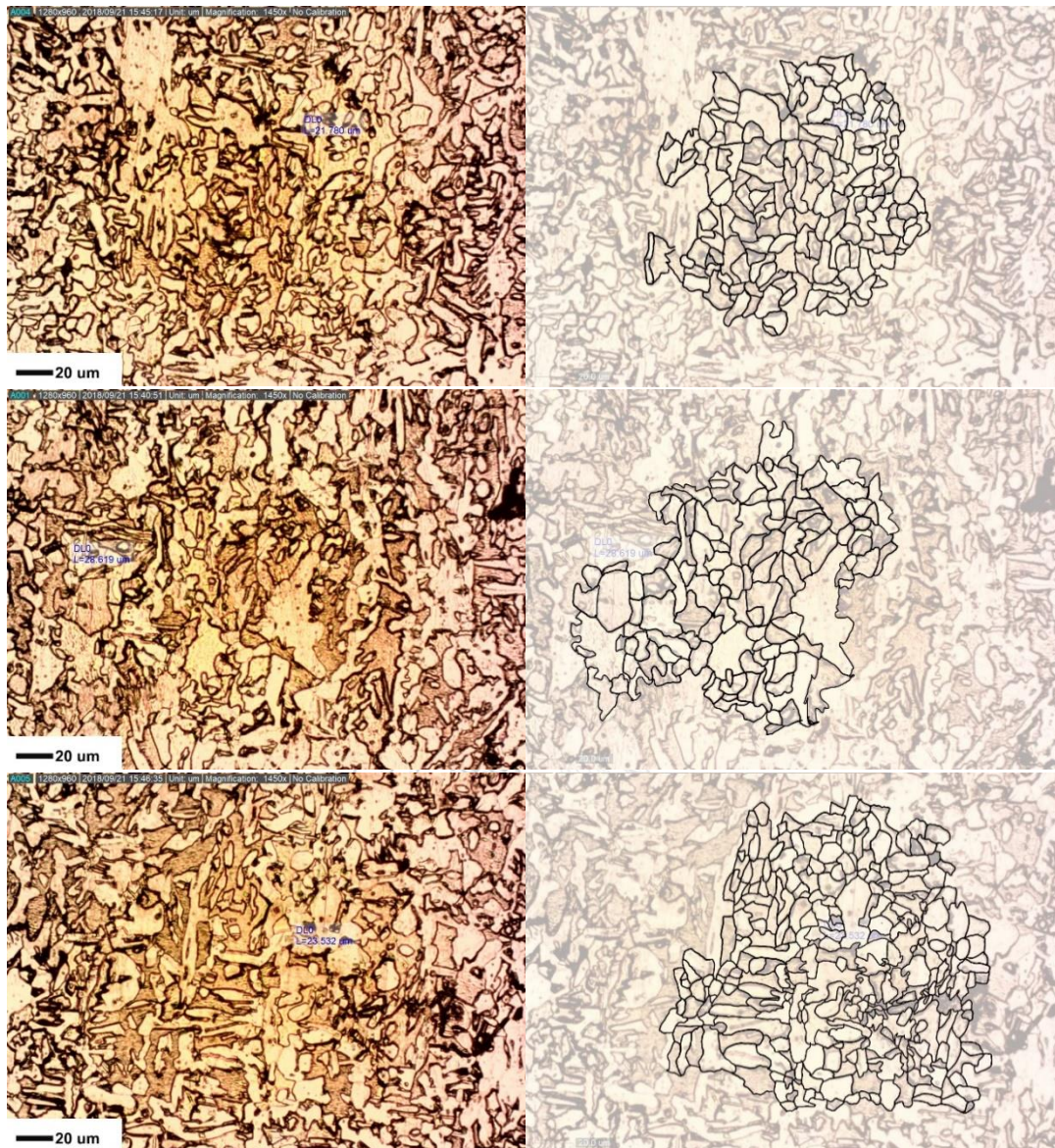
ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุโลหะที่แสดงทั้งหมด ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กับอุปกรณ์ Dino-Lite® ยกเว้นภาพโครงสร้างจุลภาคของ Aluminum ที่ได้จากกล้องถ่ายภาพมาโคร จากนั้นนำภาพถ่ายที่ได้มาหาขอบเกรนแล้วจึงใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ จึงได้ค่าพื้นที่เกรนจำนวนมากจากภาพถ่าย แล้วนำค่าพื้นที่นั้นมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



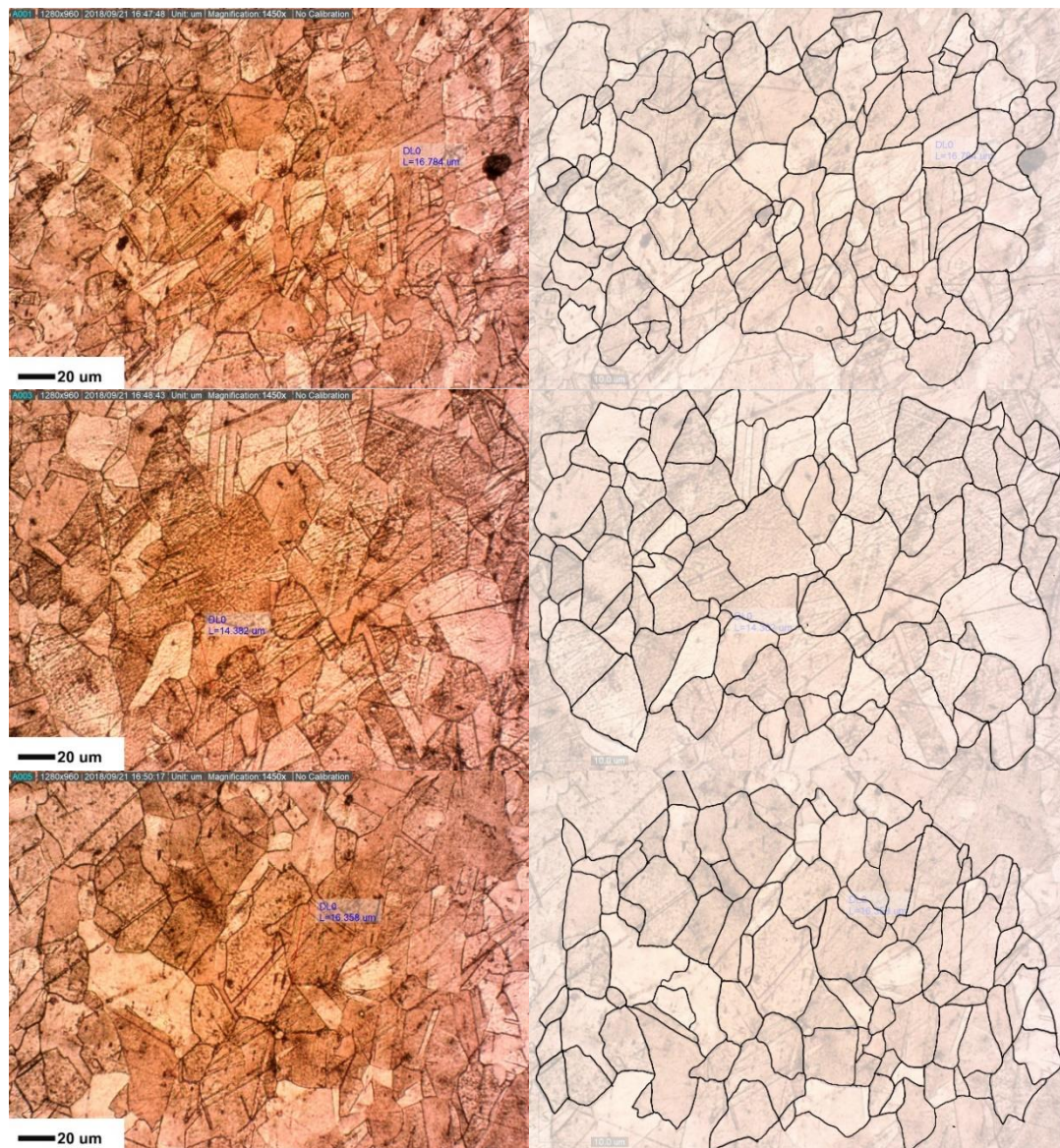
รูปที่ ก- 10 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคและภาพวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวอย่างโลหะ Aluminum



