

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น

นายจิติ รินเสนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2551

**FABRICATION OF ALUMINA-ALUMINIUM
LAMINATE COMPOSITE**

Jitti Rinseana

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Ceramic Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2008**

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.สุทิน คูหาเรืองรอง)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.วีระยุทธ ลอประยูร)

กรรมการ

(รศ. ดร.จรัสศรี ลอประยูร)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จิตติ รินเสนา : การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน
(FABRICATION OF ALUMINA-ALUMINIUM LAMINATE COMPOSITE)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม กิ่งวานตระกูล, 115 หน้า.

การศึกษาการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติ เชิงกล ของอะลูมินา ด้านความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นเกราะกันกระสุนสำหรับป้องกันอาวุธสงคราม โดยงานวิจัยนี้จะทำการขึ้นรูปวัสดุเชิง ประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียมอัดซ้อน แบบ 3 ชั้น โดยการนำแผ่น อะลูมินา เซรามิก 2 แผ่น ที่มีความหนาแผ่นละ 6 มิลลิเมตร นำมาประกบกับแผ่น โลหะอะลูมิเนียมที่มีความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร สำหรับขึ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ได้นำไปเผาประสานที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ภายใต้บรรยากาศปกติ เพื่อทำให้เกิดการยึดติดระหว่างแผ่น หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเผาประสานไปวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะและ ทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้ารอยต่อ (interface) ความแข็งแรง (Flexural strength) และความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)

ผลการทดลองพบว่า วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงลดลงแต่ความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้น เมื่อเผา ประสานที่อุณหภูมิ 950°C เวลา 45 นาที โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรง 139 ± 4.18 MPa และความต้านทานแรงกระแทก 259 ± 2.70 KJ/m² ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงกระแทกสูงที่สุดในงานวิจัยนี้

JITTI RINSEANA : FABRICATION OF ALUMINA-ALUMINIUM
LAMINATE COMPOSITE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUKASEM
KANGWANTRAKOOL, D.Eng., 115 PP.

ALUMINA-ALUMINUM / COMPOSITE / STRENGTH / ALUMINA
ALUMINA-ALUMINUM LAMINATE COMPOSITE

The purpose of this work was to improve the mechanical properties of alumina ceramic especially impact strength for the best performance of armor protection. The effect of the adhesive layers on the efficiency of alumina/aluminium laminate composite has been studied. The composites were bonded and laminated with 3 layers, alumina plates thickness of 6 mm and 2 mm for aluminium plate. The samples were bonded in the furnace with various bonding temperature and time. The mechanical properties of bonded samples were compared with alumina plate alone. Then the interfacial microstructure of bonded sample was examined using SEM and the flexural strength, impact strength was measured.

The results of the research showed the suitable condition giving the best quality of product was obtained at 950°C for 45 min. The flexural strength was 139±4.18 MPa and impact strength, 259±2.70 KJ/m².

School of Ceramic Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร .สุขเกษม กังวานตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในสิ่งที่ เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

- อาจารย์ ดร .วิระยุทธ ลอประยูร และ รองศาสตราจารย์ ดร .จรัสศรี ลอประยูร ผู้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยทั้งเรื่องทางวิชาการและเรื่องส่วนตัว

- รองศาสตราจารย์ ดร .สุทิน กุหาเรืองรอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร .สุธรรม ศรีหล่มสัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์ ผู้ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

- คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ผู้ที่คอยให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านการเอกสารแก่ผู้วิจัย

- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาระดับปริญญาโท
มหาบัณฑิต

- สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หน่วยงานที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย

- คุณเปรมวดี ทักษิณ คุณศิริภา รินเสนา และคุณจตุพล รินเสนา ที่คอยดูแลและให้กำลังใจในการทำงานจนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อทองรัตน์ รินเสนา คุณแม่คำทอง รินเสนา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

จิตติ รินเสนา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
วัสดุเชิงประกอบ.....	4
อะลูมินา.....	16
อะลูมิเนียม.....	18
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	26
3.2 วัสดุและสารเคมี.....	27
3.2.1 ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide Powder).....	28
3.2.2 แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (Aluminium Alloy Plate).....	28
3.2.3 แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ (Titanium Alloy Plate).....	28
3.3 วิธีการทดลอง.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1 การออกแบบการทดลอง.....	32
3.3.1.1 การศึกษาเบื้องต้น (ก่อนทำการทดลองจริง).....	32
3.3.1.2 การศึกษาและทดลองในงานวิจัย.....	34
3.3.2 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น.....	35
3.3.2.1 การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงอะลูมินา.....	35
3.3.2.2 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส.....	35
3.3.3 การเตรียมแผ่นอะลูมินา.....	36
3.3.4 การเผาผนึก.....	38
3.3.5 การตรวจสอบความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของอะลูมินา.....	39
3.3.6 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมออกไซด์ชั้นแบบ 3 ชั้น.....	39
3.3.7 การเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมออกไซด์ชั้นแบบ 3 ชั้น.....	40
3.3.8 ความทนต่อการดัดโค้ง.....	41
3.3.8.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ.....	42
3.3.8.2 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง.....	42
3.3.9 ความต้านทานแรงกระแทก.....	45
3.3.9.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ.....	45
3.3.9.2 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก.....	46
3.3.10 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	47
3.3.10.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	47
3.3.10.2 การวัดขนาดเกรนของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.....	49
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	50
4.1 การศึกษาเบื้องต้น.....	50
4.2 การศึกษาและทดลองในงานวิจัย.....	61
4.2.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา.....	61
4.2.1.1 การวิเคราะห์ทางวัฏภาคของผงอะลูมินา.....	62
4.2.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงอะลูมินา.....	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของอะลูมินา.....	64
4.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่มีต่อลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน.....	65
4.3.1 แสดงภาพจากการเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน.....	65
4.3.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ของผิวหน้าร่วม.....	76
4.4 ผลของอุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน.....	81
4.4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่มีต่อความทนต่อการดัดโค้งและ ความต้านทานแรงกระแทก.....	81
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. แสดงผลของการเผาประสานวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน หลังการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	91
ภาคผนวก ข. มาตรฐานการทดสอบ ASTM และ ISO.....	100
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงมุมมองสัมพัทธ์ที่ได้จากการคำนวณ การทดลอง และพลังงานที่ผิวหน้าร่วมระหว่าง วัสดุเซรามิกกับวัสดุโลหะ.....12
2.2	แสดงสมบัติเชิงกลของวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ แบบอัดซ้อน.....13
2.3	แสดงสมบัติหรือคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด.....15
2.4	แสดงสมบัติของอะลูมินา.....16
2.5	แสดงสมบัติของอะลูมิเนียม.....19
2.6	แสดงผลการทดลองของวัสดุเชิงประกอบของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม.....21
3.1	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....26
3.2	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....27
3.3	แสดงรายละเอียดการศึกษาเบื้องต้นการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ.....33
3.4	แสดงความหนาของอะลูมินาและอะลูมิเนียมและสภาวะการทดลองสำหรับการขึ้นรูป วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมอัดซ้อน แบบ 3 ชั้น..... 34
3.5	แสดงข้อมูลในการเผานิกแผ่นอะลูมินา.....38
3.6	สภาวะที่ใช้ในการทดลองการเผาประสานวัสดุเชิงประกอบ.....41
4.1	แสดงผลการศึกษาเบื้องต้นการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ.....50
4.2	แสดงลักษณะเฉพาะที่วัดได้ของผงอะลูมินา.....61
4.3	แสดงลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของอะลูมินาร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก.....64
4.4	แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาของการเผาประสานที่มีต่อลักษณะเฉพาะ ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน.....66
4.5	แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งและความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียมอัดซ้อน แบบ3 ชั้น ที่อุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่แตกต่างกัน.....81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงรูปแบบของวัสดุเสริมแรง..... 6
2.2	แสดงรูปแบบของการต่อวัสดุเชิงประกอบตามความยาวของแนวแกน..... 8
2.3	แสดงรูปแบบของการต่อวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน..... 9
2.4	แสดงสมบัติการเปียกและมุมสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง..... 10
2.5	แสดงชนิดของวัสดุเชิงประกอบ..... 14
2.6	แสดงการพัฒนาของวัสดุเชิงประกอบ..... 15
2.7	แสดงโครงสร้างของอะลูมินา..... 16
2.8	แสดงโครงสร้างผลึกของอัลฟา- อะลูมินา..... 17
2.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Contact angle กับ Time of contact ของ วัสดุเชิง ประกอบของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม..... 20
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Shear length ของวัสดุเชิงประกอบ ของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม..... 20
2.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Contact angle กับ Temperature ของวัสดุเชิงประกอบ ของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม..... 22
2.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bending strength กับ Fraction of bonded area (%) ของวัสดุเชิงประกอบของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม..... 22
2.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized efficiency กับ Thickness ของวัสดุ เชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม..... 24
2.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized efficiency กับ Projectile velocity ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม..... 24
2.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Remaining armour thickness กับ Adhesive layer thickness ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม..... 25
3.1	แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นอะลูมินา..... 29
3.2	แสดงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นอะลูมินา..... 30
3.3	แสดงขั้นตอนและวิธีการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน..... 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แสดงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกล ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน	32
3.5 แสดงเครื่อง Particle size analyzer	35
3.6 แสดงเครื่อง X-ray diffraction, XRD	36
3.7 แสดงเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก	37
3.8 กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา	38
3.9 แสดงรูปแบบการประกอบของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาอะลูมิเนียมอัดซ้อนแบบ 3 ชั้น	40
3.10 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม อัดซ้อน แบบ 3 ชั้น ที่ผ่าน การเผาประสานที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที	41
3.11 แสดงตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดใบตัดเพชร	42
3.12 แสดงเครื่อง Universal testing machine	43
3.13 แสดงลักษณะการวางชิ้นงานบนเครื่อง Universal testing machine	44
3.14 แสดงเครื่อง Charpy impact testing machine	46
3.15 แสดงลักษณะการวางชิ้นงานบนเครื่อง Charpy impact testing machine	47
3.16 แสดงการเรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอที่มีความหยาบ ไปหาละเอียด	48
3.17 แสดงเครื่อง Ion sputtering device	48
3.18 แสดงกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	49
3.19 แสดงการวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เร็ด	49
4.1 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6061-T651 หนา 6 มิลลิเมตร	51
4.2 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 1 มิลลิเมตร	52
4.3 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร.....	54
4.5 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้แผ่นไททานเนียมอัลลอยด์หนา 1 มิลลิเมตร วางคั่น อยู่ตรงกลาง.....	55
4.6 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้แผ่นไททานเนียมอัลลอยด์หนา 1 มิลลิเมตร วางคั่น อยู่ตรงกลาง.....	56
4.7 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททานเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นไททานเนียมอัลลอยด์หนา 1 มิลลิเมตร.....	57
4.8 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้แผ่นอะลูมินา จุ่มเคลือบด้วยฟريتที่มีจุดศูนย์กลางหนา 1 มิลลิเมตร แล้วประกบกับแผ่นอะลูมิเนียม.....	58
4.9 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และเติมลิเทียมคาร์บอเนตลงในฟิตร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เพื่อลดจุดศูนย์กลางของฟريتแล้วใช้แผ่นอะลูมินาจุ่มเคลือบฟريتหนา 1 มิลลิเมตร แล้วประกบกับแผ่นอะลูมิเนียม.....	59
4.10 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ภายใต้อากาศอาร์กอน โดยใช้แผ่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้ตะกั่วหนา 1 มิลลิเมตร วางคั่นอยู่ตรงกลาง.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้ผงอะลูมิเนียมผสมกับผงอะลูมินาทาบนแผ่นอะลูมินาหนา 1 มิลลิเมตร แล้วประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร.....	60
4.12 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา.....	62
4.13 แสดง XRD แพทเทิร์นของผงอะลูมินา.....	63
4.14 แสดงรูปไมโครกราฟของผงอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	64
4.15 แสดงรูปไมโครกราฟของอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	65
4.16 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที.....	67
4.17 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที.....	68
4.18 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที.....	69
4.19 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที.....	70
4.20 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที.....	71
4.21 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที.....	72
4.22 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที.....	73
4.23 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที.....	74
4.24 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที.....	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงรูปไมโครกราฟของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ หลังผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ.....	76
4.26 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบ.....	82
4.27 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบเทียบกับอะลูมินา.....	83
4.28 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ.....	84
4.29 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบเทียบกับอะลูมินา.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนานาชาติประเทศทั่วโลกได้เล็งเห็นความสำคัญที่จะพยายามวิจัยและพัฒนาอาวุธยุทโธปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในประเทศของตนเองเพื่อที่จะให้มีความทันสมัยและมีประสิทธิภาพในการทำลายล้างหรือการป้องกันควบคู่กันไปจากฝ่ายตรงข้ามให้มากขึ้น อนึ่งการวิจัยและพัฒนาวัสดุถือเป็นหนึ่งในศาสตร์ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากกระสุนปืน หรือ เกราะกันกระสุน คือหนึ่งในหลาย ๆ อุปกรณ์ที่มีบทบาทหน้าที่ในการป้องกันการทำลายที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นบุคคล ยานพาหนะ ฐานทัพ รวมถึงสิ่งของอื่น ๆ ด้วย ปัจจุบันการนำวัสดุที่มีโดยทั่ว ๆ ไป เช่น วัสดุจำพวกโลหะ วัสดุจำพวกพลาสติก ใยสังเคราะห์อย่างหนึ่งมาผลิตเป็นเกราะกันกระสุนจะมีข้อจำกัดในการป้องกันอาวุธสงครามจึงได้มีการนำวัสดุเซรามิกมาใช้เป็นเกราะกันกระสุนเนื่องจากมีความแข็งและความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโลหะ ซึ่งปัจจุบันเป็นวัสดุที่นิยมนำมาประกอบเป็นแผ่นเกราะกันกระสุนสามารถป้องกันกระสุนได้ถึงระดับสูงสุด (ระดับ 4) ตามมาตรฐานเกราะกันกระสุนของสถาบัน National Institute of Justice (NIJ) ที่ทั่วโลกยอมรับ ซึ่งวัสดุเซรามิกที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ทำเป็นแผ่นเกราะกันกระสุนนั้นควรเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งและความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ซึ่งในที่นี้ก็คือ วัสดุเซรามิกจำพวก ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC), ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4), โบรอนคาร์ไบด์ (B_4C), ไททาเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นต้น

สำหรับอะลูมินา เป็นวัสดุหนึ่ง ที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นเกราะกันกระสุนมากที่สุด เนื่องจากอะลูมินามีความแข็ง ความแข็งแรง และราคาถูกที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเซรามิกชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ทำเกราะกันกระสุนและในปัจจุบันการทำอะลูมินาให้อยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบเป็นวิธีหนึ่ง ที่เข้ามามีบทบาทสำคัญมากในการพัฒนาสมบัติดังกล่าวของอะลูมินา ไม่ว่าจะเป็นวัสดุเชิงประกอบชนิดที่ใส่อนุภาคเสริมแรงหรือการใช้เส้นใยเสริมแรงรวมทั้งการประกบกับแผ่นโลหะเหนียวแบบอัดซ้อน ซึ่งการทำวัสดุเชิงประกอบทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1.1.1 ระดับจุลภาค (Microscopic scale)

เป็นการทำวัสดุเชิงประกอบในลักษณะของการเติมอนุภาคนาโนขนาดเล็ก ๆ ลงไปในส่วนประกอบหลัก (Matrix) ตัวอย่าง เช่น การทำวัสดุเชิง ประกอบ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ หรือ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ ซึ่งอนุภาคที่เติมลงไปจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของอะลูมินา

1.1.2 ระดับมหัพภาค (Macroscopic scale)

การทำวัสดุเชิงประกอบในระดับมหัพภาคยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ประเภทชั้นเดียว (Single layer) เป็นการทำวัสดุเชิงประกอบให้ได้เพียงชั้นเดียวที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุอื่นอยู่ภายในส่วนประกอบหลัก (Matrix) เช่น การเติมเส้นใยที่มีลักษณะยาวต่อเนื่องกัน (Continuous) หรือเส้นใยที่มีขนาดสั้นไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร

2. ประเภทหลายชั้น (Multi layer) เป็นการทำวัสดุเชิงประกอบที่มีลักษณะซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ (Layering) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน อาจมีเพียง 2 องค์ประกอบหรือมากกว่านั้น แต่ละชั้นจะให้สมบัติที่ต่างกันได้ สามารถแบ่งย่อยได้อีกคือ การทำเป็นชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นมีเพียงองค์ประกอบเดียว เช่น $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ laminate composite หรือ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ laminate composite และการทำวัสดุเชิงประกอบลูกผสม (Hybrid laminate) ซึ่งแต่ละชั้นอาจมีได้หลายองค์ประกอบ เช่น การนำวัสดุเชิงประกอบชนิดชั้นเดียว (Single layer) หรือชนิดที่เติมผงอนุภาคมาซ้อนทับกันเป็นชั้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินา ด้านความต้านทานแรงกระแทก โดยใช้แผ่นโลหะอะลูมิเนียมประกบแบบอัดซ้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน (Laminate composite) ได้แก่ จำนวนชั้น ความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม อุณหภูมิและเวลาของการเผาประสาน ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่ผิวหน้าร่วม (Interface) ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน (Laminate composite)

1.3.2 ตรวจสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) เช่น ความแข็งแรง และความต้านทานแรงกระแทก ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน (Laminate composite)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงภาวะหรือตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการการขึ้นรูปที่มีผลต่อ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

1.4.2 ทำให้ทราบถึงลักษณะของโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่ผิวหน้าร่วมของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

1.4.3 ทำให้ทราบประโยชน์และศักยภาพของการใช้วัสดุ เพื่อทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมสามารถป้องกันกระสุนได้

1.4.4 ทำให้ทราบถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)

คือ วัสดุที่ประกอบขึ้นจากการรวมกันของส่วนประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งประกอบไปด้วยเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือเฟสหลัก (Matrix phase) และเฟสกระจายตัว (Distributed phase) หรือเฟสเสริมแรง (Reinforcing phase) ซึ่งเฟสกระจายตัวหรือเฟสเสริมแรงอาจมีได้มากกว่า 1 ชนิดขึ้นไป ส่วนประกอบที่มารวมกันจะมีความแตกต่างกันทั้งในด้านฟิสิกส์ องค์ประกอบทางเคมี และที่สำคัญต้องไม่เป็นตัวทำลายซึ่งกันและกัน สมบัติเดิมของส่วนประกอบแต่ละส่วนจะมีสมบัติอย่างไรอย่างหนึ่งดีเด่นมากกว่ากัน ดังนั้นเมื่อนำมาทำวัสดุเชิงประกอบ จะได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่ดีทั้งหมดของส่วนประกอบตั้งต้นรวมอยู่ในวัสดุเชิงประกอบนั้น (ศุภสโรช หมั่นสิทธิ์, 1995)

2.1.1 ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

1. วัสดุเนื้อหลัก (Matrix)
2. วัสดุเสริมแรง (Reinforcement)
3. อินตรภาค (Interface)

2.1.2 วัสดุเนื้อหลัก

คือ วัสดุที่มีปริมาณมากในวัสดุเชิงประกอบ มีหน้าที่ห่อหุ้มหรือยึดจับวัสดุเสริมแรงให้ฝังตัวอยู่ได้และมักมีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุเสริมแรง สมบัติที่ดีของวัสดุเนื้อหลัก คือ

1. ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุเสริมแรงในระหว่างการขึ้นรูปหรือระหว่างการเผาผนึก เพราะถ้าเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น จะทำให้สมบัติของวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรงเปลี่ยนไป เพราะฉะนั้นก่อนและหลังการขึ้นรูปหรือการเผาผนึก วัสดุเนื้อหลักกับวัสดุเสริมแรงควรมีรูปแบบเหมือนกันยกเว้นบริเวณอินตรภาคที่จะมีการเปลี่ยนแปลง
2. ไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือรูปร่างของวัสดุเสริมแรง เช่น วัสดุเนื้อหลักต้องไม่ทำให้วัสดุเสริมแรงเกิดการแตกหรือหักได้ง่าย วัสดุเนื้อหลักควรจะมีคุณสมบัติหน่วงพอให้วัสดุเสริมแรงเคลื่อนที่หรือยับตัวได้บ้าง
3. วัสดุเนื้อหลักควรมีสถานะทางเคมีที่เสถียร (Chemically stable) ไม่เปลี่ยนแปลงสถานะหรือโครงสร้างง่าย ๆ

4. สามารถที่จะห่อหุ้มวัสดุ เสริมแรง ได้กล่าวคือ วัสดุเนื้อหลักยอม ให้วัสดุเสริมแรงเข้าไปฝังตัวหรือกระจายตัวอยู่ได้โดยไม่หลุด

5. มีความต้านทาน การเกิด ความล้า (Fatigue), ความคืบ (Creep) และ ทนแรงกระแทก (Impact) ได้ดี ถ้าวัสดุเนื้อหลักทนแรงกระแทกได้ไม่ดี วัสดุเนื้อหลักจะเกิดรอยแตกและจะวิ่งไปชนวัสดุเสริมแรงที่วางอยู่ และหากถ้าวัสดุเสริมแรงมีความแข็งแรงกว่าแรงกระแทก ก็จะ ทำให้ไม่เกิดความเสียหายแก่วัสดุเสริมแรง

6. มีความเหนียวสูง (Toughness) ความเหนียว คือความสามารถในการต้านทานรอยแตกร้าวของวัสดุ ในทางเซรามิกวัสดุเนื้อหลักส่วนใหญ่จะมีสมบัติที่เปราะขุ่นเซรามิกที่มีความเหนียว ได้แก่ เซอร์โคเนีย (ZrO_2)

7. ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ได้ง่าย เพราะจะ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในได้

8. สามารถเข้ากันได้ดีกับวัสดุเสริมแรง ทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรง

9. ไม่เกิดการระเหยได้ง่าย (Volatilize)

2.1.3 วัสดุเสริมแรง

คือ วัสดุที่มีปริมาณน้อยในวัสดุเชิงประกอบ มีสมบัติแตกต่าง ไปจากวัสดุเนื้อหลัก และมีสมบัติที่ดีกว่า ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเนื้อหลักมีสมบัติที่ดีขึ้น โดยจะอยู่ในลักษณะกระจายตัวหรือฝังตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักรวมทั้งการประกบแบบอัดซ้อนกับวัสดุเนื้อหลัก

2.1.3.1 สมบัติที่ดีของวัสดุเสริมแรง

1. ความสามารถในการเข้ากันได้กับวัสดุเนื้อหลัก เช่น ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเคมี ความสามารถในการทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรง

2. เป็นตัวช่วยเสริมแรงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลัก โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุเสริมแรง จะมีค่าความแข็ง (Hardness), ความแข็งแรง (Strong) และความแกร่ง (Stiff) มากกว่าวัสดุเนื้อหลัก

3. มีน้ำหนักเบา (Light weight) เมื่อนำมาใช้ในวัสดุเชิงประกอบจะได้สมบัติเชิงกลอยู่ในรูปแบบสมบัติเฉพาะ (Specific properties) โดยเป็นสมบัติเชิงกลต่อความหนาแน่น

4. มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion)

5. มีความสามารถในการยืดหยุ่น (Flexibility) สูง

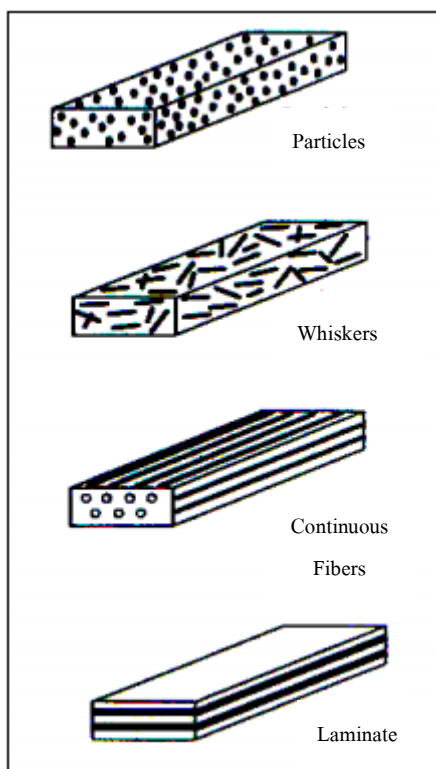
6. มีความเหนียว (Toughness) สูง

7. มีความแข็งแรง (Strength) สูง

โดยทั่วไปแล้วรูปร่างและขนาด (Shape and Dimension) ของวัสดุเสริมแรงจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลด้วย

2.1.3.2 รูปแบบของวัสดุเสริมแรง

1. อนุภาค (Particles)
2. เส้นใยแบบสั้น (Whiskers or Short fibers)
3. เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง (Continuous fibers)
4. แบบแผ่น (Sheet laminate)



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของวัสดุเสริมแรง (Chawla, 1993)

2.1.3.3 สิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้วัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรง

1. จุดหลอมเหลวและการระเหย
2. ความหนาแน่น
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน
4. ลักษณะการเกิดคืบ

5. ความแข็งแรง
6. ความเหนียว
7. ความสามารถในการเข้ากันได้

2.1.4 อันตรภาค

พื้นที่รอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้า 2 ผิวหน้า หรือ ระหว่าง 2 วัสดุ เช่น ของแข็ง-ของแข็ง หรือ ของแข็ง-ของเหลว เป็นต้น ซึ่งมีความสำคัญต่อวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจาก อันตรภาคมีอยู่ในวัสดุเชิงประกอบเป็นพื้นที่มาก และโดยทั่วไปวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรงจะมี ค่าทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ที่ไม่สมดุลกันเนื่องจากเป็นวัสดุคนละชนิด ทำให้มีผล ต่ออันตรภาค

2.1.4.1 ตัวอย่างของสาเหตุที่ทำให้เกิดอันตรภาค

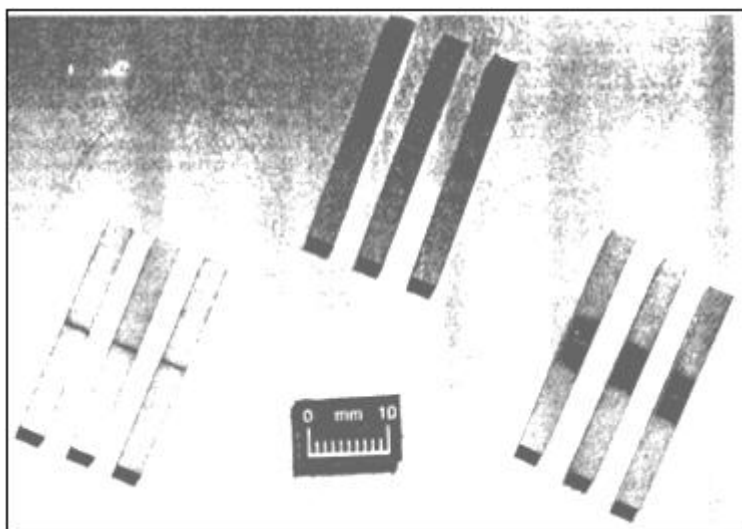
1. สมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว
2. สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนไม่เท่ากัน
3. จำนวนและขนาดของอะตอมที่แตกต่างกัน
4. ปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน
5. โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน
6. ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

2.1.4.2 ลักษณะการยึดติดกันของผลึกบริเวณอันตรภาค

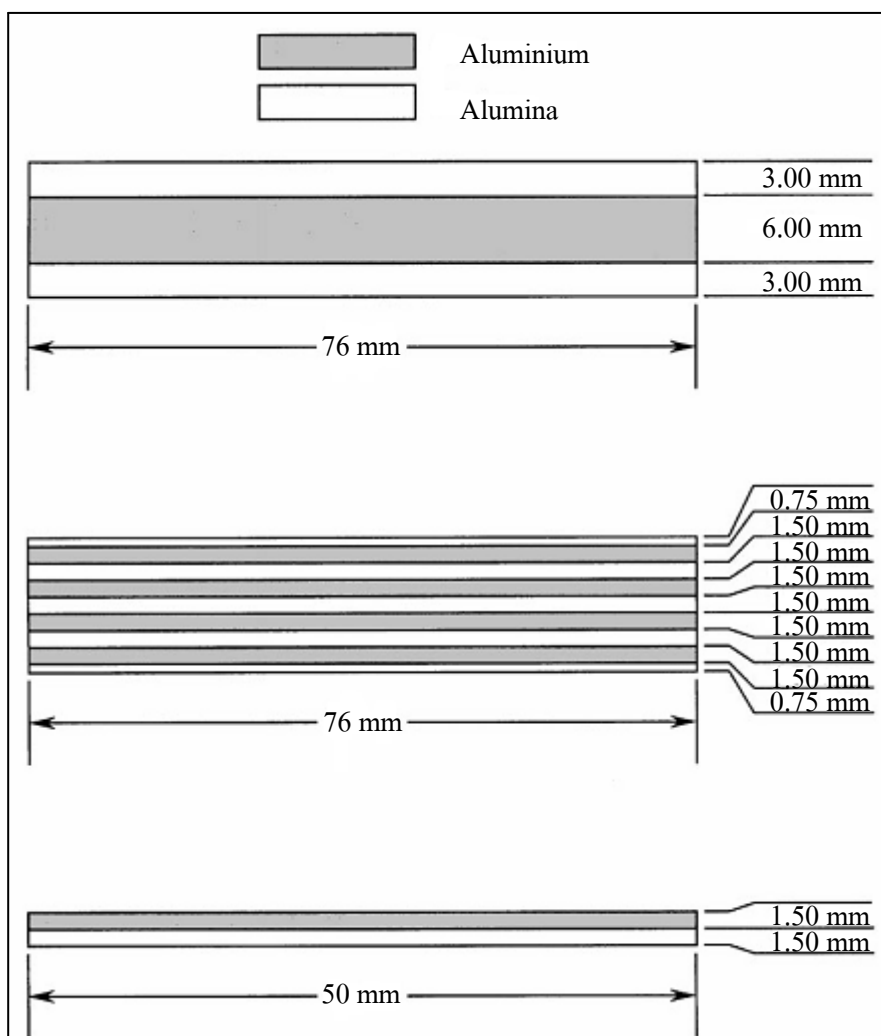
1. Coherent เป็นการยึดติดกันระหว่างระนาบของแลตทิซ (Lattice plane) อย่างต่อเนื่อง โดยที่แลตทิซไม่เกิดการเสียรูป (Dislocation)
2. Semicoherent เป็น การยึดติด กันระหว่างระนาบ ของแลตทิซอย่าง ไม่ ต่อเนื่อง เนื่องจากเกิดการเสียรูปขึ้นบางส่วน
3. Incoherent ระนาบของแลตทิซไม่สามารถยึดติดกันได้ เนื่องจากอะตอม เกิดความไม่เป็นระเบียบ

