

การเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110  
BRAZING OF TUNGSTEN CARBIDE TO K110 STEEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# BRAZING OF TUNGSTEN CARBIDE TO K110 STEEL



MS. TANPISCHA YASAMUTH  
MS. PATTRAPORN KONGKARAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN  
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110  
BRAZING OF TUNGSTEN CARBIDE TO K110 STEEL


นักศึกษา

นางสาวธัญพิชชา ยาสุมทร์ รหัสประจำตัว 60010455  
นางสาวภัทราพร คงคาร์ตัน รหัสประจำตัว 60010772

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การเล่นประสานทั้งสองคนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110

นักศึกษา

นางสาวธัญพิชชา ยาสุมทร์

นางสาวภัทรพร คงคาร์ตัน

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2563

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการเล่นประสานที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสานระหว่างทั้งสองคนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า Bohler k110 และเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของรอยต่อในการเล่นประสาน โดยใช้ Brazetec 49/Cu เป็นโลหะเติม ซึ่งทำการเล่นประสานภายในเตาที่ควบคุมบรรยากาศด้วยแก๊สอาร์กอนเพื่อช่วยตัวลดการเกิดออกซิเดชันกับชิ้นงาน มีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ โดยการทดลองการเล่นประสานระหว่างทั้งสองคนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า Bohler k110 ใช้อุณหภูมิเตาเล่นประสานที่ 690 °C, 710 °C และ 730 °C เวลาที่ใช้เตาเล่นประสานคือ 15 นาที 30 นาที และ 45 นาที จากการทดลองการเล่นประสานระหว่างทั้งสองคนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า Bohler k110 พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเล่นประสานคือ อุณหภูมิเล่นประสาน 730 °C เวลาเล่นประสาน 30 นาที และเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือนแล้ว ซึ่งจะนำฝั่งเหล็กกล้า Bohler k110 มาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยส่องจุดต่าง ๆ บนชิ้นงานจะพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของทั้งสองคนคาร์ไบด์และโลหะเติม แสดงว่าชิ้นงานมีการประสานติดกันอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ก

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

<b>Thesis Title</b>	Brazing of Tungsten Carbide to K110 Steel
<b>Student</b>	Ms. Tanpischa Yasamuth Ms. Pattraporn Kongkarat
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2020
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

The objectives of this research were to study effects of the brazing temperature and brazing time on the shear strength and microstructure between tungsten carbide and Bohler K110 steel. BrazeTec 49/Cu was used as the filler metal for this brazing system. The experiment was conducted in a brazing furnace under argon atmosphere to reduce the oxidation during brazing. A 3k factorial design was used as the experimental strategy in this research. The brazing temperatures were at 690 °C, 710 °C, and 730 °C with a brazing time of 15 minutes, 30 minutes, and 45 minutes. From the experiment, the brazing temperature of 730 °C with a brazing time of 30 minutes provided highest shear strength of the joint. After the shear testing, the workpiece was then analyzed by scanning electron microscopy. It was found that the trace elements of tungsten carbide and filler metal were successfully brazed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

๗

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการเล่นประสานทั้งสแตนด์บายด์กับเหล็กกล้า K110 สำเร็จบรรลุตามเป้าหมายไปได้ด้วยดีและมีความสมบูรณ์ เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนชี้แนะแนวทางสำหรับปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำซาบซึ้งเป็นอย่างสูงในความกรุณาและความทุ่มเทที่อาจารย์มอบให้นี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.ยลพัชร อารีรบ และ ดร.ประจักษ์ จิตกุล เป็นอย่างสูงที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาและแนวคิดต่าง ๆ ที่มีประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำ เป็นผลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุก ๆ ท่านที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ จนเป็นผลให้คณะผู้จัดทำสามารถจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

อนึ่ง คณะผู้จัดทำหวังไว้เป็นอย่างสูงว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ที่เกิดจากความทุ่มเทและความพยายาม จะมีค่าและเกิดประโยชน์แก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงมีความประสงค์ที่จะขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชา และในส่วนของข้อบกพร่องของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอน้อมรับผิดไว้แต่เพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำต่าง ๆ จากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษาเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาต่อไป

นางสาวธัญพิชชา ยาสมุทร  
นางสาวภัทราพร คงคาร์ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ค

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	3
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กระบวนการเล่นประสานเซรามิกกับโลหะ .....	5
2.2 ทังสเทนคาร์ไบด์.....	6
2.2.1 คุณสมบัติหลักของทังสเทนคาร์ไบด์.....	6
2.2.2 สมบัติทางกายภาพของทังสเทนคาร์ไบด์.....	7
2.2.3 คุณสมบัติทางเคมีของทังสเทนคาร์ไบด์.....	7
2.3 เหล็กกล้า K110.....	8
2.4 โลหะเติม.....	8
2.5 วิธีการประสานแบบแอคทีฟ.....	9
2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน .....	9
2.7 การออกแบบการทดลอง Design of Experiments .....	13
2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	15
2.9 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy .....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## สารบัญ

	หน้า
2.10 การวิเคราะห์พื้นผิวแตกหัก.....	15
2.11 การแตกหักแบบเหนียวและการแตกหักแบบเปราะ.....	16
2.11.1 การแตกหักแบบเหนียว.....	17
2.11.2 การแตกหักแบบเปราะ.....	19
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b>	
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	20
3.1.1 วัสดุสำหรับการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโลหะ .....	20
3.1.2 พิกเจอร์สำหรับวางชิ้นงานในการเล่นประสาน.....	24
3.1.3 เครื่องเล่นประสานยี่ห้อ Carbolite High Temperature Furnace รุ่น TZF..	24
3.1.4 พิกเจอร์สำหรับการทดสอบแรงเฉือน.....	25
3.1.5 เครื่อง UTM รุ่น SHIMDZU AUTOGRAPH AG-X-KN .....	25
3.1.6 กล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์.....	26
3.1.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	27
3.2 ขั้นตอนการจัดเตรียมอุปกรณ์ .....	27
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	27
3.2.2 ขั้นตอนการทำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเฉือน .....	27
3.3 ขั้นตอนการเล่นประสาน .....	28
3.4 ขั้นตอนการทดสอบแรงเฉือน .....	29
3.5 การออกแบบการทดลอง Design of Experiments .....	29
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนของการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K1110 .....	32
4.2 ผลการทดลองทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab 19 .....	35
4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลรูปแบบการทดลอง.....	36
4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแปรปรวนสำหรับค่าความต้านทาน แรงเฉือน .....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## สารบัญ

	หน้า
4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม.....	40
4.3 โครงสร้างจุลภาครอยประสานของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์.....	41
4.4 โครงสร้างจุลภาครอยประสานของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด... ..	42
4.4.1 ประสานที่อุณหภูมิการเล่นประสาน 690 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที..	43
4.4.2 ประสานที่อุณหภูมิการเล่นประสาน 730 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที..	51
<b>บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล</b>	
5.1 การสรุปผลและการอภิปรายผล.....	57
5.1.1 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสุดในการเล่นประสาน.....	57
5.1.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ฉ

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน.....	4
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเกรดเหล็กกล้า.....	8
ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุเซรามิกเทียบกับวัสดุอื่น ๆ .....	12
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของทั้งสแตนคาร์ไบด์ .....	21
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก Bohler k110 .....	22
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติม 49/Cu.....	23
ตารางที่ 3.4 Technical Data ของโลหะเติม.....	23
ตารางที่ 3.5 ออกแบบการทดลองการประสานชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบแรงเฉือน.....	30
ตารางที่ 3.6 ออกแบบการทดลองการประสานชิ้นงานเพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	31
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงเฉือนที่ทดสอบได้จากเครื่อง UTM ของแต่ละชิ้นงาน.....	32
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงเฉือน Shear Strength ของแต่ละชิ้นงาน .....	34
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลปัจจัยต่างๆในการประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 .....	36
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง .....	38
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณตรงกลางรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที .....	46
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที .....	49
ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที .....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ช

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

### หน้า

รูปที่ 1.1 ผลของอุณหภูมิในการเล่นประสานต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยประสาน $Al_2O_3$ .....	2
รูปที่ 1.2 ผลของเวลาในการเล่นประสานต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยประสาน $Al_2O_3$ .....	2
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทังสเตนคาร์ไบด์ .....	6
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน.....	10
รูปที่ 2.3 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน.....	10
รูปที่ 2.4 สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน .....	11
รูปที่ 2.5 พื้นผิวที่เกิดการแตกหักแบบต่าง ๆ ของวัสดุ .....	16
รูปที่ 2.6 ลักษณะที่แตกต่างทางกายภาพระหว่างการแตกหักแบบเหนียวซึ่งวัสดุมีการคอดหรือ เสียรูปก่อนและการแตกหักแบบเปราะที่วัสดุจะไม่มีเสียรูปก่อนแตกหัก .....	17
รูปที่ 2.7 ลักษณะความแตกต่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับการเสียรูปของวัสดุที่แตกหัก แบบเหนียวกับวัสดุที่แตกหักแบบเปราะ .....	17
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างชิ้นงานที่แตกหักจากการผ่านการทดสอบแรงดึง.....	18
รูปที่ 2.9 รอยแตกของการแตกหักแบบเหนียว .....	18
รูปที่ 2.10 ลำดับของการแตกหักแบบเหนียว .....	19
รูปที่ 3.1 ทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 8x8x8.6 มม.....	20
รูปที่ 3.2 โลหะ Bohler k110 ขนาด 20x20x13 มม. ....	21
รูปที่ 3.3 โลหะเติม 49/Cu.....	22
รูปที่ 3.4 น้ำยาประสาน .....	24
รูปที่ 3.5 พิกเจอร์สำหรับการวางชิ้นงานในเครื่องเล่นประสาน.....	24
รูปที่ 3.6 เครื่องเล่นประสาน .....	25
รูปที่ 3.7 พิกเจอร์สำหรับการทำการทดสอบแรงเฉือน.....	25
รูปที่ 3.8 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM).....	26
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์.....	26
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	27
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเฉือน.....	28
รูปที่ 3.12 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเล่นประสานอย่างเสร็จสมบูรณ์.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

๗

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.1	ผลค่าเฉลี่ยของปัจจัยการแล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110.....	36
รูปที่ 4.2	แผนภูมิพาเรโตของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย.....	39
รูปที่ 4.3	อิทธิพลหลัก 2 ปัจจัย.....	39
รูปที่ 4.4	ผลกระทบร่วมที่มีผลต่อปัจจัยในการแล่นประสาน.....	40
รูปที่ 4.5	ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab.....	40
รูปที่ 4.6	บริเวณรอยประสานที่มีอุณหภูมิการแล่นประสาน 690 °C เวลาแล่นประสาน 30 นาที (a) ชิ้นงานที่ 1, (b) ชิ้นงานที่ 2 และ (c) ชิ้นงานที่ 3.....	41
รูปที่ 4.7	บริเวณรอยประสานที่มีอุณหภูมิการแล่นประสาน 730 °C เวลาแล่นประสาน 30 นาที (a) ชิ้นงานที่ 1, (b) ชิ้นงานที่ 2 และ (c) ชิ้นงานที่ 3.....	42
รูปที่ 4.8	โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 50 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (b) บริเวณขอบ..	43
รูปที่ 4.9	โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 1,000 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (b) บริเวณขอบ.....	43
รูปที่ 4.10	โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 4,000 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (b) บริเวณขอบ.....	44
รูปที่ 4.11	โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 1).....	44
รูปที่ 4.12	โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 2).....	45
รูปที่ 4.13	โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 3).....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นชอบประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ณ

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.14	สเปคของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณตรงกลางรอยประสานของ ทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที (a) ชั้นงานที่ 1, (b) ชั้นงานที่ 2 และ (c) ชั้นงานที่ 3 .....	47
รูปที่ 4.15	โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่1) .....	47
รูปที่ 4.16	โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 2) .....	48
รูปที่ 4.17	โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 1) .....	48
รูปที่ 4.18	สเปคของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณขอบรอยประสานของ ทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที (a) ชั้นงานที่ 1, (b) ชั้นงานที่ 2 และ (c) ชั้นงานที่ 3 .....	50
รูปที่ 4.19	โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 50 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ .....	51
รูปที่ 4.20	โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 1,000 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ .....	51
รูปที่ 4.21	โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 4,000 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ .....	52
รูปที่ 4.22	โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่1) .....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ณ

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่2) .....	53
รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่1) .....	53
รูปที่ 4.25 สเปคของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที (a) ชั้นงานที่ 1, (b) ชั้นงานที่ 2 และ (c) ชั้นงานที่ 3 .....	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ของงานวิจัยเรื่อง การเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย
3. ขอบเขตการศึกษางานวิจัย
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. แผนการดำเนินงาน

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

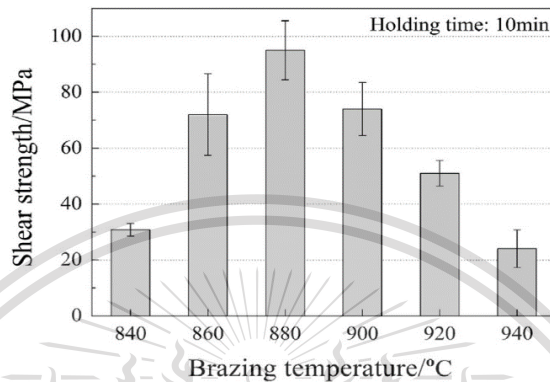
ในปัจจุบันการเล่นประสานเซรามิกกับโลหะมีความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อากาศ อวกาศนิวเคลียร์และอุตสาหกรรมยานยนต์ การประสานเซรามิกกับโลหะเป็นขั้นตอนการผลิตที่สำคัญที่มีการพัฒนามาอย่างช้า ๆ แต่มั่นคง การประสานเซรามิกกับโลหะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนที่สำคัญ เช่น ผนังชั้นแรกของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ พลังงานความร้อนของยานยนต์ขั้นสูงหรือกังหันอากาศยาน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการผลิตเหล่านี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการควบคุมเทคนิคการเล่นประสานเซรามิกกับโลหะ โดยเฉพาะการเล่นประสานโดยตรง ในทางอุณหพลศาสตร์และกลศาสตร์มีการอธิบายทฤษฎีทั่วไปของการทำให้เปื่อยและการยึดเกาะของโลหะผสมของสารตัวเติมที่ใช้งานอยู่บนเซรามิกออกไซด์ วิธีนี้ช่วยให้สามารถกำหนดองค์ประกอบของการประสานที่เหมาะสมได้ โลหะโดยทั่วไปที่ใช้ในการเล่นประสานจะถูกเลือกตามค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) โดยทั่วไปเซรามิกกับโลหะที่นำมาประสานควรมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกันมากที่สุด อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของผลผลิตของโลหะเกือบทุกชนิดสามารถลดลงได้โดยการลดพื้นที่หน้าตัด โลหะที่ไม่มีคุณสมบัติหยุ่นต่ำจะส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างในรอยประสานน้อยลง โดยโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมักจะถูกนำมาเล่นประสานกับเซรามิก [1] ความยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ระหว่างโลหะกับเซรามิกปิดสนิท ซึ่งการเล่นประสานแบบแอคทีฟจะใช้โลหะเติมที่มีส่วนผสมของ Ti หรือ

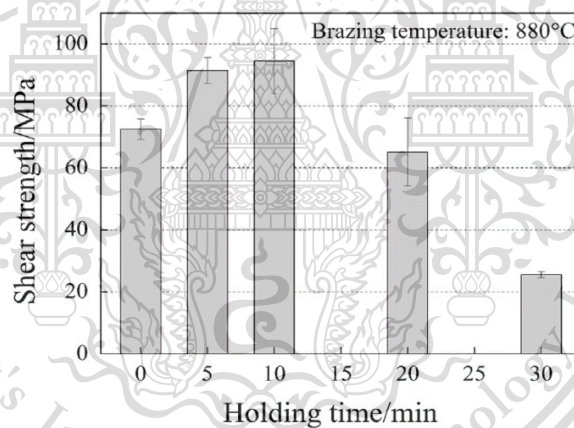
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Zr การเติม Ti ลงในส่วนประกอบของโลหะเติมส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและเกิดการเปือกที่ดีขึ้น แต่การแล่นประสานแบบแอคทีฟส่วนใหญ่จะดำเนินการภายใต้สุญญากาศ และมี 3 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การแล่นประสานเซรามิกกับโลหะประสบความสำเร็จ คือ 1. Material Selection 2. Joint Design 3. Wettability [2]



รูปที่ 1.1 ผลของอุณหภูมิในการแล่นประสานต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยประสาน  $Al_2O_3$  [3]



รูปที่ 1.2 ผลของเวลาในการแล่นประสานต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยประสาน  $Al_2O_3$  [3]

จากการศึกษางานวิจัยเซรามิก  $Al_2O_3$  แล่นประสานกับโลหะผสม TiAl โดยใช้โลหะเติม Ag-Cu-Ti จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของรอยประสานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิประสานจาก 840 °C เป็น 880 °C จากนั้นความแข็งแรงลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิประสานเพิ่มขึ้นเป็น 940 °C ความแปรผันของความแข็งแรงรอยต่อตามฟังก์ชันของเวลาในการประสานนั้นมีความคล้ายกับอุณหภูมิประสานดังแสดงในรูปที่ 1.2 ชิ้นงานสามารถรับความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) สูงสุด 94 MPa เมื่อแล่นประสานที่อุณหภูมิ 880 °C เป็นเวลา 10 นาที งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการพารามิเตอร์การแล่นประสานที่เหมาะสมโดยการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดก่อน จากนั้นนำอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้ไปหาเวลาประสานที่เหมาะสมต่อ [3] ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิการแล่นประสานและเวลาการแล่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ตามการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ประสานส่งผลอย่างไรต่อคุณภาพของรอยประสานระหว่างเซรามิกกับโลหะ เพื่อต้องการปรับปรุงการเล่นประสานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยวิธีทำให้รอยประสานมีประสิทธิภาพมากขึ้น คือ หาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสาน

จากปัญหาที่ยังไม่มีการศึกษาอุณหภูมิการเล่นประสานและเวลาการเล่นประสานที่ส่งผลอย่างไรต่อคุณภาพรอยประสาน จึงเป็นที่มาของงานวิจัยการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงเหนียวของรอยประสานของชิ้นงานโดยมีปัจจัยสำคัญที่ศึกษา คือ อุณหภูมิการเล่นประสานและเวลาการเล่นประสาน ในการศึกษาครั้งนี้ยังมีการนำข้อมูลทางสถิติมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 และมีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยประสาน เพื่อต้องการรอยประสานที่แข็งแรงที่สุดและนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่มีการเล่นประสานเซรามิกกับโลหะได้อย่างเหมาะสมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ อุณหภูมิการเล่นประสานและเวลาการเล่นประสาน
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาครอยประสานของการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110

## 1.3 ขอบเขตการศึกษางานวิจัย

1. ออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ ( $3^k$  Factorial Design) สำหรับการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสาน
2. พิจารณาการเชื่อมแบบแอคทีฟ (Active) ระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์ ขนาด  $8 \times 8 \times 8.5$  มม. และเหล็กกล้า Bohler k110 ขนาด  $12 \times 20 \times 13$  มม. โดยเลือกใช้ 49/Cu เป็นโลหะเติม
3. พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสาน คือ อุณหภูมิประสาน  $690^\circ\text{C}$ ,  $710^\circ\text{C}$  และ  $730^\circ\text{C}$  เวลาประสาน 15 นาที, 30 นาที และ 45 นาที ตามลำดับ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ได้ทราบอุณหภูมิและเวลาการเล่นประสานว่าส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสานหรือไม่ เพื่อนำข้อมูลนี้ไปเป็นแนวทางประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่มีการประสานระหว่างเซรามิกกับโลหะได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อตกลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

3. ได้ทราบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยประสานระหว่างเซรามิกกับโลหะที่นำมาศึกษา

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานจะเรียงตามลำดับขั้นตอนที่แสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2563					พ.ศ. 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและระบุหัวข้อที่สนใจ	→									
2. ระบุขอบเขตของงาน วัตถุประสงค์และประโยชน์ของ โครงการนี้		→								
3. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และออกแบบการทดลอง			→							
4. เตรียมชิ้นงานสำหรับการ เล่นประสาน				→						
5. จัดทำ Jig เพื่อจับชิ้นงาน					→					
6. ทำการเล่นประสานชิ้นงาน แฉีกทีพีในเตาอบแบบท่อ						→				
7. ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค ของชิ้นงาน								→		
8. ศึกษาข้อผิดพลาดและ ปรับปรุงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น									→	
9. รวบรวมข้อมูลเพื่อทำเล่ม รายงานวิจัย										→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรื่อง การเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับ เหล็กกล้า K110 ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. กระบวนการเล่นประสานเซรามิกกับโลหะ
2. สแตนคาร์ไบด์
3. เหล็กกล้า K110
4. โลหะเติม
5. วิธีการประสานแบบแอคทีฟ (Active Metal Brazing)
6. ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน Thermal expansion coefficient (CTE)
7. การออกแบบการทดลอง Design of experiments (DOE)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
9. เทคนิคเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)
10. การวิเคราะห์พื้นผิวแตกหัก
11. การแตกหักแบบเหนียวและแบบเปราะ (Ductile Fracture and Brittle Fracture)