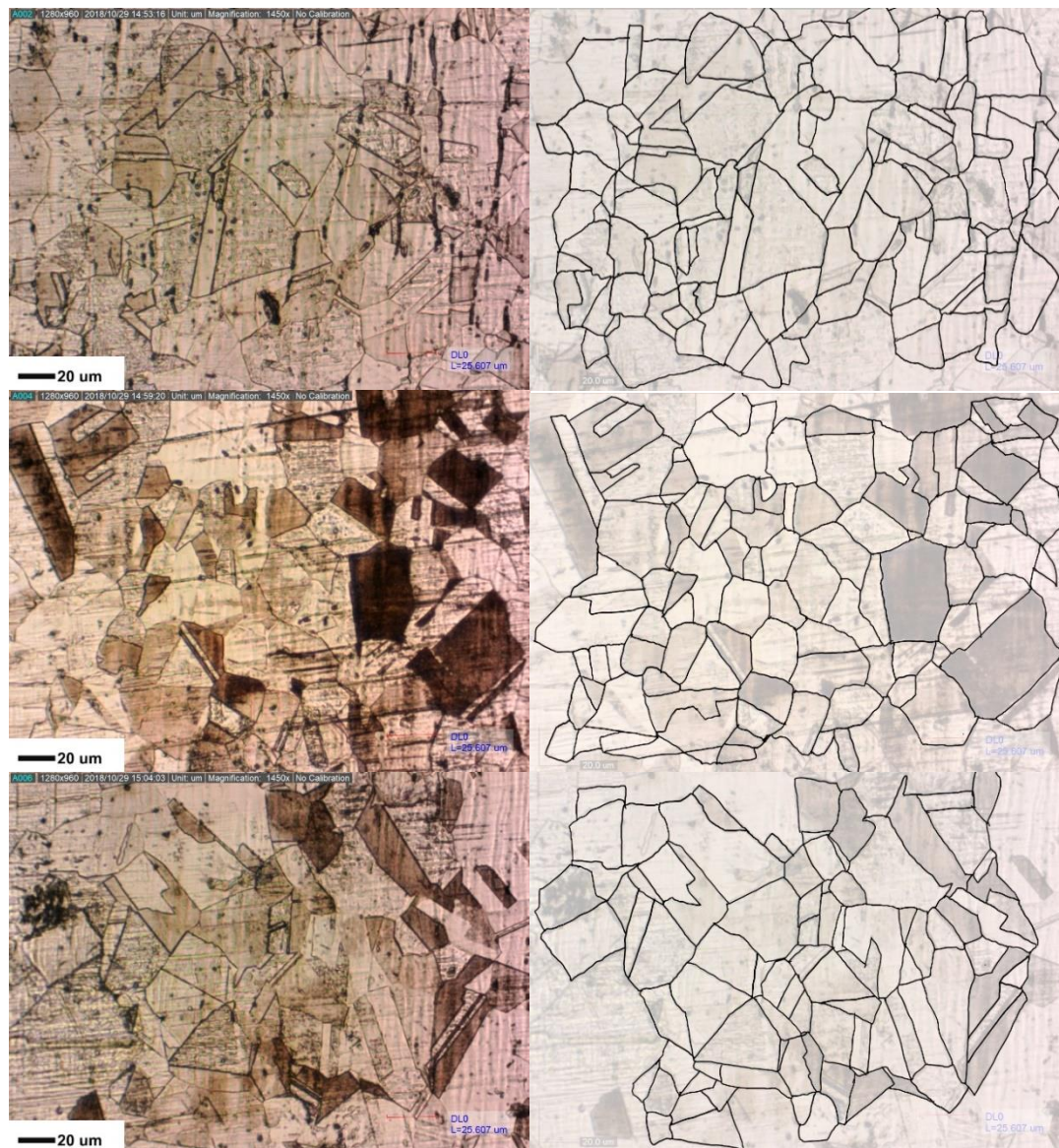
รูปที่ ก- 11 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคและภาพวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวอย่างโลหะ Brass



รูปที่ ก- 12 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคและภาพวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวอย่างโลหะ Brass annealed

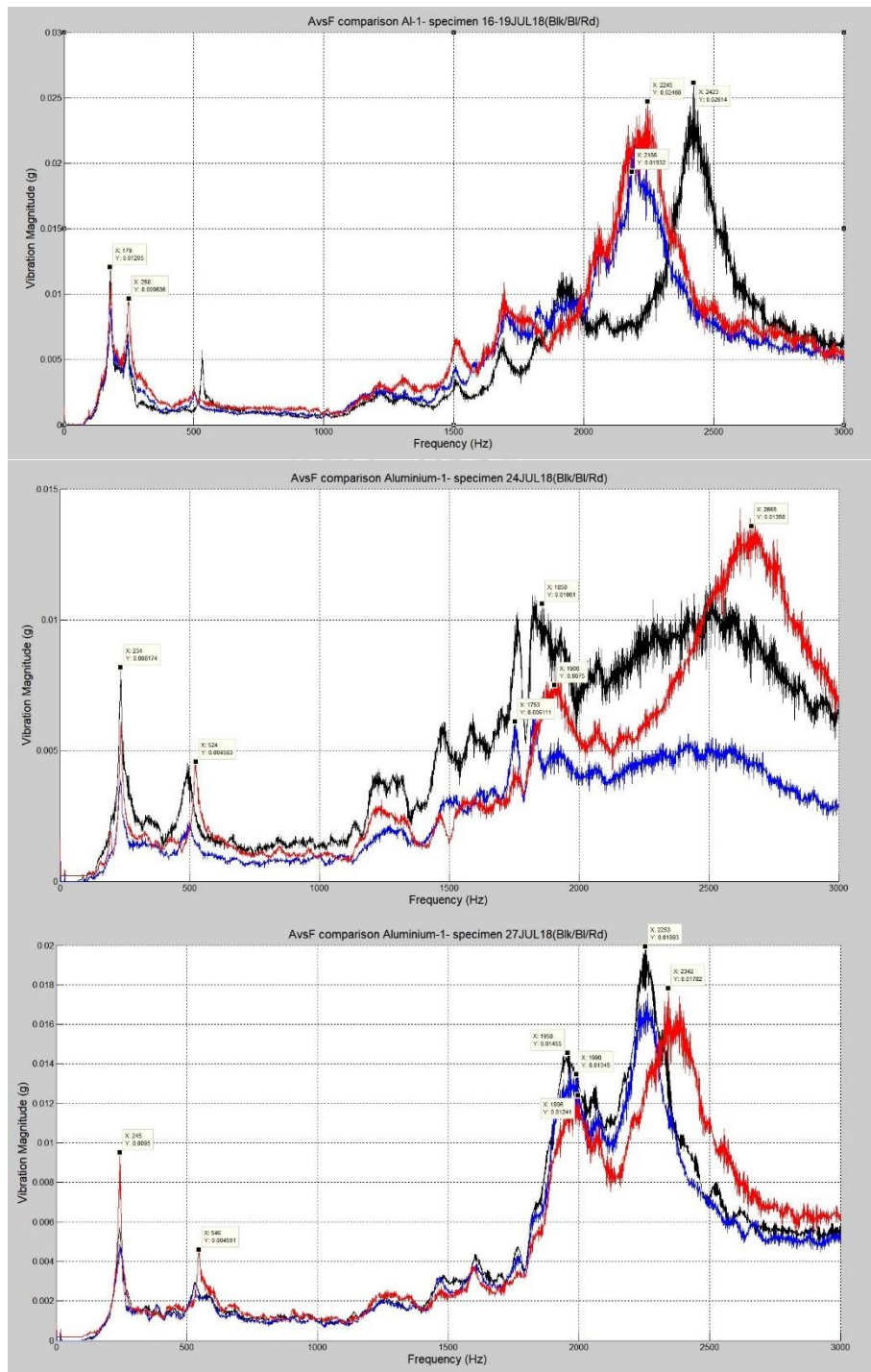


รูปที่ ก- 13 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคและภาพวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวอย่างโลหะ Copper

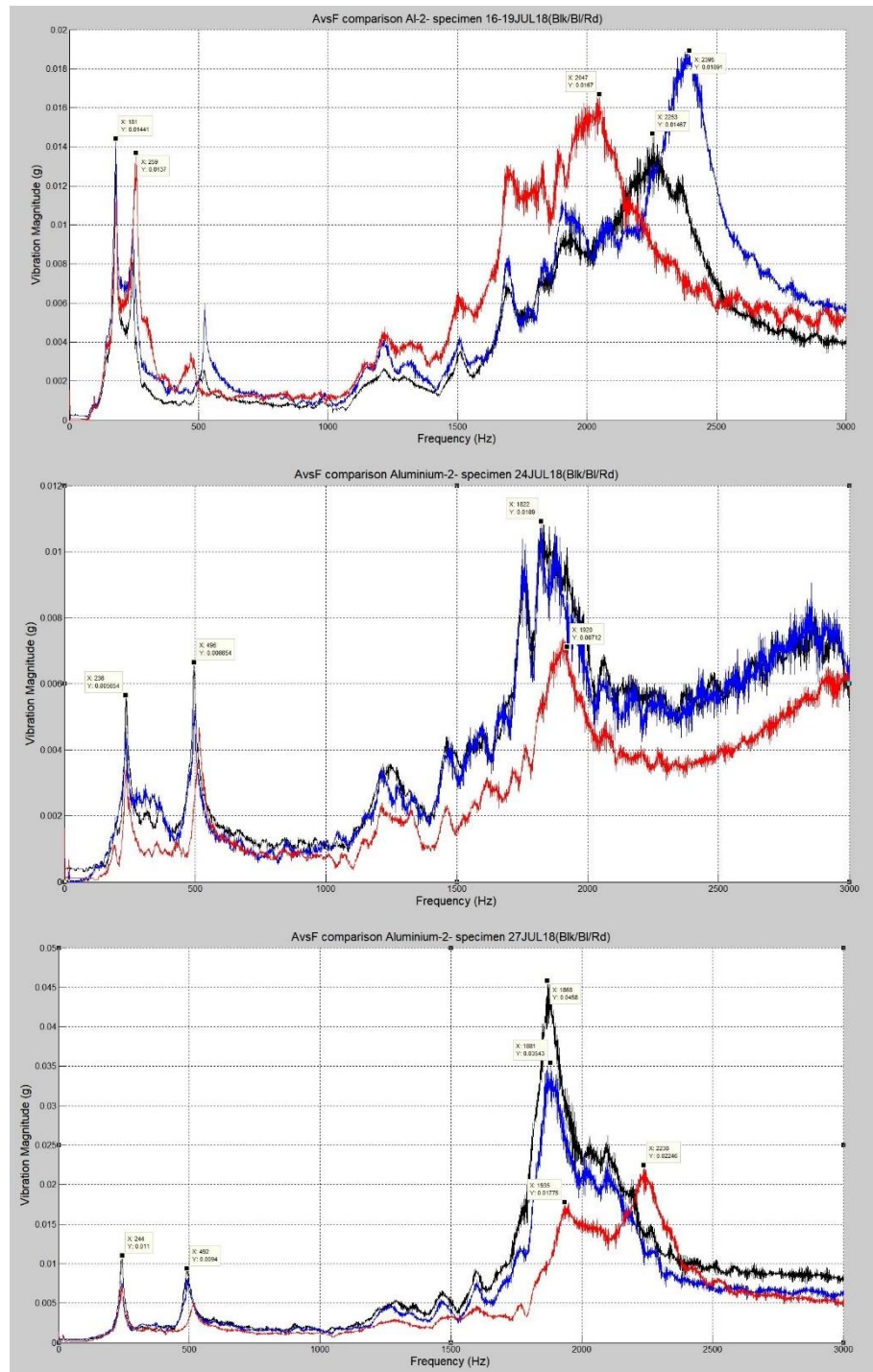


รูปที่ ก- 14 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคและภาพวิเคราะห์ขนาดเกรนของตัวอย่างโลหะ Stainless-steel เกรด 304