2.1.5 วัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน (Laminate Composite)

คือ วัสดุเชิงประกอบอีกประเภทหนึ่งที่ใช้ศาสตร์ของการต่อวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมารวมกันหรือบางทีเรียกว่า การต่อ (Joining) โดยอาศัยหลักการของการแพร่ (Diffusion bonding) โดยใช้ความร้อนเพื่อทำให้เกิดพันธะยึดแน่นกันในระดับอะตอม ซึ่งวัสดุที่สามารถนำมาต่อกันนั้นจะต้องมีความเข้ากันได้ หมายถึงเข้ากับระบบในการต่อได้ดี ซึ่งการต่อของวัสดุ นั้นสามารถต่อได้ 2 วิธี คือ การต่อวัสดุตามความยาวของแนวแกน และ การต่อที่นำวัสดุมาประกบกันเป็นชั้น เรียกว่า วัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน (Laminate composite) ซึ่งจำนวนชั้นก็ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ศึกษา การนำไปใช้งาน ความเหมาะสมและความเข้ากันได้ของระบบ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบของ การต่อวัสดุเชิงประกอบตามความยาวของแนวแกน
(Engineering materials handbook, Volume 4)



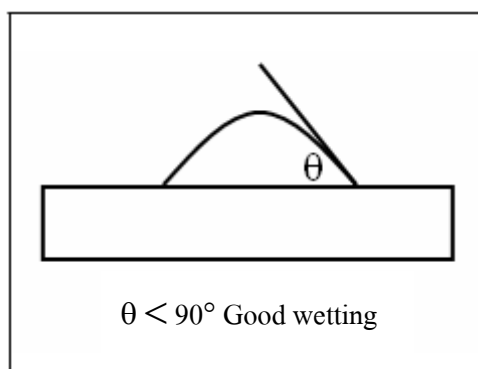
รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบของการต่อวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน (Roeder and Sun, 2001)

สำหรับการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อนนั้น จะมีปัจจัยหลายอย่างที่ใช้ในการพิจารณาถึงการขึ้นรูป เพื่อจะทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีการยึดประสานและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน อาทิเช่น อุณหภูมิ เวลา สมบัติการเปียก (Wetting) มุมสัมผัส (Contact angle, θ) รวมถึงพลังงานที่ผิว (Surface energy หรือ Interfacial tensions) ซึ่งอุณหภูมิจะเป็นตัวกำหนดการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ โดยที่อุณหภูมินั้นจะครอบคลุมถึงจุดหลอมเหลว (Melting point) สำหรับเวลานั้นหากมีการใช้เวลาในเผาการประสานนานหรือเร็วเพียงใดผลกระทบที่ได้จะบ่งบอกถึงสมบัติการเปียก และมุมสัมผัสของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้เป็นส่วนประกอบ ของการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน

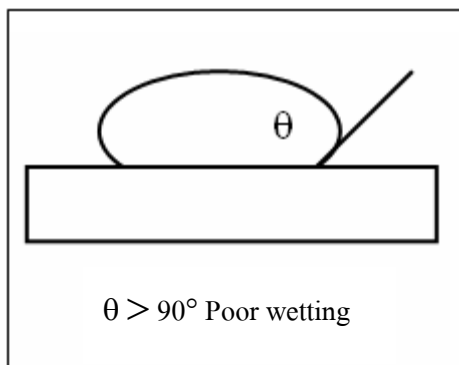
จากการศึกษาสมบัติการเปียกและมุมสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง ปรากฏว่าของเหลวจะแสดงสมบัติการเปียกบนผิวของแข็งได้หลายลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) จะแสดงถึงสมบัติการเปียกที่ดี (Good wetting) ซึ่งมุมสัมผัสน้อยกว่า 90° ($\theta < 90^\circ$) สำหรับรูปที่ 2.4(ข) จะแสดงถึงสมบัติการเปียกที่ไม่ดี (Poor wetting) ซึ่งมุมสัมผัสมากกว่า 90° ($\theta > 90^\circ$) สำหรับรูปที่ 2.4(ค) จะแสดงถึงสมบัติการเปียกที่ดีมาก (Complete wetting) ทำให้วัสดุทั้ง 2 ชนิดยึดประสานกันแน่น ซึ่งมุมสัมผัสจะเท่ากับ 0° ($\theta = 0^\circ$) สำหรับรูปที่ 2.4(ง) จะแสดงพลังงานที่ผิวและมุมสัมผัสของวัสดุ ซึ่งมุมสัมผัส จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่ผิวของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ที่สมดุล โดยพลังงานที่ผิวของทั้ง 3 สถานะของวัสดุ จะสมดุลกันสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2-1)$$

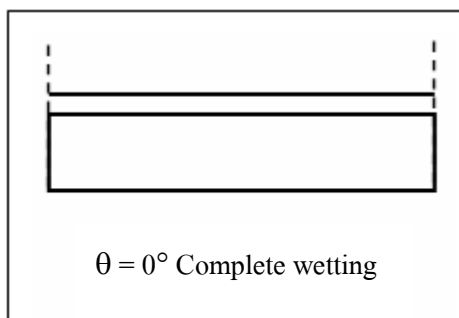
- โดย γ_{sv} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของแข็งและแก๊ส (MJ/m^2)
 γ_{sl} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว (MJ/m^2)
 γ_{lv} คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของเหลวและแก๊ส (MJ/m^2)
 θ คือ มุมสัมผัส ($^\circ$)



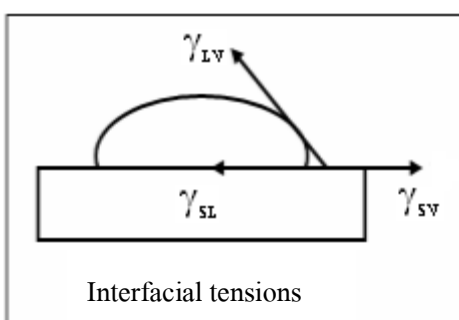
รูปที่ 2.4(ก) แสดงสมบัติการเปียกที่ดีระหว่างของแข็งและของเหลว



รูปที่ 2.4(ข) แสดงสมบัติการเปียกที่ไม่ดีระหว่างของแข็งและของเหลว



รูปที่ 2.4(ค) แสดงสมบัติการเปียกที่ดีมากระหว่างของแข็งและของเหลว



รูปที่ 2.4(ง) แสดงพลังงานที่ผิวและมุมสัมผัสของวัสดุทั้ง 3 สถานะ

รูปที่ 2.4 แสดงสมบัติการเปียกและมุมสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง
(สุธรรม ศรีห่มสัก, 2542)

ตารางที่ 2.1 แสดงมุม สัมผัส ที่ได้จากการคำนวณ การทดลอง และพลังงานที่ผิวหน้าร่วม
ระหว่าง วัสดุเซรามิกและวัสดุโลหะ (Upadhyaya, 1998)

System	T(K)	θ degrees		Interfacial energy (MJ/m ²)
		Calculated	Experimental	
Al ₂ O ₃ -Al	1500	98	60	840
Al ₂ O ₃ -Fe	1823	150	141	1780
Al ₂ O ₃ -Ni	1773	136	129	10,000
Al ₂ O ₃ -Ti	1950	129	-	1150
Al ₂ O ₃ -Cr	2173	145	65	1590
Al ₂ O ₃ -Nb	2325	116	40	571
Al ₂ O ₃ -Mo	2325	105	25	574
Al ₂ O ₃ -W	2323	112	20	574
ZrO ₂ -Fe	1823	147	111	1780
ZrO ₂ -Ni	1823	134	130	1000

จากตารางที่ 2.1 แสดงมุมสัมผัสที่ได้จากการคำนวณ การทดลอง และพลังงานที่ผิวหน้ารอยต่อระหว่างวัสดุเซรามิกและวัสดุโลหะ จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้อะลูมินาเซรามิกและนิกเกิล (Al₂O₃-Ni) จะให้ค่าพลังงานที่ผิวหน้ารอยต่อมากถึง 10,000 เมกกะจูลต่อตารางเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ผิวหน้ารอยต่อของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีพันธะที่แข็งแรงมาก ในทางตรงกันข้ามระบบที่ใช้อะลูมินาเซรามิกและไนโอเบียม (Al₂O₃-Nb) จะให้ค่าพลังงานที่ผิวหน้ารอยต่อค่อนข้างต่ำประมาณ 571 เมกกะจูลต่อตารางเมตร แสดงว่าที่ผิวหน้ารอยต่อของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีพันธะค่อนข้างหลวมไม่แข็งแรง นอกจากนี้ปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่ใช้พิจารณาการเลือกวัสดุสำหรับการนำมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อนคือ ค่าการหด-ขยายตัว (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) ของวัสดุเนื่องจากความร้อน โดยที่ค่าการหด-ขยายตัวของวัสดุ นี้มีความสำคัญต่อวัสดุเชิงประกอบซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานและระหว่างการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งการเลือกวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาเป็นส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อนจะต้องมีค่าการหด-ขยายตัวแตกต่างกันไม่มากนัก จากตารางที่ 2.2 แสดงวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบแบบอัดซ้อน

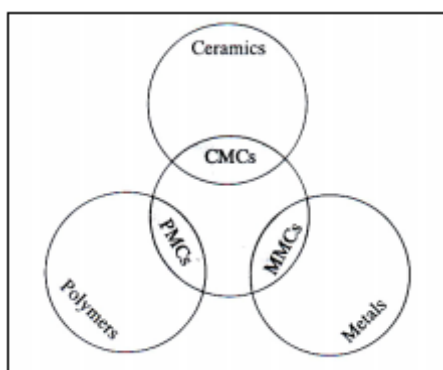
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติเชิงกลของวัสดุ ที่นิยมนำมาใช้เป็น ส่วนประกอบของวัสดุ เชิงประกอบ แบบอัดซ้อน (Engineering materials handbook, Volume 4)

material	Coefficient of thermal expansion, $10^{-6}/K$	Temperature $^{\circ}C$	Yield strength MPa	Tensile strength MPa	MOE GPa
Alumina	7.6	At 500	-	~5000	390
Mullite	5.1-5.8	At 1000	-	~4000	145
Beryllia	7.6	At 500	-	~4000	380
PSZ (2 wt% Y_2O_3)	7.5-13	20-1000	-	~4000	207
Alloy 42 (UNS 94100)	7.9	20-500	295	550	145
Kovar	5.2	20-200	410	534	138
Nickel (Nickel 200)	13.2	25-100	148	462	204
Titanium (Grade 1)	10.1	20-815	170-241	240-331	102.7
Copper (UNS C10100)	17.7	20-300	69	220	115
TZM (UNS R03630)	4.9	20-40	860	965	315
Steel (AISI-ASE 1010)	15	20-700	115	310-380	205
410 stainless (UNS S41000)	11.6	0-538	205	450	200

2.1.6 ชนิดของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบนั้น สามารถที่จะประกอบขึ้นจากการใช้วัสดุพอลิเมอร์ , วัสดุเซรามิก หรือ วัสดุโลหะ อย่างใดอย่างหนึ่งมารวมประกอบกัน ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเฟสต่อเนื่องได้ดังนี้

1. Ceramic Matrix Composites (CMCs)
2. Metal Matrix Composites (MMCs)
3. Polymer Matrix Composites (PMCs) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ คือ เทอร์โมเซต และเทอร์โมพลาสติก

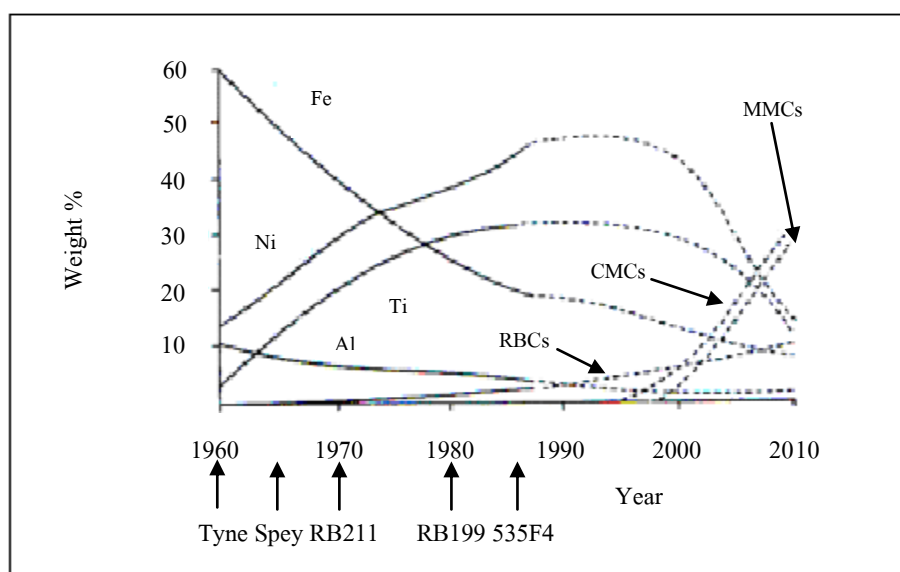


รูปที่ 2.5 แสดงชนิดของวัสดุเชิงประกอบ (Chawla, 1993)

ในการทำ วัสดุเชิงประกอบ เพื่อให้ได้สมบัติ ของวัสดุเหมาะกับการใช้งานนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและทำความเข้าใจสมบัติหรือคุณลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละวัสดุที่เราจะนำมาใช้ร่วมกัน เพื่อทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติหรือคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด (Chawla, 1993)

สมบัติหรือคุณลักษณะเฉพาะ	วัสดุเซรามิก	วัสดุโลหะ	วัสดุพอลิเมอร์
ความหนาแน่น	ต่ำ-สูง	ต่ำ-สูง	ต่ำ
ความแข็ง	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความแข็งแรงต่อการดึง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	ต่ำ
ความแข็งแรงต่อการกด	สูง	ปานกลาง-สูง	ต่ำ-ปานกลาง
จุดหลอมเหลว	สูง	ต่ำ-สูง	ต่ำ
ความเสถียร	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	ต่ำ
การหด-ขยายตัว	ต่ำ-ปานกลาง	ปานกลาง-สูง	สูง
การนำความร้อน	ปานกลาง	ปานกลาง-สูง	ต่ำ
ความต้านทานการนำไฟฟ้า	สูง	ต่ำ	สูง
ความต้านทานการเกิดปฏิกิริยา	ปานกลาง-สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความต้านทานต่อการกัดกร่อน	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	ปานกลาง
ความต้านทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลัน	ต่ำ	ปานกลาง-สูง	สูง



รูปที่ 2.6 แสดงการพัฒนาของวัสดุเชิงประกอบ (Terps, Pex, and De vries, 1995)

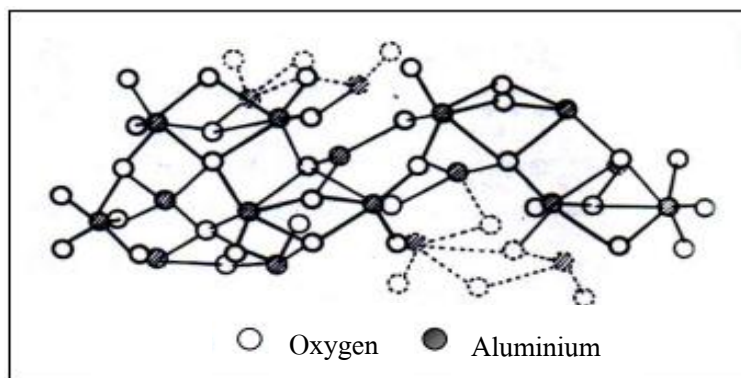
จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า วัสดุเชิงประกอบไม่ว่าจะเป็นวัสดุเนื้อหลัก ที่เป็นวัสดุเซรามิกและวัสดุโลหะกำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในอนาคต ซึ่งเป็นที่สนใจของนักวิจัยด้านวัสดุศาสตร์อย่างมาก

2.2 อะลูมินา (Alumina, Al_2O_3)

อะลูมินามีชื่อเรียกทางธรรมชาติว่า คอร์ันดัม ซึ่งเป็นแร่ที่ไม่บริสุทธิ์ รู้จักกันดีในรูปของวัสดุที่ใช้ในการขัดถู โดยคอร์ันดัมจะรวมถึงแร่ Andalusite, Silimanate และ Kayanite ซึ่งแร่ Andalusite ก็คือแร่อะลูมิโนซิลิเกต โดยมีความเสถียรที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ ๆ ตรงกันข้ามกับแร่ Silimanate ซึ่งเสถียรที่อุณหภูมิสูง ๆ (Ring, 1996) สำหรับอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นวัสดุหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก มีมูลค่าสูงเนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน เช่น มีจุดหลอมเหลวที่สูง มีความแข็งสูง และมีเสถียรรูปทางเคมีที่สูง ซึ่งอะลูมินาเป็นสารที่มีความเหนียว มากและทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดและด่างต่าง ๆ ได้ดี

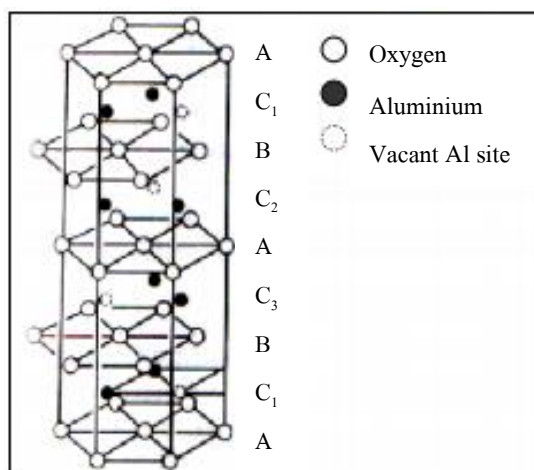
ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของอะลูมินา (Nicholas P. Cheremisinoff, 1990)

	$\alpha-Al_2O_3$
Density, g/cm^3	3.96
Melting temperature, $^{\circ}C$	2054
Elastic modulus, GPa	520
Coefficient of thermal expansion (25-1000 $^{\circ}C$), $10^{-6}/^{\circ}K$	8.5
Indentation hardness, GPa	20



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของอะลูมินา (Worrall, 1986)

สำหรับโครงสร้างผลึกของอะลูมินานั้นจะมี 2 รูปแบบ คือ อะลูมินาที่อยู่ในรูปผลึกเดี่ยว (Single crystal) ซึ่งเป็นอะลูมินาที่มีมูลค่าสูงมาก เนื่องจากถูกนำไปใช้เพื่อเครื่องประดับ และอะลูมินาที่อยู่ในรูปโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อน (Polycrystalline) นั้นจะมีราคาที่ถูกกว่า แต่เป็นวัตถุดิบที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูง อะลูมินาถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างหลากหลาย uly เช่น ผลิตภัณฑ์อะลูมินาที่ใช้ทำ ลูกบิดและผนังกรูหม้ออบ เครื่องมือตัดแต่งวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ในงานด้านไฟฟ้า วัสดุยานยนต์ วัสดุทนไฟ ชิ้นส่วนลดอันตรายจากกระสุน ตลอดจนชิ้นส่วนของอวัยวะทดแทนในทางการแพทย์ เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างผลึกของอัลฟา- อะลูมินา (Anderson, Leaver, Rawling, and Alexander, 1994)

อะลูมินาที่มีความเสถียรมากที่สุดอยู่ในรูป อัลฟา-อะลูมินา ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งมีโครงสร้างเป็น เฮกซาโกนอล (Hexagonal) หน่วยเซลล์ของโครงสร้างประกอบด้วยชั้นของไอออน 6 ชั้นขนานกัน แต่ละชั้นประกอบด้วยไอออนของอะลูมิเนียมและไอออนของออกซิเจนบรรจุอยู่เพียง 2 ใน 3 ของ ตำแหน่งทั้งหมด (Dioctahedron) เพื่อให้ประจุสมมูลระนาบของไอออน อะลูมิเนียม และมีการ จัดเรียงตัว 3 รูปแบบ ตามตำแหน่งของช่องว่างจากโครงสร้าง ทำให้เลขโคออร์ดิเนต (Coordinate) ของไอออนบวกเท่ากับ 6 และไอออนลบเท่ากับ 4 ขนาดของรัศมีไอออนอะลูมิเนียมและออกซิเจน เท่ากับ 0.053 และ 0.138 นาโนเมตร ตามลำดับ

2.3 อะลูมิเนียม (Aluminium)

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณลักษณะเด่นหลายประการ คือ

1. เป็นโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย (Nontoxic) และมีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหารและห่อรองรับอาหาร
2. ผิวหน้าของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีดัชนีการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก จึงใช้ทำแผ่นสะท้อนในแฟลชถ่ายรูป งานสะท้อนแสงใน คอมพิวเตอร์ ไฟหน้ารถยนต์
3. มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ต่ำ โดยอะลูมิเนียมมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1 ส่วน 3 เท่าของเหล็ก
4. มีความเหนียวสูง อ่อนตัวสูง สามารถดัดแปลงและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย
5. มีความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (Strength per weight ratio) สูง
6. ทนทานต่อการเกิดสนิมและการผุกร่อนในบรรยากาศทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดแก่และด่างทั่วไป (ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา, ม.ป.ป.)
7. อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน (German, 1994)

แต่เนื่องจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความแข็งต่ำ จึงทำให้ความต้านทานการสึกหรอของโลหะชนิดนี้ค่อนข้างต่ำ จึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้งาน (Smith, 1993)

อย่างไรก็ตาม การนำโลหะอะลูมิเนียมไปใช้งานในด้านต่าง ๆ นั้น ต้องคำนึงถึงคุณลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละด้าน ซึ่งโดยทั่วไป โลหะอะลูมิเนียมมีหลายเกรดขึ้นอยู่กับส่วนผสม จึงทำให้อะลูมิเนียมในแต่ละเกรดมีสมบัติที่แตกต่างกันไปด้วย

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติของอะลูมิเนียม (http://www.knovel.com/web/portal/basic_search)

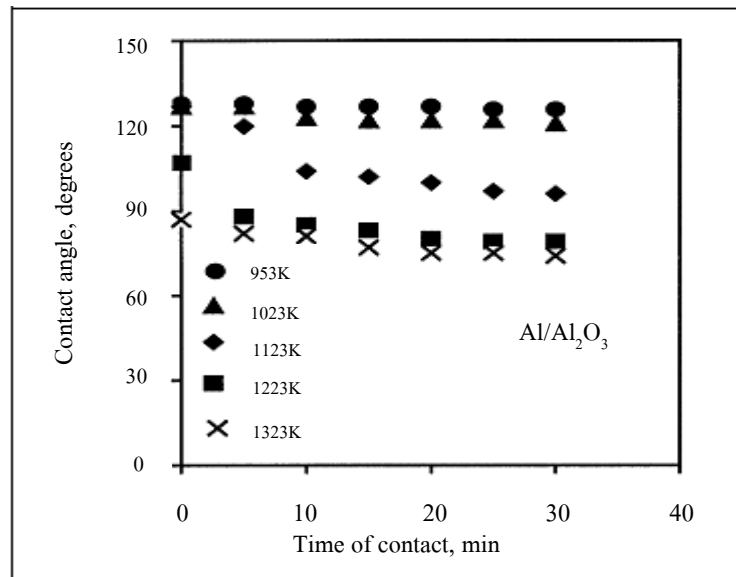
	Aluminium
Density, g/cm ³	2.7
Melting temperature, °C	580-660
Coefficient of thermal expansion, 10 ⁻⁶ / °K	23.4
Elastic modulus, GPa	69
UTS, MPa	90-400
Thermal conductivity, W/m·K	150-220

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

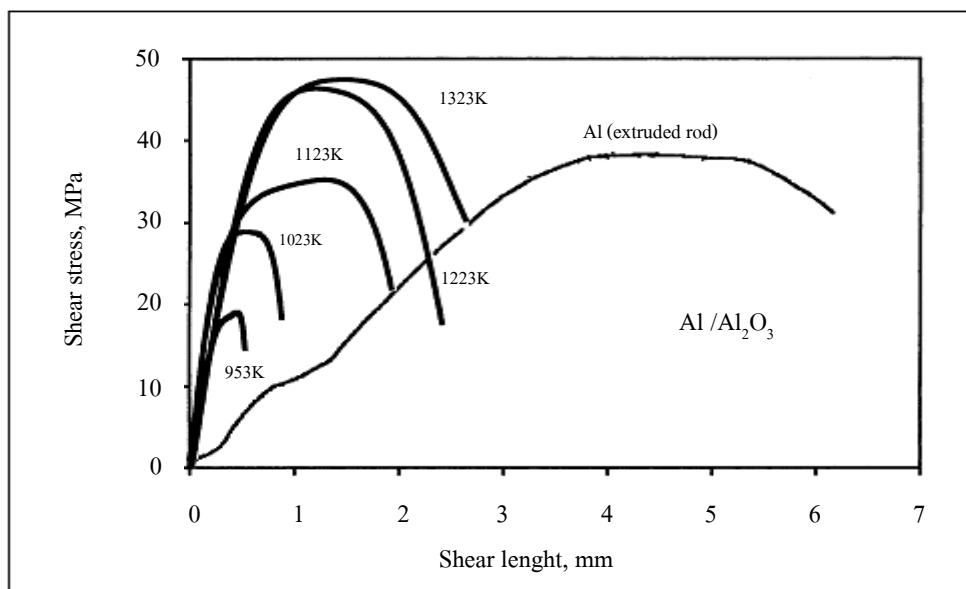
การทำเป็นวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาเซรามิกโดยการเติมวัสดุหรือสารเติมแต่งสมบัติเชิงกล (Additive) เป็นวิธีหนึ่งที่จะสามารถปรับปรุงสมบัติของอะลูมินาเซรามิกได้ ซึ่งการผสมวัสดุ หรือ สารเติมแต่งสมบัติเชิงกลลงไปในอะลูมินาเนื้อหลักนั้นสามารถทำได้หลายลักษณะ เช่น การทำให้อยู่ในรูปของอนุภาคกระจายตัว (Particles dispersion), เส้นใยเสริมแรง (Fiber reinforcement) หรือ เสริมแรงด้วยวัสดุ เติมแต่งสมบัติเชิงกลในลักษณะแผ่นประกบหลายชั้น (Laminate, Multilayer composites) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การทำวัสดุเชิงประกอบโดยกระบวนการที่กล่าวมาแล้วนั้น ในเบื้องต้นต้องศึกษาปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ เช่น อุณหภูมิ เวลา ความดัน บรรยากาศ เป็นต้น ซึ่งสถานะทั้งหมดนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ

Ksiazek et al. (2002) ได้ศึกษาผลของสมบัติการเปียก (Wetting) และแรงเฉือน (Shear stress) ในการเกิดพันธะ ระหว่างแผ่นอะลูมินาและอะลูมิเนียม ซึ่งแผ่นอะลูมินาที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 3.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรรูพรุนร้อยละ 0 สิ่งเจือปนน้อยกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก สำหรับอะลูมิเนียมมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9999 โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักประมาณ 210 มิลลิกรัม พบว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม ที่ผ่านการเผาประสาน (Bonding temperature) ที่อุณหภูมิ 1323 เคลวิน (1050 องศาเซลเซียส) เวลา 30 นาที จะมีมุมสัมผัส (Contact angle, θ) ที่ต่ำที่สุด คือน้อยกว่า 90 องศา และแรงเฉือนที่ได้มีค่ามากที่สุด ประมาณ 48 เมกกะปาสกาล ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาประสานต่ำกว่า 1123 เคลวิน (850 องศาเซลเซียส) ค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา ซึ่งจะส่งผลให้ค่าแรงเฉือนที่ได้มีค่าลดลงตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 2.9-2.10 และตารางที่ 2.6 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 กราฟ แสดง ความ สัมพันธ์ระหว่าง Contact angle กับ Time of contact ของ วัสดุเชิงประกอบของแผ่นอะลูมินา -อะลูมิเนียม (Ksiazek, Sobczak, Mikulowski, Radziwill, and Surowaik, 2002)