#### 2.1 กระบวนการเล่นประสานเซรามิกกับโลหะ

การประสานเซรามิกกับโลหะในอดีตได้กระทำในสองวิธี คือ 1. การยึดติด และ 2. การบัดกรีหรือ การประสาน โดยที่ส่วนประกอบของเซรามิกจะต้องมีการเคลือบชั้นโลหะก่อน (การเคลือบด้วยสุญญากาศ กระบวนการชุบ Mo-Mn Oxide และกระบวนการชุบหรือการประสานแบบแอคทีฟ) ในหลาย ๆ กรณีการ ยึดติดหรือการประสานเป็นที่ต้องการมากกว่ากว เนื่องจากโลหะบัดกรี (หรือตัวยึด) เป็นโลหะ นำ ความร้อนได้ดี สามารถปิดสนิทและไม่ทำให้เกิดความชื้น เมื่อพิจารณาการยึดติดเซรามิกกับโลหะพบว่า ปัญหาค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อน (CTE) มีข้อจำกัด เนื่องจากการประสานจะละลาย เมื่อมีอุณหภูมิมากกว่า 450 °C และเมื่อเย็นตัวลงความเค้นที่แข็งตัวอาจทำให้ชิ้นส่วนแตกหักหรือบิดเบี้ยว ได้หลายครั้งที่รอยประสานโลหะกับเซรามิกจึงต้องใช้โลหะที่มีค่า CTE ต่ำ เช่น Kovar, Invar หรือ Molybdenum ในทางกลับกันการบัดกรีหรือการประสานตามความหมาย คือ จะละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่า

450 °C และปกติจะใกล้ 250 °C ด้วยเหตุนี้ข้อต่อบัดกรีจึงดีกว่มากในการเชื่อมเซรามิกกับโลหะเพราะ ไม่ว่ากรณีใดก็ตามการประสานจะต่ำกว่ามากเนื่องจากการแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าข้อต่อประสาน ข้อแม้ของ

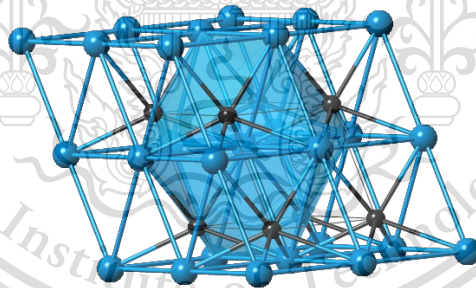
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

การบัดกรีแบบเดิมยังคงอยู่ที่ชั้นโลหะยึดติดจะต้องวางบนพื้นผิวเซรามิกก่อน จากนั้นตามด้วยกระบวนการบัดกรี-ฟลักซ์เพื่อขีดขวางออกไซด์ที่ก่อตัวบนโลหะและโลหะเคลือบบนเซรามิกเมื่อถูกให้ความร้อนในการเชื่อมประสาน [4]

## 2.2 ทังสเตนคาร์ไบด์

ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีส่วนผสมทังสเตนและอะตอมของคาร์บอนเท่ากัน บางครั้งเรียกว่า คาร์ไบด์ซีเมนต์ หรือ คาร์ไบด์ เป็นโลหะที่แข็งที่สุดมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าโลหะหรือโลหะผสมรวมทั้งเหล็ก และเป็นวัสดุที่ต้องการสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องทนต่อการสึกหรอทุกรูปแบบ รวมถึงการขัดถู การกัดกร่อน การสึกหรอหรือการกัดกร่อนของโลหะกับโลหะ เนื่องจากทังสเตนคาร์ไบด์มีความเหนียวสูง มีความสามารถในการบีบอัดสูง ทนต่อการโก่ง รักษาค่าความแข็งที่อุณหภูมิสูง และมีความสมบัติทางกายภาพที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานตัดโลหะ ทังสเตนคาร์ไบด์มีความแข็งสูงกว่า HSS (ค่าความแข็งประมาณ HV 2600) มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 2870 °C

ทังสเตนคาร์ไบด์สามารถรีดและขึ้นรูปเป็นผงสีเทาละเอียด ซึ่งถือได้ว่าเป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดหนาประมาณสามเท่าของเหล็กแข็ง มีค่า Young's Modulus ประมาณ 550 เทา และมีความหนาแน่นกว่าเหล็กหรือไทเทเนียม เปรียบได้กับคอร์รันดัมหรือโพลินด้วยค่าความแข็ง สามารถขัดผิวได้ด้วยวัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น โบรอนไนไตรด์ และเพชรอื่น ๆ ในรูปของผงลั่ว [5] โดยทังสเตนคาร์ไบด์มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทังสเตนคาร์ไบด์ [5]

### 2.2.1 คุณสมบัติหลักของทังสเตนคาร์ไบด์

ทังสเตนคาร์ไบด์มีความแข็งสูงมากโดยมีค่าความแข็งแรงอยู่ที่ประมาณ 86-93 HRA ซึ่งเท่ากับ 68-81 HRC มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีมากโดยความแข็งอยู่ที่ประมาณ 60 HRC ซึ่งต่ำกว่า 900-1000 °C มีความต้านทานที่ดี บางเกรดสามารถหลอมเหล็กได้ดีกว่า 100 เทา ส่วนทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีตัวเอกสารนี้ใช้ยึดนิกเกิลและโครเมียมจะมีความทนทานต่อสารละลายที่เป็นกรดและทนต่อแรงกระแทก เมื่อพิจารณาจากข้อมูลดังกล่าวนี้ทังสเตนคาร์ไบด์เหมาะสำหรับการตัดเครื่องมือในเชิงอุตสาหกรรม เช่น มีดกลึง [5] นำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## 2.2.2 สมบัติทางกายภาพของทังสเตนคาร์ไบด์

ทังสเตนคาร์ไบด์มีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ที่ 2870 °C และมีจุดเดือด 6000 °C เมื่ออยู่ภายใต้แรงดันเท่ากับ 760 มิลลิเมตรต่อเฮกตาร์ โดยมีค่าการนำความร้อน  $84.02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน  $5.8 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ทังสเตนคาร์ไบด์เป็นสิ่งที่ยากมากอันดับที่ 9 ในระดับ Mohs ซึ่งมีจำนวนวิกเกอร์จำนวน 1700-2400 มีโมดูลัสของยังที่ประมาณ 550 GPa โมดูลัสของเฉื่อย 439 GPa และโมดูลัสเฉือน 270 GPa ซึ่งทังสเตนคาร์ไบด์มีความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกสูงมากที่สุดที่ 6800 MPa แต่มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำสุดเพียง 35 MPa

ความเร็วของคลื่นตามยาวผ่านท่อนบางของทังสเตนคาร์ไบด์ คือ 6220 m/s ด้วยความต้านทานไฟฟ้าต่ำ โดยความต้านทานไฟฟ้าของพอร์ทอพอเซลดเทียบได้กับโลหะบางชนิด ห้องสุญญากาศสามารถหล่อขึ้นได้โดยนิกเกิลและโคบอลต์ที่หลอมละลาย จากการตรวจสอบแผนภาพเฟสของระบบ W-C-Co แสดงให้เห็นว่า WC และ Co ก่อตัวเป็น Eutectic Binary แบบ Bseudo แผนภาพเฟสยังแสดงให้เห็นว่ามีสิ่งที่เรียกว่า  $\eta$ -carbides ที่มีองค์ประกอบ (W, Co) 6C ซึ่งสามารถสร้างได้และความจริงที่ว่าชั้นตอนเหล่านี้ประปรายเป็นเหตุผลที่การควบคุมปริมาณคาร์บอนในโลหะหนัก WC-Co เป็นสิ่งสำคัญ [5]

## 2.2.3 คุณสมบัติทางเคมีของทังสเตนคาร์ไบด์

เนื่องจากทังสเตนเป็นโลหะทรานซิชันจึงมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า คือ ตั้งแต่ +2 ถึง +6 สารประกอบของทังสเตนมีเลขออกซิเดชันสูงกว่าจะมีสมบัติเป็นกรด และเลขที่มีออกซิเดชันต่ำกว่าจะมีสมบัติเป็นเบสซึ่งไม่ค่อยเสถียรนัก สารประกอบของทังสเตนที่มีเลขออกซิเดชัน +6 เสถียรที่สุด โดยมีสมบัติทางเคมี ดังนี้

1. ทังสเตนในรูปโลหะอิสระสามารถต่อต้านโลหะเหลวเป็นจำนวนมากได้เป็นอย่างดี เสถียรในสารละลายเบส แอมโมเนีย และกรดนอนออกซิเดชัน (Non-Oxidizing Acid) ทั่วไป แต่ละลายอย่างรวดเร็วในกรดผสมของกรดไฮโดรฟลูออริกและกรดไนตริก
2. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C ทังสเตนจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนอย่างรวดเร็วเป็นไตรออกไซด์ ( $\text{WO}_3$ )
3. ทังสเตนจะเสถียรในบรรยากาศของไฮโดรเจนและแอมโมเนีย
4. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 °C ทังสเตนรวมตัวกับ C, B, Si จะเกิดสารประกอบไบนารี  $\text{W}_2\text{C}$ , WC, WB,  $\text{WB}_2$  ตามลำดับ
5. ทังสเตนทำปฏิกิริยากับเฮไลต์ที่เหมาะสมเกิดทังสเตนเฮไลต์ เช่น  $\text{WF}_6$  ที่อุณหภูมิห้อง,  $\text{WCl}_4$  ที่อุณหภูมิประมาณ 250 °C,  $\text{WBr}_5$  และ  $\text{WI}_4$  ที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 °C เมื่อสัมผัสกับน้ำหรืออากาศชั้นเฮไลต์ของทังสเตนจะถูกไฮโดรไลต์เกิด Oxyhalides และในที่สุดเป็นกรดทังสติก ( $\text{H}_2\text{WO}_4$ ) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

### 2.3 เหล็กกล้า K110

เหล็กกล้า K110 เป็นเหล็กกล้าสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์งานเย็น เป็นเหล็กกล้าทำเครื่องมือชนิดไฮคาร์บอน ไฮโครเมียม (12% โครเมียม) ที่คงรูปร่างเดิมได้ดีหลังจากการชุบแข็ง เป็นเหล็กที่มีความสามารถในการชุบแข็งที่ดีและมีความเหนียวดีมาก ลักษณะเด่น คือ มีความทนต่อการสึกหรอดี รักษาคมตัดได้ดีเยี่ยม รวมทั้งมีคมเหนียวแน่นสูง ความแข็งสูงมากเมื่อผ่านการชุบแข็ง ชุบแข็งง่าย สามารถชุบ Nitriding ได้ ทนต่อการเสียดสีดีมาก ทนต่อแรงกดอัดได้ดีเยี่ยม คุณภาพสูง ทนทานการเสียดสีสูง และมีความเหนียวแกร่งพอสมควร เหล็กกล้า K110 ใช้ทำแม่พิมพ์ตัดโลหะ แม่พิมพ์กรรไกร มีดตัดเหล็ก ไขมีดสำหรับตัดกระดาษ ไขมีดตัดเชิอนแบบวงกลม แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ทำลูกรีดเกลียว ลูกรีดแป๊บ ลูกรีดสำหรับมันว่ท่ต่าง ๆ แม่พิมพ์งานเย็น แม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติก เพราะเหล็กกล้า K110 มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีความแม่นยำสูง [6] เกรดมาตรฐานทั่วไป คือ SKD11, DIN 1.2379 ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเกรดเหล็กกล้า [7]

ชนิดเหล็กกล้า Classification	JIS	AISI	DIN	JUTHAWAN NIPPON KOSHUHA	DAIDO	HITACHI	BOHLER	ASSAB	SANYO	THYSSEN	AICHI
เหล็กกล้างานร้อน Hot Work Tool Steel	SKD61	H13	1.2344	KDA15	DHA1	DAC	W 302	8407	QD61	2344	AUD61
	-	-	1.2367	1.2367( HEAVY DUTY & SPECIAL HOT WORK )	-	-	-	-	-	-	-
	SKT4	DB6	1.2714	KTV	GFA	DM	-	ALVAR 14	QT 41	-	SKT4A
เหล็กกล้างานเย็น Cold Work Tool Steel	SKD11	D2	1.2379	KD11S	DC11	SLD	K110	XW42	QC 11	2379	AUD11
	SKD11(Modified)	-	-	KD11M	DCS3	SLD-MAGIC	K340	88	OCM7,QCM8	-	-
เหล็กกล้าชุบแข็งด้วยเปลวไฟ Flame Hardening Steel	-	-	-	FH5	G05	HMD5	-	-	QF3	-	SK105V
เหล็กกล้าไฮสปีด High Speed Steel	SKH51	M2	1.3343	H51	MH51	YXM1	S600	-	QH51	-	-
	S45C	C1045	CK45	S45C	S45C	S45C	S45C	-	S45C	S45C	-
	SCM415	4115	1.7262	SCM415 ( SCM211 )	-	-	-	-	SCM415	-	SCM415
	SCM440	4140	1.7225	SCM440 (SCM4)	-	-	V 320	709	SCM440	-	SCM440
	-	-	(42CrMo4)	-	-	-	-	-	-	-	-
เหล็กกล้าอะไหล่ Machinery Steel	SNCM439	4340	1.6582	SNCM439 (SNCM8)	-	-	V 155	705	SNCM439	SNCM439	-
	SNCM220	8620	1.6523	SNCM220 (SNCM21)	-	-	-	-	SNCM220	-	SNCM220
	SNCM439	4340	34CrNiMo6	6582	-	-	-	-	SNCM439	-	SNCM439
	(PRE-HARD)	-	-	(PRE-HARD)	-	-	-	-	-	-	-
เหล็กแข็งแม่พิมพ์พลาสติก Plastic Mould Steel	S50C	C1050	CK50	S50C	S50C	S50C	S50C	760	-	S50C	-
	P20	P20	1.2311	P20	PX 4	HPM 7	M202	718	-	P20	-
	BETTER THAN S55C	C1055	CK55	KPMAX	PXZ	-	-	-	-	-	-
	BETTER THAN P20	BETTER THAN P20	-	KPM30	PX5 ( PX7 )	HPM7	-	KTSM3M	PCM 30	-	-
เหล็กลูกปืน Bearing Steel	SUJ2	52100	1.3505(100Cr6)	SUJ2	-	-	R100	-	-	-	SUJ2
เหล็กสปริง Spring Steel	SK5	-	-	SK5	SUP10	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	A7075	-	-	-	-	-	-	-
อลูมิเนียมอัลลอยด์ Aluminium Alloys	-	-	-	A6061	-	-	-	-	-	-	-
เหล็กแผ่นทนแรงดึงสูง High Strength Structural Plate	SM50	A572Gr50	17100(ST52-3)	ST52-3 N	-	-	-	-	-	-	-
เหล็กทนสึก Wear Resistant Steel Plate	-	-	-	RAEX400	-	-	-	-	-	-	-
เหล็กเหนียว Mild Steel	-	-	-	RAEX450	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	S5400	-	-	S5400	-	-	-	S5400
	-	-	-	(S541)	-	-	-	-	-	-	-
เหล็กแผ่นอุตสาหกรรมต่อเรือ LLOYD'S Standard	-	-	-	LR-GRADE A	-	-	-	-	-	-	-
เหล็กแผ่นทนแรงดึงสูงสำหรับ อุตสาหกรรมต่อเรือ LLOYD'S Standard	-	-	-	EH36	-	-	-	-	-	-	-

### 2.4 โลหะเติม

โลหะเติมเป็นโลหะผสมหรือโลหะที่ไม่ผสมจะถูกวางไว้ระหว่างสองวัสดุ (หรือมากกว่า) โลหะเติมมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมละลายเพื่อไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนที่แนบสนิทสองชิ้นทำให้เกิดรอยต่อประสานหรือบัดกรี โดยโลหะเติมจะถูกปล่อยให้แข็งตัวกลายเป็นข้อต่อ

ภายในชุดประสาน โลหะเติมมีคุณสมบัติการหลอมและการไหลที่ดีเพื่อให้สามารถกระจายโดยแรงดึงดูดใน  
ข้อต่อประสานอย่างเหมาะสม โลหะเติมผลิตข้อต่อที่ตรงตามข้อกำหนดในการใช้งาน เช่น ความแข็งแรง  
และความต้านทานการกัดกร่อน โดยโลหะเติมมาตรฐาน ได้แก่ ดีบุก ตะกั่ว ทองแดง อะลูมิเนียม นิกเกิล  
และโลหะเติมที่พบในรูปของแข็ง เช่น Rings, Wire, Slugs, Washers และ Powder [8]

## 2.5 วิธีการประสานแบบแอคทีฟ (Active Metal Brazing)

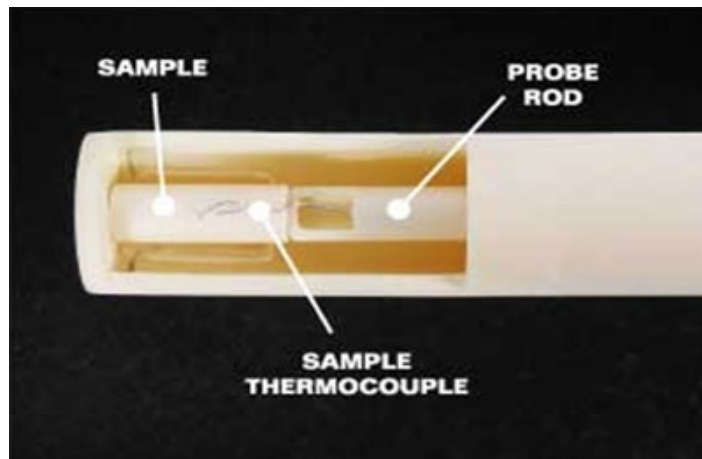
การประสานแบบแอคทีฟ คือ การเติมโลหะ เช่น เติมหาทเทเนียมลงในโลหะผสมในการประสาน  
จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับพื้นผิวของเซรามิกทำให้โลหะผสมที่จะประสานเปียกโดยตรงบนพื้นผิว  
เซรามิกในสุญญากาศได้ ซึ่งจะช่วยให้ขั้นตอนในกระบวนการประสานเซรามิกกับโลหะ ทำให้สามารถ  
ประสานโดยตรงกับเซรามิกได้โดยไม่ต้องชุบโลหะหรือชุบพื้นผิวก่อนที่จะทำการบัดกรี ผลลัพธ์คือ  
ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย โดยการประสานแบบแอคทีฟที่ใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ ไทเทเนียมหรือ  
อะลูมิเนียม เมื่อได้รับความร้อนอย่างถูกต้องจะสร้างพันธะกับวัสดุที่มีลักษณะคล้ายเซรามิกแทบทุกชนิด  
โลหะผสมเหล่านี้ประกอบด้วยองค์ประกอบแอคทีฟ (โดยทั่วไปคือไทเทเนียม) ซึ่งทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ  
พื้นผิวของเซรามิกทำให้โลหะผสมที่จะไปประสานเปียกลงบนพื้นผิวโดยตรง ความสามารถของไทเทเนียม  
ในการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกไซด์ทำให้เกิดชั้นปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ ส่งผลให้เกิดชั้นโลหะที่  
เปียกด้วยองค์ประกอบอื่น ๆ ของโลหะผสมที่ใช้งานอยู่ ดังนั้นการประสานโลหะแบบแอคทีฟจึงเป็นวิธีการ  
ทั่วไปในการประสานเซรามิกกับโลหะ [2]

## 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน Thermal Expansion Coefficient (CTE)

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE) คือ การวัดการขยายตัวหรือการหดตัวของวัสดุ  
ด้วยอุณหภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวที่เกี่ยวข้องกับการขยายตัวทางความร้อนมีน้อยมาก CTE  
มักจะแสดงเป็น Microstrains ต่อการเปลี่ยนแปลงของหน่วยอุณหภูมิ ซึ่งคือค่าของความแตกต่างความ  
ยาวหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปโดยที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 °C เมื่อเทียบกับความยาวหรือ  
ปริมาตรเริ่มต้น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้นเป็นคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ  
ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ โครงสร้างผลึก อุณหภูมิจุดหลอมเหลว ความหนาแน่นของ  
ชิ้นงาน และอุณหภูมิในการเผา หรือ CTE ในอีกความหมายหนึ่งก็คือ คุณสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึง  
ขอบเขตที่วัสดุขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งสารต่าง ๆ จะขยายตัวปริมาณที่ต่างกันในช่วงอุณหภูมิสั้น ๆ  
การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุเชิงเส้นจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยการขยายตัว  
ทางความร้อนจะพบการใช้งานในการสร้างเทอร์โมมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน [10]

CTE สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการ Run เครื่อง Dilatometer เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้น โดยปกติจะอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1000 °C และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจะอยู่ในช่วง 20-500 °C เพราะเป็นช่วงที่ไม่เกินอุณหภูมิของ Quartz Inversion ซึ่งอาจจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานแตกต่างกันไปได้