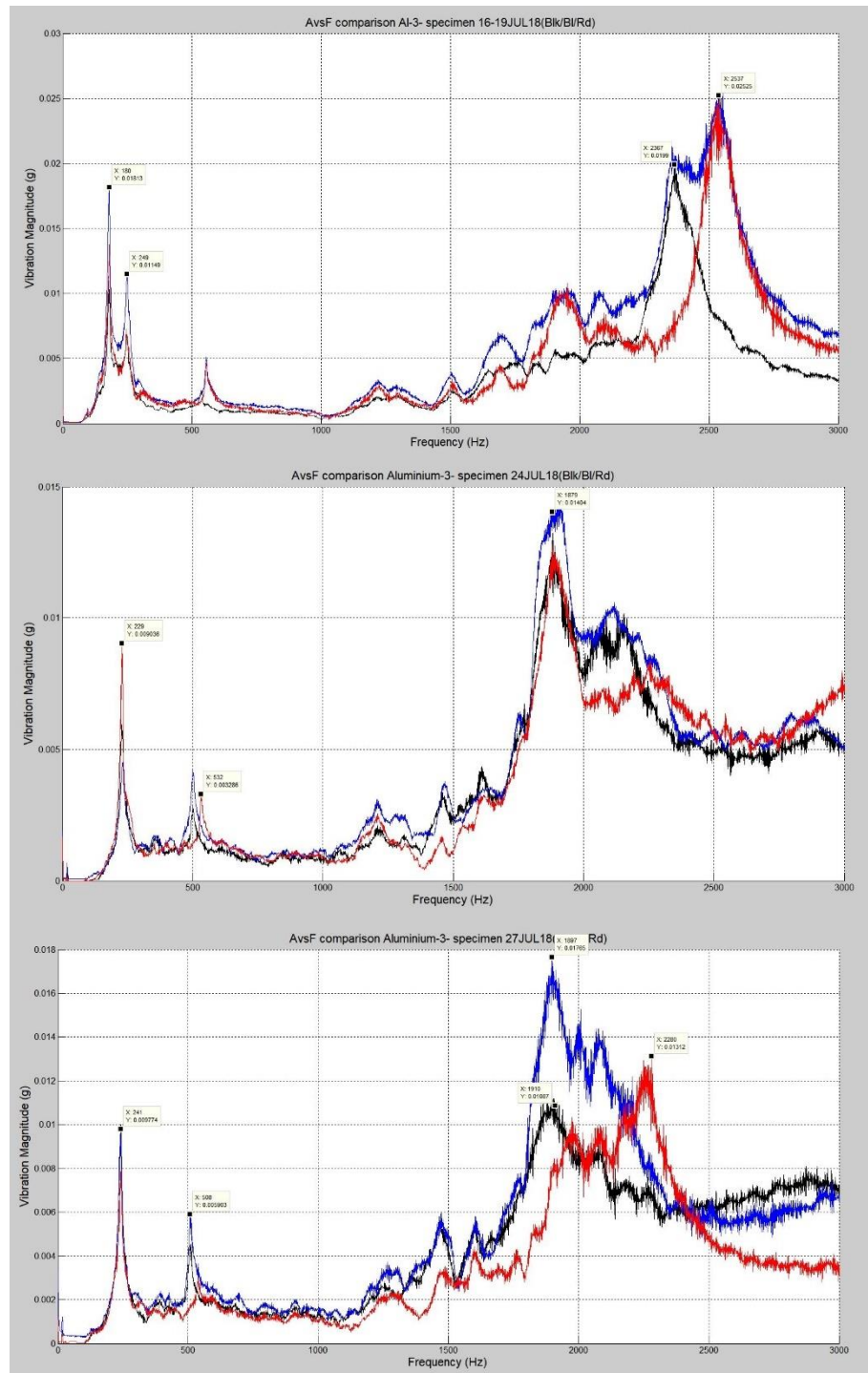
ตัวอย่างกราฟ Frequency domain จากโปรแกรม MATLAB R2013b



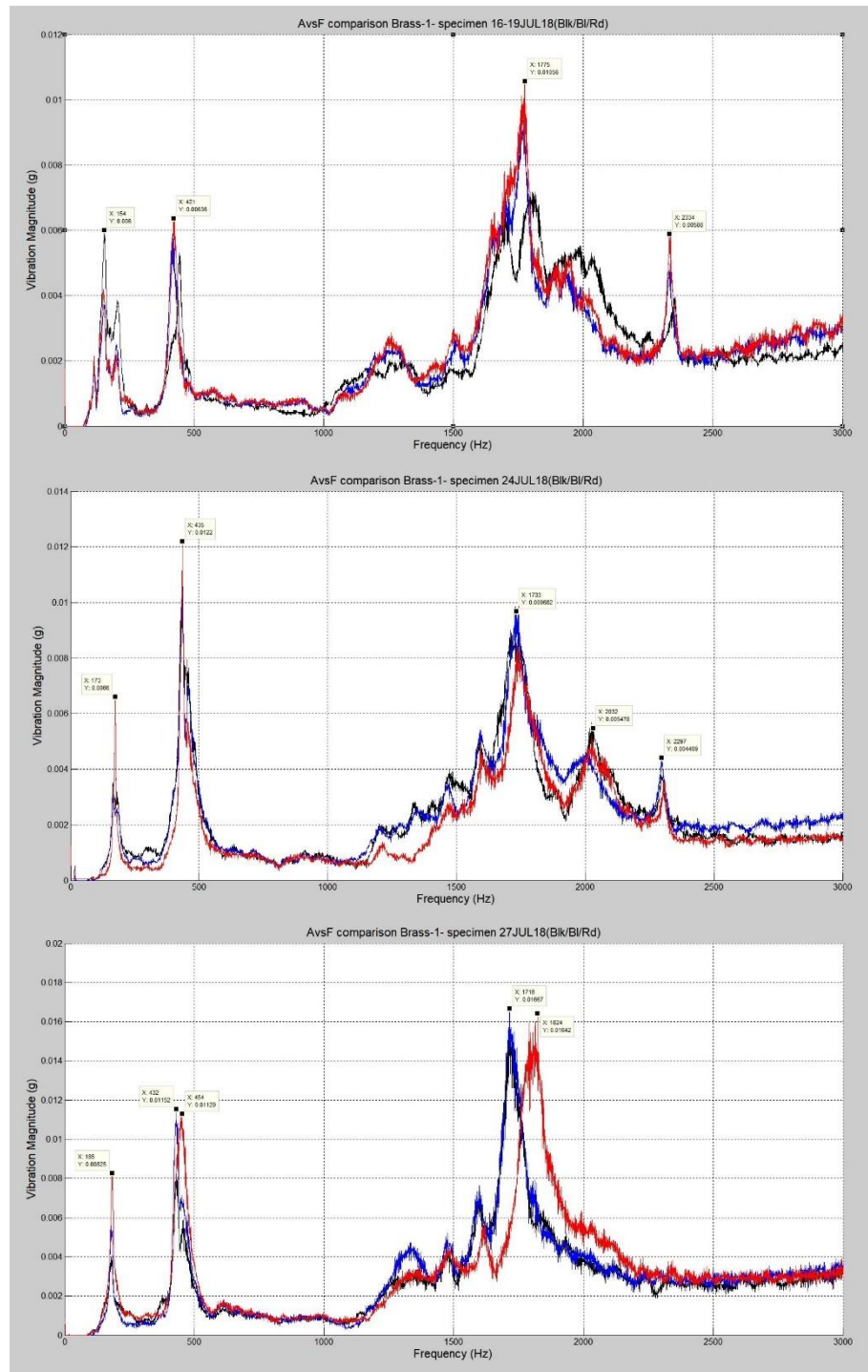
รูปที่ ก- 15 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Aluminum ชั้นที่ 1