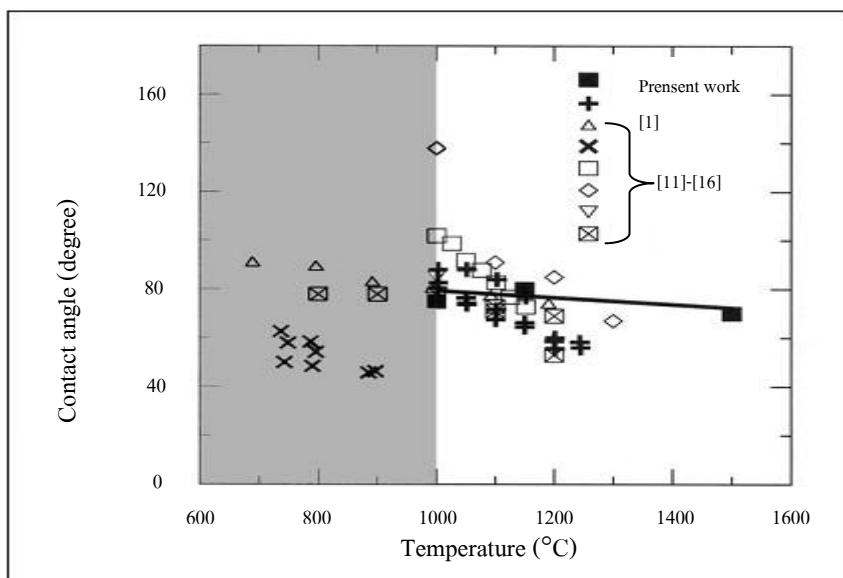
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Shear length ของวัสดุเชิงประกอบ ของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม (Ksiazek, Sobczak, Mikulowski, Radziwill, and Surowaik, 2002)

ตารางที่ 2.6 แสดงผลการทดลอง ของวัสดุเชิงประกอบของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม

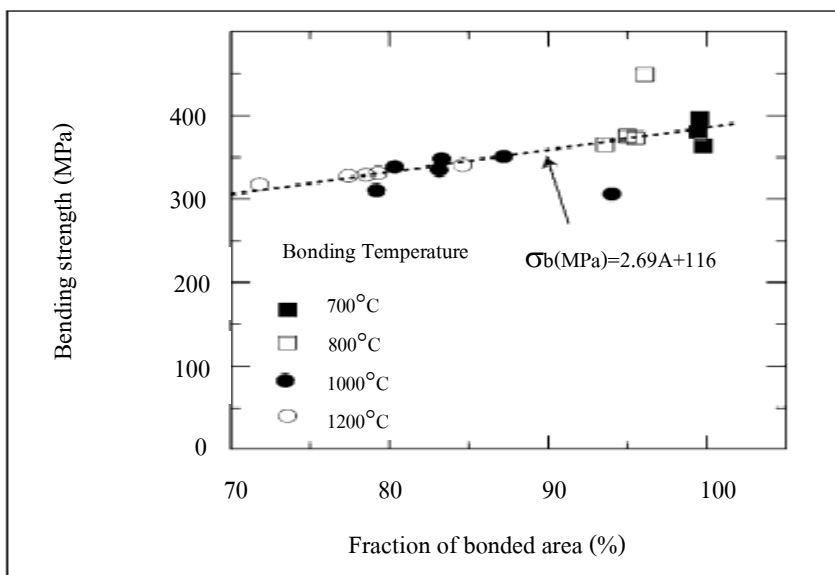
(Ksiazek, Sobczak, Mikulowski, Radziwill, and Surowaik, 2002)

System	T (K)	θ (degrees)	Max. Load (N)	τ_{\max} (MPa)
Al/Al ₂ O ₃	953	126	107	19.1
	1023	121	178	29.5
	1123	96	352	35.0
	1223	79	810	46.3
	1323	74	912	47.7

Saiz et al. (2003) ได้ทำการศึกษาผลของสมบัติการเปียก (Wetting) และความแข็งแรงของพันธะ (Bonding strength) ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแผ่นอะลูมินาและอะลูมิเนียมสำหรับการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แผ่นอะลูมินาที่ใช้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999 โดยน้ำหนัก และมีขนาด 10 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร × 2 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × สูง) สำหรับอะลูมิเนียม ที่ใช้มีความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.999 โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักประมาณ 0.2-0.5 กรัม พบว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม ที่ผ่านการเผาประสาน (Bonding temperature) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกกะปาสคาล เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สุญญากาศ จะมีมุมสัมผัส (Contact angle, θ) น้อยกว่า 90 องศา และจากผลการทดลองคณะผู้วิจัยสามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณความแข็งแรง (Bonding strength, σ_b) ได้จากสูตร $\sigma_b = 2.69A + 116$ ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งแรงที่สูงประมาณ 400 เมกกะปาสคาล แสดงดังรูปที่ 2.11-2.12 ตามลำดับ



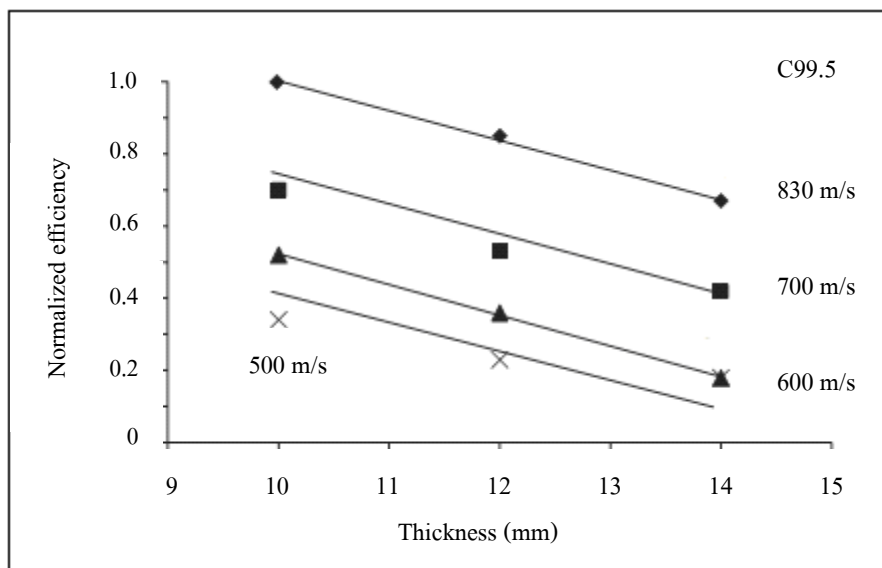
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Contact angle กับ Temperature ของวัสดุเชิงประกอบของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม (Saiz, Tomsia, and Suganuma, 2003)



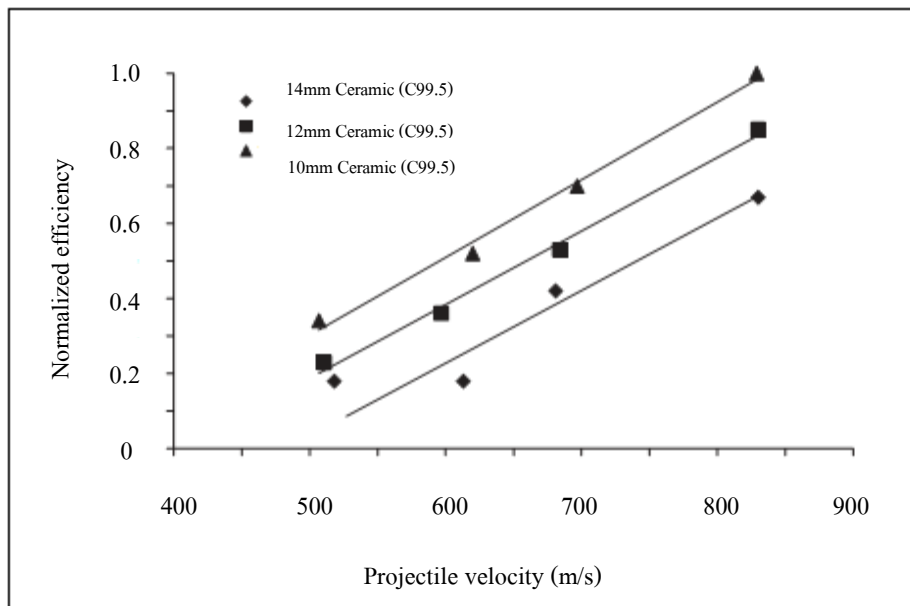
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bending strength กับ Fraction of bonded area (%) ของวัสดุเชิงประกอบของแผ่นอะลูมินา-อะลูมิเนียม (Saiz, Tomsia, and Suganuma, 2003)

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยกระบวนการที่กล่าวมาแล้วนั้น นอกจากการศึกษาในเบื้องต้นแล้ว ต้องศึกษาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งมีการศึกษาและวิจัยจำนวนมากที่พยายามเพิ่มความเหนียวให้แก่แผ่นเกราะเซรามิก (Ceramic tile) เพื่อป้องกันแรงกระแทกจากกระสุน โดยการนำแผ่นโลหะ (Backing plate) มาประกบกับแผ่นเกราะเซรามิก (Ceramic tile) ให้มีลักษณะอัด ซ้อนทับกันเป็นชั้นหรือที่เรียกว่า Laminate composite ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้อง

Madhu et al. (2005) ได้ศึกษาผลของการทดสอบสมบัติ การป้องกันแรงกระแทกจากกระสุน (Ballistic performance) ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแผ่นอะลูมินาเซรามิกและแผ่นโลหะอะลูมิเนียม สำหรับใช้เป็นเกราะยานยนต์ ซึ่งแผ่นอะลูมินาเซรามิกมีปริมาณของอะลูมินา ร้อยละ 95 และ 99.5 โดยน้ำหนัก และมีความหนาแน่น 3.68 และ 3.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแต่ละแผ่นจะใช้ขนาดความกว้างและยาวเท่ากันคือ 50 มิลลิเมตร \times 50 มิลลิเมตร แต่ความหนาจะมีการปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 10, 12 และ 14 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นโลหะอะลูมิเนียมใช้เกรด 7017 ความหนาแน่น 2.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาด 200 มิลลิเมตร \times 200 มิลลิเมตร \times 40 มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง) พบว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์สูง หรือมีปริมาณของอะลูมินามากกว่า (ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก) จะทำให้มีสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน เพิ่มมากขึ้นสามารถป้องกันแรงกระแทกจากกระสุนได้ดีขึ้นด้วย หลังจากนั้น Madhu et al. ได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยเปรียบเทียบความหนาของแผ่นอะลูมินาเซรามิก จากผลการทดลองพบว่าแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร จะมีประสิทธิภาพในการป้องกันแรงกระแทกจากกระสุนได้ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.13-2.14 ตามลำดับ

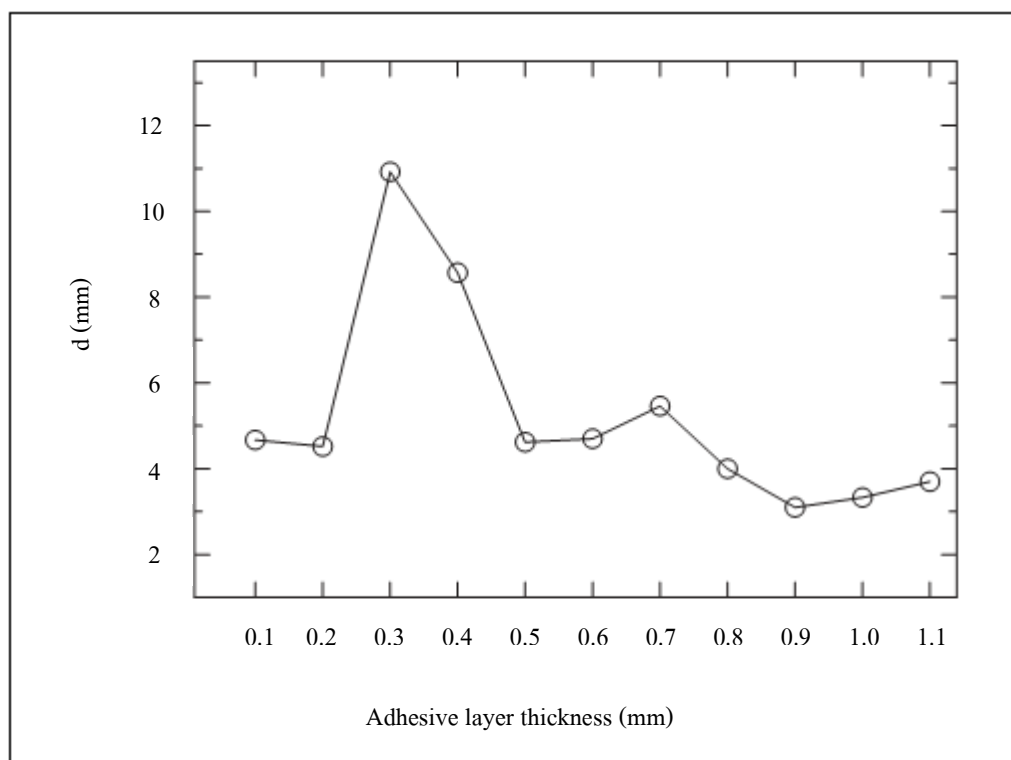


รูปที่ 2.13 กราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized efficiency กับ Thickness ของวัสดุ เซิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม (Madhu, Ramanjaneyulu, Bhat, and Gupta, 2003)



รูปที่ 2.14 กราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized efficiency กับ Projectile velocity ของ วัสดุเซิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม (Madhu, Ramanjaneyulu, Bhat, and Gupta, 2003)

Puente et al. (2005) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบความหนาของวัสดุประสานที่มีผลต่อการป้องกันแรงกระแทกจากกระสุน ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแผ่นอะลูมินาเซรามิกและแผ่นโลหะอะลูมิเนียม สำหรับแผ่นอะลูมินาที่ใช้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก ซึ่งขนาดของแผ่นอะลูมินามี 2 ขนาด คือ 1. 100 มิลลิเมตร \times 100 มิลลิเมตร \times 12 มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง) 2. 51 มิลลิเมตร \times 51 มิลลิเมตร \times 8.3 มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง) และแผ่นอะลูมิเนียมใช้เกรด 2017-T6 ซึ่งขนาดของแผ่นอะลูมิเนียม มี 2 ขนาด คือ 1. 100 มิลลิเมตร \times 100 มิลลิเมตร \times 6 มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง) 2. 51 มิลลิเมตร \times 51 มิลลิเมตร \times 12 มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง) โดยใช้วัสดุประสาน Epoxy Hysol EA 9361 พบว่าความหนา ของวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม สามารถป้องกันแรงกระแทกจากกระสุนและทำให้วัสดุทั้งสองชนิดสามารถยึดติดกันได้ดีโดยไม่หลุดร่อนออกจากกัน แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟแสดง ความสัมพันธ์ ระหว่าง Remaining armour thickness กับ Adhesive layer thickness ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม (Puente, Arias, Zaera, and Navarro, 2005)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบสมบัติทั้งหมด
ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
Particle Size Analyzer	Malvern	Mastersizer S
X-Ray Diffractometer (XRD)	Bruker	D5005
Ball Mill	P.S.C.M.	Alumina ball mill
Dryer	ELE	Model SDO 225E1
Vibrator/Shaker	Retsch	AS200
Compression Machine (200 tons)	ELE	ADR2000
Vernier	Mitutoyo	Diamond
High Temperature Furnace (1800 ^o C)	Labquip	Vecstar/VF2
High Temperature Furnace (1500 ^o C)	Nabertherm	P320
High Speed Diamond Saw	Buehler	Isomet 1000
Grinder&Polisher Machine	Buehler	Ecomet 5
Ultrasonic	NEY	28H
Ion Sputtering Device	JEOL	JFC-1100E
Scanning Electron Microscope (SEM)	JEOL	JSM-6400
Universal Testing Machine	Instron	5569
Charpy Impact Testing Machine	DMG	Leicester LE67 5FT

3.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทสาร	ชื่อการค้า	ชนิด/เกรด	ผู้ผลิต
สารตั้งต้น	Aluminium Oxide	CA 5 M	Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd.
	Aluminium Alloy Plate	6061-T651, 6 mm.* 6063-0, 6 mm.* 6063-0, 2 mm.* 6063-0, 1 mm.*	-
	(Aluminium+Aluminium Oxide) Powder	Al 70wt%+ Al ₂ O ₃ 30 wt%	Fuka.Co.,Ltd.
	Frit	Low temperature fritted glazes 980°C	Ferro (Thailand) Co., Ltd.
	Litium Carbonate	Li ₂ CO ₃ 99%	ACROS
	Titanium Alloy Plate	Gr2, 1 mm.*	Baoji Baoye Titanium-Nickel Industry Co., Ltd.
สารเพิ่มการยึดเกาะ	Tapioca Starch	Premium Quality	Kriangkrai LTD., Part

หมายเหตุ : * ความหนา

3.2.1 ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide Powder)

ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (อะลูมินา) สูตรเคมี Al_2O_3 ใช้เกรด CA 5 M เป็นอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก สิ่งเจือปนหลัก ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซิลิกา ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจาก Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd.)

3.2.2 แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (Aluminium Alloy Plate)

แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ สูตรเคมี Al ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้น สำหรับแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 เกรด คือ

3.2.2.1 แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 6061- T651

แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 6061- T651 องค์ประกอบหลักประกอบด้วย อะลูมิเนียมร้อยละ 96.47 โดยน้ำหนัก แมกนีเซียมร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ซิลิกอน ร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก คอปเปอร์ร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก โครเมียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก และมลทินอื่น ๆ ร้อยละ 1.45 โดยน้ำหนัก และความหนาที่ใช้ 6 มิลลิเมตร (ข้อมูลจาก http://www.knovel.com/web/portal/basic_search)

3.2.2.2 แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 6063- 0

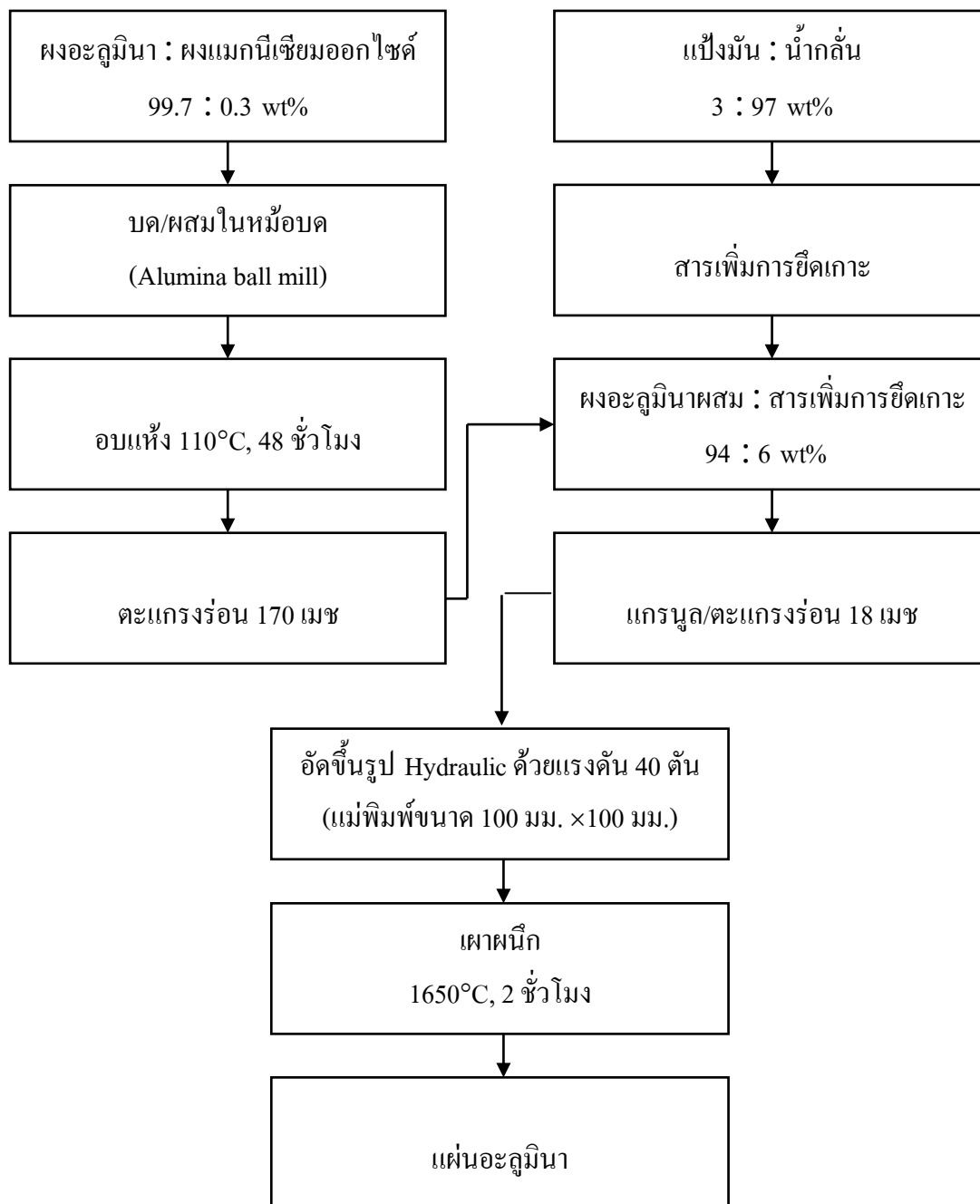
แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 6063-0 องค์ประกอบหลักประกอบด้วย อะลูมิเนียมร้อยละ 97.85 โดยน้ำหนัก แมกนีเซียมร้อยละ 0.70 โดยน้ำหนัก ซิลิกอนร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก และมลทินอื่น ๆ ร้อยละ 1.05 โดยน้ำหนัก ความหนาที่ใช้ 1, 2 และ 6 มิลลิเมตร (ข้อมูลจาก http://www.knovel.com/web/portal/basic_search)

3.2.3 แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ (Titanium Alloy Plate)

แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ เกรด Gr2 สูตรเคมี Ti องค์ประกอบหลักประกอบด้วย ไททาเนียมร้อยละ 99.627 โดยน้ำหนัก เหล็กร้อยละ 0.09 โดยน้ำหนัก คาร์บอน ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 0.003 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก และมลทินอื่น ๆ ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ความหนาที่ใช้ 1 มิลลิเมตร (ข้อมูลจาก Baoji Baoye Titanium-Nickel Industry Co., Ltd.)

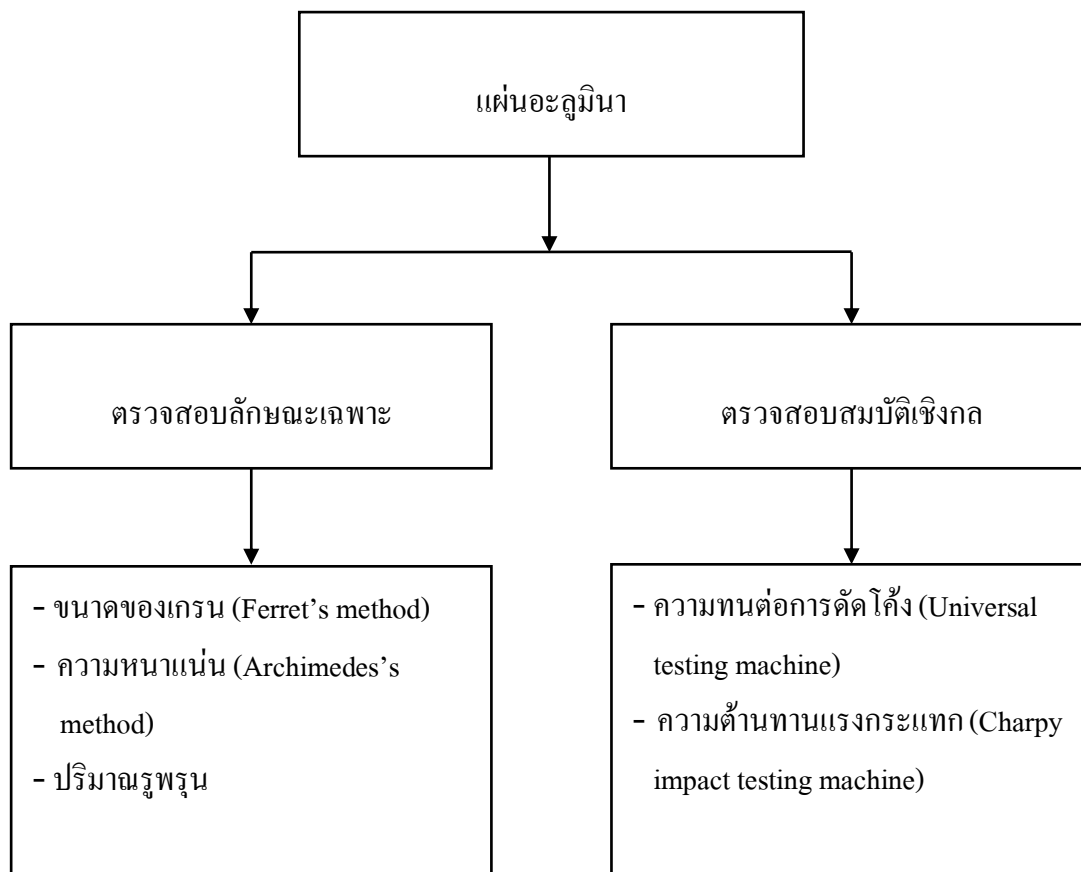
3.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง แสดงในรูปที่ 3.1-3.4



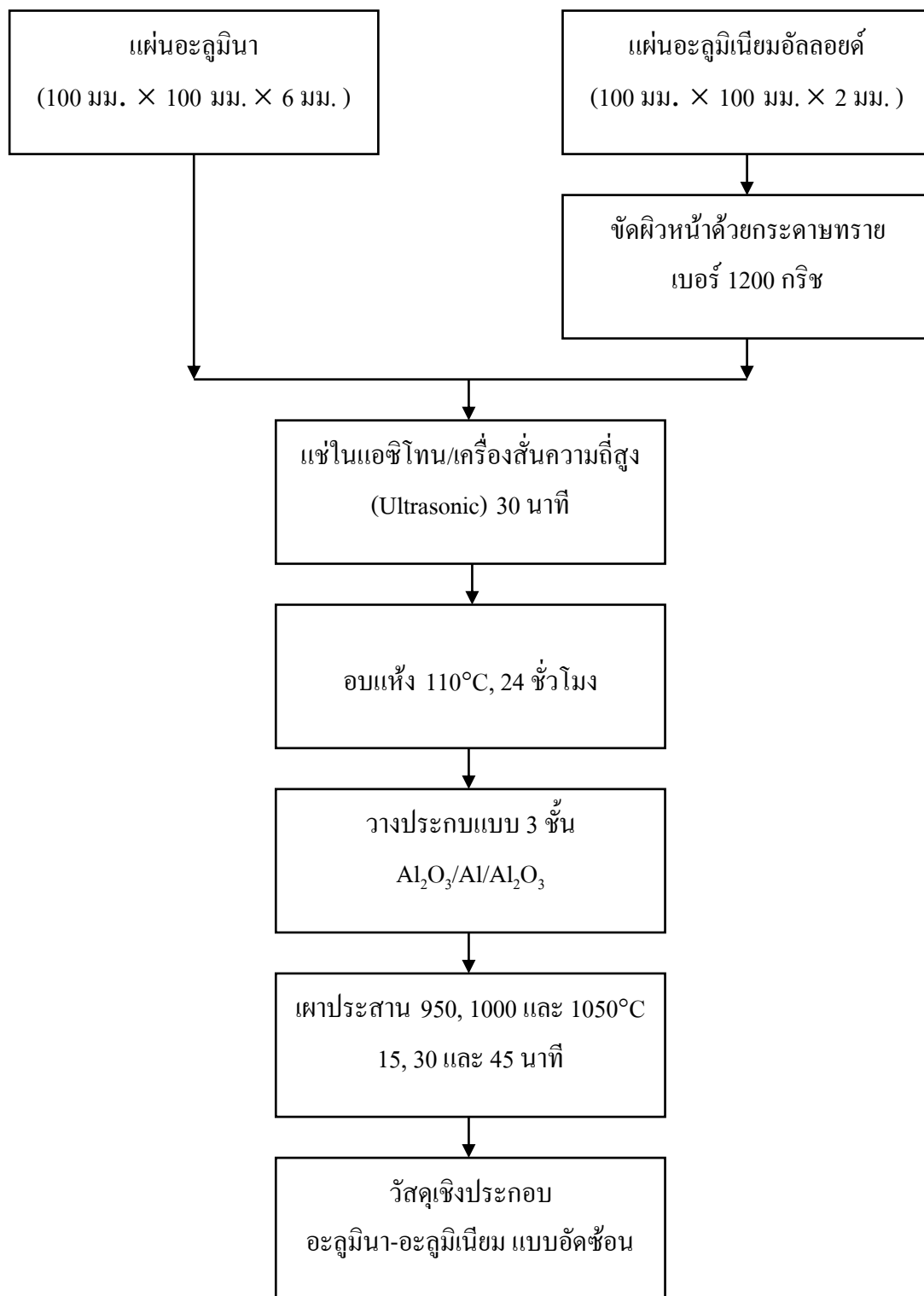
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นอะลูมินา

หลังจากนั้นแผ่นอะลูมินาเซรามิกที่ได้จากกระบวนการเตรียมในรูปที่ 3.1 จะนำมาตรวจสอบลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 3.2