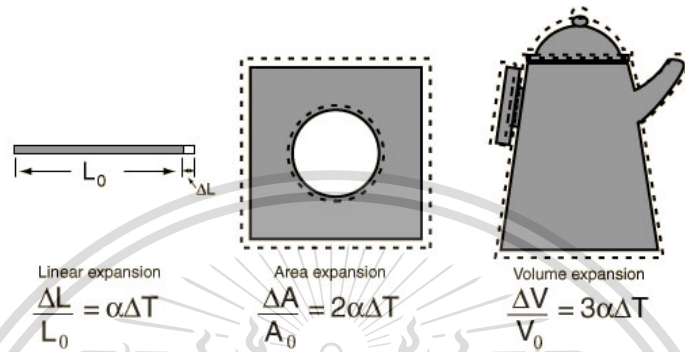
รูปที่ 2.3 เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยทั่วไปจะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

- $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
- T คือ อุณหภูมิห้อง
- t' คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้วัด
- $L_0$  คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง
- L คือ ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด



รูปที่ 2.4 สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ถ้าคำนวณโดยใช้ค่าความยาวที่แตกต่างของชิ้นงานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะมีค่าเป็น Linear Expansion ซึ่งนักเซรามิกที่วิจัยทางด้าน Advance Ceramic มักจะใช้ค่า Linear Expansion ในการอ้างอิงค่าของวัสดุ แต่ถ้าเป็นในอุตสาหกรรมเซรามิกแบบดั้งเดิม Conventional Ceramic มักจะคุ้นเคยและใช้ค่า Volume Expansion ในการอ้างอิงสำหรับเนื้อดินและสีเคลือบ หลายครั้งจึงพบว่านักวัสดุศาสตร์สมัยใหม่กับนักอุตสาหกรรมจะพูดถึงค่านี้ด้วยตัวเลขคนละตัวกันทั้งที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุเซรามิกเทียบกับวัสดุอื่น ๆ [10]

Type of body	Measured range (°C)	Average coefficient (cm./cm.°C) x10 <sup>-6</sup>
Fused silica	20 - 1000	0.48
Cordierite insulators	20 - 1000	2.10
Zircon porcelain	20 - 700	3.68
Vitreous china	20 - 100	4.00
Chemical stoneware	20 - 1000	4.75
High tension porcelain	20 - 700	5.30
Semi-vitreous dinnerware	30 - 1000	5.80
Rutile insulators	20 - 1000	7.20
Steatite	20 - 700	6.2 - 9.1
Quartz	20 - 400	17
Alumina	20 - 1000	8
NaCl	0	40
H <sub>2</sub> O	0	90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	9

สำหรับวัสดุเซรามิกนั้นถ้ามีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำก็จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) รวมทั้งค่า Spalling Resistance ตัวอย่างเช่น เนื้อดินคอร์เดียไรท์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนอยู่เพียง  $2.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากทำให้มีการใช้งานเนื้อคอร์เดียไรท์เป็นแผ่นรองเผา (Slab), จี้อ (Sagger) และ Kiln Furniture อื่น ๆ รวมทั้งเป็นผลิตภัณฑ์บรรจุอาหารที่สามารถทนความร้อนได้ในเตาอบในผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีผิวเคลือบเพื่อสร้างความสวยงามนั้นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนของเนื้อดินควรมีค่าสูงกว่าของสีเคลือบเพื่อให้ที่ชั้นเคลือบอยู่ในสภาพของแรงอัด (Compressive) แต่ไม่ควรให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเนื้อดินสูงกว่าชั้นเคลือบ มากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดปัญหาเคลือบร่อน (Peeling) ภายหลังการเผาขึ้นได้ แต่ถ้าชั้นเคลือบมีค่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงกว่าเนื้อดิน ชั้นเคลือบจะอยู่ในรูปของแรงดึง (Tension)

เอกสารนี้จะทำให้เกิดปัญหาผิวเคลือบร้าว (Crazing) ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาห่วยเวลานำไปใช้งานได้ [10] ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## 2.7 การออกแบบการทดลอง Design of Experiments (DOE)

การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาอย่างดีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสืบค้นตัวแปรในกระบวนการ (Process Variable) ตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (Product Variable) หรือองค์ประกอบของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพในการผลิต เนื่องด้วยทรัพยากรที่มีอย่างจำกัด (เวลา ต้นทุนการทดลอง บุคลากร วัสดุที่ใช้ในการทดลอง และอื่น ๆ) ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าการทดลองที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้รับการวางแผนมาก่อน การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาโดยมากจะมี 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน การคัดเลือก การหาค่าที่ดีที่สุด และการทวนสอบ

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลภาพรวมจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลองควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อม ๆ กันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งเพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลา ประหยัดต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์อิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้โดยอิทธิพลร่วม คือ ผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลาย ๆ กระบวนการถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วมชัดเจนนัก ในการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี General Full Factorial การทดลองแต่ละครั้งในแต่ละปัจจัยจะมีค่าระดับหลายการทดลองในทุกกรณีจะทำครบทุกค่าระดับของทุกปัจจัยตัวแบบ General Full Factorial อาจจะนำไปใช้ในการทดลองขนาดเล็กเพื่อทำการคัดเลือกปัจจัย (Screening) หรือเพื่อทำการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

โดยปกติ Minitab จะทำการในการทดลองซึ่งลำดับการทำการทดลองตามเงื่อนไขปัจจัยการทดลอง (Factor Combination) เรียกลำดับรัน (Run Order) ในการสุ่มลำดับรันนั้นเพื่อช่วยลดอิทธิพลของปัจจัยที่ไม่ได้ถูกรวมอยู่ในการทดลองให้น้อยลง โดยเฉพาะอิทธิพลที่ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent) อย่างไรก็ตามการสุ่มทำให้ลำดับรันไม่เป็นไปอย่างที่คาดการณ์ตัวอย่างเช่นในทางปฏิบัติเป็นเรื่องยากต้องเสียค่าใช้จ่ายมากในการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยหรือหลังจากระดับของปัจจัยมีการเปลี่ยนแปลงต้องใช้ระยะเวลาที่นานกว่าที่ระบบจะกลับเข้าสู่สถานะเสถียร ซึ่งถ้าเป็นสถานการณ์แบบนี้อาจจะไม่ทำการสุ่มการทดลองเพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัย การสร้างตัวแบบการทดลองแบบ General Full Factorial ในกรณีที่มีปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าระดับ และสามารถสร้างตัวแบบได้จนถึง 15 ปัจจัย แต่ละปัจจัยต้องมีค่าระดับอย่างน้อย 2 ค่าระดับ แต่ไม่เกิน 100 ค่าระดับ

ใน Normal Probability ของค่า Effects เมื่อค่า Effects ใดไม่อยู่ใกล้เคียงเส้นตรงในกราฟให้ถือว่า Effect นั้นมีความสำคัญจึงมักจะเป็น Effect ที่มีขนาดใหญ่และไม่อยู่ใกล้เคียงกับเส้นตรงส่วน Effect ที่ไม่มีความสำคัญจะมีขนาดเล็กหรืออยู่ใกล้ค่าศูนย์จึงมักจะถูกอยู่ใกล้เส้นตรงในกราฟ ถ้าไม่มีพจน์ Error Effect Minitab จะใช้วิธีการของ Lenth's ในการหาว่า Effect ใดที่มีความสำคัญ ถ้ามีค่า Error Effect Minitab จะใช้การเทียบเคียงกับ P-value ที่แสดงในตาราง Session เพื่อทำการหาว่าค่า Effect ใดมีความสำคัญ ซึ่งโดยปกติ Normal Probability จะใช้ค่า  $\alpha = 0.05$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ใช้ Pareto ในการหาขนาดและความสำคัญของ Effects ในแผนภูมิจะแสดงค่าสัมบูรณ์ของ Effect และแสดงเส้นอ้างอิงในแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบ Effect ใดที่มีส่วนเกินออกนอกเส้นอ้างอิงจะถือว่าเป็น effect ที่มีความสำคัญ ซึ่ง Minitab จะใช้วิธีการใดขึ้นอยู่กับค่า Error ที่มี ถ้าไม่มีค่า Error Effect Minitab จะใช้วิธีการของ Lenth's ในการลากเส้นอ้างอิงและแสดงค่า Unstandardized Effects ในแผนภูมิ แต่ถ้ามีค่า Error Effect Minitab จะใช้การเทียบเคียงกับ P-Value ที่แสดงในตาราง Session เพื่อทำการหาว่า Effect ใดมีความสำคัญและแสดงค่า Standardized Effect ในแผนภูมิ เส้นอ้างอิงจะสอดคล้องกับค่า  $\alpha = 0.05$  ซึ่งเป็นค่าอัตโนมัติในโปรแกรม

กราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ กราฟพล็อตค่าเฉลี่ยที่แต่ละค่าระดับปัจจัยซึ่ง Main Effect สามารถสร้างได้จากข้อมูลดิบของค่าตอบสนอง (Raw Response Data) คือ ค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนองที่แต่ละค่าระดับปัจจัย ค่า Fitted ซึ่งได้หลังจากทำการวิเคราะห์ตัวแบบแล้วจะเป็นค่าที่ได้จากสมการในการแทนค่าที่แต่ละค่าระดับปัจจัย

ในกรณีที่ตัวแบบเป็นแบบสมดุล (Balanced Design) การสร้าง Main Effect Plot ด้วยค่าตอบสนองทั้ง 2 ชนิด มักไม่มีข้อแตกต่าง แต่สำหรับกรณีที่ตัวแบบเป็นแบบไม่สมดุล (Unbalanced Design) กราฟที่ได้อาจจะมีความแตกต่างกันบ้าง ในการใช้ค่าข้อมูลดิบสำหรับ Unbalanced Design อาจช่วยให้เห็นภาพได้ว่าอิทธิพลปัจจัยหลักของปัจจัยใดมีความสำคัญ ส่วนการใช้ค่า Fitted ในกราฟเพื่อทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำขึ้น

Minitab จะทำการพล็อตค่าเฉลี่ยที่แต่ละค่าระดับปัจจัยจากนั้นทำการลากเส้นต่อจุดกัน ส่วนจุดที่เป็นจุดกลาง (Center Points) จะแสดงด้วยสัญลักษณ์ที่ต่างออกไปโดยทำการสร้างเส้นอ้างอิงโดยให้มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยรวม (Grand Mean) ซึ่ง Minitab จะสร้างภาพเดียวในกรณีที่ใส่ปัจจัยลงไป 1 ตัว และจะทำการสร้างเป็นชุดกราฟสำหรับกรณีที่มีการใส่ปัจจัยลงไปมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะทำให้สามารถเปรียบเทียบขนาดของแต่ละ Main Effects ได้ หรือสร้างกราฟแยกระหว่างค่าตอบสนองและปัจจัยแต่ละตัว แต่ถ้า Minitab ทำการสร้างกราฟเดี่ยวระหว่างค่าตอบสนองและคู่ปัจจัยถ้าใส่ชื่อปัจจัย 2 ตัวเท่านั้น แต่ถ้าใส่ชื่อปัจจัยมากกว่า 2 ตัว จะได้เมตริกซ์ของ Interaction Plot

อิทธิพลหลัก (Main Effect) เกิดขึ้นเมื่อค่าตอบสนองเปลี่ยนแปลงที่ระดับปัจจัยนั้นเปลี่ยนค่าโดยสามารถใช้ Main Effect เพื่อเปรียบเทียบว่าอิทธิพลของแต่ละปัจจัยใดมีความสำคัญมากกว่ากัน

กราฟอิทธิพลร่วม (Interaction) สามารถสร้างได้ที่ละคู่ปัจจัย ซึ่งเป็นการพล็อตค่าเฉลี่ยที่แต่ละค่าระดับปัจจัยโดยมีปัจจัยตัวที่สองคงที่ ซึ่ง Interaction สามารถสร้างได้จากข้อมูลดิบของค่าตอบสนอง (Raw Response Data) คือ ค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนองที่แต่ละค่าระดับปัจจัย ค่า Fitted ได้หลังจากทำการวิเคราะห์ตัวแบบแล้ว ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากสมการในการแทนค่าที่แต่ละค่าระดับปัจจัย

อิทธิพลร่วมระหว่างคู่ปัจจัยใดเกิดขึ้นเมื่อค่าตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนจากระดับต่ำไประดับสูงมีค่าการเปลี่ยนแปลงไม่เหมือนกัน หรือเมื่อปัจจัยที่สองอยู่ที่ค่าระดับต่างกัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคืออิทธิพลของปัจจัยหนึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สองซึ่งสามารถใช้อิทธิพลร่วมเพื่อเปรียบเทียบว่าอิทธิพลของแต่ละปัจจัยใดมีความสำคัญมากกว่ากัน

การหาค่าที่ดีที่สุด (Response Optimization) ใน Minitab เป็นการค้นหาเงื่อนไขของตัวแปรตั้งต้นที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด การทำ Optimization จะต้องหาเป้าหมายที่ต้องการของแต่ละตัวแปรตอบสนอง (Individual Desirability, d) รวมเป้าหมายของแต่ละตัวแปร เพื่อให้ได้เป้าหมาย Composite (Composite Desirability, D) และทำการหาตัวแปรตั้งต้นที่สามารถทำให้เกิดตามเป้าหมาย Composite [12]

## 2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่งถ่ายภาพชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการกราดไปบนพื้นผิวตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด (Electron Gun) เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับผิวชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมต่าง ๆ จะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ องค์ประกอบของพื้นผิว และคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยจุดเด่นของ SEM คือ มีระยะชัดลึกและมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial Resolution) สูง เนื่องจาก SEM ใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้น ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง [13]

## 2.9 เทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)

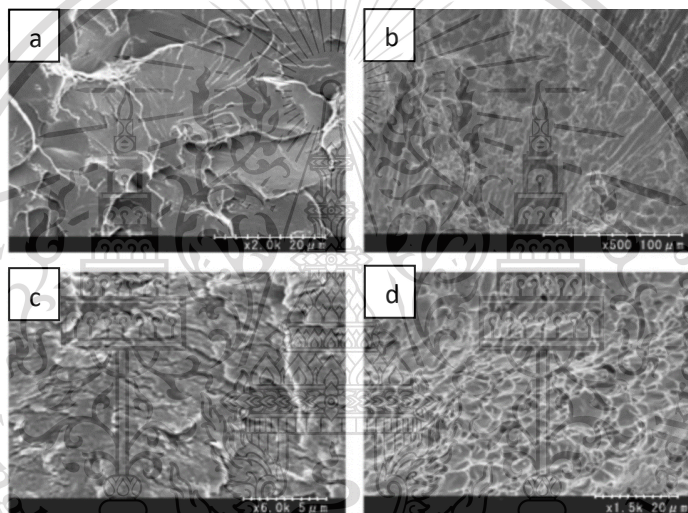
EDS เป็นสินค้าเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ปี 1970 ถูกนำมาใช้งานแทนที่ WDS (Wavelength Dispersive Spectroscopy) เนื่องจากใช้งานได้ง่ายกว่าและไม่จำเป็นต้องหมุนชิ้นงานไปมา กระบวนการของ EDS ค่อนข้างเร็ว เนื่องจากตัวจับสัญญาณจับสัญญาณของลักษณะพลังงาน X-rays จากช่วงของธาตุในชิ้นงานพร้อมกัน สำหรับ EDS ค่าความชัดเจนของพลังงานที่กระจายตัวจะอยู่ที่ประมาณ 150–200 eV ซึ่งไม่ดีเท่า WDS และธาตุเบาที่สุดที่จับได้คือ O ( $Z = 8$ ) ไม่ใช่ C ( $Z = 6$ ) แต่ข้อเสียเหล่านี้ไม่ใช่ส่วนสำคัญเท่าข้อดีของ EDS ซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำและวิเคราะห์ผลอย่างรวดเร็ว [14]

## 2.10 การวิเคราะห์พื้นผิวแตกหัก

เมื่อวัสดุที่เป็นโลหะเกิดการแตกหัก การแตกหักจะแตกต่างกันไปตามสาเหตุต่าง ๆ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ (Material Property) ระดับความเค้นที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก (Degree of Stress Which Caused Breakage) ผลกระทบของความเค้นที่เพิ่มขึ้นซ้ำ ๆ และลดลงซ้ำ ๆ (Repeated Effect of Stress-Increase and Decrease) สภาพแวดล้อม (Environment Conditions) เวลา (Time) และอุณหภูมิ (Temperature) ซึ่งสาเหตุการแตกหักสามารถระบุคร่าว ๆ จากโหมดการแตกหัก (Breakage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Mode) โดยสังเกตจากพื้นผิวการแตกหักของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) จากรูปที่ 2.4(a) เป็นพื้นผิวที่แตกหักทันทีโดยมีการเสียรูปของวัสดุเพียงเล็กน้อยภายใต้แรงกระทำที่อุณหภูมิต่ำ ลักษณะนี้เรียกว่า การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) จากรูปที่ 2.4(b) เป็นพื้นผิวการแตกหักของรอยแตกที่มีอุณหภูมิสูงของโลหะเชื่อมของ Stainless Steel และสามารถสังเกตเห็นโครงสร้างเสา (Columnar) ระหว่างการแข็งตัวได้ รูปที่ 2.4(c) คือ พื้นผิวการแตกหักของ Fatigue Fracture ซึ่งสังเกตได้จากผลของความเครียดที่เพิ่มขึ้นซ้ำ ๆ และลดลงซ้ำ ๆ เป็นเวลานาน และจากรูปที่ 2.4(d) คือ พื้นผิวแตกหักที่เกิดขึ้นหลังจากวัสดุฉีกออกโดยการรับแรงขนาดมาก รอยบุบละเอียดหรือลึ๋ม (Dimples) จะครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมด ลักษณะนี้เรียกว่า การแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) [15]



รูปที่ 2.5 พื้นผิวที่เกิดการแตกหักแบบต่าง ๆ ของวัสดุ [15]

## 2.11 การแตกหักแบบเหนียวและแบบเปราะ (Ductile Fracture and Brittle Fracture)

ความเหนียว (Ductile) ของโลหะที่พบเห็นกันก็คือ การที่วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเสียรูปก่อนที่จะแตกหัก (Fracture) ในที่สุด ส่วนความเปราะ (Brittle) ของวัสดุก็คือ การที่วัสดุไม่มีการอ่อนตัวหรือเสียรูปเมื่อรับแรงก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ซึ่งในลำดับต่อไปจะกล่าวถึงในรายละเอียดของความเหนียว (Ductile) และการเปราะ (Brittle) ของวัสดุ [17]

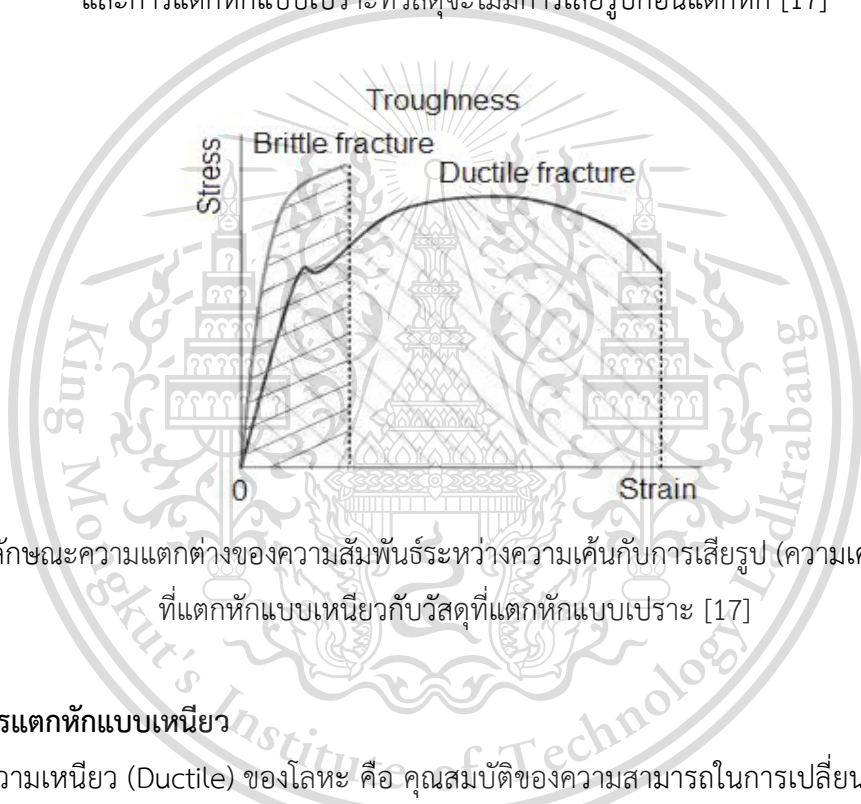
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Ductile and brittle fracture



รูปที่ 2.6 ลักษณะที่แตกต่างทางกายภาพระหว่างการแตกหักแบบเหนียวซึ่งวัสดุมีการคอดหรือเสียรูปก่อน และการแตกหักแบบเปราะที่วัสดุจะไม่มีการเสียรูปก่อนแตกหัก [17]