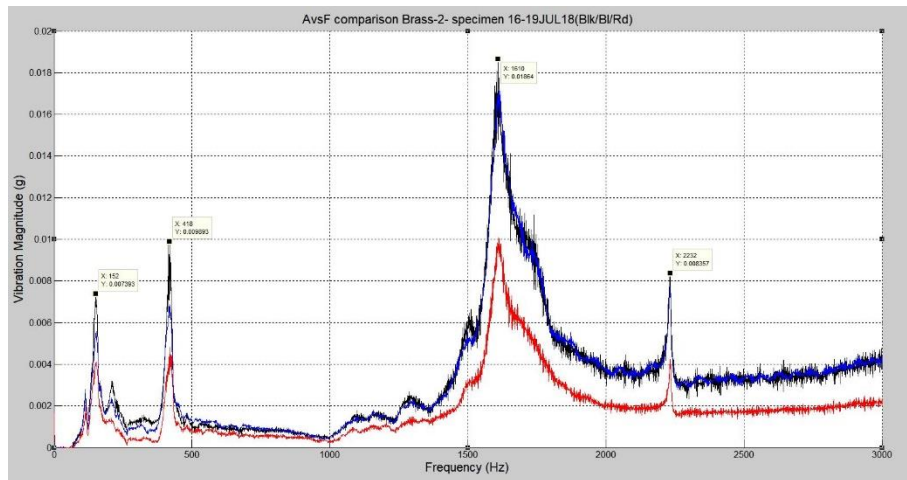
รูปที่ ก- 16 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Aluminum ชั้นที่ 2



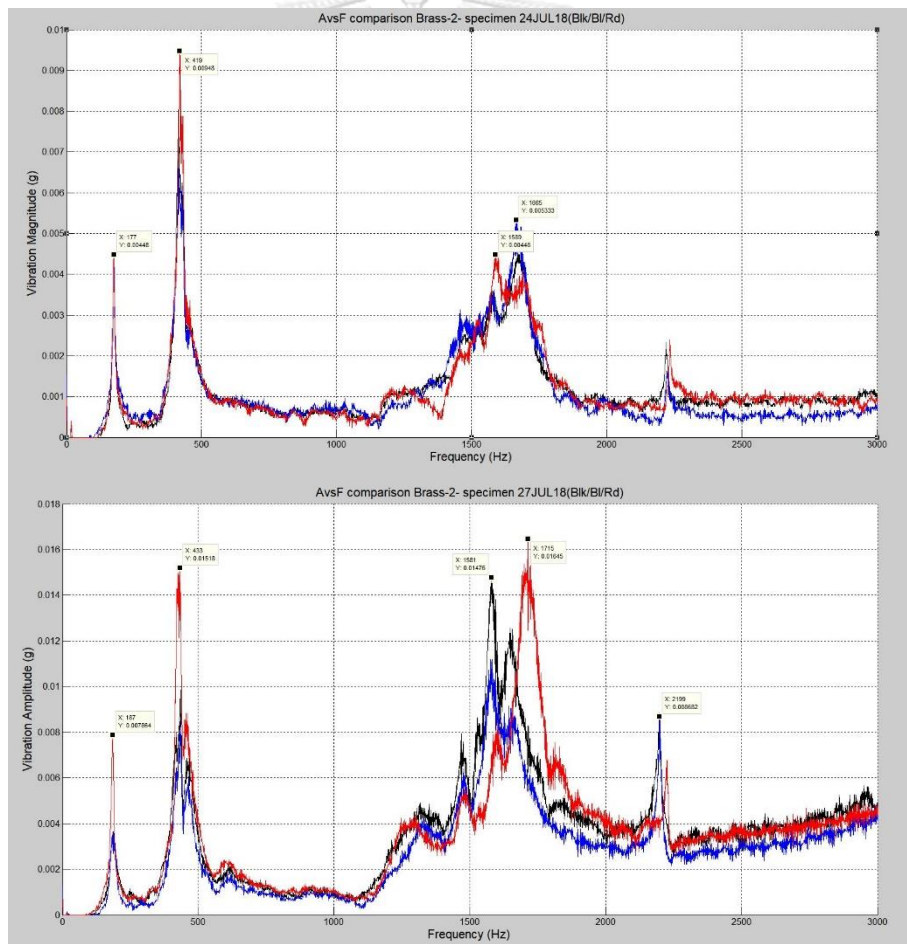
รูปที่ ก- 17 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Aluminum ชั้นที่ 3



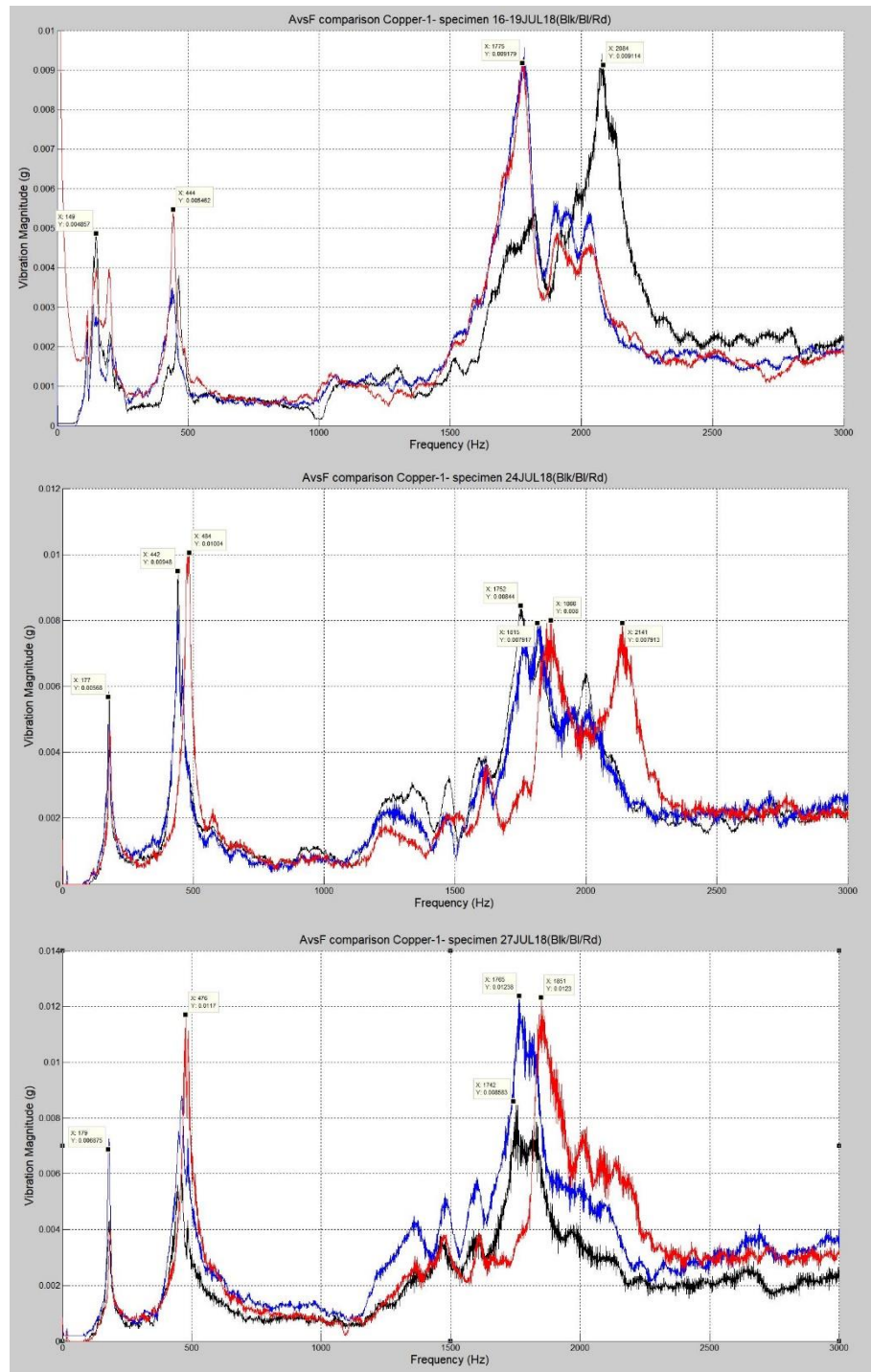
รูปที่ ก- 18 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Brass ชั้นที่ 1