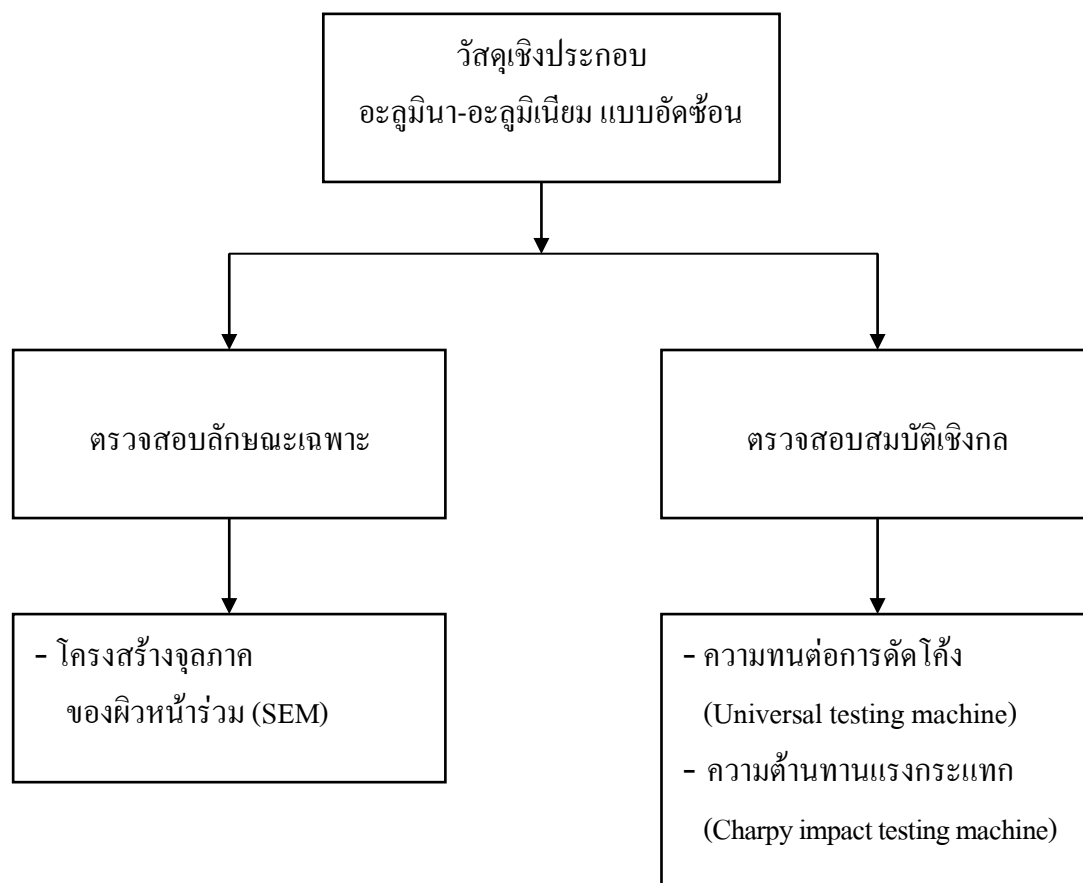
รูปที่ 3.2 แสดงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นอะลูมินา

แผ่นอะลูมินาเซรามิกที่ได้จากกระบวนการเตรียมแผ่นอะลูมินาจากรูปที่ 3.1 จะนำมาวางประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เพื่อเผาประสานขึ้นรูปให้ได้วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมแบบอัดซ้อน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนและวิธีการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

หลังจากนั้นนำวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ได้จากกระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในรูปที่ 3.3 จะนำมาตรวจสอบลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและการตรวจสอบสมบัติเชิงกล ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

จากรูปที่ 3.1-3.4 สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนและวิธีการทดลองโดยละเอียด ดังนี้

3.3.1 การออกแบบการทดลอง

3.3.1.1 การศึกษาเบื้องต้น (ก่อนทำการทดลองจริง)

จากการศึกษาการทดลอง เบื้องต้น ได้ทำการทดลอง การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดการศึกษาเบื้องต้นการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

รหัสตัวอย่าง	วัสดุตั้งต้น	ความหนา (มิลลิเมตร)	สภาวะการทดลอง
Al6061-6-750	Al 6061-T651	6	750°C, 30 นาที
	Al ₂ O ₃	6	
Al6063-1-850	Al 6063-0	1	850°C, 30 นาที
	Al ₂ O ₃	6	
Al6063-6-850	Al 6063-0	6	850°C, 30 นาที
	Al ₂ O ₃	6	
Al6063-6-750	Al 6063-0	6	750°C, 30 นาที
	Al ₂ O ₃	6	
Al6063-Ti-700	Al 6063-0	6	700°C, 30 นาที
	Ti	1	
	Al ₂ O ₃	6	
Al6063-Ti-750	Al 6063-0	6	750°C, 30 นาที
	Ti	1	
	Al ₂ O ₃	6	
Ti-1000	Ti	1	1000°C, 30 นาที
	Al ₂ O ₃	6	
Frit-1000	Frit	1	1000°C, 30 นาที
	Al ₂ O ₃	6	
Al6063-Frit-700	Al 6063-0	6	700°C, 60 นาที
	Frit	1	
	Al ₂ O ₃	6	
Al6063-F(L)-700	Al 6063-0	6	700°C, 30 นาที
	Frit (Li ₂ CO ₃ 15 wt%)	1	
	Al ₂ O ₃	6	
Al6063-Pb-350	Al 6063-0	6	350°C, 30 นาที
	Pb	1	
	Al ₂ O ₃	6	

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดการศึกษาเบื้องต้นการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	วัสดุตั้งต้น	ความหนา(มิลลิเมตร)	สภาวะการทดลอง
Al6063-Pow-750	Al 6063-0	6	750°C, 30 นาที
	Al/Al ₂ O ₃ powder	1	
	Al ₂ O ₃	6	

จากตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียด ของการศึกษาเบื้องต้นการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งผลการทดลองและรูปภาพจะแสดงในบทที่ 4

3.3.1.2 การศึกษาและทดลองในงานวิจัย

จากแผนผังรูป เป็นการ ทดลอง เพื่อหาสภาวะ ของ การเผา ประสาน ที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิ และ เวลา เพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม ที่มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงความหนาของอะลูมินา และอะลูมิเนียม และสภาวะ การ ทดลอง สำหรับการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมอัดซ้อน แบบ 3 ชั้น

ตัวอย่าง ที่	ตัวอย่าง	ความหนา (มิลลิเมตร)			ความหนารวม หลังประกอบ (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3			
		อะลูมินา	อะลูมิเนียม	อะลูมินา			
1	3L-950-15	6	2	6	14	950	15
2	3L-950-30	6	2	6	14		30
3	3L-950-45	6	2	6	14		45
4	3L-1000-15	6	2	6	14	1000	15
5	3L-1000-30	6	2	6	14		30
6	3L-1000-45	6	2	6	14		45
7	3L-1050-15	6	2	6	14	1050	15
8	3L-1050-30	6	2	6	14		30
9	3L-1050-45	6	2	6	14		45

จากตารางที่ 3.4 แสดงการ ออกแบบการ ทดลอง สำหรับการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมอัดซ้อน แบบ 3 ชั้น โดยใช้แผ่นอะลูมินาจำนวน 2 แผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นมีความหนา 6 มิลลิเมตร และแผ่น อะลูมิเนียม 1 แผ่น มีความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ความ

หนารวมหลังการประกบเท่ากับ 14 มิลลิเมตร สำหรับอุณหภูมิในการเผาประสาน เท่ากับ 950, 1000 และ 1050 องศาเซลเซียส และเวลา 15, 30 และ 45 นาที ตามลำดับ

3.3.2 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น

3.3.2.1 การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงอะลูมินา

การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงอะลูมินา โดยอาศัยหลักการการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของแสง โดยใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ใช้เครื่อง Particle size analyzer ของบริษัท Malvern



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่อง Particle size analyzer

วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

1. ชั่งผงตัวอย่างโดยสุ่มปริมาณ 2 กรัม
2. เตรียมสารละลาย Calgon ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์
3. เติมสารละลายในข้อ 2. ผสมกับผงตัวอย่างในปริมาณ 50 ลูกบาศก์

เซนติเมตร

4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องสั่นสะเทือน โดยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.3.2.2 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส (Phase analysis)

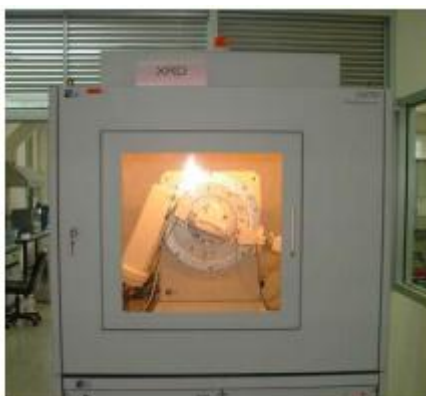
การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของผงอะลูมินา โดยใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) จากผลึกของสารจะให้แพทเทิร์น (Pattern) การเลี้ยวเบนเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) โดยใช้เครื่อง XRD ของบริษัท Bruker ใช้ $\text{CuK}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสี

วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

1. โปรรยผงอะลูมินาลงบนกรอบใส่ผงตัวอย่าง (Sample holder)
2. ใช้แผ่นกระจกคดผงอะลูมินาที่อยู่ในกรอบใส่ผงตัวอย่างให้เรียบแน่น
3. นำฝาหลังปิดเข้ากับกรอบใส่ผงตัวอย่างแล้วนำไปตรวจวิเคราะห์

สถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์

Generator tension	=	40 KV
Generator current	=	40 mA
Start angle	=	10°
End angle	=	60°
Time per step	=	0.4 s
Step size	=	0.02°



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่อง X-ray diffraction, XRD

3.3.3 การเตรียมแผ่นอะลูมินา

1. เตรียมส่วนผสมโดยการชั่งผงอะลูมินาและผงแมกนีเซียมออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 99.7 ต่อ 0.3 โดยน้ำหนัก นำไปบดผสมแบบเปียกด้วยเครื่องบดรวมแบบความเร็วต่ำ (Ball Mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำส่วนผสมของวัตถุดิบระหว่างอะลูมินาและแมกนีเซียมออกไซด์ที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3. หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปบดแห้งด้วยโกร่ง เพื่อไม่ให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน แล้วยำผงที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 170 เมช (Mesh) แล้วจะได้ผงอะลูมินาที่มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเล็กกว่า 90 ไมครอน

4. เตรียมสารเพิ่มการยึดเกาะ โดยนำน้ำกลั่นและแป้งมัน (Tapioca Starch) มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 97 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปต้มแล้วทำการกวนผสมจนกว่าแป้งมันละลายจนหมดกลายเป็นน้ำกาวเหนียว

5. นำผงอะลูมินาที่ได้จาก ข้อ 3. มาผสมกับสารเพิ่มการยึดเกาะที่ได้จาก ข้อ 4. ในอัตราส่วน ร้อยละ 94 ต่อ 6 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำ ผงอะลูมินา ที่มีความเหนียวไป ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 18 เมช เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นเม็ดแกรนูล ง่ายต่อการขึ้นรูป

6. นำผงอะลูมินาแกรนูลที่เตรียมได้จาก ข้อ 5. มาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก (Compression Machine, 200 tons ของบริษัท ELE International) โดยใช้แรงอัด 40 ตัน แม่พิมพ์อัดขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร ซึ่งแผ่นอะลูมินาที่ได้จากการอัดขึ้นรูปจะมีขนาดความหนา 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก

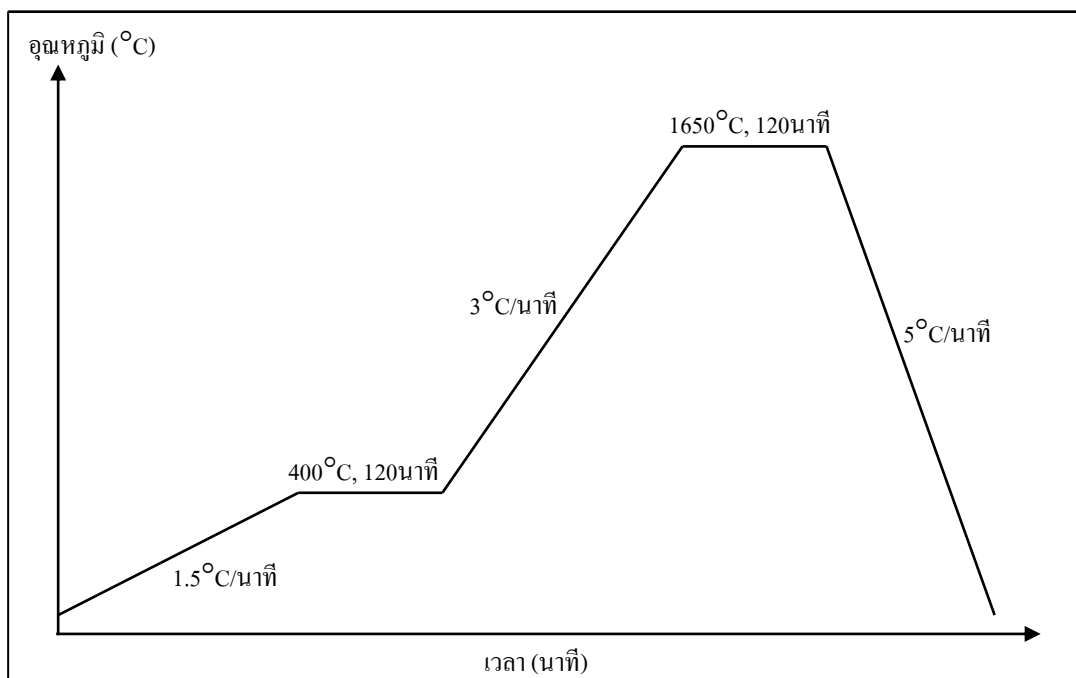
3.3.4 การเผาผนึก

นำแผ่นอะลูมินาที่ผ่านการอัดขึ้นรูปจากข้อ 3.3.3 มาเผาผนึกด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง (High Temperature Furnace (1800°C) ของบริษัท Labquip) เพื่อให้ชิ้นงานสุกตัวและเพิ่มความหนาแน่นให้กับชิ้นงาน สภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.5 แสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา*

ช่วงที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียส/นาที)	เวลาเผาแซ่ (นาที)	หมายเหตุ
1	25-400	1.5	-	-
2	400	-	120	เผาไล่สารเพิ่ม การยึดเกาะ
3	400-1650	3	-	-
4	1650	-	120	อุณหภูมิสุกตัว
5	1650-25	5	-	-

หมายเหตุ : * บรรยากาศปกติ



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงข้อมูลในการเผาผนึกแผ่นอะลูมินา

3.3.5 การตรวจสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของอะลูมินา

การตรวจสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของอะลูมินาจะดำเนินการตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM C373-88 (1994)

วิธีการตรวจสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน

1. นำแผ่นอะลูมินา ที่ผ่านการเผาผลาญ ไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปพักไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น (Desiccator) แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง (W_D)

2. นำแผ่นอะลูมินาในข้อที่ 1. ไปต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 ชั่วโมง (โดยการต้มนั้นต้องให้น้ำท่วมชิ้นงานตลอดเวลา) จากนั้นทิ้งแผ่นอะลูมินาไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. นำแผ่นอะลูมินาในข้อที่ 2. ไปทำการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ (W_{SS})

4. นำแผ่นอะลูมินาที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ แล้ว มาชั่งน้ำหนักอิมมิดิเอตในน้ำ (W_S) โดยใช้ผ้าชุบน้ำบิดให้หมาด แล้วเช็ดน้ำส่วนเกินที่ผิว ออก แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณค่าความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน

5. การคำนวณหาความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนของอะลูมินา

$$\text{ปริมาตรของอะลูมินา (V)} = (W_S - W_{SS})/\rho$$

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ เท่ากับ 1 g/cm^3

$$\text{ความหนาแน่นของอะลูมินา (Bulk density)} = W_D/V$$

$$\text{ปริมาตรรูพรุน (Apparent porosity)} = [(W_S - W_D)/V] \times 100$$

3.3.6 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมออกไซด์ แบบ 3 ชั้น

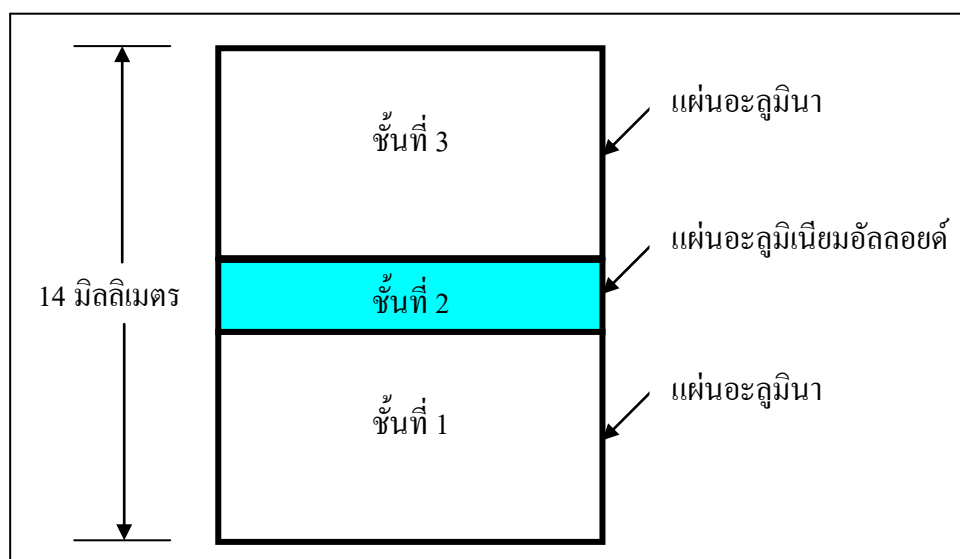
วิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมออกไซด์ แบบ 3 ชั้น

1. นำแผ่นอะลูมินาขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 6 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ที่ผ่านการเผาผลาญ ทดสอบความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุนแล้วไปแช่ในแอซิโตน (Acetone) และเขย่าด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ผิวหน้าของแผ่นอะลูมินาหลุดออก

2. นำแผ่น อะลูมิเนียม ออกไซด์ ที่มีขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 2 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) มาขัดทั้ง 2 หน้า ด้วยกระดาษทราย (SiC sand paper) เบอร์ 1200 กริช จากนั้นนำไปแช่ในแอซิโตน และเขย่าด้วยเครื่องสั่นสะเทือน ทำเช่นเดียวกับแผ่นอะลูมินาในข้อที่ 1.

3. นำแผ่นอะลูมินาที่ได้ในข้อที่ 1. และแผ่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์ ในข้อที่ 2. ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นจนสามารถหยิบจับได้

4. หลังจากนั้นนำแผ่นอะลูมินามาวางประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ ตามรูปแบบที่กำหนด โดยวางประกบกันแบบ 3 ชั้น ซึ่งชั้นที่ 1 และ 3 เป็นแผ่นอะลูมินาที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร และชั้นที่ 2 เป็นแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ความหนารวมทั้งหมด 14 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงรูปแบบการประกบของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมอัลลอยด์ 3 ชั้น

3.3.7 การเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมอัลลอยด์ 3 ชั้น

การเผาประสานวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา - อะลูมิเนียมอัลลอยด์ 3 ชั้น โดยอาศัยหลักการของการแพร่ (Diffusion bonding) โดยใช้ความร้อนเพื่อทำให้เกิดพันธะยึดแน่นกันในระดับอะตอม โดยใช้เตาเผาฟืนิก (High Temperature Furnace (1500°C) ของบริษัท Nabertherm)

สภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.6

อัตราการให้ความร้อน = 5 องศาเซลเซียส/นาที

อัตราการลดความร้อน = 5 องศาเซลเซียส/นาที

บรรยากาศ = ปกติ

ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้ในการทดลองการเผาประสานวัสดุเชิงประกอบ

ตัวอย่างที่	รหัสตัวอย่าง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาเผาแช่ (นาที)
1	3L-950-15	950	15
2	3L-950-30	950	30
3	3L-950-45	950	45
4	3L-1000-15	1000	15
5	3L-1000-30	1000	30
6	3L-1000-45	1000	45
7	3L-1050-15	1050	15
8	3L-1050-30	1050	30
9	3L-1050-45	1050	45



รูปที่ 3.10 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม ออกไซด์แบบ 3 ชั้น ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

3.3.8 ความทนต่อการดัดโค้ง (Bending strength)

ทดสอบความทนต่อการดัดโค้งตามมาตรฐาน (ASTM C1161 - 90) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ (Universal testing machine)

3.3.8.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

1. ตัดตัวอย่างทดสอบ ให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 15 มิลลิเมตร x 95 มิลลิเมตร x 14 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x สูง, ± 0.05 มิลลิเมตร) ด้วยเครื่องตัดใบตัดเพชรความเร็วต่ำ (Low speed diamond saw)

2. ลบมุมเหลี่ยมของตัวอย่างด้วยกระดาษทรายละเอียดแล้วนำไปทดสอบ
สถานะที่ใช้ในการเตรียม

ใบตัดเพชรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว

ความเร็วรอบ = 150 รอบ/นาที

น้ำหนักกดตัด = 150 กรัม

ใช้น้ำหล่อเย็นขณะตัด



รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดใบตัดเพชร

3.3.8.2 การทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง

เป็นการทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง โดยใช้เครื่องมือ ทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ ใช้แรงกระทำกับชิ้นงาน 3 จุด (Three-point flexure) แบบ Universal Testing Machine ของบริษัท Instron

วิธีการทดสอบ

นำตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมาทดสอบ

สถานะที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุกรองรับ	=	2 มิลลิเมตร
ความกว้างของจุกรองรับ	=	50 มิลลิเมตร
ความเร็วในการกดตัดโค้ง	=	0.1 มิลลิเมตร/นาที
จำนวนตัวอย่าง	=	9 ตัวอย่าง
1 ตัวอย่างมี (เพื่อหาค่าเฉลี่ย)	=	3 ชั้น
ทดสอบที่อุณหภูมิต้อง		



รูปที่ 3.12 แสดงเครื่อง Universal testing machine



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการวางชิ้นงานบนเครื่อง Universal testing machine

การคำนวณความทนต่อการดัดโค้งคำนวณได้จากสมการ(3-1)

$$\text{MOR} = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ MPa} \quad (3-1)$$

โดย MOR = ความทนต่อการดัดโค้งของชิ้นงาน (MPa)
 P = ขนาดของแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก (N)
 L = ความกว้างของจุดรองรับตัวอย่าง (cm)
 b = ความกว้างของตัวอย่าง (cm)
 d = ความสูงของตัวอย่าง (cm)

การคำนวณค่าเฉลี่ยของความทนต่อการดัดโค้งคำนวณได้จากสมการ(3-2)

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \quad (3-2)$$

โดย	\bar{X}	=	ค่าเฉลี่ยของความทนต่อการตัดโค้ง
	$\sum X$	=	ผลรวมของความทนต่อการตัดโค้ง
	N	=	จำนวนตัวอย่าง

การคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของความทนต่อการตัดโค้ง คำนวณได้จากสมการ (3-3)

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (3-3)$$

โดย	S.D.	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	X_i	=	ค่าความทนต่อการตัดโค้งของตัวอย่าง
	\bar{X}	=	ค่าเฉลี่ยของความทนต่อการตัดโค้ง
	N	=	จำนวนตัวอย่าง

3.3.9 ความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)

ทดสอบ ความต้านทานแรงกระแทก ตามมาตรฐาน (ISO 179) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทกของวัสดุ (Charpy impact testing machine)

3.3.9.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

1. ตัดตัวอย่างทดสอบให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยม มีขนาดประมาณ 15 มิลลิเมตร x 95 มิลลิเมตร x 14 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x สูง, ± 0.05 มิลลิเมตร) ด้วยเครื่องตัดใบตัดเพชรความเร็วต่ำ (Low speed diamond saw)

2. ลบมุมเหลี่ยมของตัวอย่างด้วยกระดาษทรายละเอียดแล้วนำไปทดสอบสถานะที่ใช้ในการเตรียม

ใบตัดเพชรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว

ความเร็วรอบ = 150 รอบ/นาที

น้ำหนักกดตัด = 150 กรัม

ใช้น้ำหล่อเย็นขณะตัด

3.3.9.2 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

เป็นการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก โดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกของวัสดุ แบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum impact method) เครื่อง Charpy Impact Testing Machine ของบริษัท DMG ผลที่ได้จากการทดสอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพเนื้อของวัสดุซึ่งวัสดุเหนียวจะทนการกระแทกได้ดีกว่าวัสดุที่แข็งเปราะ

วิธีการทดสอบ

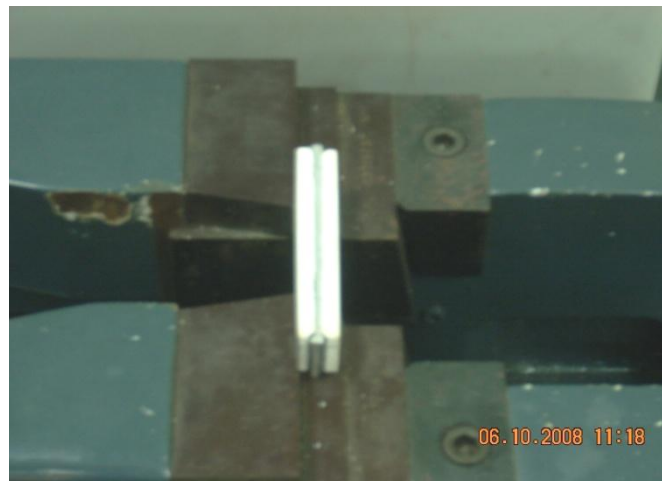
นำตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมาทดสอบ

สถานะที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดของแรงกระแทกสูงสุด	=	600 จูล
ความกว้างของจุดรองรับตัวอย่าง	=	40 มิลลิเมตร
ความเร็วในการกระแทก	=	5.24 เมตร/วินาที
มุมของค้อนทำกับชิ้นงาน	=	160 องศา
จำนวนตัวอย่าง	=	9 ตัวอย่าง
1 ตัวอย่างมี (เพื่อหาค่าเฉลี่ย)	=	3 ชิ้น
ทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ		



รูปที่ 3.14 แสดงเครื่อง Charpy impact testing machine



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะการวางชิ้นงานบนเครื่อง Charpy impact testing machine

การคำนวณความต้านทานแรงกระแทกคำนวณได้จากสมการ (3-4)

$$\alpha = \frac{W}{A} \quad \text{KJ/m}^2 \quad (3-4)$$

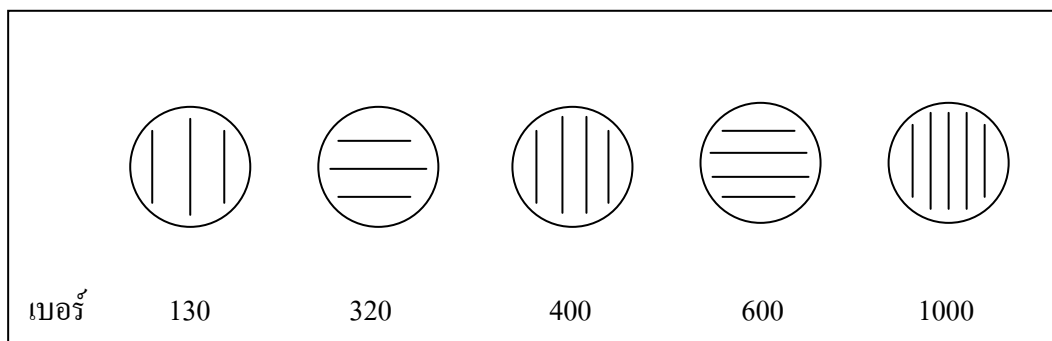
โดย α = ความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน (KJ/m²)
 W = งานที่ใช้ในการตีกระแทก (KJ)
 A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m²)

3.3.10 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure analysis)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

3.3.10.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

1. เตรียมตัวอย่าง โดยการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย เรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด (เบอร์ 130-1000) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (เมื่อมีการเปลี่ยนกระดาษทรายต้องวางชิ้นงานให้ตัดกับรอยเดิมทุกครั้ง)



รูปที่ 3.16 แสดงการเรียงลำดับในการขัดด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ที่มีความหยาบไปหาละเอียด

2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. มาขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ บนงานขัดแบบผ้า
3. ทำความสะอาดตัวอย่างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ จากนั้นใช้ เครื่องเป่าแห้ง (Dryer) เป่าให้แห้ง
4. ขัดสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนผิวหน้าชิ้นงานออกโดยใช้เครื่องสันความถี่สูง
5. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4. นำไปฉาบทองด้วยเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยไอออน (Ion sputtering device ของบริษัท JEOL) เพื่อให้ชิ้นงานนำไฟฟ้า
6. นำตัวอย่าง ที่ผ่านการฉาบด้วยทองไป วิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาค และ ถ่ายรูป ด้วยกล้อง จุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.17 แสดงเครื่อง Ion sputtering device



รูปที่ 3.18 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning electron microscope, SEM)