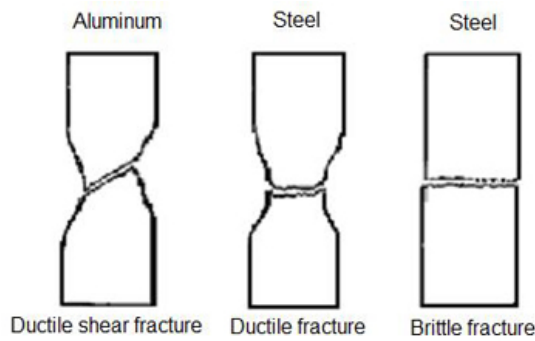
รูปที่ 2.7 ลักษณะความแตกต่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับการเสียรูป (ความเครียด) ของวัสดุที่แตกหักแบบเหนียวกับวัสดุที่แตกหักแบบเปราะ [17]

### 2.11.1 การแตกหักแบบเหนียว

ความเหนียว (Ductile) ของโลหะ คือ คุณสมบัติของความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ตัวอย่าง เช่น เหล็กเหนียวธรรมดา เกรด SS400 เมื่อนำมายืดหรือนำมาดึงก่อนที่จะขาดเหล็กเหล่านี้จะสามารถยืดตัวออกได้มาก หรือถ้าเรานำมาตีเหล็กเหล่านี้ก็จะสามารถที่จะเปลี่ยนรูปได้มากกว่า ซึ่งนิยามของคำว่าเหนียวให้เข้าใจว่าเป็นความสามารถในการยืดหยุ่นเมื่อรับแรงนั่นเอง โลหะหรือวัสดุที่มีความเหนียวมากก็สามารถยืดหยุ่นได้มากแต่ความแข็งแรงจะน้อย ส่วนโลหะหรือวัสดุที่มีความเหนียวน้อยจะมีความสามารถยืดหยุ่นน้อยเมื่อต้องรับแรงหรือรับภาระมากแต่จะมีความแข็งแรงมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างชิ้นงานที่แตกหักจากการผ่านการทดสอบแรงดึง [16]

การแตกแบบเหนียวจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

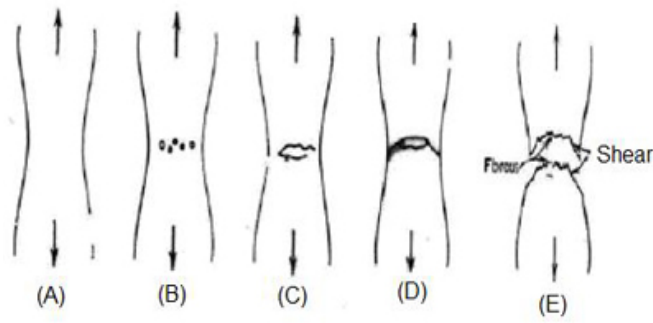
1. การเกิดโพรงเล็ก ๆ ภายในวัสดุ (Small Voids) ภายในบริเวณที่มีความเข้มข้นของการเปลี่ยนรูปสูงหรือบริเวณที่เป็นคอคอด
2. การเกิดรอยแตก (Crack) เมื่อเกิดโพรงเล็กขึ้นและในขณะเดียวกันตรงจุดที่เริ่มคอดต้องรับแรงต่อไปรอยเล็ก ๆ ดังกล่าวก็จะรวมตัวและลุกลามถึงกันจนเกิดเป็นรอยแยก (Crack) ที่ใหญ่ขึ้นและขยายตัวไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงที่กระทำ
3. รอยแยกจะขยายจากด้านในมาสู่ด้านนอกผิวชิ้นงานและชิ้นงานดังกล่าวจะแตกหักเสียหายในที่สุดโดยรอยผิวที่แตกนั้นเมื่อมองด้วยตาเปล่านั้นจะเห็นเป็นผิวหยาบ ฝ้าแสง และมีสีคล้ำ เนื่องจากการรวมตัวกันเป็นหลุมเล็ก ๆ ในขณะแตก

การแตกหักจากความเหนียวจะแสดงออกมาในรูปของการฉีกหรือการเสียรูปทรงของโลหะ โดยการฉีกขาดหรือเสียรูปที่เกิดขึ้นมากจนถึงขนาดวัสดุมีลักษณะเป็นเส้นออกมาก็มีให้เห็น สาเหตุของการเสียรูปของโลหะหรือวัสดุส่วนใหญ่มาจากการรับภาระมากเกินไป (Over Load) หรือการที่มีภาระที่กระทำกับโลหะหรือวัสดุไม่สม่ำเสมอ (Large Discontinuities Load) [16]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.9 รอยแตก (Void) ของการแตกหักแบบเหนียว [16]  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 2.10 ลำดับของการแตกหักแบบเหนียว [16]

### 2.11.2 การแตกหักแบบเปราะ

ความเปราะ (Brittle) เป็นคุณสมบัติทางกลของโลหะและวัสดุที่ตรงกันข้ามกับความเหนียว ในการแตกหักเสียหายของโลหะหรือวัสดุที่มีความเปราะนั้นจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดโดยที่ไม่มีการเสียรูปหรือเกิดความยืดขึ้นก่อน เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะหรือวัสดุที่มีความเปราะนั้นโมเลกุลจะจัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบและต้องใช้พลังงานอย่างมากในการจัดเรียงโมเลกุล ดังนั้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจึงมีความแข็งแรงสูงและยากหรือต้องใช้พลังงานมากในการแยกออกจากกัน โลหะหรือวัสดุที่มีความเปราะนั้นส่วนมากจะเป็นโลหะผสมที่ต้องการคุณสมบัติของความเปราะ เช่น เหล็กหล่อและเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) การแตกหักที่เกิดจากการเปราะจะมีลักษณะของการแตกหักที่เกิดจากการแตกตัวอย่างรวดเร็วของโลหะหรือวัสดุโดยที่ไม่มีการอ่อนตัวหรือเสียรูปก่อนการแตกหัก และพลังงานที่ปลดปล่อยออกมานั้นน้อยมาก โดยร่องรอยของการแตกหักที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นรอยยาวของการกะเทาะหรือรอยร้าวที่เป็นเส้นยาว

ลักษณะเด่นของการแตกแบบเปราะ

1. โลหะหรือวัสดุจะแตกหักโดยเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเล็กน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนรูปร่าง
2. ผิวโลหะที่แตกค่อนข้างตรงและค่อนข้างวาวเมื่อมองด้วยตาเปล่า
3. โลหะที่แตกแบบเปราะค่อนข้างจะมีอันตราย เนื่องจากสามารถแตกเปราะได้ง่ายในที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูงและถ้ามีรูพรุนมาก ๆ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

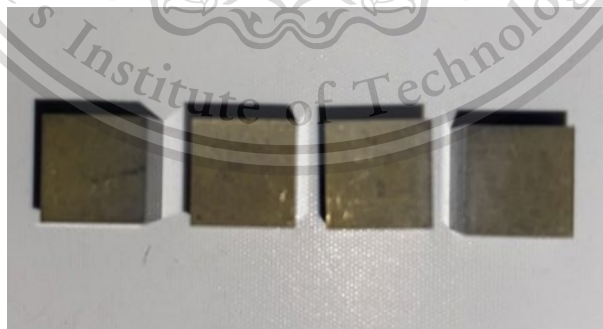
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัยของงานวิจัยเรื่อง การเล่นประสานทังสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
2. ขั้นตอนการจัดเตรียมอุปกรณ์
3. ขั้นตอนการเล่นประสาน
4. ขั้นตอนการทดสอบแรงเฉือน
5. การออกแบบการทดลอง Design of Experiments (DOE)

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 วัสดุสำหรับการเล่นประสานระหว่างทังสแตนคาร์ไบด์กับโลหะ มีดังนี้

1. ทังสแตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด  $8 \times 8 \times 8.5$  มม. จำนวน 36 ชิ้น
2. เหล็กกล้า Bohler k110 ขนาด  $12 \times 20 \times 13$  มม. จำนวน 36 ชิ้น
3. โลหะเติม 49/Cu ขนาด  $8.25 \times 8.25 \times 0.3$  มม. จำนวน 36 ชิ้น
4. น้ำยาประสาน (BrazeTec spezial h Paste)



รูปที่ 3.1 ทังสแตนคาร์ไบด์ ขนาด  $8 \times 8 \times 8.6$  มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของทั้งสแตนคาร์ไบด์ [21]

ธาตุ	องค์ประกอบทางเคมี (wt %)
1. โบรอน (B)	23.65
2. คาร์บอน (C)	3.92
3. ฟลูออรีน (F)	16.32
4. ซิลิคอน (Si)	0.08
5. โพแทสเซียม (K)	24.58
6. วาเนเดียม (V)	0.04
7. โครเมียม (Cr)	0.11
8. แมงกานีส (Mn)	28.30
9. นิกเกิล (Ni)	0.01
10. ทองแดง (Cu)	1.23
11. สังกะสี (Zn)	0.55
12. เงิน (Ag)	0.46
13. ทั้งสแตน (W)	0.76

จากตารางที่ 3.1 พบว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุแมงกานีส ธาตุโพแทสเซียม ธาตุโบรอน และธาตุฟลูออรีนโดยส่วนใหญ่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวัตถุประสงค์ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.2 โลหะ Bohler k110 ขนาด 20 x 20 x 13 มม.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก Bohler k110 [22]

ธาตุ	องค์ประกอบทางเคมี (wt %)
1. คาร์บอน (C)	1.55
2. ซิลิกอน (Si)	0.25
3. แมงกานีส (Mn)	0.35
4. โครเมียม (Cr)	11.8
5. โมลิบดีนัม (Mo)	0.8
6. วาเนเดียม (V)	0.95

จากตารางที่ 3.2 พบว่าเหล็ก Bohler k110 มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอน ธาตุซิลิกอน ธาตุแมงกานีส ธาตุโครเมียม ธาตุโมลิบดีนัม และธาตุวาเนเดียม รวมอยู่ 15.7% โดยสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เหลือเป็นของธาตุเหล็กคือ 84.3%



รูปที่ 3.3 โลหะเติม 49/Cu [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติม 49/Cu [23]

ธาตุ	องค์ประกอบทางเคมี (wt %)
1. เงิน (Ag)	49
2. ทองแดง (Cu)	27.5
3. สังกะสี (Zn)	20.5
4. แมงกานีส (Mn)	2.5
5. นิกเกิล (Ni)	0.5

จากตารางที่ 3.3 พบว่าโลหะเติม 49/Cu มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุเงิน ธาตุทองแดง และธาตุสังกะสีโดยส่วนใหญ่ แต่จะพบปริมาณธาตุเงินเยอะที่สุด

ตารางที่ 3.4 Technical Data ของโลหะเติม 49/Cu [23]

ข้อมูล	ช่วงการใช้งาน
1. ช่วงการหลอมเหลว (Melting range)	670 – 690 °C
2. อุณหภูมิใช้งาน (Working temperature)	690 °C
3. ความหนาแน่น (Density)	9.0 g/cm <sup>3</sup>
4. ความแข็งแรงเฉือน (Shear strength)	150 – 300 MPa

โลหะเติม 49/Cu เป็นแผ่นเงินที่มีการสอดไส้ทองแดงตรงกลาง เหมาะกับชิ้นงานคาร์ไบด์ต่าง ๆ เพราะชั้นทองแดงตรงกลางช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ช่วยป้องกันชิ้นงานแตกจากแรงดึงขณะหดตัว ระหว่างชิ้นงานเย็นตัวหลังเชื่อม และสามารถรับแรงกระแทกสำหรับชิ้นงานหลังเชื่อมได้ดีขึ้น [24] ซึ่งโลหะเติมเอกสารนี้ 49/Cu มีอุณหภูมิใช้งานที่ 690 °C แสดงดังตารางที่ 3.4 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 น้ำยาประสาน (BrazeTec spezial h Paste)

### 3.1.2 พิกเจอร์สำหรับวางชิ้นงานในการแล่นประสาน (Fixture)

เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อบังคับชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยใช้สำหรับการวางชิ้นงานในเตาแล่นประสานได้ครั้งละ 4 ชิ้น ออกแบบการกดชิ้นงานให้มีแรงกดเท่ากันทุกชิ้น และมีการฉีดโบรอนไนไตรด์ (BN) รอบพิกเจอร์ เพื่อกำจัดการออกซิเดชันและช่วยทำความสะอาดผิวบริเวณผิวประสานอีกด้วย



รูปที่ 3.5 พิกเจอร์ (Fixture) สำหรับการวางชิ้นงานในเตาแล่นประสาน

### 3.1.3 เตาแล่นประสานยี่ห้อ Carbolite High Temperature Furnace รุ่น TZF

เป็นเตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อเชื่อมประสานโดยการปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในเตาแล่นเพื่อลดการออกซิเดชันที่เกิดออกซิเดชันของชิ้นงานที่จะทำการประสานในเตาแล่นนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 3.6 เตาแล่นประสาน (Tube Furnace)

### 3.1.4 ฟิกเจอร์สำหรับการทดสอบแรงเฉือน (Fixture Shear Test)

เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อจับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเฉือน โดยตัว Fixture เป็นโลหะ Boher k110 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยเหล็กกล้า X153CrMoV12 ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 800-850 °C และทำการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1010-1030 °C



รูปที่ 3.7 ฟิกเจอร์ สำหรับการทดสอบแรงเฉือน (Fixture Shear Test)

### 3.1.5 เครื่อง UTM รุ่น SHIMADZU AUTOGRAPH AG-X-KN

ใช้ทดสอบแรงเฉือนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมในเตาแล่นประสาน (Tube Furnace) ด้วยอัตราการกระจัด 0.5 มม./นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 3.8 เครื่อง UTM

### 3.1.6 กล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์ (3D Measuring Laser Microscope)

ใช้ในการศึกษาการแตกหัก (Fracture) ของรอยประสานบนชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

### 3.1.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยประสานบนชิ้นงาน



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [19]

## 3.2 ขั้นตอนการจัดเตรียมอุปกรณ์

### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

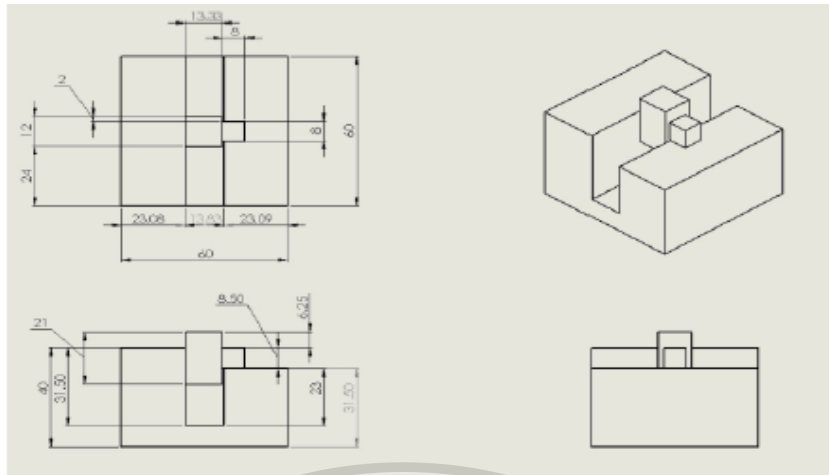
1. วัดขนาดของเซรามิกทั้งสแตนคาร์ไบด์แล้วนำไปตัดด้วยเครื่องตัด Wire EDM ให้ได้ขนาด  $8 \times 8 \times 8.5$  มม. จำนวน 36 ชิ้น
2. นำแผ่นเหล็ก Bohler k110 ไปเจียรระโนทั้ง 2 ด้านแล้วนำไปตัดด้วยเครื่องตัด Wire EDM ให้ได้ขนาด  $20 \times 20 \times 13$  มม. จำนวน 36 ชิ้น
3. วัดขนาดแผ่นโลหะเติม 49/Cu ให้ขนาดใหญ่กว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์เพียงเล็กน้อย จำนวน 36 ชิ้น

### 3.2.2 ขั้นตอนการทำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเฉือน (Figure Shear Test)

1. ออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture) ในการทดสอบแรงเฉือนโดยใช้โลหะ Boher k110 ขนาด  $65 \times 65 \times 45$  มม. มีช่องกลวงตรงกลางลงมา
2. ทำการกัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Milling Machine ให้มีขนาด  $60 \times 60 \times 40$  มม.
3. เจาะรูตรงกลางจากด้านบนชิ้นงานลงมา โดยรูห่างจากขอบชิ้นงาน 8.5 มม. รูที่เจาะกว้าง 13.33 มม. และมีความลึก 31.50 มม.
4. นำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานไปชุบแข็งด้วย X153CrMoV12 ที่อุณหภูมิ 1010–1030 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



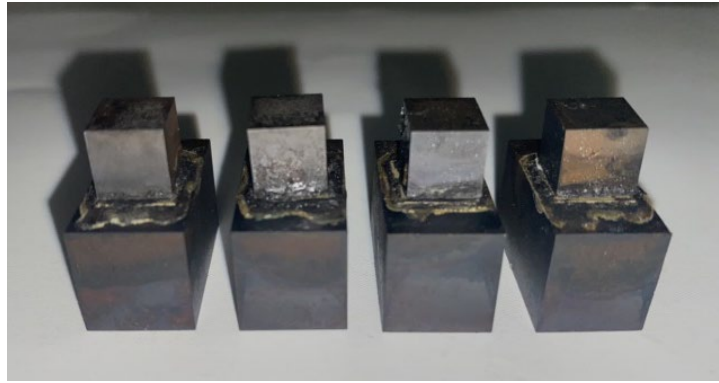
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเฉือน (Figure Shear Test)

### 3.3 ขั้นตอนการเล่นประสาน

1. ทำความสะอาดชิ้นงานที่ต้องการประสานด้วยอะซิโตน
2. ทาหน้ายาประสาน (Flux) รอบ ๆ ชิ้นงานหลัก เพื่อกำจัดการเกิดออกซิเดชันและช่วยทำความสะอาดผิวที่ต้องการประสาน
3. วางชิ้นงานที่ต้องการประสานลงบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานโดยวางทั้งสแตนคาร์ไบด์ไว้บนเหล็ก Bohler k110 โดยมีโลหะเติมวางอยู่ตรงกลางระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็ก
4. ทำการเปิดเตาเล่นประสาน (Tube Furnace) จากนั้นตรวจเช็คแก๊สอาร์กอนว่ามีปริมาณเพียงพอต่อการประสานครั้งนี้หรือไม่ ถ้าไม่เพียงพอให้นำแก๊สอาร์กอนมาเติมให้เพียงพอต่อการประสาน 1 ครั้ง
5. นำชิ้นงานที่วางบนอุปกรณ์จับยึดเข้าไปไว้ในเครื่องเล่นประสาน แล้วทำการปิดท้อพร้อมกับปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไป
6. ตั้งค่าตัวแปร กำหนดค่าของอุณหภูมิและเวลาในการประสานที่เตาเล่นประสานให้เรียบร้อย จากนั้นตรวจสอบค่าตัวแปรในการประสานซ้ำอีก 1 ครั้ง
7. เมื่อชิ้นงานที่อยู่ในเตาเล่นประสานมีอุณหภูมิถึงค่าที่ต้องการ ให้เริ่มทำการจับเวลา โดยเวลาที่จับจะขึ้นอยู่กับเวลาที่เรากำหนดในการทดลอง
8. เมื่อครบกำหนดเวลาที่ต้องการแล้ว ให้ปิดเตาเล่นประสานและรอให้อุณหภูมิของเครื่องเย็นลง ซึ่งอุณหภูมิของเครื่องต้องต่ำกว่า 250 °C แล้วค่อยทำการเปิดท้อออกมา
9. รอให้อุณหภูมิในท้อเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง (25 °C) แล้วจึงนำชิ้นงานที่ทำการประสานออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเล่นประสานอย่างเสร็จสมบูรณ์

### 3.4 ขั้นตอนการทดสอบแรงเค้น

1. นำชิ้นงานที่ประสานแล้ววางบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงเค้น โดยด้านหลักจะเป็นด้านที่อยู่ตรงกับหัวกดและกดลงไป
2. ทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยใช้เครื่องทดสอบแรงเค้น (Tensile Test Machine) ด้วยความเร็ว 0.5 มม./นาที
3. นำค่าแรงที่วัดได้ และกราฟที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.5 การออกแบบการทดลอง Design of Experiments (DOE)

ในการทดลองการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 มีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ ( $3^k$  Factorial Design) สำหรับการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยประสาน โดยกำหนดปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลาเล่นประสาน โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำให้ต้องเก็บข้อมูลทดสอบแรงเค้นทั้งหมด 27 ข้อมูล และการทดลองนี้มีการประสานเพิ่มอีก 9 ชิ้นงาน เพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 3.5 ออกแบบการทดลองการประสานชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบแรงเฉือน