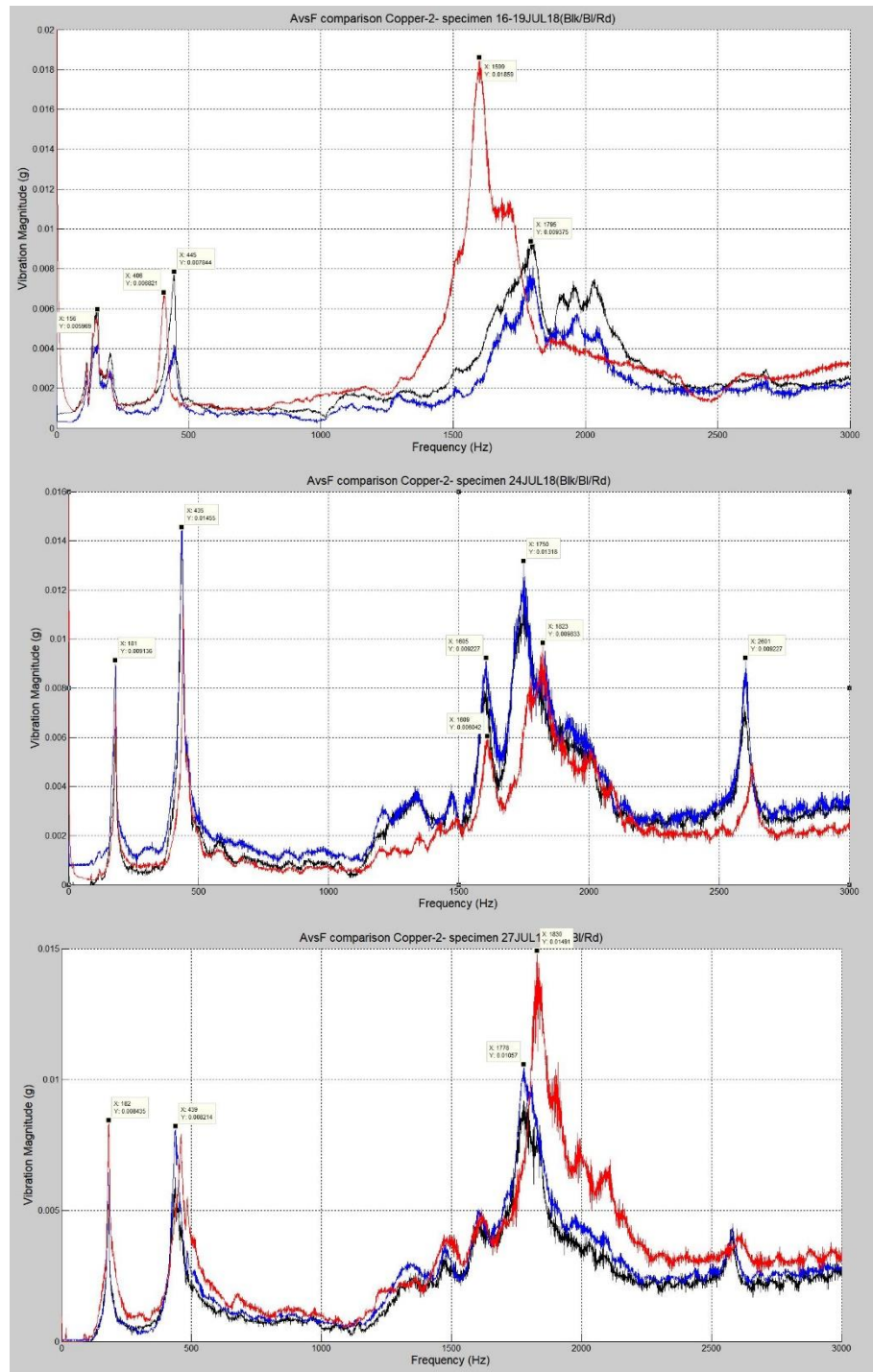
รูปที่ ก- 19 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Brass ชั้นที่ 2



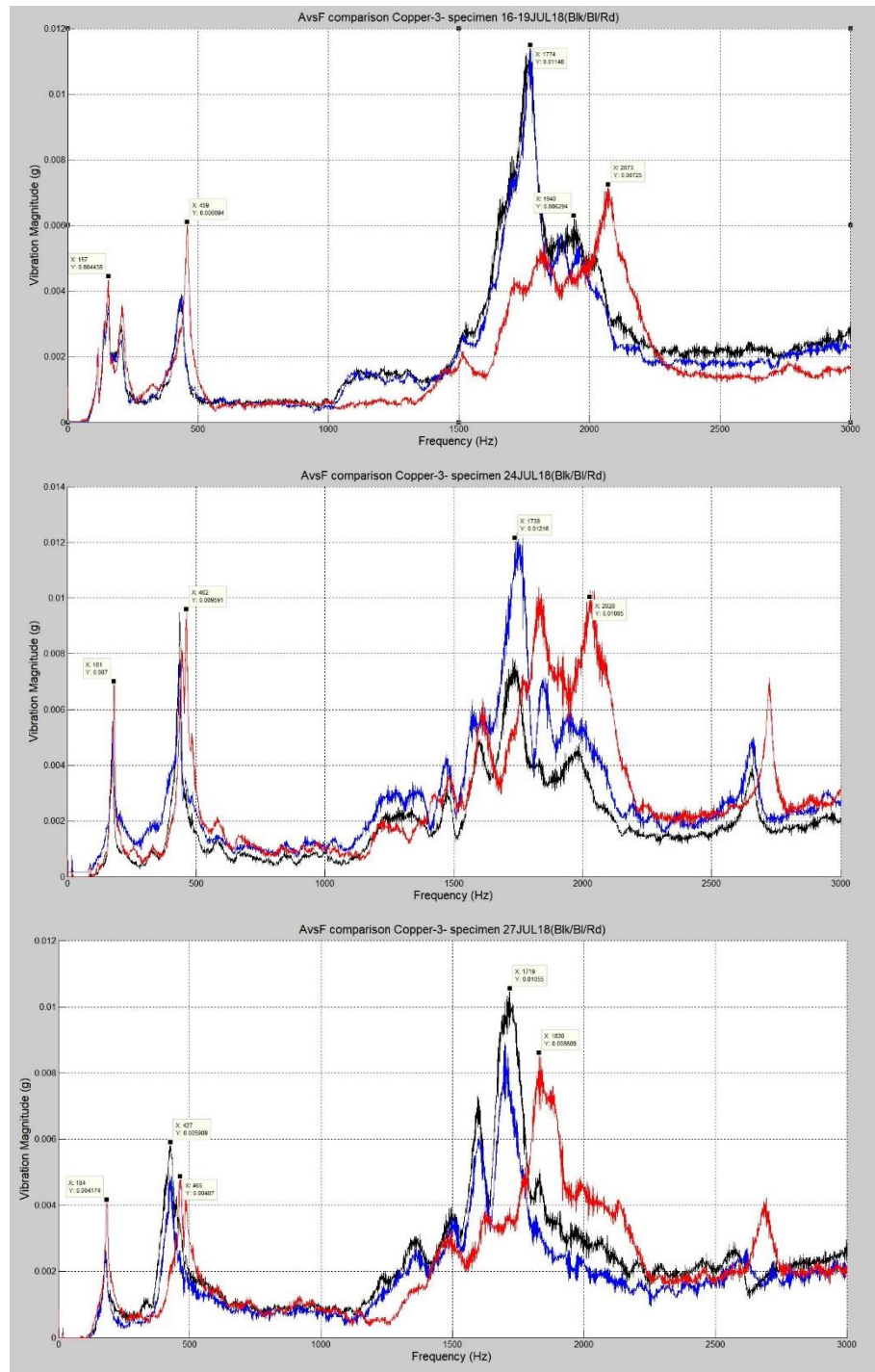
รูปที่ ก- 20 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Brass annealed



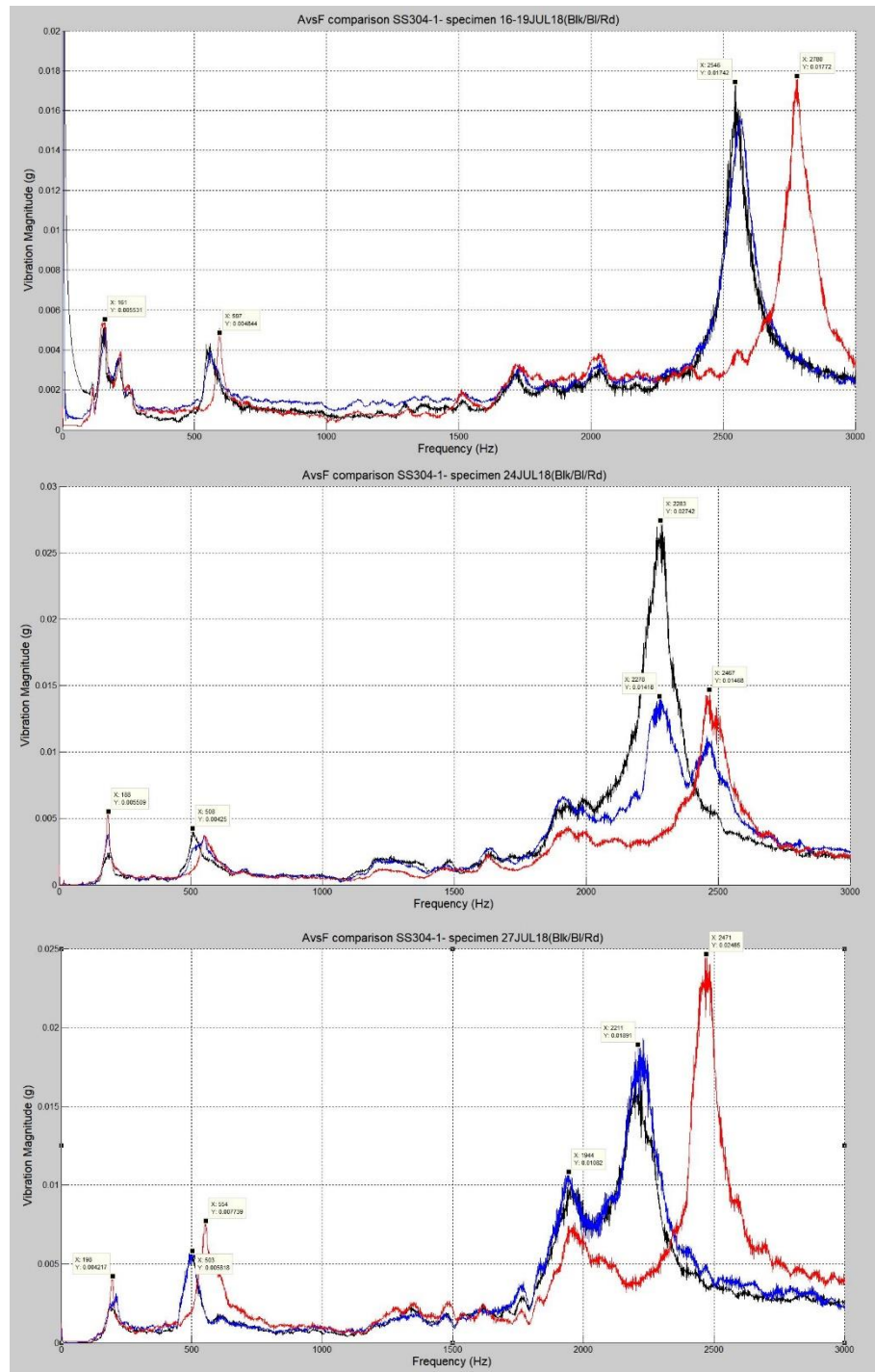
รูปที่ ก- 21 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Copper ชั้นที่ 1