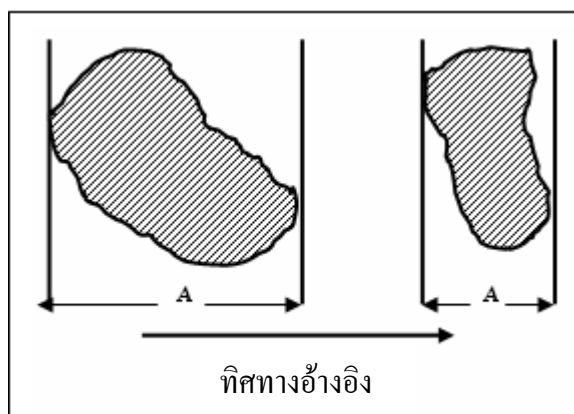
3.3.10.2 การวัดขนาดเกรนของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบจะทำ ในลักษณะเดียวกัน กับการเตรียมตัวอย่าง ในหัวข้อ 3.3.10.1

วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เรต์ (Ferret's method) โดยการลากเส้นขนานและเส้นสัมผัสที่ขอบทั้งสองข้าง ของเกรน ที่ต้องการ วัดจากนั้น กำหนด ทิศทางอ้างอิง แล้วจึงทำการวัดขนาดของเกรนตามทิศทางนั้นตลอดดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงการวัดขนาดเกรนของตัวอย่างตามวิธีของเฟอร์เรต์

บทที่ 4

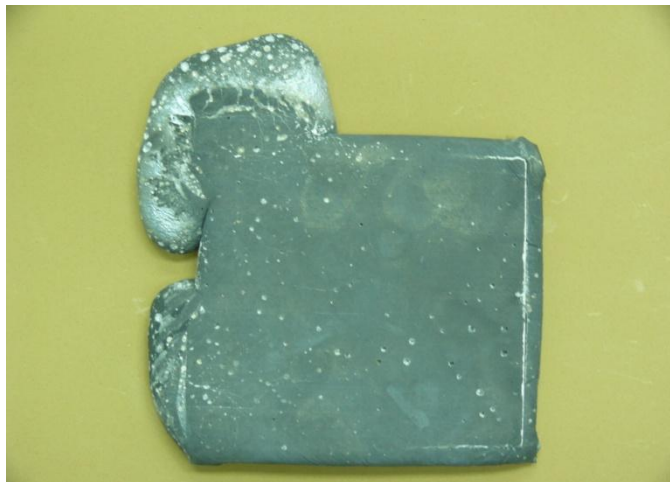
ผลการทดลอง และ อภิปรายผล

4.1 การศึกษาเบื้องต้น

จากการศึกษาการทดลองเบื้องต้นได้ทำการทดลองการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1-4.11

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการศึกษาเบื้องต้นการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

รหัสตัวอย่าง	ผลการทดลอง
Al6061-6-750	ติดและแผ่นอะลูมิเนียมเกิดการหลอม (รูปที่ 4.1)
Al6063-1-850	ไม่ติด (รูปที่ 4.2)
Al6063-6-850	ติดและแผ่นอะลูมิเนียมเกิดการหลอม (รูปที่ 4.3)
Al6063-6-750	ติดและแผ่นอะลูมิเนียมเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูป (รูปที่ 4.4)
Al6063-Ti-700	ไม่ติด (รูปที่ 4.5)
Al6063-Ti-750	แผ่นไททานเนียมไม่ทำปฏิกิริยากับแผ่นอะลูมินาแต่แผ่นอะลูมิเนียมยึดติดกับแผ่นไททานเนียม (รูปที่ 4.6)
Ti-1000	ไม่ติดและแผ่นไททานเนียมเกิดการเปลี่ยนสี (รูปที่ 4.7)
Frit-1000	ติด (รูปที่ 4.8(ก))
Al6063-Frit-700	ไม่ติด (รูปที่ 4.8(ข))
Al6063-F(L)-700	ไม่ติด (รูปที่ 4.9)
Al6063-Pb-350	ไม่ติด (รูปที่ 4.10)
Al6063-Pow-750	ไม่ติด (รูปที่ 4.11)



รูปที่ 4.1(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบ ด้านแผ่นอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.1(ข) แสดงวัสดุเชิงประกอบ ด้านแผ่นอะลูมินา

รูปที่ 4.1 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6061-T651 หนา 6 มิลลิเมตร (A16061-6-750)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าแผ่นอะลูมินาเกิดการยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียม เนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียมเกิดการหลอมเสียรูปแล้วห่อหุ้มแผ่นอะลูมินาไว้เมื่อ เย็นตัวลง ทำให้แผ่นอะลูมินาเกิดการแตกหัก จากการทดลองเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาและอะลูมิเนียมได้ทำการลด

ขนาดความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมจากความหนา 6 มิลลิเมตร เหลือ 1 มิลลิเมตร ผลปรากฏว่าแผ่นอะลูมิเนียมไม่ทำปฏิกิริยากับแผ่นอะลูมินาหรือไม่เกิดการยึดติดกันดังรูปที่ 4.2

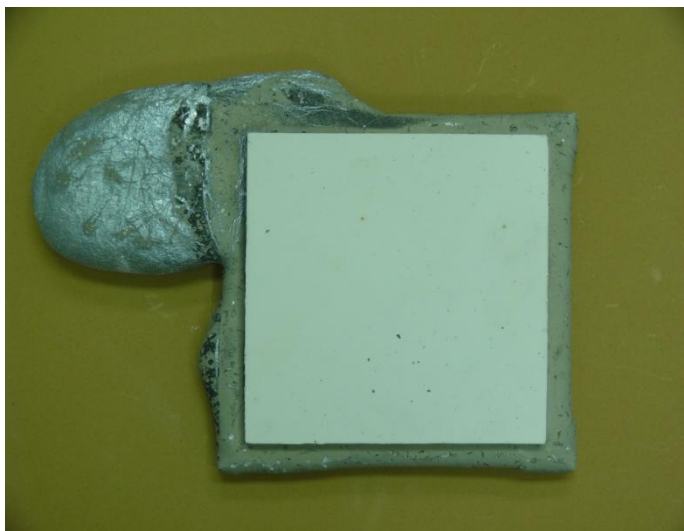


รูปที่ 4.2(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบ ด้านแผ่นอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.2(ข) แสดงวัสดุเชิงประกอบ ด้านแผ่นอะลูมินา

รูปที่ 4.2 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัล ลอยด์เกรด 6063-0 หนา 1 มิลลิเมตร (A16063-1-850)



รูปที่ 4.3 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาอะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัล ลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร (A16063-6-850)

จากรูปที่ 4.3 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้อะลูมิเนียมเกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร จะทำให้เกิดการยึดติดกันระหว่าง แผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมินา แต่แผ่นอะลูมิเนียมเกิดการหลอมเสียรูปเนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียม ที่มีขนาดและความหนาจะไม่สามารถทนต่อการหลอมเสียรูปที่อุณหภูมิสูงได้ดีเท่ากับแผ่น อะลูมิเนียมที่มีขนาดและความหนาน้อยกว่าจึงเกิดการหลอมละลายแสดงในรูปที่ 4.2 ดังนั้นจึงได้ทำ การทดลองลดอุณหภูมิเผาประสาน โดยใช้อะลูมิเนียมเกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที พบว่าแผ่นอะลูมินาจะเกิดการยึดติดกันแน่นกับแผ่นอะลูมิเนียมแต่ แผ่นอะลูมิเนียมจะเริ่มมีการหลอมเสียรูปตรงริมขอบทั้ง 4 ด้าน ดังรูปที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าแผ่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร สามารถทนต่ออุณหภูมิได้ที่ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยแผ่นอะลูมิเนียมเริ่มมีการเสียรูปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ณ ที่อุณหภูมิและเวลา เดียวกันนี้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์เกรด 6061-T651 หนา 6 มิลลิเมตร ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิ ได้จึงเกิดการหลอมละลายและเสียรูปไป ดังรูปที่ 4.1

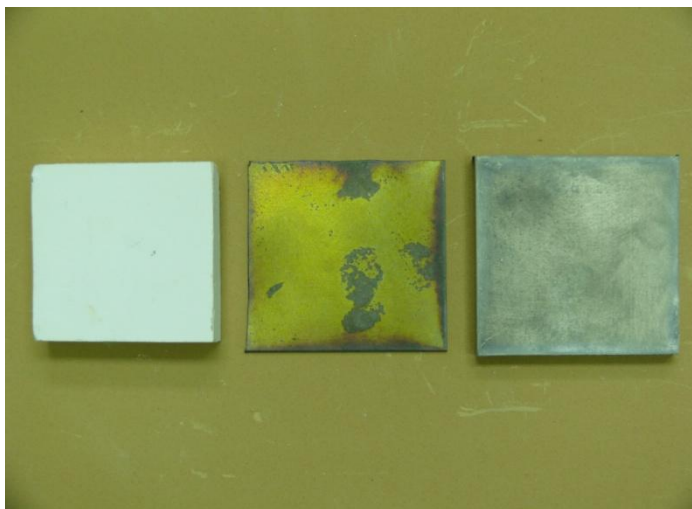


รูปที่ 4.4(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบ ด้านแผ่นอะลูมิเนียม



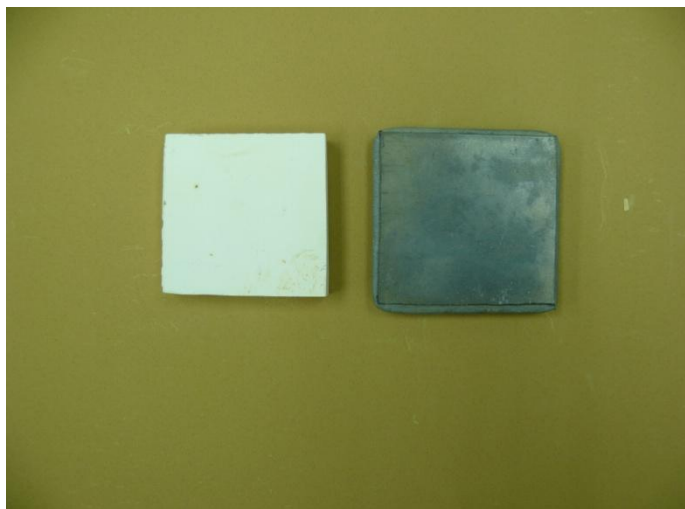
รูปที่ 4.4(ข) แสดงวัสดุเชิงประกอบ ด้านแผ่นอะลูมินา

รูปที่ 4.4 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร (A16063-6-750)



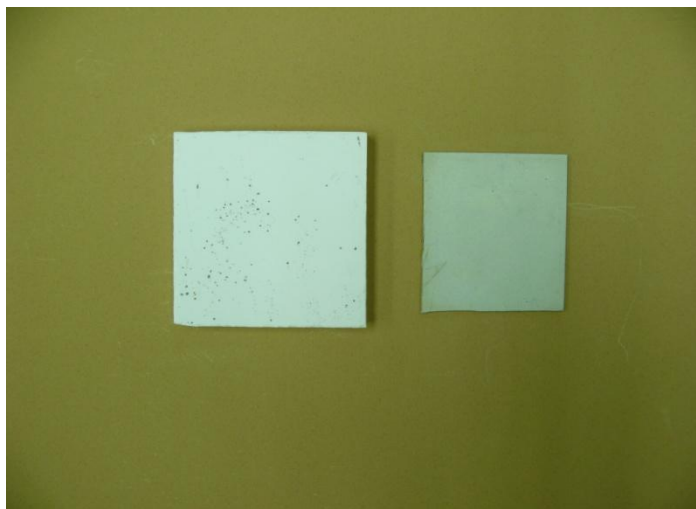
รูปที่ 4.5 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ หนา 1 มิลลิเมตร วางคั่นอยู่ตรงกลาง (Al6063-Ti-700)

จากรูปที่ 4.5 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ หนา 1 มิลลิเมตร วางคั่นอยู่ตรงกลาง พบว่าวัสดุที่นำมาเผาประสานเพื่อทำเป็น วัสดุเชิงประกอบทั้ง 3 ชนิด ไม่เกิดปฏิกิริยา ต่อกันทำให้ไม่เกิดการยึดติดกัน เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประสานต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะไททาเนียม (ปกติ 1670 องศาเซลเซียส) มากเกินไป ดังนั้นได้ทำการ ทดลองเพิ่มอุณหภูมิของการเผาประสานของวัสดุเชิงประกอบที่ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที พบว่าแผ่นอะลูมิเนียมเกิดการยึดติดกับแผ่นไททาเนียมแต่แผ่นไททาเนียมไม่เกิดปฏิกิริยากับแผ่นอะลูมินา ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ หนา 1 มิลลิเมตร วางคั่นอยู่ตรงกลาง (Al6063-Ti-750)

จากการทดลองเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ หนา 1 มิลลิเมตร วางคั่นอยู่ตรงกลาง เผาประสานที่อุณหภูมิ 700 และ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ตามลำดับ ผลที่ได้ไม่ประสบความสำเร็จ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิเผาประสานที่ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที แต่เผาประสานเพียงวัสดุ 2 ชนิดเท่านั้น คือ แผ่นอะลูมินาและแผ่นไททาเนียมอัลลอยด์ ผลปรากฏว่าแผ่นอะลูมินาและแผ่นไททาเนียมไม่เกิด ปฏิกิริยาใด ๆ ต่อกันแต่สำหรับแผ่นไททาเนียมจะเกิดปฏิกิริยากับออกไซด์ฟิล์มที่ผิวของแผ่นไททาเนียมเอง ทำให้แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์เกิดการเปลี่ยนจากสีดำกลายเป็นสีขาวเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 4.7

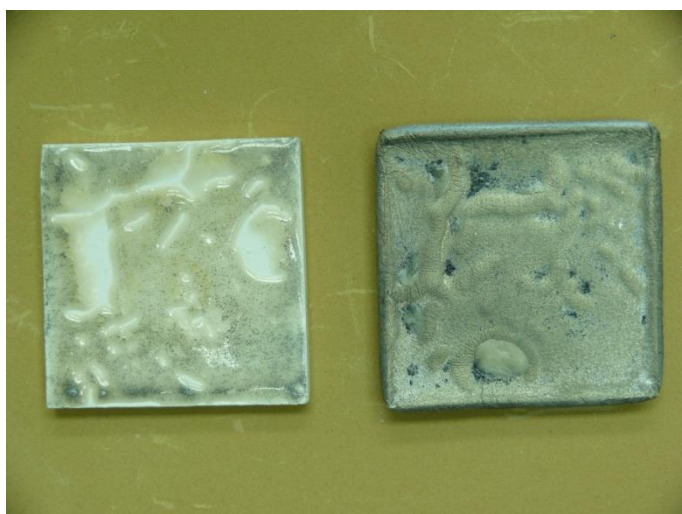


รูปที่ 4.7 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-ไททาเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นไททาเนียมอัลลอยด์หนา 1 มิลลิเมตร (Ti-1000)

หลังจากนั้นทำการทดลองเผาเคลือบด้วยฟrit หนา 1 มิลลิเมตร ที่มีจุดสุกตัวต่ำ (980 องศาเซลเซียส) กับแผ่นอะลูมินาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที พบว่าเคลือบฟritเกิดการยึดเกาะบนแผ่นอะลูมินาได้อย่างหนาแน่นดังแสดงในรูปที่ 4.8(ก) และหลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากรูปที่ 4.8(ก) มาวางประกบเผาประสานกับแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ผลปรากฏว่าแผ่นอะลูมิเนียมไม่เกิดปฏิกิริยากับตัวเคลือบที่ใช้ประสานดังแสดงในรูปที่ 4.8(ข) หลังจากนั้นได้ทำการทดลอง เผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้เคลือบฟrit หนา 1 มิลลิเมตร เป็นตัวประสานคั่นอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นวัสดุทั้ง 2 ซึ่งเคลือบฟrit ที่ใช้นั้นได้ทำการเติมลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เพื่อลดจุดสุกตัวของเคลือบ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ได้ไม่เกิดการยึดติดกันและเคลือบฟritจะมีลักษณะร่อนแตกรานดังแสดงในรูป 4.9



รูปที่ 4.8(ก) แสดงการเผาเคลือบด้วยฟริตที่มีจุดสุกตัวต่ำ กับแผ่นอะลูมินา ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที (Frit-1000)



รูปที่ 4.8(ข) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที (Al6063-Frit-700)

รูปที่ 4.8 แสดงวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสานโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้แผ่นอะลูมินาจุ่มเคลือบ ด้วยฟริตที่มีจุดสุกตัวต่ำ หนา 1 มิลลิเมตร แล้วประกบกับแผ่นอะลูมิเนียม

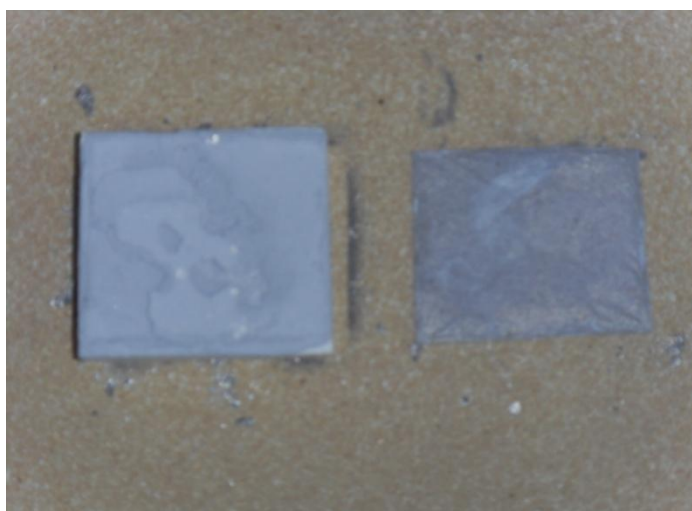


รูปที่ 4.9 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์ เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และเติมลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) ลงในฟrit ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เพื่อลดจุดสุกตัวของฟrit แล้วใช้แผ่นอะลูมินาจุ่มเคลือบฟrit หนา 1 มิลลิเมตร แล้วประกบกับแผ่นอะลูมิเนียม (A16063-F(L)-700)



รูปที่ 4.10 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาอะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้ตะกั่ว หนา 1 มิลลิเมตร วางกั้นอยู่ตรงกลาง (A16063-Pb-350)

จากรูปที่ 4.10 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผา
 ประสานที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน โดยใช้แผ่น
 อะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6 มิลลิเมตร และใช้เส้นตะกั่วที่นำมาขดเป็นวงกลมที่มีความ
 หนา 1 มิลลิเมตร วางคั่นตรงกลางระหว่างแผ่นวัสดุทั้ง 2 ชนิด ผลปรากฏว่าตะกั่วเกิดการหลอม
 ละลายยึดเกาะให้แผ่นอะลูมินาและแผ่นอะลูมิเนียมอยู่ด้วยกันได้ เมื่อทดสอบดึงด้วยมือพบว่าแผ่น
 วัสดุทั้ง 2 ชนิดเกิดการหลุดออกจากกันได้อย่างง่ายดาย จึงสามารถสรุปได้ว่าเส้นตะกั่วที่นำมาขึ้น
 รูปประสานส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ยึดติดกันด้วยพันธะที่ไม่
 แข็งแรงสามารถทำให้หลุดออกจากกัน ได้โดยง่าย หลังจากนั้นได้ทำการทดลองเผาประสานวัสดุ
 เชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้
 ผงอะลูมิเนียมร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ผสมกับผงอะลูมินาร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ทาบนแผ่นอะลูมินา
 ให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร แล้ววางประกบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 6
 มิลลิเมตร ผลปรากฏว่าผงที่มีส่วนผสมระหว่างอะลูมิเนียมและอะลูมินาจะไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิด
 การยึดติดกับแผ่นวัสดุทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ
 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้ผงอะลูมิเนียมผสมกับผงอะลูมินา ทาบนแผ่นอะลูมินา
 หนา 1 มิลลิเมตร แล้วประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์

4.2 การศึกษาและทดลองในงานวิจัย

4.2.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา แสดงในตารางที่ 4.2

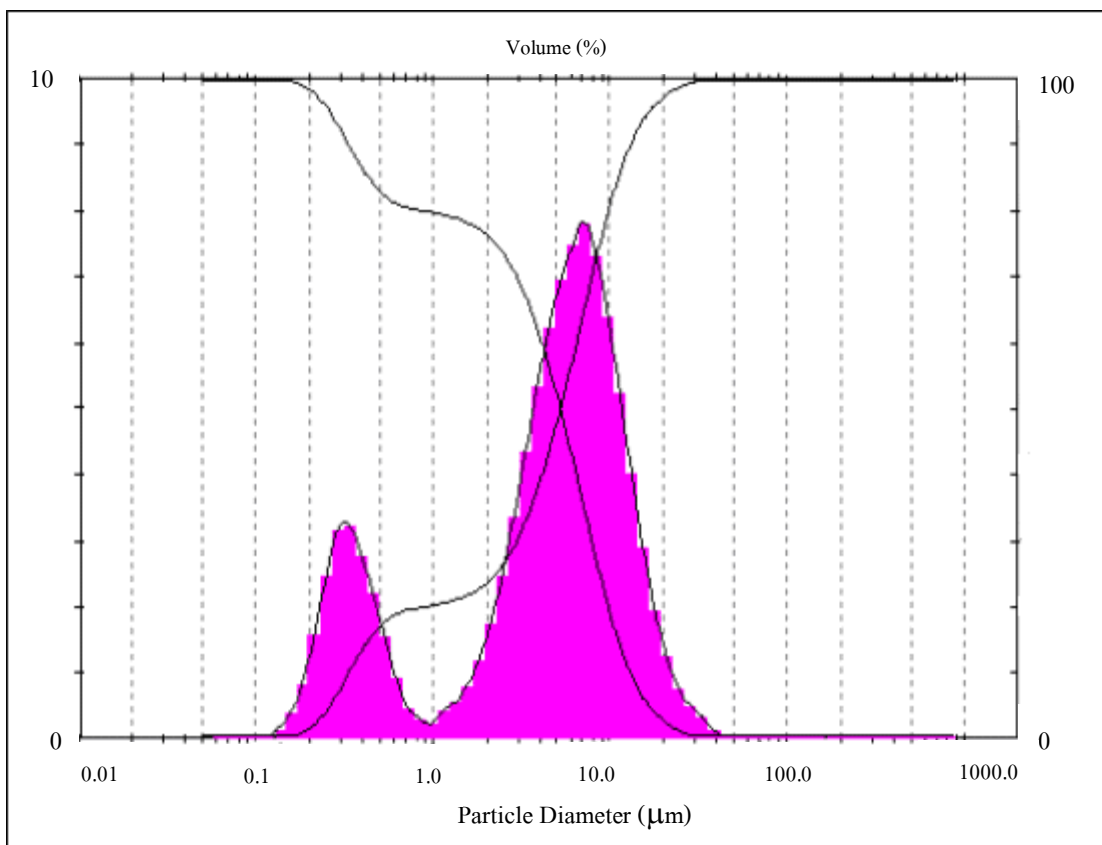
ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะเฉพาะที่วัดได้ของผงอะลูมินา

ลักษณะเฉพาะ	ค่าที่วัดได้
ความถ่วงจำเพาะ	3.11
การกระจายขนาดอนุภาค (ไมครอน)	
- ขนาดที่เล็กกว่า 0.33	ร้อยละ 10
- ขนาดที่เล็กกว่า 5.24	ร้อยละ 50
- ขนาดที่เล็กกว่า 13.05	ร้อยละ 90
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) *	
Al ₂ O ₃	95.0
Na ₂ O	0.3
SiO ₂	0.2
CaO	0.1
Fe ₂ O ₃	0.02
วิญญภาค	α- Al ₂ O ₃

หมายเหตุ : * Suzhou Dexin Advanced Ceramics Co., Ltd.

จากการศึกษาอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์สูง (ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก) จะมีสมบัติเชิงกลสูงด้วย แต่การวิจัยครั้งนี้ใช้อะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่แล้วและลดต้นทุนในการผลิต

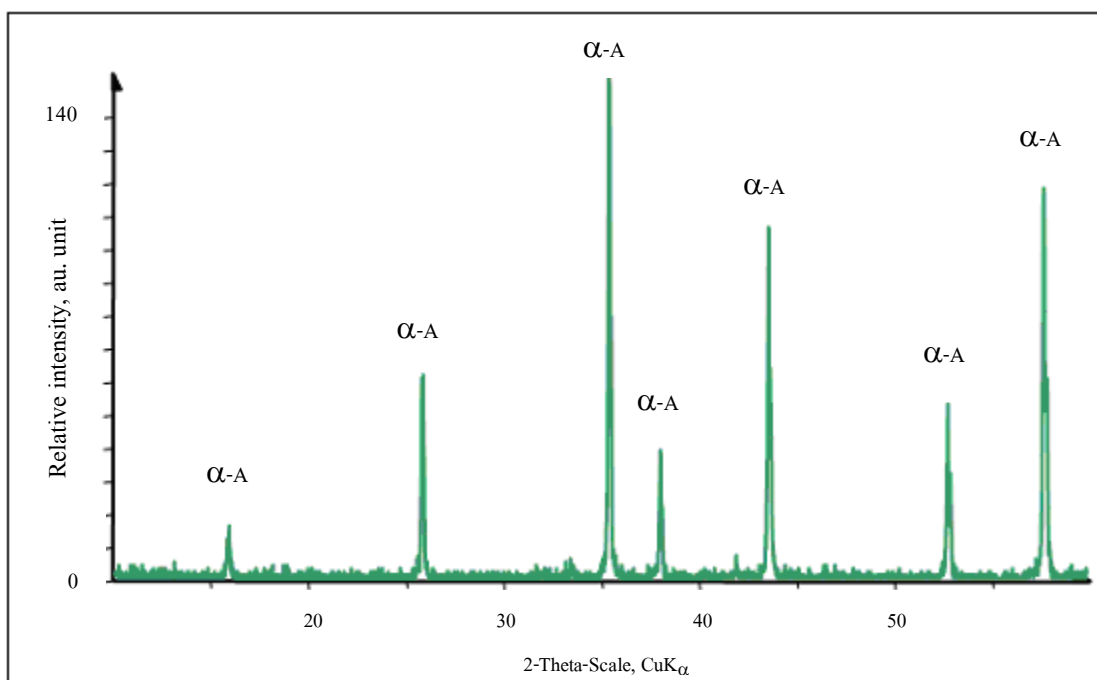
รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของ อะลูมินา จากการศึกษาด้วยเครื่อง มีอวัดขนาดอนุภาค โดยอาศัยการกระเจิงและเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์แสดงใน รูปที่ 4.12 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 5.24 ไมครอน



รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา

4.2.1.1 การวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ของผงอะลูมินา

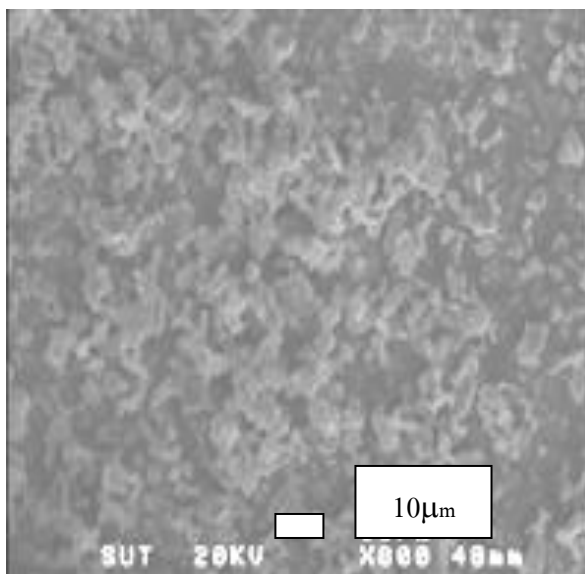
การวิเคราะห์วิทยาศาสตร์ ด้วยเครื่อง เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) แพทเทิร์น ที่แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าพีคที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.15 องศา พีคที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 57.49 และ 43.35 องศา ตามลำดับ มี วิทยาศาสตร์ อยู่ในรูป แอลฟา- อะลูมินา ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) (Card number 00-010-0173) เพียงวิทยาศาสตร์เดียว



รูปที่ 4.13 แสดง XRD แพทเทิร์นของผงอะลูมินา โดย α -A แสดงวัฏภาคแอลฟา-อะลูมินา

4.2.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผงอะลูมินา

รูปไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าผงอะลูมินามีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) มีอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับอนุภาคขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 10 ไมครอน



รูปที่ 4.14 แสดงรูปไมโครกราฟของผงอะลูมินาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.2.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของอะลูมินา

สำหรับแผ่นอะลูมินาที่ผ่านการอัดขึ้นรูปและเผาผนึกเรียบร้อยแล้วจะนำมาตรวจสอบลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และผงอะลูมินาที่ใช้ในการเตรียมแผ่นอะลูมินานั้นมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

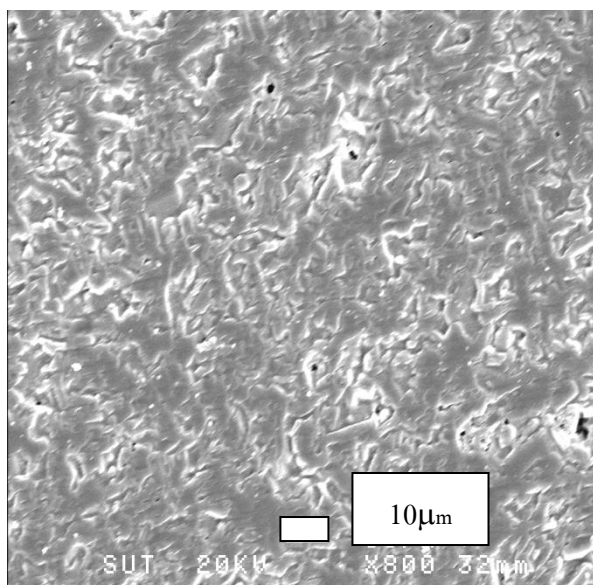
ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของอะลูมินาร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

ลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกล	อะลูมินา
ความหนาแน่น, g/cm^3	3.11
ปริมาณรูพรุน, %	20.08
ความทนต่อการดัดโค้ง, MPa	149.81
ความต้านทานแรงกระแทก, KJ/m^2	37.18

หมายเหตุ : ลักษณะเฉพาะ และสมบัติเชิงกลของอะลูมินามีค่าอยู่ในระดับต่ำ

เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณสารเพิ่มการยึดเกาะที่เติมลงไป

รูปไมโครกราฟจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าเกรนของ อะลูมินามีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) มีเกรนขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับเกรนขนาดเล็ก มีขนาดของเกรนอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 10 ไมครอน



รูปที่ 4.15 แสดงรูปไมโครกราฟของอะลูมินาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่มีต่อลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

4.3.1 แสดงภาพจากการเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ในรูปที่ 4.16-4.24 และตารางที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาของการเผาประสานที่มีต่อลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิ และเวลาของการเผาประสานที่มีต่อลักษณะเฉพาะของวัสดุ
เชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

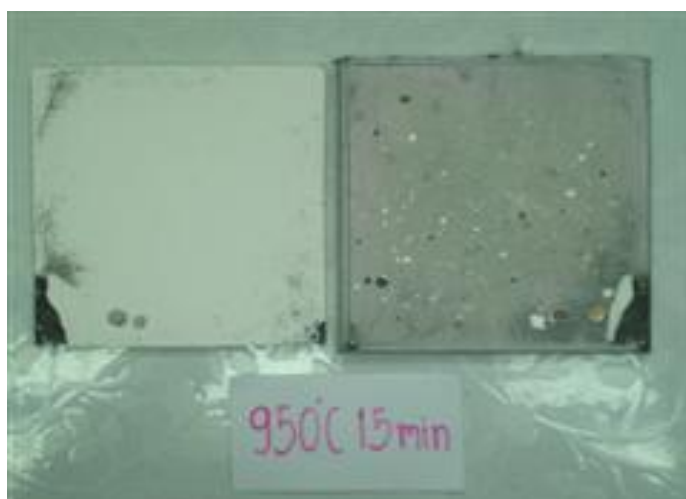
ตัวอย่างที่	รหัสตัวอย่าง	การขยายตัวของแผ่น อะลูมิเนียมออกนอก กรอบ (ร้อยละ)	ผลการทดลอง
1	3L-950-15	0.53	หลุดร่อน
2	3L-950-30	0.63	หลุดร่อน
3	3L-950-45	0.84	ติด
4	3L-1000-15	0.95	ติด
5	3L-1000-30	1.03	ติด
6	3L-1000-45	1.07	ติด
7	3L-1050-15	1.33	ติด
8	3L-1050-30	1.66	ติด
9	3L-1050-45	2.08	ติด

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและเวลาของการเผาประสานจะมีผลกระทบต่อลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อะลูมิเนียมเกิดการหลอมละลายแล้วขยายตัวไหลออกมาจากช่องว่างระหว่างแผ่นอะลูมินาทั้ง 2 ได้มากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม จากการทดลองและศึกษาการเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ผลปรากฏว่าวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างที่ 1 รหัสตัวอย่าง 3L-950-15 ชิ้นงานเกิดการหลุดร่อนระหว่างการนำไปตัด เพื่อตรวจสอบลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และสำหรับวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างที่ 2 รหัสตัวอย่าง 3L-950-30 ชิ้นงานเกิดการหลุดร่อนหลังจากการตัดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 สาเหตุเนื่องมาจากเวลาของการเผาประสานไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นอะลูมินาและแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ ทำให้เกิดการหลุดร่อนของชิ้นงาน จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ อภิปราย และสรุปผลการทดลองได้ ดังนั้นจำนวนตัวอย่างของการวิจัยครั้งนี้จึงเหลือเพียง 7 ตัวอย่างเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18-4.24

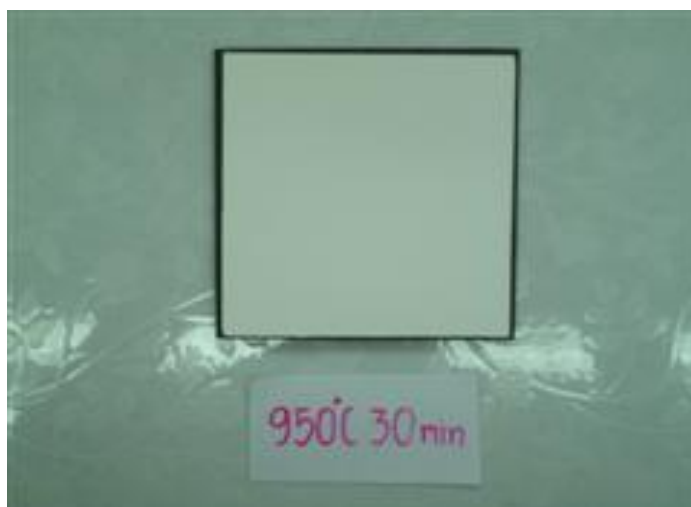


รูปที่ 4.16(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน



รูปที่ 4.16(ข) แสดงวัสดุเชิง ประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม หลุดร่อนก่อนการตัดชิ้นงาน

รูปที่ 4.16 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้นที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที (3L-950-15)



รูปที่ 4.17(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน



รูปที่ 4.17(ข) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาอะลูมิเนียม ที่ผ่านการตัดก่อนการทดสอบแล้วหลักร้อน

รูปที่ 4.17 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้นที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที (3L-950-30)



รูปที่ 4.18(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน



รูปที่ 4.18(ข) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม ที่ผ่านการตัดก่อนการทดสอบ

รูปที่ 4.18 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที (3L-950-45)



รูปที่ 4.19(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน



รูปที่ 4.19(ข) แสดงวัสดุเชิง ประกอบ อะลูมินา -อะลูมิเนียม ที่ผ่านการตัดก่อนการทดสอบ

รูปที่ 4.19 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้นที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที (3L-1000-15)



รูปที่ 4.20(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน



รูปที่ 4.20(ข) แสดงวัสดุเชิง ประกอบ อะลูมินา -อะลูมิเนียม ที่ผ่านการตัดก่อนการทดสอบ

รูปที่ 4.20 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้นที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที (3L-1000-30)



รูปที่ 4.21(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดร้อน ที่ผ่านการเผาประสาน



รูปที่ 4.21(ข) แสดงวัสดุเชิง ประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม ที่ผ่านการตัดก่อนการทดสอบ

รูปที่ 4.21 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดร้อนที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที (3L-1000-45)

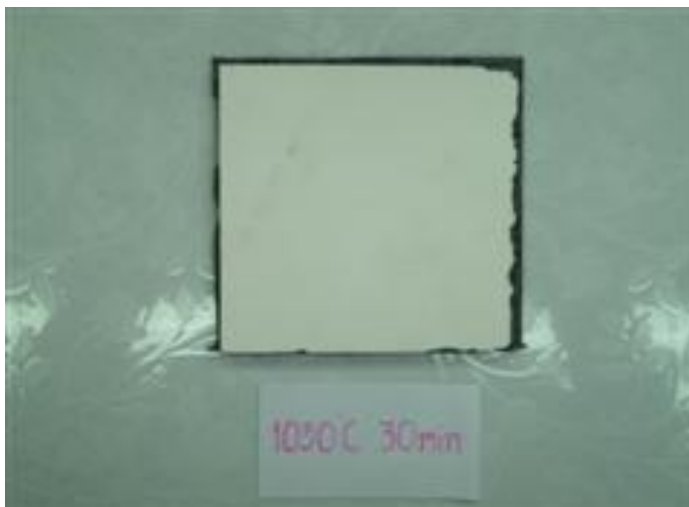


รูปที่ 4.22(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน



รูปที่ 4.22(ข) แสดงวัสดุเชิง ประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม ที่ผ่านการตัดก่อนการทดสอบ

รูปที่ 4.22 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้นที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที (3L-1050-15)

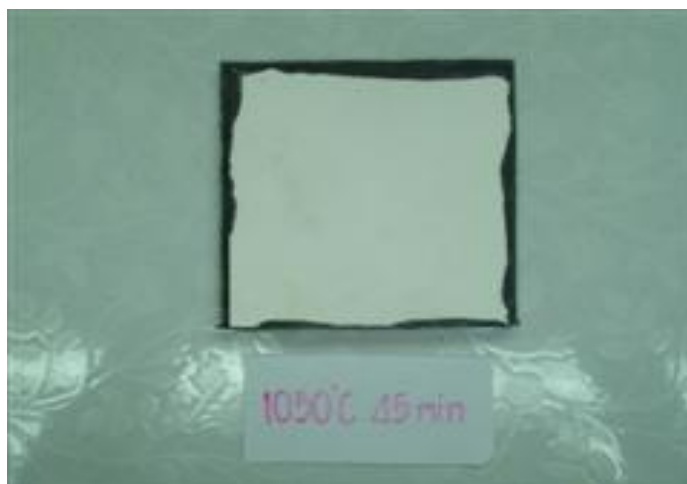


รูปที่ 4.23(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน



รูปที่ 4.23(ข) แสดงวัสดุเชิง ประกอบ อะลูมินา -อะลูมิเนียม ที่ผ่านการตัดก่อนการทดสอบ

รูปที่ 4.23 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้นที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที (3L-1050-30)



รูปที่ 4.24(ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสาน



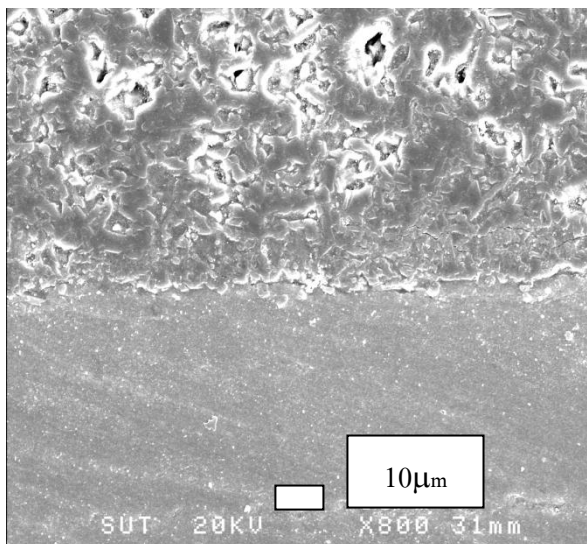
รูปที่ 4.24(ข) แสดงวัสดุเชิง ประกอบ อะลูมินา -อะลูมิเนียม ที่ผ่านการตัดก่อนการทดสอบ

รูปที่ 4.24 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้นที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที (3L-1050-45)

จากรูปที่ 4.18-4.24 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 950-1050 องศาเซลเซียส เวลา 15, 30 และ 45 นาที ตามลำดับ โดยผ่านการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบลักษณะเฉพาะและตรวจสอบสมบัติเชิงกล

4.3.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าร่วม

รูปที่ 4.25 แสดงรูปไมโครกราฟของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิและเวลาสูงขึ้น จะทำให้เกิดรูพรุนที่ผิวหน้าร่วมและบริเวณชั้นของอะลูมิเนียมมากขึ้นเนื่องจากการเกิดรูพรุนหรือโพรงอากาศของการเกิดแก๊สจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมเหลว กับออกไซด์ฟิล์มที่ผิวของอะลูมิเนียมและจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมเหลวกับออกซิเจนในบรรยากาศ ซึ่งเกิดจากการใช้อุณหภูมิที่สูงทำให้อะลูมิเนียมเกิดการเดือดเป็นฟองอากาศและทิ้งรูพรุนหรือโพรงอากาศไว้เมื่อเย็นตัวลง ดังรูปที่ 4.25

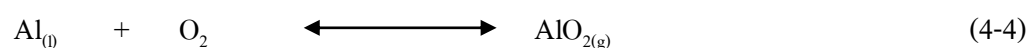
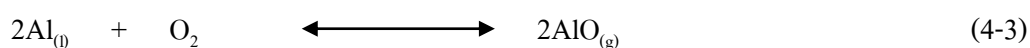
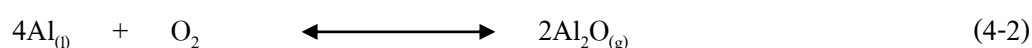
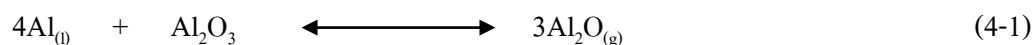


รูปที่ 4.25(ก) วัสดุเชิงประกอบเผาประสานที่ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

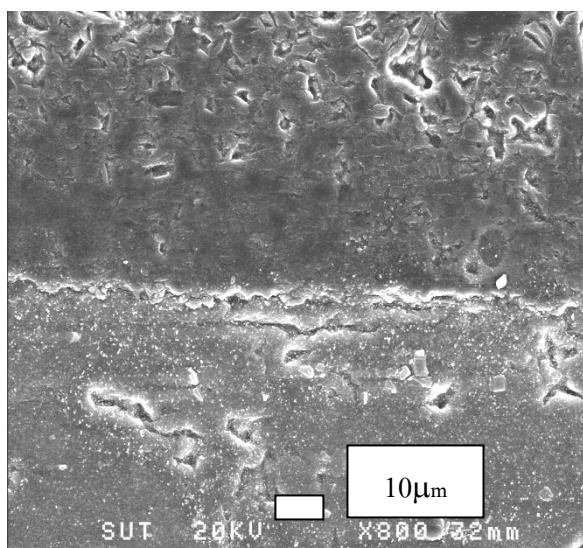
จากรูปที่ 4.25 (ก) แสดงรูปไมโครกราฟของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา - อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที จากการสังเกตจะเห็น ได้ว่าที่ผิวหน้าร่วมและบริเวณชั้นของ อะลูมิเนียมจะมีลักษณะ เรียบ ไม่ขรุขระ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเผาประสานที่อุณหภูมิและเวลาอื่น ๆ

อย่างไรก็ตามการเผาประสานที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที สามารถทำให้เกิดแก๊สขึ้นได้แต่เกิดในปริมาณที่ค่อนข้างน้อยกว่าที่สภาวะอื่น ซึ่งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนี้มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ Al_2O , AlO และ AlO_2 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมเหลวกับออกไซด์ฟิล์มที่ผิวของอะลูมิเนียม (Ksiazek, Sobczak, Mikulowski, Radziwill, and Surowiak, 2002) ดังแสดงในสมการที่ (4-1) และเมื่อออกไซด์ฟิล์มที่ผิวของอะลูมิเนียมถูกทำลาย

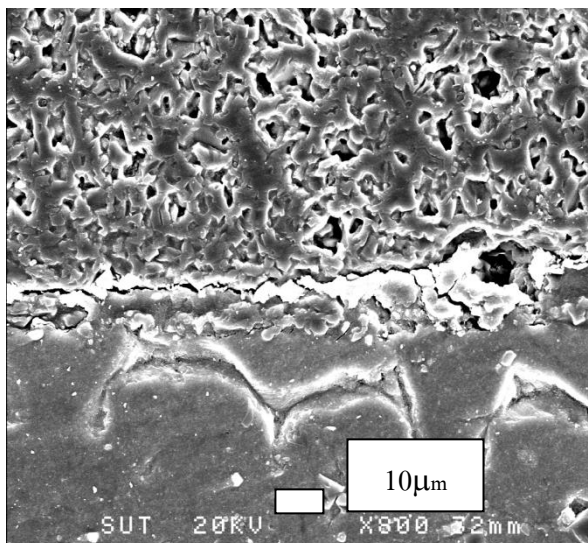
ออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเหลวทำให้เกิดแก๊สต่าง ๆ ได้เหมือนกัน (Lou, Mitchell, and Heuer, 1985) ดังแสดงได้จากสมการ (4-2), (4-3) และ (4-4) ตามลำดับ



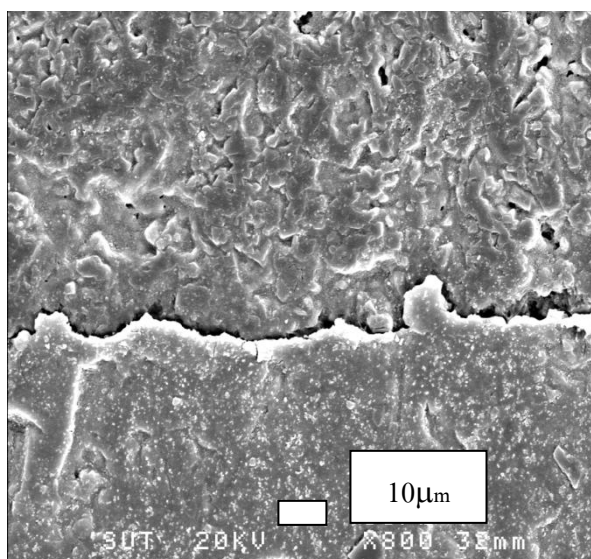
ซึ่งแก๊สทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้บริเวณผิวหน้าร่วมและบริเวณชั้นของอะลูมิเนียมเกิดรูพรุนหรือโพรงอากาศแล้วปล่อยทิ้งไว้เมื่อเย็นตัวลง และรูพรุนหรือโพรงอากาศเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลหรือสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น ต่อไป



รูปที่ 4.25(ข) วัสดุเชิงประกอบเผาประสานที่ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที



รูปที่ 4.25(ค) วัสดุเชิงประกอบเผาประสานที่ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

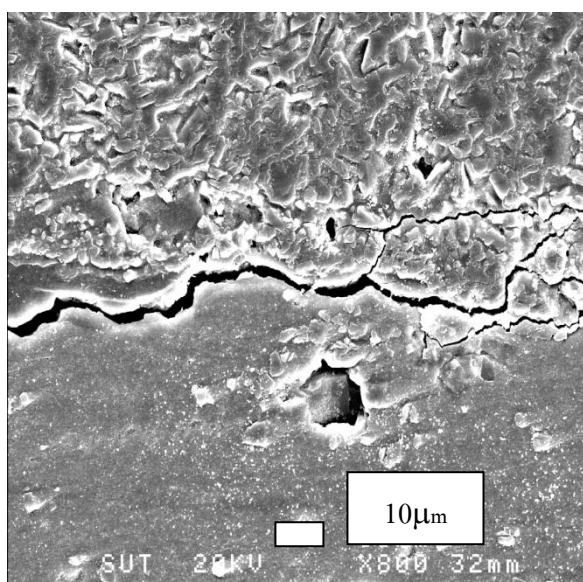


รูปที่ 4.25(ง) วัสดุเชิงประกอบเผาประสานที่ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

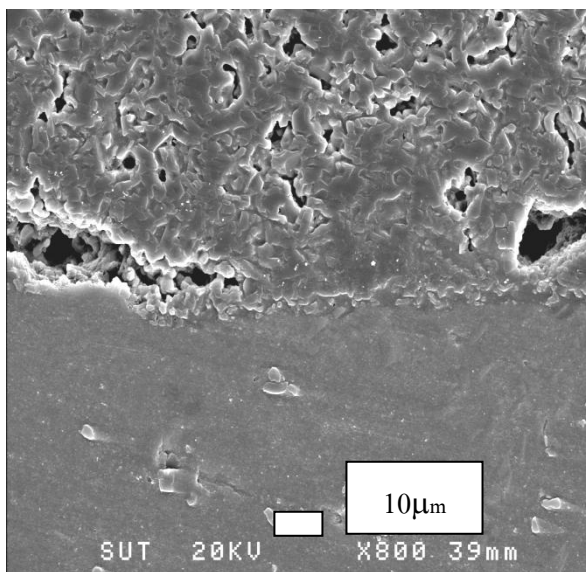
จากรูปที่ 4.25 (ข)-(ง) แสดงรูปไมโครกราฟของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 15, 30 และ 45 นาที ตามลำดับ จากการสังเกตจะเห็นความแตกต่างของปริมาณรูพรุนหรือโพรงอากาศที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การเผาประสาน ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที เนื่องจากการ เพิ่ม

อุณหภูมิและเวลาในการเผาประสานจะทำให้อะลูมิเนียมเหลวทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจนได้มากขึ้น (Lou, Mitchell, and Heuer, 1985) เกิดเป็นแก๊สแล้วทิ้งรูพรุนหรือโพรงอากาศไว้ที่ผิวหน้าร่วมและบริเวณชั้นของอะลูมิเนียมเมื่อเย็นตัวลง ซึ่งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้แสดงไว้จากสมการ (4-1), (4-2), (4-3) และ (4-4) ในตอนเริ่มต้น

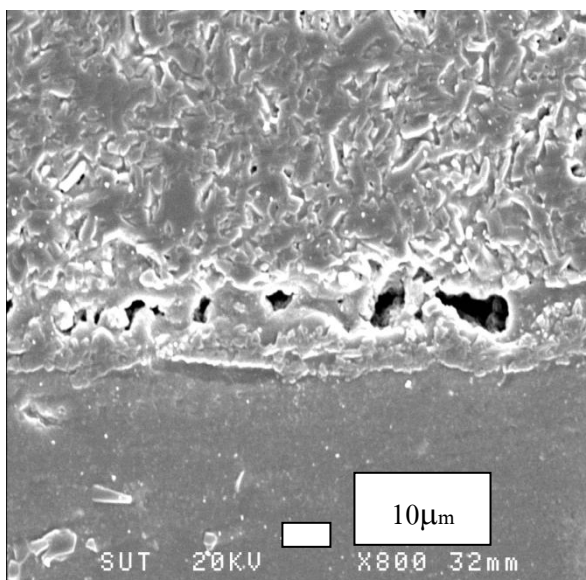
จากการ ศึกษา นอกจากการเกิดแก๊สใน ระบบ ของวัสดุเชิง ประกอบ อะลูมินา - อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อนแล้ว ยังพบว่าเมื่อ อุณหภูมิและเวลาของการเผาประสานที่ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 45 นาที ที่ผิวหน้าร่วมของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินาอะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน เกิดการ แตกร้าวเนื่องจากวัสดุทั้ง 2 ชนิด มีค่าการหด - ขยายตัวที่แตก ต่างกัน ที่อุณหภูมิสูงดังแสดง ในตารางที่ 2.4 (หน้า 16) และตารางที่ 2.5 (หน้า 19) ซึ่งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในวัสดุนี้จะส่งผลกระทบต่อสมบัติ เชิงกลของวัสดุเชิงประกอบต่อไป



รูปที่ 4.25(จ) วัสดุเชิงประกอบเผาประสานที่ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที



รูปที่ 4.25(ฉ) วัสดุเชิงประกอบเผาประสานที่ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที



รูปที่ 4.25(ช) วัสดุเชิงประกอบเผาประสานที่ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

รูปที่ 4.25 แสดงรูปไมโครกราฟของโครงสร้างจุลภาคของ วัสดุเชิงประกอบ หลังผ่านการเผา
ประสานที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.25(จ)-(ข) แสดงรูปไมโครกราฟ ของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 15, 30 และ 45 นาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นสถานะที่มีผลเสียต่อชิ้นงานมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสถานะที่กล่าวในตอนต้น จะสามารถมองเห็นรูพรุนหรือโพรงอากาศจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งปริมาณหรือขนาดของรูพรุนจะแสดงถึงปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าร่วมและบริเวณชั้นของอะลูมิเนียม (Yanaguda and Krorger, 1968) และรูปที่ 4.25(จ) แสดงวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที จะพบรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าร่วมของวัสดุเชิงประกอบเด่นชัดที่สุด เนื่องจากค่าการหดยกตัวของวัสดุทั้ง 2 ชนิดที่แตกต่างกันมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

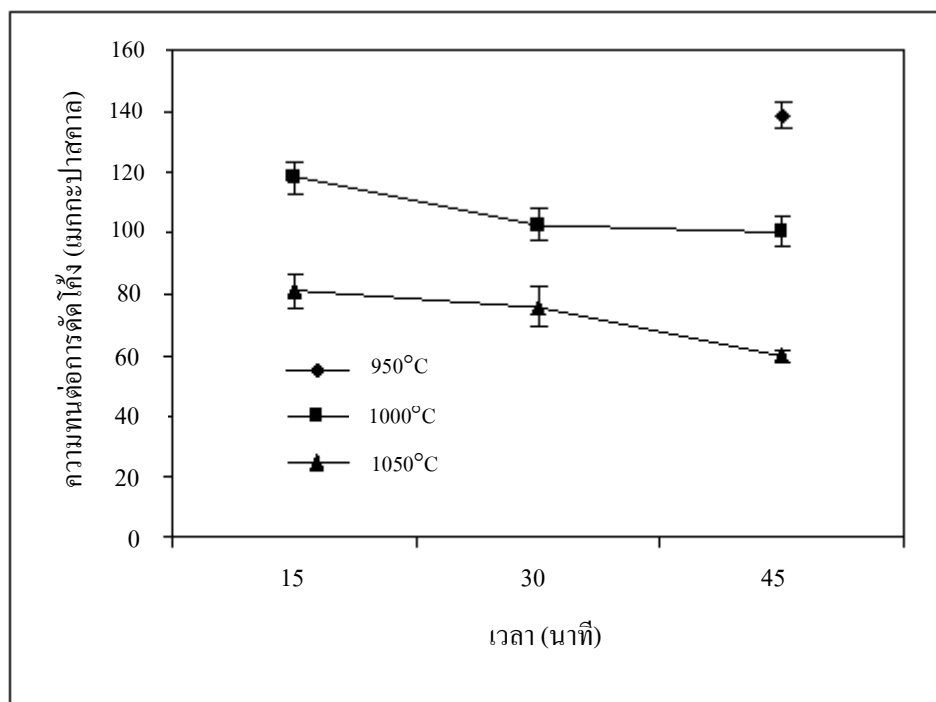
4.4 ผลของอุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกล ของ วัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน

4.4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่มีต่อความทนต่อการดัดโค้ง และ ความต้านทานแรงกระแทก

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความทนต่อการดัดโค้ง และ ความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-อะลูมิเนียมอัดซ้อนแบบ 3 ชั้น ที่อุณหภูมิและเวลาเผาประสานที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความทนต่อการดัดโค้ง (เมกกะปาสคาล)	ความต้านทานแรงกระแทก (กิโลจูล / เมตร ²)
950	45	139±4.18	259±2.70
1000	15	119±5.15	247±5.93
1000	30	103±5.51	231±4.76
1000	45	101±5.2	226±1.71
1050	15	82±5.65	184±6.46
1050	30	76±7.01	176±1.58
1050	45	59±2.03	172±7.35

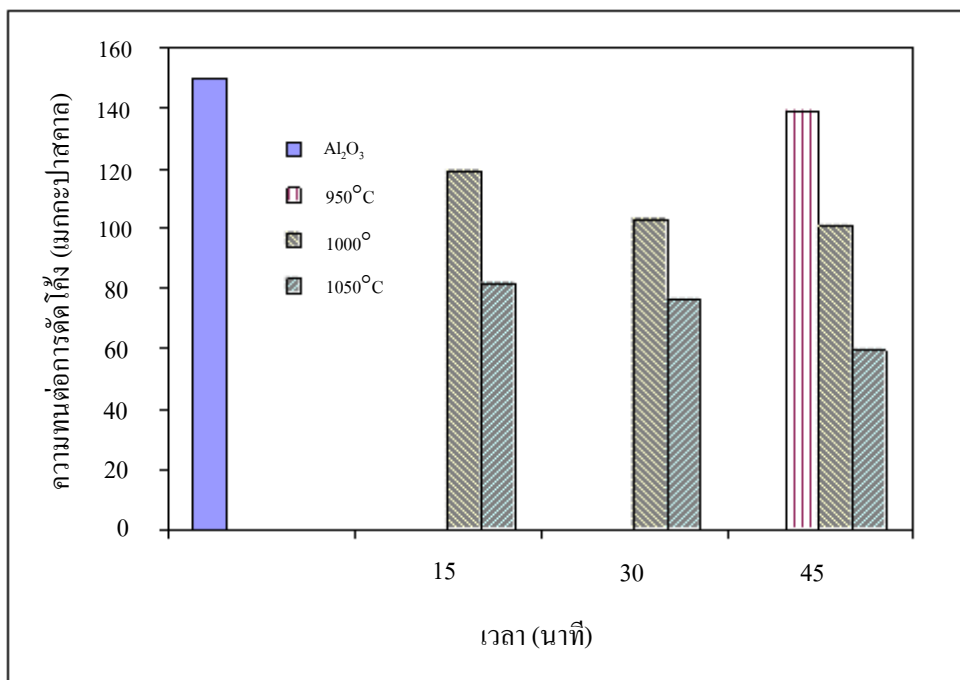
หมายเหตุ : ทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง



รูปที่ 4.26 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบ

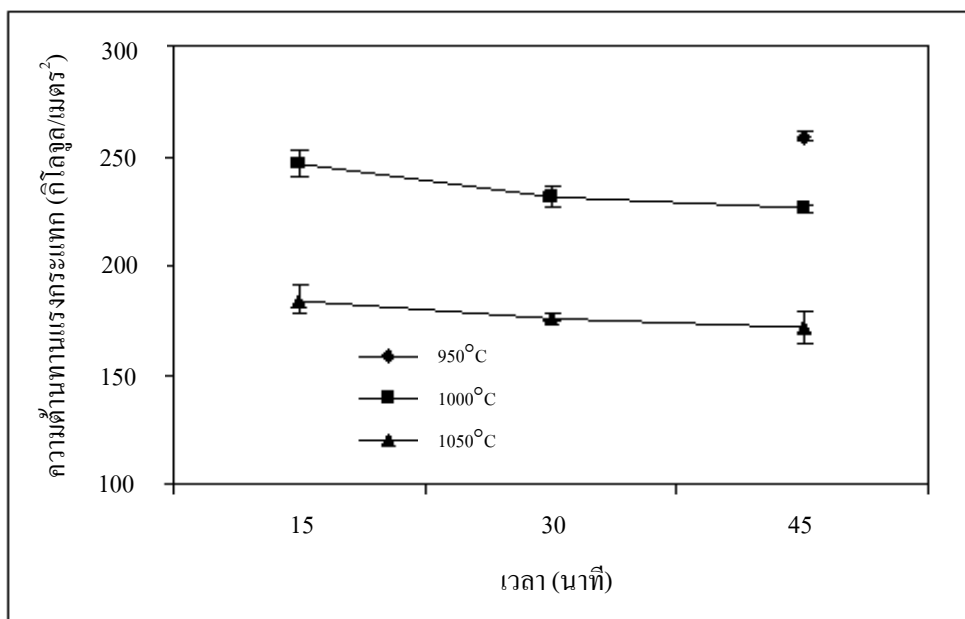
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.26 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งที่ได้จากการทดลองของวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ สูงขึ้นและเวลาเพิ่มมากขึ้น มีค่าความทนต่อการตัดโค้งลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิและเวลาสูงขึ้นจะทำให้อะลูมิเนียม เหลว ทำปฏิกิริยากับ ออกไซด์ฟิล์มที่ผิวอะลูมิเนียม (Ksiazek, Sobczak, Mikulowski, Radziwill, and Surowiak, 2002) และอะลูมิเนียมเหลวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศเกิดเป็นแก๊สที่ผิวหน้าร่วมและบริเวณชั้นของอะลูมิเนียม (Lou, Mitchell, and Heuer, 1985) ได้มากขึ้น และนอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิยังส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นวัสดุทั้ง 2 ชนิด จะมีค่าการหด-ขยายตัวที่ต่างกันมากทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าร่วมของวัสดุเชิงประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ก)-(ข) ซึ่งแก๊สและรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบลดลง อย่างไรก็ตามพบว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน เผาประสานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที มีค่าความทนต่อการตัดโค้งสูงสุดเท่ากับ 139 เมกกะปาสคาล

จากตารางที่ 4.3 หน้า 65 แสดงการศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของอะลูมินาที่ได้จากการทดลอง ทำให้ทราบค่าความทนต่อการตัดโค้งของอะลูมินามีค่าเท่ากับ 150 เมกกะปาสคาล เมื่อนำค่าความทนต่อการตัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน มาพลอตกราฟเปรียบเทียบกับอะลูมินาเซรามิกเพียงอย่างเดียว แสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบเทียบกับอะลูมินา

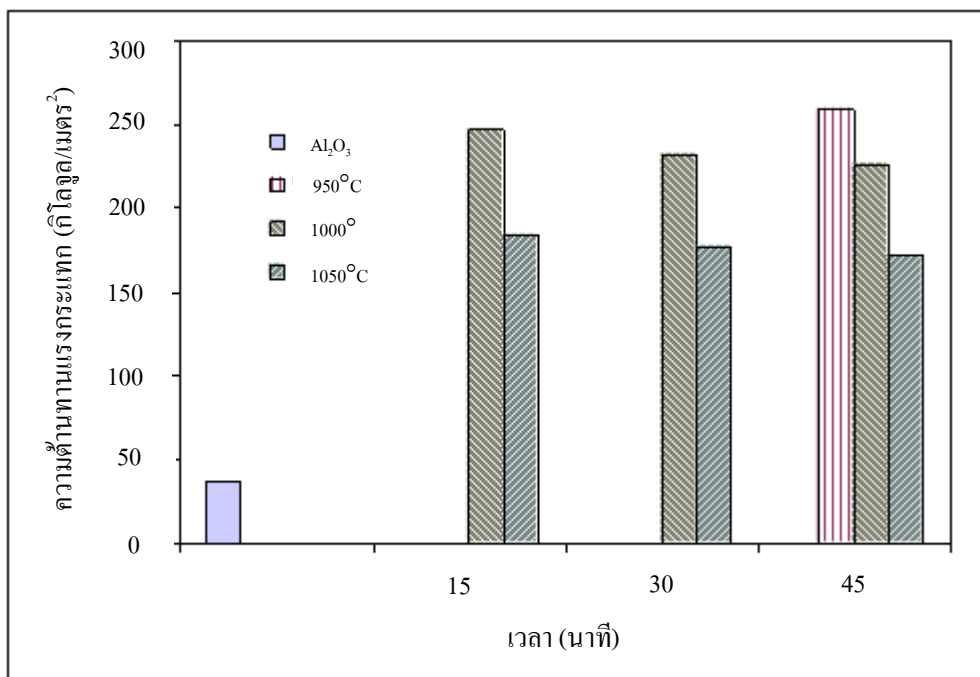
จากรูปที่ 4.27 เมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อนกับอะลูมินาเซรามิกเพียงอย่างเดียว พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ มีค่าความทนต่อการตัดโค้งต่ำกว่าอะลูมินา เนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียมอัดลดยึดมีความแข็งแรงต่ำกว่าอะลูมินา เมื่อนำมาเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน มีค่าความทนต่อการตัดโค้งต่ำกว่าอะลูมินาเพียงอย่างเดียวด้วย



รูปที่ 4.28 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.28 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ได้จากการทดลองของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลาเพิ่มมากขึ้น มีค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิและเวลาสูงขึ้นจะทำให้อะลูมิเนียมเหลวทำปฏิกิริยากับ ออกไซด์ฟิล์มที่ผิวอะลูมิเนียม (Ksiazek, Sobczak, Mikulowski, Radziwill, and Surowiak, 2002) และอะลูมิเนียมเหลวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศเกิดเป็นแก๊สที่ผิวหน้าร่วมและบริเวณชั้นของอะลูมิเนียม (Lou, Mitchell, and Heuer, 1985) ได้มากขึ้น และนอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิยังส่งผลกระทบต่อการยึดประสานของวัสดุเชิงประกอบ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นวัสดุทั้ง 2 ชนิด จะมีค่าการหด-ขยายตัวที่ต่างกันมากทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าร่วมของวัสดุเชิงประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ก)-(ข) ซึ่งแก๊สและรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ความเหนียว ของวัสดุเชิงประกอบลดลง อย่างไรก็ตามพบว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน เผาประสานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที มีค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดเท่ากับ 259 กิโลจูลต่อตารางเมตร

จากตารางที่ 4.3 หน้า 65 แสดงการศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติเชิงกลของอะลูมินาที่ได้จากการทดลอง ทำให้ทราบค่าความต้านทานแรงกระแทกของอะลูมินา มีค่าเท่ากับ 37 กิโลจูลต่อตารางเมตร เมื่อนำค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา- อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน มาพลอตกราฟเปรียบเทียบกับอะลูมินาเซรามิกเพียงอย่างเดียว แสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบเทียบกับอะลูมินา

จากรูปที่ 4.29 เมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อนกับอะลูมินาเซรามิกเพียงอย่างเดียว พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผา ประสานที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ มีค่าความต้านทานแรงกระแทก สูงกว่าอะลูมินา เนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่นำมาทำวัสดุเชิงประกอบมีความเหนียวสูงกว่าอะลูมินา เมื่อนำมาเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน มีค่าความต้านทานแรงกระแทก สูงกว่าอะลูมินาเซรามิกเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที มีค่าความต้านทานแรงกระแทก สูงกว่าอะลูมินาเพียงอย่างเดียวถึง 7 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาเบื้องต้น

จากการศึกษาการทดลองเบื้องต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผา ประสานที่อุณหภูมิ 750 และ 850 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ผลปรากฏว่าเกิดการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุทั้ง 2 ชนิด แต่แผ่นอะลูมิเนียมเกิดการหลอมเสียรูป และ ยังพบว่าเมื่อ ใช้อะลูมิเนียมหนา 1 มิลลิเมตร วัสดุเชิงประกอบไม่เกิดการยึดติดกัน

2. เมื่อนำวัสดุประสาน อาทิเช่น ตะกั่ว ฟรिट ผงอะลูมิเนียมผสมกับผงอะลูมินาและแผ่นไททานเนียมอัลลอยด์ มาวางคั่นอยู่ตรงกลางเพื่อช่วยในการเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน ที่ผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 350, 700 และ 750 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ตามลำดับ ผลปรากฏว่าวัสดุเชิงประกอบไม่เกิดการยึดติดกัน

5.1.2 การศึกษาในงานวิจัย

การศึกษาก่อขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้วิธีการเผาประสาน จากสถานะที่ใช้ในการทดลองทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียมแบบอัดซ้อน มีการยึดประสานที่สมบูรณ์และสมบัติเชิงกลที่ดีผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถเตรียมแผ่นอะลูมินาเซรามิก โดยวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก ได้ขนาด 100 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร × 6 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × สูง) และผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ได้ความหนาแน่น 3.11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2. สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม อัดซ้อนแบบ 3 ชั้น ได้โดยใช้อะลูมินาเซรามิกจำนวน 2 แผ่น แต่ละแผ่นมีความหนา 6 มิลลิเมตร และแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร วางคั่นตรงกลางระหว่างแผ่นอะลูมินา และผ่านการเผาประสานที่อุณหภูมิ 950, 1000 และ 1050 องศาเซลเซียส เวลา 15, 30 และ 45 นาที ตามลำดับ ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที มีค่าความต้านทานแรง กระแทกและค่าความทนต่อการดัดโค้งสูงสุดเท่ากับ 259 กิโลจูลต่อตารางเมตร และ 139 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งให้ผลดีที่สุด

3. สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมินา โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความต้านทานแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 37 กิโลจูลต่อตารางเมตร เป็น 259 กิโลจูลต่อตารางเมตร อย่างไรก็ตามพบว่าวัสดุเชิงประกอบมีค่าความทนต่อการคืบโค้งต่ำกว่าอะลูมินาเซรามิก (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 เมกะปาสคาล)

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและทดลองนี้สามารถปรับปรุงและพัฒนาขั้นต่อไปได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของความหนาของ แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ
2. การเพิ่มเวลาในการเผาประสาน เช่น วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเผาประสานที่ อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที จะมีค่าสมบัติเชิงกลสูงสุด ดังนั้นควรได้มีการศึกษาโดยการเพิ่มเวลาเผาประสานเป็น 60 นาที หรือมากกว่าเวลาที่ได้ศึกษาไว้
3. การเปลี่ยนเกรดของแผ่น อะลูมิเนียมอัลลอยด์ เนื่องจากอะลูมิเนียม เกรด 6063-0 เป็นอะลูมิเนียม เกรดทั่วไปที่มีสมบัติเชิงกลค่อนข้างต่ำกว่าอะลูมิเนียม เกรดอื่น ๆ ดังนั้นหากมีการเลือกใช้ อะลูมิเนียม เกรดอื่น ๆ มีความเป็นไปได้ว่าจะสามารถเพิ่มสมบัติ เชิงกลให้กับวัสดุเชิงประกอบได้
4. การศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นอะลูมินา จากเดิมทำการอัดขึ้นรูป ด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกเพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นให้นำตัวอย่างที่ได้ไปอัดขึ้นรูปแบบใช้ความดันเท่ากันทุกทิศทาง (Cold isostatic pressing, CIP) อีกครั้งหนึ่ง เพราะจะทำให้แผ่นอะลูมินามีความหนาแน่นมากกว่าเดิม ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นด้วย

รายการอ้างอิง

- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2539). **เซรามิกส์**. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช จิตติเกียรติพงศ์ . (ม.ป.ป.). **วัสดุในงานวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- ศุภสโรช หมั่นสิทธิ์. (1995). **วัสดุเชิงพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ: บริษัท พิมพ์ดี จำกัด.
- พิมพ์พัฒน์ สิมะวัฒนะ .(2542). **เคมีเชิงพอลิเมอร์** .(พิมพ์ครั้งที่ 1). อุบลราชธานี : สถาบันราชภัฏอุบลราชธานี
- มานพ ดันตระกูล. (2531). **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- สุธรรม ศรีหล่มสัก .(2542). **เอกสารประกอบการสอนวิชา 506208 Ceramic Fundamentals**. นครราชสีมา: สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุธรรม ศรีหล่มสัก .(2543). **คุณสมบัติเซรามิก . เอกสารประกอบการสอนวิชา 506201 Introduction to ceramics ประจำปีการศึกษาที่ 1/2543** . นครราชสีมา : สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จิตร์รัตน์ ชีระพรกุล. (2548). **การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม และ อะลูมินา-นิกเกิล โดยการเผาผนึกแบบไม่ใช้ความดัน** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อนรรจน์ ภูวานคำ. (2548). **การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-มุลไลต์-เซอร์โคเนีย สำหรับงานทางวิศวกรรม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Anderson, J.C., Leaver, K.D., Rawlings, R.D., and Alexander , J.M. (1994). **Materials science**. (4th ed.). London: Chapman & Hall.
- Charles, E., Anderson, JR., Suzanne, A., and Royal-Timmons. (1997). Ballistic performance of confined 99.5%-Al₂O₃ ceramic tiles. **International Journal of Impact Engineering**. pp703-713.

- Chawla, K.K. (1993). **Ceramic matrix composites**. London: Chapman & Hall.
- Eugene Medvedovski. (2005). **Ceramic armor and armor system II**. (Vols 178). Maryland: The American Ceramic Society.
- German, R.M. (1994). **Powder metallurgy science**. (2nd ed). Princeton, N.J.: Metal powder industries federation.
- Hioraki Yanaguda and Krörger, F.A. (1968). The system Al-O. **Journal of the American Ceramic Society**. 51(12): 700-706.
- Jing Shi and Dana Grow. (2007). Effect of double constraints on the optimization of two component armor systems. **Composite Structure**. (79): 445-453.
- Knovel. **Type of aluminum**. [On-line]. Available: http://www.knovel.com/web/portal/basic_search
- Ksiazek, M., Sobczak, N., Mikulowski, B., Radziwill, W., and Surowiak, I. (2002). Wetting and bonding strength in Al/Al₂O₃ system. **Materials Science and Engineering A**. (324): 162-167.
- Levi, G. and Kaplan, W. D. (2003). Aluminium - alumina interface morphology and thermodynamics from dewetting experiments. **Acta Materialia**. (51): 2793-2802.
- Lou, V.L.K., Mitchell, T.E., and Heuer, A.H. (1985). Review - graphical displays of the thermodynamics of high-temperature gas-solid reactions and their application to oxidation of metals and evaporation of oxides. **Journal of the American Ceramic Society**. 68(2): 49-58.
- Madhu, Ramanjaneyulu, K., Balakrishna Bhat, T., and Gupta, N.K. (2005). An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. **International Journal of Impact Engineering**. (32): 337-350.
- Marek Boniecki, Dariusz Kalinski, Zdzislaw Librant, and Wladyslaw Wesolowski. (2006). Superplastic joining of alumina and zirconia ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**.
- Mustafa Übeyli, Orhan Yildirim, R., and Bilgehan Ögel. (2007). Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂O₃ laminated composites. **Journal of Materials Processing Technology**.
- Nicholas P. Cheremisinoff. (1990). **Handbook of Ceramics and Composites** (Vols 1). New York: Marcel Dekker.

- Puente, J., Arias, A., Zaera, R., and Navarro, C. (2005). The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. **International Journal of Impact Engineering**. (32): 321-336.
- Ring, T.A. (1996). **Fundamentals of ceramic powder processing and synthesis**. California: Academic press.
- Roeder, B.A. and Sun, C.T. (2001). Dynamic penetration of alumina/aluminum laminates: experiments and modeling. **International Journal of Impact Engineering**. (25): 169-185.
- Saiz, E., Tomsia, A.P., and Sukanuma, K. (2003). Wetting and strength issues at Al / α -alumina Interfaces. **Journal of the European Ceramic Society**. (23): 2787-2797.
- Samuel J. Schneider. Ceramics and glasses. **Engineered materials handbook** (Vols 4). USA: ASM International.
- Terpstra, R.A., Pex, P.P.A.C., and De vries, A.H. (1995). **Ceramic processing**. New Delhi: Chapman & Hall.
- Upadhyaya, G.S. (1998). **Sintered metallic and ceramics materials**. Kanpur: John Wiley & Sons.
- Worrall, W.E. (1986). **Clays and ceramic raw materials**. (2nd ed). London: Elsevier applied science.
- Wriedt, H.A. (1985). The Al-O (Aluminum-Oxygen) system. **Bull. Alloy Phase Diagrams**. 6(6): 548-553.
- Zaera, R., Sánchez-Sáez, S., Pérez-Castellanos, J.L., and Navarro, C. (2000). Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. **Composites: Part A**. (31): 823-833.

ภาคผนวก ก

แสดงผลของการเผาประสานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม
แบบอัดก้อน หลังการทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ ก.1 แสดงแท่งอะลูมินาหลังการทดสอบ ความทนต่อการดัดโค้ง



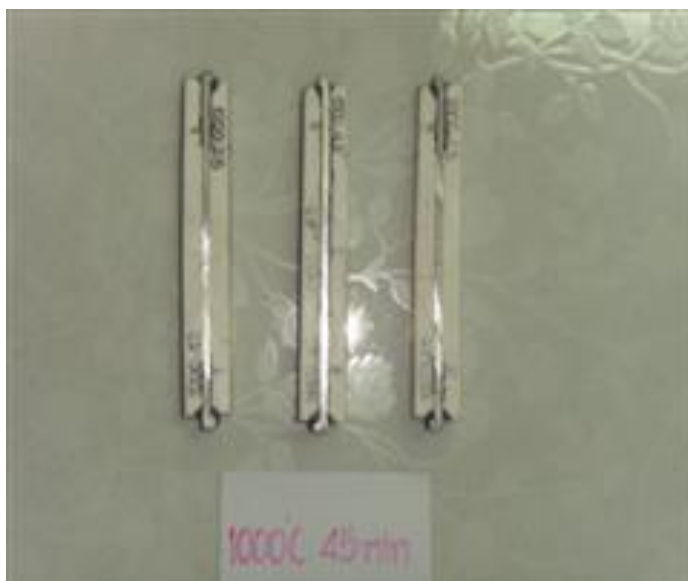
รูปที่ ก.2 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 950 °C เวลา 45 นาที หลังการทดสอบ ความทนต่อการดัดโค้ง



รูปที่ ก.3 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 15 นาที หลังการทดสอบความทนต่อการตัดโค้ง



รูปที่ ก.4 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 30 นาที หลังการทดสอบความทนต่อการตัดโค้ง



รูปที่ ก.5 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 45 นาที หลังการทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง



รูปที่ ก.6 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 15 นาที หลังการทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง



รูปที่ ก.7 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมินีเยม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมินีเยมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 30 นาที หลังการทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง



รูปที่ ก.8 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา-อะลูมินีเยม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมินีเยมอัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 45 นาที หลังการทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง



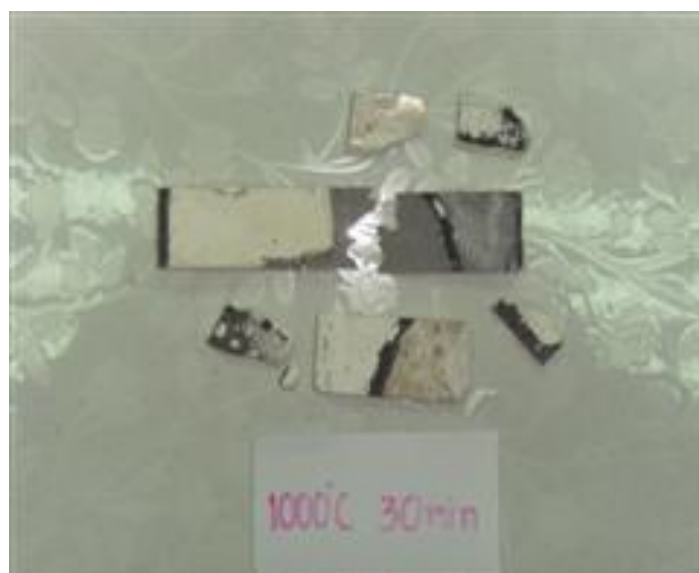
รูปที่ ก.9 แสดงแท่งอะลูมินาหลังการทดสอบ ความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ ก.10 แสดงวัสดุ เชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์เกรด 6063- 0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 950 °C เวลา 45 นาที หลังการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



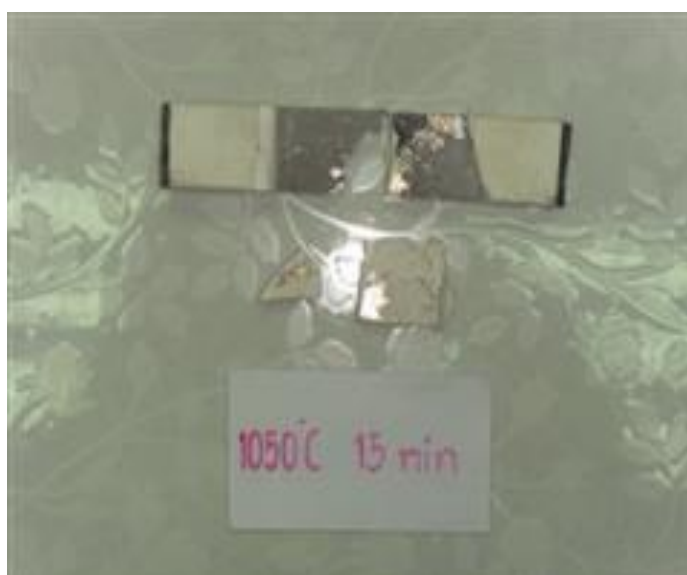
รูปที่ ก.11 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์เกรด 6063- 0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 15 นาที หลังการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ ก.12 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์เกรด 6063- 0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 30 นาที หลังการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ ก.13 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์เกรด 6063- 0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 45 นาที หลังการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ ก.14 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์เกรด 6063- 0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 15 นาที หลังการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ ก.15 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์เกรด 6063-0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 30 นาที หลังการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ ก.16 แสดงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดซ้อน โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียม อัลลอยด์เกรด 6063- 0 หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 1050 °C เวลา 45 นาที หลังการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

ภาคผนวก ข

มาตรฐานการทดสอบ ASTM และ ISO



Designation: C 373 - 88 (Reapproved 1994)

Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products¹

This standard is issued under the fixed designation C 373; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers procedures for determining water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired unglazed whiteware products.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Significance and Use

2.1 Measurement of density, porosity, and specific gravity is a tool for determining the degree of maturation of a ceramic body, or for determining structural properties that may be required for a given application.

3. Apparatus and Materials

3.1 *Balance*, of adequate capacity, suitable to weigh accurately to 0.01 g.

3.2 *Oven*, capable of maintaining a temperature of $150 \pm 5^\circ\text{C}$ ($302 \pm 9^\circ\text{F}$).

3.3 *Wire Loop, Halter, or Basket*, capable of supporting specimens under water for making suspended mass measurements.

3.4 *Container*—A glass beaker or similar container of such size and shape that the sample, when suspended from the balance by the wire loop, specified in 3.3, is completely immersed in water with the sample and the wire loop being completely free of contact with any part of the container.

3.5 *Pan*, in which the specimens may be boiled.

3.6 *Distilled Water*.

4. Test Specimens

4.1 At least five representative test specimens shall be selected. The specimens shall be unglazed and shall have as much of the surface freshly fractured as is practical. Sharp edges or corners shall be removed. The specimens shall contain no cracks. The individual test specimens shall weigh at least 50 g.

5. Procedure

5.1 Dry the test specimens to constant mass (Note) by

heating in an oven at 150°C (302°F), followed by cooling in a desiccator. Determine the dry mass, D , to the nearest 0.01 g.

NOTE—The drying of the specimens to constant mass and the determination of their masses may be done either before or after the specimens have been impregnated with water. Usually the dry mass is determined before impregnation. However, if the specimens are friable or evidence indicates that particles have broken loose during the impregnation, the specimens shall be dried and weighed after the suspended mass and the saturated mass have been determined, in accordance with 5.3 and 5.4. In this case, the second dry mass shall be used in all appropriate calculations.

5.2 Place the specimens in a pan of distilled water and boil for 5 h, taking care that the specimens are covered with water at all times. Use setter pins or some similar device to separate the specimens from the bottom and sides of the pan and from each other. After the 5-h boil, allow the specimens to soak for an additional 24 h.

5.3 After impregnation of the test specimens, determine to the nearest 0.01 g the mass, S , of each specimen while suspended in water. Perform the weighing by placing the specimen in a wire loop, halter, or basket that is suspended from one arm of the balance. Before actually weighing, counterbalance the scale with the loop, halter, or basket in place and immerse in water to the same depth as is used when the specimens are in place. If it is desired to determine only the percentage of water absorption, omit the suspended mass operation.

5.4 After the determination of the suspended mass or after impregnation, if the suspended mass is not determined, blot each specimen lightly with a moistened, lint-free linen or cotton cloth to remove all excess water from the surface, and determine the saturated mass, M , to the nearest 0.01 g. Perform the blotting operation by rolling the specimen lightly on the wet cloth, which shall previously have been saturated with water and then pressed only enough to remove such water as will drip from the cloth. Excessive blotting will introduce error by withdrawing water from the pores of the specimen. Make the weighing immediately after blotting, the whole operation being completed as quickly as possible to minimize errors due to evaporation of water from the specimen.

6. Calculation


6.1 In the following calculations, the assumption is made that 1 cm^3 of water weighs 1 g. This is true within about 3 parts in 1000 for water at room temperature.

6.1.1 Calculate the exterior volume, V , in cubic centimetres, as follows:

$$V = M - S$$

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-21 on Ceramic Whitewares and Related Products and is the direct responsibility of Subcommittee C21.03 on Fundamental Properties.

Current edition approved Sept. 30, 1988. Published November 1988. Originally published as C 373 - 55 T. Last previous edition C 373 - 72 (1982).

 C 373

6.1.2 Calculate the volumes of open pores V_{OP} and impervious portions V_{IP} in cubic centimetres as follows:

$$V_{OP} = M - D$$

$$V_{IP} = D - S$$

6.1.3 The apparent porosity, P , expresses, as a percent, the relationship of the volume of the open pores of the specimen to its exterior volume. Calculate the apparent porosity as follows:

$$P = [(M - D)/V] \times 100$$

6.1.4 The water absorption, A , expresses as a percent, the relationship of the mass of water absorbed to the mass of the dry specimen. Calculate the water absorption as follows:

$$A = [(M - D)/D] \times 100$$

6.1.5 Calculate the apparent specific gravity, T , of that portion of the test specimen that is impervious to water, as follows:

$$T = D/(D - S)$$

6.1.6 The bulk density, B , in grams per cubic centimetre, of a specimen is the quotient of its dry mass divided by the exterior volume, including pores. Calculate the bulk density as follows:

$$B = D/V$$

7. Report

7.1 For each property, report the average of the values obtained with at least five specimens, and also the individual values. Where there are pronounced differences among the individual values, test another lot of five specimens and, in addition to individual values, report the average of all ten determinations.

8. Precision and Bias

8.1 This test method is accurate to ± 0.2 % water absorption in interlaboratory testing when the average value recorded by all laboratories is assumed to be the true water absorption. The precision is approximately ± 0.1 % water absorption on measurements made by a single experienced operator.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



Designation: C 1161 - 94 (Reapproved 1996)

Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature¹

This standard is issued under the fixed designation C 1161; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of flexural strength of advanced ceramic materials at ambient temperature. Four-point- $1/4$ point and three-point loadings with prescribed spans are the standard. Rectangular specimens of prescribed cross-section sizes are used with specified features in prescribed specimen-fixture combinations.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines²
E 337 Test Method for Measured Humidity with a Psychrometer (The Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures)³

2.2 Military Standard:

MIL-STD-1942 (MR) Flexural Strength of High Performance Ceramics at Ambient Temperature⁴

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *flexural strength*—a measure of the ultimate strength of a specified beam in bending.

3.1.2 *four-point- $1/4$ point flexure*—configuration of flexural strength testing where a specimen is symmetrically loaded at two locations that are situated one quarter of the overall span, away from the outer two support bearings (see Fig. 1).

3.1.3 *three-point flexure*—configuration of flexural strength testing where a specimen is loaded at a location midway between two support bearings (see Fig. 1).

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-28 on Advanced Ceramics and is the direct responsibility of Subcommittee C28.01 on Properties and Performance.

Current edition approved July 25, 1994. Published February 1995. Originally published as C 1161 - 90. Last previous edition C 1161 - 90.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.03.

⁴ Available from Standardization Documents, Order Desk, Bldg. 4, Section D, 700 Robbins Ave., Philadelphia, PA 19111-5094.

4. Significance and Use

4.1 This test method may be used for material development, quality control, characterization, and design data generation purposes.

4.2 The flexure stress is computed based on simple beam theory with assumptions that the material is isotropic and homogeneous, the moduli of elasticity in tension and compression are identical, and the material is linearly elastic. The average grain size should be no greater than one fiftieth of the beam thickness. The homogeneity and isotropy assumption in the standard rule out the use of this test for continuous fiber-reinforced ceramics.

4.3 Flexural strength of a group of test specimens is influenced by several parameters associated with the test procedure. Such factors include the loading rate, test environment, specimen size, specimen preparation, and test fixtures. Specimen sizes and fixtures were chosen to provide a balance between practical configurations and resulting errors, as discussed in MIL-STD 1942 (MR) and Refs (1) and (2).⁵ Specific fixture and specimen configurations were designated in order to permit ready comparison of data without the need for Weibull-size scaling.

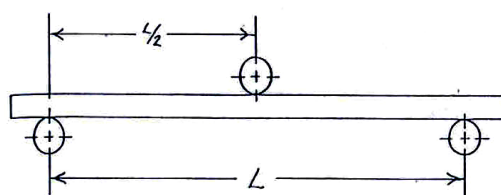
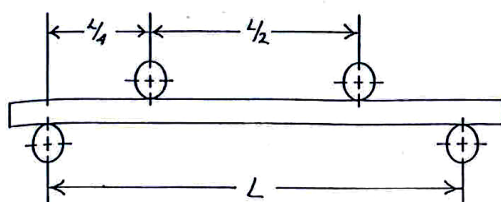
4.4 The flexural strength of a ceramic material is dependent on both its inherent resistance to fracture and the presence of defects. Analysis of a fracture surface, fractography, though beyond the scope of this test method, is highly recommended for all purposes, especially for design data as discussed in MIL-STD-1942 (MR) and Refs (2-5).

5. Interferences

5.1 The effects of time-dependent phenomena, such as stress corrosion or slow crack growth on strength tests conducted at ambient temperature, can be meaningful even for the relatively short times involved during testing. Such influences must be considered if flexure tests are to be used to generate design data.

5.2 Surface preparation of test specimens can introduce machining flaws which may have a pronounced effect on flexural strength. Machining damage imposed during specimen preparation can be either a random interfering factor, or an inherent part of the strength characteristic to be measured. Surface preparation can also lead to residual stresses. Universal or standardized test methods of surface preparation do not exist. It should be understood that final machining steps may or may not negate machining damage

⁵ The boldface numbers in parentheses refer to the references at the end of this test method.

 C 1161


NOTE—Configuration:
 A: $L = 20$ mm
 B: $L = 40$ mm
 C: $L = 80$ mm

FIG. 1 The Four-Point- $\frac{1}{4}$ Point and Three-Point Fixture Configuration

introduced during the early course or intermediate machining.

6. Apparatus

6.1 *Loading*—Specimens may be loaded in any suitable testing machine provided that uniform rates of direct loading can be maintained. The load-measuring system shall be free of initial lag at the loading rates used and shall be equipped with a means for retaining read-out of the maximum load applied to the specimen. The accuracy of the testing machine shall be in accordance with Practices E 4 but within 0.5 %.

6.2 *Four-Point Flexure*—Four-point- $\frac{1}{4}$ point fixtures (Fig. 1) shall have support and loading spans as shown in Table 1.

6.3 *Three-Point Flexure*—Three-point fixtures (Fig. 1) shall have a support span as shown in Table 1.

6.4 *Bearings*—Three- and four-point flexure:

6.4.1 Cylindrical bearing edges shall be used for the support of the test specimen and for the application of load. The cylinders shall be made of hardened steel which has a hardness no less than HRC 40 or which has a yield strength no less than 1240 MPa (~ 180 ksi). Alternatively, the cylinders may be made of a ceramic with an elastic modulus between 2.0 and 4.0×10^5 MPa (30 – 60×10^6 psi) and a flexural strength no less than 275 MPa (~ 40 ksi). The portions of the test fixture that support the bearings may need to be hardened to prevent permanent deformation. The cylindrical bearing length shall be at least three times the specimen width. The above requirements are intended to ensure that ceramics with strengths up to 1400 MPa (~ 200 ksi) and elastic moduli as high as 4.8×10^5 MPa (70×10^6 psi) can be tested without fixture damage. Higher strength

TABLE 1 Fixture Spans

Configuration	Support Span (L), mm	Loading Span, mm
A	20	10
B	40	20
C	80	40

TABLE 2 Nominal Bearing Diameters

Configuration	Diameter, mm
A	2.0 to 2.5
B	4.5
C	9.0

TABLE 3 Specimen Size

Configuration	Width (b), mm	Depth (d), mm	Length (L_1), min, mm
A	2.0	1.5	25
B	4.0	3.0	45
C	8.0	6.0	90

and stiffer ceramic specimens may require harder bearings.

6.4.2 The bearing cylinder diameter shall be approximately 1.5 times the beam depth of the test specimen size employed. See Table 2.

6.4.3 The bearing cylinders shall be carefully positioned such that the spans are accurate within ± 0.10 mm. The load application bearing for the three-point configurations shall be positioned midway between the support bearing within ± 0.10 mm. The load application (inner) bearings for the four-point configurations shall be centered with respect to the support (outer) bearings within ± 0.10 mm.

6.4.4 The bearing cylinders shall be free to rotate in order to relieve frictional constraints (with the exception of the middle-load bearing in three-point flexure which need not rotate). This can be accomplished by mounting the cylinders in needle bearing assemblies, or more simply by mounting the cylinders as shown in Figs. 2 and 3. Note that the outer-support bearings roll *outward* and the inner-loading bearings roll *inward*.

6.5 *Semiarticulating-Four-Point Fixture*—Specimens prepared in accordance with the parallelism requirements of 7.1 may be tested in a semiarticulating fixture as illustrated in Fig. 2. The bearing cylinders themselves must be parallel to each other to within 0.015 mm (over their length).

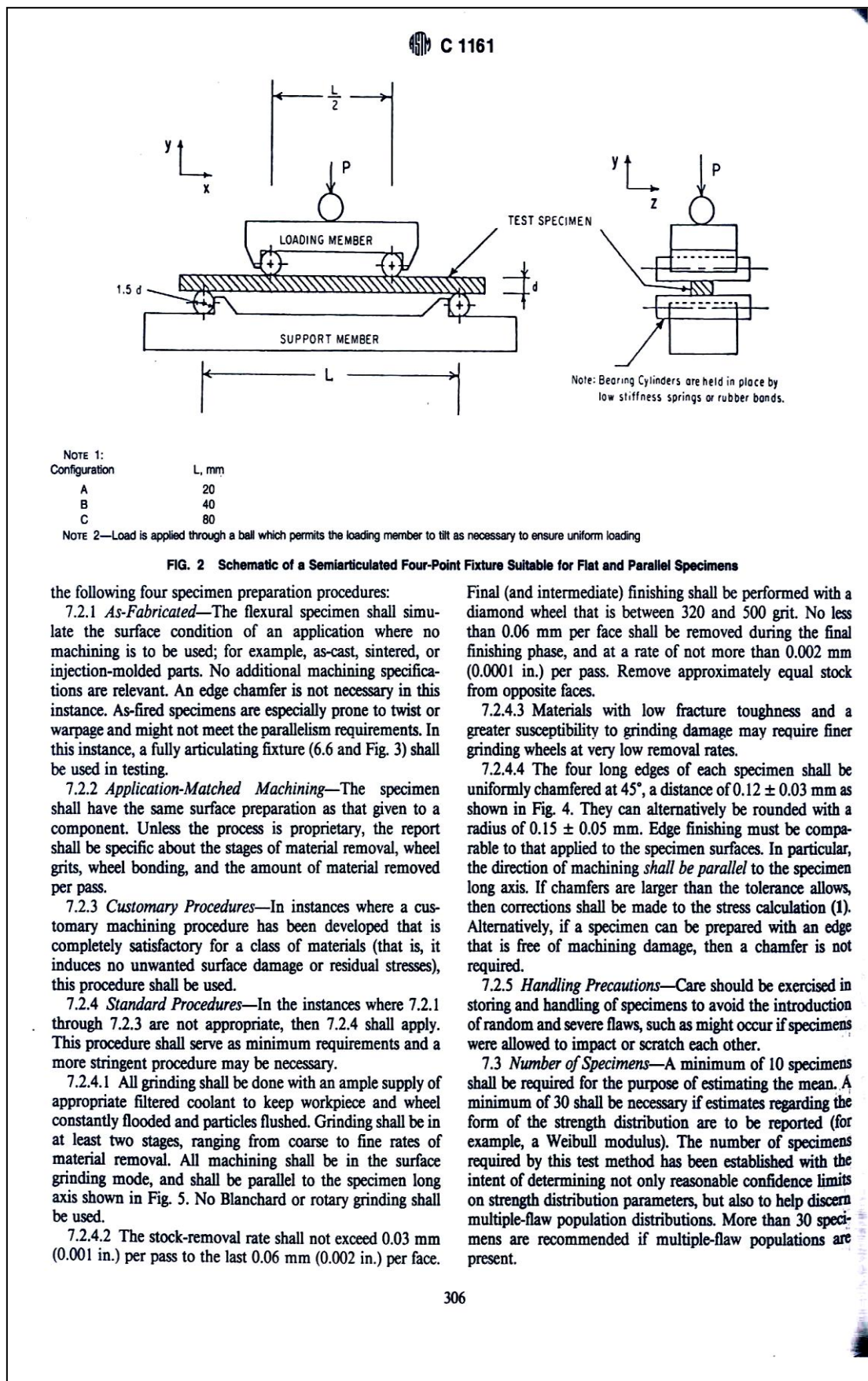
6.6 *Fully Articulating-Four-Point Fixture*—Specimens that are as-fired, heat treated, or oxidized often have slight twists or unevenness. Specimens which do not meet the parallelism requirements of 7.1 shall be tested in a fully articulating fixture as illustrated in Fig. 3.

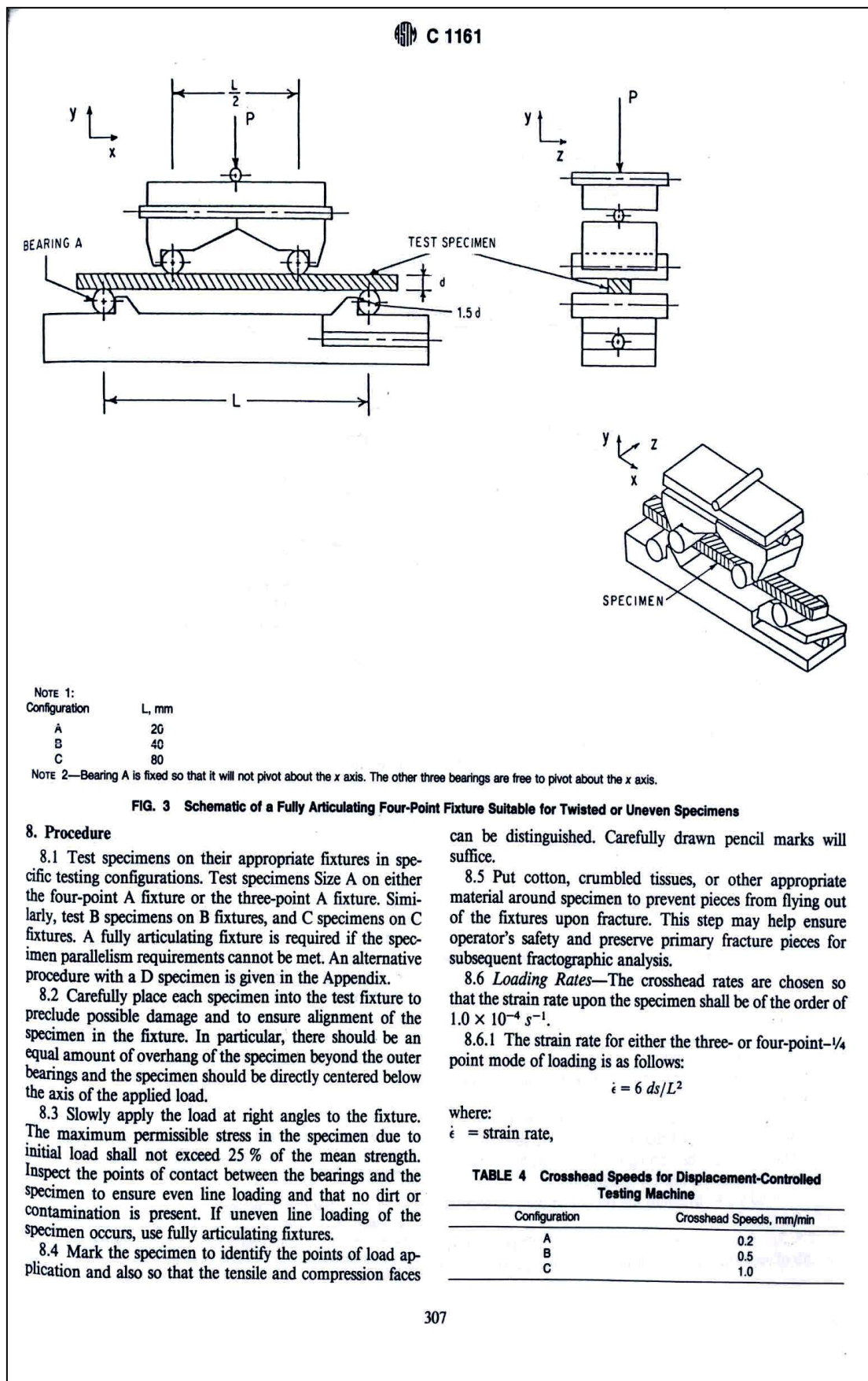
6.7 The fixture shall be stiffer than the specimen, so that most of the crosshead travel is imposed onto the specimen.

7. Specimen

7.1 *Specimen Size*—Dimensions are given in Table 3 and shown in Fig. 4. Cross-sectional dimensional tolerances are ± 0.13 mm for B and C specimens, and ± 0.05 mm for A. The parallelism tolerances on the four longitudinal faces are 0.015 mm for A and B and 0.03 mm for C. The two end faces need not be precision machined.

7.2 *Specimen Preparation*—Depending upon the intended application of the flexural strength data, use one of





C 1161

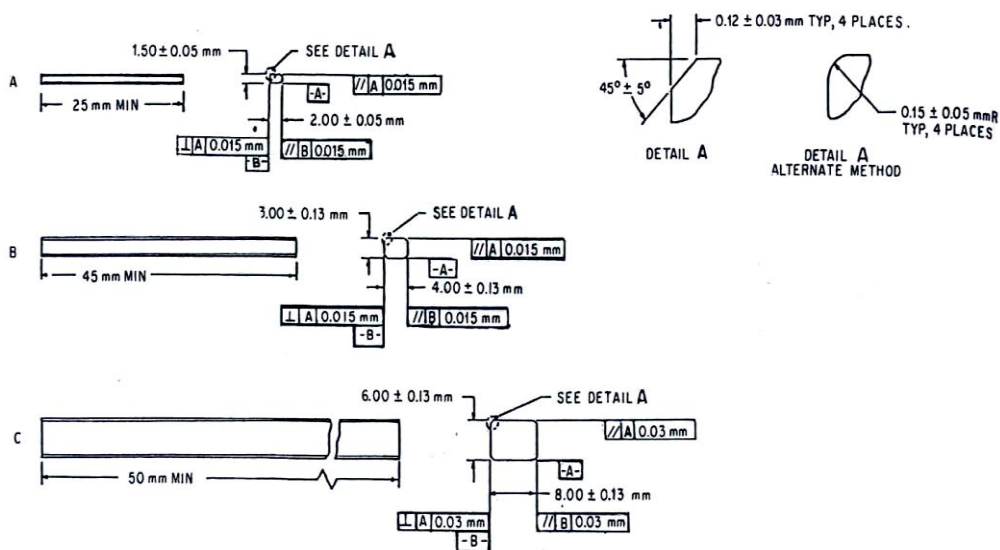


FIG. 4 The Standard Test Specimens

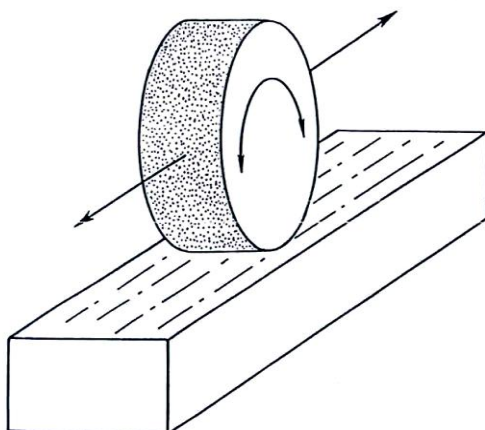


FIG. 5 Surface Grinding Parallel to the Specimen Longitudinal Axis

d = specimen thickness,
 s = crosshead speed, and
 L = outer (support) span.

8.6.2 Crosshead speeds for the different testing configurations are given in Table 4.

8.6.3 Times to failure for typical ceramics will range from 3 to 30 s. It is assumed that the fixtures are relatively rigid and that most of the testing-machine crosshead travel is imposed as strain on the test specimen.

8.7 *Breakload*—Measure the breakload with an accuracy of $\pm 0.5\%$.

8.8 *Specimen Dimension*—Determine the thickness and width of each specimen to within 0.0025 mm (0.0001 in.). In

order to avoid damage in the critical area, it is recommended that measurement be made after the specimen has broken at a point near the fracture origin. It is highly recommended to retain and preserve all primary fracture fragments for fractographic analysis.

8.9 Determine the relative humidity in accordance with Test Method E 337.

8.10 The occasional use of a strain-gaged specimen is recommended to verify that there is negligible error in stress, in accordance with 11.2.

9. Calculation

9.1 The standard formula for the strength of a beam in four-point- $1/4$ point flexure is as follows:

$$S = \frac{3 PL}{4 bd^2} \quad (1)$$

where:

P = breakload,
 L = outer (support) span,
 b = specimen width, and
 d = specimen thickness.

9.2 The standard formula for the strength of a beam in three-point flexure is as follows:

$$S = \frac{3 PL}{2 bd^2} \quad (2)$$

9.3 Equations 1 and 2 shall be used for the reporting of results and are the common equations used for the flexure strength of a specimen.

NOTE 1—It should be recognized however, that Eqs 1 and 2 do not necessarily give the stress that was acting directly upon the flaw that caused failure. (In some instances, for example, for fracture mirror or fracture toughness calculations, the fracture stress must be corrected for subsurface origins and breaks outside the gage length.)

C 1161

NOTE 2—The conversion between pounds per square inch (psi) and megapascals (MPa) is included for convenience (145.04 psi = 1 MPa; therefore, 100 000 psi = 100 ksi = 689.5 MPa.)

10. Report

10.1 Test reports shall include the following:

10.1.1 Test configuration and specimen size used.

10.1.2 The number of specimens (n) used.

10.1.3 All relevant material data including vintage data or billet identification data. (Did all specimens come from one billet?) As a minimum, the date the material was manufactured shall be reported.

10.1.4 Exact method of specimen preparation, including all stages of machining.

10.1.5 Heat treatments or exposures, if any.

10.1.6 Test environment including humidity (Test Method E 337) and temperature.

10.1.7 Strain rate or crosshead rate.

10.1.8 Report the strength of every specimen in megapascals (pounds per square inch) to three significant figures.

10.1.9 Mean (\bar{S}) and standard deviation (SD) where:

$$\bar{S} = \frac{\sum_1^n S}{n} \quad (3)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_1^n (S - \bar{S})^2}{(n - 1)}} \quad (4)$$

10.1.10 Report of any deviations and alterations from the procedures described in this test method.

11. Precision and Bias

11.1 The flexure strength of a ceramic is not a deterministic quantity, but will vary from one specimen to another. There will be an inherent statistical scatter in the results for finite sample sizes (for example, 30 specimens). Weibull statistics can model this variability as discussed in Refs (1) and (6–10). This test method has been devised so that the precision is very high and the bias very low compared to the inherent variability of strength of the material.

11.2 Experimental Errors:

11.2.1 The experimental errors in the flexure test have been thoroughly analyzed and documented in Ref (1). The specifications and tolerances in this test method have been chosen such that the individual errors are typically less than 0.5 % each and the total error is probably less than 3 % for

four-point configurations B and C. (A conservative upper limit is of the order of 5 %.) This is the maximum possible error in stress for an individual specimen.

11.2.2 The error due to cross-section reduction associated with chamfering the edges can be of the order of 1 % for configuration B and less for configuration C in either three or four-point loadings, as discussed in Ref (1). The chamfer sizes in this test method have been reduced relative to those allowed in MIL-STD-1942 (MR). Chamfers larger than specified in this test method shall require a correction to stress calculations as discussed in Ref (1).

11.2.3 Configuration A is somewhat more prone to error which is probably greater than 5 % in four-point loading. Chamfer error due to reduction of cross-section areas is 4.1 %. For this reason, this configuration is not recommended for design purposes, but only for characterization and materials development.

11.3 An intralaboratory comparison of strength values of a high purity (99.9 %) sintered alumina was held (7). Three different individuals with three different universal testing machines on three different days compared the strength of lots of 30 specimens from a common batch of material. Three different fixtures, but of a common design, were used. The mean strengths varied by a maximum of 2.4 % and the Weibull moduli by a maximum of 27 % (average of 11.4). Both variations are well within the inherent scatter predicted for sample sizes of 30 as shown in Refs (1), (7), and (9).

11.4 An interlaboratory comparison of strength of the same alumina as cited in 11.3 was made between two laboratories. A 1.3 % difference in the mean and an 18 % difference in Weibull modulus was observed, both of which are well within the inherent variability of the material.

11.5 An interlaboratory comparison of strength of a different alumina and of a silicon nitride was made between seven international laboratories. Reference (7) is a comprehensive report on this study which tested over 2000 specimens. Experimental results for strength variability on B specimens, in both three- and four-point testing, were generally consistent with analytical predictions of Ref (9). For a material with a Weibull modulus of 10, estimates of the mean (or characteristic strength) for samples of 30 specimens will have a coefficient of variance of 2.2 %. The coefficient of variance for estimates of the Weibull modulus is 18 %.

12. Keywords

12.1 advanced ceramics; flexural strength; four-point flexure; three-point flexure

C 1161

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. ALTERNATIVE PROCEDURE

X1.1 An alternative procedure is given in the following paragraphs. This alternate procedure may be used when the procedures in the main text are not suitable.

X1.2 *Fixture Spans*—A support span of 38.10 mm (1.5 in.) shall be used for three- or four-point loading, and a loading span of 19.05 mm (0.75 in.) shall be used for the four-point loading.

X1.3 *Bearing Diameter*—A bearing diameter of 4.5 to 5.0 mm diameter shall be used.

X1.4 *Specimen Size*—The specimen size D shall be as given in Fig. X1.1. The width is 6.35 mm (0.25 in.); the

thickness, 3.18 mm (0.125 in.) and the length greater than 45 mm (1.8 in.).

X1.5 *Crosshead Speed*—Crosshead speed shall be 0.5 mm/min (0.02 in./min).

X1.6 All other testing procedures and tolerances are as specified in the main text for the B configuration.

X1.7 *Precision and Bias*—Data on precision and bias obtained during an interlaboratory round robin study of the flexure strength of a sintered silicon nitride will be published soon. This study was conducted as a subtask of a larger International Energy Agency (IEA) round robin effect (11).

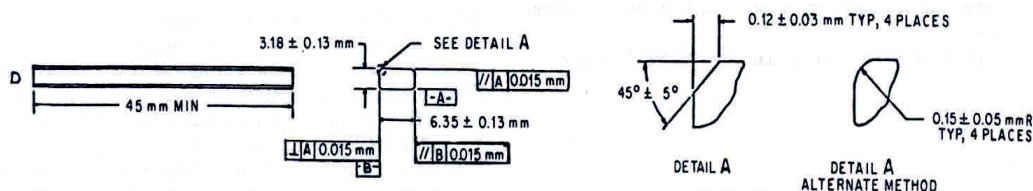


FIG. X1.1 The Alternative 'D' Test Specimen

REFERENCES

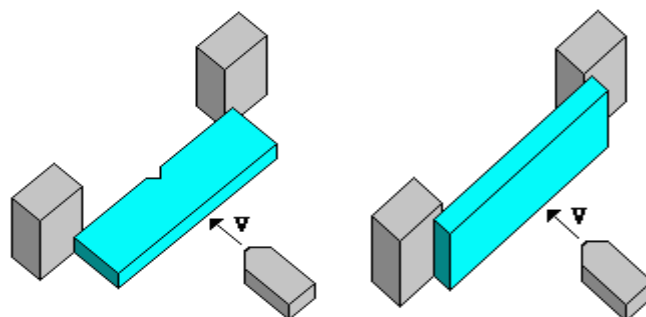
- (1) Baratta, F. I., Quinn, G. D., and Matthews, W. T., "Errors Associated With Flexure Testing of Brittle Materials," U.S. Army MTL TR 87-35, July 1987.
- (2) Quinn, G. D., Baratta, F. I., and Conway, J. A., "Commentary on U.S. Army Standard Test Method for Flexural Strength of High Performance Ceramics at Ambient Temperature," U.S. Army AMMRC 85-21, August 1985.
- (3) Hoagland, R., Marshall, C., and Duckworth, W., "Reduction of Errors in Ceramic Bend Tests," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol 59, No. 5-6, May-June, 1976, pp. 189-192.
- (4) Quinn, G. D., and Baratta, F. I., "Flexure Data, Can It Be Used For Ceramics Part Design?" *Advanced Materials and Processes*, December 1985, pp. 31-35.
- (5) Quinn, G. D., "Properties Testing and Materials Evaluation," *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Vol 5, May-June 1984, pp. 298-311.
- (6) Quinn, G. D., "Fractographic Analysis and the Army Flexure Test Method," *Fractography of Glass and Ceramics*, Vol 22 of *Advances in Ceramics*, American Ceramic Society, 1988, pp. 314-334.
- (7) Quinn, G. D., "Flexure Strength of Advanced Ceramics—A Round Robin Exercise," U.S. Army MTL TR 89-62, July 1989.
- (8) Davies, D. G. S., "The Statistical Approach to Engineering Design in Ceramics," *Proceedings of the British Ceramic Society*, Vol 22, 1979, pp. 429-452.
- (9) Ritter, J. Jr., Bandyopadhyay, N., and Jakus, K., "Statistical Reproducibility of the Dynamic and Static Fatigue Experiments," *Ceramic Bulletin*, Vol 60, No. 8, 1981, pp. 798-806.
- (10) Weibull, W., "Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *Journal of Applied Mechanics*, Vol 18, 1951, p. 293.
- (11) Tennery, V., "International Energy Agency Annex II," *Ceramic Technology Newsletter*, Number 23, April-June 1989.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

Charpy Impact Strength - ISO 179

Energy per unit area required to break a test specimen under flexural impact. Test specimen is held as a simply supported beam and is impacted by a swinging pendulum. The energy lost by the pendulum is equated with the energy absorbed by the test specimen.



Edgewise Impact

Flatwise Impact

Testing is performed on either notched or unnotched specimens. The impact blow is in either the edgewise or the flatwise direction for most materials. For long fiber reinforced specimens the impact is either normal or parallel to the orientation of the fibers. Type 2 and 3 specimens are used for long fiber reinforced materials.

Charpy Specimen Types

Type	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Span (mm)
1	80	10	4	62
2	25×Thickness	10 or 15	3	20×Thickness
3	11 or 13 ×Thickness	10 or 15	3	6 or 8 ×Thickness

Three different notch types may be used. Notch Type A is preferred.

Notch	A	B	C
Notch Base Radius (mm)	0.25	1.00	0.10

Similar Standards [ASTM D256](#)

Izod Impact Testing

(Unnotched Izod)



**ASTM D4812 and
ISO 180**



Scope:

Unnotched Izod Impact is a single point test that measures a materials resistance to impact from a swinging pendulum. Izod impact is defined as the kinetic energy needed to initiate fracture and continue the fracture until the specimen is broken. This test can be used as a quick and easy quality control check to determine if a material meets specific impact properties or to compare materials for general toughness.

Test Procedure:

The specimen is clamped into the pendulum impact test fixture with the thin edge facing the striking edge of the pendulum. The pendulum is released and allowed to strike through the specimen. If breakage does not occur, a heavier hammer is used until failure occurs.

Specimen size:

The standard specimen for ASTM is 64 x 12.7 x 3.2 mm (2½ x ½ x 1/8 inch). The most common specimen thickness is 3.2 mm (0.125 inch), but the preferred thickness is 6.4 mm (0.25 inch) because it is not as likely to bend or crush.

The standard specimen for ISO is a Type 1A multipurpose specimen with the end tabs cut off.

The resulting test sample measures 80 x 10 x 4 mm.

Data:

ASTM impact energy is expressed in J/m or ft-lb/in. Impact strength is calculated by dividing impact energy in J (or ft-lb) by the thickness of the specimen. The test result is typically the average of 5 specimens.

ISO impact strength is expressed in kJ/m². Impact strength is calculated by dividing impact energy in J by the area under the notch. The test result is typically the average of 10 specimens.

The higher the resulting number, the tougher the material.

Equipment Used:

TMI Impact Tester

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

จิตติ รินเสนา (2552). การขึ้นรูป วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา -อะลูมิเนียม แบบอัดขึ้น .
การประชุมเสนอผลงาน วิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, วันที่ 13 กุมภาพันธ์
พ.ศ. 2552 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ประวัติผู้เขียน

นายจิตติ รินเสนา เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกาฬสินธุ์ เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านหนองสรวงวิทยาคม ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนดงมูลวิทยาคม จังหวัดกาฬสินธุ์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก จากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ .ศ. 2548 หลังจากนั้นได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีผลการเรียนดีเด่น (ที่สมัครเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา) ของมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก ในปีการศึกษา 2549 ระหว่างศึกษาได้มีผลงานวิจัยเสนอบทความ เข้าร่วมการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 โดยมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ค.