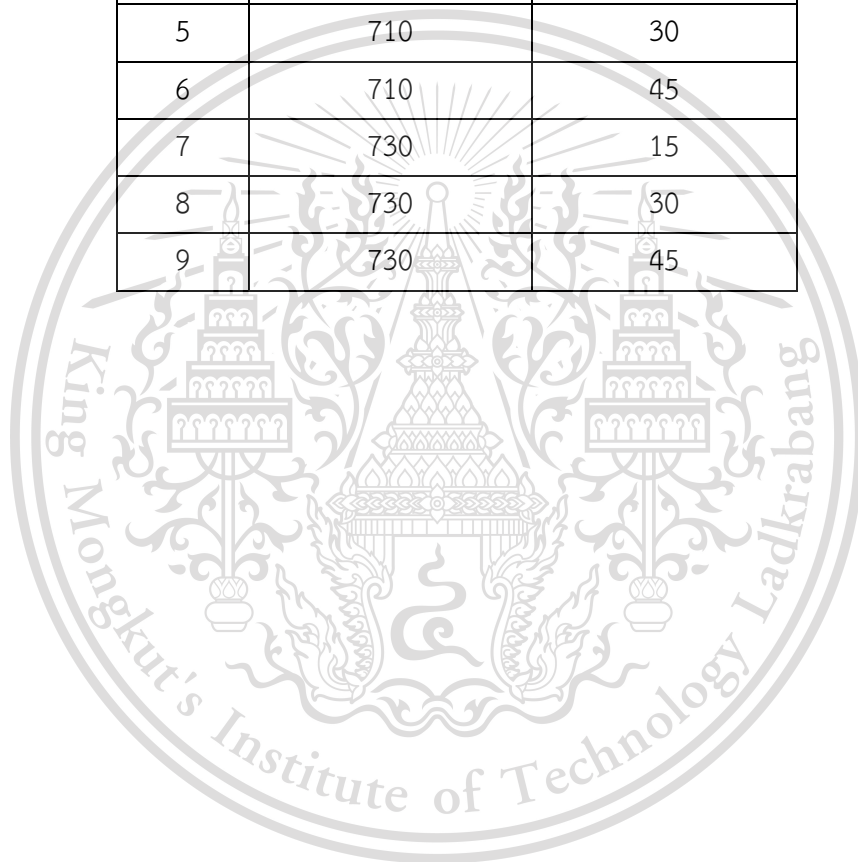
ชิ้นงานที่	อุณหภูมิประสาน (°C)	เวลาประสาน (นาที)
1	690	15
2	690	15
3	690	15
4	690	30
5	690	30
6	690	30
7	690	45
8	690	45
9	690	45
10	710	15
11	710	15
12	710	15
13	710	30
14	710	30
15	710	30
16	710	45
17	710	45
18	710	45
19	730	15
20	730	15
21	730	15
22	730	30
23	730	30
24	730	30
25	730	45
26	730	45
27	730	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 3.6 ออกแบบการทดลองการประสานชิ้นงานเพื่อนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ชิ้นงานที่	อุณหภูมิประสาน (°C)	เวลาประสาน (นาที)
1	690	15
2	690	30
3	690	45
4	710	15
5	710	30
6	710	45
7	730	15
8	730	30
9	730	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานหลังจากทำการทดลองเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ด้วยค่าอุณหภูมิและเวลาการประสานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบแรงเฉือนของการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110
2. ผลการทดลองทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab 19
3. โครงสร้างจุลภาครอยประสานของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์ (3D Measuring Laser Microscope)
4. โครงสร้างจุลภาครอยประสานของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 4.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนของการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110

จากการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 โดยปัจจัยในการทดลองได้แก่ อุณหภูมิในการประสานที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 690 °C, 710 °C, 730 °C และเวลาในการประสานที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 15 นาที , 30 นาที และ 45 นาที ทำการเล่นประสานทั้งหมด 3 ชิ้นงาน ใน 1 ครั้งทำการทดลอง จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเล่นประสานทั้งหมด 27 ชิ้น ไปทำการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM เพื่อนำค่าแรงเฉือนที่ได้ไปหาค่าความแข็งแรงเฉือนต่อไป ซึ่งค่าแรงเฉือนที่ทดสอบได้จากเครื่อง UTM ปรากฏดังตารางที่ 6

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงเฉือนที่ทดสอบได้จากเครื่อง UTM ของแต่ละชิ้นงาน

ชิ้นงานที่	อุณหภูมิประสาน (°C)	เวลาประสาน (นาที)	แรงเฉือน (นิวตัน)
1	690	15	7127.06
2	690	15	5740.33
3	690	15	4770.38
4	690	30	6222.09
5	690	30	2087.39
6	690	30	5120.64
7	690	45	4760.01

ชั้นงานที่	อุณหภูมิประสาน (°C)	เวลาประสาน (นาที)	แรงเฉือน (นิวตัน)
8	690	45	3722.94
9	690	45	5944.06
10	710	15	7771.73
11	710	15	5074.84
12	710	15	9325.43
13	710	30	4304.81
14	710	30	5434.64
15	710	30	3904.95
16	710	45	6637.24
17	710	45	6754.49
18	710	45	6836.29
19	730	15	7452.04
20	730	15	6274.02
21	730	15	8447.63
22	730	30	6708.53
23	730	30	9040.77
24	730	30	8852.37
25	730	45	10525.2
26	730	45	6290.90
27	730	45	5983.78

นำค่าแรงเฉือนที่ทดสอบได้จากเครื่อง UTM ของชั้นงานทั้งหมด 27 ชั้นงาน ไปคำนวณหาค่าความแข็งแรงเฉือนของแต่ละชั้นงาน ดังสมการที่ (1) สมการหาค่าความแข็งแรงเฉือน

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงเฉือนของแต่ละชั้นงาน

ชั้นงานที่	อุณหภูมิประสาน (°C)	เวลาประสาน (นาที)	ค่าความแข็งแรงเฉือน (MPa)
1	690	15	104.8097
2	690	15	84.4166
3	690	15	70.1526
4	690	30	90.5013
5	690	30	30.6969
6	690	30	75.3035
7	690	45	70.0001
8	690	45	54.7491
9	690	45	87.4126
10	710	15	114.2901
11	710	15	74.6300
12	710	15	137.1387
13	710	30	63.3060
14	710	30	79.9212
15	710	30	57.4257
16	710	45	97.6065
17	710	45	99.3307
18	710	45	100.5337
19	730	15	109.5888
20	730	15	92.2650
21	730	15	124.2298
22	730	30	98.6548
23	730	30	132.9525
24	730	30	130.1819
25	730	45	154.7824
26	730	45	92.5132
27	730	45	87.9968

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ค่าความแข็งแรงเฉือนที่สูงที่สุดจะสามารถระบุได้ว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการประสานได้มีความเหมาะสมสำหรับการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 โดยผลจากการศึกษา ค่าความแข็งแรงเฉือนดังตารางที่ 4.2 พบว่า การทดลองเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 โดยชิ้นงานที่ 5 ใช้อุณหภูมิเล่นประสานที่ 690 °C เวลา 30 นาที ให้ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดจากการทดลองทั้งหมด คือ 30.6969 MPa และการทดลองเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 โดยชิ้นงานที่ 25 ใช้อุณหภูมิเล่นประสานที่ 730 °C เวลา 45 นาที ให้ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดจากการทดลองทั้งหมด คือ 154.7824 MPa แต่พบว่าที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกันใน ชิ้นงานที่ 26 และ 27 ให้ค่าความแข็งแรงเฉือนเพียง 92.5132 MPa และ 87.9968 MPa ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ 25 ดังนั้นค่าความแข็งแรงเฉือนที่สูงที่สุดที่ได้มาจากการทดสอบแรงเฉือนยังไม่สามารถระบุได้ว่า อุณหภูมิเล่นประสานที่ 730 °C เวลา 45 นาที มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 จึงต้องมีการวิเคราะห์ทางสถิติและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาครอยประสานของชิ้นงานเพื่อหาค่าอุณหภูมิและเวลาการเล่นประสานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110

#### 4.2 ผลการทดลองทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab 19

การวิเคราะห์ผลการทดลองจะนำข้อมูลผลการทดลองทางกลมาใช้วิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม MINITAB 19 วิเคราะห์ผลตามวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบทั่วไป (General Full Factoria) วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติโดยหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือน

ผลที่ได้จากตารางที่ 4.2 นำมาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบทดลอง วิธีนี้จะพิจารณาจากค่าความต้านทานแรงเฉือนจากกรณีค่ายิ่งมายิ่งดี (Larger is Better) จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ปัจจัยที่มีผลต่อการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 คือ อุณหภูมิในการเล่นประสานที่ 690 °C, 710 °C, 730 °C และเวลาในการเล่นประสานที่ 15 นาที, 30 นาที และ 45 นาที และยังมีผลกระทบร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยเกิดขึ้นในกระบวนการ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยอุณหภูมิและเวลาตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปัจจัยมีผลกระทบร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

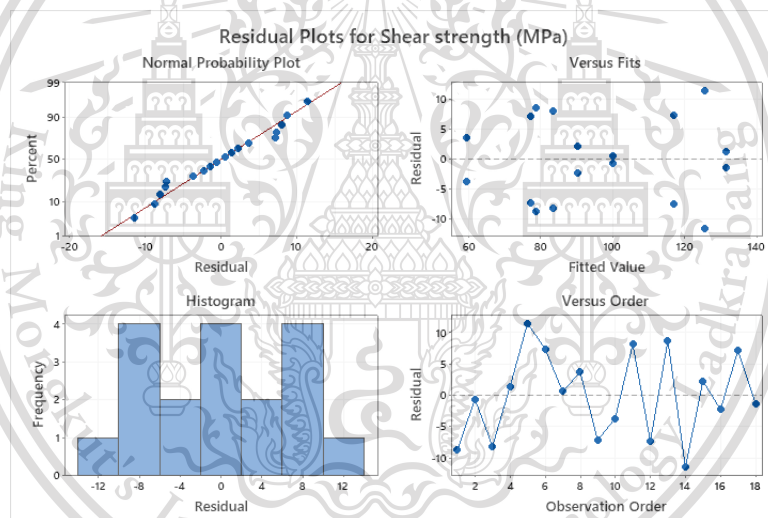
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลปัจจัยต่างๆในการประสานทั้งสแตนคาร์ไบต์กับเหล็กกล้า K110

Factor	Levels	Values
Brazing Temperature (°C)	3	690, 710, 730
Brazing Time (min)	3	15, 30, 45

#### 4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลรูปแบบการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองว่ารูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบนั้นมีความเหมาะสมและข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความถูกต้องหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลค่าเฉลี่ยของปัจจัยการแล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบต์กับเหล็กกล้า K110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

จากรูปที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่า

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากแผนภาพ Normal Probability Plot โดยแกน X คือ ส่วนตกค้าง และแกน Y คือ ค่าความเป็นปกติมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่า การกระจายตัวของข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบปกติ

2. การตรวจสอบความเสถียรของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) จากแผนภาพ Versus Fits แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเสถียรของค่าความแปรปรวน เนื่องจากความแปรปรวนของส่วนตกค้างนั้นไม่คงที่ ไม่มีลักษณะที่เป็นแนวโน้มแต่อย่างใด

3. Histogram แสดงรูปแบบพื้นปลา แสดงว่าเครื่องมือในการวัดค่ามีคุณภาพต่ำหรือการอ่านค่ามีความแตกต่างกันมากเป็นผลทำให้คลาดเคลื่อนในการทดลอง

4. การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้างจากแผนภาพ Versus Order โดยแกน X คือ ลำดับการทดลองและแกน Y คือ ค่าส่วนตกค้าง แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่มหรือไม่มีแนวโน้มแสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบทั่วไป (General Full Factoria) เป็นข้อมูลที่ต้องการและมีความเหมาะสม เนื่องจากข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติเป็นอิสระต่อกันและมีความเสถียรของค่าความแปรปรวน สามารถนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อได้

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแปรปรวนสำหรับค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear Stress)

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองแสดงให้เห็นว่าไม่พบความผิดปกติของข้อมูลจากการทดลองเกิดขึ้นเนื่องจากข้อมูลนั้นกระจายตัวเป็นเส้นตรงจึงได้นำข้อมูลในตาราง 4.2 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด จากผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบทั่วไปโดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ ) ด้วยโปรแกรม Minitab 19 ดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

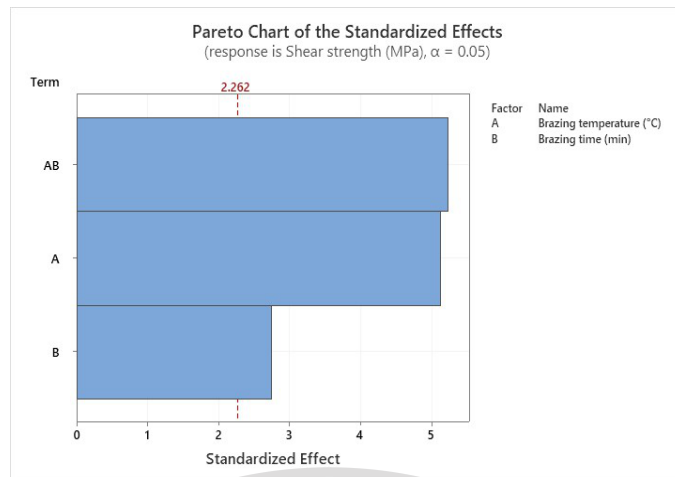
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	9552.1	1194.01	13.53	<0.001
Linear	4	4340.9	1085.22	12.30	0.001
Brazing Temperature (°C)	2	3296.3	1648.13	18.68	0.001
Brazing Time (min)	2	1044.6	522.30	5.92	0.03
2-Way Interactions	4	5211.2	1302.81	14.76	0.001
Brazing Temperature ( °C ) * Brazing Time ( min )	4	5211.2	1302.81	14.76	0.001
Error	9	794.2	88.24	-	-
Total	17	10346.3	-	-	-

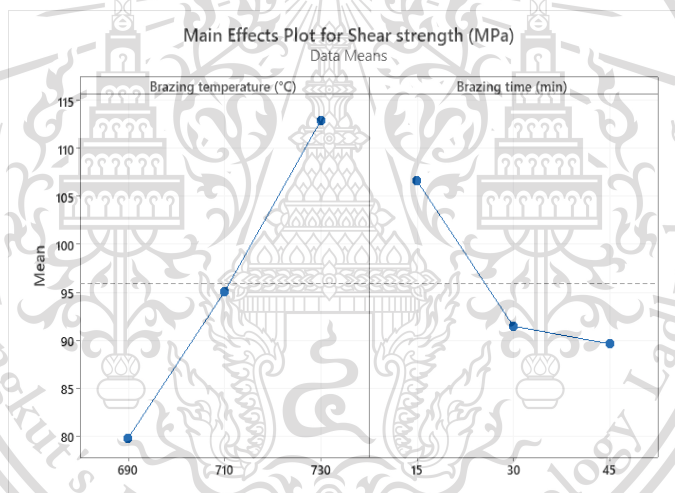
พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 จากการพิจารณา ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเล่นประสานโดยการ วิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 4.4 และแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ดังรูปที่ 4.2 พบว่าปัจจัยที่มี ผลต่อการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 มีปัจจัยที่มีผล โดยตรง คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเล่นประสานและเวลาที่ใช้ในการเล่นประสานมีปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way Interaction) คือ อุณหภูมิและเวลาของการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 4.2 แผนภูมิพารेटอ (Pureto Chart) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย

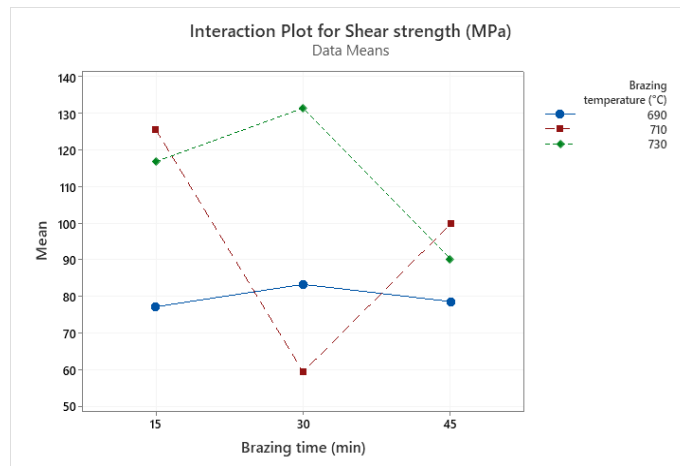


รูปที่ 4.3 อิทธิพลหลัก (Main Effect) 2 ปัจจัย

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟอิทธิพลหลัก 2 ปัจจัย พบว่ากราฟมีความชันทำให้ทราบว่า มีปัจจัยที่มีผลโดยตรง คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการแล่นประสานและเวลาที่ใช้ในการแล่นประสาน สามารถสรุปผลได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการแล่นประสานที่ 730 °C และเวลาที่ใช้ในการแล่นประสานที่ 15 นาที เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการแล่นประสานมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

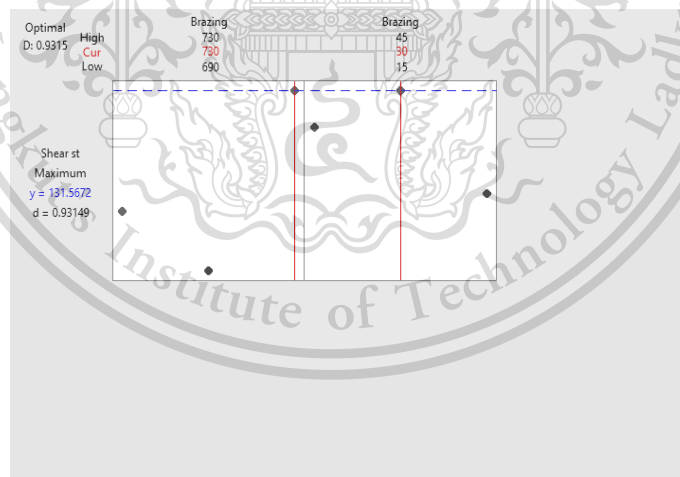
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 4.4 ผลกระทบร่วมที่มีผลต่อปัจจัยในการแล่นประสาน

จากรูปที่ 4.4 เป็นกราฟอิทธิพลร่วมเป็นการพล็อตค่าเฉลี่ยที่แต่ละค่าระดับปัจจัยโดยมีปัจจัยตัวที่สองคงที่ จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแล่นประสานที่ 730 °C และเวลาที่ใช้ในการแล่นประสานที่ 30 นาที เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการแล่นประสานมากที่สุด

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 4.5 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.5 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab แสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแล่นประสานที่ดีที่สุดคือ 730 °C และเวลาที่ใช้ในการแล่นประสานที่ 30 นาที เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการแล่นประสานมากที่สุด โดยมีความพึงพอใจเท่ากับ 0.93149

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

จากการวิเคราะห์ผล สรุปได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเล่นประสานที่ 730 °C และเวลาที่ใช้ในการเล่นประสานที่ 30 นาที เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเล่นประสานมากที่สุด จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยมีตัวแปรต้น คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเล่นประสาน และตัวแปรตามคือ ค่าความต้านทานแรงเฉือน พบว่าการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงเฉือนนั้นจะได้ว่าค่า P-value ของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเล่นประสานมีค่าเท่ากับ (0.001, 0.023) ตามลำดับ มีค่าน้อยกว่า  $\alpha$  (0.05) ทำให้สรุปผลได้ว่า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเล่นประสาน นั้นมีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.3 โครงสร้างจุลภาครอยประสานของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์ (3D Measuring Laser Microscope)

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเล่นประสาน คือ อุณหภูมิการเล่นประสาน 730 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที และปัจจัยที่ทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนมีค่าน้อยที่สุดในการทดลอง คือ อุณหภูมิการเล่นประสาน 690 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที เพื่อต้องการศึกษาโครงสร้างจุลภาครอยประสานของชิ้นงาน 6 ชิ้นที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือนแล้วมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลเซอร์ โดยชิ้นงาน 6 ชิ้นจะแบ่งเป็นอุณหภูมิการเล่นประสาน 690 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที มี 3 ชิ้นงาน และอุณหภูมิการเล่นประสาน 730 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที มี 3 ชิ้นงาน ซึ่งได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.6 บริเวณรอยประสานที่มีอุณหภูมิการเล่นประสาน 690 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที  
(a) ชิ้นงานที่ 1, (b) ชิ้นงานที่ 2 และ (c) ชิ้นงานที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 4.7 บริเวณรอยประสานที่มีอุณหภูมิการแล่นประสาน 730 °C เวลาการแล่นประสาน 30 นาที

(a) ชั้นงานที่ 1, (b) ชั้นงานที่ 2 และ (c) ชั้นงานที่ 3

จากรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแบบเลเซอร์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานตรงบริเวณรอยการประสาน ยังไม่สามารถระบุได้ว่าชั้นงานเกิดการแตกหักแบบใด จึงต้องนำชั้นงานไปศึกษาต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อวิเคราะห์การแตกหักของชั้นงานต่อไป

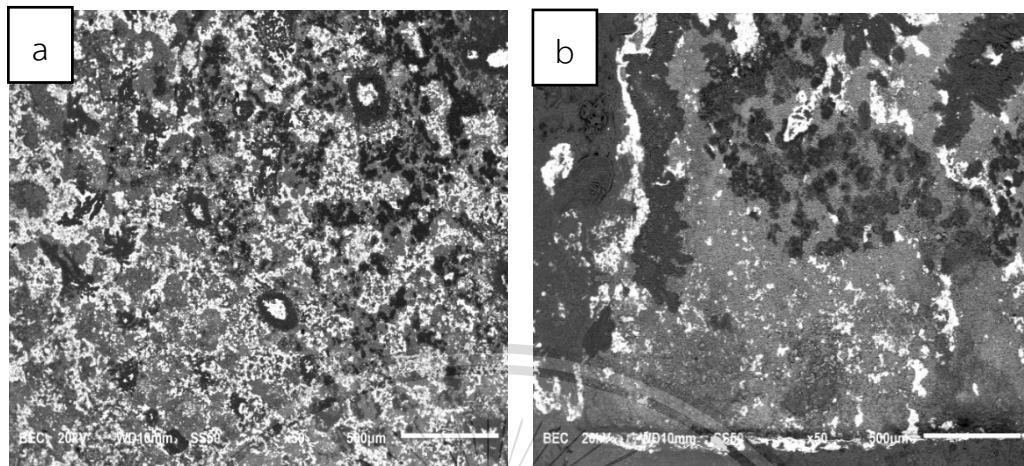
#### 4.4 โครงสร้างจุลภาครอยประสานของชั้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นำชั้นงานที่มีการแล่นประสานด้วยอุณหภูมิการแล่นประสาน 690 °C เวลาการแล่นประสาน 30 นาที และอุณหภูมิการแล่นประสาน 730 °C เวลาการแล่นประสาน 30 นาที ที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือนแล้ว ไปศึกษาโครงสร้างจุลภาครอยประสานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลดังนี้

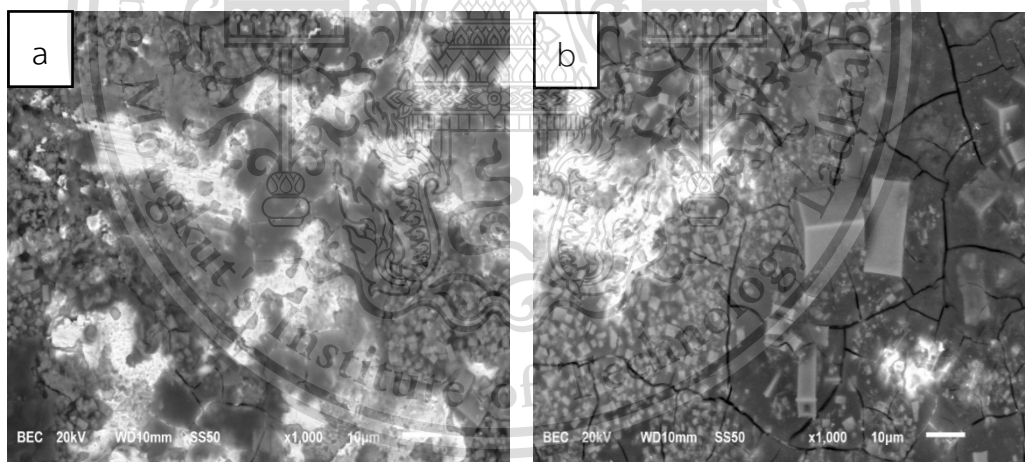
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

#### 4.4.1 ประสานที่อุณหภูมิการแล่นประสาน 690 °C เวลาการแล่นประสาน 30 นาที



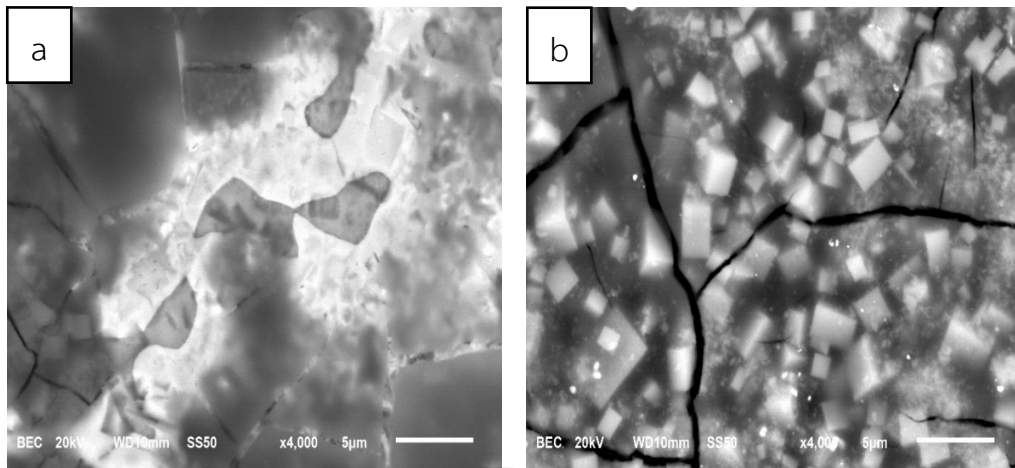
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 50 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 1,000 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



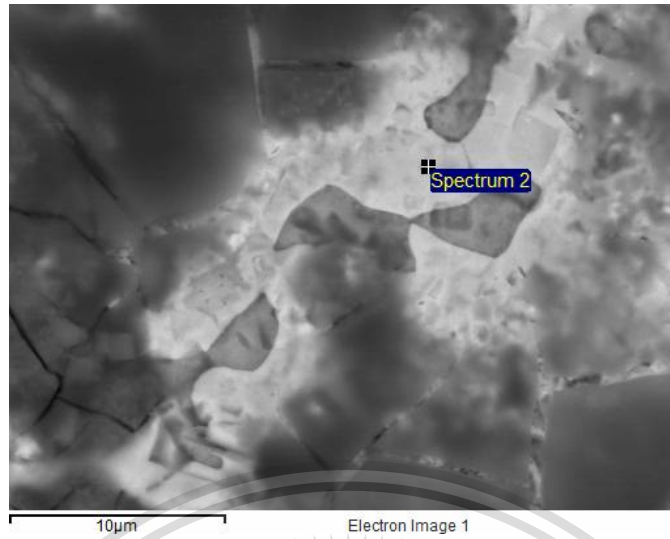
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 4,000 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณตรงกลางรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณตรงกลางรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 2)



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณตรงกลางรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

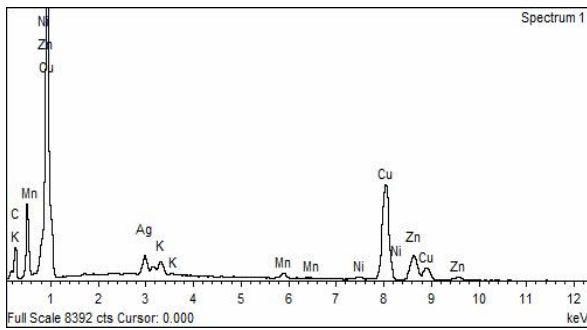
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณตรงกลางรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110  
ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที

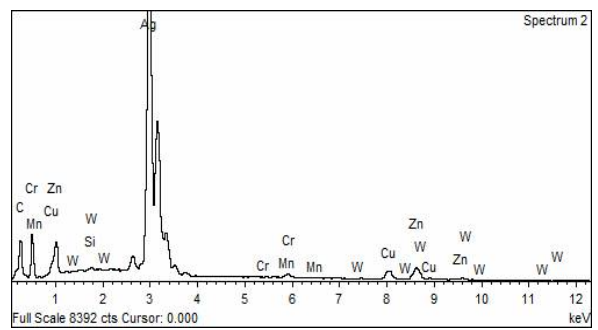
ธาตุ	องค์ประกอบทางเคมี					
	ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
	% wt	% at	% wt	% at	% wt	% at
C	23.21	61.69	8.86	44.27	10.35	12.40
K	1.27	1.04	-	-	6.17	2.27
Mn	1.16	0.68	0.83	0.91	1.99	0.52
Ni	0.69	0.38	-	-	-	-
Cu	51.41	25.94	4.09	3.86	0.40	0.09
Zn	17.53	8.60	7.79	7.15	-	-
Ag	4.72	1.40	77.85	43.29	-	-
Si	-	-	0.18	0.39	-	-
Cr	-	-	0.01	0.01	-	-
B	-	-	-	-	28.29	37.66
O	-	-	-	-	50.20	45.15
F	-	-	-	-	2.39	1.81
Al	-	-	-	-	0.21	0.11
W	-	-	0.39	0.13	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

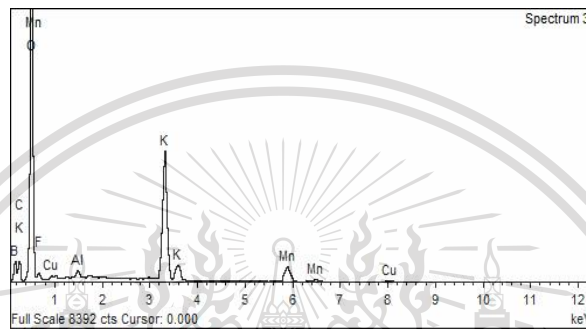
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



(a)

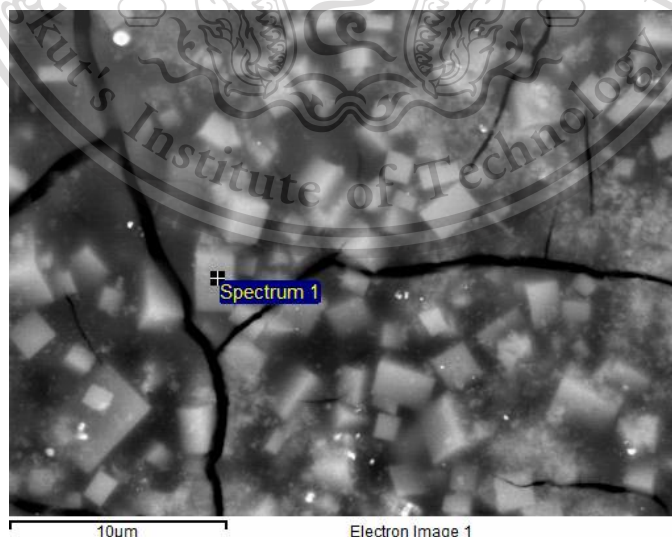


(b)



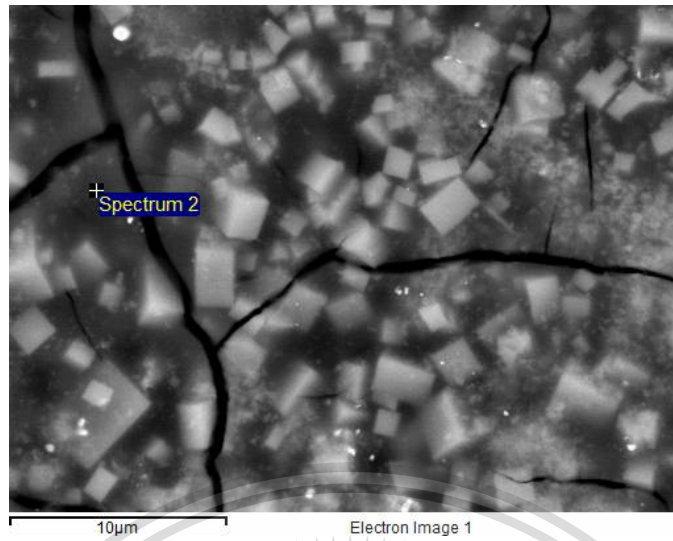
(c)

รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณตรงกลางรอยประสานของ ทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที (a) ตำแหน่งที่ 1, (b) ตำแหน่งที่ 2 และ (c) ตำแหน่งที่ 3

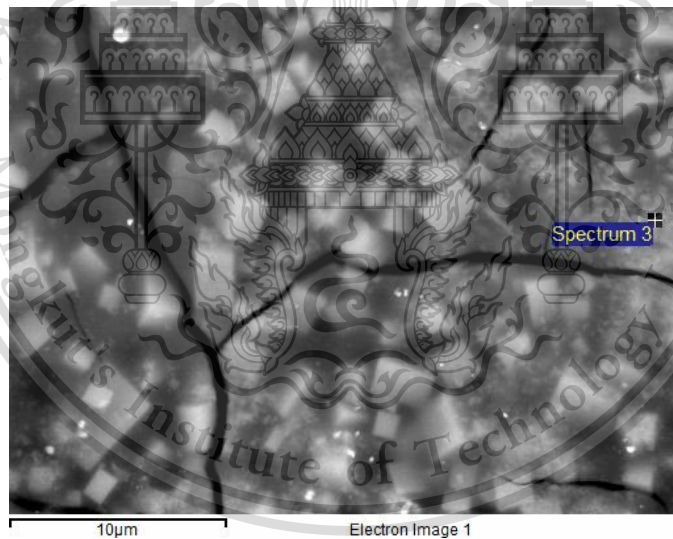


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 1) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 2)



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

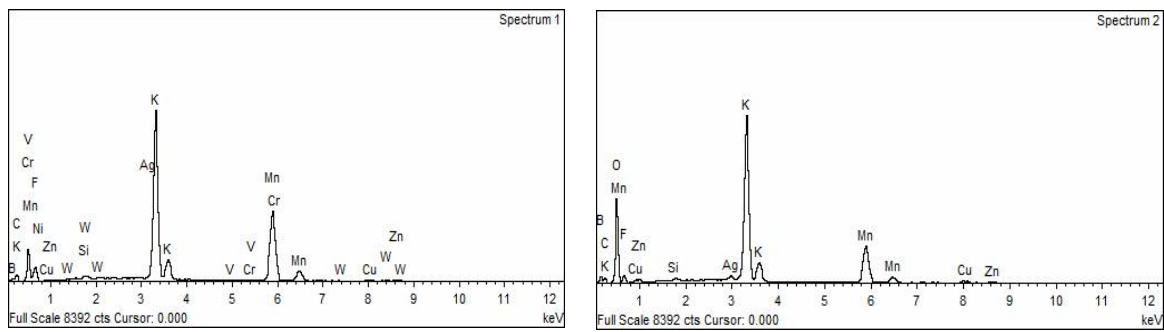
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่ อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที

ธาตุ	องค์ประกอบทางเคมี					
	ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
	% wt	% at	% wt	% at	% wt	% at
B	23.65	47.99	26.69	42.76	24.41	35.35
C	3.92	7.15	3.17	4.58	13.96	18.20
F	16.32	18.84	6.17	5.63	14.58	12.02
Si	0.08	0.06	0.03	0.02	-	-
K	24.58	13.79	17.25	7.64	10.23	4.10
V	0.04	0.02	-	-	-	-
Cr	0.11	0.04	-	-	-	-
Mn	28.30	11.30	10.85	3.42	5.37	1.53
Ni	0.01	0.01	-	-	-	-
Cu	1.23	0.42	1.33	0.36	0.58	0.14
Zn	0.55	0.18	1.01	0.27	0.36	0.09
Ag	0.46	0.09	1.01	0.16	-	-
W	0.76	0.09	-	-	1.33	0.11
O	-	-	32.48	35.16	28.92	28.30
Na	-	-	-	-	0.24	0.17

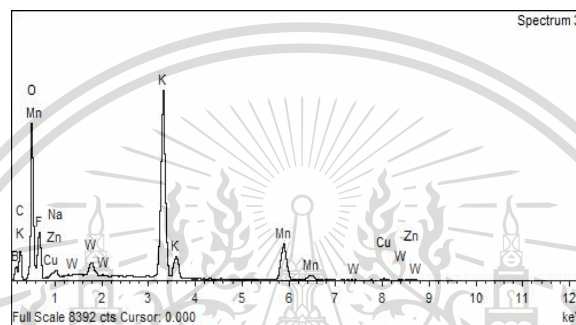
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



(a)

(b)



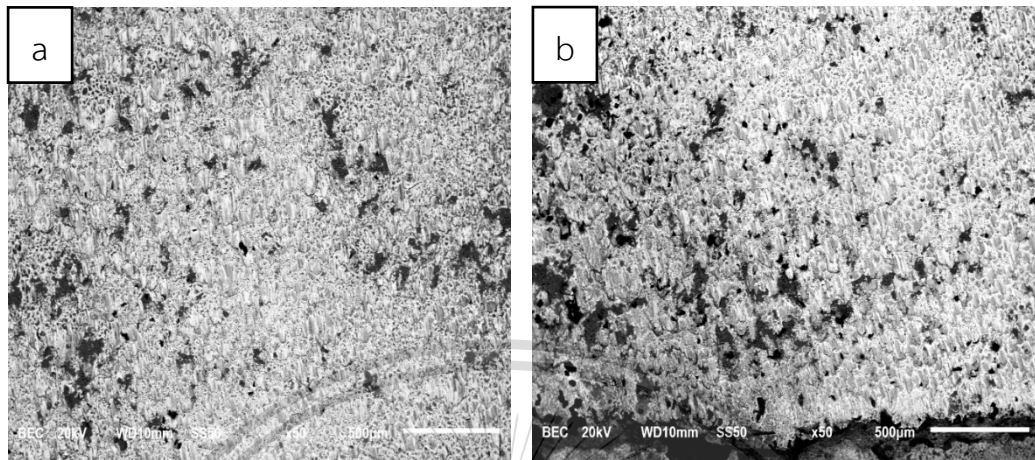
(c)

รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณขอบรอยประสานของ  
 ทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C เวลา 30 นาที (a) ตำแหน่งที่ 1,  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 และ (c) ตำแหน่งที่ 3

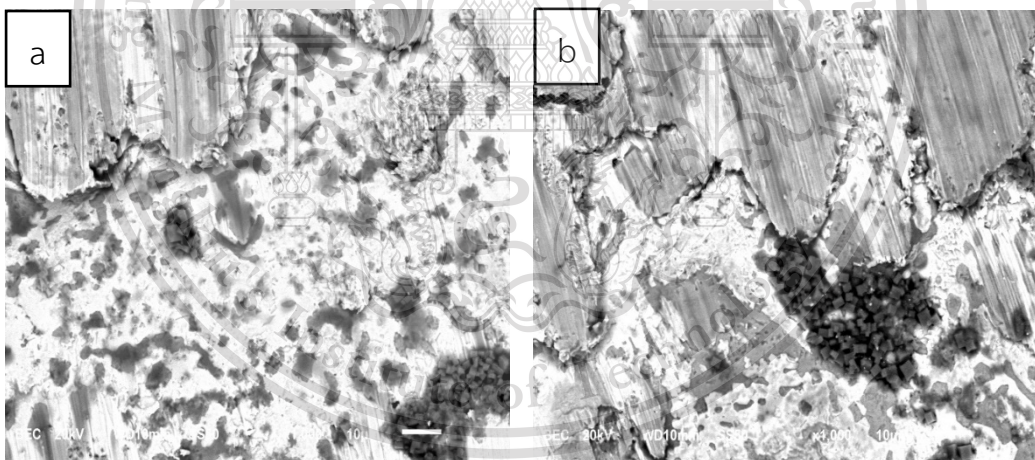
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

#### 4.4.2 ประสานที่อุณหภูมิการแล่นประสาน 730 °C เวลาการแล่นประสาน 30 นาที



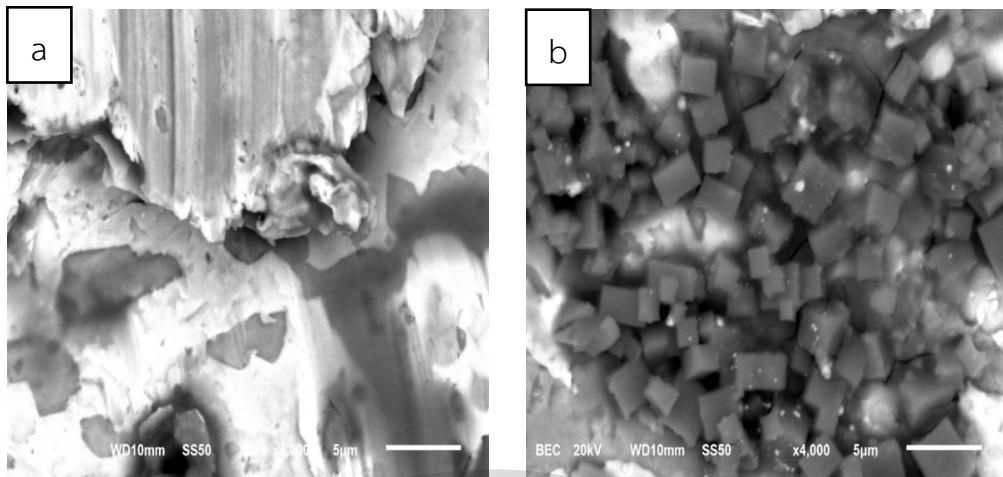
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 50 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ



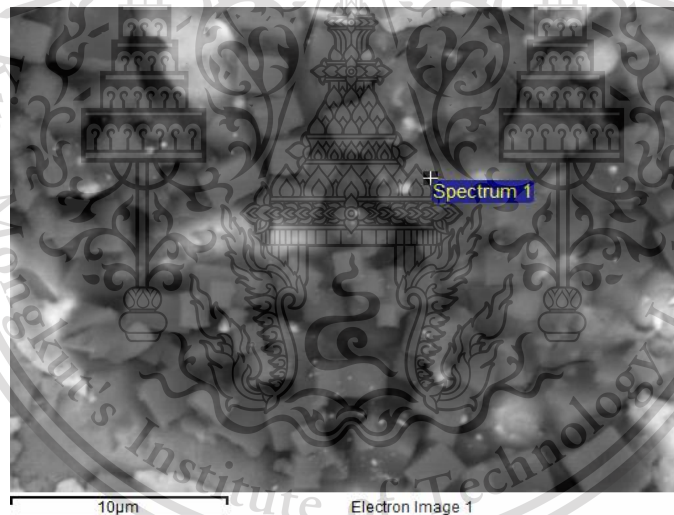
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 1,000 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



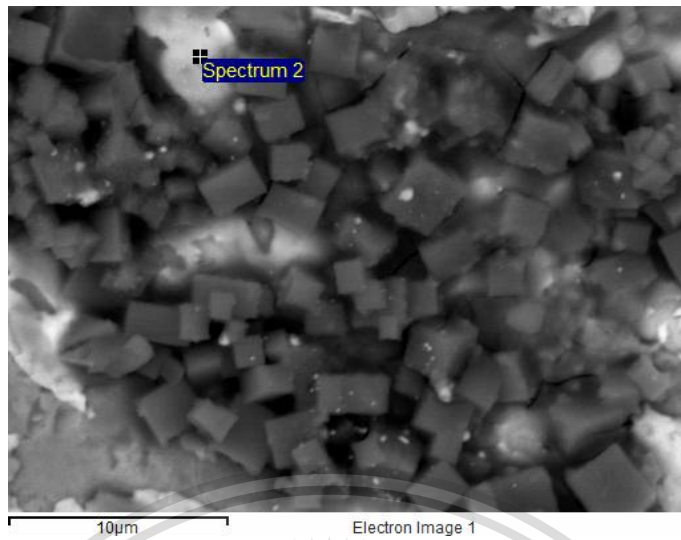
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที กำลังขยาย 4,000 เท่า (a) บริเวณตรงกลาง (c) บริเวณขอบ



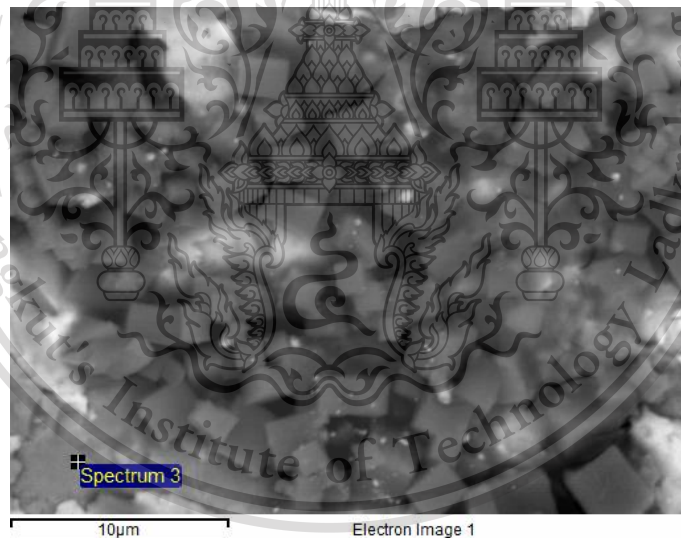
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 2)



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที ผ่านกระบวนการ EDS ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (ตำแหน่งที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

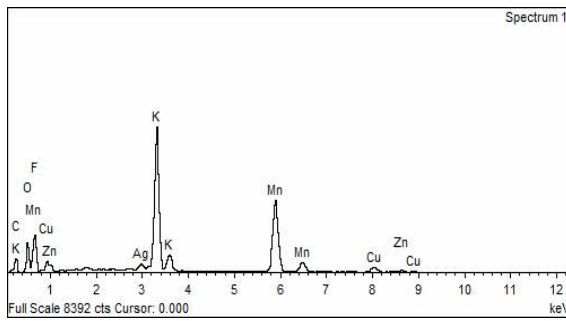
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีบริเวณขอบรอยประสานของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่ อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที

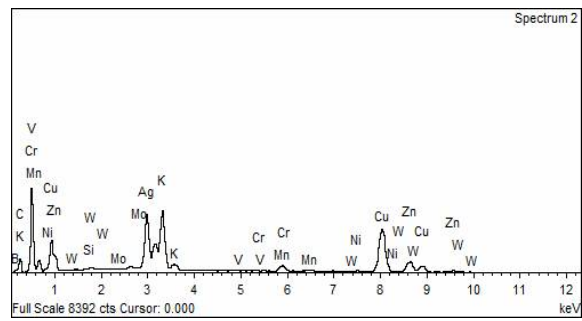
ธาตุ	องค์ประกอบทางเคมี					
	ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
	% wt	% at	% wt	% at	% wt	% at
C	8.64	17.85	12.74	26.24	24.15	44.52
O	12.02	18.64	-	-	-	-
F	29.23	38.18	-	-	2.63	3.07
K	18.47	11.72	6.88	4.35	1.13	0.64
Mn	24.86	11.23	1.86	0.84	0.44	0.18
Cu	3.47	1.36	29.26	11.53	26.73	9.32
Zn	1.72	0.65	9.61	3.64	8.84	3.00
Ag	1.58	0.36	16.56	3.80	17.99	3.69
B	-	-	21.55	49.31	17.27	35.37
Si	-	-	0.00	0.00	0.08	0.06
V	-	-	0.03	0.02	-	-
Cr	-	-	0.01	0.000	-	-
Ni	-	-	0.37	0.15	0.20	0.08
Mo	-	-	0.08	0.02	0.16	0.04
W	-	-	0.70	0.09	0.37	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

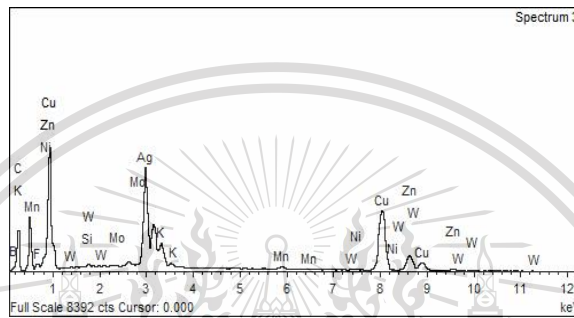
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDS บริเวณขอบรอยประสานของ  
 ทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 30 นาที (a) ตำแหน่งที่ 1,  
 (b) ตำแหน่งที่ 2 และ (c) ตำแหน่งที่ 3

จากรูปภาพข้างต้นเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง  
 กราด ทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิการแล่นประสานที่เวลาเท่ากัน คือ 30 นาที แต่เวลาการแล่นประสาน  
 ต่างกัน ซึ่งวิเคราะห์ที่จุดต่าง ๆ บนชิ้นงานโดยแสดงเป็นจุดสเปกตรัมต่าง ๆ ดังรูป แล้วจึงแสดงผลการ  
 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจุดนั้น ๆ ในรูปของกราฟและตารางแสดงสัดส่วนร้อยละประกอบ  
 ในรูปแบบสัดส่วนเปอร์เซ็นต์น้ำหนักและในรูปแบบสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอม

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีการวิเคราะห์ 2  
 บริเวณ คือ บริเวณตรงกลางของรอยประสาน และ บริเวณขอบของรอยประสาน จากรูปที่ 4.10(a) และ  
 4.10(b) พบว่า อุณหภูมิการแล่นประสานที่ 690 °C เวลาการแล่นประสาน 30 นาที ที่บริเวณตรงกลาง  
 รอยประสานและบริเวณขอบของรอยประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 มีรอยร้าวหรือ  
 รอยแตก (Crack Progressed) กระจายไปทั่วบริเวณ ซึ่งลักษณะการแตกนี้เป็นการแตกหักแบบเปราะ ซึ่ง

มีความเป็นไปได้ว่ามีรูปแบบการแตกหักเป็นแบบแตกไปตามขอบเกรน (Intergranular Cracking) โดย  
 การแตกตามขอบเกรนนี้นักเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกใช้งานในอุณหภูมิที่ส่งเสริมให้เกิดการ  
 ตกตะกอนของคาร์ไบด์ (Sensitization temperature) โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิ 450-850 °C ซึ่งสภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ดังกล่าวนี้จะส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการสูญเสียโครเมียมบริเวณที่อยู่ใกล้ขอบเกรน (มีสัดส่วนเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของโครเมียมเหลือน้อยกว่า 10.5%) ทำให้ขอบเกรนมีความไวต่อการกัดกร่อน และจากรูปที่ 4.19(a) และ 4.19(b) ที่มีอุณหภูมิการแล่นประสานที่ 730 °C เวลาการแล่นประสาน 30 นาที พบว่าชิ้นงานมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว เนื่องจากบริเวณตรงกลางและบริเวณขอบของรอยประสานระหว่างทั้งสเตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 เกิดรอยบุบละเอียด มีลักษณะเป็นลึ้กยี่มเล็ก ๆ ครอบคลุมพื้นผิวเกือบทั้งหมด

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานที่ผ่านกระบวนการ EDS โดยองค์ประกอบทางเคมีในตารางที่ 4.5 พบว่าบริเวณกลางรอยประสานในตำแหน่งที่ 1 (สีเทา) และตำแหน่งที่ 2 (สีขาว) มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นโลหะเติม 49/Cu เนื่องจากพบสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของเงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) ประมาณ 35-55% ของธาตุทั้งหมด ส่วนในตำแหน่งที่ 3 (สีดำ) มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นทั้งสเตนคาร์ไบด์ เพราะพบสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน (B) ปริมาณมาก โดยพบโบรอนประมาณ 45% ส่วนบริเวณขอบของรอยประสานในตารางที่ 4.6 ตำแหน่งที่ 1 (สีเทา), ตำแหน่งที่ 2 (สีดำ) และตำแหน่งที่ 3 (สีเทา) มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นทั้งสเตนคาร์ไบด์ทั้งหมด โดยบริเวณทั้ง 3 ตำแหน่งนี้พบปริมาณสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน (B) ประมาณ 35-50% มีสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟลูออรีน (F) ประมาณ 6-16% และโพแทสเซียม (K) ประมาณ 5-15% เมื่อสังเกตที่อุณหภูมิการแล่นประสานที่ 730 °C เวลาการแล่นประสาน 30 นาที ตารางที่ 4.7 ในบริเวณขอบของรอยประสานตำแหน่งที่ 1 (สีดำ) พบสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟลูออรีน (F) สูงถึง 38% เปอร์เซ็นต์อะตอมของโพแทสเซียม (K) และแมงกานีส (Mn) อยู่ที่ 11% ส่วนในบริเวณตำแหน่งที่ 2 (สีขาว) และตำแหน่งที่ 3 (สีเทา) มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนปริมาณมาก อยู่ที่ 35-50% จึงมีความเป็นไปได้ที่บริเวณ 3 ตำแหน่งนี้จะเป็นทั้งสเตนคาร์ไบด์ทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบรอยประสานที่ใช้เวลาประสานเท่ากันแต่อุณหภูมิประสานต่างกัน สิ่งที่สังเกตได้คือ รอยประสานระหว่างทั้งสเตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิ 690 °C และที่อุณหภูมิ 730 °C เวลาแล่นประสาน 30 นาที ชิ้นงานมีการประสานติดกันเพราะชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือนแล้วนำฝั่งเหล็กกล้า K110 มาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เมื่อส่องจุดต่าง ๆ บนชิ้นงานจะพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของทั้งสเตนคาร์ไบด์และโลหะเติม แสดงว่าชิ้นงานประสานติดกันระหว่างเหล็กกับทั้งสเตนคาร์ไบด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปและอภิปรายผลของงานวิจัยเรื่อง การเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. การสรุปผลและการอภิปรายผล
2. ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การสรุปผลและการอภิปรายผล

วัตถุประสงค์หลักของการทดลองเล่นประสานชิ้นงานในครั้งนี้คือ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยประสานของการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 โดยสรุปผลได้ดังนี้

##### 5.1.1 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสุดในการเล่นประสาน

จากการทดลองการเล่นประสานชิ้นงานด้วยอุณหภูมิเล่นประสานและเวลาเล่นประสานต่าง ๆ พบว่า ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเล่นประสานที่ 690 °C เวลา 30 นาที ให้ค่าความแข็งแรงเนียนต่ำสุดจากการทดลองทั้งหมด คือ 30.6969 MPa และ ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเล่นประสานที่ 730 °C เวลา 45 นาที ให้ค่าความแข็งแรงเนียนสูงที่สุดจากการทดลองทั้งหมด คือ 154.7824 MPa แต่พบว่าที่อุณหภูมิ 730 °C เวลา 45 นาที ชิ้นงานอื่น ๆ ให้ค่าความแข็งแรงเนียนเพียง 92.5132 MPa และ 87.9968 MPa ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ต่ำเกินไป จึงต้องนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ โดยผลการทดลองทางสถิติพบว่า อุณหภูมิการเล่นประสาน 730 °C และเวลาการเล่นประสาน 30 นาที เป็นค่าที่เหมาะสมสุดสำหรับการเล่นประสานทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงเนียนนั้นจะได้ค่า P-value ของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเล่นประสานมีค่าเท่ากับ (0.001, 0.023) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า  $\alpha$  (0.05) ทำให้สรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเล่นประสานนั้นมีผลต่อค่าความต้านทานแรงเนียนอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นปัจจัยที่เหมาะสมสุดสำหรับการเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 คือ อุณหภูมิการเล่นประสาน 730 °C และเวลาการเล่นประสาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

### 5.1.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

โครงสร้างจุลภาคจากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่า ที่อุณหภูมิการเล่นประสาน 690 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที บริเวณตรงกลางรอยประสานและบริเวณขอบของรอยประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 มีรอยร้าวหรือรอยแตก (Crack Progressed) กระจายไปทั่วบริเวณ ซึ่งเป็นการแตกหักแบบเปราะมีรูปแบบการแตกหักเป็นแบบแตกไปตามขอบเกรน (Intergranular Cracking) เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกใช้งานในอุณหภูมิที่ส่งเสริมให้เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ (Sensitization Temperature) โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิ 450-850 °C ซึ่งสภาวะดังกล่าวนี้จะส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการสูญเสียโครเมียมบริเวณที่อยู่ใกล้ขอบเกรน ทำให้ขอบเกรนมีความไวต่อการกัดกร่อน จึงทำให้เกิด Intergranular Cracking และเมื่อสังเกตโครงสร้างจุลภาคของอุณหภูมิการเล่นประสานที่ 730 °C เวลาการเล่นประสาน 30 นาที พบว่าชิ้นงานมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว เนื่องจากบริเวณตรงกลางและบริเวณขอบรอยประสานของชิ้นงาน เกิดรอยบุบละเอียด มีลักษณะเป็นลักษณะเล็ก ๆ ครอบคลุมพื้นผิวเกือบทั้งหมด

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยประสานที่ผ่านกระบวนการ EDS โดยองค์ประกอบทางเคมีของรอยประสานที่ใช้เวลาประสานเท่ากันแต่อุณหภูมิประสานต่างกัน สิ่งที่สังเกตได้คือ ชิ้นงานมีการประสานติดกันเพราะชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือนแล้วนำฝั่งเหล็กกล้า K110 มาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เมื่อส่องจุดต่าง ๆ บนชิ้นงานจะพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของทั้งสแตนคาร์ไบด์และโลหะเติม แสดงว่าชิ้นงานประสานติดกันระหว่างเหล็ก K110 กับทั้งสแตนคาร์ไบด์

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การเล่นประสานระหว่างทั้งสแตนคาร์ไบด์กับเหล็กกล้า K110 ที่อุณหภูมิเล่นประสาน 730 °C เวลา 45 นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด จึงควรประสานชิ้นงานที่ระดับปัจจัยนี้ขึ้นมาอีก 1 ชั้น เพื่อนำชิ้นงานมาทดสอบแรงเฉือนและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอีกครั้ง เพื่อยืนยันผลการทดลองและทำให้ผลการทดลองที่ได้น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Chinese Society of Aeronautics and Astronautics & Benihana Universit, Joining of SiO<sub>2</sub> ceramic and TC4 alloy by Nanoparticles modified brazing filler metal, Chinese Journal of Aeronautics (2018) 385-390.
- [2] H.Mizuhara and T.Obama, Ceramic/Metal Seals- AMS International. Brazing Ceramic to Metal (1993) 964-974.
- [3] Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic and TiAl alloy joints brazed with Ag-Cu-Ti filler metal. Ceramics International (2015) 6925-6933.
- [4] Sbondadmin, Ceramic to Metal Bonding. Scripta Materialia (2011) 1170-1173.
- [5] Alexey S. Kurllov, Alessandro I. Gusev, Tungsten Carbides, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London (2013).
- [6] BOHLER Edelstahl GmbH & Co KG, High performance steels for punching and blanking, Mariazeller Straße 25 8605 Kapfenberg Austria (2018).
- [7] Dongguan Otai Special Steel, คุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม Bohler k110, Bohler k110 (2020).
- [8] Fusion Incorporated, Filler Metals, Prafax Thai (2020).
- [9] Altair Technologies, Vacuum Active Metal Brazing, Altair (2019).
- [10] Federal Highway Administration Research and Technology, Portland Cement Concrete Pavements Research Thermal Coefficient of Portland Cement Concrete. Federal Highway Administration Research and Technology Coordinating Developing and Delivering Highway Transportation Innovations (2016).
- [11] Departamento de Engenharia Mecânica, Review Article Recent advances in metal ceramic brazing. Laboratório de Soldagem Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Univeritário Trindade Florianópolis SC (2003)178-198.
- [12] Solution Center, คู่มือการใช้ Minitab หัวข้อ Design of Experiments, Minitab15 Statistical Software (2008) 9-174.
- [13] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, [Online]. <http://steel.keytometals.com/> (December,2020).
- [14] Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, [Online]. <https://irrigationcraft.com/> (December,2020).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์ทั้งหมดนี้ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

- [15] George E. Dieter, Mechanical Metallurgy 3rd edition, McGraw-Hill 1986.
- [16] J. Stokes, Theory and Application of the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Thermal Spray Process, Dublin City University (Surface Engineering and Wear) 2020.
- [17] การแตกหักแบบเหนียวและการแตกหักแบบเปราะ, [Online].  
<http://pioneer.netserv.chula.ac.th/> (April,2021).
- [18] 3D Measuring Laser Microscope, [Online].  
[https://www.photonics.com/Products/3D\\_Measuring\\_Laser\\_Microscope/pr62362](https://www.photonics.com/Products/3D_Measuring_Laser_Microscope/pr62362)  
(April,2021).
- [19] กล้องจุลทรรศน์แบบ 3D, [Online].  
<https://fotografarestrafighenude.wordpress.com/2014/05/29/2-il-corpo-nudo-conosciuto-a-livello-microscopico-o-se-preferite-lo-studio-della-fica-e-del-pene-a-livello-molecolare/> (April,2021).
- [20] Filler Metal 49/Cu, [Online]. <https://www.bowmap.com/en/products/416123>  
(April,2021).
- [21] องค์ประกอบเคมีของทั้งสแตนคาร์ไบด์, [Online]. <https://carbidedee.wordpress.com/mr-carbide> (April,2021).
- [22] องค์ประกอบเคมีของเหล็ก Bohler k110, [Online]. <https://bohler-edelstahl.com>  
(April,2021).
- [23] Profaxthai, Technical Data Sheet Braze Tec 49/Cu, Saxonia (2018) 1.
- [24] น้ำยาประสาน, [Online]. <https://www.profaxthai.com> (April,2021).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

## Submission Information

ID	SUBMISSION DATE	SUBMITTED BY	ORGANIZATION	FILENAME	STATUS	SIMILARITY INDEX
2066094	May 12, 2021 at 02:03 AM	60010455@kmitl.ac.th	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	เจ็ครวมเล่ม ล่าสุด.docx.pdf	Completed	0.49 %

## Match Overview

Show  entries

Search:

NO.	TITLE	AUTHOR(S)	SOURCE	SIMILARITY INDEX
1	การศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาฟิล์มลอกของซิลิคอนเวเฟอร์ในการเคลือบผิวฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ A study and analysis on factors affecting film peeling problem of silicon wafer coating for instrument temperature sensor.	ยรรยง สรี สวัสดิ์	สถาบัน เทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	0.49 %

Showing 1 to 1 of 1 entries

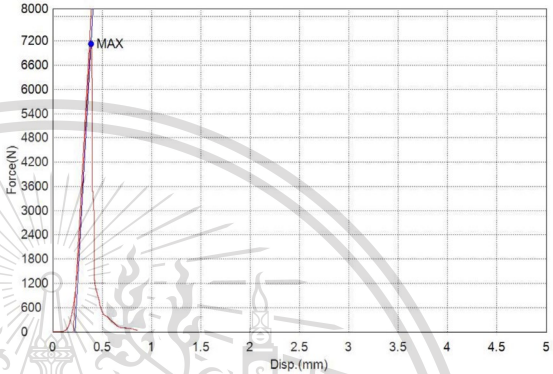
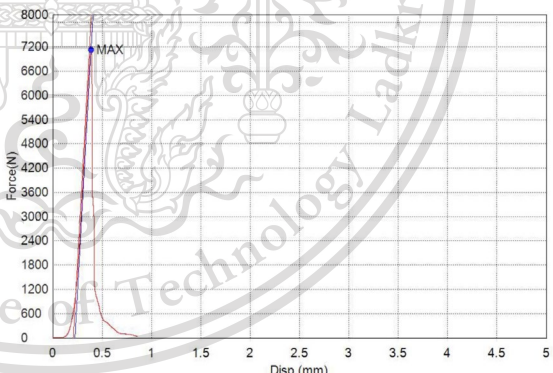
First Previous 1 Next Last

รูปที่ ผก. 1 การตรวจสอบอักษรวิสุทธิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

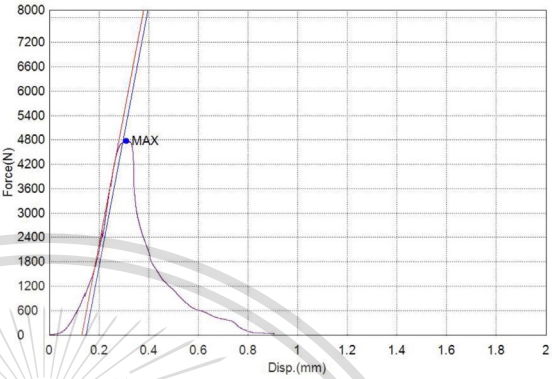
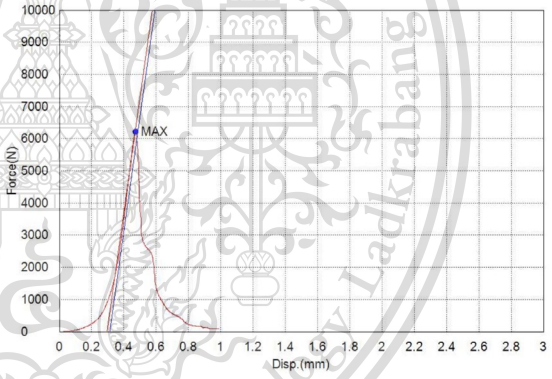
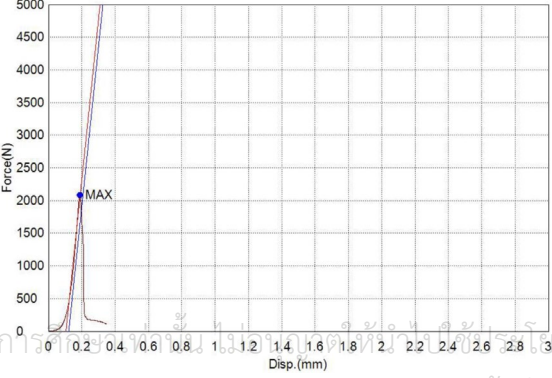
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ตารางที่ ผช. 1 ความสัมพันธ์ของกราฟระหว่างแรงกับการกระจัดจากการทดสอบแรงเฉือน

ชั้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเฉือนกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
1	690 °C, 15 นาที	
2	690 °C, 15 นาที	

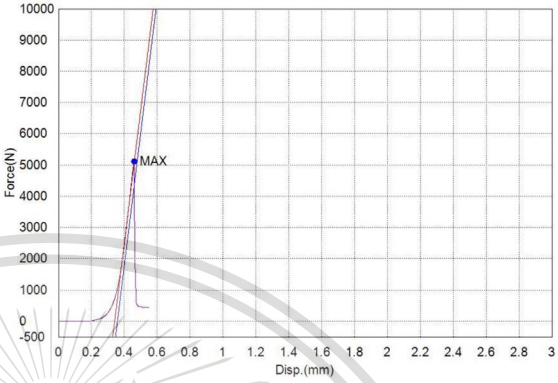
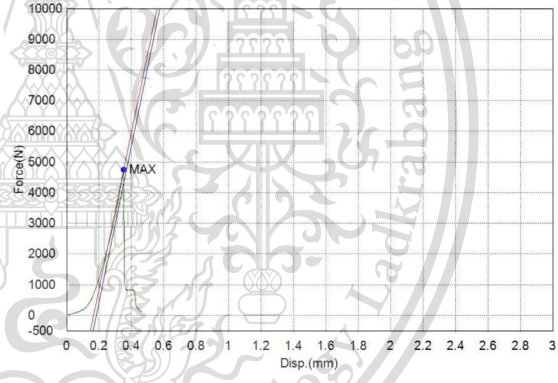
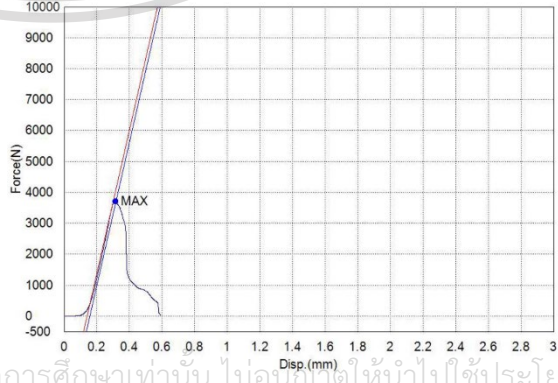
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชั้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเฉือนกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
3	690 °C, 30 นาที	
4	690 °C, 30 นาที	
5	690 °C, 30 นาที	

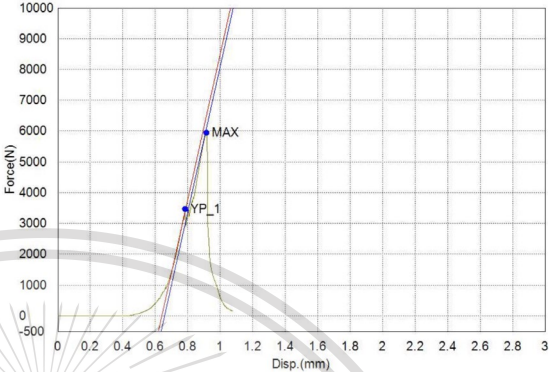
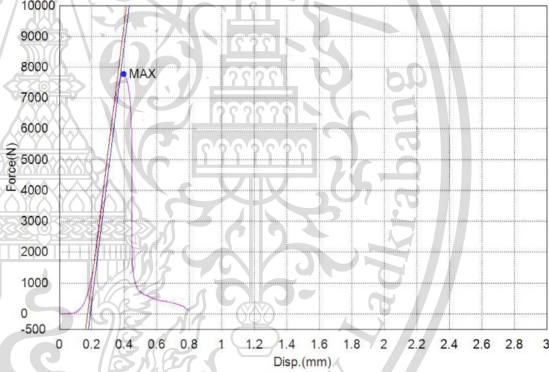
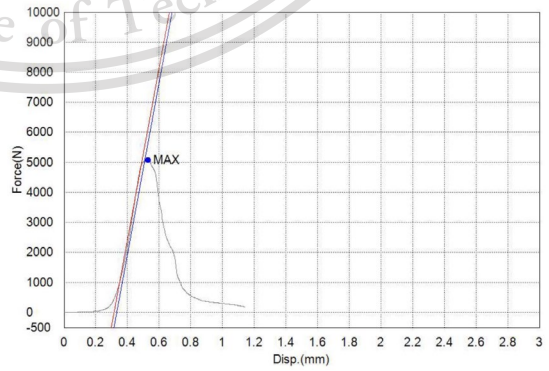
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยทางวิชาการ ไม่สามารถดัดแปลงหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชิ้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบ แรงเนื่องด้วยเครื่อง UTM
6	690 °C, 30 นาที	
7	690 °C, 45 นาที	
8	690 °C, 45 นาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการแก้ไขใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้ให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

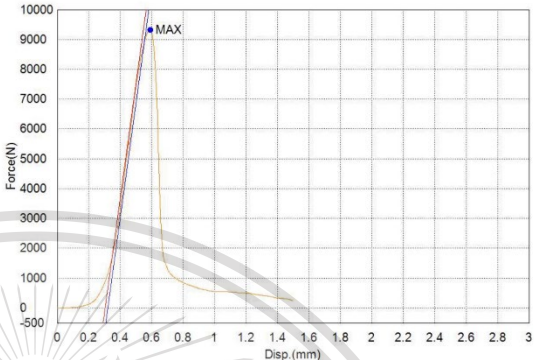
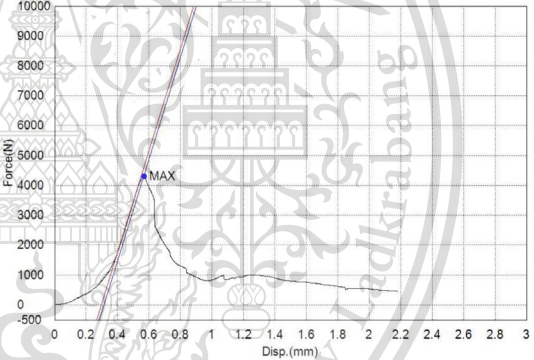
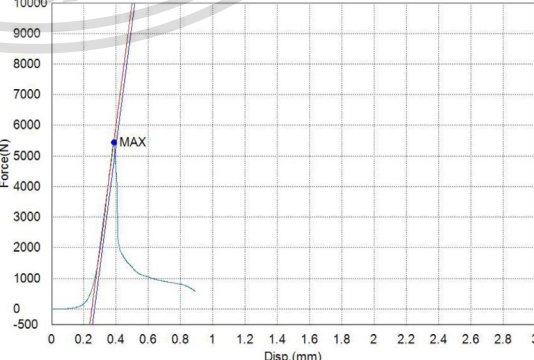
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชิ้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
9	690 °C, 45 นาที	
10	710 °C, 15 นาที	
11	710 °C, 15 นาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

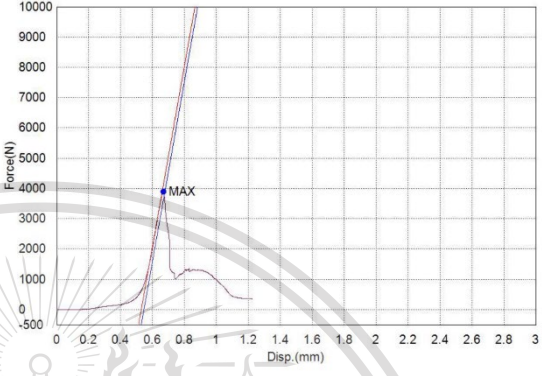
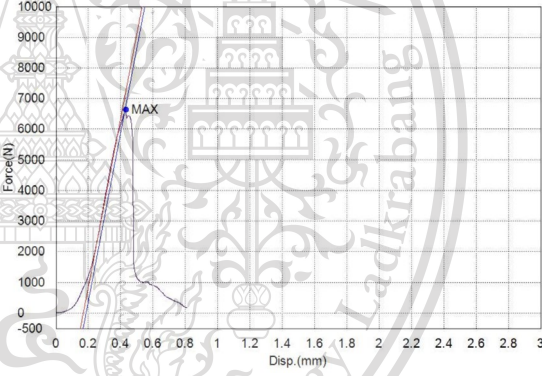
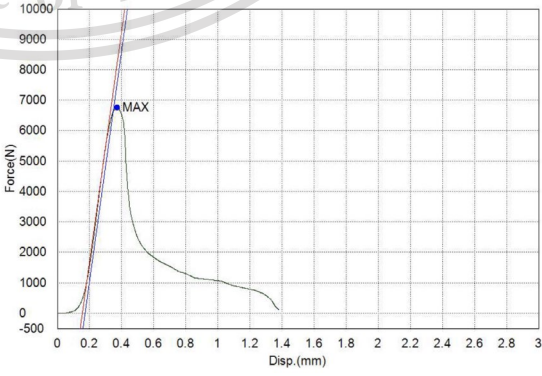
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชั้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
12	710 °C, 15 นาที	
13	710 °C, 30 นาที	
14	710 °C, 30 นาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

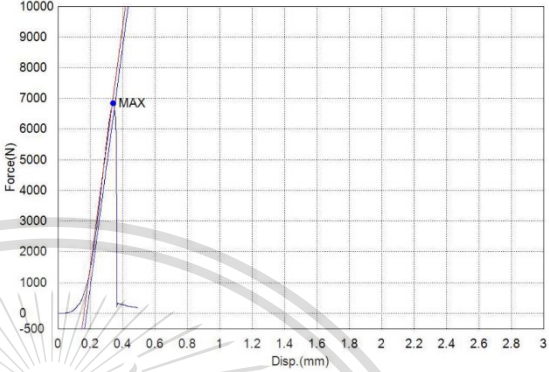
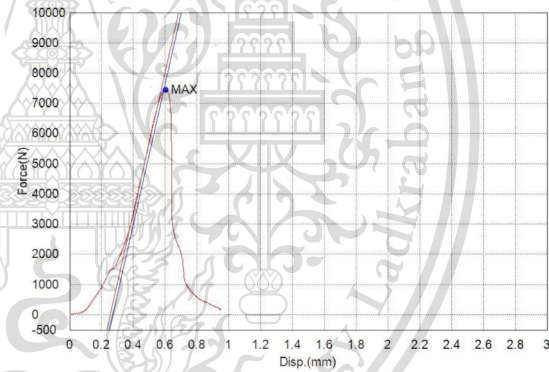
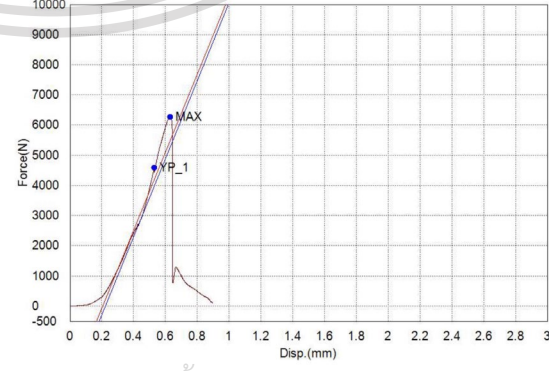
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชิ้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
15	710 °C, 30 นาที	
16	710 °C, 45 นาที	
17	710 °C, 45 นาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

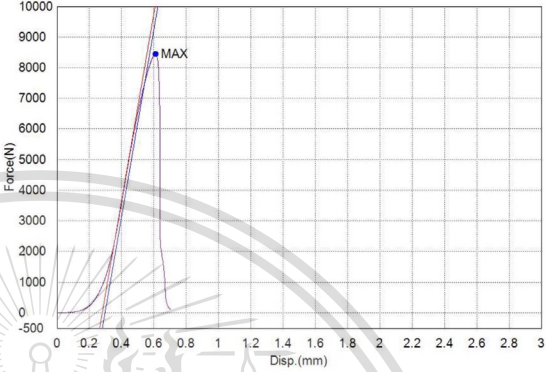
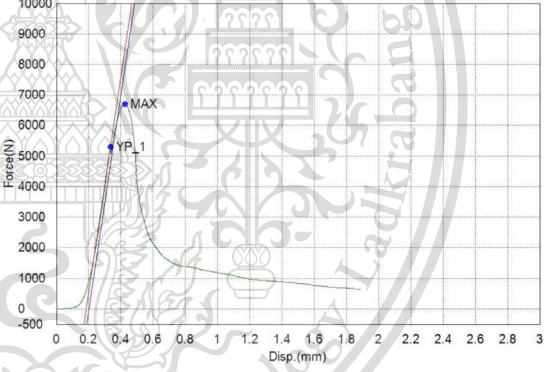
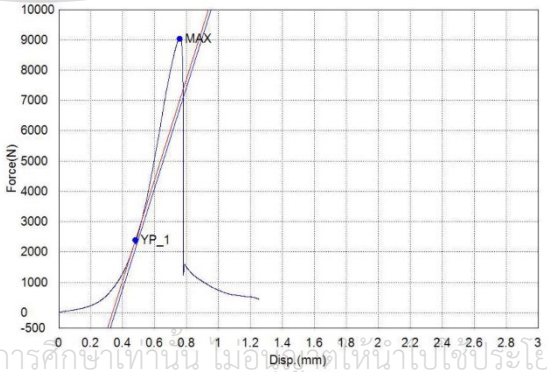
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชิ้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
18	710 °C, 45 นาที	
19	730 °C, 15 นาที	
20	730 °C, 15 นาที	

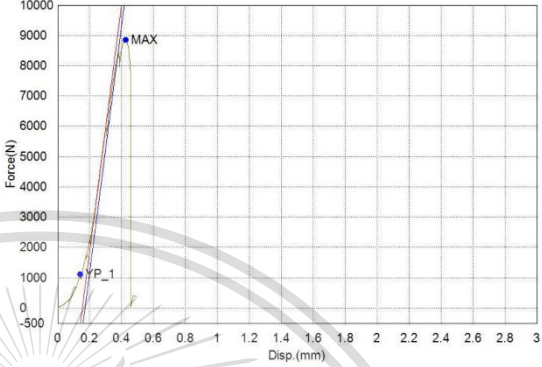
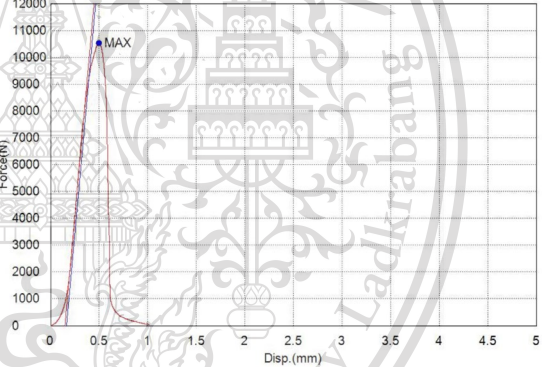
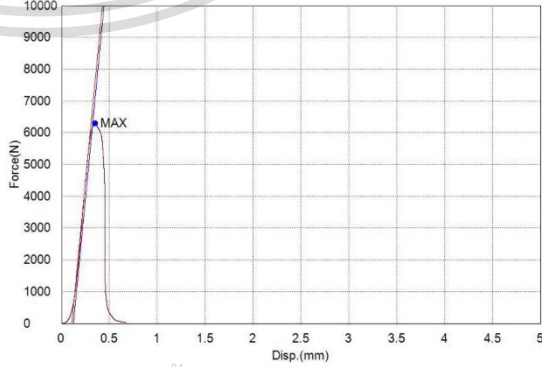
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชิ้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
21	730 °C, 15 นาที	
22	730 °C, 30 นาที	
23	730 °C, 30 นาที	

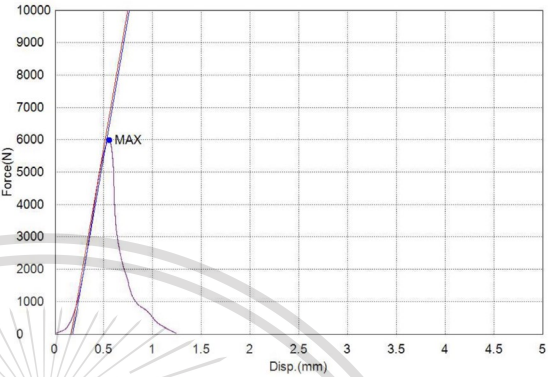
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

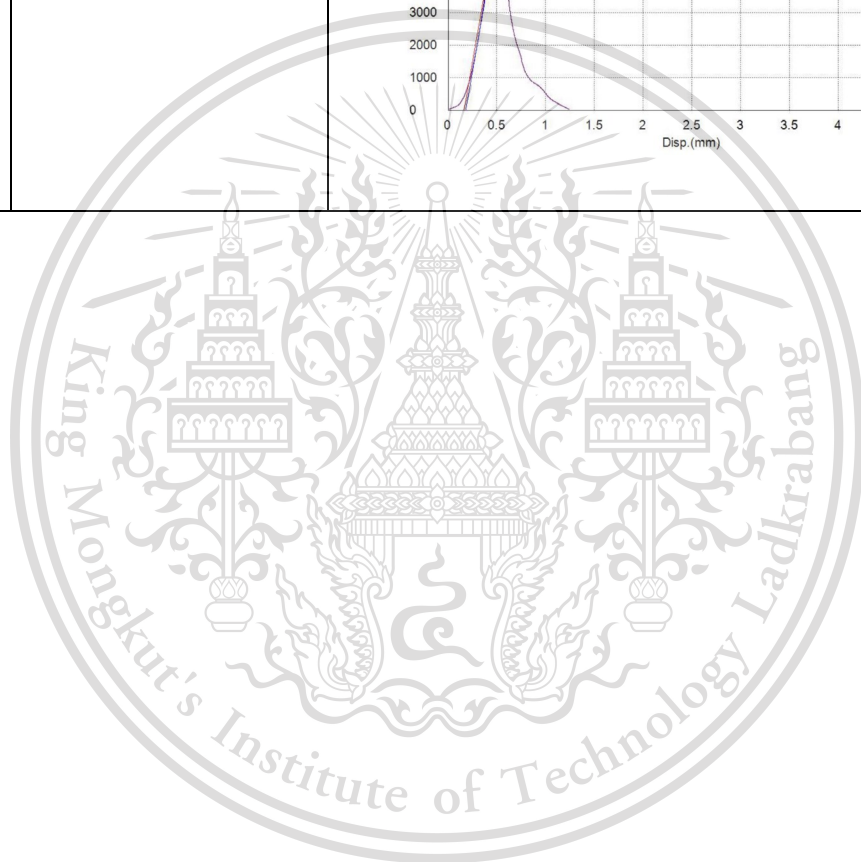
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชั้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
24	730 °C, 30 นาที	
25	730 °C, 45 นาที	
26	730 °C, 45 นาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

ชิ้นงานที่	อุณหภูมิการประสาน (°C) และ เวลาการประสาน (นาที)	กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการกระจัดที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนด้วยเครื่อง UTM
27	730 °C, 45 นาที	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.