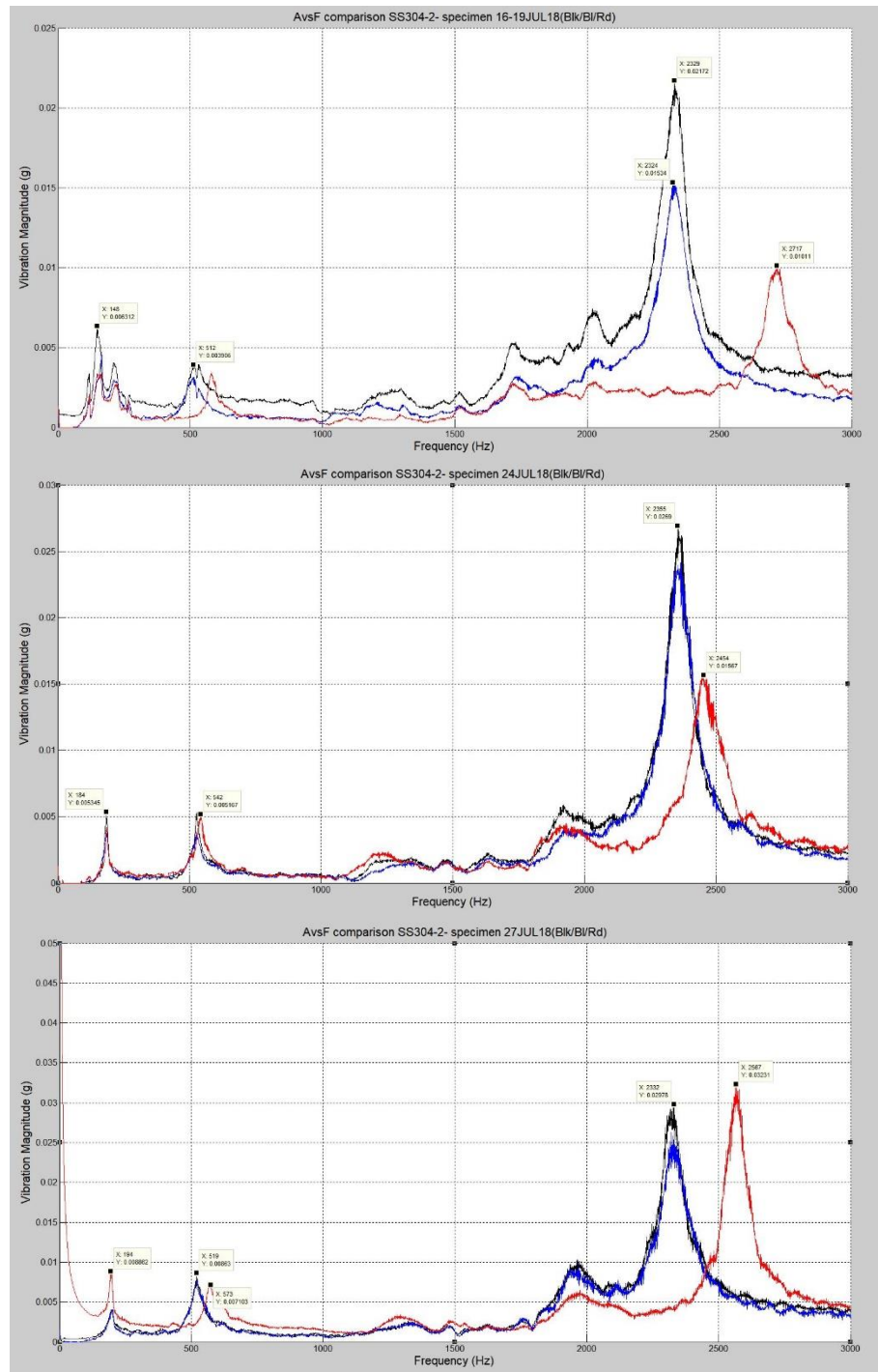
รูปที่ ก- 22 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Copper ชั้นที่ 2



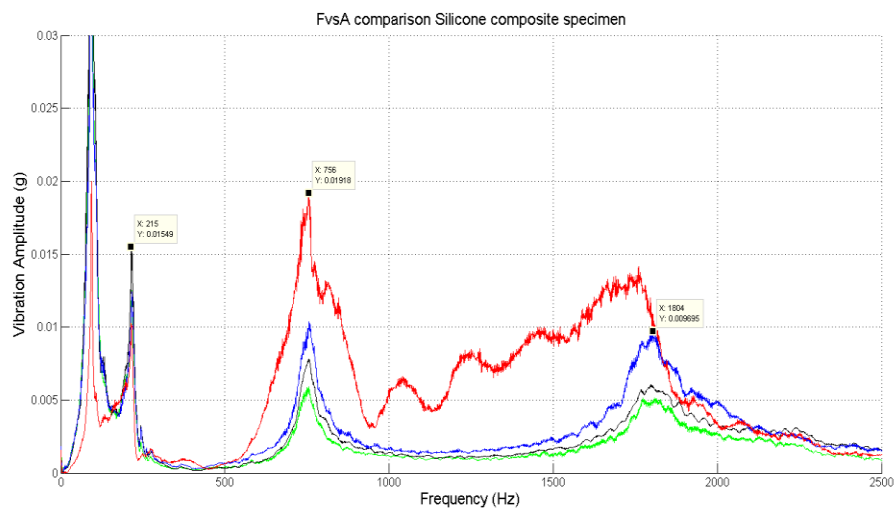
รูปที่ ก- 23 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ Copper ชั้นที่ 3



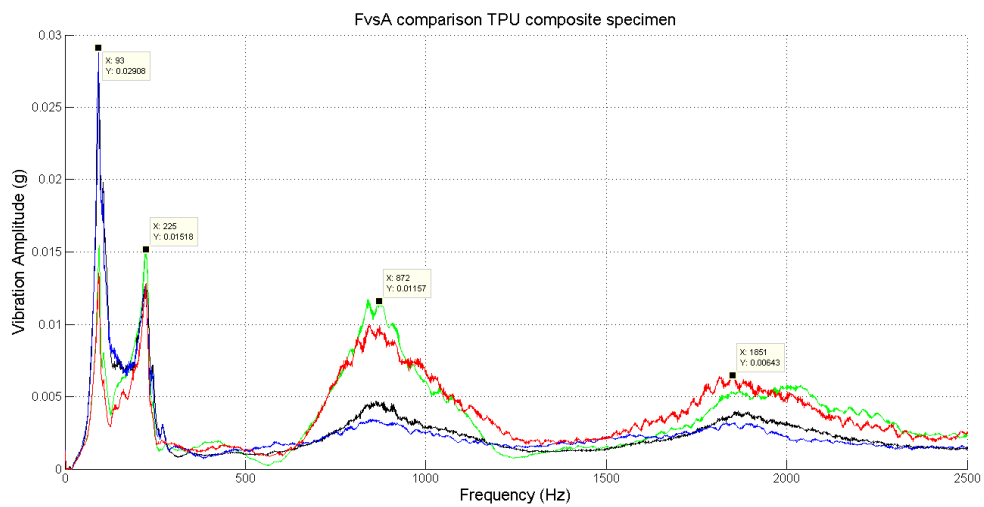
รูปที่ ก- 24 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ
Stainless steel เกรด 304 ชั้นที่ 1



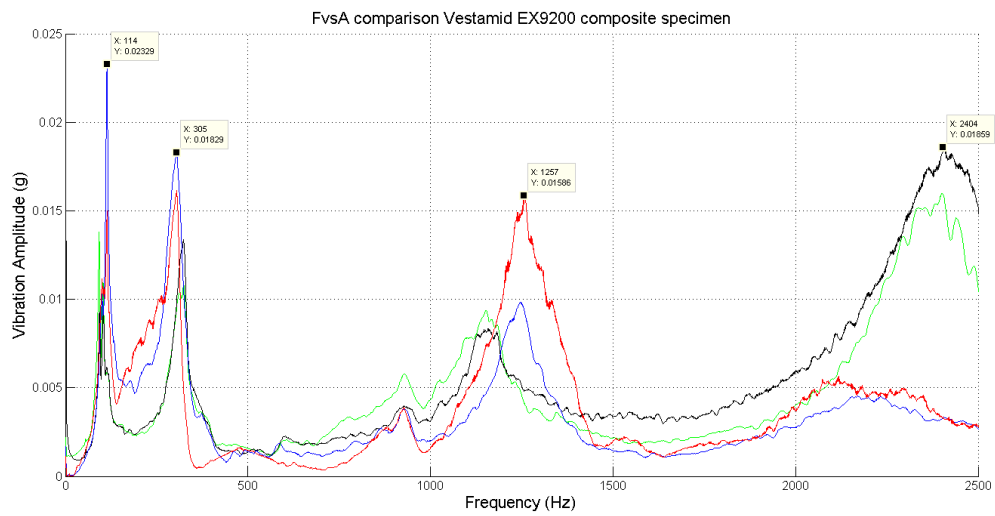
รูปที่ ก- 25 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบโลหะ
Stainless steel เกรด 304 ชั้นที่ 2



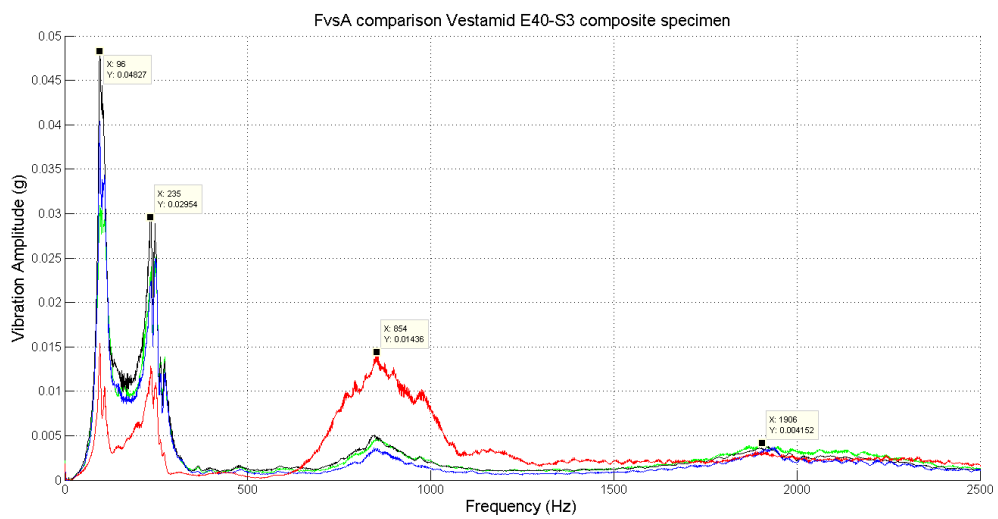
รูปที่ ก- 26 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบ
วัสดุผสมพอลิเมอร์ Silicone rubber



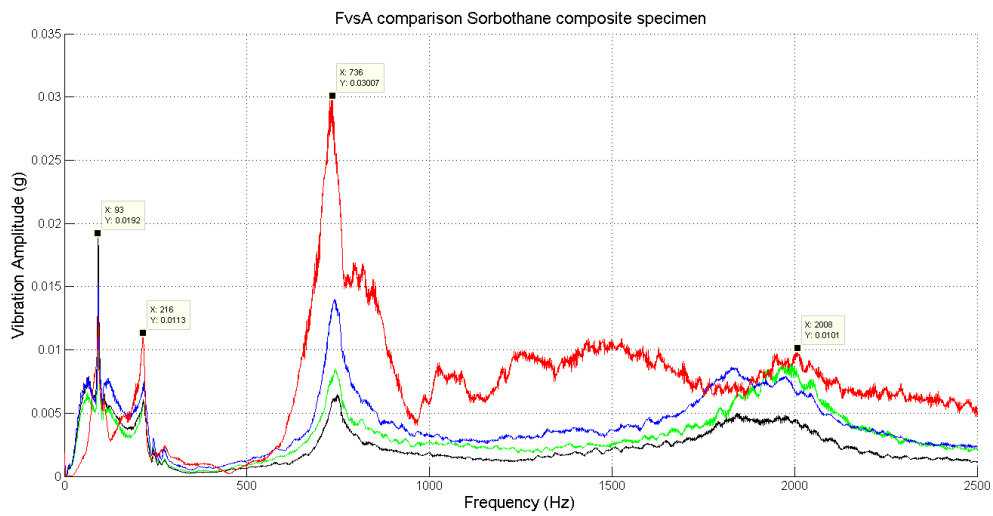
รูปที่ ก- 27 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบ
วัสดุผสมพอลิเมอร์ TPU



รูปที่ ก- 28 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบ
วัสดุผสมพอลิเมอร์ Vestamid® EX9200

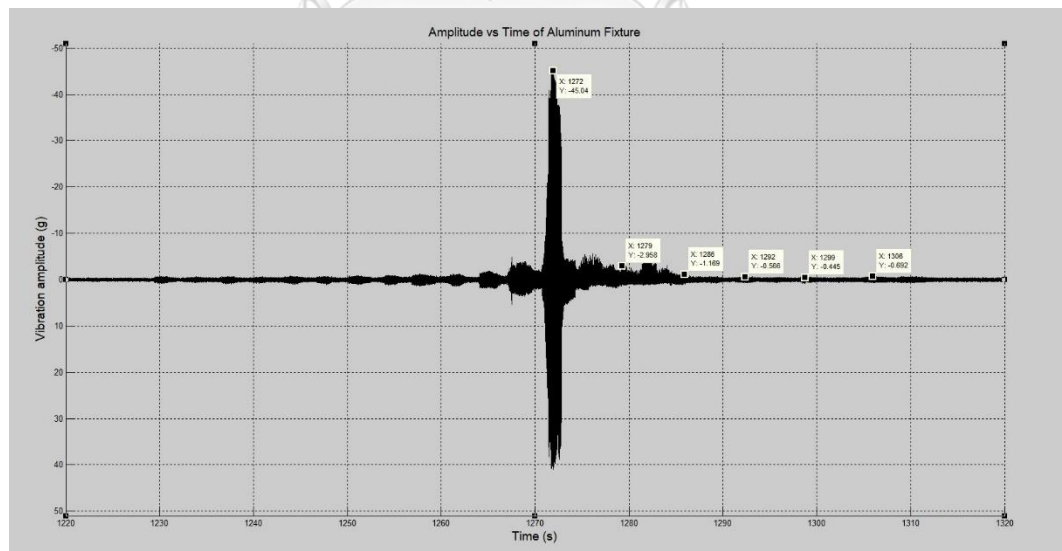


รูปที่ ก- 29 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบ
วัสดุผสมพอลิเมอร์ Vestamid® E40-S3

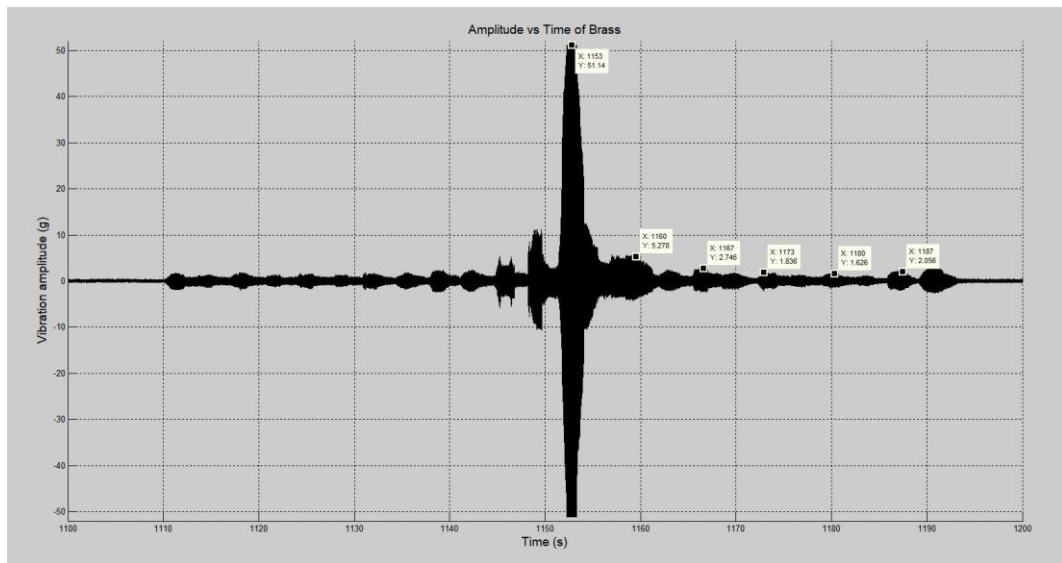


รูปที่ ก- 30 ตัวอย่างกราฟ Frequency domain ของชิ้นงานทดสอบ
วัสดุผสมพอลิเมอร์ Sorbothane®

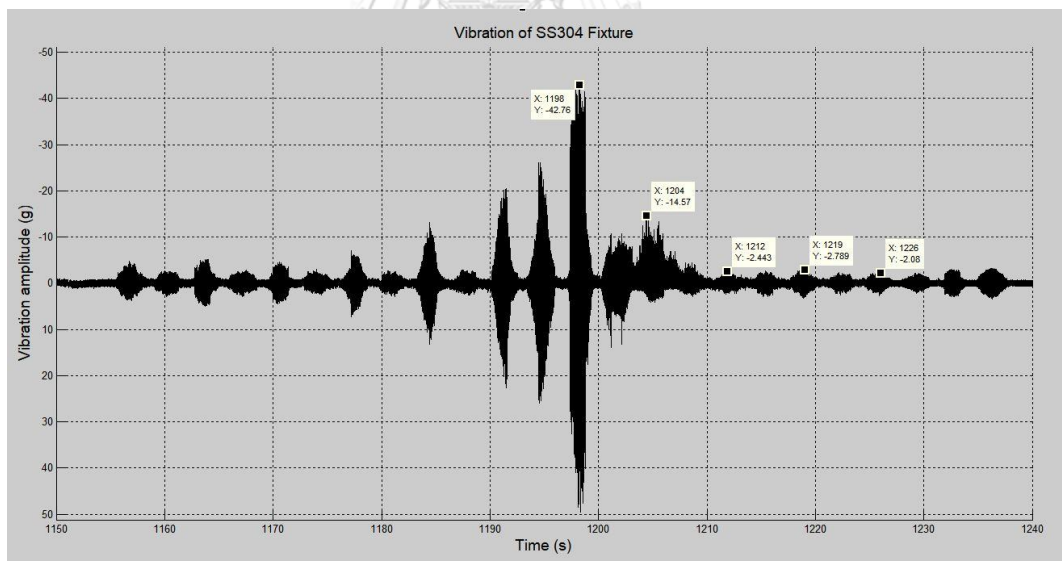
ตัวอย่างกราฟ Time domain จากโปรแกรม MATLAB R2013b



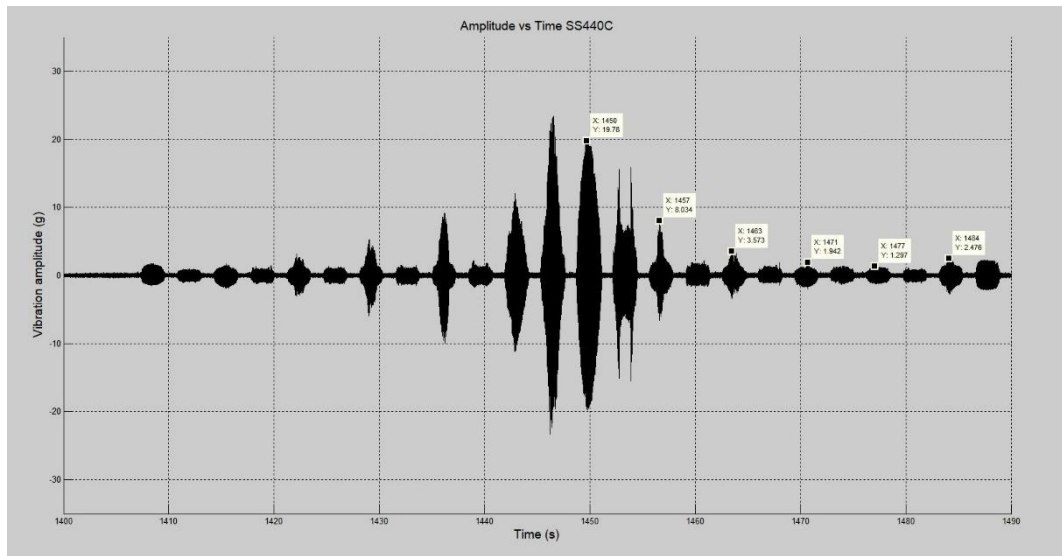
รูปที่ ก- 31 ตัวอย่างกราฟ Amplitude ต่อเวลาระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ฐาน
วางชิ้นงานโลหะ Aluminum



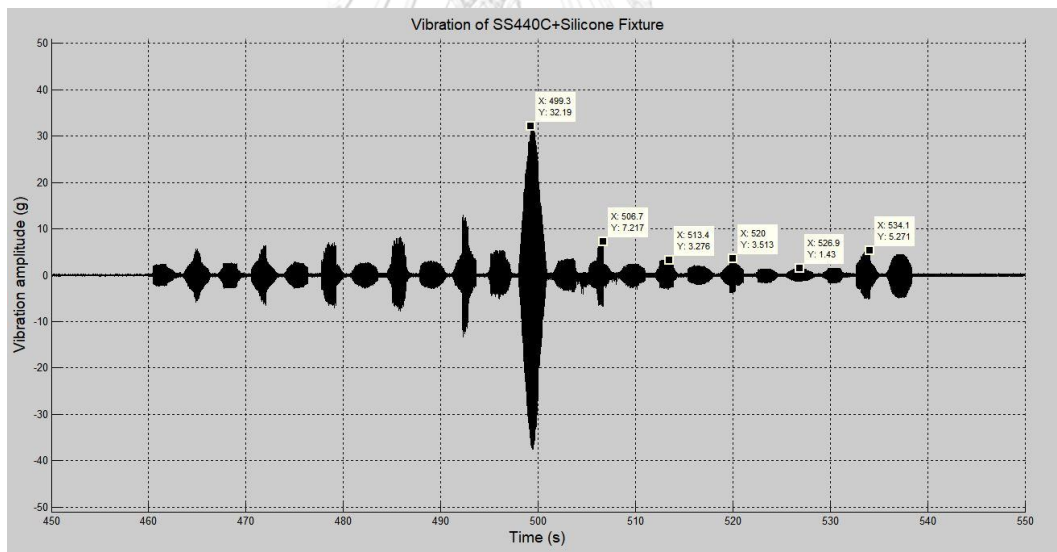
รูปที่ ก- 32 ตัวอย่างกราฟ Amplitude ต่อเวลาระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ฐานวางชิ้นงานโลหะ Brass



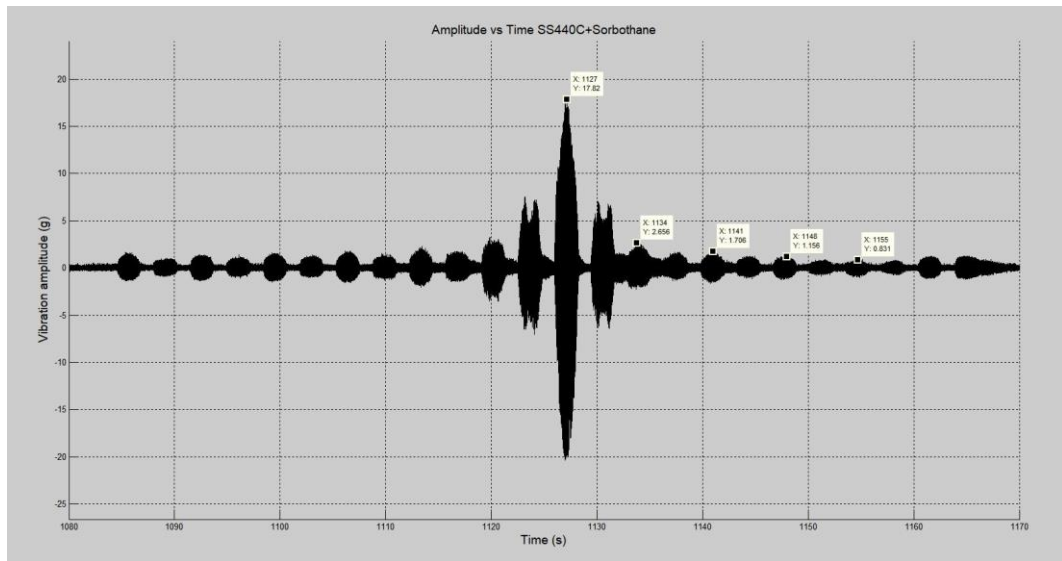
รูปที่ ก- 33 ตัวอย่างกราฟ Amplitude ต่อเวลาระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ฐานวางชิ้นงานโลหะ Stainless steel เกรด 304



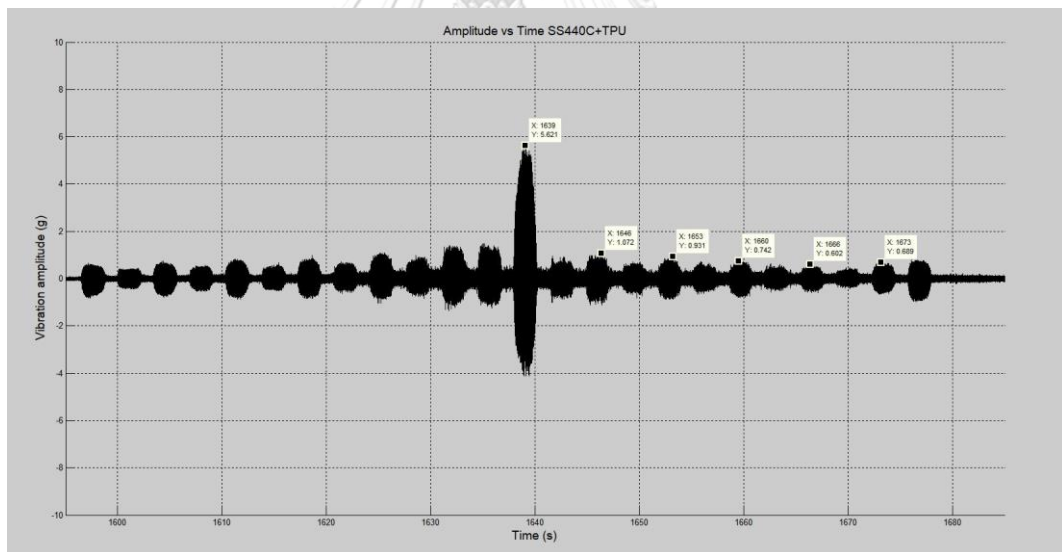
รูปที่ ก- 34 ตัวอย่างกราฟ Amplitude ต่อเวลา ระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ฐานวางชิ้นงานโลหะ Stainless steel เกรด 440C



รูปที่ ก- 35 ตัวอย่างกราฟ Amplitude ต่อเวลา ระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ฐานวางชิ้นงาน Stainless steel เกรด 440C เสริมพอลิเมอร์ Silicone rubber



รูปที่ ก- 36 ตัวอย่างกราฟ Amplitude ต่อเวลาระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ฐานวางชิ้นงาน Stainless steel เกรด 440C เสริมพอลิเมอร์ Sorbothane®



รูปที่ ก- 37 ตัวอย่างกราฟ Amplitude ต่อเวลาระหว่างกระบวนการขัดสีความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ฐานวางชิ้นงาน Stainless steel เกรด 440C เสริมพอลิเมอร์ TPU

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศิริวิทย์ ดวงทวี
วัน เดือน ปี เกิด	11 ธันวาคม 2534
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	จบการศึกษาในระดับปริญญาตรีจากภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2556



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY