



แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ  
Ceramic Armor Plates with Composite Materials

นายชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์  
Mr.Chaiwat Chaimahapuk

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2561



แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ  
Ceramic Armor Plates with Composite Materials

นายชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์  
Mr.Chaiwat Chaimahapuk

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อ นามสกุล นายชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์  
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
คณะ วิศวกรรมศาสตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประกอบ ชาติภักต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว



..... ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.ธงชัย ฟองสมุทร)



..... กรรมการ

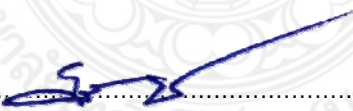
(ผศ.ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน)



..... กรรมการ

(ดร.ประกอบ ชาติภักต์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)

วันที่ 14 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562

ชื่อวิทยานิพนธ์	แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ
ชื่อ สกุล	นายชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2561

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและสร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแห้งในแม่พิมพ์ โดยใช้วัสดุผงอลูมิเนียมออกไซด์ วัสดุผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปผ่านการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผ่านการวิเคราะห์ผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ แสดงให้เห็นถึงสารประกอบและขนาดของอนุภาคผงที่มีขนาด 5 ไมครอน มีรูปสัณฐานเป็นแบบวงกลมแบน เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ Corundum  $Al_2O_3$  และมีรูปผลึกระบบเฮกซะโกนอล แกนอัดได้รับการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสร้างให้มี 2 รูปแบบคือ แบบที่ 1 มีปลายเป็นแบบหน้าตัดเรียบ ซึ่งจะได้แผ่นเกราะแบบหน้าเรียบ และแบบที่ 2 มีปลายเป็นแบบหน้าขนซึ่งจะได้แผ่นเกราะเป็นแบบหน้ายุบ โดยแกนอัดสร้างจากวัสดุ AISI 52100 และชุบแข็งที่ 64 HRC แผ่นเกราะเซรามิกส์ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปภายใต้แรงอัดที่ 1,000 กิโลนิวตัน มีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยมด้านเท่า ที่มีความกว้างด้านละ 25.98 มิลลิเมตร หรือมีความสูงระหว่างด้านคู่ขนานเท่ากับ 45 มิลลิเมตร ผง  $Al_2O_3$  ได้รับการอัดขึ้นรูปเพื่อศึกษาการกระจายของความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่มีความสูงหลังการอัด คือ 15 และ 30 มิลลิเมตร จึงมีการวิเคราะห์ 4 กรณีประกอบด้วย 1) กรณีอัดด้วยแกนอัดหน้าตัดเรียบได้กรีนคอมแพคที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร 2) กรณีอัดด้วยแกนอัดหน้าตัดขนได้กรีนคอมแพคที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร 3) กรณีอัดด้วยแกนอัดหน้าตัดเรียบได้กรีนคอมแพคที่มีความสูง 30 มิลลิเมตร และ 4) กรณีอัดด้วยแกนอัดหน้าตัดขนได้กรีนคอมแพคที่มีความสูง 30 มิลลิเมตร ผลจากการศึกษาเป็นการนำเสนอการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์บนแกนแนวนอนที่เป็นรัศมีสัมพัทธ์ และแกนตั้งเป็นระยะทางสัมพัทธ์จากแกนอัดตัวบนที่เป็นแกนอัดแบบเคลื่อนที่ลงมา ส่วนแกนอัดตัวล่างไม่ได้เคลื่อนที่ พบว่ารูปแบบการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์มีรูปแบบคล้ายคลึงกันทั้ง 4 กรณี ความหนาแน่นจะแตกต่างกันน้อยและมีค่าสูงในบริเวณขอบบนของแผ่นเกราะ เป็นผลมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผนังแม่พิมพ์และแกนอัด แผ่นเกราะเซรามิกส์ถูกตั้งตั้งลงบนแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด และใช้ซิลิโคนชนิดพิเศษเป็นตัวเชื่อมเข้าด้วยกันและจะได้แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบตามมาตรฐาน NIJ 3

**คำสำคัญ :** รถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ, แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุน, วัสดุเชิงประกอบ



<b>Thesis title</b>	Ceramic Armor Plates with Composite Materials
<b>Author</b>	Mr.Chaiwat Chaimahapuk
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Major program</b>	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
<b>Academic Year</b>	2018

## ABSTRACT

This research has been studied and created the ceramic armor plates with composite materials that been proceeded from drying compression process with mold.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  that use for compression forming has been analyzed by SEM and XRD. It showed that compound and powder particle led to 5 microns-sized. It had flat circle shape of colundum  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and hexagonal crystal system. Upper punch of molding has designed and analyzed by FEA to 2 forms, first form was the end-point had flat face and second form was the end-point had a convex. Upper punch had been made from AISI 52100 with 64 HRC, ceramic armor plate had been produced by compression at 1,000 kN which had hexagon side shape of width 25.98 mm for each side or height between parallel side of 45 mm.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  had been compressed to investigate the distribution of relative density for the height after compression of 15 and 30 mm by analyzing 4 cases that consist of 1.) a case of smooth face of upper punch which has green compact of 15 mm height 2.) a case of convex face of upper punch which has green compact of 15 mm height 3.) a case of smooth end face of upper punch which has green compact of 30 mm height 4.) a case of convex face of upper punch which has green compact of 30 mm height. The result of this study is to propose the distribution of relative density on horizontal axis as it is a relative radius and vertical axis is a relative distance from the upper punch that is an axis of moving down action. This study found that the distribution of relative density form had analogous form for these 4 cases, the density had few differences and had high value at the town edge of green compact due friction between die wall and upper punch. The ceramic armor plate has been set up on UHMWPE fiber plate and used special silicone to connect them together then will get the NIJ 3 standard of ceramic armor plate with composite materials.

**Keywords :** Armored Small Truck, Ballistic Ceramic Armor Plate, Composite materials

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ดร.ประกอบ ชาตฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ รวมถึงการสนับสนุน ทุน เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อใช้ในการทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ฟองสมุทร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชิวัน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง และตรวจสอบความ ถูกต้องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ณรงค์ศักดิ์ เย็นประเสริฐ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้ เครื่องมือต่างๆ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความ อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดลอง ขอขอบพระคุณ ดร.ณภัทร อัลเบิตต์ และ ดร.จิระศักดิ์ ธาระจักร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้คำแนะนำการใช้ เครื่องมือในการทดลอง จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ อบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จ ในการศึกษา ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการ ทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

นายชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์

## สารบัญ

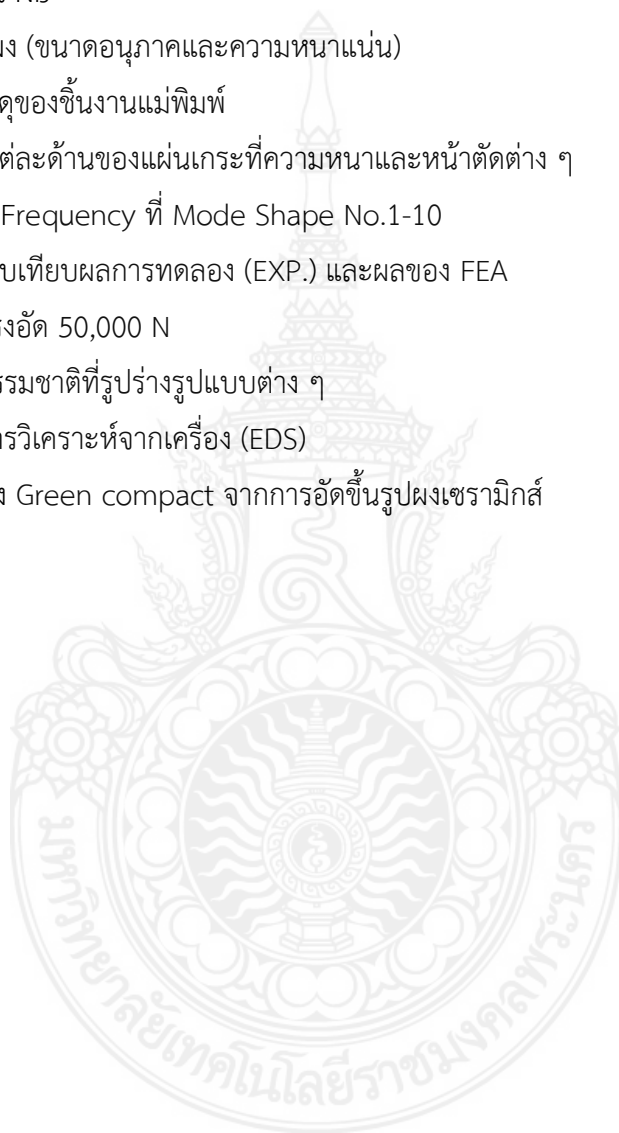
	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
2. ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	3
2.1.2 ผงเซรามิกส์	10
2.1.3 ผงพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE)	11
2.1.4 กระบวนการขึ้นรูปผงเซรามิกส์	12
2.1.5 มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน	13
2.2 กรอบการวิจัย	14
2.3 ระเบียบวิธีวิจัย	15
2.4 การทบทวนวรรณกรรม	15
3. การดำเนินงานวิจัย	
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	54
3.2 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์	56
3.3 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ	59
3.4 การอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบผงอลูมินา	61
4. ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์	

## สารบัญ (ต่อ)

4.1	ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	65
4.2	ผลการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	71
4.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผง ( $Al_2O_3$ )	73
4.3.1	ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง	73
4.3.2	ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพ	75
4.3.3	การวิเคราะห์ธาตุเชิงชนิดของสารประกอบของธาตุ	77
4.4	ผลการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์	78
4.5	ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตร	80
4.6	แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ	86
5.	สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
5.1	การสรุป และการอภิปรายผล	89
5.2	ข้อเสนอแนะ	91
	บรรณานุกรม	92
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก	99
	ประวัติการศึกษาและการทำงาน	111

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะเฉพาะและราคาเปรียบเทียบของเซรามิกส์ที่ใช้สำหรับกันกระสุน	10
2.2	มาตรฐาน NIJ	13
2.3	ลักษณะผง (ขนาดอนุภาคและความหนาแน่น)	53
3.1	สมบัติวัสดุของชิ้นงานแม่พิมพ์	57
3.2	ภาพตัดแต่ละด้านของแผ่นกระที่ความหนาและหน้าตัดต่าง ๆ	63
4.1	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.1-10	68
4.2	การเปรียบเทียบผลการทดลอง (EXP.) และผลของ FEA ภายใต้แรงอัด 50,000 N	73
4.3	ความถี่ธรรมชาติที่รูปร่างรูปแบบต่าง ๆ	73
4.4	ผลจากการวิเคราะห์จากเครื่อง (EDS)	76
4.5	ข้อมูลของ Green compact จากการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์	79



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	4
2.2	เอลิเมนต์แบบทรงสี่เหลี่ยมหน้า	6
2.3	a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b) แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา	11
2.4	กรอบการวิจัย (Conceptual Framework)	14
2.5	ผลการทดสอบของความหนาเซรามิกส์	15
2.6	รูปแบบชั้นของเกราะเซรามิกส์คอมโพสิต	16
2.7	ผลการทดสอบยิงเกราะเซรามิกส์อลูมินา-มัลไลต์ AM2	16
2.8	ตัวอย่างหลังการทดสอบยิงของอีพ็อกซี	17
2.9	ตัวอย่างหลังการทดสอบยิงของ Geopolymer-filled	17
2.10	รูปแบบของชิ้นงานที่ทดสอบ (a) Con. 1, (b) Con. 2 and (c) Con. 3	17
2.11	รูปแบบกระสุนที่ใช้ในการทดสอบ	18
2.12	วัสดุแต่ชั้นของเกราะคอมโพสิตอเนกประสงค์	19
2.13	การแตกหักของเซรามิกส์หลังจากผลกระทบของกระสุน	20
2.14	A) ชั้นเกราะป้องกันกระสุน B) กระสุน 7.62x63 mm M2 AP และกระสุน 7.62x51 mm M 80 C) ผลจากการวิ่งเข้าปะทะของกระสุนด้านหน้า D) ด้านหลังแผ่นเกราะกันกระสุน	21
2.15	ผลหลังจากการทดสอบยิง	22
2.16	(ก) แม่พิมพ์เหล็กหกเหลี่ยมอัดขึ้นรูป (ข) แผ่นเซรามิกส์แบบหน้าเรียบ (ค) แผ่นเซรามิกส์แบบเรียบหน้านูน	22
2.17	เทคนิคการอัด Green compact ที่มีความหนาแน่นสูง	23
2.18	ลักษณะทางกายภาพของผงที่ได้จากเครื่อง SEM	23
2.19	ความหนาแน่นเทียบกับความดันที่ใช้ที่อุณหภูมิห้องและที่ 450 ° C	24
2.20	โปรแกรมการเผาผนึกของเซรามิกส์แก้ว	24
2.21	ผงเซรามิกส์ที่ศึกษาซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ Zeiss Stemi 2000-C	25
2.22	ขั้นตอนการทดลอง: (a) การกดแบบแกนเดียวและ (b) การกดแบบไม่คงที่	25
2.23	ความหนาแน่นหลังจากอัด (a) การกดแบบปิดและการตีตอออก, (b) การกดแบบคงที่ที่ 25 MPa และ (c) 200 MPa	25

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.24	รูปของวัสดุอลูมิเนียมคอมโพสิตอัลลอยด์ที่มีความหนาแน่นสูงที่ถ่ายจากเครื่อง SEM	26
2.25	คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ศึกษา	27
2.26	กระบวนการอัดที่ใช้ในการพัฒนาคอมโพสิต $Al_2O_3$ ( $ZrO_2$ ) ที่มีการไล่ระดับสีทำงาน	27
2.27	อนุภาคผง $UO_2$ สังเกตได้จากเทคโนโลยี SEM	28
2.28	ระยะห่างระหว่างส่วนบนแกนอัดและแม่พิมพ์เป็น 40 มิลลิเมตรแกนอัดด้านบนกำลังลดลงเหลือ 37 มิลลิเมตร จากจุดเริ่มต้นด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตร	28
2.29	รูปแบบของกระบวนการขึ้นรูป $UO_2$	29
2.30	ตารางผลการเก็บค่า	29
2.31	ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปอลูมิเนียมแบบอัดแกนเดี่ยวและแบบอัดแกนคู่ มีแรงเสียดทานด้วยค่าสัมประสิทธิ์ได้เท่ากับ 0.4	30
2.32	การกระจายของความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม., ซ้าย), การเชื่อมโยงต่อกัน (MPa, กลาง), โมดูลัสความยืดหยุ่นสัมผัส $K_t$ (MPa, ขวา) สำหรับการบีบอัดแบบแกนเดี่ยว (แถวบน) และการบีบอัดแบบสองแกน (แถวล่าง) ของอลูมินาที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.4	30
2.33	แบบจำลองการกระจายความหนาแน่น (เป็น ก./ลบ.ซม., ซ้าย) และการเชื่อมโยงต่อกัน (เป็น MPa, ขวา)	31
2.34	การจำลองการติดคันทัว	31
2.35	แบบจำลองการกระจายความเค้นตกค้าง (เป็น MPa), ภาพซ้ายเป็นภาคตัดขวางการติดคันทัว และภาพขวาคือส่วนเบี่ยงเบนแปรผัน	31
2.36	ผงแต่ละชนิดที่แต่ละชั้นความหนา	32
2.37	รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาค APT ลามิเนตโดย SEM Micrographs	32
2.38	รูปแบบ XRD ของผง $LaPO_4$ หลังจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน	33
2.39	กำลังขยายสูงของฝุ่นละอองที่เกิดจากการใช้เครื่องพ่นแบบแห้ง	34
2.40	ภาพรวมของพารามิเตอร์ในการทดลอง	35
2.41	(a) ระบบ Binder และ (b) วัสดุดิบ $Si_3N_4$	35
2.42	(a) TG Curves และ (b) อนุพันธ์ TG Curves	36
2.43	จากภาพกล้อง SEM ดังรูป a และ b	37
2.44	ชิ้นส่วนประกอบของโมลอัดขึ้นรูปแกนเดี่ยว	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.45	การอัดแบบคงที่ของผง Kennametal WC ที่เกิดความหนาแน่นภายใต้โหลด Monotonic และ Cyclic	38
2.46	การอัดแบบคงที่ของผง Kennametal WC ที่มีความหนาแน่นสูง	38
2.47	การเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง Dynamic และ Static	39
2.48	ส่วนประกอบโมลอัดขึ้นรูป	40
2.49	ความสัมพันธ์ของการผลการทดสอบ	40
2.50	ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ HVC	41
2.51	ผลการเปรียบเทียบระหว่าง HVC และ Conv	42
2.52	การประกอบอุลตราโซนิกส์เข้ากับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	42
2.53	การกดผงแบบแห้ง	43
2.54	(a) การกดแบบแกนเดียวธรรมดา (b) การกดแบบคอลเรคเตอร์	43
2.55	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์	43
2.56	ส่วนประกอบแม่พิมพ์และการติดตั้งอุลตราโซนิกส์	45
2.57	(a) ขั้นตอนแรก แรงอัดเท่านั้น (b) ขั้นตอนที่ 2: แรงอัดและคลื่นอุลตราโซนิกส์ และ (c) ขั้นตอนที่ 3 - สถานะผลลัพธ์ (หลังจาก Densification)	45
2.58	การอัดและการนำถ่านหินออกจากกระบวนการอัด	46
2.59	อัตราส่วนของแรงส่งและแรงที่ใช้สำหรับการอัดที่มีและไม่มีสารหล่อลื่น	46
2.60	แรงเสียดทานที่ผนังกับแรงอัดที่มีและไม่มีสารหล่อลื่น	47
2.61	เครื่องมือที่ใช้สำหรับการบีบอัดแผ่นโลหะผสมอลูมิเนียมโดยใช้การดันเป็นจังหวะ	47
2.62	ความแปรผันของแรงอัดแบบสโตรก ที่มีและไม่มีโหลดเป็นจังหวะสำหรับ $F_f = 200$ kN	48
2.63	วิธีการวัดแรงเสียดทานของผนังแม่พิมพ์ระหว่างการอัด (a) วิธีทางอ้อม (b) วิธีโดยตรง	49
2.64	แผนผังของระบบโหลดและเครื่องมือวัด	49
2.65	สถานะความเครียดของการอัดเบนโทไนต์บล็อก	49
2.66	คุณสมบัติวัสดุ	50
2.67	(a) รูปทรงและส่วนประกอบ (b) โครงร่างแผนผังของเครื่องทดสอบ	50
2.68	ความหนาแน่นของอลูมินาอัดแน่น ก) 4.0 กรัม และ ข) 6.0 กรัม	51
2.69	การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ผงอลูมินา 4.0 กรัม ความเค้น 70 MPa	51
2.70	การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ผงอลูมินา 6.0 กรัม ความเค้น 70 MPa	52



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.71	ลักษณะการอัด	53
3.1	ขั้นตอนกระบวนการศึกษาวิจัย	55
3.2	ส่วนประกอบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์	56
3.3	กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	56
3.4	ขนาดและลักษณะของแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุน	58
3.5	การเตรียมชิ้นงานเข้าเครื่องวิเคราะห์	59
3.6	เครื่องเคลือบทองคำเพื่อไล่ความชื้นก่อนนำขึ้นทดสอบเข้าเครื่อง SEM	59
3.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM และ EDS	60
3.8	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ XRD	61
3.9	ก) เครื่องซิงติจิทัลทศนิยม 4 ตำแหน่ง ข) ผงที่เตรียมอัดขึ้นรูป	61
3.10	แม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	62
3.11	เครื่อง Universal Testing Machine: (UTM) ยี่ห้อ Hualong รุ่น waw-2000	62
3.12	เครื่อง Universal Testing Machine แบบควบคุมด้วยมือ	62
3.13	ชิ้นงานได้หลังจากกระบวนการอัดขึ้นรูป	63
4.1	การเปลี่ยนแปลงความเค้นเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์	65
4.2	รูปแบบของแม่พิมพ์อุตสาหกรรมโชนิกส์	65
4.3	ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์	66
4.4	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.1: 21.799 kHz	68
4.5	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.2: 22.096 kHz	68
4.6	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.3: 22.495 kHz	68
4.7	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.4: 23.119 kHz	69
4.8	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.5: 23.359 kHz	69
4.9	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.6: 23.481 kHz	69
4.10	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.7: 24.665 kHz	69
4.11	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.8: 25.817 kHz	70
4.12	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.9: 26.164 kHz	70
4.13	Natural Frequency ที่ Mode Shape No.10: 26.379 kHz	70
4.14	เครื่องจักร CNC 3 แกน	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	รูปชิ้นงานแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	71
4.16	การติดตั้ง Strain gage ลงบนตัวเรือนแม่พิมพ์และแกนอัด	71
4.17	การวิเคราะห์ความเค้น Von-Mises โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	72
4.18	ผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติแบบรูปที่ 5 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	72
4.19	โครงสร้างจุลภาคของ Alumina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> B-Grade ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	74
4.20	โครงสร้างจุลภาคของ Alumina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> B-Grade ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	74
4.21	โครงสร้างจุลภาคของ Alumina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> HTM 30 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	75
4.22	โครงสร้างจุลภาคของ Alumina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> HTM 30 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	75
4.23	การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> B grade	76
4.24	การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> HTM 30	76
4.25	การวิเคราะห์ธาตุอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> B grade	77
4.26	การวิเคราะห์ธาตุอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> HTM 30	77
4.27	ชิ้นงาน Green Compact หลังกระบวนการอัด ก) ชิ้นงานแบบหน้าเรียบและแบบ หน้ายวบจำนวน 7 ชั้น และ ข) ชิ้นงานแบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบจำนวน 13 ชั้น	78
4.28	ชิ้นงาน Green Compact หลังการผ่าครึ่ง ก) ชิ้นงานแบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบ จำนวน 7 ชั้น และ ข) ชิ้นงานแบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบ 13 ชั้น	78
4.29	ตัวอย่างการสแกนหน้าตัด Green Compact ร่วมกับการวัดระยะของ Green Compact แบบหน้าเรียบ 7 ชั้น 15 มิลลิเมตร	79
4.30	ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร 7 เลเยอร์	81
4.31	ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานที่มีความสูง 30 มิลลิเมตร 13 เลเยอร์	81
4.32	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้ายวบ ที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร	82
4.33	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้าเรียบ ที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร	83
4.34	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้ายวบ ที่มีความสูง 30 มิลลิเมตร	84
4.35	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้าเรียบ ที่มีความสูง 30 มิลลิเมตร	85

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.36	เครื่องเผาผนึก Nabertherm 1800	87
4.37	โปรแกรมเวลาและอุณหภูมิการเผาผนึก	87
4.38	การจัดวางเรียงชิ้นงานในเตาเผาผนึก	88
4.39	ตัวอย่างแผ่นเกราะเซรามิกส์ ก) เผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ที่แรงอัด 300 kN และ ข) เผาที่อุณหภูมิ 1,650 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดสูงสุด 1,000 kN	88
4.40	ตัวอย่างการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ	88



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
E	โมดูลัสความยืดหยุ่น	GPa
K	ค่าความแข็งสปริง	N/mm
V	ปริมาตร	mm <sup>3</sup>
m	มวล	g
F	แรง	N
$\sigma_x$	ความเค้นในแนวแกน x	MPa
$\epsilon_x$	ความเครียดในแกน x	-
[D]	เมตริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ	GPa
f'	เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง	N
k'	สทิพเนสเมทริกซ์ของสปริง	N/mm
d'	เมทริกซ์ของระยะยึด/หดตัวของสปริง	mm
$\tau$	ความเค้นเฉือน	MPa
$\rho$	ความหนาแน่น	g/mm <sup>3</sup>

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์ความไม่สงบใน 3 จังหวัด ชายแดนภายใต้ของประเทศไทย จากการก่อเหตุความไม่สงบ เช่น การวางระเบิด วางเพลิง รวมไปถึงการลอบยิงประชาชน และเจ้าหน้าที่ของรัฐ ทั้งตำรวจ ทหาร อาสาสมัคร เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม รัฐบาลมีมาตรการต่างๆ ทั้งเชิงนโยบาย และเชิงป้องกัน หากยังไม่สามารถหลีกเลี่ยงการปะทะ ซึ่งกลุ่มเป้าหมายของการก่อเหตุความไม่สงบ มุ่งเน้นไปที่ตัวบุคคล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เจ้าหน้าที่ของรัฐ และยานพาหนะลำเลียงกำลังพล ถึงแม้ว่ารัฐบาลมีการสนับสนุนการใช้เครื่องป้องกันทั้งเสื้อเกราะกันกระสุนและรถติดเกราะ หากแต่ยังไม่เพียงพอต่อการรักษาชีวิตไว้ได้ หากพิจารณาถึงการสูญเสียที่เกิดจากการลำเลียงกำลังพลด้วยพาหนะมีมากกว่าในตัวบุคคล เนื่องจากปริมาณบุคคลในขณะลำเลียง ดังนั้นหากมีการเพิ่มประสิทธิภาพของรถติดเกราะให้ดีขึ้น อาจจะทำให้ความสูญเสียนั้นลดลง ทั้งนี้ มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบรถติดเกราะของยานพาหนะมีอยู่หลายมาตรฐาน เช่น National Institute of Justice (NIJ) British Standard และ German DIN Standard [1] เป็นต้น โดยขึ้นอยู่กับประเภทของรถและเครื่องกระสุนที่ยิงเข้าปะทะ

สำหรับเกราะกันกระสุนรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ เกราะโลหะกันกระสุน เกราะกระจกلاميเน็ต และแผ่นเกราะวัสดุคอมโพสิต ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการพัฒนาเกราะรถยนต์ นิยมพัฒนาในด้านคุณสมบัติวัสดุจากตัวอย่างงานวิจัยของ Qun Wang และคณะ [2] ออกแบบเกราะที่ประกอบด้วยเม็ดเซรามิกสโกลูมินา (UHMWPE) และ Ti-6Al-4V (TC4) สองชั้นที่มีน้ำหนักที่เบา ในขณะที่ Matias Garcia-Avila และคณะ [3] ได้ศึกษาระบบเกราะคอมโพสิตโลหะแผ่นโฟม (Steel-Steel Composite Metal Foams ร่วมกับแผ่นเซรามิกส์ ทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน (NIJ) ระดับ 3 สามารถต้านทานกระสุนได้และดูดซับพลังงานที่สูงกว่าเดิม 3 เท่า ส่วน Daniel Bürger และคณะ [4] ได้จำลองผลกระทบบนไฮบริดเซรามิกส์/ไฟเบอร์เสริมเกราะคอมโพสิตเซรามิกส์ จากการใช้อลูมินามี 2 ขนาด โดยทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-662F จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและทำการทดลองผลมีความสอดคล้องกัน คอมโพสิตที่นำมาใช้ในการจำลองที่ใช้สามารถทำวิเคราะห์การดูดกลืนพลังงานได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามการพัฒนาที่ผ่านมา มีแนวโน้มการใช้วัสดุแบบคอมโพสิตที่ใช้เซรามิกส์ หากแต่การขึ้นรูปแบบของแผ่นเกราะมีความหลากหลายด้านรูปทรง ภายใต้ข้อจำกัดของการอัดตัววัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ยิ่งไปกว่านั้นการทำการทดสอบถูกจำกัดด้วยองค์การยิงปะทะ

กระบวนการอัดขึ้นรูปผงด้วยการอัดแบบแกนเดียวหรือการอัดแบบสองแกน พบว่ามีอุปสรรคและปัญหาในการอัดขึ้นรูปที่สำคัญ คือ ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผงอัดกับผนังแม่พิมพ์ ความหนาแน่นของผงในบริเวณที่ติดกับผนังแม่พิมพ์จะมีค่าสูงมากในขณะที่ส่วนใจกลางของแผ่นเกราะเซรามิกนั้น ซึ่งอยู่ห่างจากผนังแม่พิมพ์ออกไปจะมีความหนาแน่นต่ำ และที่สำคัญเมื่อเปรียบเทียบระหว่างด้านล่างของแผ่นเกราะกับด้านบนจะมีความแตกต่างของความหนาแน่นที่สูงมาก ทั้งนี้โดยสรุปแล้วเกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานระหว่างผงซึ่งเราเรียกว่า Interparticle และความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผนังแม่พิมพ์กับผงที่ถูกอัด ดังนั้นในกระบวนการอัดอาจจะต้องจัดความเสียดทานออกไปให้ได้มากที่สุด ซึ่งผงที่ใช้ในการอัดบางครั้งอาจต้องผสมบางสิ่งบางอย่างลงไปเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น แต่นั่นก็หมายความว่าส่งผลกระทบต่อสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์เกิดการปลอมปนของสารตัวอื่น ในบางกรณีอาจใช้สารหล่อลื่นบางตัวเคลือบไปที่ผิวของผนังแม่พิมพ์แต่นั้นก็คือสิ่งปลอมปนเช่นกัน มีนักวิจัยจำนวนมากคิดค้นวิธีการใช้คลื่น Ultrasonic ยิ่งไปที่ผนังแม่พิมพ์เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นดังกล่าว ซึ่งได้ผลค่อนข้างดี ในงานวิจัยนี้จะศึกษาแผ่นเกราะเซรามิกที่มีรูปร่างเป็นรูปหกเหลี่ยม และสนใจที่จะศึกษาความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผงกับผนังแม่พิมพ์ของแผ่นเกราะเซรามิกที่มีรูปร่างเป็นรูปหกเหลี่ยมแบบเรียบและแผ่นเกราะเซรามิกที่มีรูปร่างเป็นรูปหกเหลี่ยมแบบหน้ายุบ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อออกแบบ วิเคราะห์ รูปแบบของแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ
- 1.2.2 เพื่อสร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความหนาแน่นของแผ่นเกราะจากกระบวนการอัดขึ้นรูปผง

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผงขนาดระดับไมครอน
- 1.3.2 ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์
- 1.3.3 วิธีการสร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์จะใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปเท่านั้น

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้รูปแบบของแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ
- 1.4.2 ได้แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนนำไปติดตั้งในรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ
- 1.4.3 ผลิตแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่ผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3
- 1.4.4 ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารหรือผลงานจากการสัมมนาทางวิชาการ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [5]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นวิธีทางตัวเลข เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural) หรืออื่นๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยในการแก้ปัญหาดังกล่าวโครงสร้างหรือชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ (Element) ในจำนวนที่จำกัด (Finite) และผลเฉลยที่ได้จะเป็นคำตอบที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ (โหนด: Node) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์จะมีผลเฉลยที่สามารถหาได้ง่าย และเมื่อนำมารวมกันจะสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถให้ผลเฉลยของค่าการเสียรูปและแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนดๆ และค่าความเค้นและความเครียดที่แต่ละเอลิเมนต์ได้ ความเครียดกับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างปัญหาใน 1 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปกับความเครียดดังนี้

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.1)$$

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_x = E\epsilon_x \quad (2.2)$$

โดยที่  $\sigma_x$  คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $[D]$  คือ เมตริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

การหาสทิพเนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบสปริง เมื่อสปริงที่มีค่านิจของสปริง (Stiffness) เท่ากับ  $k$  รับแรงดึงเท่ากับ  $F$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อชิ้นงานกับระยะสปริงยืดตัวได้ตามสมการที่ (2.4)

$$F=kx \quad (2.4)$$

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

$$f'=k'd' \quad (2.5)$$

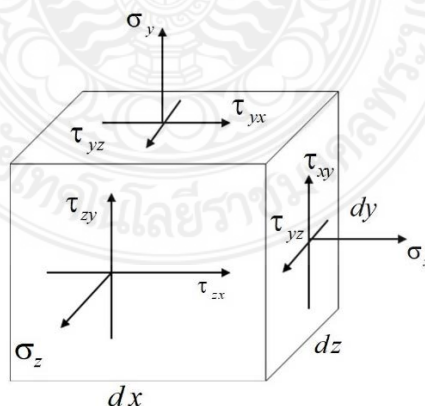
โดยที่  $f'$  คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

$k'$  คือ สทิพเนสเมทริกซ์ของสปริง และ

$d'$  คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

ในการวิเคราะห์หวิเคราะห์เอลิเมนต์ในระบบ 3 มิตินั้น เอลิเมนต์ประเภทนี้จะให้คำตอบมากกว่าเอลิเมนต์แบบ 2 มิติ หรือแบบแกนสมมาตร เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เป็นเอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับ 3 มิติ ในส่วนขงนี้จะยกตัวอย่างจากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น ผู้แต่ง รศ.ดร. ธงชัย ฟองสมุทร หน้า 175-180

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดใน 3 มิติ ตามรูปที่ 2.1 คือลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และเมื่อพิจารณาตามหลักการสมดุล (Equilibrium) จะได้ว่า



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2.6)$$



ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่านั้นที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\text{โดยที่ } \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{yx}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \gamma_{zy}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_{xz} \quad (2.9)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.10)$$

โดยที่

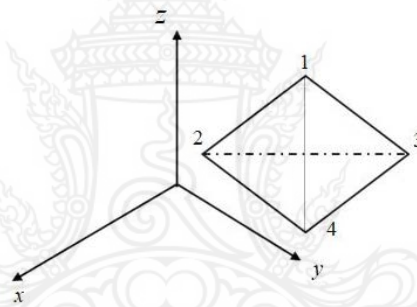
$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

การหาสทิงเฟนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

พิจารณาเอลิเมนต์ 3 มิติแบบสี่หน้า (Tetrahedron) ดังรูปที่ 2.2 โดยที่ 1 เอลิเมนต์ประกอบด้วย 4 โหนด แต่ละโหนดมีระดับความเสรี (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 และเมทริกซ์สำหรับการเสียรูปเท่ากับ

$$d = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของการเสียรูป

กำหนดให้การเสียรูปทั้งหมดยังอยู่ในช่วงของการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) อยู่ดังนั้นจะสามารถเขียนฟังก์ชันของการเสียรูป ( $u$ ,  $v$  และ  $w$ ) ในแต่ละแนวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x,y,z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\ v(x,y,z) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\ w(x,y,z) &= a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z \end{aligned} \quad (2.13)$$

จากนั้นกำหนดให้  $\psi'$  เป็นฟังก์ชันของการเสียรูปของ  $u$ ,  $v$  และ  $w$  โดยที่ในการวิเคราะห์นั้น สามารถทำได้เหมือนกันกับกรณีของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม จะได้ว่า

$$u(x, y, z) = \frac{1}{6v} \left\{ (\alpha_1 + \beta_1x + \gamma_1y + \delta_1z)u_1 + (\alpha_2 + \beta_2x + \gamma_2y + \delta_2z)u_2 \right. \\ \left. + (\alpha_3 + \beta_3x + \gamma_3y + \delta_3z)u_3 + (\alpha_4 + \beta_4x + \gamma_4y + \delta_4z)u_4 \right\} \quad (2.14)$$

โดยที่

$$6v = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2.15)$$

$$\alpha_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_1 = \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \quad (2.16)$$

และ

$$\alpha_2 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_2 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_2 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \quad (2.17)$$

และ

$$\alpha_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_3 = - \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_3 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_3 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \quad (2.18)$$

และ

$$\alpha_4 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \beta_4 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \gamma_4 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \delta_4 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (2.19)$$

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชันการเสียรูปเท่ากับ

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z)}{6V} & N_2 &= \frac{(\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z)}{6V} \\ N_3 &= \frac{(\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z)}{6V} & N_4 &= \frac{(\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z)}{6V} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูป ได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

หรือ

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (2.23)$$

โดยที่

$$[B] = [\underline{B}_1 \quad \underline{B}_2 \quad \underline{B}_3 \quad \underline{B}_4] \quad (2.24)$$

และ

$$B_1 = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{1,z} \\ N_{1,y} & N_{1,x} & 0 \\ 0 & N_{1,z} & N_{1,y} \\ N_{1,z} & 0 & N_{1,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2.26)$$

และ

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (2.27)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาสมการสทริกซ์และสมการสทิฟเนส  
เมื่อพิจารณาในรูปของสมการ  $\underline{F} = \underline{K}\underline{d}$  จะได้ว่า

$$[K] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV \quad (2.28)$$

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนี้

$$[K] = V [B]^T [D][B] \quad (2.29)$$

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

$$\{f_b\} = \iiint [N]^T \{X\} dV \quad (2.30)$$

โดยที่

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{Bmatrix} \quad (2.31)$$

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force)

จาก

$$\{f_s\} = \iint_s [N]^T \{T\} dS \quad (2.32)$$

โดยที่

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

### 2.1.2 ผงเซรามิกส์

ในหัวข้อ 2.1.2 นี้ ผู้เขียนได้คัดลอกเนื้อหาจากบทความของ วรรณิการ์ เดชรักษา เรื่อง “เกราะกันกระสุน” ด้วยเนื้อหา ดังนี้ “วัสดุเซรามิกส์เป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายงาน เซรามิกส์เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้ทำแผ่นเกราะกันกระสุน เซรามิกส์มีหลายประเภท ได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) โบรอนคาร์ไบด์ (B<sub>4</sub>C) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพและทางกลที่เหมาะสม และเมื่อพิจารณาเซรามิกส์กับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะและโพลีเมอร์ โดยเปรียบเทียบน้ำหนักต่อพื้นที่ (Weight/Area) และราคาเมื่อเทียบกับเหล็ก RHA (Rolled Homogeneous Armor Steel) ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นวัสดุที่น่าสนใจ รองลงมาในเรื่องของความหนาแน่นและความแข็ง แต่ถ้าพิจารณาด้านราคาเปรียบเทียบจะมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์มากกว่าโบรอนคาร์ไบด์ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า อลูมินาเหมาะสมกับการใช้งานในเกราะทั่วไป ในขณะที่ซิลิคอนคาร์ไบด์อาจเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการสร้างสมบัติที่ดีขึ้นในอีกระดับหนึ่ง ส่วนโบรอนคาร์ไบด์เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการน้ำหนักเบาและไม่มีข้อจำกัดด้านราคา”

ตารางที่ 2.1 ลักษณะเฉพาะและราคาเปรียบเทียบของเซรามิกส์ที่ใช้สำหรับกันกระสุน [6]

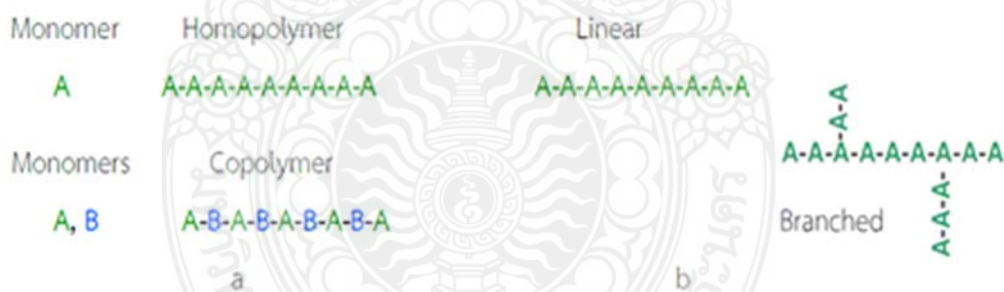
Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elastic Modulus (GPa)	Hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	Fracture toughness (MPa.m <sup>1/2</sup> )	Strength (MPa)	Price Factor
B <sub>4</sub> C	2.5	400	29	2.9	400	8
SiC	3.2	455	26	4.6	655	4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.68	322	14	4.0	200	1

โดย วรรณิการ์ เดชรักษา ได้เขียนอธิบายไว้ว่า “ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า โบรอนคาร์ไบด์ B<sub>4</sub>C เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด น้ำหนักเบา และมีความแข็งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับ SiC และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จึงเหมาะสมสำหรับทำเป็นแผ่นเกราะบุคคลและอากาศยาน แต่มีข้อด้อยที่มีความเหนียวต่ำ (พิจารณาจากค่าความทนทานต่อการแตกหัก (Fracture Toughness) จึงทนต่อแรงกระแทกได้ไม่ดึ๊งกอย่างไรรักดี ข้อจำกัดที่สำคัญของโบรอนคาร์ไบด์อยู่ที่ราคาเปรียบเทียบซึ่งค่อนข้างสูงมาก เพราะต้องใช้กระบวนการผลิตที่มีต้นทุนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเกราะชนิดอื่นๆ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และอลูมินา Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นวัสดุที่น่าสนใจรองลงมาในแง่ของความหนาแน่นและความแข็ง แต่ถ้าพิจารณาด้านราคาเปรียบเทียบมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์มากกว่าโบรอนคาร์ไบด์ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า อลูมินาเหมาะสมกับการใช้งานในเกราะทั่วไป ในขณะที่ซิลิคอนคาร์ไบด์เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการสมบัติที่ดีขึ้นในอีกระดับหนึ่ง ส่วนโบรอนคาร์ไบด์เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการน้ำหนักเบาที่สุดและไม่มีข้อจำกัดด้านราคา” [6]

### 2.1.3 พงพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) [7]

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi Crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทก เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่าง ๆ การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น เฟือง เกียร์ แบริ่ง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร และอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีการนำไปใช้เป็นวัสดุบุพื้นหนทออบุภายในรางลำเลียงถ่านหินหรือพื้นกระเบรรถบรรทุก เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์ UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อเทียมต่าง ๆ (Total Joint Replacement) สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยของไฮโดรเจนและคาร์บอนหลาย ๆ โมเลกุล (Poly) เชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งแต่โมเลกุลย่อยหรือที่เรียกว่า “โมโนเมอร์ (Monomer)” ของพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบเหมือนกันเชื่อมต่อเข้าด้วยกันจะเรียกว่า Homopolymer แต่ถ้าแต่ละส่วนหรือแต่ละโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันมีความแตกต่างกันจะเรียกว่า Copolymer ดังลักษณะแผนภาพการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.3a โดยที่สัญลักษณ์ A, B คือ โมโนเมอร์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b) แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา [8]

โมโนเมอร์ของพอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวกันเป็นแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (Branched) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.3b ซึ่งแนวโน้มของการเกิดการจัดเรียงตัวแบบกิ่งก้านสาขานี้ขึ้นอยู่กับควบคุมสถานะของขบวนการสังเคราะห์ ดังนั้นสิ่งที่ควรจำและทำความเข้าใจก็คือรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ ดังลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่แสดงในรูปที่ 2.3a และ 2.3b ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างง่าย ๆ ของโครงสร้างพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น Copolymer มีความเป็นไปได้ที่จะมีโครงสร้างย่อยหรือโมโนเมอร์ย่อยต่างชนิดกัน ตามชนิดของธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบที่ผสมเข้าไป แต่ในทางปฏิบัติในอุตสาหกรรม พอลิเอทิลีนรวมทั้ง UHMWPE จะเป็น

Copolymer ที่เกิดร่วมกับโมโนเมอร์อื่นๆ ตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ สมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นและเห็นได้ชัดของพอลิเมอร์ที่แตกต่างจากวัสดุอื่นๆ (เช่น โลหะชนิดต่างๆ และเซรามิกส์) คือ ขนาดโมเลกุล (Molecular) ในกรณีที่เป็นโลหะผสมและเซรามิกส์ องค์ประกอบย่อยที่เป็นส่วนประกอบคืออะตอมของธาตุโลหะชนิดต่าง ๆ (ตัวอย่างเช่น Co, Cr, Mo และอื่นๆ) หรืออาจจะเป็นพันธะโมเลกุลเล็กๆ เช่น คาร์ไบด์ หรือ ออกไซด์ของโลหะ แต่สำหรับขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์อาจจะประกอบด้วยโมโนเมอร์หลาย ๆ ชนิดรวมกันมากกว่า 100,000 โมโนเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้มวลโมเลกุล (Molecular-weight) ของพอลิเมอร์สามารถรับขนาดเพิ่มขึ้นเป็นล้านกรัมต่อโมล (10<sup>6</sup> g/mol) และนอกจากรูปร่างแบบการก่อตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ย่อยๆ เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทำให้พอลิเมอร์มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของพอลิเมอร์ [7]

#### 2.1.4 กระบวนการขึ้นรูปผงเซรามิกส์

ในหัวข้อ 2.1.4 นี้ ผู้แต่งได้คัดลอกเนื้อหาจากบทความของ สุรศักดิ์ ไชยวงศ์สกุล เรื่อง “การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์” โดยอธิบายว่า “การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีอยู่หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีมีข้อแตกต่างกัน ทั้งในการเตรียมผงเซรามิกส์ และอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ รวมถึงรูปลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้ โดยทั่วไปแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว (Plastic Forming) เป็นวิธีการขึ้นรูปที่เก่าแก่ที่สุด การเตรียมเนื้อดินปั้นจะกระทำโดยการผสมดินกับวัตถุอื่น ๆ และนวดให้เข้ากันดี หรืออาจผสมในรูปของน้ำดินแล้วนำไปกรองให้เป็นแผ่น จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปซึ่งอาจแบ่งได้เป็นอีกหลายวิธีย่อย ๆ เช่น

- การปั้นด้วยมือ (Hand Forming) เป็นวิธีขึ้นรูปที่อิสระที่สุด ผู้ปั้นจะใช้มือและอุปกรณ์ต่างๆ เข้าช่วยในการปั้นดินให้เป็นรูปร่างตามต้องการ วิธีนี้สามารถปั้นผลิตภัณฑ์ได้ทุกรูปร่าง แต่มีขนาดไม่แน่นอน และต้องอาศัยใช้เวลาและความชำนาญของผู้ปั้นมาก จึงนิยมใช้กับงานศิลปะ หรืองานหัตถกรรมพื้นบ้าน ที่ไม่ต้องการกำลังผลิตสูงนัก

- จิกเกอร์ริง (Jiggering) เป็นวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยนำแผ่นเนื้อดินมาวางบนแบบปูนพลาสติก แล้วใช้ใบมีดกดรีดให้เนื้อดินได้รูปร่างตามต้องการ ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปกลมและแบน เช่น งานชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

- การรีด (Extrude) วิธีนี้จะนำดินมาผ่านเข้าเครื่องรีดให้ออกมาเป็นแท่งยาว ๆ ซึ่งมีรูปหน้าตัดตามที่ออกแบบไว้ มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปเป็นแท่งยาว ๆ เช่น ท่อ (Tube) เป็นต้น

2. การเทแบบ (Casting) วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปน้ำดินข้น ๆ (Slip) ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงเทลงในแบบปูนพลาสติก ปูนจะดูดน้ำและทำให้เนื้อดินเกาะติดกับผนังแบบ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ วิธีนี้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปทรง แต่ต้องใช้น้ำในการขึ้นรูป



มากทำให้การหดตัวหลังอบแห้งสูง ซึ่งอาจเกิดการแตกหรือบิดเบี้ยวได้ง่าย ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้แก่ เช่น สุขภัณฑ์ ถ้วยชาม ของที่ระลึกประเภทต่างๆ เป็นต้น

3. การอัด (Pressing) วิธีนี้จะเตรียมเซรามิกส์อยู่ในรูปผงเซรามิกส์ จากนั้นจึงนำไปอัด ด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงเพื่อให้เกาะติดกันเป็นแผ่น ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง มีการหดตัวน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ แต่รูปทรงผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้จำกัดกว่า ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้แก่ กระเบื้องชนิดต่าง ๆ เป็นต้น” [9]

### 2.1.5 มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน

ปัจจุบันมาตรฐานการทดสอบเกราะกันกระสุน มีอยู่หลายมาตรฐาน แต่มาตรฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการยอมรับได้แก่ มาตรฐานของ NIJ (National Institute of Justice) ที่ต้องคำนึงถึงการวัดความเร็วต้นของหัวกระสุนที่ออกจากกระบอกปืนทดสอบ การกำหนดจุดที่จะต้องยิงจำนวนนัด ระยะทางการยิง แผ่นวัสดุรองด้านหลังเพื่อใช้พิจารณาการทะลุผ่านของหัวกระสุน และแน่นอนว่าจะต้องทำการบรรจุดินปืนใหม่ทุกครั้งด้วยน้ำหนักการชั่งดินปืนที่เท่ากัน ซึ่ง NIJ Standard จะแบ่งระดับเกราะออก เป็น 6 ระดับ ดังตารางที่ 2.2

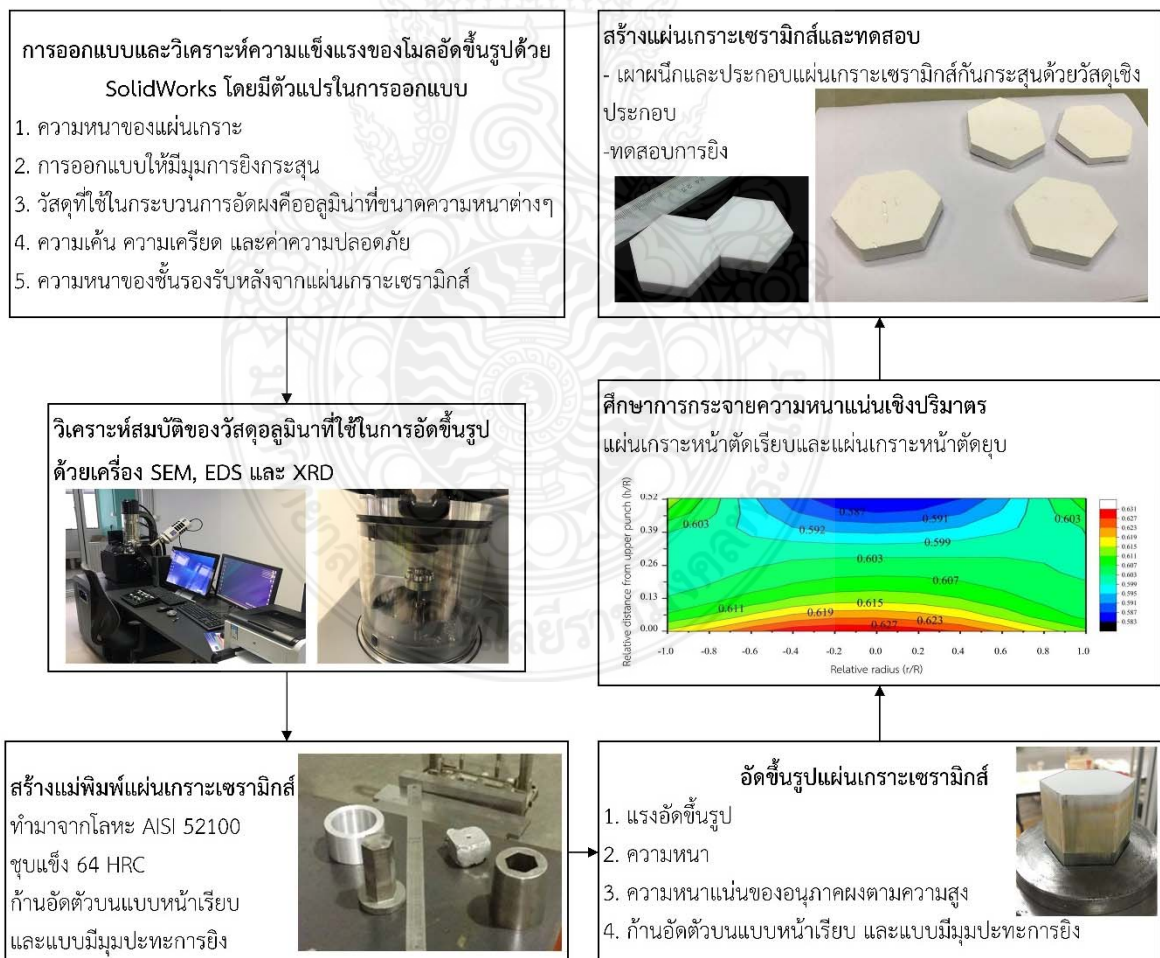
ตารางที่ 2.2 มาตรฐาน NIJ [10]

การป้องกัน	ประสิทธิภาพ
ระดับ I (.22 LR; .380 ACP)	เกราะ สามารถป้องกันกระสุน .22 Long Rifle น้ำหนัก 2.6 กรัม มีความเร็ว 329 ± 9.1 เมตร/วินาที (1080 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .380 ACP น้ำหนัก 6.2 กรัม มีความเร็ว 322 ± 9.1 เมตร/วินาที (1055 ± 30 ฟุต/วินาที) แต่ปัจจุบัน NIJ ได้ยกเลิกการใช้มาตรฐานการป้องกันระดับ I เนื่องจากไม่เพียงพอที่จะป้องกันกระสุนปืน
ระดับ IIA (9 mm; .40 S&W)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 มม. น้ำหนัก 8 กรัม มีความเร็ว 373 ± 9.1 เมตร/วินาที (1225 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .40 S&W น้ำหนัก 11.7 กรัม มีความเร็ว 352 ± 9.1 เมตร/วินาที (1155 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I ได้
ระดับ II (9 mm; .357 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 มม. น้ำหนัก 8 กรัม มีความเร็ว 398 ± 9.1 เมตร/วินาที (1305 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .357 Magnum น้ำหนัก 10.2 กรัม มีความเร็ว 436 ± 9.1 เมตร/วินาที (1430 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะสามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I และ IIA ได้ด้วย
ระดับ IIIA (.357 Sig; .44 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด .357 SIG น้ำหนัก 8.1 กรัม มีความเร็ว 448 ± 9.1 เมตร/วินาที (1470 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุนขนาด .44 Magnum น้ำหนัก 15.6 กรัม มีความเร็ว 436 ± 9.1 เมตร/วินาที (1430 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะสามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA และ II ได้ด้วย

การป้องกัน	ประสิทธิภาพ
ระดับ III (Rifles)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62x51 มม. NATO M80 ball หนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว $847 \pm 9.1$ เมตร/วินาที ( $2780 \pm 30$ ฟุต/วินาที) ซึ่งเสื้อเกราะตามสามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA, II และ IIIA ได้ด้วย
ระดับ IV (Armor Piercing Rifle)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนเจาะเกราะ .30-06 Springfield M2 หนัก 10.8 กรัม มีความเร็ว $878 \pm 9.1$ เมตร/วินาที ( $2880 \pm 30$ ฟุต/วินาที) ซึ่งเสื้อเกราะระดับนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA, II, IIIA และ III ได้ด้วย

## 2.2 กรอบการวิจัย

สำหรับกรอบการวิจัย (Conceptual Framework) จะเป็นการวางแนวความคิดของกระบวนการการทำการวิจัย ที่ต้องกล่าวถึงตัวแปรต้นและตัวแปรตามต่างๆ ที่ใช้ในแต่ละกรอบ จะต้องมีความสัมพันธ์กันและกันซึ่งจะต้องสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานของทฤษฎีต่างๆ ซึ่งมีแนวคิดดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กรอบการวิจัย (Conceptual Framework)

## 2.3 ระเบียบวิธีวิจัย

สำหรับระเบียบวิธีวิจัยในการวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่การออกแบบแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุน โดยกระบวนการเริ่มต้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผงอลูมินาและทำการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ที่สามารถใช้อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะที่มีรูปร่างหกเหลี่ยม ซึ่งแกนอัดจะมี 2 รูปแบบ คือ แบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบ หลังจากนั้นนำผงเซรามิกส์มาทำการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแรงดันสูง ทดสอบการอัดด้วยความดันที่แตกต่างกัน และนำมาตรวจสอบความหนาแน่น หากการกระจายความหนาแน่นที่เกิดขึ้น จากนั้นทำการประกอบเข้ากับแผ่นเส้นใย UHMWPE และนำไปทดสอบการยิงกระสุน

## 2.4 การทบทวนวรรณกรรม

ที่ผ่านมาการพัฒนาวัสดุเกราะสำหรับยานยนต์ได้มุ่งเน้นไปที่การลดน้ำหนักของวัสดุเกราะที่มีอยู่ เนื่องจากน้ำหนักที่ลดลงส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ตลอดจนการเพิ่มความคล่องตัวการเคลื่อนที่ ในอดีตที่ผ่านมา เหล็กนิยมนำมาใช้เป็นเกราะอย่างแพร่หลาย สืบเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวที่ดี และต้นทุนต่ำนำไปสู่การค้นหาเทคนิคการผลิตที่แตกต่างกัน เช่น การรักษาความร้อน การรีดเย็น ฯลฯ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งของเหล็ก ซึ่งจะช่วยให้การลดน้ำหนักของชุดเกราะ การศึกษาก่อนหน้านี้มีอย่างกว้างขวาง การศึกษาผลกระทบของการรักษาความร้อนในการปรับปรุงคุณสมบัติของเกราะเหล็ก [11–17] มีการศึกษาเกี่ยวกับทิศทางของกระสุนที่วิ่งเข้ามาปะทะกับแผ่นเกราะ ซึ่งให้เห็ว่ามุมวิ่งเข้าปะทะกับแผ่นเกราะที่ 30 องศา จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงประมาณร้อยละ 30 ในขณะที่ประสิทธิภาพการป้องกันเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 21 [18] นั่นคือทุกครั้งที่ทำทดสอบต้องทดสอบที่มุมปะทะ 0 องศา เพื่อให้ครอบคลุมการโจมตีของกระสุน

Impact event#	Input variables		Measured or generated parameters					
	Ceramic thickness [mm]	Bullet or core	Final core length [mm]	Reduction in core length [%]	Mean core lengths [mm]	Final core mass [g]	Reduction in core mass [%]	Mean core masses [g]
1	3.1	Bullet	20	0	19.5	3.55	1	3.55
16	3.1	Bullet	19	5		NR	NR	
2	3.1	Core	14	30	14.0	3.05	15	3.05
3	4.1	Bullet	17	15	18.5	3.38	6	3.44
7	4.1	Bullet	20	0		3.49	3	
20	4.1	Core	11	45	12.7	2.51	30	2.74
22	4.0	Core	11	45		2.36	34	
23	4.0	Core	16	20		3.34	7	
21	5.0	Bullet	15	25	15.7	NR	NR	3.19
25	5.0	Bullet	14	30		2.88	20	
26	5.0	Bullet	18	10		3.49	3	
6	5.0	Core	9	55	9.0	2.21	38	1.95
27	5.1	Core	9	55		1.83	49	
32	5.1	Core	9	55		1.80	50	

The shaded rows highlight the data re "bullet" (rather than "core").

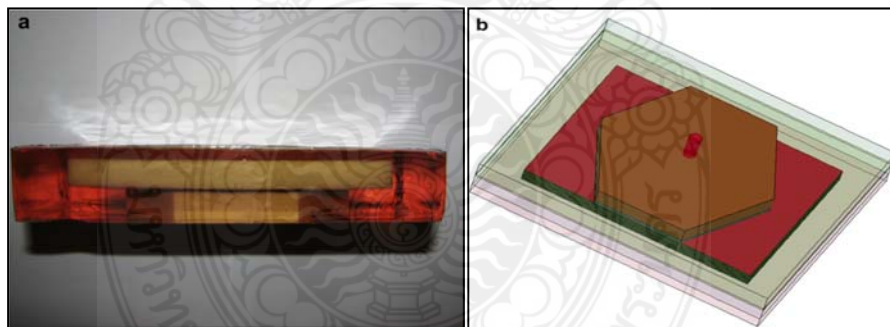
## รูปที่ 2.5 ผลการทดสอบของความหนาเซรามิกส์ [19]

Ahmad Serjouei และคณะ [19] ได้ทำการวิจัยวิธีกึ่งวิเคราะห์เพื่อประเมินความเร็วของขีดจำกัด (BLV) ของเกราะโลหะเซรามิกส์สองชั้น แผ่นหน้า คือ โบรอนคาร์ไบด์ (B<sub>4</sub>C) และอลูมิเนียมเป็น

6061-T6 อยู่ด้านหลัง ถูกนำมาใช้เป็นชั้นรองพื้นของเซรามิกส์ในชุดเกราะจริง โดยใช้กระสุนปืน AP 7.62 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยการจำลองเชิงตัวเลข โดย AUTODYN® สรุปได้ว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถนำมาใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ได้

A. Tasdemirci และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของชั้นประสิทธิภาพพีปนาวุธของชุดเกราะเซรามิกส์/คอมโพสิต เกราะแต่ละชั้นประกอบไปด้วย แผ่นอลูมินาคอมโพสิต ประกอบด้วยแผ่นเกราะทกเหลี่ยมเซรามิกส์อลูมินา เทพลอนและอลูมิเนียมโพลีเมได้แทรกระหว่างชั้นเซรามิกส์ และคอมโพสิตชั้นคอมโพสิตถูกจำลองด้วย MAT162 (MAT COMPOSITE DMG MSC) แบบจำลองวัสดุ โดยใช้กระสุน 7.62 x 51 mm M61 type AP ผลการทดสอบพบว่า ในชั้นคอมโพสิต ชั้นเทพลอน และโพลีออลูมิเนียมสามารถลดความเร็วของกระสุนได้และลดความเครียดที่ส่งไปแผ่นรองแผ่นคอมโพสิต นอกจากนี้เทพลอนและโพลีออลูมิเนียม การกำหนดค่าระหว่างชั้นให้พลังงานจลน์ที่สูงขึ้นไปในชั้นเซรามิกส์มากกว่า โดยไม่มีชั้นระหว่างและการกำหนดค่าระหว่างชั้นอย่างความเสียหายในชั้นเซรามิกส์สูงมาก

Eugene Medvedovski [21] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเกราะเซรามิกส์ป้องกันกระสุน โดยวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของการออกแบบและโครงสร้าง ในการทดลองได้ศึกษาความหนาแน่นความเป็นเนื้อเดียวกันของเซรามิกส์  $Al_2O_3$  ซึ่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์บริสุทธิ์ถึง ร้อยละ 97-99.7 wt. ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.6 พบว่าทั้งกระสุน 7.62x51 mm NATO Ball FMJ และ 7.62-63 mm AP M2 ไม่สามารถเจาะเกราะให้ทะลุได้



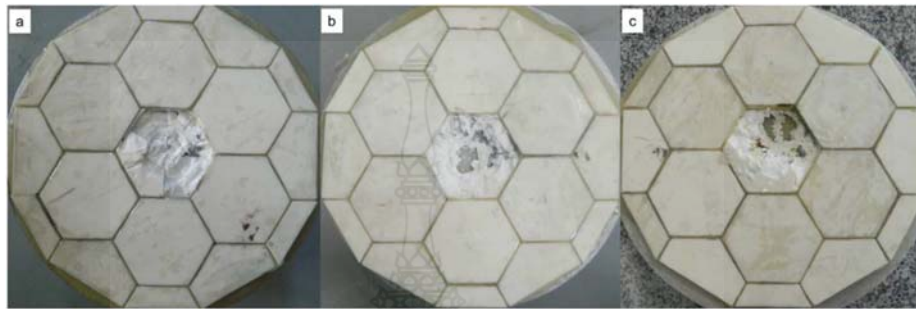
รูปที่ 2.6 รูปแบบชั้นของเกราะเซรามิกส์คอมโพสิต [19]



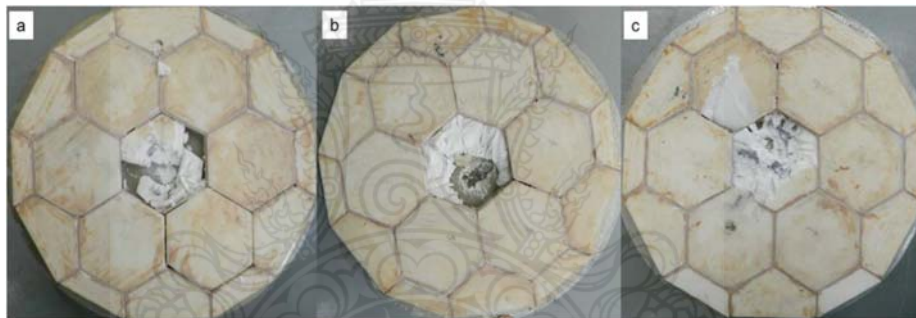
รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบยิงเกราะเซรามิกส์อลูมินา-มัลไลต์ AM2 (ก) กระสุน 7.62x51 mm NATO Ball FMJ (6 รู้นี้ไม่ทะลุ) (ข) 7.62x63 mm AP M2 (1 รู้นี้ไม่ทะลุ) [21]



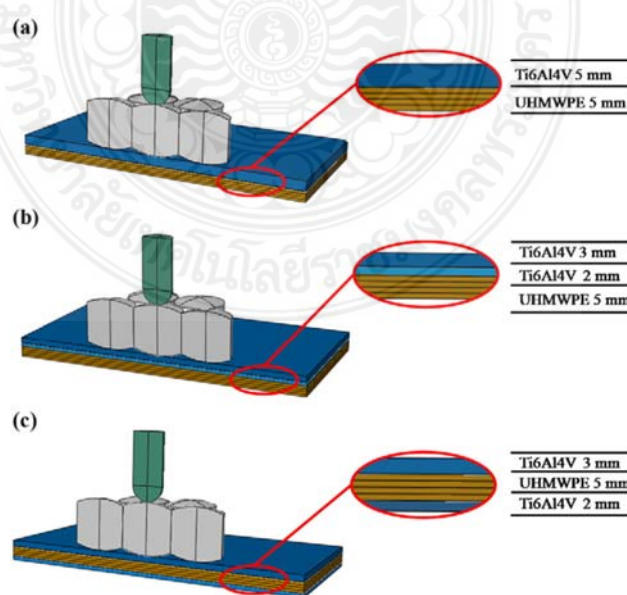
Jiusti และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาาระบบชุดเกราะ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  บรรจุวัสดุในช่องว่างที่ใช้ในการศึกษานี้คือ เรซินอีพ็อกซีและ Geopolymer ที่มีผลึกควอตซ์ Geopolymer มีสัดส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  ที่ 2.4, อัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 1.3, และอัตราส่วน  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  เท่ากับ 7.8 จากผลการทดลองวัสดุทั้ง 2 ชนิดที่เติมลงในช่องว่างสรุปได้ว่าอีพ็อกซีมีประสิทธิภาพดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างหลังการทดสอบยิงของอีพ็อกซี [22]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างหลังการทดสอบยิงของ Geopolymer-filled [22]



รูปที่ 2.10 รูปแบบของชิ้นงานที่ทดสอบ (a) Con. 1, (b) Con. 2 and (c) Con. 3 [22]

S. Feli และคณะ [23] ได้ทำการวิเคราะห์รูปแบบใหม่ของการเจาะของซีปนาวูธในการทำลาย เป้าหมาย โลหะเซรามิกส์น้ำหนักเบาใช้ข้อมูลจากแบบจำลอง Zaera และ Sanchez-Galvez สำหรับ เซรามิกส์ที่วิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ โดยใช้กระสุน 7.62 AP ยาว 25.4 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 7.62 มิลลิเมตร ผลลัพธ์จากการทดลองพบว่า ผลการวิเคราะห์มีรูปแบบสอดคล้องกับผลการ ทดลอง Runqiang Chi และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาความเร็วกระแทก สำหรับเกราะเซรามิกส์/โลหะ ด้วยกระสุน 12x61.5 มิลลิเมตร โดยการจำลองเชิงตัวเลข จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่ เสนอสอดคล้องกับการจำลองเชิงตัวเลขที่ได้รับการยืนยันโดยการทดลอง Weilan Liu และคณะ [25- 26] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพสูงของเกราะเซรามิกส์คอมโพสิตป้องกันกระสุน โดยแผ่นเซรามิกส์จะ อยู่ด้านหน้าแรกสุดเพื่อทำลายหัวกระสุน และชั้นต่อมาคือ UHMWPE (ชั้นกลาง) ชั้นสุดท้ายคือ  $Ti_6Al_4V$  แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และอลูมิเนียมอัลลอยด์ เป็นชั้นที่สามตามลำดับ และยังได้ทำการทดลองอีก รูปแบบหนึ่งคือ แผ่นเซรามิกส์จะอยู่ด้านหน้าแรกสุดเพื่อทำลายหัวกระสุน ชั้นต่อมาคือ  $Ti_6Al_4V$  และ ต่อมาเป็น UHMWPE และชั้นสุดท้ายคือ  $Ti_6Al_4V$  โดยการจำลองเชิงตัวเลขใน ABAQUS/Explicit ใช้ใน การวิเคราะห์กระบวนการเจาะ และทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-662F โดยกระสุนเจาะเกราะ 12.7 มิลลิเมตร

Ian G. Crouch และคณะ [27] ได้ศึกษาพฤติกรรมของกระสุน เหล็กอ่อนกับเกราะเซรามิกส์ด้วย โบรอนคาร์ไบด์ ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้ ANSYS AUTODYN และทดลองใช้กระสุนขนาด 20.0 มิลลิเมตร และ 5.7 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อความหนาของเซรามิกส์สูง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการเจาะ ของกระสุนสามารถเจาะได้น้อยลงและเมื่อเสริมชั้น Polyethylene (UHMWPE) เกรด SR3124 ดูดซับ พลังงานทำให้ความเร็วกระสุนลดลง P.J. Hazell และคณะ [28] ได้ทำการวิเคราะห์กระสุนและการ คำนวณเพื่อคิดผลกระทบของหัวกระสุนจากกระสุนเจาะเกราะ 7.62X51 มิลลิเมตร และอีกแบบเป็น กระสุนดัดแปลงที่ถอดส่วนด้านหน้าของเสื่อกระสุนปืน วัสดุที่ใช้ในการทดสอบคือ Sintox FA/อลูมินา, ซิลิกอนคาร์ไบด์ และอลูมิเนียมอัลลอยด์ Al 6082-T651 เป็นแผ่นรองหลัง การวิเคราะห์เชิงตัวเลขใช้ ANSYS AUTODYN ผลทดสอบพบว่าเมื่อถอดปลายกระสุนออกทำให้ประสิทธิภาพการเจาะเกราะ ลดลงและจากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์เห็นได้ชัดว่ากระสุนปืนแบบมีปลายกระสุนจะทำหน้าที่ ทำลายซิลิกอนคาร์ไบด์ได้ดี

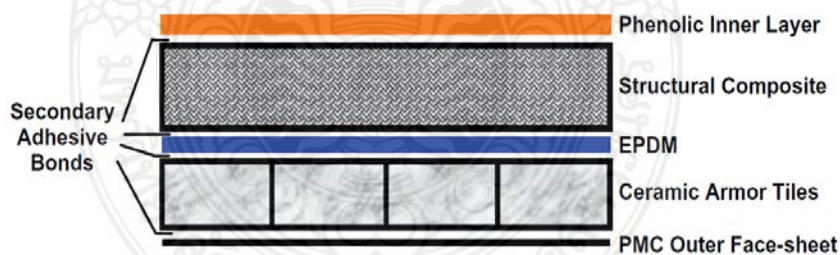


รูปที่ 2.11 รูปแบบกระสุนที่ใช้ในการทดสอบ [28]

Qun Wang และคณะ [29] ได้ทำการออกแบบและลักษณะของชุดเกราะไฮบริดรุ่นใหม่ที่มีน้ำหนักเบา ประกอบด้วยผงเซรามิกอัลูมินา, Ultrahigh Polyethylene (UHMWPE) และ Ti-6Al-4V (TC4) ชุดเกราะไฮบริดมีขนาด 150x150x28 มิลลิเมตร ขนาดกระสุนเจาะเกราะ (AP) 10.8 มิลลิเมตร และ 12.7 มิลลิเมตร ทดสอบภายใต้มาตรฐาน MIL-STD-662F การทดลองพบว่าเกราะคอมโพสิตนวัตกรรมใหม่มีการดูดซับพลังงานที่ดี เผยให้เห็นว่าชุดเกราะที่พัฒนาแล้วสามารถป้องกันกระสุนปืนพร้อมกับมีน้ำหนักที่เบา

J. Lopez-Puente และคณะ [30] ทำการศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นกาวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเกราะอลูมิเนียม ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยการจำลองเชิงตัวเลข แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านทานการปะทะของกระสุนนั้นเกี่ยวข้องกับความหนาของกาว คือ ความเครียดเฉือนในกาวจะลดลงด้วยชั้นกาวที่หนา แผ่นเซรามิกจะล่อนและหลุดออกจากแผ่นรองด้านหลัง โดยต้องให้แผ่นเซรามิกติดอยู่กับแผ่นรองกระแทกหลังจากกระสุนวิ่งเข้าปะทะ กระสุนจะเข้าปะทะและถ่ายโอนแรงและพลังงานจากแผ่นเซรามิกไปยังแผ่นรองด้านหลัง ดังนั้นความหนาของชั้นกาวที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของชุดเกราะจะอยู่ที่ 0.3 มิลลิเมตร

M. Grujicic และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกาวในซีปนาวุธ/โครงสร้างของเกราะเซรามิกสโพลีเมอร์เมทริกซ์ผสม ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้กระสุน 7.62 มิลลิเมตร FMJ AP โดยการทดสอบถูกตรวจสอบภายใต้: (a) อัตราไหลสูง และ (ข) อัตราการไหลต่ำ สมรรถนะในการป้องกันซีปนาวุธและความทนทานของชุดเกราะไฮบริดได้มีการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญโดยการปรับเปลี่ยนสมบัติเชิงกลของชั้นกาวอย่างเหมาะสม

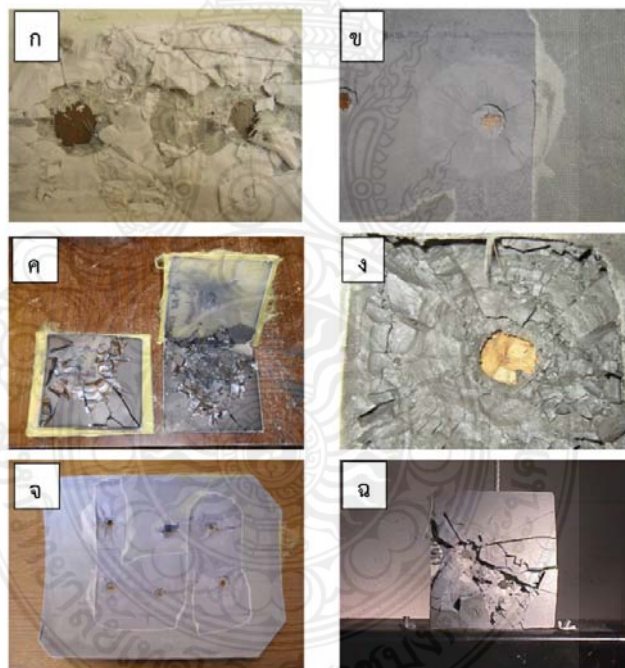


รูปที่ 2.12 วัสดุแต่ละชั้นของเกราะคอมโพสิตอเนกประสงค์ [31]

M.B. Karamis และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุผสมเนื้อโลหะ 2 ชนิด คือ AA 5083 และ AA 6063 ที่มีส่วนเสริมแรงเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาด 250-500 ไมครอน โดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ 45, 30 และร้อยละ 15 ตามลำดับ แล้วทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Squeeze Casting โดยการใส่ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ลงในแม่พิมพ์จากนั้นนำโลหะอลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์แล้วทำการอัดเป็นแผ่นกลมให้มีความหนา 2 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 14 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้ผงซิลิกอนคาร์ไบด์กระจายตัวในเนื้อโลหะอลูมิเนียม ทำการทดสอบด้วยกระสุนปืน 7.62 มิลลิเมตร แล้วทำ

การสังเกตกลไกการแตกและกลไกการเปลี่ยนรูปของวัสดุผสมเนื้อโลหะและกระสุนปืน พบว่าระบบของกลไกของพลังงานจะลดลงเนื่องจากแรงเสียดทาน ปัจจัยคือ กระสุนผ่านความลึก เมื่อลูกกระสุนปืนวิ่งมาด้วยความเร็วสูง และเกราะจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และลักษณะของการเสียดสีจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งจะทำให้พลังงานจลน์ลดลง

D.P. Goncalves และคณะ [33] ได้ทำการการวิเคราะห์และการตรวจสอบผลกระทบที่ปืนอาวุธบนเซรามิกส์/โลหะคอมโพสิตเกราะ ความหนาแผ่นเซรามิกส์แผ่นฐาน 5x5 เซนติเมตร ความหนาต่างกัน 7.3, 9.3 และ 11.3 มิลลิเมตร โหมดแบบจำลองช่วยในการคำนวณการสูญเสียมวลกระสุน ความเร็ว ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและใช้กระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ทำการทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-662E จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผลการทดลองกับผลทางทฤษฎีตรงกัน พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ได้แก่ ลักษณะของกระสุน ความเร็วกระสุนทางกล สมบัติของแผ่นเซรามิกส์และโลหะ สามารถสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นเซรามิกส์มีบทบาทสำคัญและเป็นพื้นฐานในการลดหรือสูญเสียพลังงานกระสุนจากกระสุน



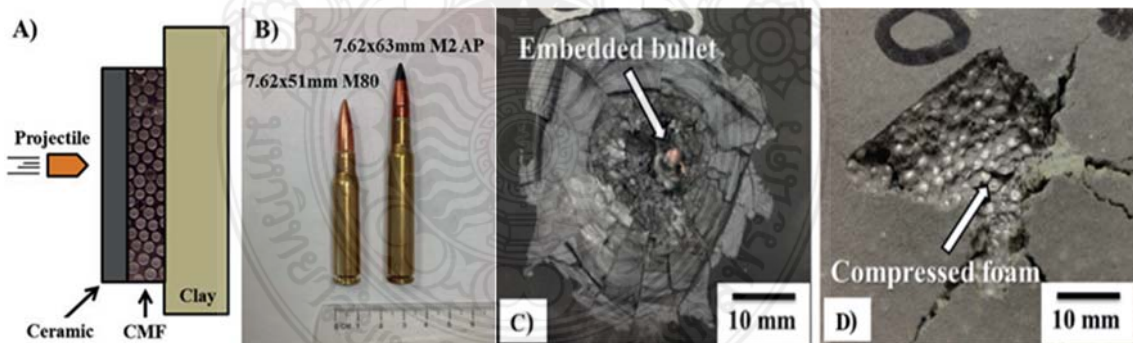
**รูปที่ 2.13** การแตกหักของเซรามิกส์หลังจากผลกระทบของกระสุน (ก) AM2 Ceramics, 7.62 x 63 mm AP M2 (Some Fragments Were Removed) (ข) RBSC Ceramics, 7.62x54 mm RLPS (ค) Dense SiC Ceramics, 7.62x51 mm NATO Ball FMJ (ง) Biomorphic RBSC, 7.62x63 mm AP M2 (จ) ASN Ceramics, 7.62x51 mm NATO Ball FMJ (ฉ) AS Ceramics, 7.62 x 51 mm NATO Ball FMJ, 2 Rounds to 1 Tile 110x110 mm [34]

Eugene Medvedovski และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเกราะเซรามิกส์ ศึกษาความหนาแน่นเซรามิกส์อลูมินาที่เป็นเนื้อเดียวกันที่มีส่วนผสมของ  $Al_2O_3$  โดยใช้กระสุน 7.62x63



มิลลิเมตร AP M2, 7.62x54 มิลลิเมตร RLPS และชนิดอื่น ๆ โดยทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 0101.03 และ NIJ 0101.04 ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของเกราะเซรามิกส์มีความแตกต่างกัน เช่น เซรามิกส์จากอลูมินาที่เป็นเนื้อเดียวกันและน้ำหนักลดลง, ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีความหนาแน่นเป็นเนื้อเดียวกันและเซรามิกส์โบรอนคาร์ไบด์ ประสิทธิภาพถูกพิจารณาจากโครงสร้างและสมบัติของเซรามิกส์ เช่นเดียวกับคุณสมบัติของระบบเกราะมีเพียงคุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวข้องทั้งหมด การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ความหนาแน่นของเซรามิกส์ที่เป็นเนื้อเดียวกัน แสดงให้เห็นว่ามีน้ำหนักเบา ราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพ

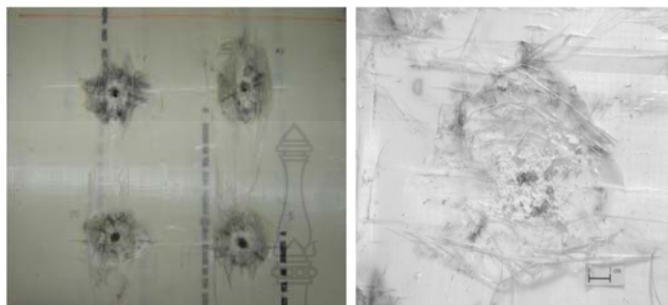
Mustafa Ubeyli และคณะ [35] การศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมของซีปนาวุธความเร็วต่ำของ  $Al_2O_3/Al2024$  (อลูมินา/อลูมิเนียม) กับเกราะอลูมินาคอมโพสิตและอัลลอยด์  $Al2024$  ได้รับเลือกให้ใช้เป็นชั้นด้านหน้าและด้านหลังตามลำดับ แผ่นอลูมินามีขนาด 50x50 มิลลิเมตร มีความหนาต่างกันที่ 4, 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร โดยใช้กระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร M61 type AP มีการตรวจสอบพื้นผิวแตกหักเพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากผลการทดสอบพบว่า การใช้อลูมินาเป็นชั้นหน้าและ  $Al2024-T6$  เป็นชั้นรองในคอมโพสิตด้วยอัตราส่วนอลูมินา/อลูมิเนียมที่มีความหนาอยู่ในช่วง 1-3 ทำให้เกราะมีน้ำหนักเบาประมาณร้อยละ 25 เมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่าคอมโพสิตที่ยึดติดกันด้วยยูรีเทน มีความต้านทานมากขึ้น ดังนั้นการใช้ยูรีเทนจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับคลื่นที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการกระแทกเนื่องจากความเหนียวที่เหนือกว่า



รูปที่ 2.14 A) ชั้นเกราะป้องกันกระสุน B) กระสุน 7.62x63 mm M2 AP และกระสุน 7.62x51 mm M 80 C) ผลจากการวิ่งเข้าปะทะของกระสุนด้านหน้า D) ด้านหลังแผ่นเกราะกันกระสุน [36]

Matias Garcia-Avila และคณะ [36] ได้ศึกษาระบบเกราะคอมโพสิตโลหะแผ่นโฟม (Steel-Composite Metal Foams (S-S CMF)) ร่วมกับแผ่นเซรามิกส์ โดยแผ่นเซรามิกส์จะอยู่ด้านหน้าแรกสุดเพื่อทำลายหัวกระสุน และชั้นต่อมาคือคอมโพสิตโลหะแผ่นโฟม ดังรูปที่ 2.14 ทำการทดสอบภายใต้มาตรฐานสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (NIJ) ด้วยรหัสมาตรฐานการทดสอบ 0101.06 โดยกระสุน

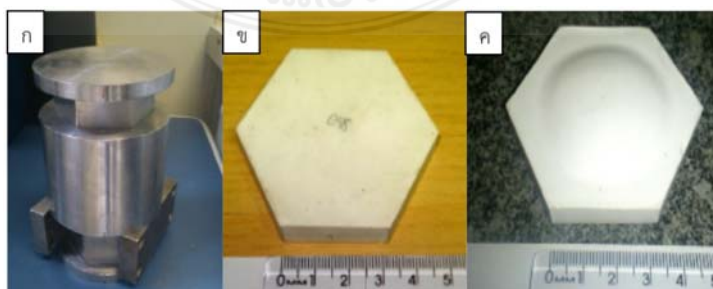
7.62x51 มิลลิเมตร M80 (Type III) และ 7.62x63 มิลลิเมตร M2 เจาะเกราะ (AP) (ประเภท IV) ที่มีการยิงหลายสถานการณ์ ผลที่ได้คือเกราะสามารถต้านทานกระสุนได้ในระดับสามและสี่ ดูดซับพลังงานที่สูงกว่าเดิม 3 เท่า จากความเร็วหัวกระสุน 870 เมตร/วินาที



รูปที่ 2.15 ผลหลังจากการทดสอบยิง [36]

Sudhakar และคณะ [37] ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพด้านทานการสึกหรอและความต้านทานการเจาะทะลุด้วยอลูมิเนียมเกรด AA7075 ในการศึกษาเบื้องต้น พบว่าสารเคลือบผิวและชั้นของโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีอนุภาคเซรามิกส์ ช่วยเพิ่มความต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน นอกจากนี้ในหมู่โลหะผสมอลูมิเนียม, อลูมิเนียม 7075 จัดว่ามีความแข็งแรงสูง มีน้ำหนักเบา จากการปรับปรุงส่วนผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านทานการสึกหรอ พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีความสม่ำเสมอซึ่งประกอบด้วยอนุภาคคาร์ไบด์ จากการเติมผงโบรอนคาร์ไบด์ลงใน อลูมิเนียมเกรด AA7075 ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าขนาดอนุภาคของโบรอนคาร์ไบด์ส่งผลกระทบต่อความต้านทานการสึกหรอของพื้นผิวและความต้านทานการสึกหรอสูงสุด ที่ขนาดอนุภาค 30 ไมโครเมตร

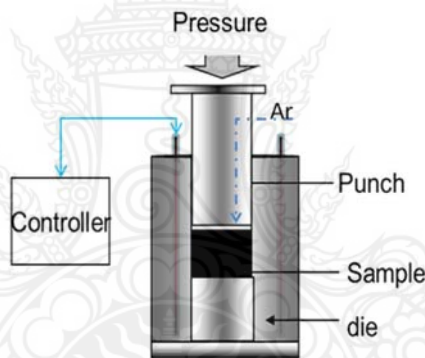
Fábio de Oliveira Braga, Fernanda Santos da Luz [38] ได้ทำศึกษาผลกระทบรูปร่างของแผ่นเซรามิกส์ในชุดแผ่นเกราะหลายชั้น โดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยทำชิ้นงานแผ่นเกราะทำจากอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ที่มีไนโตรเจน ( $Nb_2O_5$ ) ร้อยละ 4 กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้การอัดขึ้นรูปมี 2 รูปแบบ คือ แบบหน้าเรียบและแบบนูน หลังจากนั้นทำการนำชิ้นงานเข้าเตาเผา การอบแห้งที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}C$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และปรับความร้อนที่อุณหภูมิ  $158^{\circ}C$  สำหรับการขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ  $1,400^{\circ}C$



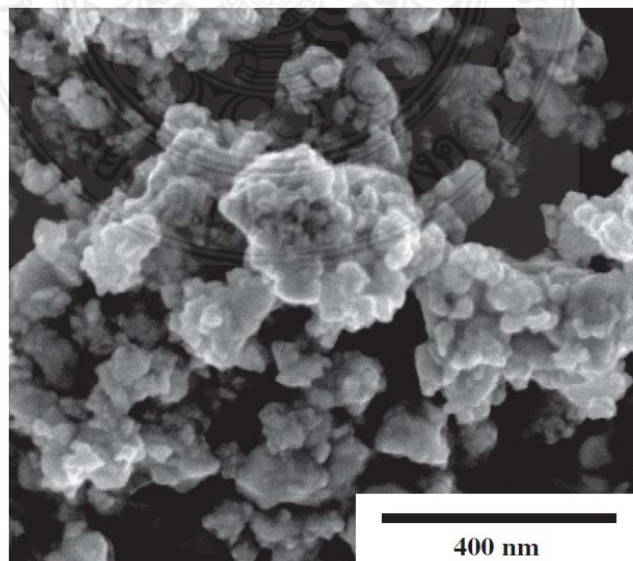
รูปที่ 2.16 (ก) แม่พิมพ์เหล็กหกเหลี่ยมอัดขึ้นรูป (ข) แผ่นเซรามิกส์แบบหน้าเรียบ (ค) แผ่นเซรามิกส์แบบเรียบหน้านูน [39]

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 (2008) ใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร และ 5.56 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบชุดเกราะแบบหน้าทูน สามารถป้องกันกระสุนและสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่า ร้อยละ 19 ชุดเกราะแบบหน้าเรียบ โดยทดสอบผ่านมาตรฐาน NIJ ระดับ 3

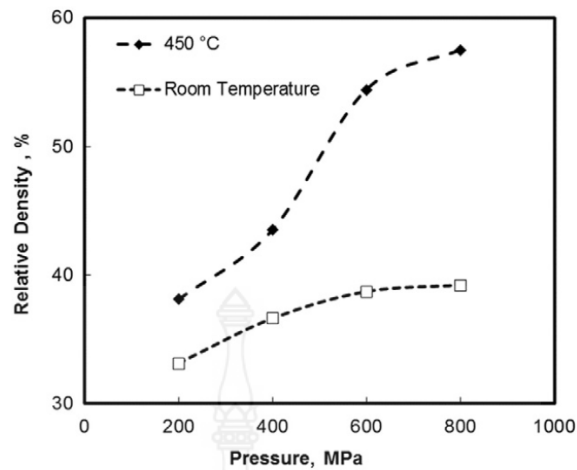
Xu Wang และคณะ [39] ได้ทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ Green compact และความหนาแน่นหลังการเผา Green compact วัสดุนาโนถูกใช้ในการทดสอบ การอัดถูกดำเนินการโดยใช้การกดแบบแกนเดียว ผงถูกอัดเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร น้ำหนัก 3 กรัม ในระหว่างการอัดผงจะถูกให้ความร้อน ชั้นส่วนแม่พิมพ์เหล็กสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 500 °C จะได้ Green compact ที่มีความหนาแน่นสูง ได้ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 °C ถึง 500 °C และภายใต้แรงกดอัด 200–800 MPa หลังจากการอัดตัวอย่างจะมีความหนาแน่นของ Green compact ที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 2.18 แสดงสัณฐานวิทยาทั่วไปของผง มีขนาดการรวมตัวกันจาก 50 ถึง 500 นาโนเมตร ขนาดผลึกเฉลี่ยถูกกำหนดเป็น 12 นาโนเมตร โดยใช้ X-ray diffraction (XRD)



รูปที่ 2.17 เทคนิคการบดอัด Green compact ที่มีความหนาแน่นสูง [39]



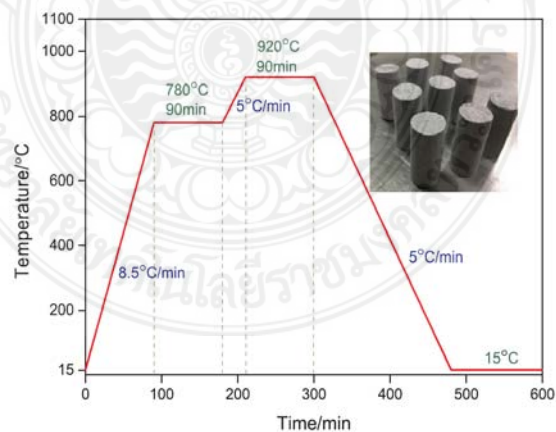
รูปที่ 2.18 ลักษณะทางกายภาพของผงที่ได้จากเครื่อง SEM [39]



รูปที่ 2.19 ความหนาแน่นเทียบกับความดันที่ใช้ที่อุณหภูมิห้องและที่ 450°C [39]

สำหรับการอัดที่ 450 °C ความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 58 การทดลองเผาพูนิกภายใต้เงื่อนไขการเผาเดียวกันที่ 1,100 °C นาน 1 ชั่วโมง Green compact จะมีความหนาแน่นในแนวโน้มที่ตีด้วยความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 หลังถูกเผาพูนิกจะมีความหนาแน่นถึงร้อยละ 98 ด้วยขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 585 นาโนเมตร

H.T. Gao และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาผลการรวมของใยแก้วและผงอลูมิเนียมต่อสมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิกส์วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ตะกรันจากเตาถูถูกเลือกเป็นวัสดุหลักและใยแก้วและผงอลูมิเนียมเป็นวัสดุเสริมแรง ที่ต้องพิจารณาองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาค สมบัติวัสดุ แรงอัดและความหนาแน่นของแก้วเซรามิกส์ เวลาการอัดขึ้นรูป หลังจากนั้นทำการเผาพูนิกด้วยโปรแกรมตามรูปที่ 2.20 ในการศึกษาครั้งนี้จะได้เซรามิกส์แก้วที่มีความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวสูง

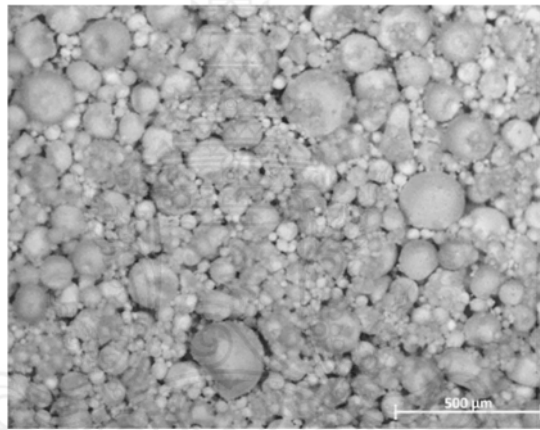


รูปที่ 2.20 โปรแกรมการเผาพูนิกของเซรามิกส์แก้ว [40]

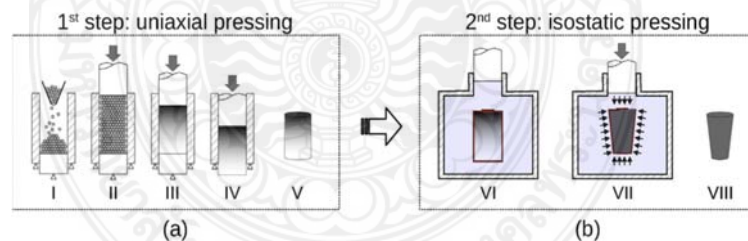
C. C. Melo และคณะ [41] ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการจำลองการอัดแบบผงด้วยการอัดแกนเดียวแบบ Isostatic การกดแกนเดียวทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อันเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างผนังแม่พิมพ์และผง วัสดุที่ใช้ใน



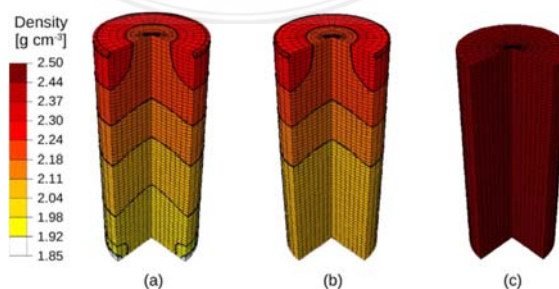
การศึกษาผงอลูมินา  $Al_2O_3$  ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 75 ไมครอน ดังแสดงรูปที่ 2.21 รูปร่างของ Green compact วัตต์ได้จากการทดลองและทำนายโดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากกดแบบ Isostatic แสดงในรูปที่ 2.22 ความแตกต่างระหว่างการทดลองและการจำลองความสูงของส่วนที่ถูกอัดแบบ Isostatically คือ 1.23 มิลลิเมตร (ร้อยละ 1.0 ของการทดลองความสูง) และ 2.99 มิลลิเมตร ที่ 200 MPa (ร้อยละ 2.6 ของการทดลองความสูง) เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดที่วัดได้และคาดการณ์ในการอัดส่วนหนึ่งมีความแตกต่างของ 0.05 มิลลิเมตร (ร้อยละ 0.2 ของการทดลองเส้นผ่านศูนย์กลาง) เมื่อกดที่ 25 MPa และ 0.40 มิลลิเมตร (ร้อยละ 1.7 ของการทดลองเส้นผ่านศูนย์กลาง) ที่ 200 MPa เมื่อกดที่ 25 MPa และ 0.28 มิลลิเมตร (ร้อยละ 0.3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางการทดลอง) ที่ 200 MPa การวัดและผลลัพธ์ FEA ดังรูปที่ 2.23 ผลอยู่ในเกณฑ์ดี



รูปที่ 2.21 ผงเซรามิกส์ที่ศึกษาซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ Zeiss Stemi 2000-C [41]



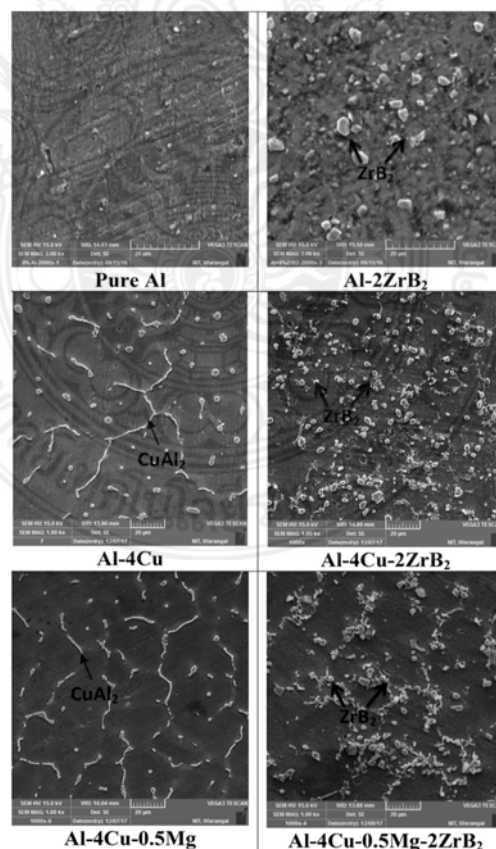
รูปที่ 2.22 ขั้นตอนการทดลอง: (a) การกดแบบแกนเดียว และ (b) การกดแบบไม่คงที่ [41]



รูปที่ 2.23 ความหนาแน่นหลังจากอัด (a) การกดแบบปิด (b) กดอัดแบบคงที่ 25 MPa และ (c) 200 MPa [41]

การวัดการกระจายความหนาแน่นใน Green compact สามารถช่วยให้สามารถตรวจสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขให้สอดคล้องกับการบดอัดแบบผงและถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ขั้นตอนการทดลองนำเสนอพิสูจน์แล้วว่าเป็นการประเมินทางอ้อมของการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์และง่ายขึ้นกว่าขั้นตอนอื่น ๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดของพารามิเตอร์ที่ได้รับจากขั้นตอนที่เสนอนั้นถูกต้อง มีความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดลอง เช่น พฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นและพารามิเตอร์ที่ไม่ยืดหยุ่นถือว่าเป็นค่าคงที่ระหว่างการบดอัดผงหรือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผนังแม่พิมพ์และผง โดยสมมติฐานให้เป็นค่าคงที่

S. M. Y. Kaku และคณะ [42] ได้ทำการศึกษาผลของการเสียรูปต่อคุณสมบัติของผงอลูมิเนียมอัลลอยด์  $ZrB_2$  คอมโพสิตโลหะ วัสดุที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบ Al, Al-2ZrB<sub>2</sub>, Al-4Cu, Al-4Cu-0.5Mg, Al-4Cu-2ZrB<sub>2</sub> และ Al-4Cu-0.5Mg-0.5Mg-2ZrB<sub>2</sub> ชิ้นงานถูกอัดในแม่พิมพ์เหล็กกล้า Green compacts ที่อัดแล้ว ถูกเผาผนึกในเตา Swam equip, Chennai, ประเทศอินเดีย ในระหว่างการเผาซินเทอร์จะถูกทำให้ร้อนที่ 550°C ที่อัตรา 10°C/min และให้เผาที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะระบายความร้อนออกจากเตาเผาผนึก การไหลของก๊าซอาร์กอนจะคงที่ในระหว่างกระบวนการซินเทอร์จนถึงอุณหภูมิห้อง ความหนาแน่นของคอมโพสิตนั้นวัดโดยใช้หลักการอาร์คิมิดีสด้วยความแม่นยำร้อยละ 1



รูปที่ 2.24 รูปของวัสดุอลูมิเนียมคอมโพสิตอัลลอยด์ที่มีความหนาแน่นสูงที่ถ่ายจากเครื่อง SEM [42]

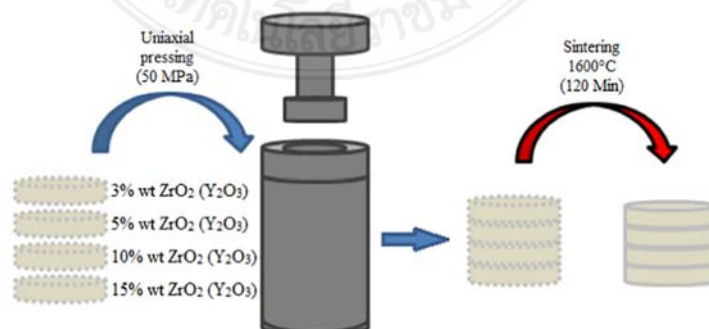
จากผลลัพธ์คุณสมบัติของคอมโพสิตที่ปรับปรุงด้วยการผสมและการเสริมแรง  $ZrB_2$  เฟส  $Al_2Cu$  เกิดขึ้นเป็นผลของการเจือ  $Cu$  กับอลูมิเนียมเมทริกซ์ ความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย  $Cu$  ถึงอลูมิเนียมเมทริกซ์  $Al-4Cu-0.5Mg-2 ZrB_2$  ผลลัพธ์มีค่าสูงกว่าความแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตชนิดอื่นๆ ปริมาณของความเครียดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น องค์ประกอบความเค้นที่ต้องการในการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นเมื่อผสมเพิ่ม  $Mg$  และยังมีเสริมแรงเซรามิกส์ การเพิ่มอนุภาค  $ZrB_2$  ลงในเมทริกซ์อัลลอยด์ ความแข็งของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น คอมโพสิต  $Al-4Cu-0.5 Mg-2 ZrB_2$  มีความแข็งสูงสุด  $132.5 \text{ Hv}$  เมื่อหนาแน่นเป็นร้อยละ  $97.51$

Technical specifications of the starting materials.

Characteristics	$Al_2O_3$	Y-TZP = $ZrO_2$ (3 mol% $Y_2O_3$ )
Manufacturer	ALMATIS*: CT-3000 SG	TOSOH* ZPex
Average particle size (nm)	300	40
Specific surface area ( $m^2/g$ )	8	13
Density ( $g/cm^3$ )	3.98	6.05
Thermal expansion coefficient (CTE) ( $^{\circ}C^{-1}$ )	$8.5 \times 10^{-6}$	$10.5 \times 10^{-6}$

รูปที่ 2.25 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ศึกษา [43]

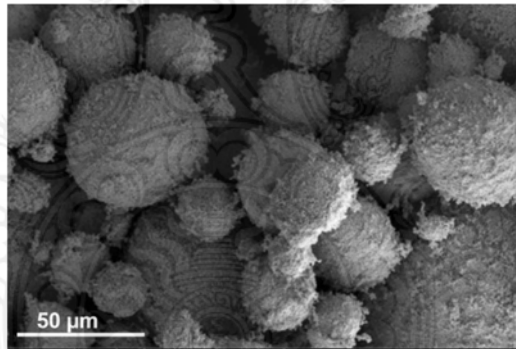
Claudinei dos Santos และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาคอมโพสิตเซรามิกส์ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเฟสเดียว ในงานนี้ผงที่ใช้ศึกษาคือ  $Al_2O_3$  และผง Y-TZP ขนาดนาโน คุณสมบัติดังรูปที่ 2.25 ผงนาโนขนาด  $ZrO_2$  (ร้อยละ 3 mol  $Y_2O_3$ ) ถูกเผาที่  $900^{\circ}C$  เป็นเวลา 60 นาที ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) HITACHI TM 3000 ภาพตัดขวางถูกอัดและให้ความร้อนที่  $1,450^{\circ}C$  เป็นเวลา 20 นาที ก่อนที่จะมีการตรวจสอบ SEM พื้นผิวตัวอย่างชิ้นงานถูกเคลือบด้วยทองคำ ทำการหาขนาดของเกรนของตัวอย่างชิ้นงานเผาผนึก การใช้ซอฟต์แวร์ Image J เพื่อประมวลผล



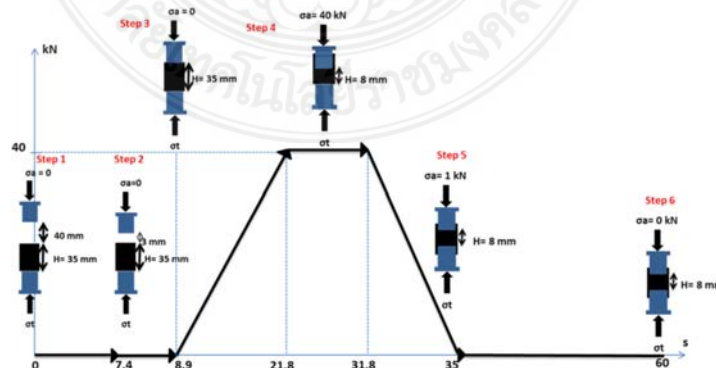
รูปที่ 2.26 กระบวนการอัดที่ใช้ในการพัฒนาคอมโพสิต  $Al_2O_3$  ( $ZrO_2$ ) ที่มีการไล่ระดับสีทำงาน [43]

การพัฒนาคอมโพสิตเซรามิกส์แบบชั้นกับเซรามิกส์  $Al_2O_3$  เสริมด้วยวัสดุที่แตกต่างกันของ  $ZrO_2$  ( $Y_2O_3$ ) ขนาดอนุภาคนาโน มีความหนาแน่นสูงกว่าร้อยละ 98 ความแข็งที่แตกต่างกันระหว่าง 1,750 และ 1,540 HV และความทนทานการแตกหักระหว่าง 3.2 และ 4.8  $MPa \cdot m^{1/2}$  ซึ่งแตกต่างกันไประหว่างชั้นที่ 3 และร้อยละ 15wt ในสี่ชั้นที่แตกต่างกัน หลักการเพิ่มขึ้นความเหนียวแตกหักด้วยการเพิ่ม  $ZrO_2$  ความเค้นที่เกิดจากความร้อนไม่ตรงกันระหว่าง  $Al_2O_3$  และ  $ZrO_2$  การศึกษาอาจทำหน้าที่เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยความซับซ้อนของรูปทรงเรขาคณิต การแปรผันขององค์ประกอบและการประมวลผลพารามิเตอร์ สมบัติที่ไม่ได้รับการประเมินในครั้งนี่คือการศึกษารูพรุน โมดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานรอยแตก การแพร่กระจายการนำความร้อนหรือไฟฟ้า

Ousseini Marou Alzouma และคณะ [44] ได้ทำการศึกษาความหนาของน้ำมันหล่อลื่นที่ผนังแม่พิมพ์สำหรับอัดผง  $UO_2$  ที่ผ่านการอบแห้งอย่างละเอียด คือมีประมาณร้อยละ 8.5 ของ  $U_3O_8$  ผง  $UO_2$  แสดงในรูปที่ 2.27 พบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่จาก 0.5 ไมครอน ถึง 150 ไมครอน และเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของอนุภาค  $UO_2$  คือ 150 ไมครอน ระยะห่างของแกนอัดด้านบนกับค่าแรงแสดงดังรูปที่ 2.28

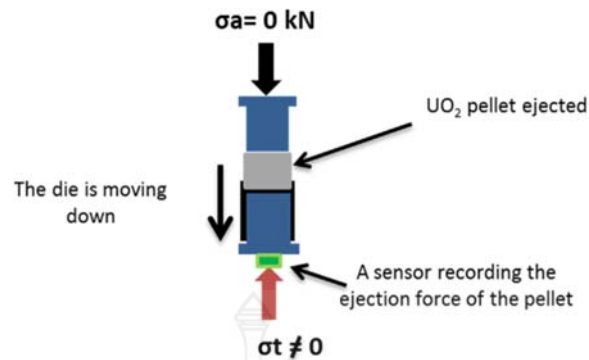


รูปที่ 2.27 อนุภาคผง  $UO_2$  สังเกตได้จากเทคโนโลยี SEM [44]



รูปที่ 2.28 ระยะห่างระหว่างส่วนบนแกนอัดและแม่พิมพ์เป็น 40 มิลลิเมตร แกนอัดด้านบนกำลังลดลงเหลือ 37 มิลลิเมตร จากจุดเริ่มต้นด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตร [44]





รูปที่ 2.29 รูปแบบของกระบวนการขึ้นรูป  $UO_2$  [44]

รูปที่ 2.29 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงส่งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของชั้นน้ำมันหล่อลื่นที่สะสมบนผนังแม่พิมพ์ (จาก 1 ชั้นถึง 3 ชั้น) อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเคลือบที่เกิดจากสารหล่อลื่นกลายเป็นความหนาเกินไป (6 ชั้น) อัตราส่วนแรงส่งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มีสารหล่อลื่นน้อย ซึ่งหมายความว่า การเคลือบหนาจะเป็นอุปสรรคต่อการการส่งกำลังระหว่างแกนอัดบนและแกนอัดล่าง ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สอดคล้องกับจำนวนชั้นของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละประเภทแสดงในรูปที่ 2.30

Approximate values of lubricant quantity corresponding to each number of lubricant layers.

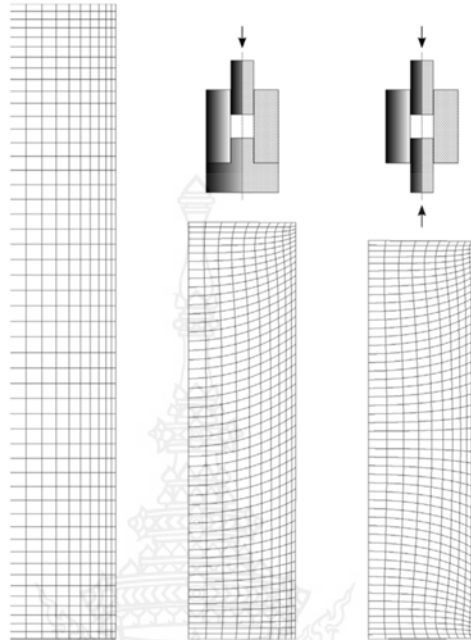
Number of layers	1 layer	3 layers	6 layers
Total quantity of lubricant (mg)	1	3	6
Quantity of lubricant per millimeter square of die wall surface (79 mm <sup>2</sup> ) (mg/mm <sup>2</sup> )	$12.7 \times 10^{-3}$	$38 \times 10^{-3}$	$76 \times 10^{-3}$

รูปที่ 2.30 ตารางผลการเก็บค่า [44]

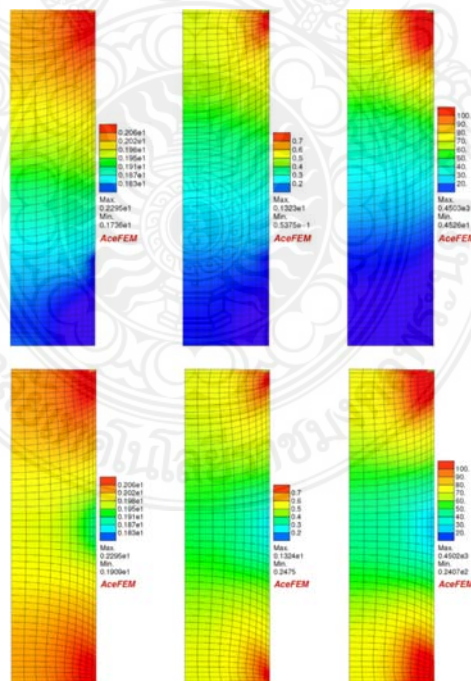
การศึกษาผลกระทบของปริมาณสารหล่อลื่นภายนอกสำหรับผง  $UO_2$  การอัดและคุณสมบัติของ Green compact ที่สอดคล้องกัน (สอดคล้องกับข้อกำหนดก่อนการเผา) ไม่มีสารหล่อลื่นผสมในผง เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของแนวทางนี้ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณหรือจำนวนชั้นภายนอกที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นบนผนังแม่พิมพ์จะเป็นผลต่อดัชนีแรงเสียดทานและแรงขับในระหว่างการกดอัด (ข้อบกพร่องของพื้นผิวขึ้นกับความแข็งแรงเชิงกล) ของ Green compact ยังสามารถรับผลกระทบจากปริมาณสารหล่อลื่น ดังนั้นปริมาณและความหนาของสารหล่อลื่นบนผนังแม่พิมพ์จะต้องปรับให้เหมาะสมเพื่อให้มั่นใจว่าโหมดการหล่อลื่นแบบผสมมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับโหมดการหล่อลื่นที่ดีขึ้นในกรณีศึกษา

S. Stupkiewicz และคณะ [45] ทำการจำลองกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการอัดแบบเย็นของผงเซรามิกสีเขียว การจำลองที่ดำเนินการด้วยตัวแปลงขนาดเล็กและขนาดใหญ่ของโมเดล อิลาสโตพลาสติกแบบคู่ที่นำเสนอในส่วนที่ผ่านมา การเสียรูปแบบแกนเดียวจากการกดอัดแกนเดี่ยวและสอง

แกนในแม่พิมพ์ที่มีแรงเสียดทาน ในทุกกรณีการจำลองได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง บางอย่างที่มีอยู่แล้วและอื่นๆ ดำเนินการสำหรับการศึกษาปัจจุบัน

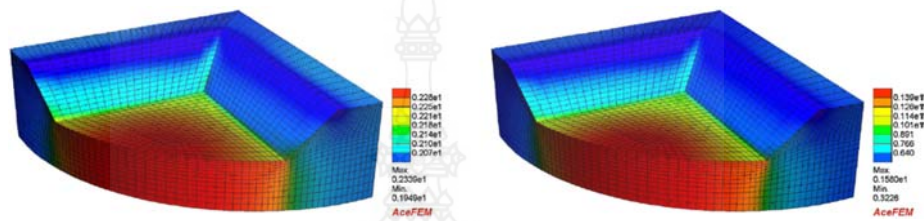


รูปที่ 2.31 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปอลูมิเนียมแบบอัดแกนเดียวและแบบอัดแกนคู่ที่มีแรงเสียดทานด้วยค่าสัมประสิทธิ์ได้เท่ากับ 0.4 [45]

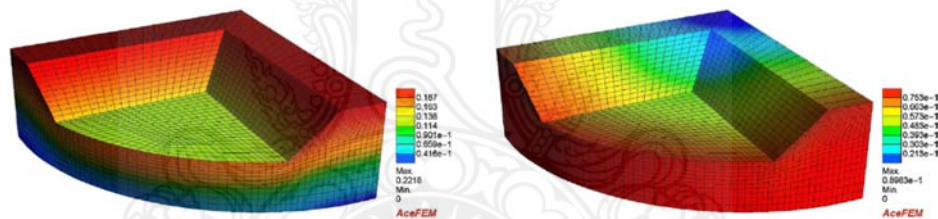


รูปที่ 2.32 การกระจายของความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม., ซ้าย), การเชื่อมโยงตอกัน (MPa, กลาง), โมดูลัสความยืดหยุ่นสัมพันธ์  $K_t$  (MPa, ขวา) สำหรับการบีบอัดแบบแกนเดียว (แถวบน) และการบีบอัดแบบสองแกน (แถวล่าง) ของอลูมินาที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.4 [45]

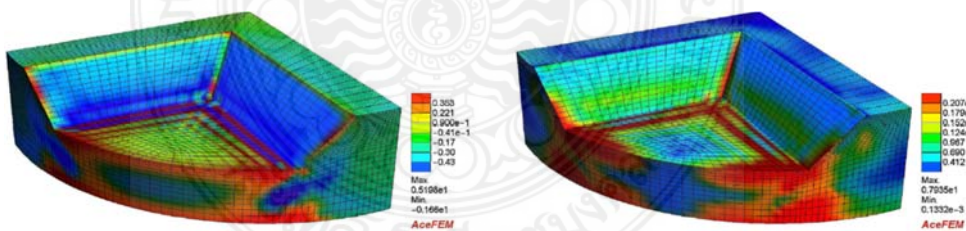
การกระจายความหนาแน่นด้วยจำลองการบีบอัดแบบเย็น ด้วยแกนอัดเดี่ยวของผงเซรามิกส์ลงในรูปทรงกระบอกแข็ง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 38.2 มม.) ที่มีการเสียดสีระหว่าง Powder และผนังแม่พิมพ์โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.4 ตัวอย่างของอลูมินาและอลูมิเนียมซิลิเกตถูกวิเคราะห์ด้วยความสูงเริ่มต้นที่ 113.9 มม. และ 128.5 มม. การจำลองเชิงตัวเลข (เพื่อจำลองขั้นตอนการทดลอง) ได้ดำเนินการโดยให้แรงเสียดทานแบบไม่เปลี่ยนรูปแบบ ความเครียดแกนเดียวที่สอดคล้องกับการบีบอัดที่ 3 MPa และจากนั้นให้แรงอัดในการขึ้นรูปสุดท้ายที่ 40 MPa



รูปที่ 2.33 แบบจำลองการกระจายความหนาแน่น (เป็น ก./ลบ.ซม, ซ้าย) และการเชื่อมโยงต่อกัน (เป็น MPa, ขวา) [45]



รูปที่ 2.34 การจำลองการติดคืบตัว [45]

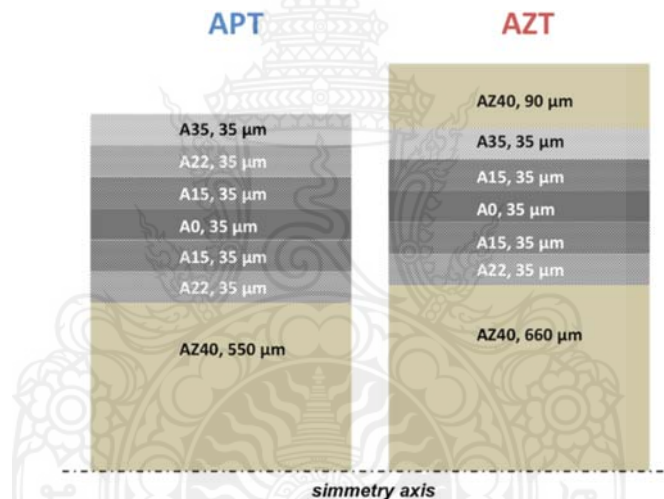


รูปที่ 2.35 แบบจำลองการกระจายความเค้นตกค้าง (เป็น MPa), ภาพซ้ายเป็นภาคตัดขวางการติดคืบตัว และภาพขวาคือส่วนเบี่ยงเบนแปรผัน [45]

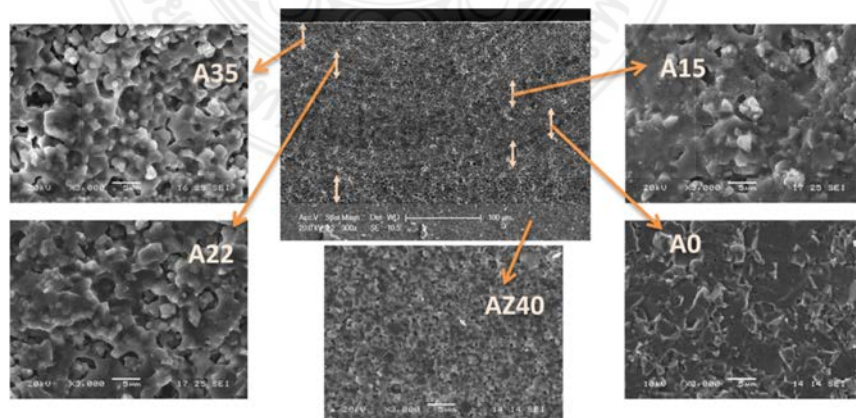
การขึ้นรูปด้วยแกนอัดแบบแกนเดี่ยวและแกนคู่ด้วยแม่พิมพ์ที่มีแรงเสียดทานผนัง การกระจายความหนาแน่นได้ดำเนินการโดยให้แรงเสียดทานแบบไม่เปลี่ยนรูปแบบความเครียด การอัดแบบแกนเดียวที่สอดคล้องกับการบีบอัดที่ 3 MPa และหลังจากนั้นให้แรงดันในการขึ้นรูปสุดท้ายที่ 40 MPa ปัญหาได้รับการแก้ไขด้วย axisymmetric นอกจากการกระจายแรงแบบ Nonuniform Mesh ที่เกิด

จากการเสียดสีที่ผนัง สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 2.31 การบดอัดที่ดีเกิดขึ้นเมื่อใช้การอัดแบบสองแกน การกระจายตัวของความหนาแน่น ความต่อเนื่องการทำงาน และโมดูลัสแบบยืดหยุ่นสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 2.32 สำหรับการบีบอัดแบบแกนเดียว (ตอนบน) และสองแกน (ล่าง) รูปที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความหนาแน่นการเกาะติดกันและความยืดหยุ่นที่ได้รับในตอนท้ายของกระบวนการขึ้นรูปนั้นมีหลายรูปแบบด้วยอุปกรณ์การอัดแบบสองแกนมากกว่าการอัดแบบแกนเดียว

Vincenzo M. Sglavo และคณะ [46] ได้ทำการศึกษาชั้นลามิเนตเซรามิกส์ที่มีการปรับแต่งความพรุนของชั้นประกอบวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (CT3000SG, Al matis – D50= 0.5  $\mu\text{m}$ )/(TZ-8YS, Tosoh – D50= 0.6  $\mu\text{m}$ ) การเผาผนึกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความร้อนที่อัด 80°C เป็นเวลา 15 นาที ภายใต้การอัดแบบแกนเดียว 30 MPa ลามิเนตของ Green compact ถูกเผาผนึกแล้วในขั้นแรกด้วยความร้อนสูงถึง 600°C ในบรรยากาศปกติ สารอินทรีย์เกิดการเผาไหม้หมด จากนั้นใช้อัตราความร้อน 4°C ต่อนาที สูงขึ้นที่ 1,550°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะระบายความร้อนภายในเตาอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.36 ผงแต่ละชนิดที่แต่ละชั้นความหนา [46]

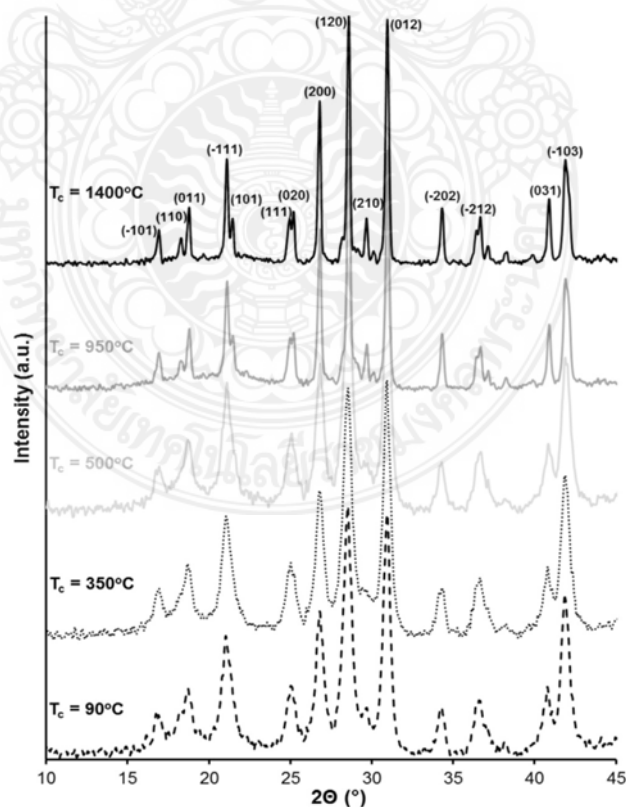


รูปที่ 2.37 รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาค APT ลามิเนตโดย SEM Micrographs [46]



รูปที่ 2.37 แสดงภาพตัดขวางของลำแสงที่ได้รับการออกแบบทางวิศวกรรมที่ตรวจพบภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบออปติคอลและแบบสแกนหนึ่งครั้ง สามารถสังเกตเห็นการยึดเกาะที่สมบูรณ์แบบในแผ่นอลูมินาที่แตกต่างกัน รูพรุนที่แตกต่างกันในชั้นอลูมินานั้นเห็นได้ชัดว่ามีรายละเอียดชัดเจน อลูมินาในชั้นที่สองจะใช้ชั้นอลูมินาคอมแพค/เซอร์โคเนียคอมแพค ชั้นที่มีรูพรุนด้านล่างทั้งสองกรณีไปรไฟล์ Biaxials Tress ที่เหลือ มีหน้าที่รับความเหนียวแตกหักที่เห็นได้ชัด ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นที่สำคัญของ Weibull modulus ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงในการตัด สิ่งที่น่าสนใจที่สุดคือการได้รูปแบบที่ดีที่สุดในตลาดที่มีรูพรุน ชี้ให้เห็นว่ามันเป็นไปได้ที่จะปรับสมบัติเชิงกลของลามิเนต Composite

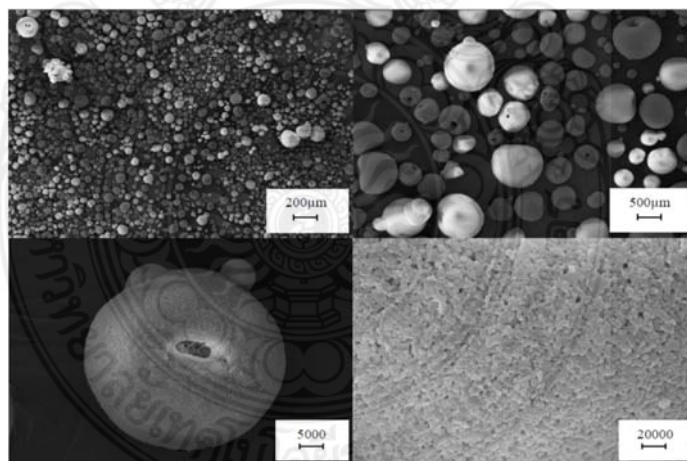
C. Babelot และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาการตกผลึกการบีบอัดและการเผาผนึกของผงแลนทานัมชนิดผง Monazite สังเคราะห์ที่ Hydrothermally โดยใช้วัสดุ  $\text{LaPO}_4$  ถูกบดละเอียดและเผาที่ 350, 500 และ 950°C สำหรับ 2 ชั่วโมง จากนั้นกดลงในแม่พิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยการกดอัดเย็นแบบแกนเดียว (64–765 MPa) Green compact ถูกเผาที่ 1,400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ ในการศึกษานี้พฤติกรรมทางความร้อนของ  $\text{LaPO}_4$  Powder ถูกตรวจสอบจาก RT ถึง 1300°C โดย TG ควบคู่กับ DSC รูปที่ 2.38 แสดงการสูญเสียมวลร้อยละ (เส้นประ) และสัญญาณ DSC (เส้นทึบ) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.38 รูปแบบ XRD ของผง  $\text{LaPO}_4$  หลังจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน [47]

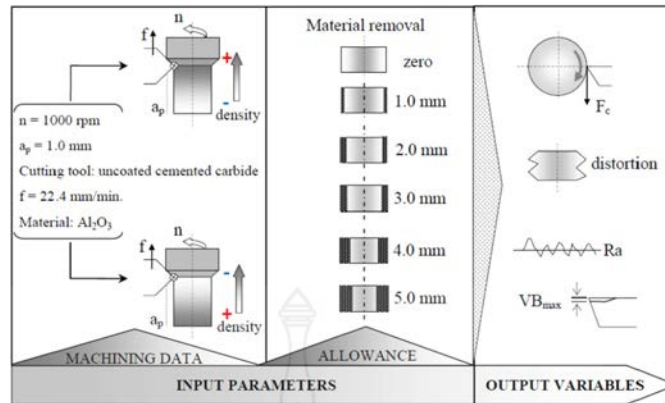
แสดงรูปแบบ XRD ของ  $\text{LaPO}_4$  Powder ที่  $\text{Tx}_1$  to  $\text{Tx}_5$  ตามลำดับ รูปแบบการเลี้ยวเบนทั้งหมด ยืนยันโครงสร้างของโมโนไซต์สำหรับตัวอย่างทั้งหมด แม้สำหรับตัวอย่างหลังจากการสังเคราะห์เฟล็กซ์ เฟล็กซ์ของเฟส Rhabdophane ไม่ได้เป็นหลักฐาน รูปแบบ XRD ของตัวอย่างถูกเผาที่  $\text{Tx}_1$ ,  $\text{Tx}_2$  และ  $\text{Tx}_3$  ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ปฏิริยาตอบสนองแบบวงกว้างบ่งบอกถึงความเป็นผลึกต่ำของวัสดุ หลังจากเผาที่  $\text{Tx}_4$  ( $950^\circ\text{C}$ ) จะมีความยืดหยุ่นมากขึ้นเนื่องจากการตกผลึก คุณสมบัติเชิงกลได้รับการวิเคราะห์ใน  $\text{LaPO}_4$  Pellets Prepared ที่พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ( $T_c = 500^\circ\text{C}$ ,  $P_{opt} = 450\text{ MPa}$ ) Interms ของ Vickers Microhardness (HV) และความเหนียวแตกหัก ( $K_{1c}$ ) โดยใช้สมการ Niihara ขั้นตอนพิเศษถูกนำมาใช้สำหรับการทำ The Determination ของโพลิตที่ใช้ที่เหมาะสม (150 กรัม) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสำหรับ H Vand K1cof  $5.7 \pm 0.1\text{ GPa}$  และ  $1.4 \pm 0.1\text{ MPa m}^{0.5}$  ตามลำดับ ข้อมูลเหล่านี้ เป็นข้อตกลงที่ดีกับข้อมูลวรรณกรรม

L.E.A. Sanchez และคณะ [48] การกำจัดค่าเผื่อจากชิ้นส่วน Green compact เป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของเซรามิกส์ขั้นสูง ชิ้นงานทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $25.0 \times 39.0$  มิลลิเมตร ถูกบีบอัดด้วยการกดอัดแบบแกนเดียว โดยใช้ข้อมูลมินาผงที่ความดัน 120 MPa อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวประมาณ 1:1.5 ค่านี้ถูกกำหนดโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชิ้นงานตาม Richer son (1992) และ German (1994) ซึ่งเพียงพอสำหรับวัตถุประสงค์ที่เสนอในการศึกษา



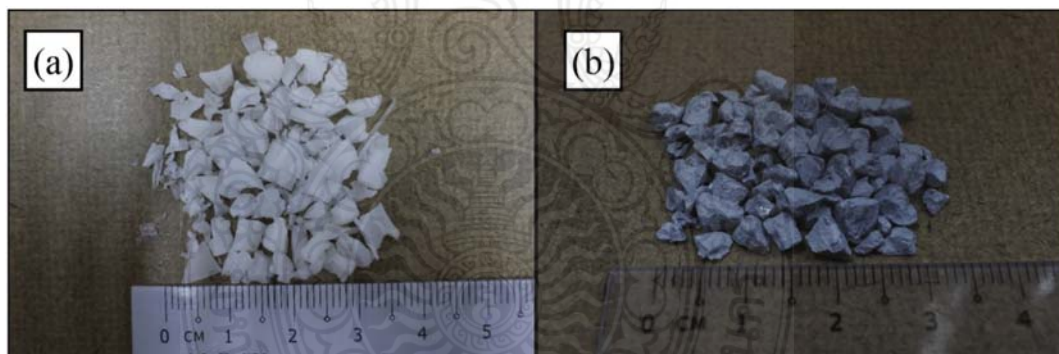
รูปที่ 2.39 กำลังขยายสูงของฝุ่นละอองที่เกิดจากการใช้เครื่องพ่นแบบแห้ง [48]

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ การลดจำนวนของการไล่ระดับสีความหนาแน่นของ Green compact โดยการกดอัดแบบแกนเดียวจะลดการเผาผนึก โดยกระบวนการกำจัดเศษเหล็กเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ ที่รอบนอกของ Green compact จะมีความหนาแน่นมากที่สุด และจะลดลงสู่ศูนย์กลางของ Green compact มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังจากการเผาผนึก



รูปที่ 2.40 ภาพรวมของพารามิเตอร์ในการทดลอง [48]

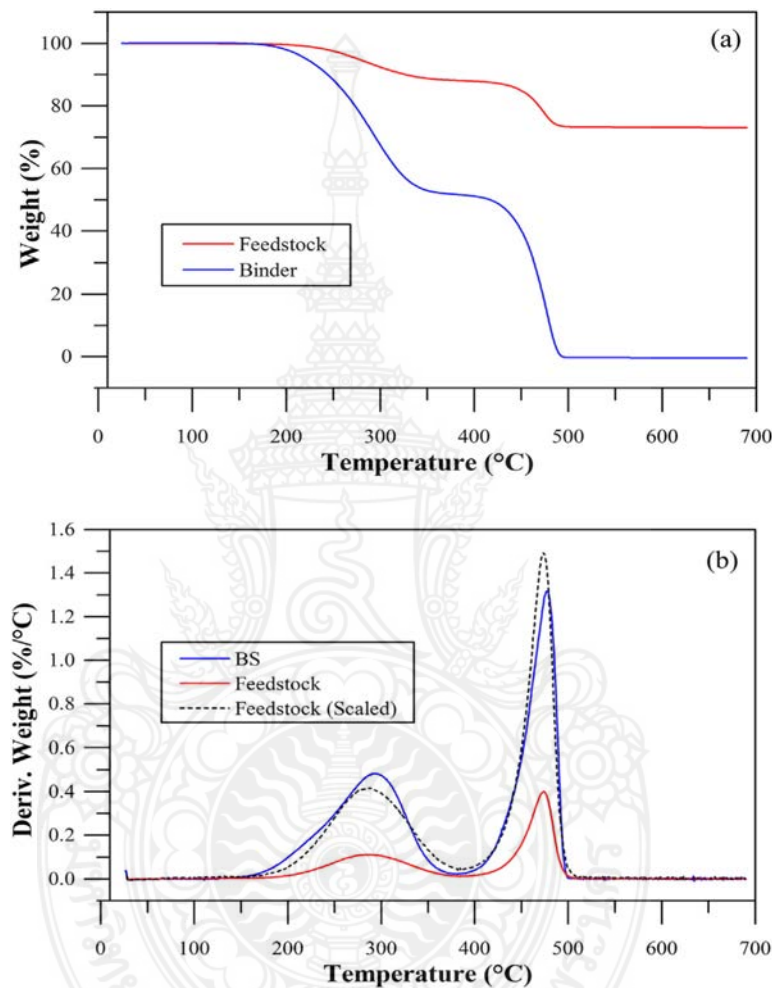
Leslie Poh และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาการกระจายผงในการฉีดขึ้นรูปผงของเซรามิกส์โดยใช้การวิเคราะห์และวัดความแตกต่างของอนุภาค ใช้สารยึดประสานหลายองค์ประกอบ (Binder) และซิลิคอนไนไตรด์เป็นวัตถุดิบ (Feed Stock) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.41 (a) และ (b) ระบบเครื่องประกอบด้วยโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยดัชนีละลาย 18 ก./10 นาทีและความหนาแน่น 0.955 กรัม/ลบ.ซม.



รูปที่ 2.41 (a) ระบบ Binder และ (b) วัตถุดิบ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [49]

ดังแสดงในรูปที่ 2.41 (a) Binder และวัตถุดิบ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากอนุภาคการสลายตัวที่ต่างกันของส่วนประกอบลดน้ำหนักได้ร้อยละ 5 การลดน้ำหนักสำหรับ Binder และ Feedstock คือ  $221^\circ\text{C}$  และ  $229^\circ\text{C}$  ขั้นตอนแรกของการสลายตัวจะสิ้นสุดลงเมื่อการลดน้ำหนักที่อนุภาค  $380^\circ\text{C}$  และ  $382^\circ\text{C}$  สำหรับสารยึดเกาะและวัตถุดิบตามลำดับ การสูญเสียน้ำหนัก Binder และ Feedstock ที่อุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง ร้อยละ 48.6 wt และร้อยละ 11.9 wt สิ่งนี้คือความสอดคล้องถึงสัดส่วนน้ำหนักของ PW และ SA ใน Binder (ร้อยละ 48 wt) และ Feedstock (ร้อยละ 12.48 wt) ขั้นตอนที่สองของการสลายตัวสำหรับ Binder และ Feedstock เกิดขึ้นที่  $398^\circ\text{C}$  และ  $392^\circ\text{C}$  ตามลำดับขั้นตอนที่สองของการสลายตัวสำหรับ Binder และ Feedstock จะสิ้นสุดลงที่  $505^\circ\text{C}$  และ

525°C ตามลำดับ สารยึดเกาะย่อยสลายอย่างสมบูรณ์และวัตถุดิบที่มีการลดน้ำหนักร้อยละ 14.9 wt น้ำหนักเศษส่วนของเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ในวัตถุดิบเป็นร้อยละ 13.52 wt น้ำหนักเศษเสี้ยวของสารตกค้างสุดท้ายในวัตถุดิบที่กำหนดปริมาณผงในวัตถุดิบ การสูญเสียวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 185°C ในทุก ๆ ของการฉีด กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นร้อยละ 0.3 wt ซึ่งเป็นร้อยละ 1.1 ของระบบ



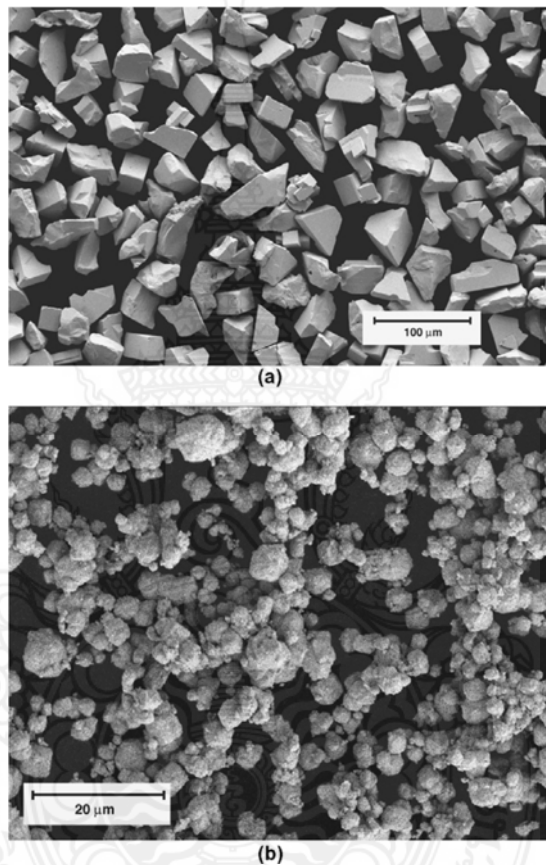
รูปที่ 2.42 (a) TG Curves และ (b) อนุพันธ์ TG Curves [49]

การวิเคราะห์ความร้อนด้วยไฟฟ้า (TGA) และการสแกนค่าความร้อน (DSC) เคยใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของผงภายใน Green compact มีการระบุลักษณะการสูญเสียมวลและความร้อนของฟิวชั่นของระบบ, วัตถุดิบซิลิคอนไนไตรต์และแถบทดสอบ TGA สามารถวัดส่วนที่เป็นปริมาตรของผงได้ขึ้นส่วน Green compact ที่มีความแตกต่างร้อยละ 1.76 vol จากส่วนปริมาณที่กำหนดและรูปแบบสูงถึงร้อยละ 0.177 vol แบบจำลองเชิงประจักษ์ DSC ทำนายปริมาณเศษของผงในขึ้นส่วน Green compact ที่มีความแตกต่างร้อยละ 1.76 vol จากส่วนและปริมาตรเล็กน้อยที่กำหนดสูงถึงร้อยละ 1.710 vol การใช้กฎของการผสมจะทำให้เกิดเศษส่วนปริมาตรที่คาดการณ์ของผงในขึ้นส่วน



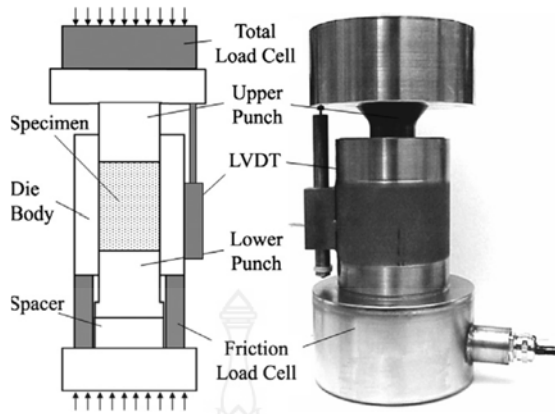
Green compact ร้อยละ 6.78 vol จากสัดส่วนปริมาณเล็กน้อยและมีความหลากหลายมากถึงร้อยละ 2.510 vol

T.J. Vogler และคณะ [50] ทำการศึกษาการอัดแบบคงที่และแบบไดนามิกส์ของผงเซรามิกส์ถูกตรวจสอบการทดลองโดยใช้แรงเสียดทานแรงดันสูงชดเชย ในการศึกษาที่ใช้ผง WC 2 ชนิด มีโครงสร้างที่หลากหลายจาก รูปที่ 2.43 a โครงสร้างบรรจุหกลเหลี่ยมปิด (HCP) และความหนาแน่นของคริสตัลอยู่ที่ 15.70 ก./ลบ.ซม. รูปที่ 2.43 b โครงสร้างเป็นทรงกลม

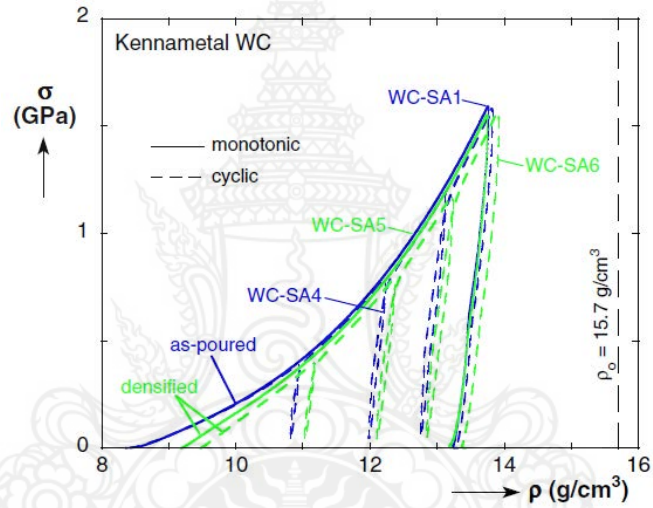


รูปที่ 2.43 จากภาพกล้อง SEM ดังรูป a และ b [50]

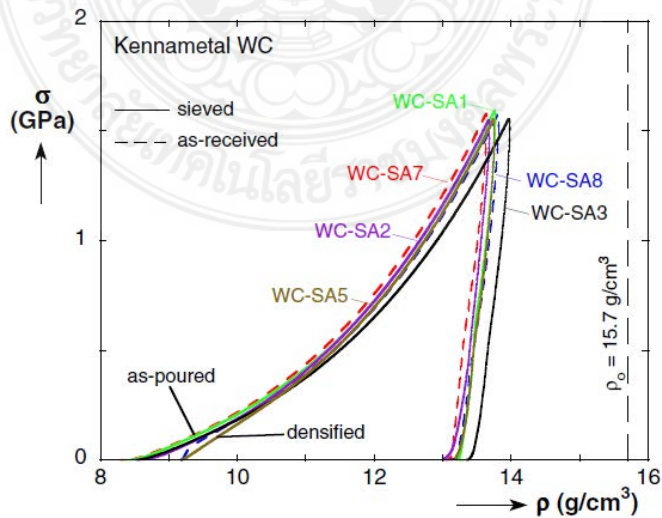
การออกแบบโมลสำหรับการทดสอบการบีบอัดแกนเดียว (USC) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.44 ประกอบด้วยแม่พิมพ์ทรงกระบอกที่ผลิตจากเหล็ก Aermet 100 ที่ชุบแข็งถึง 40 Rockwell C. ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและด้านนอกเท่ากับ 28.58 มม. และ 69.85 มม. ตามลำดับ ด้านบนและช่องเปิดด้านล่างของแม่พิมพ์จะมีแกนอัดที่ทำจากวัสดุผสมนิกเกิล (หรือ Vascomax 350) และพื้นผิวด้านในมีพื้นผิวเรียบ ตัวอย่างถูกเตรียมโดยการเทมวลผง ( $\pm 0.01$  ก.) ผลการทดลองเกี่ยวกับวัสดุที่กรองแล้วสำหรับการเรียงสับเปลี่ยนทั้งแบบโมโนโทนิค แบบวงกลม และแบบเท ความหนาแน่นจะแสดงในรูปที่ 2.45-2.46 ความลาดชันของเส้นโค้งการไหลลดค่อนข้างต่ำในตอนแรกแต่เพิ่มขึ้นเมื่อการบดอัดสูงขึ้น ความหนาแน่นสูงสุด 14 ก./ลบ.ซม. ทำให้มีความหนาแน่นของ WC เท่ากับ 15.7 ก./ลบ.ซม.



รูปที่ 2.44 ชิ้นส่วนประกอบของโมลัดขึ้นรูปแกนเดี่ยว [50]

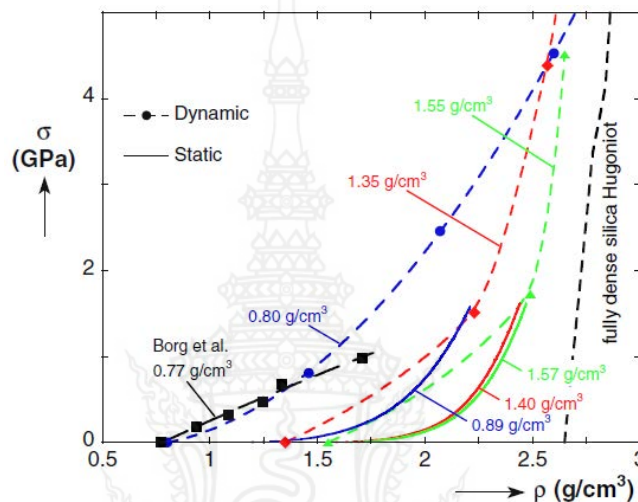


รูปที่ 2.45 การอัดแบบคงที่ของผง Kennametal WC ที่เกิดความหนาแน่นภายใต้โหลดแบบ Monotonic และ Cyclic [50]



รูปที่ 2.46 การอัดแบบคงที่ของผง Kennametal WC ที่มี ความหนาแน่นสูง [50]

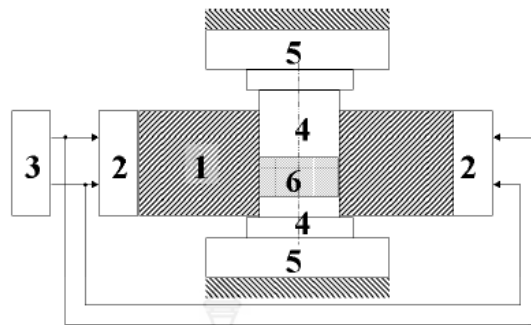
การเปรียบเทียบแบบคงที่และแบบไดนามิกส์ การตอบสนองการบดอัดของวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบ กับผลลัพธ์ที่คงที่ และผลลัพธ์ไดนามิกส์ของ WC ฝงมีความแข็งมาก แม้ว่าการเปรียบเทียบระหว่าง ข้อมูลแบบคงที่และแบบไดนามิกส์จะถูกแสดงแนวโน้มที่คล้ายกันของการตอบสนองแบบไดนามิกส์ อย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับการเปรียบเทียบการกระแทกและข้อมูลการบดอัดที่คงที่สำหรับ  $\text{SiO}_2$  ขนาดของเกรนจะอธิบายได้ว่ามีขนาดถึง 100 ไมครอน ที่ความหนาแน่น 0.77 ก./ลบ.ซม. ของ Borg และคณะ วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือผลึกควอตซ์ที่มีขนาดเกรนน้อยกว่า 44 ไมครอน



รูปที่ 2.47 การเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง Dynamic และ Static [50]

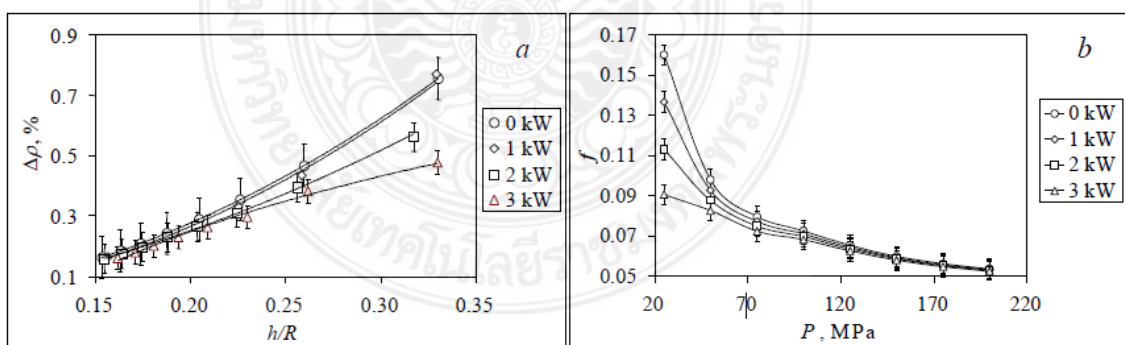
การทดลองการบดอัดแบบไดนามิกส์ได้ทำการทดสอบ 3 แรงกระแทก โดยใช้การทดลองแบบ ใหม่ มีการสังเกตคลื่นที่มีโครงสร้างที่มั่นคงและความสามารถในการทำซ้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของ คลื่นอัดและการตอบสนองของอลูมิเนียม สถานะของผงถูกคำนวณการตอบสนองการบดอัดแบบ ไดนามิกส์มีความแข็งกว่าแบบคงที่ การตอบสนองเป็นเพราะพื้นที่แคบ (3-5 จุด) การทดสอบแสดงให้เห็นการแตกหักของผงตลอดจนแตกที่ขอบของอนุภาค ในการทดลองแบบไดนามิกส์ให้คงที่คลื่นอัด แบบมีโครงสร้างคลื่นที่ด้วยความเร็วต่ำ อัตราความเครียดภายในคลื่นการบดอัดพบว่ามีอัตราได้ระดับ เกือบเป็นเส้นตรงกับความเร็วจากความเค้นจากแรงกระแทกในทางตรงกันข้ามกับวัสดุที่มีความหนาแน่นจำนวนมาก ด้วยความเครียด จากข้อมูลจากวรรณกรรมบนผง  $\text{TiO}_2$  การตอบสนองแบบไดนามิกส์ของ WC การ เปรียบเทียบผลการบดอัดแบบคงที่ใหม่กับข้อมูลจากวรรณกรรมสำหรับ  $\text{SiO}_2$  ยังเผยให้เห็นการ ตอบสนองแบบไดนามิกส์ที่แข็งแกร่ง

Khasanov O.L. และคณะ [51] ทำการศึกษาการอัดผงเซรามิกส์แบบแห้งภายใต้อุลตราโซนิกส์ มีอุปกรณ์พิเศษในการทดลองดังรูปที่ 2.48 คือ 1.) ท่อนำคลื่น 2.) เครื่องแปลงสัญญาณ Magneto Strictive ที่มีประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการสั่นสะเทือนอุลตราโซนิกส์ ที่ความถี่ประมาณ 20 kHz และกำลัง  $W = 1, 2$  หรือ 3 kW, 3.) HF-generator UZG 6.3; 4.) แกนอัด 5.) แท่นกดไฮดรอลิก WK18; 6.) ผงอัดถูกนำไปใช้กับแม่พิมพ์พร้อมกันกับแรงกดอัดในแกนเดียว



รูปที่ 2.48 ส่วนประกอบโมลัดขึ้นรูป [51]

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น และ  $h/R$  คือนำเสนอในรูปที่ 2.49 การกระทำอุลตราโซนิคส์บน Compaction nano particle (CNP) ถูกทดสอบอย่างมีประสิทธิภาพ ในการทดลองจะกระทำที่กำลังของคลื่น Ultrasonic ที่ 0, 1, 2 และ 3 กิโลวัตต์ และแสดงผลการทดลองในรูปของแกน 2 มิติ ประกอบด้วยแกนแนวนอนเป็นอัตราความสูงต่อรัศมีของ Green Compact และแกนแนวตั้งจะเป็นความแตกต่างของความหนาแน่นโดยคิดเป็นร้อยละ พบว่ากำลังที่ใช้ในการสร้างคลื่น Ultrasonic ส่งผลต่อการกระจายความหนาแน่นเชิงปริมาตร ช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของความหนาแน่น Green compact ขนาดกะทัดรัดพร้อมการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความกว้าง ความยาวของ Green compact การบดอัดเซรามิกส์ Nano Powder โดยใช้สมการไร้มิติช่วยให้การกำหนดพารามิเตอร์การกดพื้นฐาน เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผนังแรงเสียดทาน Interparticle, Spring Back ระหว่างการอัดแบบแห้งภายใต้อุลตราโซนิคส์ที่มีประสิทธิภาพจนได้ Green compact ที่เป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ

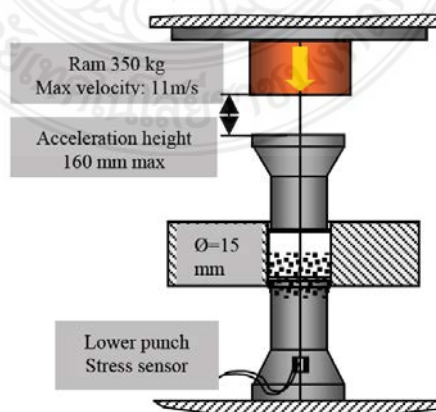


รูปที่ 2.49 ความสัมพันธ์ของการผลการทดสอบ [51]

A. Michrafy และคณะ [52] ได้ทำศึกษาแรงเสียดทานของผนังในการอัดผงยา หาผลกระทบต่อการกระจายความหนาแน่น ในการบีบอัดผงในรูปทรงกระบอกแกนเดี่ยวในแม่พิมพ์ ประยุกต์ใช้แรงอัดบนแกนอัดด้านบนจะถูกส่งไปยังผนังและที่ตัวผนังแม่พิมพ์จะเกิดแรงในแนวรัศมีหรือแนวรอบวง ซึ่งทำให้ส่งแรงไปยังด้านล่างหรือด้านที่เป็นแกนอัดตัวล่างน้อยกว่า เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างผนังกับผนัง

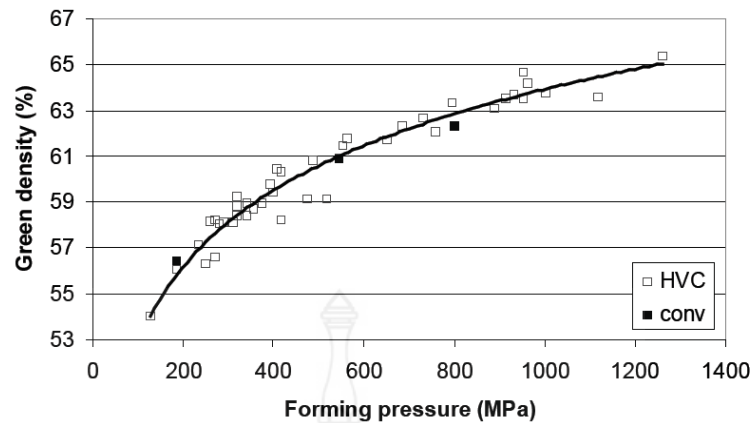
แม่พิมพ์  $F_f$  และระหว่างอนุภาคของผง (Interparticle) เพื่อประเมินแรงเสียดทานสัมประสิทธิ์ภายใต้เงื่อนไขคล้ายกับการบดอัด กระบวนการวิเคราะห์ที่ในบางสมมติฐาน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผงแม่พิมพ์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าเฉลี่ยของความเค้นตามแนวแกนที่ระดับความลึก  $h$  ลดลงจากด้านบนของ Green compact ที่อัตราส่วนกว้างยาว  $h/D$  มวลของผง MCC ขนาด 2.75 กรัม ถูกอัดลงไป 60 MPa ในแม่พิมพ์แข็งแบบไม่หล่อลื่นที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ข้อมูลการทดลองของความเครียดตามแนวแกนและความเค้นตามแนวแกนและสมมติฐานที่ว่าอัตราส่วนการถ่ายโอนเป็น 0.45 ให้ผลการทำงานร่วมกันเป็น 0.46 MPa ค่ายังส์มอดุลัสของ MCC มีผลลัพธ์เป็น  $E$  (Gpa) = 0.09 Exp (4.49  $q_r$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดคือ  $r^2 = 0.98$  การตรวจสอบโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ถึงคำนวณการกระจายความหนาแน่นของผง MCC บดอัดระบุว่าเป็นไปได้ที่จะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์แรงเสียดทานผนังและเส้นทางการไหลต่างๆ ที่จะทำให้การกระจายความหนาแน่นของขนาดกะทัดรัด อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ต้องถูกวัดและความไวของผลลัพธ์ที่  $R$  และ  $m$  ต้องพิจารณาใหม่

D. Souriou และคณะ [53] ทำการทดลองเปรียบเทียบการอัดธรรมดาและความเร็วสูงของผงอลูมินา วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือผงอลูมินา SM8 (ขนาดเกรนเฉลี่ย  $d_{50} = 0.4 \mu\text{m}$ ) ที่มีน้ำหนักร้อยละ 2.5 ของสารยึดเกาะ PVA การอัดรูปใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก (QUIRI) รูปที่ 2.50 ความเครียดบดอัดจะถูกกำหนดด้วยเครื่องวัด Manometer ความดันที่สูงสุดในการอัด 800 MPa ระยะทางในการอัดเป็น 200 มิลลิเมตรต่อวินาที การเผาผนึกของ Green compact ตั้งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง  $1,650^\circ\text{C}$  (อัตราความร้อน  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ) และอุณหภูมิลดลงทันที (อัตราการระบายความร้อนที่  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ) จนถึงอุณหภูมิห้อง ความหนาแน่นของตัวอย่างซินเทอร์ถูกกำหนดโดยน้ำหนักของอาร์คิมิดีส HAL-00128232 หลังการเผาขึ้นงานเข้าเครื่องเพื่อวิเคราะห์ SEM และ PSD ผลการทดสอบบดรูปที่ 2.51 แสดงให้เห็นถึงเส้นโค้งความหนาแน่นของ Green compact เมื่อเทียบกับแรงกดต้นในการขึ้นรูปของ HVC ที่มีความหนาแน่นมากกว่า Conv



รูปที่ 2.50 ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ HVC [53]

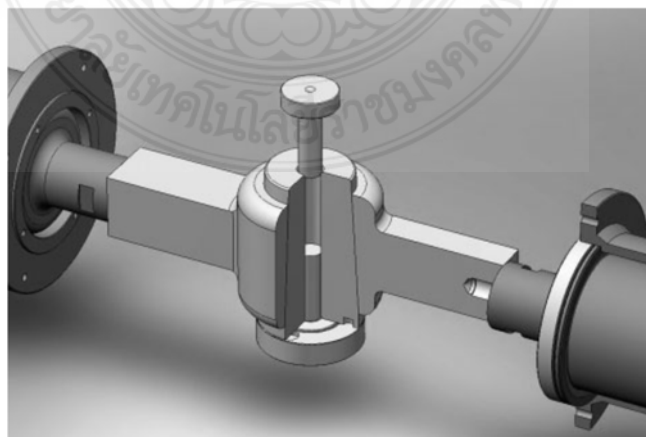




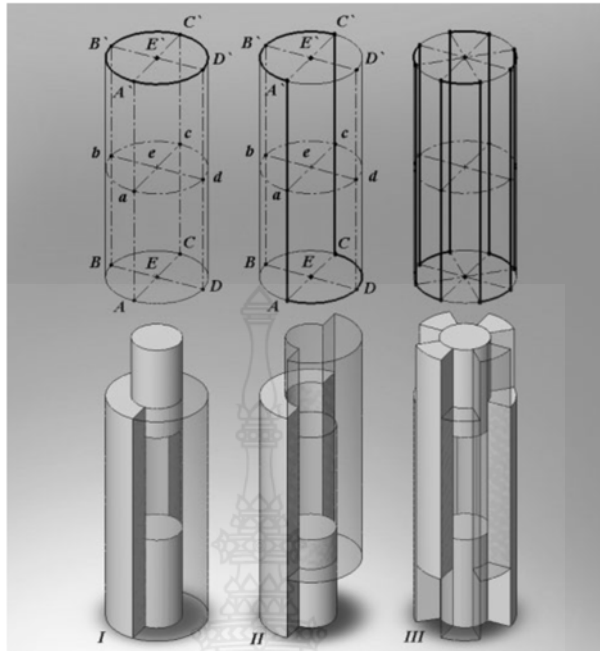
รูปที่ 2.51 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง HVC และ Conv [53]

การศึกษาเปรียบเทียบกับผงอลูมินาได้แสดงให้เห็นว่าสำหรับแรงกดอัดในการขึ้นรูปที่เหมือนกันต่ำกว่า 550 MPa ความหนาแน่นเริ่มต้นและสุดท้ายของ Green compact ทั่วไปและ HVC นั้นเหมือนกัน แต่ HVC ดูเหมือนว่าจะเพิ่มความหนาแน่นสำหรับแรงกดอัดที่สูงขึ้น แม้ว่าจะไม่มีความแตกต่างกับขนาด Macro pores การกระจายตัวได้รับการสังเกตดูเหมือนว่ากระบวนการ HVC นำไปสู่การเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเล็กน้อย

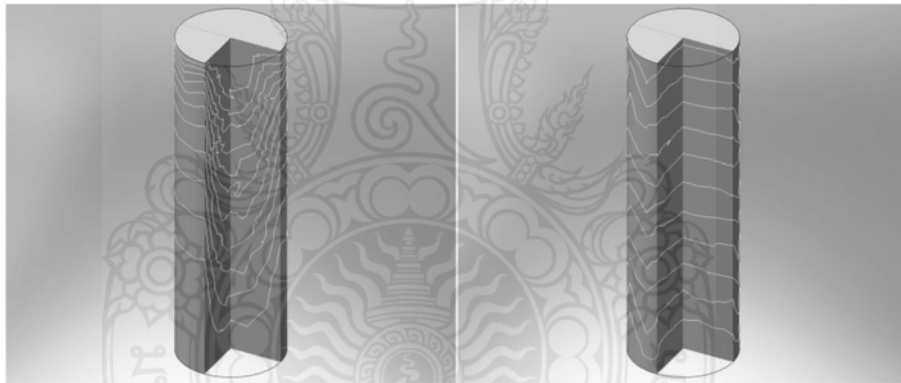
O. L. Khasanov และคณะ [54] ทำการศึกษาผงขนาดนาโน โดยใช้อุลตราโซนิกส์และวิธีการควบคุมการกระจายความหนาแน่นในสองวิธี คือ การอัดผงแห้งและ Nano Disperse ลงใน Green compact จากรูปที่ 2.52 มีการพัฒนารูปทรงที่ซับซ้อนพร้อมการกระจายความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอเชิงปริมาตรของชิ้นงาน นำอุลตราโซนิกส์มาช่วยในการสันสะเทือนทางกล การขึ้นรูปนี้พื้นผิวสามารถลดแรงเสียดทานของผนังโดยไม่ต้องใช้สารหล่อลื่น สามารถทำได้เมื่ออยู่ในคู่แรงเสียดทานพื้นผิวของอนุภาคผงจะแยกออกเป็นระยะจากผนังและแรงเสียดทานจะทำงานเฉพาะเมื่อพื้นผิวสัมผัส ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงตามสัดส่วนช่วงเวลา



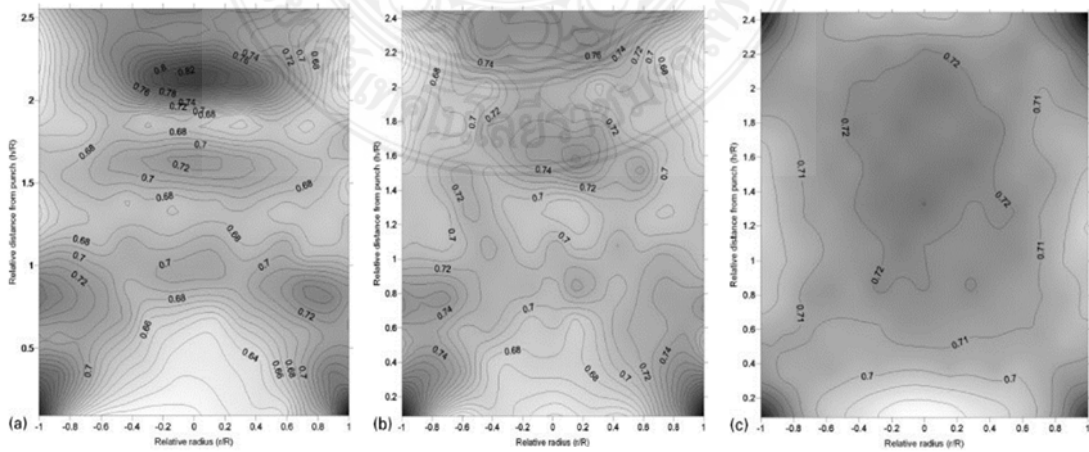
รูปที่ 2.52 การประกอบอุลตราโซนิกส์เข้ากับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป [54]



รูปที่ 2.53 การกดผงแบบแห้ง [54]



รูปที่ 2.54 (a) การกดแบบแกนเดี่ยวธรรมดา (b) การกดแบบคอลเลคเตอร์ [54]



รูปที่ 2.55 การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์ [54]

รูปที่ 2.53 เป็นการออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโดยรูปด้านซ้ายมือจะเป็นแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปทั่วไปที่มีตัวเรือนแม่พิมพ์ มีแกนอัดตัวล่างและแกนอัดตัวบน วิธีการอัดอาจจะกระทำได้ทั้ง 2 วิธี คือการอัดแบบแกนเดี่ยวหรือการอัดแบบสองทิศทาง สำหรับรูปแบบที่ 2 คือรูปแบบกลางจะเป็นการอัดแบบคอลเลคเตอร์ที่เป็นารออกแบบพิเศษให้ตัวเรือนแม่พิมพ์แบ่งครึ่งออกจากกันและแกนอัดตัวบนเคลื่อนที่ไปกับตัวเรือนแม่พิมพ์ จะส่งผลให้ความหนาแน่นของผงที่อยู่ในแนว A-A หรือ C-C เกิดความหนาแน่นที่เท่ากัน นั่นหมายความว่าหากสามารถสร้างแนวการเชื่อมต่อ A-A หรือ C-C ให้มากขึ้นเท่าไรก็จะส่งผลให้เกิดความหนาแน่นกระจายทั่วเชิงปริมาตรได้ดีขึ้นเท่านั้นและจะเกิดความแตกต่างของความหนาแน่นที่ลดลง ในรูปขวามือจะเป็นการออกแบบแม่พิมพ์แบบคอลเลคเตอร์ที่แบ่งตัวเรือนแม่พิมพ์ออกเป็น 8 ส่วนด้วยกัน โดยแยกออกเป็นส่วนตัวบน 4 ตัว และส่วนตัวล่างอีก 4 ตัว แกนอัดตัวบนจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวเรือนแม่พิมพ์ 4 ชิ้น ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้การกระจายความหนาแน่นเชิงปริมาตรที่ดีที่สุด แต่ทั้งนี้ในการออกแบบแม่พิมพ์แบบนี้จะส่งผลให้ความแข็งแรงของแม่พิมพ์มีค่าลดลงและมีการสึกหรอระหว่างชิ้นส่วนของตัวเรือนแม่พิมพ์มากยิ่งขึ้น

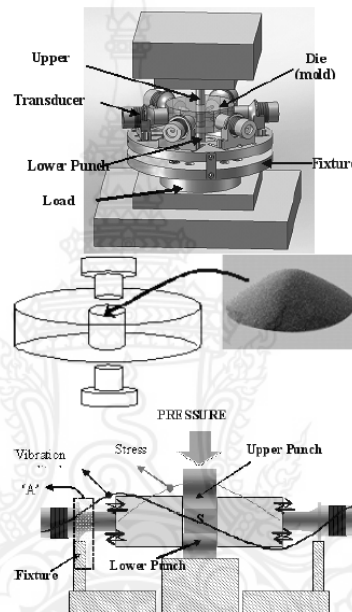
ในรูปที่ 2.54 จะเป็นการแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของผงภายใต้การอัดแบบแกนเดี่ยว รูปด้านซ้ายมือเป็นการอัดแบบทั่วไปที่ใช้แม่พิมพ์แบบปกติ สังเกตเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวของผงในส่วนของด้านบนของ Green Compact จะมีการเคลื่อนตัวที่สูง ส่งผลให้เกิดการกระจุกตัวของความหนาแน่นสูงตามไปด้วย แต่เมื่อดูที่ด้านล่างของตัว Green Compact พบว่าความหนาแน่นจะมีค่าต่ำเนื่องจากการเคลื่อนตัวของผงในกระบวนการอัดที่น้อยสำหรับรูปด้านขวามือเป็นการอัดผงด้วยแม่พิมพ์แบบคอลเลคเตอร์พบว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของผงตลอดระยะเวลาที่อัดตัวนั้น การเคลื่อนตัวของผงจะเคลื่อนตัวเท่ากันตลอดปริมาตรทั้งด้านบนและด้านล่างของ Green Compact นั่นคือจะทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นทั่วปริมาตร

รูปที่ 2.55 เป็นการแสดงการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์โดยแกนในแนวนอนเป็นรัศมีสัมพัทธ์โดยเปรียบเทียบกับคาร์ซีมี สำหรับแกนในแนวตั้งนั้นจะเป็นระยะทางสัมพัทธ์จากแกนอัดตัวบน รูปด้านซ้ายมือเป็นการอัดด้วยแม่พิมพ์แบบปกติทั่วไป ซึ่งพบว่าความหนาแน่นจะมีค่าสูงมากที่ด้านใต้ของแกนอัดตัวบน และที่มุมขอบด้านล่างของ Green Compact ในบริเวณอื่น ๆ หนาแน่นจะมีค่าต่ำกว่า สำหรับรูปกลางเป็นการบีบอัดโดยใช้แม่พิมพ์แบบคอลเลคเตอร์ที่ปราศจากการใช้คลื่น Ultrasonic พบว่าการกระจายของความหนาแน่นจะดีกว่าการใช้แม่พิมพ์อัดแบบปกติทั่วไปความแตกต่างของความหนาแน่นในแต่ละพื้นที่จะมีค่าน้อยกว่า สำหรับรูปด้านขวามือเป็นการใช้แม่พิมพ์แบบคอลเลคเตอร์ร่วมกับคลื่น Ultrasonic ที่กำลัง 3000 วัตต์ พบว่าความหนาแน่นจะกระจายตัวเชิงปริมาตรได้ดีมีความแตกต่างของความหนาแน่นสัมพัทธ์ในแต่ละพื้นที่น้อยมาก

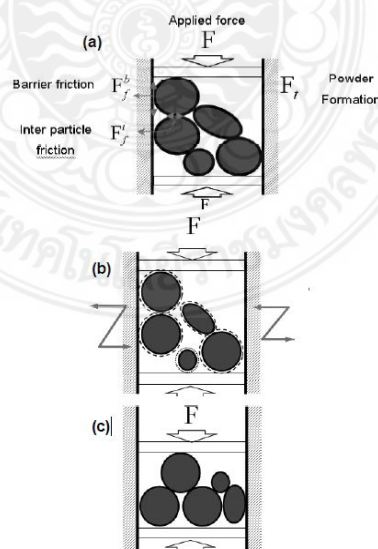
H. R. Cha [55] ได้ทำการศึกษาความหนาแน่นของผงนาโนโดยใช้การสั่นสะเทือนด้วยคลื่นอุลตราโซนิก ผงที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 0.4-0.5 ไมครอน และมีส่วนผสมคาร์บอนร้อยละ 6.12-6.20 มี



การกระชับและรองรับฟลักซ์เจอร์สำหรับการส่งคลื่นการสั่นสะเทือนอุลตราโซนิคส์ การออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปสำหรับการใช้งานสั่นสะเทือนที่ 20 kHz ความยาวคลื่นครึ่งความยาวและมีความดันอัดไฮดรอลิกคองที่เนื่องจากการสั่นสะเทือนอุลตราโซนิคส์ถูกนำไปใช้สำหรับการอัด การปรับปรุงความหนาแน่นสูงสุด 1.0 ~ 0.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ประสบความสำเร็จเมื่อใช้ความดัน 200 MPa ด้วยอุลตราโซนิคส์ ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 15 ในขณะที่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 2~3 ที่ความดัน 250 MPa จากผลการวิจัยพบว่าผลเพิ่มความหนาแน่นเนื่องจากอุลตราโซนิคส์ค่อนข้างชัดเจนในการอัดที่ความดันต่ำ



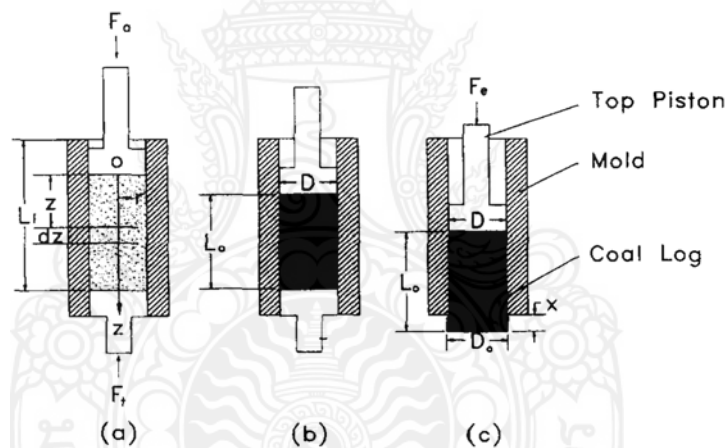
รูปที่ 2.56 ส่วนประกอบแม่พิมพ์และการติดตั้งอุลตราโซนิคส์ [55]



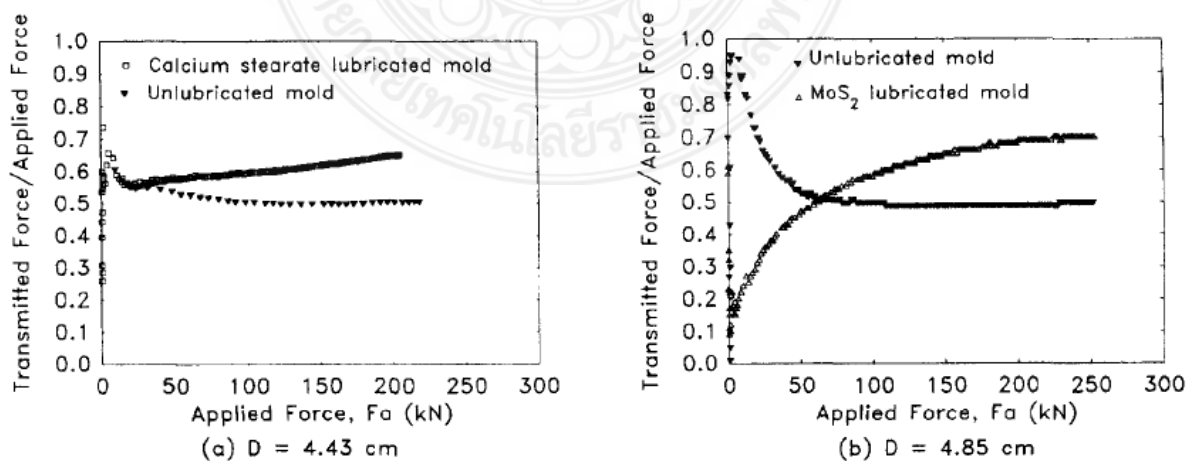
รูปที่ 2.57 (a) ขั้นตอนที่ 1: แรงอัดเท่านั้น (b) ขั้นตอนที่ 2: แรงอัดและคลื่นอุลตราโซนิคส์ และ (c) ขั้นตอนที่ 3: สถานะผลลัพธ์ (หลังจาก Densification) [55]

ความหนาแน่นของ Green compact จากผงนาโนเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอัดด้วยแม่พิมพ์แบบดั้งเดิม ยิ่งกว่านั้นความแข็งแรงหลังการเผาผนึกเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกส์

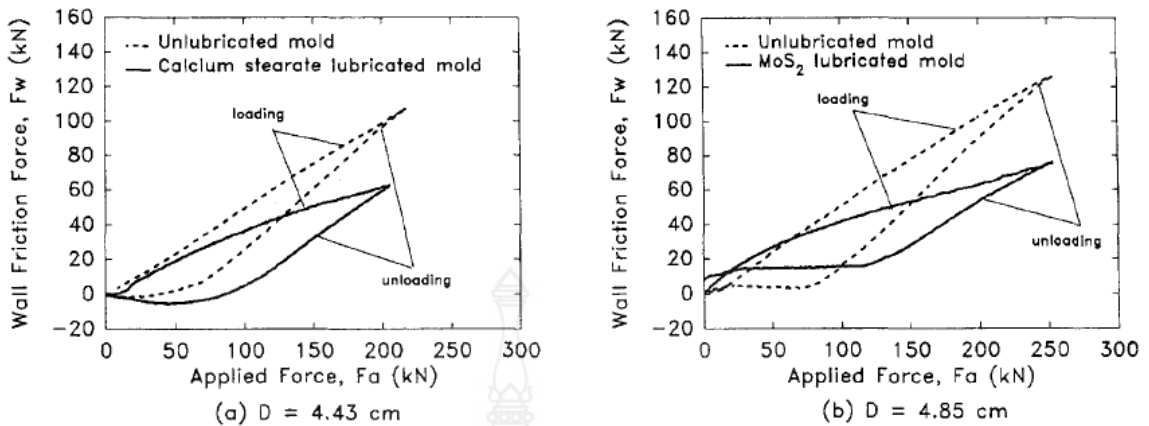
Y. Li, H. Liu และ A. Rockabrand [56] ได้ทำการทดสอบแรงเสียดทานและการหล่อลื่นผนังแม่พิมพ์ระหว่างการอัดของถ่านหิน ในการศึกษาการอัดถ่านหิน เวลาต้องนำ green compact ออกจากแม่พิมพ์ จะต้องนำแกนอัดตัวล่างออกก่อนและใช้แกนอัดตัวบนดันส่ง Green compact ออกมา ดังรูปที่ 2.58 ทำการบันทึกค่าแรงที่สามารถเอาชนะความเสียดทานที่ผนังแม่พิมพ์ได้ เมื่อเริ่มบันทึกและเคลื่อนที่แรงเสียดทานสถิตจะเปลี่ยนเป็นแรงเสียดทานแบบไดนามิกส์ แม่พิมพ์ทรงกระบอกสองชิ้นทำจากสแตนเลส 410 ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์แกนอัดเดียวคือ 4.85 เซนติเมตร และ 4.43 เซนติเมตร ประกอบด้วยระยะเวลาโหลด 6 นาที ถึงค่าสูงสุด ซึ่งเป็นแรง 213.6 กิโลนิวตัน สำหรับแม่พิมพ์ 4.43 เซนติเมตร และ 253 กิโลนิวตัน สำหรับแม่พิมพ์ 4.85 เซนติเมตร โดยไม่มีเวลาพัก



รูปที่ 2.58 การอัดและการนำถ่านหินออกจากกระบวนการอัด [56]



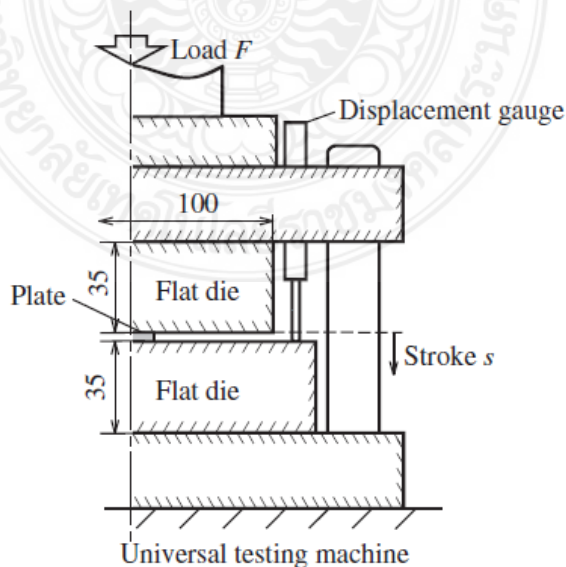
รูปที่ 2.59 อัตราส่วนของแรงส่งและแรงที่ใช้สำหรับการอัดที่มีและไม่มีสารหล่อลื่น [56]



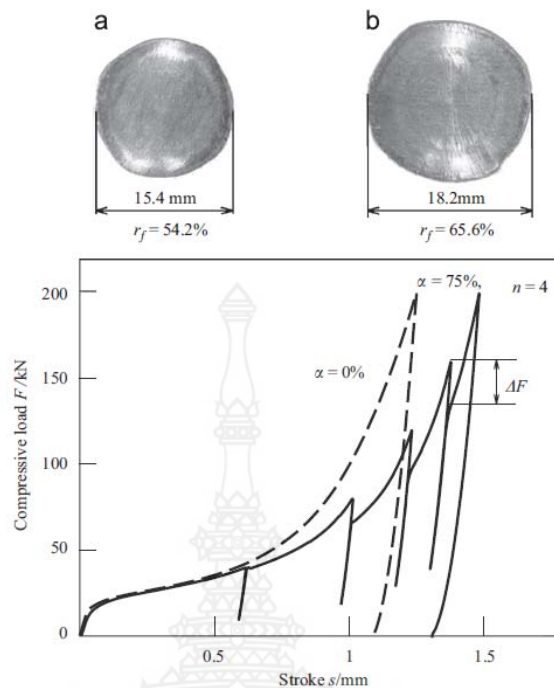
รูปที่ 2.60 แรงเสียดทานที่ผนังกับแรงอัดที่มีและไม่มีสารหล่อลื่น [56]

การหล่อลื่นพื้นผิวแม่พิมพ์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตและ  $\text{MoS}_2$  ช่วยลดแรงเสียดทานของผนังและเพิ่มการส่งผ่านความเครียดในระหว่างการอัดถ่านหิน กำแพงแรงเสียดทานแสดง Hysteresis ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีขนาดเล็กลง ความเครียดแนวรัศมีในระหว่างการอัดมีค่ามาก

T .Maeno และคณะ [57] ได้การทดสอบการลดแรงเสียดทานในการบีบอัดเพลตโดยการสั้นของโพลด แผ่นวงกลมของอลูมิเนียมอัลลอยด์ A5052 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และความหนา 2.0 มิลลิเมตร บีบอัดด้วย flat dies ดังแสดงในรูปที่ 2.61 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่มีลูกบอล สกรูที่มีความจุ 250 กิโลนิวตัน ทำจากเหล็กชุบแข็งและเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11 และพื้นผิวที่ขรุขระแม่พิมพ์มีขนาด 0.08 มิลลิเมตร และความยาว ความกว้าง และความสูงของแม่พิมพ์เท่ากับ 70, 100 และ 35 มิลลิเมตร ตามลำดับ น้ำมันหล่อลื่นเป็นน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้ ความเร็วของการบีบอัดคือ 0.02 มิลลิเมตรต่อวินาที อัดที่แรง 80-200 กิโลนิวตัน



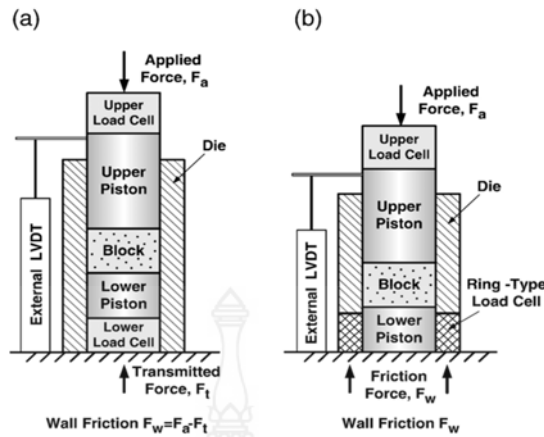
รูปที่ 2.61 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการบีบอัดแผ่นโลหะผสมอลูมิเนียมโดยใช้การเดินเป็นจังหวะ [57]



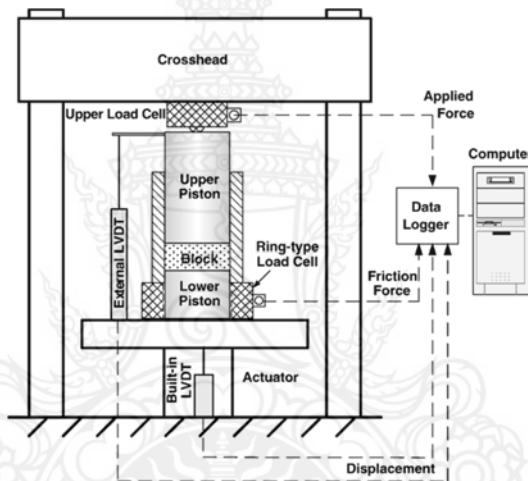
รูปที่ 2.62 ความแปรผันของแรงอัดแบบสโตรก ที่มีและไม่มีโหลดเป็นจิ้งหะสำหรับ  $F_f = 200$  kN [57]

ในรูปที่ 2.62 โดยที่การลดความหนาของ  $r_f$  คือพิจารณาจากความหนาตรงกลางของแผ่น โหลด บีบอัดส่วนใหญ่ลดลงโดยการเต้นเป็นจิ้งหะของโหลดและโหลดที่มีการเต้นเป็นจิ้งหะจะลดลง การลดลงของความหนาด้วยการเต้นเป็น  $r_f/4$  ร้อยละ 65.6 ในขณะที่ไม่มีการเต้นเป็น  $r_f/4$  ร้อยละ 54.2 และเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นบีดอัดที่มีการเต้นขนาดใหญ่ ในการทดสอบการบีดอัดการเกิดช่องว่าง ด้านนอกในการปลดปล่อยของโหลดที่แสดงในรูปที่ 2.62 ถูกตรวจสอบโดยการป้อนเข้าไปในช่องว่าง และมีการกัดกร่อนพื้นผิวของแผ่น การกัดกร่อนคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ความแตกต่างของความหนึ่ระหว่างการกัดกร่อนและสารหล่อลื่นมีเพียงเล็กน้อย ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด ภาระการรับแรงอัดลดลงอย่างมากจากภาระจิ้งหะและความหนาของแผ่นบีดอัดลดลง การเกิดช่องว่างในการปลดปล่อยโหลดบางส่วนนั้นถูกต้องโดยการกัดกร่อนพื้นผิวหน้าของแผ่นในการบีดอัดการทดลอง

Yong-Ming Tien และคณะ [58] ได้ทำการทดสอบการวัดแรงเสียดทานของผนังแม่พิมพ์และลักษณะการอัดของผงเบนโทไนท์ วิธีการวัดทางอ้อมสำหรับแรงเสียดทานผนังใช้โหลดเซลล์สองตัวดังแสดงในรูปที่ 2.63 (a) ประกอบด้วย โหลดเซลล์ตัวบนและโหลดเซลล์ตัวล่าง, แรงส่ง  $F_c$ , แรงเสียดทานของผนัง  $F_w$ , ระหว่างการอัดผง, LVDT แรงเสียดทานระหว่างการอัดถือว่าเป็นแรงเสียดทานของส่วนต่อประสานระหว่างบล็อกและผนังแม่พิมพ์ แบบจำลองการวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับการแจกแจงความเค้น แรงเสียดทานตามแนว 1) ความเค้นจะเหมือนกันในทุกแนว 2) ทิศทางหลักของความเครียดที่เกิดขึ้นกับทิศทางแนวตั้งและแนวนอน และ 3) ความเครียดและความเสียหาย  $f_w$  (ดูรูปที่ 2.63)

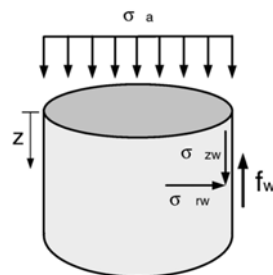


รูปที่ 2.63 วิธีกรวัดแรงเสียดทานของผนังแม่พิมพ์ระหว่างการอัด (a) วิธีทางอ้อม (b) วิธีโดยตรง [58]



รูปที่ 2.64 แผนผังของระบบไฮดรอลิกและเครื่องมือวัด [58]

ลูกสูบส่วนบนและลูกสูบล่างเหนือโพลดเซลล์ จากนั้นใช้แรงกดสัมผัส 0.08 MPa เพื่อตั้งค่าการอ้างอิงจุดของปริมาณบล็อกศูนย์ อัตราส่วนความหนาแน่นแห้งและอัตราส่วนแรงเสียดทานในขั้นตอนสุดท้ายของการอัดเบนโทไนต์แบล็กอิธิลล์และเบนซี Zhi-Hsing สรุปไว้ในรูปที่ 2.66 การบีบอัดได้เส้นโค้งที่แตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น แรงเสียดทานของผนังเพิ่มขึ้น ตามมุมมองอัตราส่วนเนื่องจากพื้นที่แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น



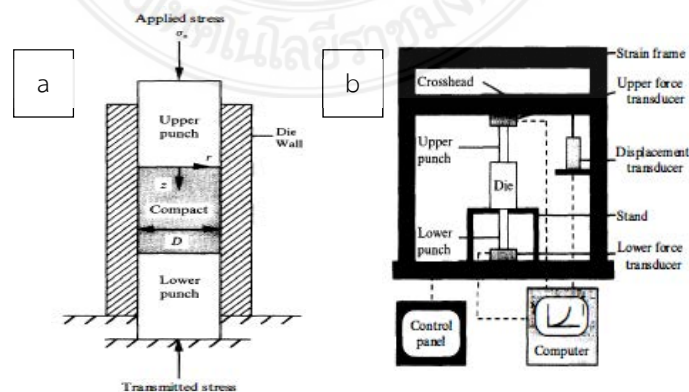
รูปที่ 2.65 สถานะความเครียดของการอัดเบนโทไนต์บล็อก [58]

Summary of compaction and friction data at end of compaction test and the parameters of Gurnham's compaction equation of two Na-bentonite powders

Material	Weight (g)	Final aspect ratio	Final dry density ( $\text{kN/m}^3$ )	Final friction ratio, FR	Gurnham's parameter	
					$K$	$A$
Black Hills bentonite	259	0.196	20.79	0.242	9.86	2.55
	388	0.298	20.6	0.348	9.63	2.55
	518	0.400	20.46	0.443	9.44	2.55
	647	0.505	20.26	0.523	9.25	2.55
Zhi-Hsing bentonite	247	0.171	23.91	0.202	13.73	2.40
	371	0.261	23.61	0.278	13.5	2.40
	495	0.348	23.57	0.364	13.43	2.40
	619	0.436	23.54	0.441	13.32	2.40
	742	0.527	23.36	0.495	13.20	2.40
	866	0.617	23.25	0.569	13.07	2.40

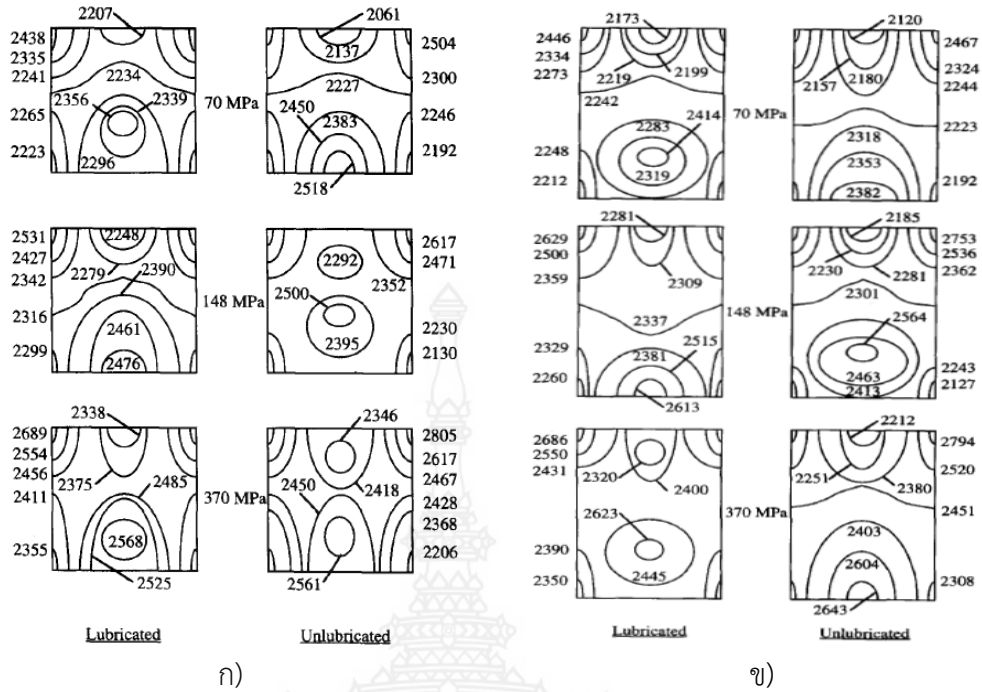
รูปที่ 2.66 คุณสมบัติวัสดุ [58]

ความแม่นยำในการวัดแรงเสียดทานของผนังและความหนาแน่นของ Green compact วิธีการเปรียบเทียบโดยตรงกับวิธีทางอ้อมในรูปที่ 2.63 เบนโทไนต์และแบล็กเบนตอไนต์แบล็กไนท์ เบนโทไนต์ ถูกนำมาใช้เพื่อทำการทดสอบการอัดและการตีคั่นตัว ลักษณะการบดอัดของเบนโทไนต์ถูกแสดงในรูปของเส้นโค้งการบีบอัดอัตราส่วนแรงเสียดทานผนังและดัชนีแรงเสียดทาน สมการของ Gurnham ใช้เพื่ออธิบายเส้นโค้งการอัด ผลกระทบของอัตราส่วนภาพของบล็อกเบนโทไนต์ต่ออัตราส่วนแรงเสียดทานและดัชนีแรงเสียดทานได้รับการกล่าวถึงจากการทดลองและมุมมองทางทฤษฎี การวัดที่ตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบการอ่านแรงขับที่โหลดเซลล์ด้านบนและโหลดเซลล์ชนิดแหวนด้านล่าง B.J. Briscoe และคณะ [59] ได้ศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานของผนังในการอัดผงเซรามิกสีในแม่พิมพ์แข็ง ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเชิงวิเคราะห์และเชิงตัวเลข มีรายงานการอัดของผงอลูมินาเป็นทรงกระบอกที่จับตัวเป็นก้อน การกระจายความหนาแน่นภายในต่างๆ วัสดุที่ใช้เป็นผงอลูมินาชนิดผงร้อยละ 99.7 wt.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาด 150 ไมครอน ในบางกรณีผนังแม่พิมพ์ถูกล้อลื่นด้วยผงสังกะสีเตียรต ขนาด 3 ไมครอน ความเครียดการอัดสูงถึง 70 MPa มวลของผงที่มีขนาดตั้งแต่ 0.45 กรัมถึง 6.0 กรัม ถูกนำไปอัดจนถึงระดับความเครียดสูงสุดที่ใช้คือ 70 MPa ในแม่พิมพ์หล่อลื่นและแม่พิมพ์ที่ไม่ได้หล่อลื่น

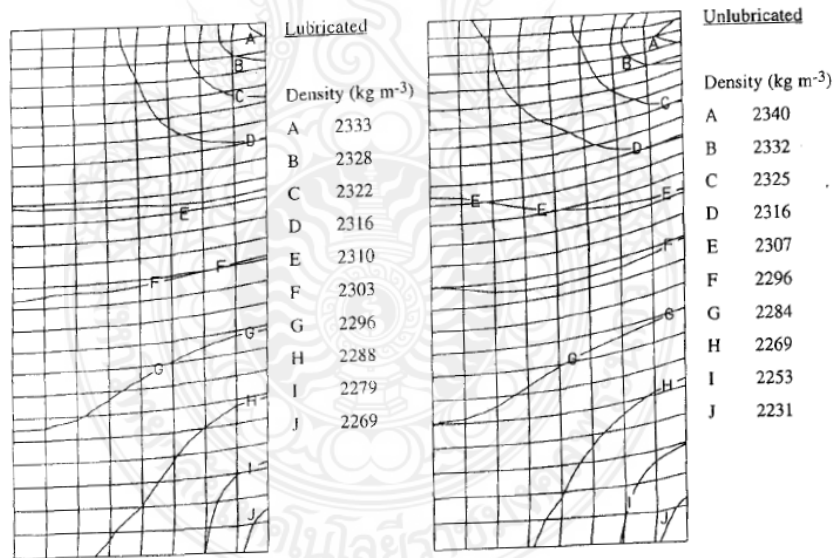


รูปที่ 2.67 (a) รูปทรงและส่วนประกอบ (b) โครงร่างแผนผังของเครื่องทดสอบ [59]





รูปที่ 2.68 ความหนาแน่นของอลูมินาอัดแน่น ก) 4.0 กรัม และ ข) 6.0 กรัม [59]



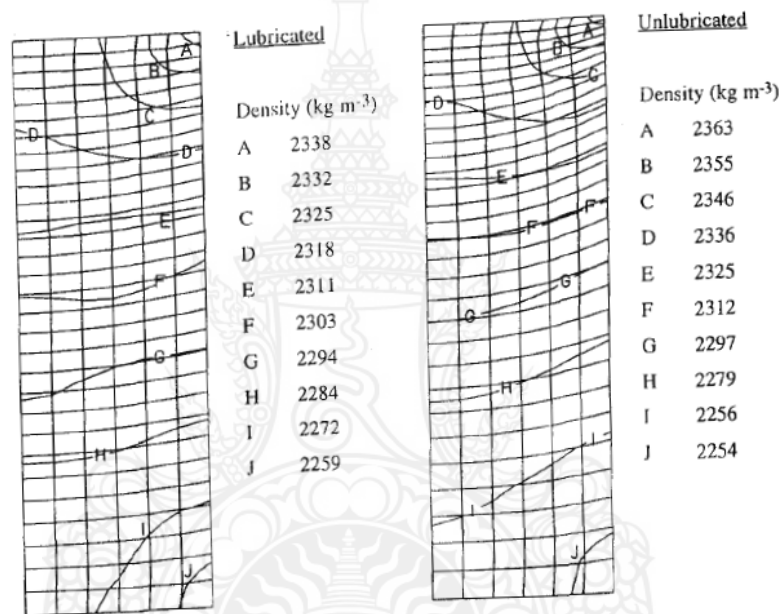
รูปที่ 2.69 การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ผงอลูมินา 4.0 กรัม ความเค้น 70 MPa [59]

การอัดที่ประยุกต์ใช้ที่ 70 MPa แสดงในรูปที่ 2.68 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผนังแม่พิมพ์ที่สอดคล้องกันสำหรับกรณีที่ถูกหล่อลื่นและไม่หล่อลื่นมีการคำนวณเป็น 0.399 และ 0.654 ตามลำดับ โดยสมมติว่าค่าของ Kw'P เป็น 0.3 การวิเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นนี้ถูกทำซ้ำที่ความเค้นสูงสุด ที่ประยุกต์ใช้หลายครั้งตั้งแต่ 5 MPa ถึง 70 MPa ในทุกกรณี จากการคำนวณค่าต่าง ๆ ของผลลัพธ์เหล่านี้จะแสดง



ในรูปที่ 2.68 สำหรับกรณีหล่อลื่นค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับความเค้นที่เกิดขึ้นหลังจากความดันเข้าร่วม 16.26 MPa, ค่าเฉลี่ยของ  $\mu_w$  คือ 0.394 สำหรับกรณีที่ไม่มีหล่อลื่น

ความเครียดในแนวแกนที่ได้จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบไฟไนต์ถูกแปลงโดยใช้ความสัมพันธ์ของการสอบเทียบความหนาแน่นของความเครียด เพื่อให้ได้การแจกแจงความหนาแน่นที่ตามมา (รูปที่ 2.69 และ 2.70) การแจกแจงอยู่ในข้อตกลงเชิงคุณภาพบางส่วนกับที่ได้รับการทดลองในการทำนายว่า บริเวณที่สำคัญของความหนาแน่นสูงและต่ำจะถูกคาดการณ์ไว้ที่มุมบนและล่างของ Green compact ตามลำดับ โดยมีความหนาแน่นลดลงที่ผนัง ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าความหนาแน่นต่ำสุด นั้นเพิ่มขึ้นหากไม่มีการหล่อลื่นตามที่สังเกตจากการทดลอง



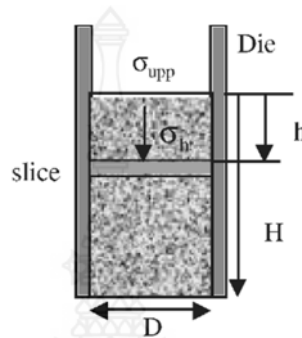
รูปที่ 2.70 การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ผงอลูมินา 6.0 กรัม ความเค้น 70 MPa [59]

อิทธิพลของการแปรผันของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผนังแม่พิมพ์กับสถานะของการหล่อลื่นผนังแม่พิมพ์และทำการทดสอบ โหลดที่ใช้โดยการวัดการส่งผ่านของความเครียดที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ กระบวนการอัด ข้อมูลเหล่านี้รวมกับรูปแบบแรงเสียดทานผนังที่จัดตั้งขึ้นซึ่งใช้ในการอธิบายเงื่อนไขขอบเขตของบนผนังถูกนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ป้อนเข้าสำหรับแบบจำลอง องค์ประกอบ จำลองเชิงตัวเลขของการบดอัดแบบผง ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองวัสดุชนิดไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น ผลลัพธ์ที่เป็นตัวเลขสร้างขึ้นให้การทำนายเชิงปริมาณของความเครียดและด้วยเหตุนี้ของการกระจายความหนาแน่นที่สร้างขึ้นและแสดงข้อตกลงบางอย่างกับการแจกแจงที่กำหนดทดลอง

A. MICHRAFY และคณะ [60] ได้ศึกษาความหนาแน่นของผนังแม่พิมพ์และผลของความหนาแน่นการกระจายในการอัดวัสดุที่ใช้สรุปดังตารางที่ 2.3 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นคือ ร้อยละ 1 ผงและสารหล่อลื่นถูกผสมในเครื่องปั่น Turbula ความเร็วการบดอัดเฉลี่ย 31.25 มิลลิเมตรต่อวินาที (ค่าเฉลี่ยเวลาในการบดอัดคือ 0.24 วินาที และค่าการเจาะเฉลี่ยการกำจัด 7.5 มิลลิเมตร)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะผง (ขนาดอนุภาคและความหนาแน่น) [60]

Powder	Mean particle size ( $\mu\text{m}$ )	True density $\rho_t$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Apparent density $\rho_a$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
Avicel PH 105	20	1.514	0.23
Avicel PH 101	50	1.503	0.29
Avicel PH 102	90	1.599	0.31



รูปที่ 2.71 ลักษณะการอัด [60]

ระยะทาง  $h$  จากด้านบนของ Green compact ไปยังศูนย์กลางที่ 1–5 คือ 2.31, 6.97, 11.69, 16.46 และ 21.27 มิลลิเมตร คำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ โดยใช้แบบจำลองการทำนายความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามในสมการ Heckel ก็ถูกคำนวณเช่นกันรูปที่ 2.71 แสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดสอบ การทดสอบความเสียหายของผนังในการกระจายความหนาแน่นตามแนวแกนและโดยการสร้างแบบจำลอง ตัวแบบถูกสร้างขึ้นจากการวิเคราะห์ห้วงอวกาศของ Janssen ควบคู่กับ Heckel สมการสำหรับการเปรียบเทียบมีเพียงการอัดแอกชั่นเดียวในแม่พิมพ์ที่ไม่ได้หล่อขึ้น การพิจารณา พบว่าความหนาแน่นแกนที่วัดและทำจำลองได้ลดลงจากบนลงล่าง ด้านล่างของ Green compact นอกจากนี้ความหนาแน่นที่คาดการณ์และวัดมีแนวโน้มเดียวกันแต่ค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่ไม่ควรนำไปใช้กับการอัดของผงผสมกับน้ำมันหล่อลื่น

Yunping Li และคณะ [61] ได้ทำการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการบีบอัดตัวอย่างทรงกระบอกที่มีอุณหภูมิร้อน วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ IHS38MSV Hypo Eutectoid Steel (Sumitomo Metal Industries, จำกัด ประเทศญี่ปุ่น) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาในปัจจุบัน ทรงกระบอกชิ้นงานทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และความสูง 12 มิลลิเมตร ถูกตัดโดยการตัดเฉือนด้วยกระแสไฟฟ้า (EDM) จากด้านนอกส่วนหนึ่งของกระบอกสูบหลอมขนาดใหญ่ ศูนย์กลางร่องกับความลึก 0.1 มิลลิเมตร ทำการทดสอบแรงอัดในสุญญากาศที่ 1073, 1173, 1273, 1373 และ 1473K โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลอง (The Rmecmaster-Z) อัตราจังหวะคือ ตั้งค่าเป็น 1.2 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิแตกต่างจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิกับอุณหภูมิทดสอบ ที่อัตราความร้อน 5 K/s โดยการเหนี่ยวนำความร้อน และใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงานวิจัยที่ประกอบไปด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัย การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์ ที่จะต้องใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์รูปร่างของแม่พิมพ์ รวมถึงการวิเคราะห์วัสดุที่ต้องตรวจสอบสมบัติต่างๆ กระบวนการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์ เพื่อทำเป็นแผ่นเกราะ การวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตร โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

#### 3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์ การสร้างแผ่นเซรามิกส์ ความหนาแน่นของผงอัดในกระบวนการอัดขึ้นรูปผง การทดสอบ รวมทั้งวัสดุที่จะนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์

3.1.2 วิเคราะห์สมบัติของวัสดุลูมินาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง SEM, EDS และ XRD

3.1.3 ออกแบบโมเดล 3 มิติ ของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปด้วยโปรแกรม SolidWorks ประกอบด้วยชิ้นส่วนตัวเรือนแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป แกนอัดด้านบน แกนอัดด้านล่าง และชิ้นส่วน Waveguide จะได้รูปแบบโมเดลดังรูปที่ 3.2

3.1.4 วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนแบบสถิตศาสตร์ ความถี่ธรรมชาติ รูปร่างของการสั่นสะเทือน และหาค่าความปลอดภัย ซึ่งสามารถแสดงผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ บันทึกผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดและความถี่ธรรมชาติ

3.1.5 สร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปจริงด้วยวัสดุดังตารางที่ 3.1 และทำการทดสอบความแข็งแรงของแม่พิมพ์ด้วยการติดตั้ง Strain Gage ลงบนตัวเรือนแม่พิมพ์ ทำการทดลองการอัดขึ้นรูปจริง บันทึกค่าความเครียด

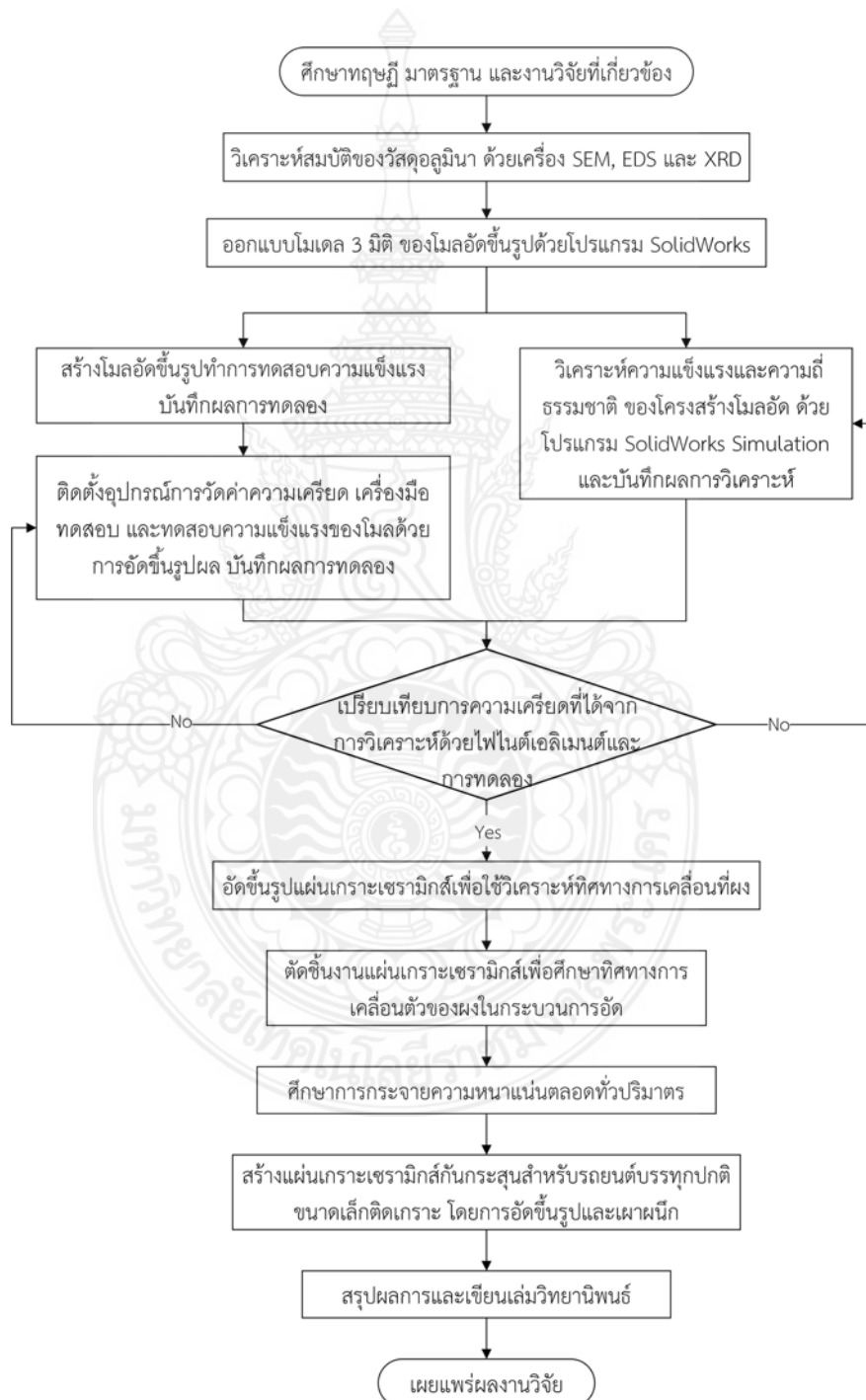
3.1.6 เปรียบเทียบผลของค่าความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดลอง

3.1.7 นำแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นจริงมาอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นเกราะเซรามิกส์ด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงที่แรงอัดต่างๆ ในช่วง 50-100 ตัน ด้วยค่าความหนาต่างๆ

3.1.8 ตัดชิ้นงานแผ่นเกราะเซรามิกส์ด้วยเครื่องตัดละเอียดเพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของผงอัด

3.1.9 ศึกษาและวิเคราะห์การยุบตัวของผงเซรามิกส์ในกระบวนการอัดขึ้นรูป

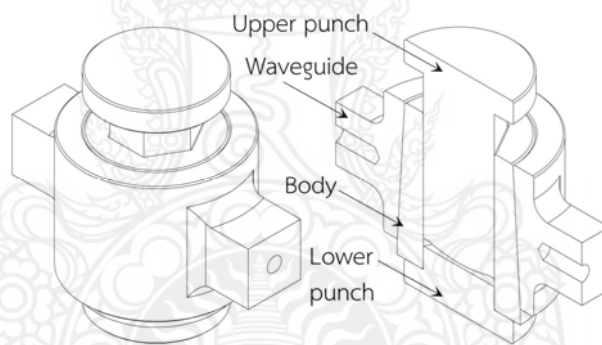
- 3.1.10 คำนวณหาการกระจายความหนาแน่นของ Green compact เจริงปริมาตร
- 3.1.11 สร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ โดยการอัดขึ้นรูปและเผาผนึก
- 3.1.12 สรุปผลการออกแบบ วิเคราะห์ และสร้าง เขียนเล่มปริญญานิพนธ์
- 3.1.13 เผยแพร่ผลงานวิจัย ด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารงานวิจัย



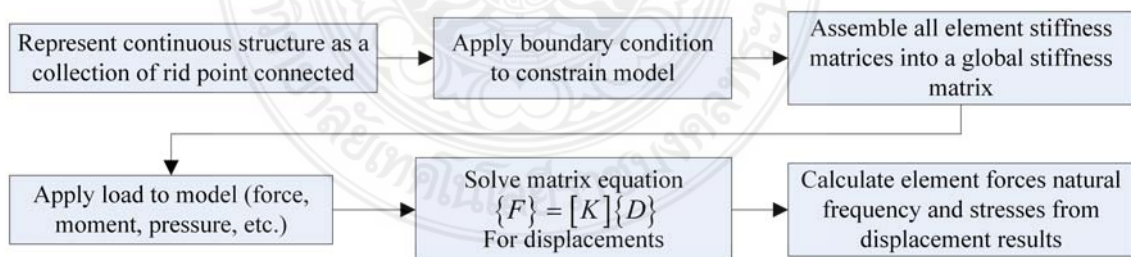
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการศึกษาวิจัย

### 3.2 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์

การออกแบบ วิเคราะห์ความแข็งแรง และความถี่ธรรมชาติของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์ด้วยโปรแกรม SolidWorks และ SolidWorks Simulation จากรูปที่ 3.2 รูปแบบของการเสียรูปที่ความถี่และ Mode Shape ต่าง ๆ สามารถรองรับการเกิด Resonant ได้ระดับหนึ่ง ทั้งสองรูปแบบนี้มีความสมมาตรกัน และการเสียรูปเมื่ออยู่ภายใต้คลื่นอุลตราโซนิคส์จะมีความสมมาตร ส่งผลให้คลื่นอุลตราโซนิคส์สามารถส่งถ่ายไปยัง Mold Body ได้เป็นอย่างดี มีความแตกต่างในส่วนของรูปร่างของ Waveguide ที่เป็นแบบทรงสี่เหลี่ยม และแบบทรงกระบอกตามลำดับ รูปร่างของ Waveguide ต้องได้รับการออกแบบและวิเคราะห์ใหม่เพื่อให้สามารถส่งถ่ายคลื่นอุลตราโซนิคส์ได้ ในกรณีที่กระบวนการทำวิจัยประกอบด้วยสองวิธี คือการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) และวิธีการทดลอง (EXP.) ซึ่งวิธีการทดลองคือ การทดสอบความแข็งแรงของแม่พิมพ์สำหรับชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น Mold Body, Upper and Lower Punch, Waveguide และนำมาเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถ้าทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ก็แสดงให้เห็นว่า FEA สามารถเป็นตัวแทนการทดลองได้



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์



รูปที่ 3.3 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SolidWorks Simulation มีกระบวนการวิเคราะห์ที่อยู่ 3 ส่วน ดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย Pre-processing, Solve processing และ Post-processing การวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ และ 2. การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของ Waveguide

สำหรับกระบวนการ Pre-processing เป็นการเตรียมการโมเดล 3 มิติ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWorks กำหนดสมบัติของวัสดุ ดังตารางที่ 3.1 วัสดุ AISI52100 ใช้กำหนดให้กับ Mold body, Upper and Lower Punch สำหรับ AISI1045 ใช้กำหนดให้กับ Waveguide การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันจะเกิดหน้าสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ จำนวน 29 หน้าสัมผัส ดังนั้นให้กำหนด Contact set เป็น No Penetration ทุกหน้าสัมผัส สำหรับการจับยึด (Fixtures) ให้กำหนดที่ฐานล่างของแกนอัดตัวล่าง (Lower punch) ในรูปแบบ Fixed กำหนดแรงภายนอก (External load) เป็นชนิด Compressive normal load ขนาด 50,000-100,000 N แบ่งเอลิเมนต์ โดยกำหนด Mesh Parameters เป็นแบบ Curvature-based Mesh ซึ่งจะได้ Maximum Element Size mm ควบคุมขนาดเอลิเมนต์ที่แกนอัดตัวบนด้วยขนาด 3 มิลลิเมตร และได้จำนวนเอลิเมนต์สำหรับแม่พิมพ์ เท่ากับ 79,449 เอลิเมนต์ ตามลำดับ สำหรับกระบวนการ Solve Processing นั้นได้ใช้รูปแบบสมการการคำนวณของโปรแกรมอัตโนมัติ กระบวนการ Post-processing คือ การนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1. ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ที่สามารถต้านทานแรงอัดกำลังสูงได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ซึ่งอธิบายได้ด้วยค่าความเค้นที่ได้มาจากสมการพลังงานการเสียรูปสูงสุด (Maximum Distortion Energy) ในรูปของ Von Mises และ 2. ความถี่ธรรมชาติของ Waveguide ซึ่งแสดงผลความถี่ธรรมชาติจำนวน 5 โหมด (Mode Shape) การออกแบบ Waveguide ที่ดีนั้น ต้องให้ความถี่ธรรมชาติของ waveguide ตรงกันกับชุดกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกส์ เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ Resonant และตัวเรือนแม่พิมพ์ (Mold) อัดขึ้นรูปจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากชุดกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกส์ต้องส่งถ่ายคลื่นออกมาผ่าน Ultrasonic Transducer และคลื่นจะเข้ามาถึง Waveguide ถ้า Waveguide มีความถี่ธรรมชาติที่ไม่ตรงกันกับชุดกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกส์แล้ว จะส่งผลให้เกิดความร้อนสูงที่แผ่น Piezoelectric Ceramic และจากนั้นแผ่น Piezoelectric Ceramic ก็จะแตกหัก

**ตารางที่ 3.1** สมบัติวัสดุของชิ้นงานแม่พิมพ์

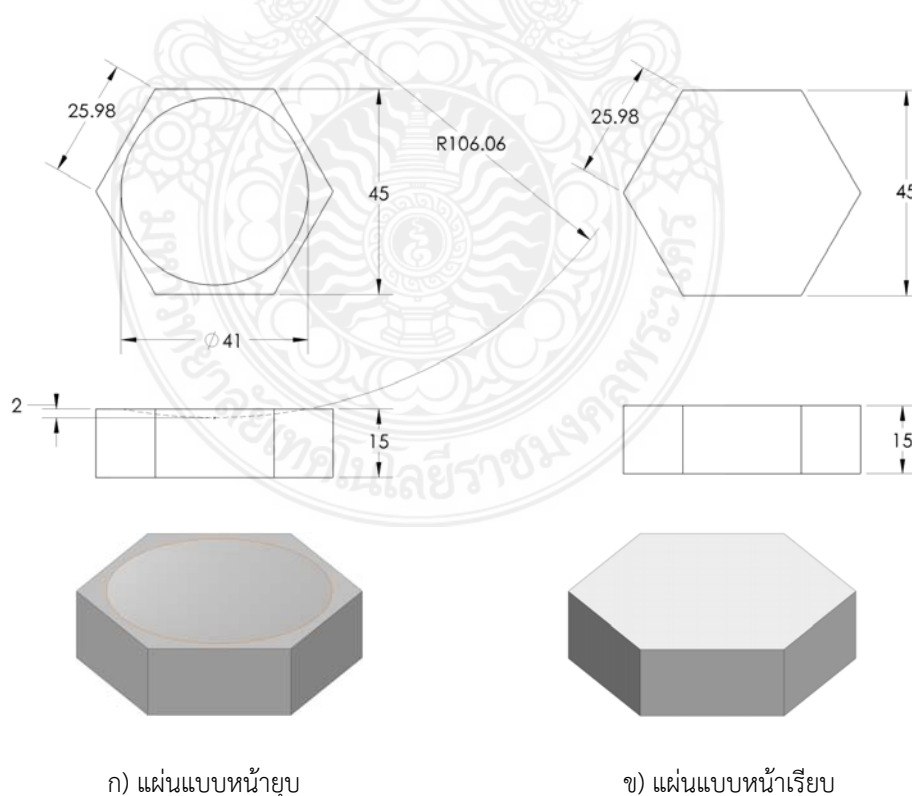
Materials	AISI 52100	AISI 1045
Elastic Modulus	210 GPa	205 GPa
Poisson's Ratio	0.30	0.32
Shear Modulus	80 GPa	80 GPa
Mass Density	7,810 kg/m <sup>3</sup>	7,850 kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	2,240 MPa	1,110 MPa
Yield Strength	2,033 MPa	710 MPa
Hardness, Rockwell C	64 HRC	-

แผ่นเกราะมี 2 แบบ คือ แบบหน้ายุบและแบบหน้าเรียบ จากรูปที่ 3.4 ก จะเป็นรูปทรงแบบหน้ายุบ และรูปที่ 3.4 ข เป็นแบบหน้าเรียบ โดยแต่ละด้านมีความยาวด้านละ 26 มิลลิเมตร หน้าฐานมี



ขนาดความลึกกระยะ 2 มิลลิเมตร เมื่อทราบแรงที่ใช้กระทำในการอัด ความเร็ว ปริมาณผงที่ใส่สามารถคำนวณปริมาณความหนาแน่นตัวแผ่นขึ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูป ได้จาก สูตร  $\rho = m/V$  จากสมการ เมื่อ  $m$  มวลรวมของวัตถุมวลรวมของวัตถุ (กิโลกรัม) เปลี่ยนไป เมื่อ  $V$  มีค่าน้อยกว่า  $m$  ทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

แผ่นเกราะเซรามิกสี่กั๊กกระสุน 2 รูปแบบ คือ แบบหน้าเรียบและแบบหน้ายุบ แสดงดังรูปที่ 3.4 สำหรับแผ่นแบบหน้ายุบจะมีร่องเว้าลงไปลึก 2 มิลลิเมตร ซึ่งร่องเว้านี้สามารถที่จะมีค่าได้มากกว่า 2 มิลลิเมตร ยิ่งล่องเว้าลึกเท่าไรจะส่งผลให้มุมปะทะของหัวกระสุนมีค่ามากขึ้น หัวกระสุนจะเกิดการแฉลบ ความสามารถในการต้านทานการยิงก็จะสูงขึ้นเช่นกัน เพราะจะทำให้ทิศทางของหัวกระสุนเกิดการเบี่ยงเบน ลักษณะของแผ่นแบบหน้ายุบนี้ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 41 มิลลิเมตร มีรัศมีความโค้งอยู่ที่ 106.06 มิลลิเมตร ทั้งแผ่นแบบหน้ายุบและแผ่นแบบหน้าเรียบมีความหนา 15 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ขึ้นอยู่กับว่าจะใส่ผงอลูมินาลงไปในปริมาณกี่กรัม ความหนาจะส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของหัวกระสุนได้ จากรูปที่ 3.4 ข เป็นแผ่นแบบหน้าเรียบที่มีขนาดเหมือนกับแผ่นแบบหน้ายุบเพียงแต่ไม่มีร่องเว้าลงไปเท่านั้น ซึ่งถือได้ว่าเป็นแผ่นเกราะเซรามิกสี่กั๊กทรงเรขาคณิตแบบปกติ ในกระบวนการอัดขึ้นรูปจะเกิดความหนาแน่นของผงที่แตกต่างกันระหว่าง 2 รูปแบบนี้ จึงต้องทำการศึกษาความหนาแน่นที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงความหนาแน่นที่เกิดขึ้นและเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อเพื่อให้เท่ากันทั่วทั้งปริมาตร



ก) แผ่นแบบหน้ายุบ

ข) แผ่นแบบหน้าเรียบ

รูปที่ 3.4 ขนาดและลักษณะของแผ่นเกราะเซรามิกสี่กั๊กกระสุน

### 3.3 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ

ผงอลูมินาเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการทำวิจัย ก่อนการอัดขึ้นรูปแผ่นเซรามิกส์ทำการศึกษากระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของผงวัสดุที่ทดสอบ ก่อนจะนำชิ้นงานวิเคราะห์ต้องทำการเคลือบทองคำลงบนผิวชิ้นงาน ด้วยเครื่อง Sputter Coaters ยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES แสดงดังรูปที่ 3.5-3.6 เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวชิ้นงานเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 แสดงดังรูปที่ 3.7 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเล็กมาก ๆ ของตัวอย่างทางชีวภาพ และยังได้ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณของผงวัสดุทดสอบด้วย ชุดวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX (IE-350) จากนั้นนำชิ้นงานทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) : ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Miniflex แสดงดังรูปที่ 3.7 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าโครงสร้างผลึกของสารนั้นมีโครงสร้างแบบใด หรือเป็นวัสดุอะไร โดยเครื่องวิเคราะห์ทั้งหมดที่ใช้ศึกษาโครงจุลภาคชิ้นวัสดุทดสอบของ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา



รูปที่ 3.5 การเตรียมชิ้นงานเข้าเครื่องวิเคราะห์



รูปที่ 3.6 เครื่องเคลือบทองคำเพื่อไล่ความชื้นก่อนนำชิ้นทดสอบเข้าเครื่อง SEM



**รูปที่ 3.7** กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope: (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: (EDS)

ใช้สำหรับการเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสุดท้ายการเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เพื่อไล่ความชื้นของตัวชิ้นงานทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าในสถานะความเป็นสุญญากาศสูง (HV) ซึ่งจะใช้โลหะฉาบลงบนตัวอย่างภายใต้สถานะสุญญากาศเพื่อทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้า ฉาบด้วยทองคำ

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 2 และ 3 มิติ ได้จากเครื่อง (SEM) จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษา สันฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่างและส่วนเครื่อง (EDS) เป็นเครื่องใช้วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ จุดวิเคราะห์ขนาดเล็กระดับไมครอน ถึงระดับนาโน ผลของการวิเคราะห์ตัวอย่างชิ้นงาน มีสาร มีธาตุ และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสาร/ธาตุนั้น ๆ อยู่ปริมาณเท่าไร

เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ สารประกอบและโมเลกุลของสาร ผลของการวิเคราะห์จะได้ในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และปริมาณ (Quantitative) ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก รวมทั้งใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) และยังบ่งบอกชนิดของสารแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์





รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-ray Diffractometer (XRD)

### 3.4 การอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบผงอลูมินา

หลังจากวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผง ก่อนจะดำเนินการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ เตรียมทำการชั่งผง Alumina HTM 30 ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadza รุ่น ATX224 มีลักษณะดังแสดงรูปที่ 3.9 ใส่ปริมาณผงเท่ากัน นำผงที่ได้จากการชั่งจากนั้นเทผงลงในแม่พิมพ์มีขนาด 45×51.96×98 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.10 ทำการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ โดยทำการอัดด้วยแรงขนาด 1,000 กิโลนิวตัน ความเร็วในการอัด 3 กิโลนิวตันต่อวินาที พื้นที่หน้าตัดแกน 1,753.7 ตารางมิลลิเมตร กระทำลงบนแกนอัด เครื่องมือที่ใช้ในการอัด Universal Testing Machine: (UTM) ยี่ห้อ Hualong รุ่น waw-2000 ที่มีขีดความสามารถในการอัดด้วยแรง 2,000 กิโลนิวตัน แสดงดังรูปที่ 3.11 ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ หลังจากผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปเสร็จ ใช้เครื่องอัดไฮดรอลิคแบบควบคุมด้วยมือ ดังรูปที่ 3.12 อัดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ของสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี



รูปที่ 3.9 ก) เครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยม 4 ตำแหน่ง ข) ผงที่เตรียมมอดขึ้นรูป



รูปที่ 3.10 แม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 3.11 เครื่อง Universal Testing Machine: (UTM) ยี่ห้อ Hualong รุ่น waw-2000



รูปที่ 3.12 เครื่อง Universal Testing Machine: (UTM) แบบควบคุมด้วยมือ



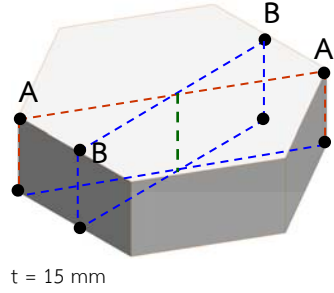
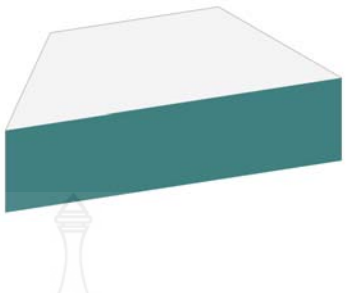
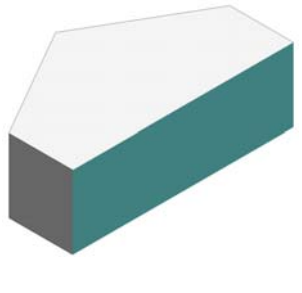
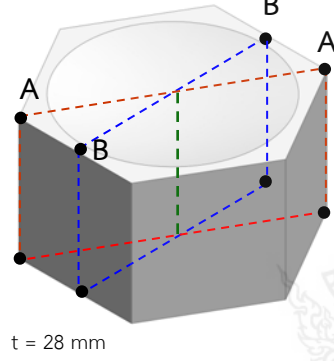

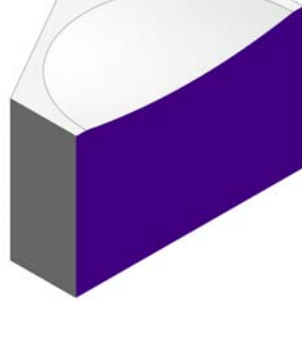
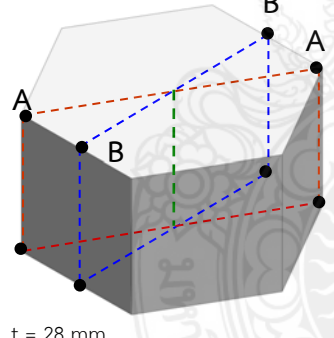


รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่ได้หลังจากกระบวนการอัดขึ้นรูป

จากที่ได้ชิ้นงานจากกระบวนการอัดขึ้นรูป นำชิ้นงานทำการตัดครึ่งโดยจะตัดออกเป็น 2 รูปแบบ โดยมีชิ้นงานมีทั้งหมด 4 รูปแบบคือ 1.) แบบหน้าเรียบ 7 ชั้น 2.) แบบหน้ายุบแบบโค้ง 7 ชั้น 3.) แบบหน้าเรียบ 13 ชั้น 4.) แบบหน้ายุบโค้ง 13 ชั้น โดยใช้ใบเลื่อยฉลุในการแบ่งครึ่งของตัวชิ้นงานเสร็จแล้ว เคลือบด้วยแลคเกอร์เคลือบเงาเพื่อให้ผิวงดรูป จากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดแบ่งครึ่ง วางเทียบกับไม้บรรทัด เข้าเครื่องสแกนด้วยเครื่องพิมพ์เอกสาร Cannon Mg3670 เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 3.2 ภาคตัดแต่ละด้านของแผ่นเกราะที่ความหนาและหน้าตัดต่างๆ

ลำดับ	3D Models	Section A-A	Section B-B
1	<p>t = 15 mm</p>		



ลำดับ	3D Models	Section A-A	Section B-B
2	 <p>t = 15 mm</p>		
3	 <p>t = 28 mm</p>		
4	 <p>t = 28 mm</p>		

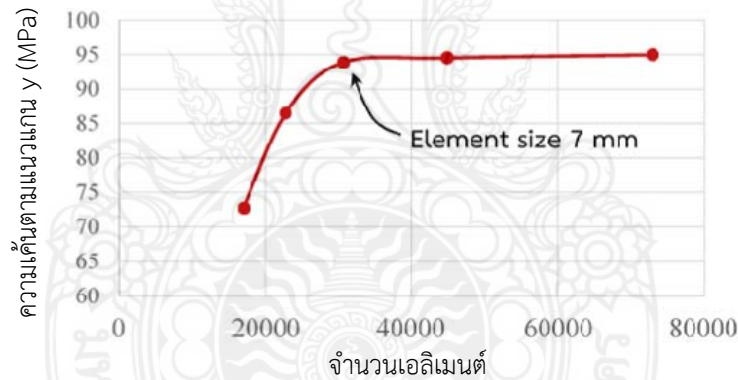
จากตารางที่ 3.2 เป็นการแสดงภาคตัดแต่ละด้านของแผ่นเกราะที่ความหนาและหน้าตัดต่างๆ โมเดล 3 มิติที่ใช้ในการนำเสนอแสดงถึงการกระจายความหนาแน่นตลอดทั่วปริมาตรแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ รูปแบบที่เป็นหน้าเรียบและหน้ายวบและแบ่งความหนาออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 15 มิลลิเมตร และ 28 มิลลิเมตร ทำการตัด Section เป็น 2 Section คือ Section A-A และ Section B-B ได้ผลของการตัดแสดงดังตารางที่ 3.2 รูปแบบในการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์จะต้องสร้างชั้นความหนาของแต่ละชั้นและนำเส้นการเคลื่อนที่ของผงมาทำการวิเคราะห์คำนวณหาความหนาแน่นที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดจากนั้นทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นที่เกิดขึ้นของโมเดล 3 มิติทั้ง 4 รูปแบบว่ามีลักษณะการกระจายความหนาแน่นเป็นอย่างไร ซึ่งจะแสดงผลของการวิเคราะห์ในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

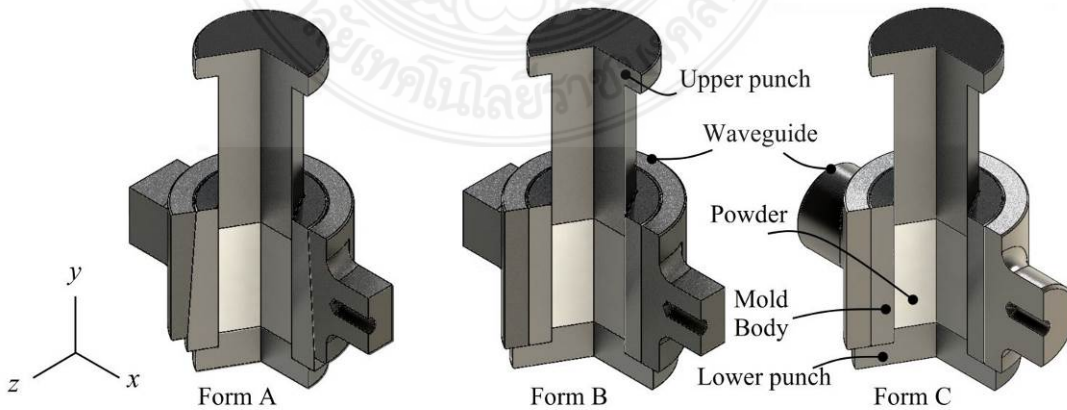
### ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์

#### 4.1 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

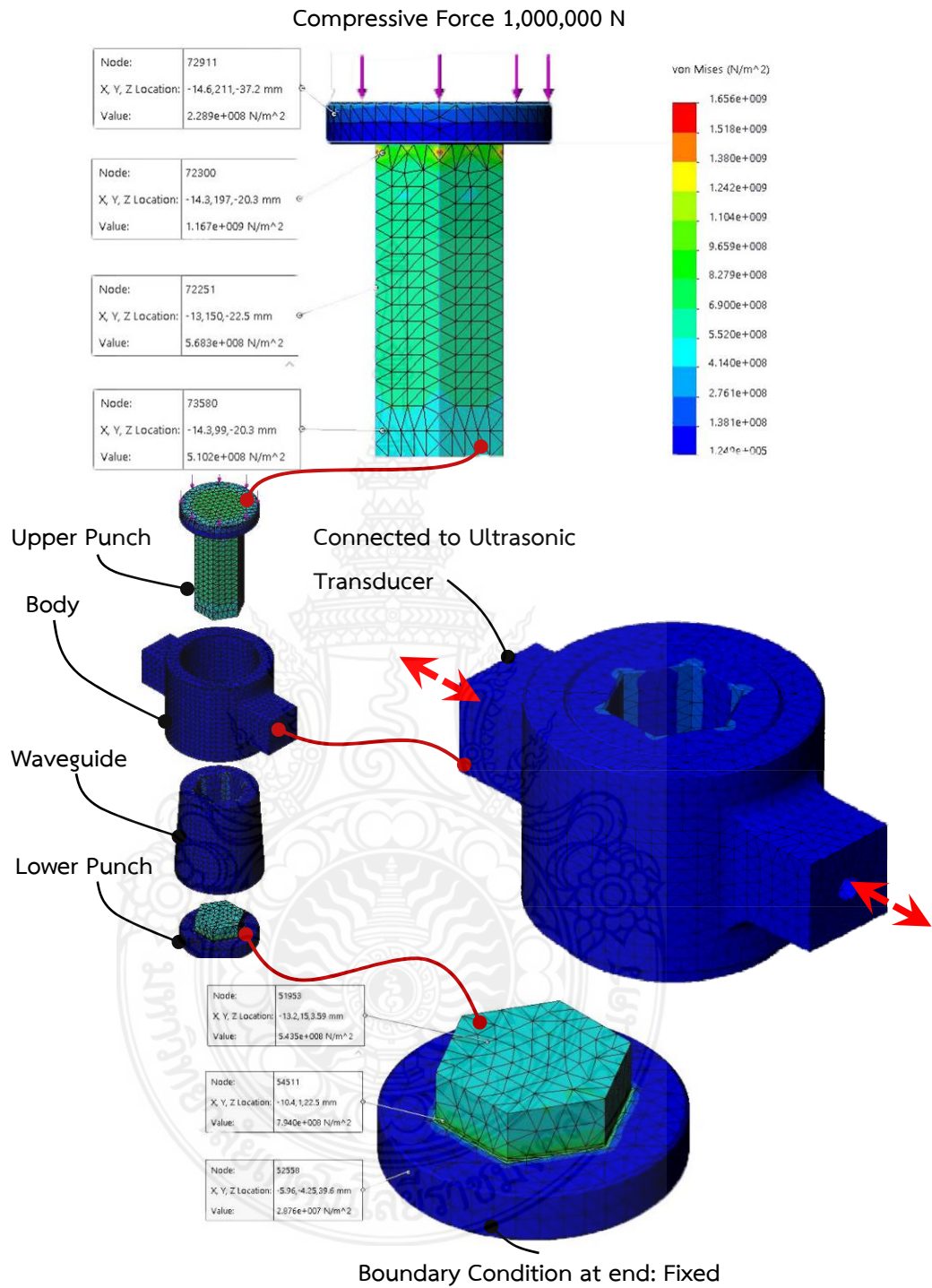
จากการสร้างแบบจำลองทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ด้วยมาตราส่วน 1:1 โดยโปรแกรม SolidWorks และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks Simulation ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ ซึ่งกำหนดการเป็นแรงเนื่องจากก้านสูบไฮดรอลิก และจากการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ด้วยขนาดต่าง ๆ ทำให้ทราบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเทียบกับขนาดเอลิเมนต์ (ส่งผลต่อจำนวนเอลิเมนต์) แสดงดังรูปที่ 4.1 และสามารถเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมคือ 7 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความเค้นเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์



รูปที่ 4.2 รูปแบบของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเซรามิกส์



รูปที่ 4.3 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นกระาเซรามิกส์

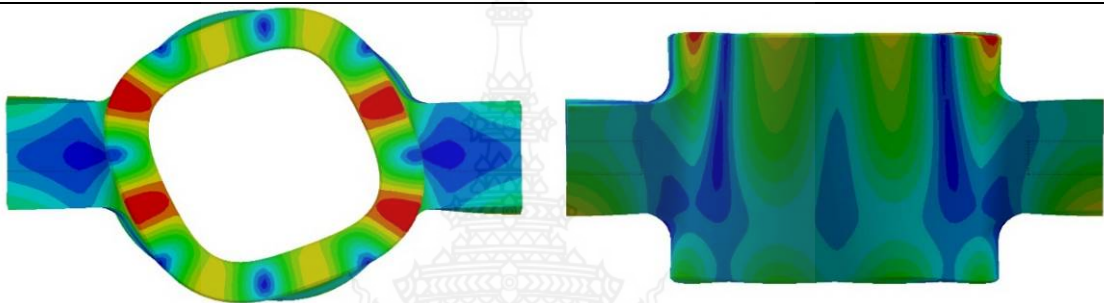
จากรูปที่ 4.2 Form A เป็นรูปแบบของแม่พิมพ์อุลตราโซนิกส์ได้เคยนำเสนอไปก่อนหน้านี้ รูปแบบของการเสียรูปที่ความถี่และ Mode Shape ต่างๆ สามารถรองรับการเกิด Resonant ได้ระดับหนึ่ง จำเป็นอย่างที่ที่ต้องทำการออกแบบแม่พิมพ์ใหม่ โดยเฉพาะชิ้นส่วน Waveguide รูปที่ 4.2 Form

B และ Form C เป็นรูปแบบของ Waveguide ที่ได้รับการออกแบบใหม่ โดย Mold Body และ Waveguide เป็นรูปทรงกระบอก ไม่มีมุมเอียง สวมเข้าด้วยกันด้วยค่าพิคัดความเผื่อ (Tolerance) เท่ากับ 40 ไมครอน ทั้งสองรูปแบบนี้มีความสมมาตรกัน และการเสีรูปร่างเมื่ออยู่ภายใต้คลื่นอุลตราโซนิคส์จะมีความสมมาตร ส่งผลให้คลื่นอุลตราโซนิคส์สามารถส่งถ่ายไปยัง Mold Body ได้เป็นอย่างดี รูปแบบ Form B และ Form C มีความแตกต่างในส่วนของการสร้างแกน Waveguide ที่เป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมและแบบทรงกระบอก ตามลำดับ รูปร่างของ Waveguide ต้องได้รับการออกแบบและวิเคราะห์ใหม่

จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ พบว่าชิ้นส่วนที่ต้องได้รับการพิจารณามากที่สุดคือ แกนอัดตัวบน (Upper Punch) ภายใต้แรงอัด 1,000,000 นิวตัน ส่งผลให้เกิดความเค้นสูงสุดที่ 1,656 เมกกะนิวตันต่อตารางเมตร และต่ำสุดที่ 124.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงอัดในแนวแกนโดยตรงจากก้านอัดไฮดรอลิกด้วยกำลังสูง และแกนอัดนี้มีความยาว ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ความเค้นสูงสุดในแกนอัดตัวบนนี้มีค่าเท่ากับ 1,656 เมกกะนิวตันต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าความเค้นที่จุดครากอยู่ที่ 2,033 เมกกะปาสคาล (ดูตารางที่ 3.1) ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.22 พื้นที่ที่เกิดความเค้นนี้อยู่ที่บริเวณคอบนของแกนอัด ซึ่งเกิดเป็นความเข้มข้นของความเค้นที่จุด ดังรูปที่ 4.3 ส่วนชิ้นส่วนอื่น ๆ นั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นน้อยกว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแกนอัดตัวบน หากแกนอัดตัวบนสามารถต้านทานแรงอัดได้ ชิ้นส่วนอื่นก็ย่อมสามารถใช้งานได้เช่นกัน จากการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของ Waveguide ในการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ (Frequency Analysis) เป็นการตรวจสอบ Mode Shape ของ Waveguide ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกับ Ultrasonic Transducer ที่จะส่งคลื่นความถี่ที่ระดับ 20-25 กิโลเฮิร์ตซ์ ในการออกแบบ Waveguide ต้องออกแบบให้มีรูปร่างที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของ Waveguide เอง ผลลัพธ์จากการออกแบบทำให้ได้รูปร่างของ Waveguide ที่เหมาะสม เมื่อนำไปใช้ในงานกระบวนการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์จะทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคผงลดลง และแรงเสียดทานระหว่างผงกับผนังแม่พิมพ์ลดลง ทำให้ความหนาแน่นตลอดปริมาตรของแผ่นเกราะเซรามิกส์เกือบเท่ากันในทุกๆระดับชั้นความสูง จากการวิเคราะห์ด้วย SolidWorks Simulation ทำให้ได้รูปแบบออกมา 10 รูปแบบ ดังรูปที่ 4.4-4.13 และตารางที่ 4.1 ค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์มีหน่วยเป็น กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ชิ้นส่วน Waveguide จะเกิดการเสีรูปร่างตามค่าความถี่ที่ได้รับการกระตุ้นมาจาก Ultrasonic Transducer ที่สามารถส่งคลื่นความถี่ออกมาได้ในช่วง 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ด้วยกำลังขับ 1,000 วัตต์ จากรูปที่ 4.3-4.12 สรุปได้ว่าการออกแบบรูปร่าง Waveguide และขนาดต่าง ๆ มีความเหมาะสมกับตัวเสื่อแม่พิมพ์และตัว Ultrasonic Transducer ที่สามารถรับคลื่นการสั่นสะเทือนเหนือเสียงแล้วส่งผ่านออกไปยังตัวเสื่อแม่พิมพ์จะเสีรูปร่างเมื่อมีความถี่มากกระทำต่อ Waveguide ดังนั้นจึงเลือกใช้ Mode Shape ที่มีการเสีรูปร่างในทุกทิศทาง ซึ่งจะตรงกับ Mode Shape แบบที่ 8

ตารางที่ 4.1 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.1-10 [62]

Mode Shape No.	Mode Shape Value (kHz)	Mode Shape No.	Mode Shape Value (kHz)
1	21.799	6	23.481
2	22.096	7	24.665
3	22.495	8	25.817
4	23.119	9	26.164
5	23.359	10	26.379



มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

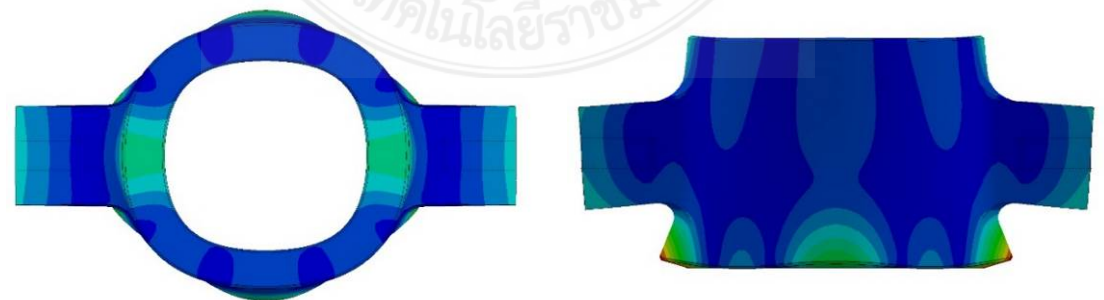
รูปที่ 4.4 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.1: 21.799 kHz [62]



มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.5 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.2: 22.096 kHz [62]

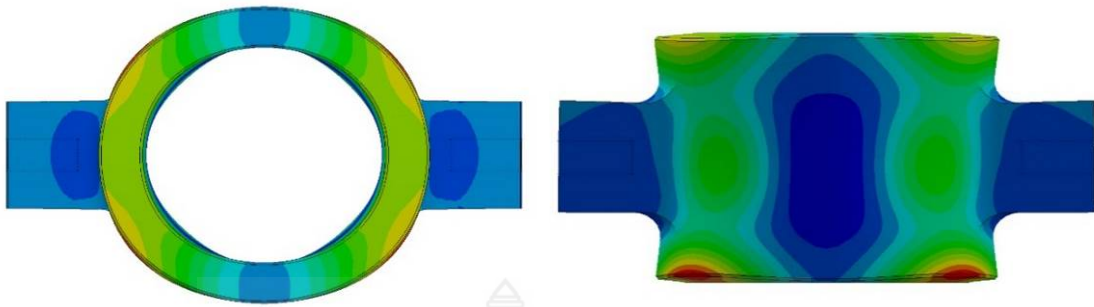


มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.6 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.3: 22.495 kHz [62]

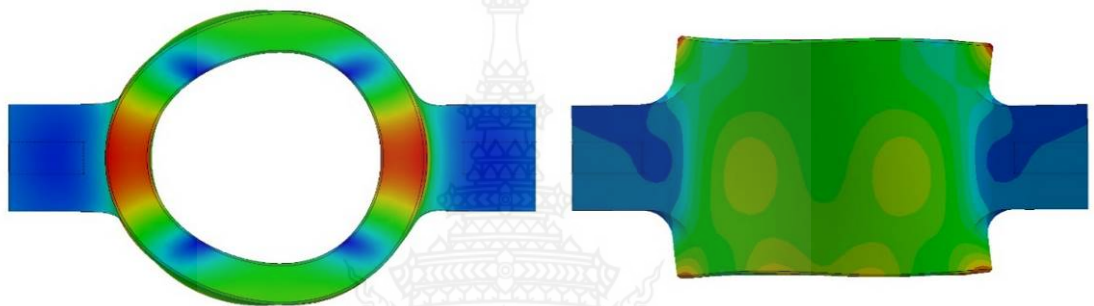




มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.7 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.4: 23.119 kHz [62]



มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

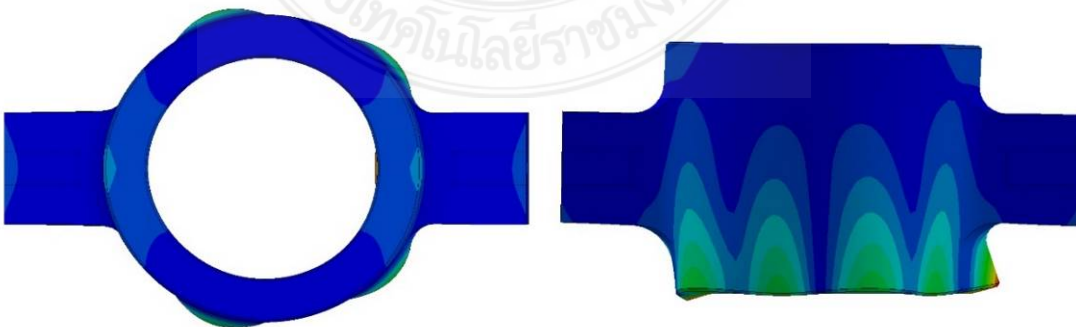
รูปที่ 4.8 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.5: 23.359 kHz [62]



มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.9 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.6: 23.481 kHz [62]

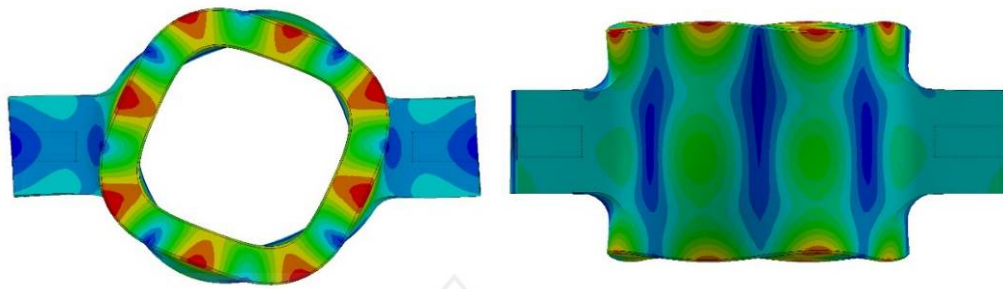


มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.10 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.7: 24.665 kHz [62]

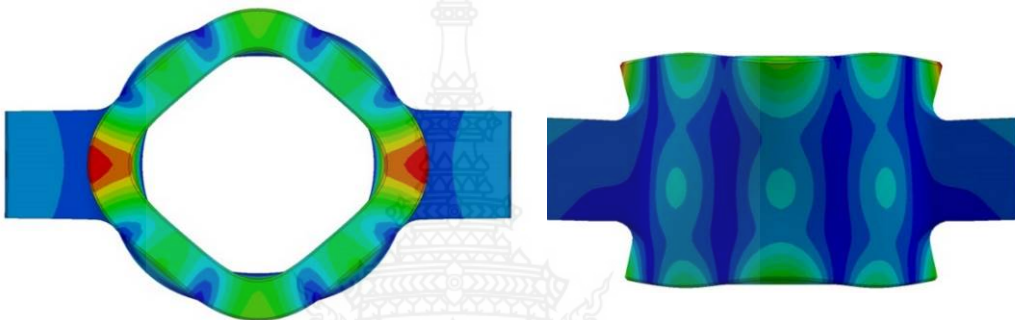




มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.11 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.8: 25.817 kHz [62]



มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.12 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.9: 26.164 kHz [62]



มุมมองด้านบน

มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 4.13 Natural Frequency ที่ Mode Shape No.10: 26.379 kHz [62]



รูปที่ 4.14 เครื่องจักร CNC 3 แกน

## 4.2 ผลการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

หลังจากการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ด้วยโปรแกรม SolidWorks และวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation ก็ต้องทำการผลิต โดยจะใช้เครื่องจักร CNC 3 แกน ดังรูปที่ 4.14 ในการผลิตขึ้นส่วนจำนวน 4 ชิ้น ซึ่งต้องใช้ดอกกัดชนิดพิเศษ เนื่องจากชิ้นส่วนทั้งหมดเมื่อสวมเข้าด้วยกันจะมีช่องว่างผิวสัมผัสห่างกันประมาณ 60 ไมครอน จากรูปที่ 4.15 ชิ้นงานจริงหลังจากผ่านกระบวนการสร้างด้วยเครื่อง CNC ความละเอียด 60 ไมครอน รูปที่ 4.15ก ชิ้นส่วนประกอบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป โดยจะมีส่วนประกอบ Waveguide, Body, แกนอัด 2 รูปแบบ คือ แกนอัดแบบหน้าเรียบ แกนอัดแบบหน้านูน และภาพเป็นการประกอบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป เพื่อเตรียมสำหรับการอัดขึ้นรูปผงอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined  $Al_2O_3$



ก ชิ้นส่วนประกอบแม่พิมพ์

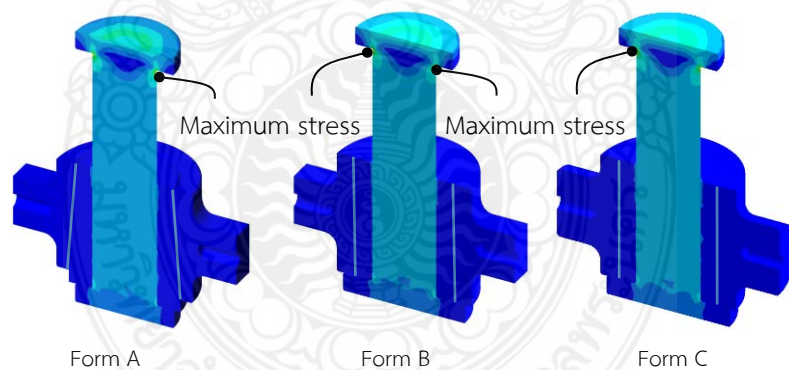
ข ประกอบแม่พิมพ์ขึ้นรูป

รูปที่ 4.15 รูปชิ้นงานแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

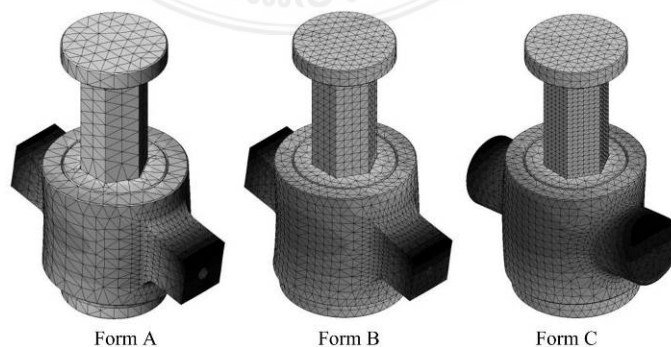


รูปที่ 4.16 การติดตั้ง Strain Gage ลงบนตัวเรือนแม่พิมพ์และแกนอัด

การทดสอบหาค่าความเครียดจากการทดลองทำได้ด้วยการกำหนดจุดติดตั้ง Strain gages จำนวน 12 จุด และใช้กระดาษทรายสำหรับขัดโลหะเบอร์ 600 ขัดผิวโลหะที่จะติดตั้งลงไป และเช็ดทำความสะอาดอีกครั้ง ตามรูปที่ 3 Strain Gages ที่เลือกใช้เป็นชนิด FLA-5-111LJC มี Gauge length เท่ากับ 5 มิลลิเมตร หลังการติดตั้งวัดค่าความต้านทาน ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และ 50% RH จะต้องวัดได้ในช่วง  $120 \pm 0.5$  เมื่อนำ Data Logger รุ่น EDX-200A-4H (KYOWA) ติดตั้งเข้ากับ Strain Gages และปรับตั้งค่าให้เป็นศูนย์ จากนั้นนำแม่พิมพ์เข้าเครื่องทดสอบการอัดด้วยแรง 300 กิโลนิวตัน ขณะทำการอัด Data Logger จะบันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่แกนอัดและที่ตัวแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปตลอดเวลาที่ตั้งค่าไว้ ความเครียดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นความเครียดในทิศทางแนวแกน y และจะสอดคล้องกับความเครียดที่ได้จากการทดลองภายใต้แรงอัด 500 กิโลนิวตัน ผลการเปรียบเทียบความเครียดจากสองวิธีแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งมีค่าความแตกต่างระหว่างสองวิธี สูงสุดไม่เกินร้อยละ 7 และต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 3.24 แสดงว่าการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถเป็นตัวแทนการทดลองได้และโปรแกรม SolidWorks Simulation มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแข็งแรงและความถี่ธรรมชาติของแม่พิมพ์ได้ ผลจากการวิเคราะห์ค่าความเครียดส่งผลให้สามารถคำนวณค่าความเค้น และนำไปสู่การคำนวณค่าความปลอดภัยของแม่พิมพ์ จากรูปที่ 4.17 ความเค้นและความเครียดสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณคอกของแกนอัดตัวบน และเมื่อแกนอัดอยู่ในตำแหน่งที่สูงจะส่งผลให้เกิดความเข้มของความเค้นสูงขึ้นกว่าปกติ



รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ความเค้น Von-Mises โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติแบบรูปที่ 5 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลอง (EXP.) และผลของ FEA ภายใต้แรงอัด 50,000 N

Strains						
Position	1	2	3	4	5	6
EXP.	-0.00033	-0.000139	-0.000135	-0.000000422	-0.000011	-0.00000068
FEA	-0.00032	-0.000135	-0.000131	-0.000000401	-0.000010	-0.00000065
%	4.23	3.45	3.88	5.29	3.24	4.82

Position	7	8	9	10	11	12
EXP.	-0.0002539	-0.000144	-0.000132	-0.0000004994	-0.00001136	-0.000000749
FEA	0.0002443	-0.000135	0.000126	-0.0000004974	-0.00001095	-0.000000718
%	3.96	6.77	5.21	4.08	3.75	4.26

ตารางที่ 4.3 ความถี่ธรรมชาติที่รูปร่างรูปแบบต่างๆ

Mode Shape	1	2	3	4	5
Natural Frequency (Hz) for Form A	7,386	9,200	12,587	11,616	12,340
Natural Frequency (Hz) for Form B	8,151	9,535	11,357	12,003	12,450
Natural Frequency (Hz) for Form C	7,432	8,931	11,001	11,680	12,042

ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นของแม่พิมพ์ทั้ง 3 รูปแบบ ไม่มีความแตกต่าง แต่สำหรับ Waveguide ที่สวมเข้ากับตัวเรือนแม่พิมพ์ มีค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างออกไป และรูปร่าง Waveguide ของ Form B และ Form C มีความคล้ายคลึงกัน เนื่องด้วย Waveguide มีความสมมาตร และไม่มีความชันด้านใน

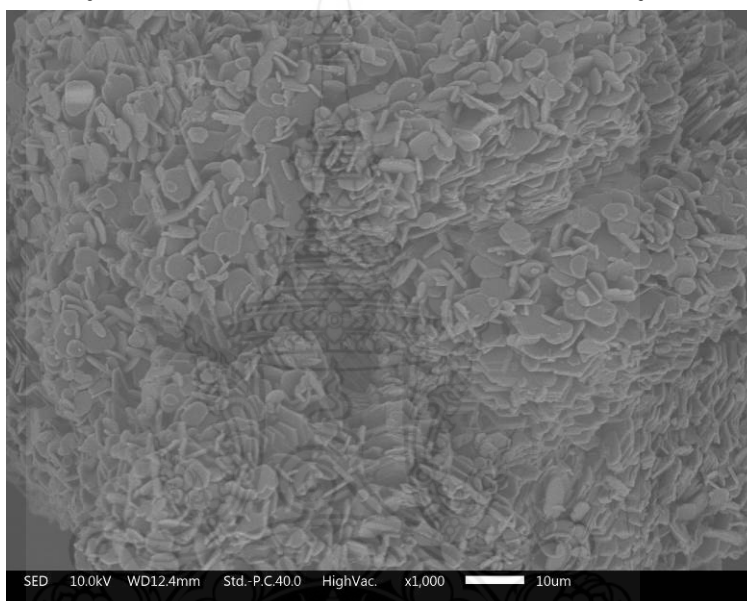
## 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผง ( $Al_2O_3$ )

### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง

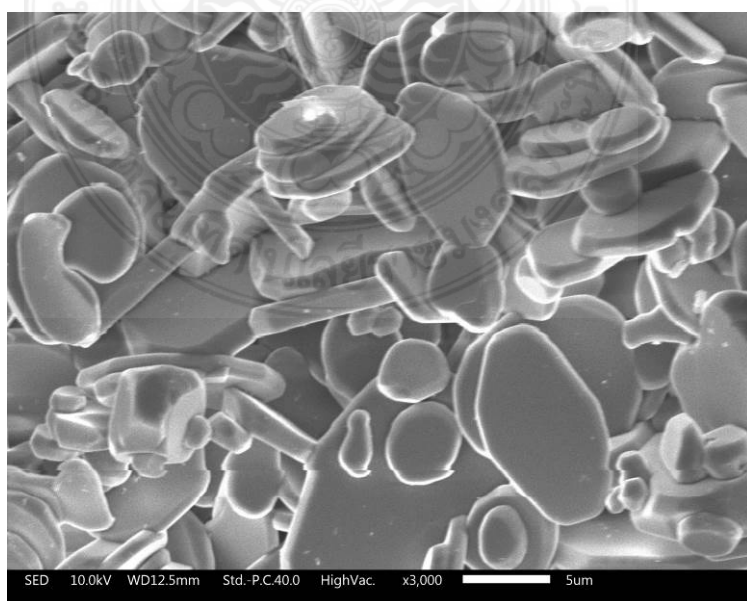
วัสดุผงที่นำมาใช้ในการทดสอบของกระบวนการอัดขึ้นรูปผงคืออลูมิเนียมออกไซด์หรืออะลูมินาซึ่งได้เลือกใช้อยู่ 2 ชนิดคือ Alumina  $Al_2O_3$  B-Grade และ Alumina  $Al_2O_3$  HTM 30 ผลการทดสอบจากเครื่อง Scanning Electron Microscope : (SEM) ทำให้เห็นขนาดและรูปร่างของอนุภาคผงในตำแหน่งที่น่าสนใจบนชิ้นงาน และแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสใน



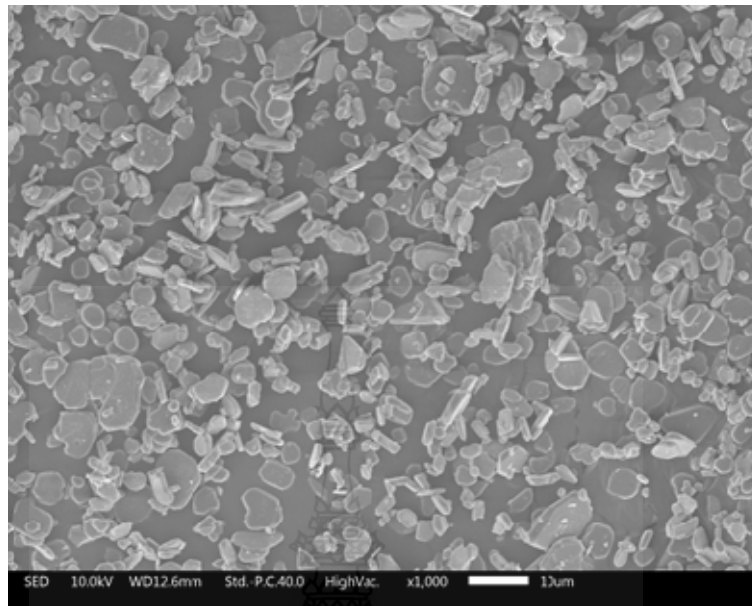
โครงสร้างจุลภาค รวมไปถึงลักษณะของชิ้นงานทางด้านชีววิทยา ภาพลักษณะสัณฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.18, รูปที่ 4.20 ด้วยกำลังขยายที่ 1,000 เท่า และ รูปที่ 4.19, รูปที่ 4.21 ด้วยกำลังขยายที่ 3,000 เท่า จากการศึกษาโครงสร้างพบว่า Alumina  $Al_2O_3$  B-Grade มีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 5 ไมครอนและอนุมิติผงจะมีขนาดไล่เลี่ยใกล้เคียงกัน แต่สำหรับ Alumina  $Al_2O_3$  HTM 30 มีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 2-5 ไมครอน มีขนาดไม่สม่ำเสมอคละเคล้ากันไปอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 ไมครอน นั้นหมายความว่าในกระบวนการอัดขึ้นรูปผงจะทำให้ได้ Green Compact ที่มีความแน่นสูง



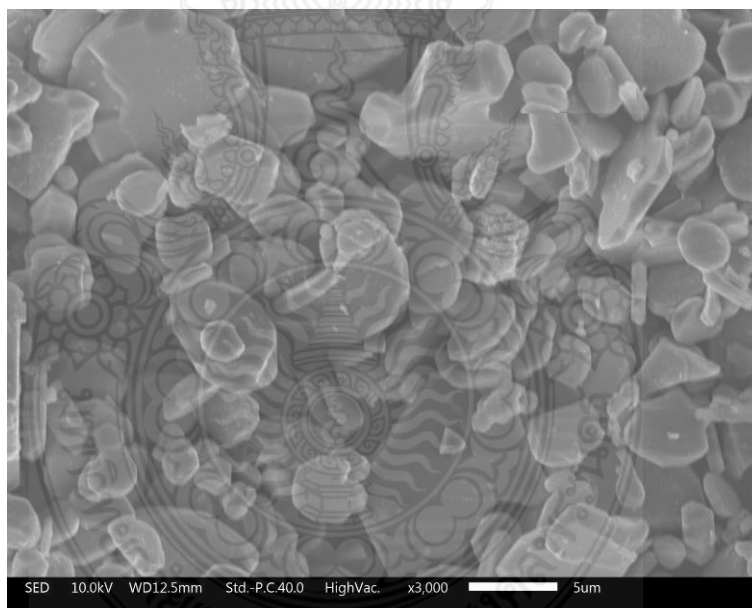
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของ Alumina  $Al_2O_3$  B-Grade ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของ Alumina  $Al_2O_3$  B-Grade ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของ Alumina  $Al_2O_3$  HTM 30 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของ Alumina  $Al_2O_3$  HTM 30 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

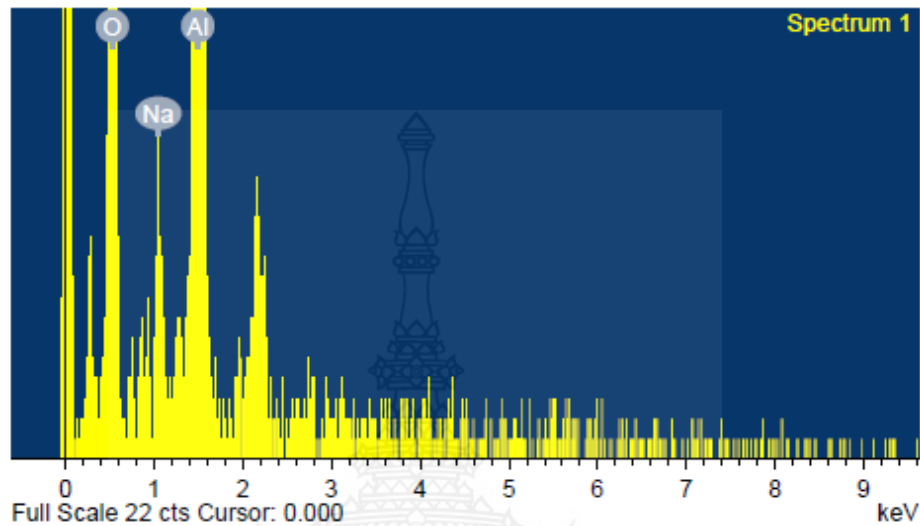
#### 4.3.2 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพ

ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : (EDS) ได้ผลเชิงปริมาณของธาตุของวัสดุ ชนิดของธาตุของวัสดุ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุ ได้ ซึ่งข้อมูลหรือผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนางานวิจัยหรืองานในกระบวนการผลิต จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพ พบว่ามีรายงานผลดังข้อมูลต่อไปนี้

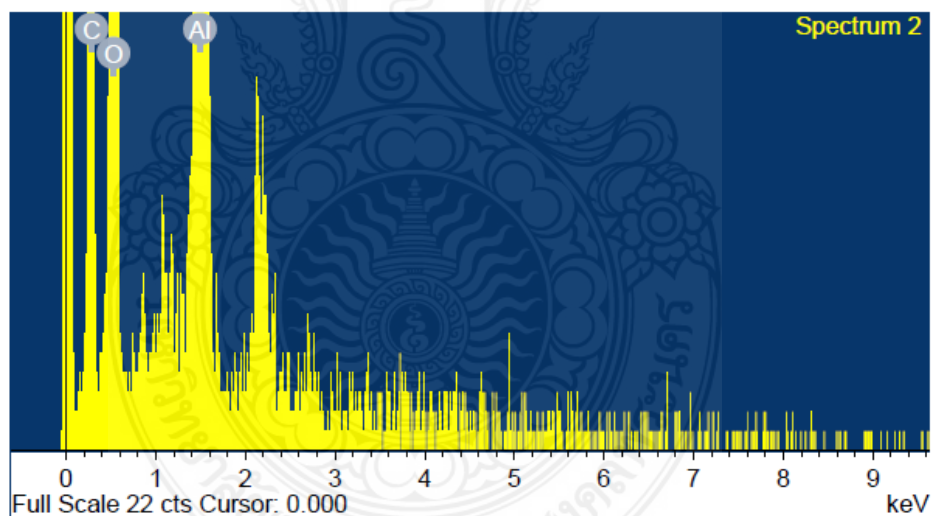
- Spectrum Processing: No Peaks Omitted



- Processing Option for Calcined  $\text{Al}_2\text{O}_3$  B grade: All Elements Analyzed (Normalised) Number of - Iterations = 2 และ Processing Option for Calcined  $\text{Al}_2\text{O}_3$  HTM 30: All Elements Analyzed (Normalised) Number of Iterations = 3



รูปที่ 4.23 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined  $\text{Al}_2\text{O}_3$  B grade



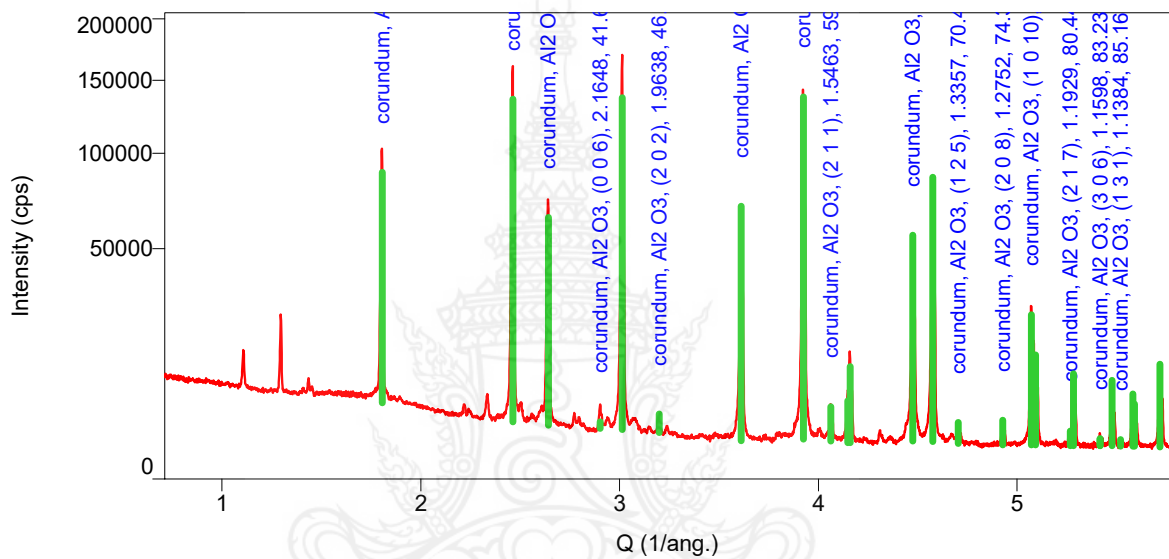
รูปที่ 4.24 การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined  $\text{Al}_2\text{O}_3$  HTM 30

ตารางที่ 4.4 ผลจากการวิเคราะห์จากเครื่อง (EDS)

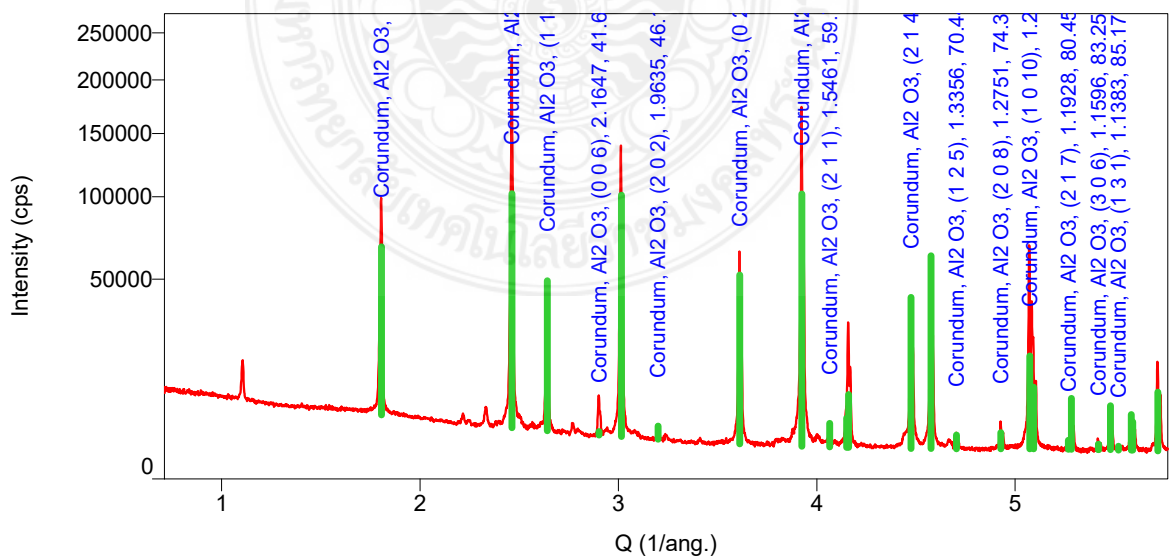
Elements	Calcined $\text{Al}_2\text{O}_3$ B grade			Calcined $\text{Al}_2\text{O}_3$ HTM 30		
	Spect. type	Element %	Atomic %	Spect. type	Element %	Atomic %
O K	ED	47.46	60.22	ED	15.99	23.83
Na K	ED	1.81	0.25	ED	44.92	50.25
Al K	ED	50.73	38.18	ED	39.08	25.92
Total	-	100	100	-	100	100

### 4.3.3 การวิเคราะห์ธาตุเชิงชนิดของสารประกอบของธาตุ

ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer : (XRD) จะบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ ยิ่งไปกว่านั้นผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนางานวิจัย งานในกระบวนการผลิต จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงให้เห็นถึง XRD Pattern ของอะลูมิเนียมออกไซด์ได้อย่างชัดเจน เป็น Corundum  $Al_2O_3$  มีรูปผลึกระบบเฮกซะโกนอล รูปหกเหลี่ยม



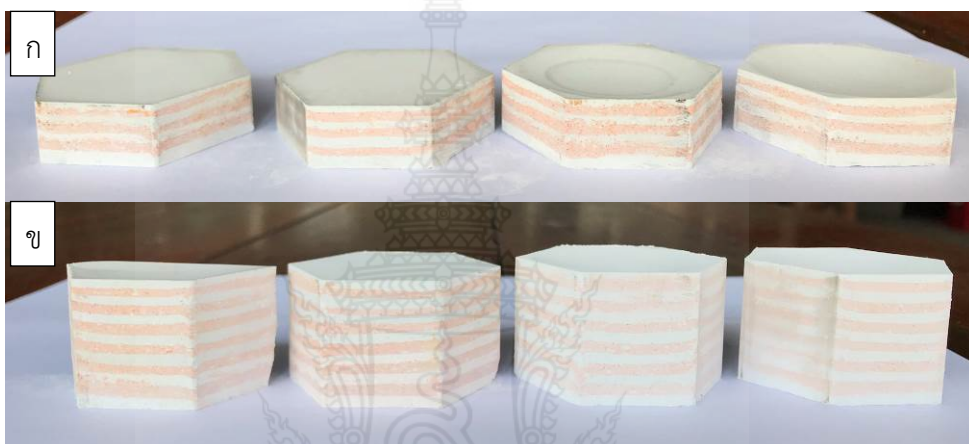
รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์ธาตุอะลูมิเนียมออกไซด์ Calcined  $Al_2O_3$  B grade



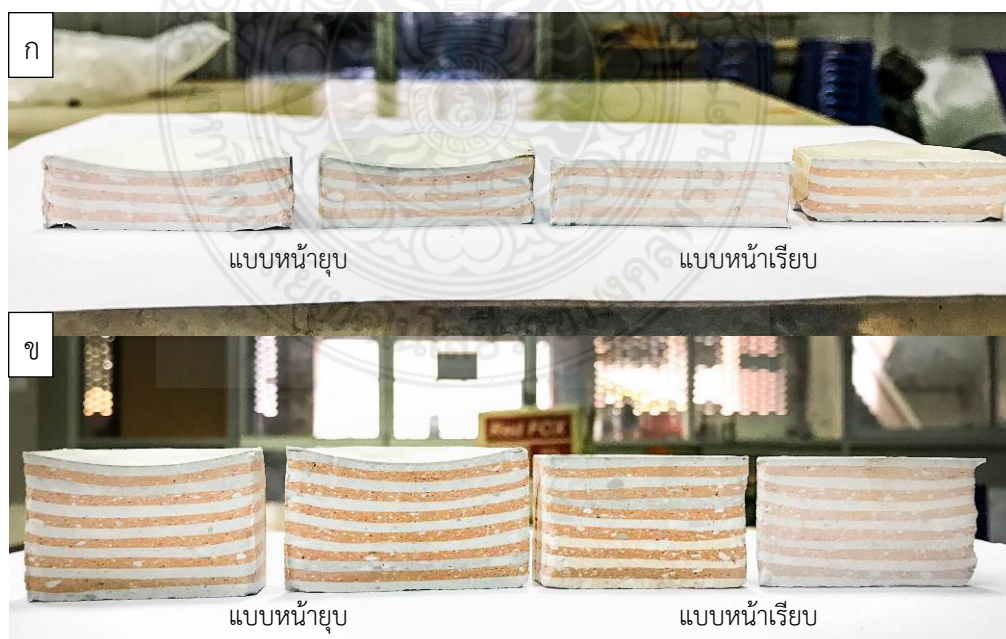
รูปที่ 4.26 การวิเคราะห์ธาตุอะลูมิเนียมออกไซด์ Calcined  $Al_2O_3$  HTM 30

#### 4.4 ผลการอัดขึ้นรูปแผ่นกระดาษเซรามิกส์

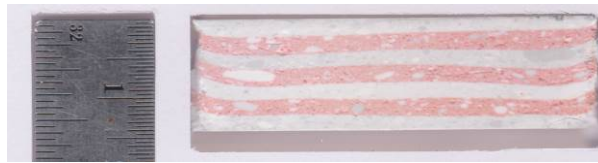
จากรูปที่ 4.27 เป็นชิ้นงานจริงที่ได้หลังจากกระบวนการอัดขึ้นรูป เรียกว่า Green compact โดยมีจำนวนชั้นทั้งหมด 7 และ 13 ชั้น มี 2 รูปแบบ คือ แบบหน้าเรียบ และแบบหน้ายวบ โดยแต่ละชั้นมีปริมาณของผงอลูมินาที่มีน้ำหนักเท่ากัน และใช้แรงอัดด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เท่ากัน โดยแต่ละชั้นใส่สีผสมลงไปในแต่ละชั้นของทุกชั้น เพื่อให้เห็นการแบ่งตัวละชั้น ด้วยแรงที่อัดลงตัวชิ้นงานที่เท่ากัน จากรูปที่ 4.28 เป็นชิ้นงานที่ได้จากการ แบ่งครึ่ง เพื่อทำการศึกษาแรงที่กระทำกันแต่ละชั้นในตัวชิ้นงาน โดยจะมีชิ้นงานแบบ 7 ชั้น และ 13 ชั้น แบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบ



รูปที่ 4.27 ชิ้นงาน Green Compact หลังกระบวนการอัด ก) ชิ้นงานแบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบ จำนวน 7 ชั้น และ ข) ชิ้นงานแบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบจำนวน 13 ชั้น



รูปที่ 4.28 ชิ้นงาน Green Compact หลังการผ่าครึ่ง ก) ชิ้นงานแบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบ จำนวน 7 ชั้น และ ข) ชิ้นงานแบบหน้าเรียบและแบบหน้ายวบจำนวน 13 ชั้น



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างการสแกนหน้าตัด Green Compact ร่วมกับการวัดระยะของ Green Compact แบบหน้าเรียบ 7 ชั้น 15 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลของ Green compact จากการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์

No.	Section in 3D Modeling	2D Scan	Height (mm)	Width (mm)	Number of Layers	Sub-areas	Weight (gram)	Compressive Force (kN)
1			15	45	7	70	59.5	300
2			15	51	7	70	59.5	300
3			15	45	7	70	59.5	300
4			15	51	7	70	59.5	300
5			30	45	13	130	110.5	300
6			30	51	13	130	110.5	300
7			30	45	13	130	110.5	300
8			30	51	13	130	110.5	300

จากรูปที่ 4.29 เป็นตัวอย่างของ Green Compact ที่ถูกแบ่งครึ่งทำให้เห็นการยุบตัวของผงเซรามิกส์ที่เกิดจากกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยแต่ละชั้นจะมีการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกัน ลักษณะของชั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งโดยเฉพาะที่บริเวณผนังแม่พิมพ์กับผงเซรามิกส์ แต่บริเวณส่วนกลางจะค่อนข้างเป็นเส้นตรงท ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานระหว่างผงเซรามิกส์และแม่พิมพ์นั่นเอง Green compact ที่ผ่านการแบ่งครึ่งจะถูกนำไปสแกนร่วมกับไม้บรรทัดเพื่อใช้ในการวัดระยะบนเครื่องสแกนเนอร์ เพื่อที่จะเข้าสู่กระบวนการศึกษาการกระจายความหนาแน่นต่อไป และจากตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับมิติของหน้าตัดในแต่ละ Section ซึ่งแบ่งออกเป็นแผ่นเกราะแบบหน้าเรียบและแผ่นเกราะแบบหน้ายุบสามารถแบ่งออกเป็นได้ 8 กรณีศึกษา ซึ่งแสดงถึงค่าความสูง ความกว้าง จำนวนชั้นของเลเยอร์ พื้นที่ย่อยโดยรวม น้ำหนัก และแรงที่ใช้ในการอัด พารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ใช้ในการศึกษาการกระจายความหนาแน่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

จากแผ่นเกราะเซรามิกส์ที่ผ่านกระบวนการอัดเป็น Green Compact ที่นำมาผ่าครึ่งใน Section A-A และ Section B-B (ดูตารางที่ 4.5 ประกอบ) ดังที่กล่าวมา พบว่ามีชั้นของการเคลื่อนตัวของอนุภาคผงในแต่ละชั้นของแต่ละรูปแบบ จึงได้นำพื้นที่หน้าตัดมาทำการสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์ โดยเทียบระยะกับไม้บรรทัด จากนั้นนำเส้นการเคลื่อนตัวของอนุภาคมาทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็น ส่วน ๆ และพื้นที่ในแต่ละส่วนจะถูกบังคับด้วยเส้น Isoline หรือเส้นทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคผง ทำให้พื้นที่สี่เหลี่ยมแต่ละช่องมีพื้นที่ที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 4.5 กรณีที่ 1-4 ชั้นงานมีความสูง 15 มิลลิเมตร จำนวน 7 ชั้นเลเยอร์ จึงทำการแบ่งจำนวนคอลัมน์ออกเป็น 10 คอลัมน์ ส่งผลให้มีพื้นที่ย่อยจำนวน 70 พื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และกรณีที่ 5-8 ชั้นงานมีความสูง 30 มิลลิเมตร จำนวน 13 ชั้นเลเยอร์ จึงทำการแบ่งจำนวนคอลัมน์ออกเป็น 10 คอลัมน์ ส่งผลให้มีพื้นที่ย่อยจำนวน 130 พื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 เมื่อมีพื้นที่ที่แตกต่างกันหมายถึงปริมาตรในวงรอบจะมีค่าไม่เท่ากันและมวลก็จะมีค่าไม่เท่ากันเช่นกัน ส่งผลให้เกิดการกระจายความหนาแน่นของแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงนำพื้นที่ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J ซึ่งเป็นโปรแกรม Free Software ใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัดที่ผ่าครึ่ง แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติและเปลี่ยนพื้นที่ให้ออกมาเป็นเส้นการกระจายความหนาแน่น ซึ่งได้ผลดังแสดงในคอลัมน์ที่ 3 ของตารางที่ 4.5 โดยในลำดับที่ 1 เป็นแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้าตัดยุบที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร ใน Section A-A และ Section B-B พบว่าความหนาแน่นจะเกิดการกระจายตัวไม่เท่ากันในเชิงปริมาตร ความหนาแน่นจะมีค่าสูงมากในบริเวณผนังขอบด้านบนของ Green compact ที่ติดกับแม่พิมพ์การอัดตัวบนคือเคลื่อนที่ลงมา ส่วนแกนอัดตัวล่างไม่ได้เคลื่อนที่ความหนาแน่นจะมีค่าต่ำกว่าด้านบนและความหนาแน่นจะมีค่าน้อยที่สุด ณ ตำแหน่งใจกลางของแผ่นเกราะ จากตารางที่ 4.6 ลำดับที่ 2 เป็นแผ่นเกราะหน้าตัดเรียบจากการแสดงผลการกระจายความหนาแน่นของผงเซรามิกส์ พบว่าการกระจายตัวทั้งในส่วน Section A-A และ Section



B-B มีรูปแบบการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันมาก อาจเนื่องมาจากไม่มีร่องยวบด้านบนของการอัดตัวบนที่เคลื่อนที่ลงมาอัด แต่ถึงอย่างไรก็ตามความหนาแน่นก็มีค่าสูงมากในบริเวณขอบด้านบนที่ติดกับการอัดตัวบนและในส่วนของพื้นที่ด้านใต้ตรงกลางของการอัดตัวบน อนุภาคผงจะมีความหนาแน่นต่ำ จากตารางที่ 4.5 ลำดับที่ 3 และ 4 เป็นการแสดงการกระจายความหนาแน่นบน Section A-A และ Section B-B แผ่นเกราะที่มีความหนา 30 มิลลิเมตร ที่มีหน้าตัดยวบและหน้าตัดเรียบ พบว่าการกระจายความหนาแน่นค่อนข้างมีการกระจายตัวอย่างดีอาจเนื่องมาจากความสูงของตัวแผ่นเกราะแต่เมื่อไหร่ก็ตามที่แผ่นเกราะถูกอัดจนมีความหนาที่น้อยลงเราจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความหนาแน่นจะกระจายตัวในเชิงปริมาตรที่ไม่เท่าเทียมกันและมีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนความแตกต่างของการกระจายความหนาแน่นจะส่งผลในเรื่องของการหดตัวของแผ่นเกราะภายหลังกระบวนการเผาผนึกแผ่นเกราะจะหดตัวไม่เท่ากันในแต่ละส่วนส่งผลให้รูปร่างที่ออกมาไม่เป็นไปตามต้องการ ปัญหาเรื่องของความเสียหายที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นปัญหาสำคัญและเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์ถึงแม้ว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปจะเป็นกระบวนการที่ง่ายและต้นทุนต่ำแต่ก็ยังเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70

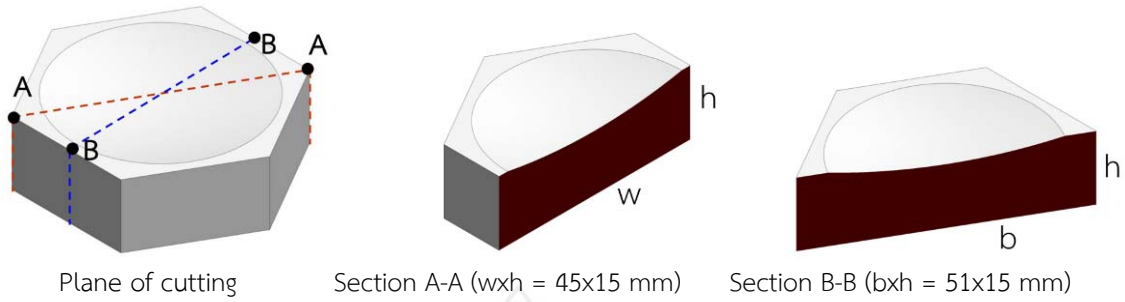
รูปที่ 4.30 ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร 7 เลเยอร์



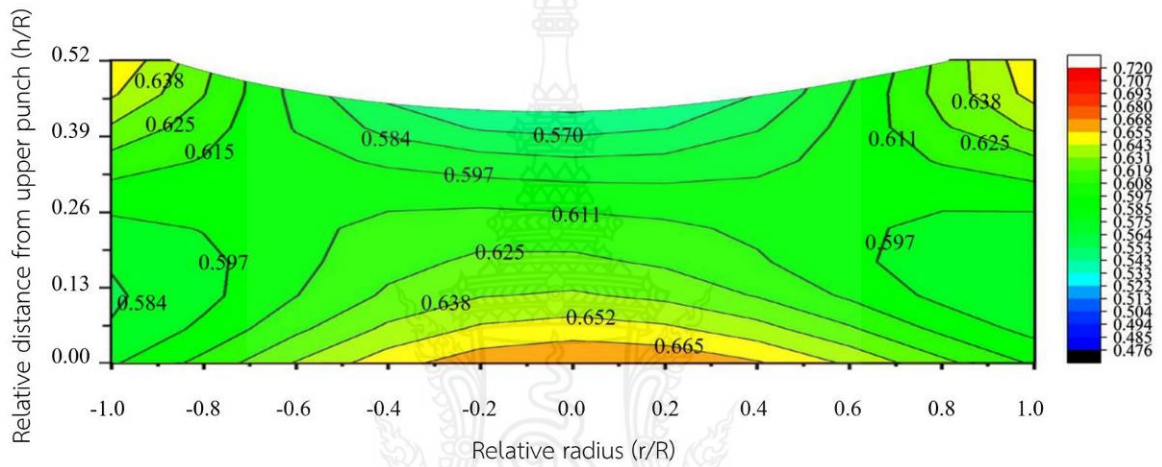
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130

รูปที่ 4.31 ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานที่มีความสูง 30 มิลลิเมตร 13 เลเยอร์

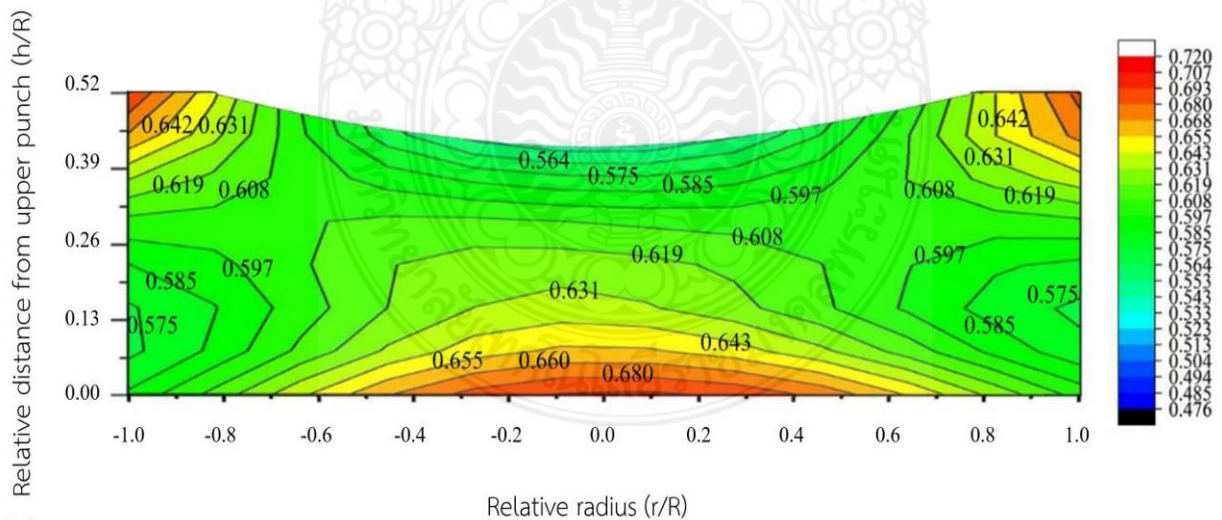




a) Section in 3D modeling

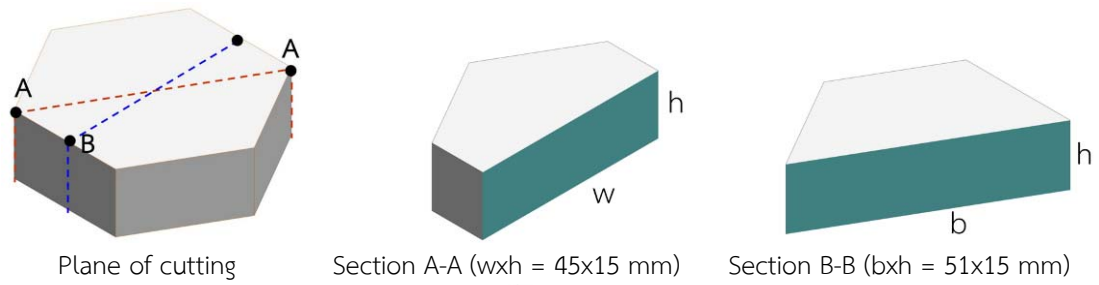


b) Relative density distribution in section A-A

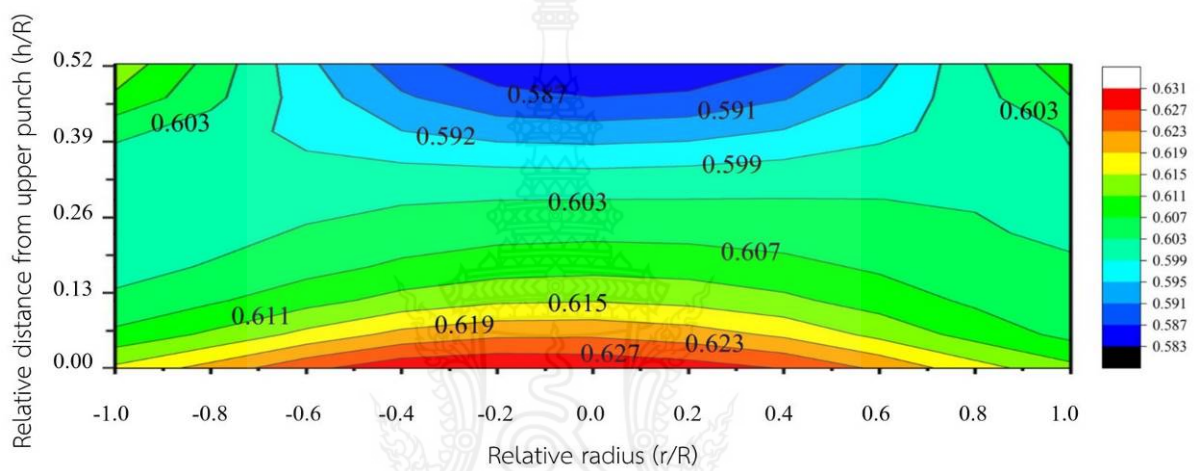


c) Relative density distribution in section B-B

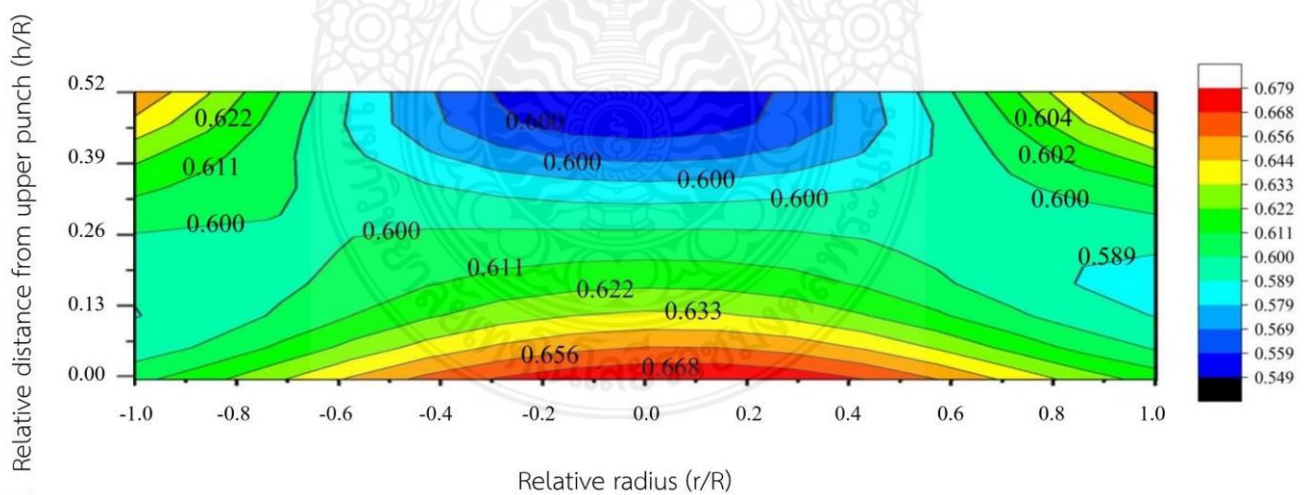
รูปที่ 4.32 การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้ายู่  
ที่ความสูง 15 มิลลิเมตร



a) Section in 3D modeling

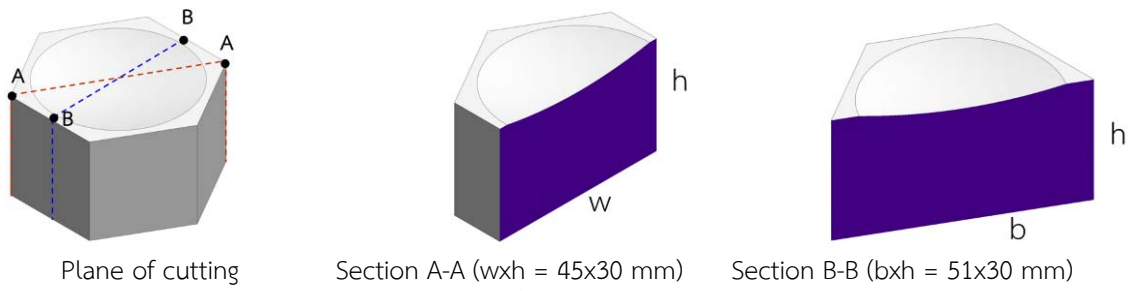


b) Relative density distribution in section A-A

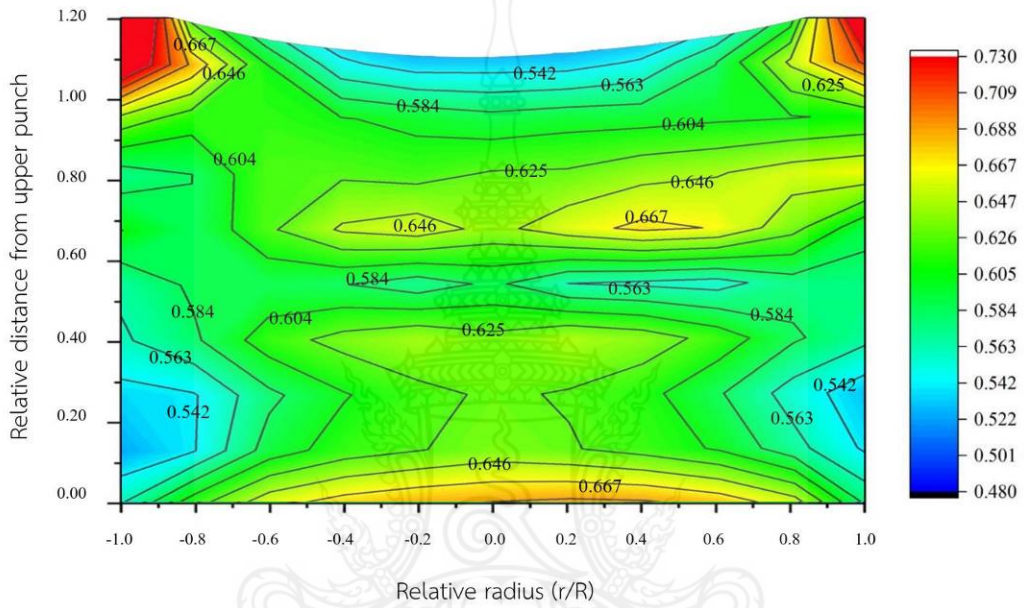


c) Relative density distribution in section B-B

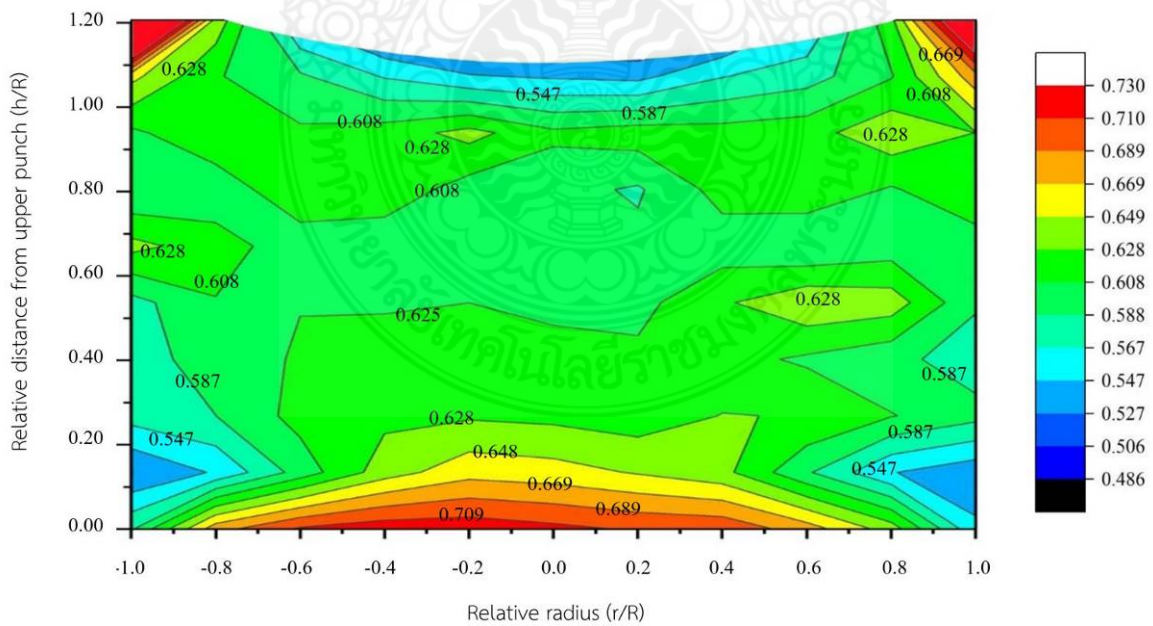
รูปที่ 4.33 การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้าเรียบ  
ที่ความสูง 15 มิลลิเมตร



a) Section in 3D modeling



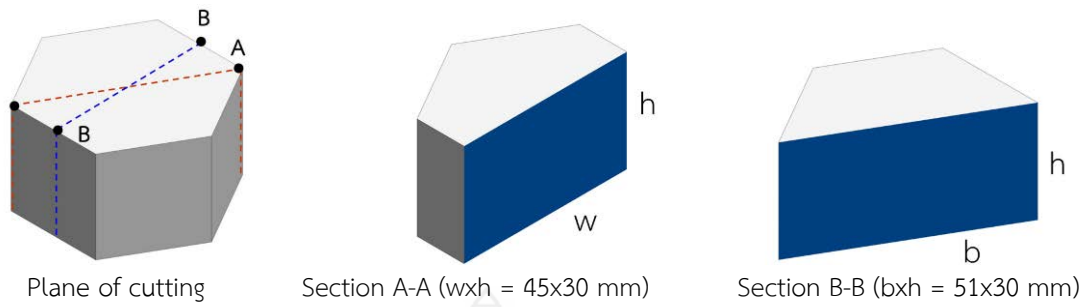
b) Relative density distribution in section A-A



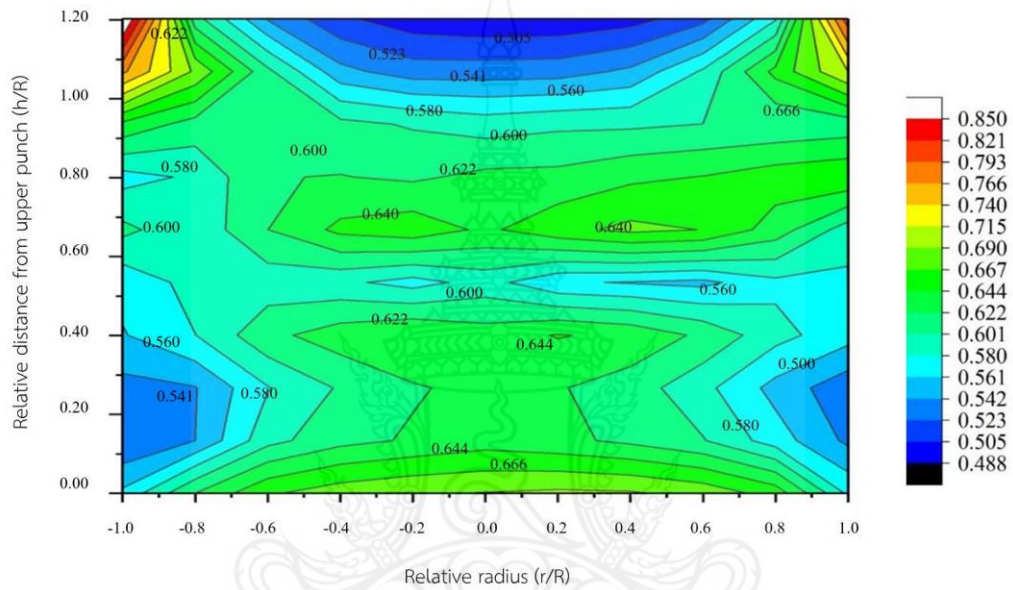
c) Relative density distribution in section B-B

รูปที่ 4.34 การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้ายุบ ที่ความสูง 30 มิลลิเมตร

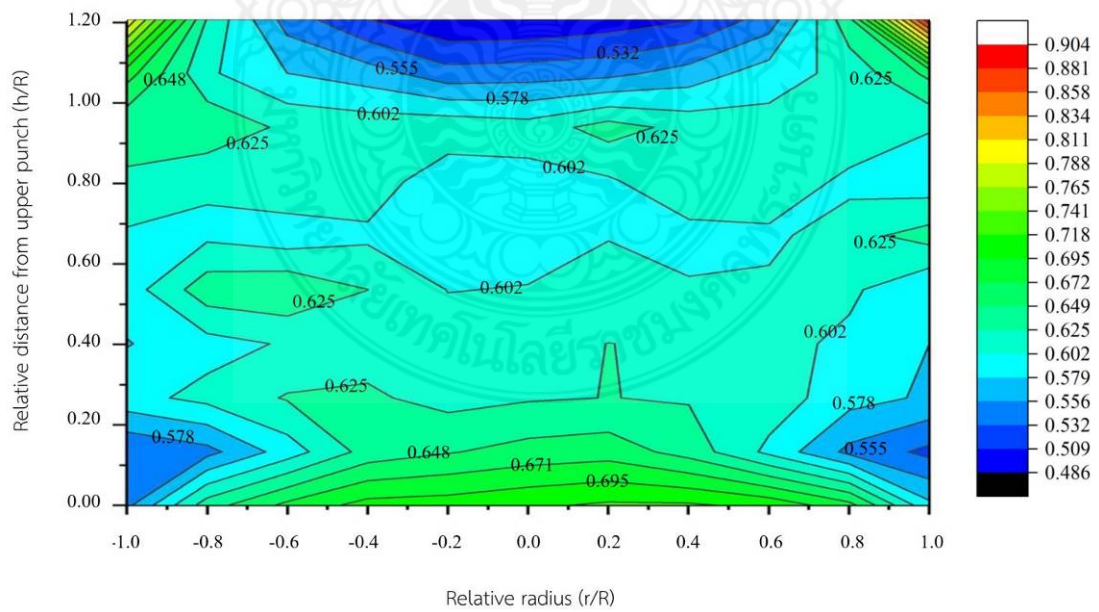




a) Section in 3D modeling



b) Relative density distribution in section A-A



c) Relative density distribution in section B-B

รูปที่ 4.35 การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้าเรียบ  
ที่ความสูง 30 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.32 และ 4.35 เป็นการนำเสนอการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์บนแกนแนวนอนที่เป็นรัศมีสัมพัทธ์ และแกนตั้งเป็นระยะทางสัมพัทธ์จากแกนอัตรานที่เป็นแกนอัตรแบบเคลื่อนที่ลงมา ส่วนแกนอัตรกลางไม่ได้เคลื่อนที่ (หยุดนิ่ง) ภายใต้แรงอัดที่เท่ากันคือ 300 กิโลนิวตัน โดยทำการแบ่งระนาบการตัดออกเป็นสองแบบคือ Section A-A และ B-B ซึ่งมีความกว้าง 45 และ 51 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 4.32 และ 4.34 เป็นการอัดผงเซรามิกส์ในแม่พิมพ์ด้วยแกนอัตรทิศทางเดียว (Uniaxial compression) แบบหน้าเรียบที่มีความสูงแตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์พบว่า รูปแบบการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์มีรูปแบบคล้ายคลึงกันในทุกกรณี ความหนาแน่นจะแตกต่างกันน้อยและมีค่าสูงในบริเวณขอบบนของ Green Compact ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผนังแม่พิมพ์และแกนอัตร บริเวณใดที่มีเขตสีใกล้เคียงกันจะแสดงถึงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ใกล้เคียงกัน

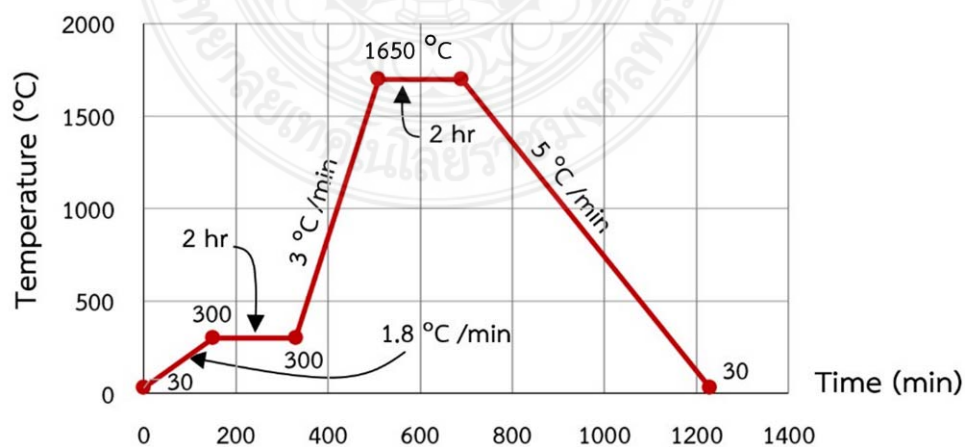
#### 4.6 แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ

นำ Green Compact จากกระบวนการอัดขึ้นรูปมาทำการเผาผนึกในห้องเผา Sintering เพื่อสร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์โดยใช้เตาเผาผนึก Nabertherm 1800 ดังรูปที่ 4.36 ซึ่งเป็นเตาที่มีอุณหภูมิเผาผนึกสูงสุดที่ 1,800 องศาเซลเซียส โปรแกรมการเผาผนึกแสดงดังรูปที่ 4.37 เริ่มต้นจากการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 1.8 องศาเซลเซียสต่อนาที จนไปถึง 300 องศาเซลเซียส และให้เผา Green Compact ที่ 300 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ต่อไปเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ 1,650 องศาเซลเซียส และให้คงอุณหภูมิเผาผนึกที่ 1,650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นให้ทำการลดอุณหภูมิลง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งค่าอุณหภูมิในห้องเผาและชิ้นงานกลับเข้าสู่อุณหภูมิห้อง จึงเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการเผาผนึก รูปที่ 4.36 เป็นการจัดวางเรียงแผ่นเกราะลงในห้องเผาผนึก ต้องวางเรียงโดยไม่ซ้อนทับกัน จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิในการเผาผนึกที่ 1500, 1550, 1600 และ 1650 องศาเซลเซียส และการทดสอบการอัดที่แรงอัดต่างๆคือ 300, 500, 700 และ 1000 กิโลนิวตัน พบว่าการอัดที่แรงอัด 1000 กิโลนิวตัน และที่อุณหภูมิเผาผนึก 1650 องศาเซลเซียส จะได้แผ่นเกราะที่มีความแข็งสูงสุดดังรูปที่ 4.40 ซึ่งแรงอัด 1000 กิโลนิวตัน เป็นแรงอัดสูงสุดที่แม่พิมพ์สามารถทำงานได้โดยไม่เสียหาย หากต้องการแรงอัดที่สูงกว่านี้เพื่อให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นจะต้องใช้วัสดุอื่นในการสร้างแกนอัตร จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการได้มาซึ่งแผ่นเกราะเซรามิกส์ที่ดีนั้น ประกอบด้วย 1) อุณหภูมิการเผาผนึก 2) ระยะเวลาในการเผาผนึก 3) แรงอัดขึ้นรูปในกระบวนการอัดขึ้นรูปแห้ง 4) ความหนาของแผ่นเกราะที่อัดขึ้นรูป 5) สารเติมแต่งช่วยในการขึ้นรูป 6) ขนาดอนุภาคผงเซรามิกส์ 7) ความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียมออกไซด์ (อลูมินา) ทั้งนี้ขนาดอนุภาคผงควรที่จะประกอบไปด้วยขนาดอนุภาคผงเซรามิกส์ที่มีขนาดระดับไมครอน และระดับนาโนผสมเข้าด้วยกัน เพื่อลดช่องว่างระหว่างอนุภาคผงและจะมีผลต่อขนาดเกรน นำแผ่น

เกราะเซรามิกส์มาติดตั้งโดยการวางเรียงซ้อนกันลงบนแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE-fiber) และใช้ซิลิโคนชนิดพิเศษเป็นตัวเชื่อมเข้าด้วยกันและจะได้แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ จากนั้นนำไปทดสอบการยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 พบว่าสามารถต้านทานการยิงได้โดยไม่ทะลุ ดังรูปที่ 4.40 และสามารถต้านทานได้ในระดับ NIJ 4 โดยต้องปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้น ทั้งนี้ข้อมูลบางอย่างไม่สามารถเขียนบันทึกลงในวิทยานิพนธ์นี้ได้หมดเนื่องด้วยเกี่ยวข้องกับเป็นทรัพย์สินทางปัญญา และการต่อยอดองค์ความรู้สู่เชิงพาณิชย์ต่อไป



รูปที่ 4.36 เครื่องเผาฟืน Nabertherm 1800



รูปที่ 4.37 โปรแกรมเวลาและอุณหภูมิการเผาฟืน





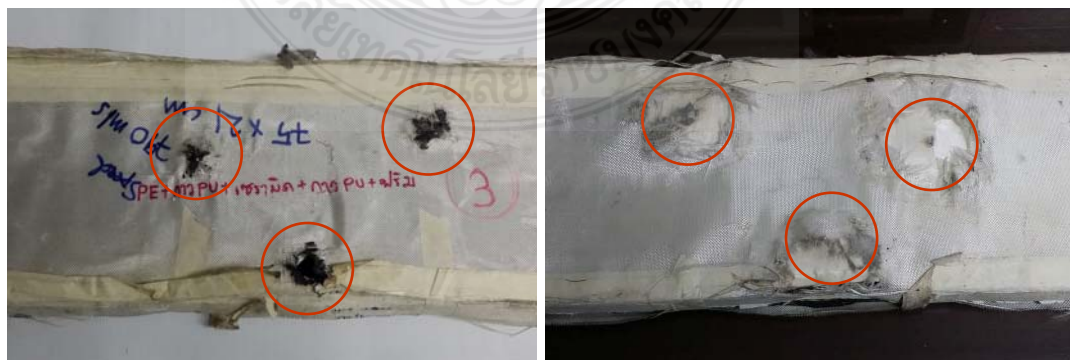
รูปที่ 4.38 การจัดวางเรียงชิ้นงานในเตาเผาผนัง



ก)

ข)

รูปที่ 4.39 ตัวอย่างแผ่นกระเบื้องเซรามิกส์ ก) เเผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ที่แรงอัด 300 kN และ ข) เเผาที่อุณหภูมิ 1,650 องศาเซลเซียส ที่แรงอัดสูงสุด 1,000 kN



ก) ด้านหน้า

ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.40 ตัวอย่างการยิงกระสุนลงบนแผ่นกระเบื้องเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การสรุป และการอภิปรายผล

การสรุปผล คือการนำผลงานการวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำ มาสรุปผลให้สั้นและต้องตอบต่อวัตถุประสงค์และประโยชน์ที่ได้รับ สำหรับการอภิปรายผลเป็นส่วนประกอบสำคัญของการทำรายงานการวิจัยเพื่อให้เหตุผลยืนยันว่าผลการวิจัยที่ได้มีความน่าเชื่อถือ มีความถูกต้อง สอดคล้องหรือไม่ สอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัย โดยอาศัยแนวคิด ทฤษฎีและผลการวิจัยที่ผ่านมา โดยการนำเสนอข้อมูลในภาพรวมหรือสรุปเพียงคร่าวๆ ทั้งในส่วนของผลการศึกษาและสมมติฐานการวิจัย โดยมีเนื้อหาใจความสรุปและอภิปรายผลได้ดังต่อไปนี้

1. การทำวิจัยแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ ได้ตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ครบถ้วนทั้งหมด ประกอบด้วย 1) ได้ทำการออกแบบ วิเคราะห์ และกำหนดรูปแบบของแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกราะ 2) ได้สร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกราะ และ 3) ได้ผลการศึกษาคความหนาแน่นของแผ่นเกราะจากกระบวนการอัดขึ้นรูปผง

2. การทำวิจัยอยู่ภายใต้ขอบเขตการวิจัยที่ต้องใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผงขนาดระดับไมครอน โดยได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์ และใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปในการขึ้นรูปแผ่นเกราะและใช้วิธีการเผาผนึกในการทำให้เป็นแผ่นเกราะแข็ง ทั้งนี้ประโยชน์ที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วย 1) ได้รูปแบบของแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนและสามารถติดตั้งได้อย่างเหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกราะ 2) จากการทดสอบการยิง พบว่าแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3 และ 3) ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสาร

3. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคความหนาแน่นของ Green Compact ที่เป็นอลูมินาผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัดสูงสุด 1,000 กิโลนิวตัน ในการศึกษาความหนาแน่นของ Green Compact ได้ศึกษาคความหนาแน่นที่กระจายเชิงปริมาตร การวิเคราะห์ความหนาแน่นของ Green Compact นั้นจะอาศัยหลักการศึกษาเส้นทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคผงในกระบวนการอัด โดยแบ่งชั้นของผงออกเป็นจำนวนชั้นต่างๆ และนำเส้นทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคผงหรือเส้นไอโซไลน์ (Isoline) มาทำการวิเคราะห์หาคค่าความหนาแน่นด้วยสมการของอาร์คิมิดีส แผ่นเกราะ Green Compact ด้วยวัสดุเซรามิกส์ถูกสร้างขึ้นมา 4 รูปแบบด้วยกัน ประกอบด้วย Green Compact ที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเกราะที่มีหน้าตัดเรียบและแผ่นเกราะที่มีหน้าตัดดัดและอีก 2 รูปแบบ คือ แผ่นเกราะที่มีความหนาสูงถึง 28 มิลลิเมตร ที่เป็นทั้งหน้าตัดเรียบและหน้าตัดดัด ในการ

วิจัยได้ทำการศึกษาแผ่นเกราะที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร และ 28 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของความหนาแน่นเชิงปริมาตรว่ามีผลอย่างไร พบว่ายิ่งชิ้นงานมีความสูงหรือความหนา มากขึ้นเท่าไรจะส่งผลให้เกิดความหนาแน่นที่แตกต่างมากขึ้นเท่านั้น เป็นความหนาแน่นที่แตกต่างกันระหว่างด้านบนสุดและด้านล่างสุดของแกนอัด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยว่าจะเป็นการอัดแบบแกนเดียวหรือการอัดแบบสองแกน ในกรณีที่เป็นการอัดแบบแกนเดียวความหนาแน่นของอนุภาคผงจะมีค่าสูงมากภายใต้การอัดที่แกนอัดกำลังเคลื่อนที่อยู่ ส่วนแกนอัดที่ไม่ได้เคลื่อนที่หรือแกนอัดตัวล่างนั้น ความหนาแน่นของอนุภาคผงในบริเวณนั้นจะมีค่าน้อยกว่า นั้นหมายความว่าเมื่อไหร่ก็ตามที่นำ Green Compact เข้าสู่กระบวนการเผาผนึกจะส่งผลให้ได้ Net-shaping ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอมีการหดตัวสูงหรือมีการเสียรูปหลังการเผาผนึกสูงนั่นเอง

4. จากการศึกษาการกระจายความหนาแน่นเชิงปริมาตรนั้น พบว่าความหนาแน่นจะมีค่าสูงมากในบริเวณของอนุภาคผงที่อยู่ใกล้กับแกนอัดที่เคลื่อนที่ได้ เช่น ในกรณีการอัดแบบแกนเดียวนั้น หมายความว่าจะมีแกนอัดหนึ่งแกนอยู่กับที่แกนอัดอีกตัวหนึ่งจะเป็นตัวเคลื่อนที่ อนุภาคผงที่อยู่ใต้แกนอัดที่เคลื่อนที่จะมีความหนาแน่นที่สูง ในขณะที่อนุภาคผงที่อยู่บริเวณแกนอัดที่ไม่เคลื่อนที่จะมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นในเชิงความยาวที่แตกต่างกันอย่างมาก ในกรณีที่เป็นการอัดแบบสองแกนแน่นอนว่าความหนาแน่นจะมีค่าสูงมากในบริเวณการอัดตัวบนและตัวล่าง แต่จะมีความหนาแน่นต่ำในบริเวณของอนุภาคที่อยู่ตรงกลางระหว่างแกนอัดตัวบนและแกนอัดตัวล่าง ผลของการอัดแบบสองแกนย่อมดีกว่าการอัดแบบแกนเดียว แต่กระบวนการอัดแบบสองแกนก็มีความยุ่งยากและกระทำได้ยากกว่า

5. การวิเคราะห์ผงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined  $Al_2O_3$  B grade พบว่าลักษณะสัณฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นกลมบาง ขนาดเฉลี่ย 5 ไมครอน มีอลูมิเนียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบ 98.15 %

6. การออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปสำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุน และสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปสำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุน รวมทั้งสร้างชิ้นส่วนเพื่อสวมแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปรองรับเคลื่อนอุตสาหกรรม โดยใช้โปรแกรม SolidWorks และ SolidWorks Simulation เป็นเครื่องมือในการออกแบบและวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติตามหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ จนได้รูปแบบของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปสำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุน และเป็นการบูรณาการความรู้หลายด้านจากการเรียนการศึกษาเพื่อการแก้ไขปัญหาในสภาวะจริง จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ พบว่าแกนอัดตัวบน (Upper Punch) เป็นชิ้นส่วนที่รับแรงอัดในแนวแกนโดยตรงจากก้านอัดไฮดรอลิค ด้วยกำลังสูง และแกนอัดนี้มีความยาว ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ที่แรงอัด 500 กิโลนิวตัน มีค่าความปลอดภัยอยู่ที่ 2.5 พื้นที่ที่เกิดความเค้นนี้อยู่ที่บริเวณคอบนของแกนอัด ซึ่งเกิดเป็นความ

เข้มของความเค้นเฉพาะจุด ส่วนชิ้นส่วนอื่นๆ นั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นน้อยกว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแกนอัดตัวบน หากแกนอัดตัวบนสามารถต้านทานแรงอัดได้ ชิ้นส่วนอื่นก็ย่อมสามารถใช้งานได้เช่นกัน ในการวิเคราะห์ Mode Shape ของ Waveguide ได้ผลว่าการออกแบบรูปร่าง Waveguide และขนาดต่างๆ มีความเหมาะสมกับตัวเสื้อแม่พิมพ์และตัว Ultrasonic Transducer ที่สามารถรับคลื่นการสั่นสะเทือนเหนือเสียงแล้วส่งผ่านออกไปยังตัวเสื้อแม่พิมพ์ได้ในลักษณะการสั่นสะเทือนเชิงกล

7. ตัวแปรที่มีผลต่อการได้มาซึ่งแผ่นเกราะเซรามิกส์ที่ดีนั้น ประกอบด้วย 1) อุณหภูมิการเผาผนึก 2) ระยะเวลาในการเผาผนึก 3) แรงอัดขึ้นรูปในกระบวนการอัดขึ้นรูปแห้ง 4) ความหนาของแผ่นเกราะที่อัดขึ้นรูป 5) สารเติมแต่งช่วยในการขึ้นรูป 6) ขนาดอนุภาคผงเซรามิกส์ 7) ความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียมออกไซด์ (อลูมิน่า)

8. แผ่นเกราะเซรามิกส์ติดตั้งโดยการวางเรียงซ้อนกันลงบนแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE-fiber) และใช้ซิลิโคนชนิดพิเศษเป็นตัวเชื่อมเข้าด้วยกันและจะได้แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ จากนั้นนำไปทดสอบการยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 พบว่าสามารถต้านทานการยิงได้โดยไม่ทะลุ และสามารถต้านทานได้ในระดับ NIJ 4 โดยต้องปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์ครั้งนี้พบว่าความหนาแน่นของ Green Compact มีความไม่สม่ำเสมอเชิงปริมาตร เพื่อที่จะลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคผลต่ออนุภาคผงที่เรียกว่า Interparticle และลดปัญหาความเสียดทานระหว่างอนุภาคของกับผนังแม่พิมพ์สามารถประยุกต์ใช้คลื่น Ultrasonic โดยการนำ Ultrasonic Transducer ต่อเข้าไปยังตัวเรือนของแม่พิมพ์ส่งผ่านคลื่นไปยังอนุภาคผงด้านในระหว่างการอัด และสามารถลดแรงเสียดทานต่างๆ ลง ได้อย่างมากซึ่ง Ultrasonic transducer จะนำมาใช้ในการต่อเข้ากับตัวเรือนแม่พิมพ์นั้นอาจจะเป็น Ultrasonic ที่มีต้นกำลังขับเคลื่อนด้วยแผ่นเปียโซเซรามิกส์ หรืออาจจะเป็น Electromagnetic ก็ได้ด้วยกำลังที่มากถึง 2,000-3,000 วัตต์ แต่ในการออกแบบตัวเรือนนั้นจะต้องมีค่าความถี่ธรรมชาติของตัวเรือนเท่ากับความถี่ของคลื่น Ultrasonic ที่ต่อเข้ามายังตัวเรือนเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์

## บรรณานุกรม

- [1] Clint Murphy. Ballistics Levels. [Online]. Available: <https://armortek.com/bulletproof-car-armor-ballistics-levels>
- [2] Q. Wang, Z. Chen and Z. Chen, “Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact,” *Materials and Design*, vol. 46, pp. 634–639, Nov. 2013.
- [3] M. Garcia-Avila, M. Portanova, and A. Rabiei, “Ballistic Performance of a Composite Metal Foam-ceramic Armor System”, *Procedia Mater. Sci.*, vol. 4, pp.151–156, Jan. 2014.
- [4] D. Bürger, A. Rocha de Faria, S. F. M. de Almeida, F. C. L. de Melo, and M. V. Donadon, “Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours”, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 43, pp. 63–77, May. 2012.
- [5] ผศ.ดร.ธงชัย ฟองสมุทร, *วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น*, ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดารารวรรณการพิมพ์, 2549.
- [6] กรรณิการ์ เดชรักษา, “เกราะกันกระสุน,” ห้องปฏิบัติการเซรามิกส์ประยุกต์หน่วยวิจัยเทคโนโลยีเซรามิกส์, MTEC, หน้า 4-5, กรกฎาคม-กันยายน 2557.
- [7] ประกอบชาติภูกต์ และคณะ, “พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเชิงประกอบเพื่อความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ, 2559.
- [8] S.M. Kurtz. UHMWPE Biomaterials Handbook, Elsevier Ins., Chaina, 2009.
- [9] สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล. (2532, กรกฎาคม 15). การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์. [ออนไลน์]. Available: <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/July/radio7-1.htm>
- [10] บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. การพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนแบบเกราะแข็ง. [ออนไลน์]. Available: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/965>
- [11] P. K. Jena et al, “Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 242–249, Mar. 2010.
- [12] A. K. Srivastava, G. Jha, N. Gope and S. B. Singh, “Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of cold rolled C–Mn–Si TRIP-aided steel,” *Mater. Charact.*, vol. 57, no. 2, pp. 127–135, Aug. 2006.

- [13] W.-S. Lee and T.-T. Su, "Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 87, no. 1, pp. 198–206, Mar. 1999.
- [14] P. K. Ray, R. I. Ganguly and A. K. Panda, "Optimization of mechanical properties of an HSLA-100 steel through control of heat treatment variables," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 346, no. 1, pp. 122–131, Apr. 2003.
- [15] P. K. Jena, K. Ramanjeneyulu, K. Siva Kumar and T. Balakrishna Bhat, "Ballistic studies on layered structures," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 6, pp. 1922–1929, Jun. 2009.
- [16] T. Demir, M. Übeyli and R. O. Yildirim, "Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 10, pp. 2009–2016, Dec. 2008.
- [17] S. K. Dhua, A. Ray and D. S. Sarma, "Effect of tempering temperatures on the mechanical properties and microstructures of HSLA-100 type copper-bearing steels," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 318, no. 1, pp. 197–210, Nov. 2001.
- [18] S. N. Dikshit, V. V. Kutumbarao and G. Sundararajan, "The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 293–320, Apr. 1995.
- [19] A. Serjouei, R. Chi, Z. Zhang and I. Sridhar, "Experimental validation of BLV model on bi-layer ceramic-metal armor," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 77, pp. 30–41, Mar. 2015.
- [20] A. Tasdemirci, G. Tunusoglu and M. Güden, "The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 44, pp. 1–9, Jun. 2012.
- [21] E. Medvedovski, "Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1," *Ceram. Int.*, vol. 36, no. 7, pp. 2103–2115, Sep. 2010.
- [22] J. Jiusti et al, "Ballistic performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mosaic armors with gap-filling materials," *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 2, pp. 2697–2704, Feb. 2017.
- [23] S. Feli, M. E. Aalami Aaleagha and Z. Ahmadi, "A new analytical model of normal penetration of projectiles into the light-weight ceramic-metal targets," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 37, no. 5, pp. 561–567, May 2010.
- [24] R. Chi, A. Serjouei, I. Sridhar and G. E. B. Tan, "Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 52, pp. 37–46, Feb. 2013.



- [25] W. Liu, Z. Chen, X. Cheng, Y. Wang, A. R. Amankwa and J. Xu, "Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor," *Compos. Part B Eng.*, vol. 84, pp. 33–40, Jan. 2016.
- [26] W. Liu et al., "Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor," *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 421–427, Dec. 2015.
- [27] I. G. Crouch, G. Appleby-Thomas, and P. J. Hazell, "A study of the penetration behaviour of mild-steel-cored ammunition against boron carbide ceramic armours," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 80, pp. 203–211, Jun. 2015.
- [28] P. J. Hazell, G. J. Appleby-Thomas, D. Philbey and W. Tolman, "The effect of gilding jacket material on the penetration mechanics of a 7.62 mm armour-piercing projectile," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 54, pp. 11–18, Apr. 2013.
- [29] Q. Wang, Z. Chen and Z. Chen, "Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact," *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 634–639, Apr. 2013.
- [30] J. López-Puente, A. Arias, R. Zaera and C. Navarro, "The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 1, pp. 321–336, Dec. 2005.
- [31] M. Grujicic, B. Pandurangan and B. d'Entremont, "The role of adhesive in the ballistic/ structural performance of ceramic/ polymer– matrix composite hybrid armor," *Mater. Des.*, vol. 41, pp. 380–393, Oct. 2012.
- [32] M. B. Karamis, A. Tasdemirci and F. Nair, "Failure and tribological behaviour of the AA5083 and AA6063 composites reinforced by SiC particles under ballistic impact," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 3, pp. 217–226, Mar. 2003.
- [33] D. P. Gonçalves, F. C. L. de Melo, A. N. Klein and H. A. Al-Qureshi, "Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 2, pp. 307–316, Feb. 2004.
- [34] E. Medvedovski, "Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2," *Ceram. Int.*, vol. 36, no. 7, pp. 2117–2127, Sep. 2010.
- [35] M. Übeyli, R. O. Yıldırım and B. Ögel, "Investigation on the ballistic behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al2024 laminated compositesv," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 196, no. 1, pp. 356–364, Jan. 2008.

- [36] M. B. Karamis, A. Tasdemirci and F. Nair, "Failure and tribological behaviour of the AA5083 and AA6063 composites reinforced by SiC particles under ballistic impact," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 3, pp. 217–226, Mar. 2003.
- [37] I. Sudhakar, V. Madhu, G. Madhusudhan Reddy and K. Srinivasa Rao, "Enhancement of wear and ballistic resistance of armour grade AA7075 aluminium alloy using friction stir processing," *Def. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 10–17, Mar. 2015.
- [38] Fábio de Oliveira Bragaa, Fernanda Santos da Luza, Sergio Neves Monteiroa and Édio Pereira Lima Jr.a "Effect of the impact geometry in the ballistic trauma absorption of a ceramic multilayered armor system," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 554–560, Jun. 2018.
- [39] X. Wang, Z. Zak Fang and M. Koopman, "The relationship between the green density and as-sintered density of nano-tungsten compacts," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 53, pp. 134–138, Nov. 2015.
- [40] H. T. Gao, X. H. Liu, S. J. Zhang and J. L. Qi, "Synergistic effect of glass fibre and Al powder on the mechanical properties of glass-ceramics," *Ceramics International*, vol. 44, no. 13, pp. 15167–15175, Sep. 2018.
- [41] C. C. Melo, A. L. I. Moraes, F. O. Rocco, F. S. Montilha and R. B. Canto, "A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 38, no. 8, pp. 2928–2936, Jul. 2018.
- [42] S. M. Y. Kaku, A. K. Khanra and M. J. Davidson, "Effect of deformation on properties of Al/Al-alloy ZrB<sub>2</sub> powder metallurgy composite," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 747, pp. 666–675, May 2018.
- [43] C. dos Santos, C. M. F. A. Cossu, M. F. R. P. Alves, L. Q. B. Campos, R. O. Magnago and K. Strecker, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y-TZP ceramic composite with unidirectional functional gradient," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 75, pp. 147–152, Sep. 2018.
- [44] O. Marou Alzouma, F. Marion and A.-C. Robisson, "The importance of the amount/thickness of die wall lubricant for UO<sub>2</sub> pellets pressing," *Ceramics International*, vol. 44, no. 11, pp. 12073–12080, Aug. 2018.
- [45] S. Stupkiewicz, A. Piccolroaz and D. Bigoni, "Elastoplastic coupling to model cold ceramic powder compaction," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 34, no. 11, pp. 2839–2848, Sep. 2014.

- [46] V. M. Sglavo and N. Bellettati, "Ceramic laminates with improved mechanical reliability by tailoring the porosity of the constituting layers," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 37, no. 4, pp. 1643–1650, Apr. 2017.
- [47] C. Babelot, A. Bukaemskiy, S. Neumeier, G. Modolo and D. Bosbach, "Crystallization processes, compressibility, sinterability and mechanical properties of La-monazite-type ceramics," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 37, no. 4, pp. 1681–1688, Apr. 2017.
- [48] L. E. A. Sanchez, G. Bukvic, A. A. Fiocchi and C. A. Fortulan, "Allowance removal from green pieces as a method for improvement surface quality of advanced ceramics," *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 10–21, Jun. 2018.
- [49] L. Poh, C. Della, S. Ying, C. Goh and Y. Li, "Powder distribution on powder injection moulding of ceramic green compacts using thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry," *Powder Technology*, vol. 328, pp. 256–263, Apr. 2018.
- [50] T. J. Vogler, M. Y. Lee and D. E. Grady, "Static and dynamic compaction of ceramic powders," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 2, pp. 636–658, Jan. 2007.
- [51] O. L. Khasanov, E. S. Dvilis, V. M. Sokolov and P. Pokholkov Yu, "Ceramic Powder Dry Compaction Under Powerful Ultrasound Action," *Key Engineering Materials*, vol. 264–268, pp. 73–76, May 2004.
- [52] A. Michrafy, J. A. Dodds and M. S. Kadiri, "Wall friction in the compaction of pharmaceutical powders: measurement and effect on the density distribution," *Powder Technology*, vol. 148, no. 1, pp. 53–55, Oct. 2004.
- [53] D. Souriou et al., "Comparison of Conventional and High Velocity Compaction of Alumina Powders," *Advances in Science and Technology*, vol. 45, pp. 893–898, Oct. 2006.
- [54] O. L. Khasanov and E. S. Dvilis, "Net shaping nanopowders with powerful ultrasonic action and methods of density distribution control," *Advances in Applied Ceramics*, vol. 107, no. 3, pp. 135–141, May 2008.
- [55] H. R. Cha, "Densification of the nanopowder by using ultrasonic vibration compaction," *Reviews on advanced materials science*, vol. 28, no. 1, pp. 90–93, Feb. 2011.

- [56] Y. Li, H. Liu and A. Rockabrand, "Wall friction and lubrication during compaction of coal logs," *Powder Technology*, vol. 87, no. 3, pp. 259–267, Jun. 1996.
- [57] T. Maeno, K. Osakada and K. Mori, "Reduction of friction in compression of plates by load pulsation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, no. 7–8, pp. 612–617, Jul. 2011.
- [58] Y.-M. Tien, P.-L. Wu, W.-H. Huang, M.-F. Kuo and C.-A. Chu, "Wall friction measurement and compaction characteristics of bentonite powders," *Powder Technology*, vol. 173, no. 2, pp. 140–151, Apr. 2007.
- [59] B. J. Briscoe and S. L. Rough, "The effects of wall friction in powder compaction," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 137, no. 1–3, pp. 103–116, Jun. 1998.
- [60] A. Michrafy, M. S. Kadiri and J. A. Dodds, "Wall Friction and its Effects on the Density Distribution in the Compaction of Pharmaceutical Excipients," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 81, no. 8, pp. 946–952, Sep. 2003.
- [61] Yunping Li, Emi Onodera and Akihiko Chiba, "Friction Coefficient in Hot Compression of Cylindrical Sample," *Materials Transactions*, vol. 51, no. 7, pp. 1210–1215, Feb. 2010.
- [62] ประกอบชาติภักดิ์ สราวุฒิ เปรมใจ ทวีพงษ์ สุขมูลศิริ ภาณุพงศ์ ศรีนุรักษ์ และ เดชาพล สุรินทร์, "การออกแบบและสร้างโมลอัดขึ้นรูปสำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุน," *การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 2*, กรุงเทพฯ, pp. 1-4, May. 2017.

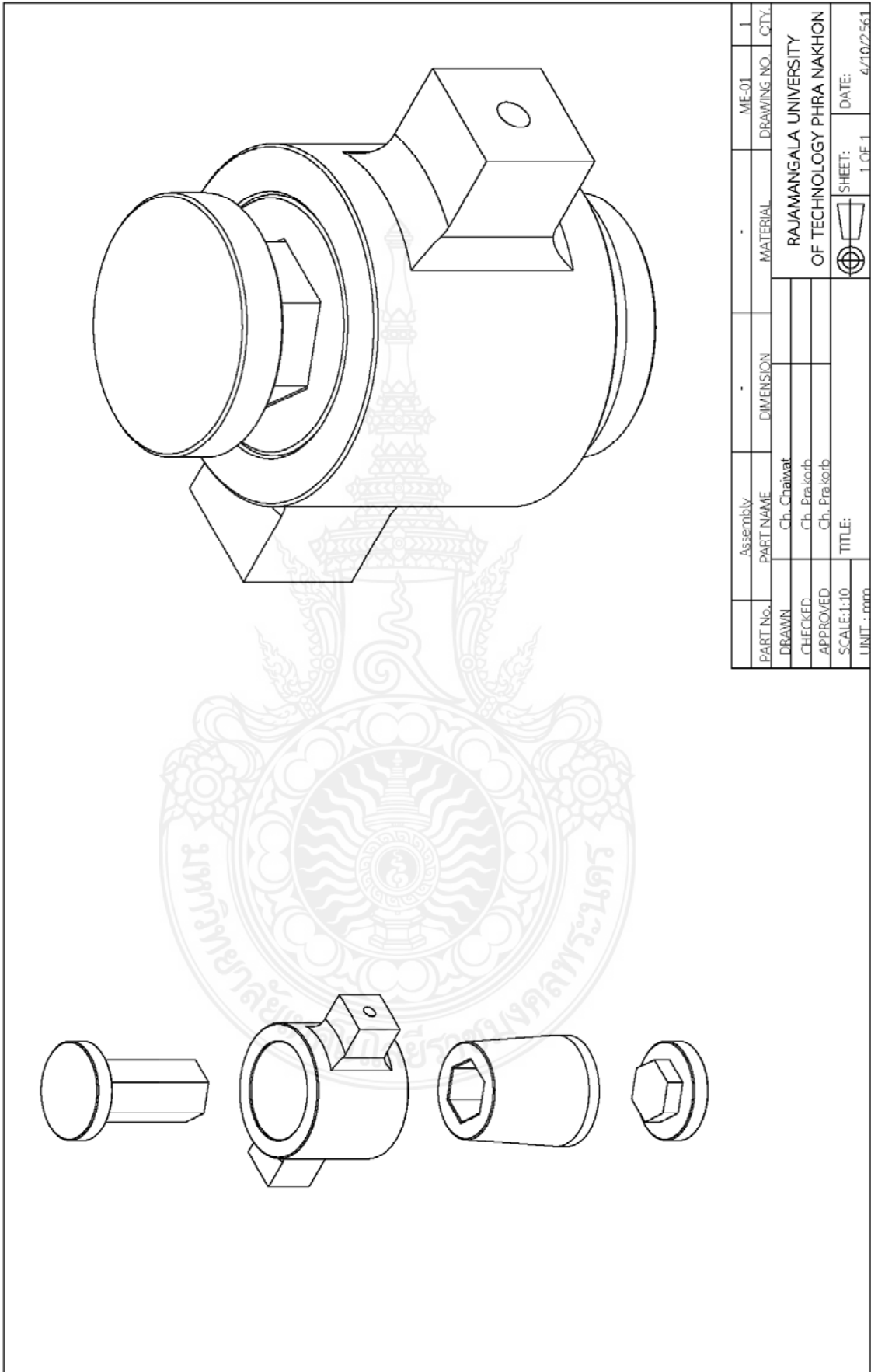
ภาคผนวก



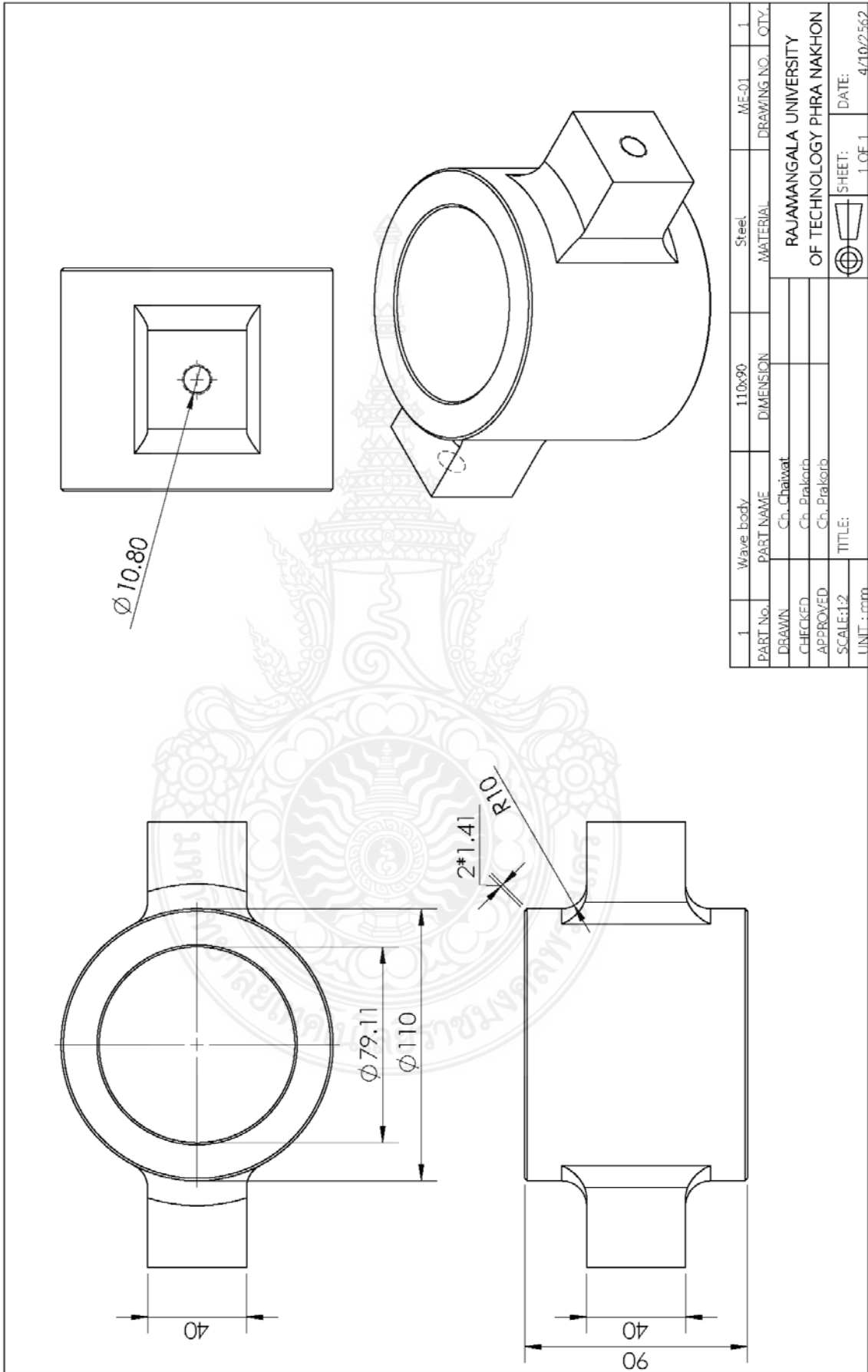
ภาคผนวก ก

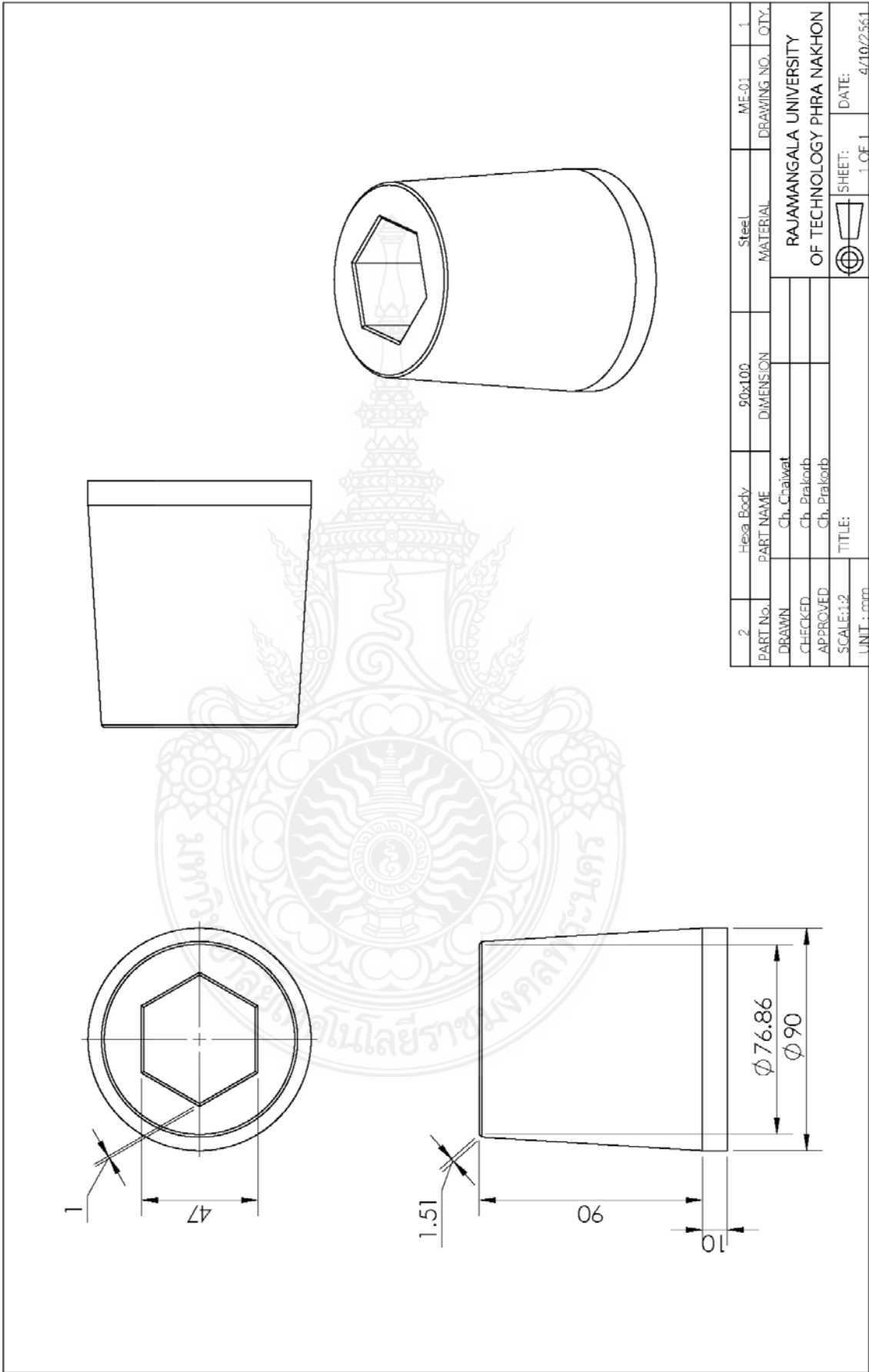


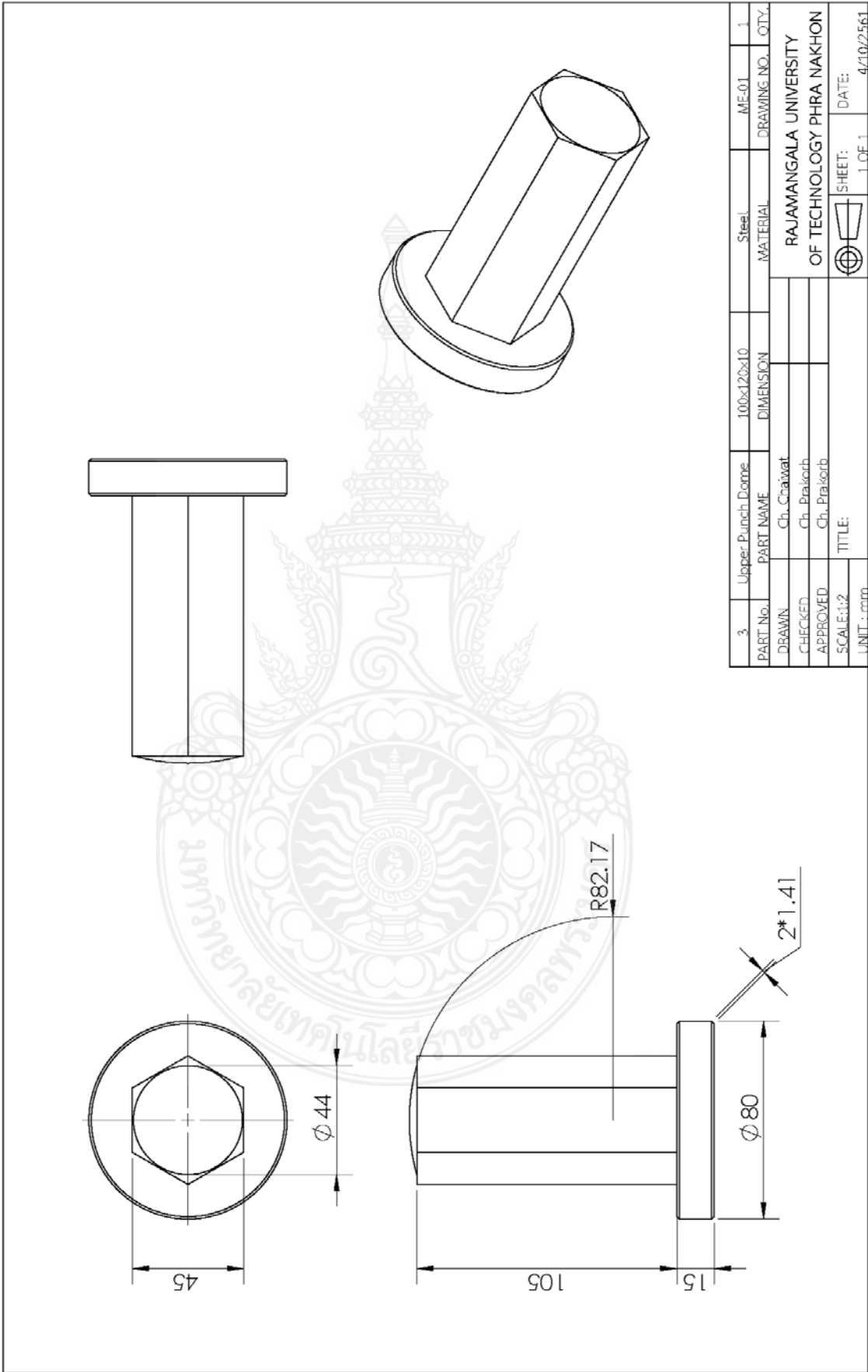


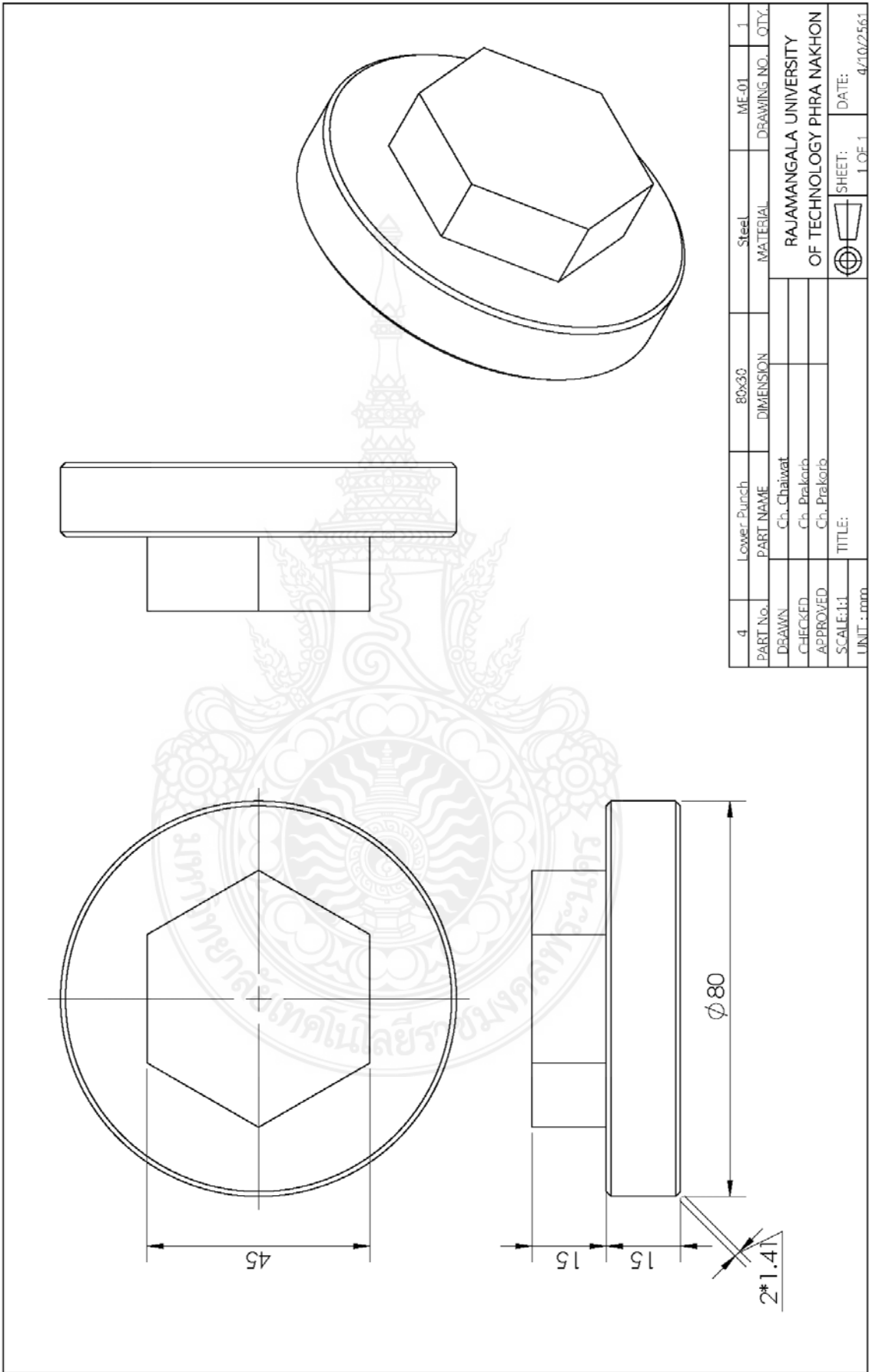


PART No.	Assembly	DIMENSION	MATERIAL	ME-01	1
DRAWN	Ch. Chaiwat		RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA NAKHON	DRAWING NO.	CTY.
CHECKED	Ch. Prakorb				
APPROVED	Ch. Prakorb				
SCALE: 1:10	TITLE:			SHEET:	DATE:
UNIT : mm				1 OF 1	4/10/2561









RAJAMANGALA UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY PHRA NAKHON

DATE: 4/10/2561

SHEET: 1 OF 1

## Analysis of Stress Distribution for Powder Compression Molding by Finite Element Method

Prakorb Chartpuk<sup>a\*</sup> and Chaiwat Chaimahapuk<sup>b</sup>

1381 Department of mechanical engineering, Faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

<sup>a</sup>prakorb.c@rmutp.ac.th, <sup>b</sup>chaiwat-c@rmutp.ac.th

**Keywords:** stress distribution, powder compression mold, finite element method

**Abstract.** The ultrasonic mold was designed for the ceramic powder compression. CAD and CAE were used in the design to analyze the mold strength and its natural frequency. The study of stress distribution and compression in upper and lower punch, mold body and waveguide comparison of stresses was analyzed by FEA experiments under maximum compression at 50,000 N to validate the results of both methods and the mold natural frequency. The difference between FEA and experimental analysis was 3-7%, acceptable. The redesign results in a cylindrical mold body with the outer diameter of 80 mm, the height of 100 mm, and the upper punch of 125 mm in length. The six sides are 26 mm of the high waveguide with 100 mm height. The internal and external diameters are 80 and 110 mm, respectively. The mold has been redesigned and can support the maximum compression force of 1,500 kN. with the bearing steel, AISI 52100, obtainable hardness 65 HRC, the stress concentration occurs at the neck of the upper punch using the ultrasonic at 12.00 to 12.45 kHz.

### Introduction

Powder compression molding is the simplest and most traditional forming process in which the materials used can be either metal or ceramic powder [1]. To produce bulletproof ceramic armor, ceramics forming process is considered very efficient [2], [3]. There are several factors that affect the density in the powder compression process; the major problem is the friction between the powder and the mold wall which result in inconsistent density throughout the net-shaping. The friction reduction can be applied in many ways, such as the design of a low ratio between the height and the diameter [4], [5]. Much effort has been invested to design the mold to achieve the consistent density throughout the volume without the use of lubricant and with the single core compression [6], [7]. The use of ultrasonic waves in the forming process [3] is beneficial and produces good results for the friction can be reduced without compression [3], [8]. The design and the mold construction require both the strengths analysis, which can withstand high compression without breaking [9]. However, as for waveguide [9], it is necessary to redesign to suit the ultrasonic transducer and mold body to accommodate the hexagonal bulletproof ceramic armor.

### Mold Design

The ultrasonic mold has been designed and analysis its strength and natural frequency by SolidWorks and SolidWorks Simulation as shown in Figure 1, Form A., which was previously, presented [4]. Patterns of frequency displacement and various shapes of the mold can support a certain level of resonant. It is necessary to redesign a new mold, especially the waveguide as shown in Figure 1, Form B and Form C, which are waveguide patterns that have been redesigned resulting the cylindrical mold body and the waveguide without the oblique angle worn with a tolerance of 40 microns. Both models are symmetric under the ultrasonic waves rightly affecting the mold body. Form B and Form C are different in the shape of square and cylindrical waveguide arms redesigned and analyzed so that the ultrasonic waves can be transmitted.



The research process consists of two methods, finite element method analysis (FEA) and experimental methods (EXP.). The molecular strength tests have been applied for various parts such as the mold body, upper and lower punch, waveguide and compared to the finite element method. If both methods yielded the same result and do not exceed 10%, it means that the FEA could represent the experiment.

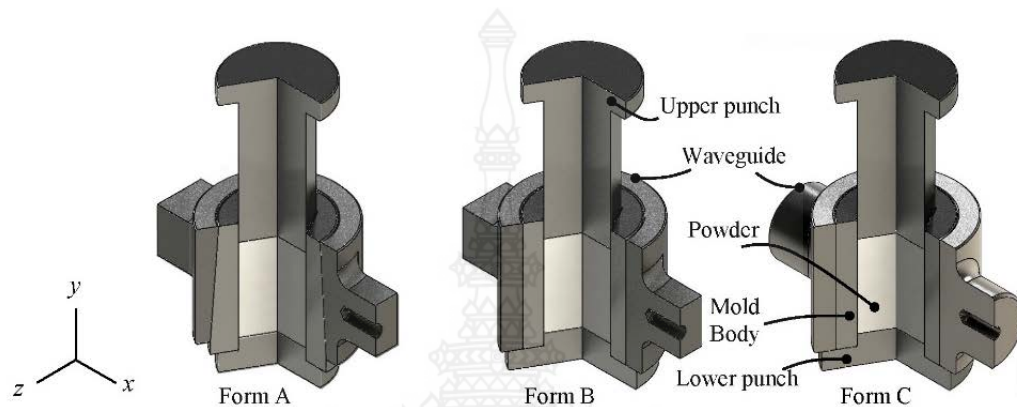


Fig. 1 Ultrasonic mold model

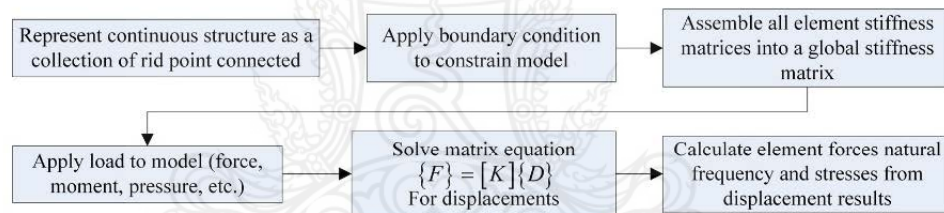


Fig. 2 Processes of finite element method [10]

### Finite Element Analysis (FEA)

The analysis of finite element method can be performed by using SolidWorks Simulation software, which includes three parts: Pre-processing, Solve processing, and Post-processing to analyze 1) the strength of the mold and 2) the natural frequency of the waveguide.

Concerning the Pre-processing, 3D model has been prepared, designed, and created with the SolidWorks program according to the material properties as shown in Table 1. AISI 52100 materials are determined for the mold body and upper and lower punch. Regarding AISI 1045 used for waveguide, the contact between the 29 various parts occur, therefore, every contact has been set to No penetration. In term of fixtures, the lower punch is fixed and the external load is set as compressive normal load of 50,000 N, divided by the mesh parameters, curvature-based mesh, yielding the maximum element size for A, B, and C equal to 10 mm and the minimum size of 2 mm controlling the element with the compression size of 3 mm yielding the element amount of 79,449 for mold A, B and C respectively. The solving process is based on the equation of the program automation process while the post-processing is the presentation of the results of the analysis consisting of two parts: 1) the mold strength with the ability to resist the high compressive strength without the deformities explained by the stresses derived from the maximum distortion energy in the form of Von Mises, and 2) the natural frequency of the waveguide, which displays 5 mode shapes. To design a good waveguide, the waveguide natural frequency needs to match the ultrasonic wave generator to cause the resonant phenomena and the mold body work effectively. The ultrasonic wave generator sends its waves through the ultrasonic transducer and waves into the waveguide. If the natural frequency of the waveguide is not consistent with the ultrasonic wave generator, it will result in high heat on the piezoelectric ceramic plate and will consequently be broken.

**Table 1** Properties of material [4]

Materials	AISI 52100	AISI 1045
Elastic Modulus	210 GPa	205 GPa
Poisson's Ratio	0.30	0.32
Shear Modulus	80 GPa	80 GPa
Mass Density	7,810 kg/m <sup>3</sup>	7,850 kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	2,240 MPa	1,110 MPa
Yield Strength	2,033 MPa	710 MPa
Hardness, Rockwell C	64 HRC	-

**Table 2** Pre-processing parameters

Parameters	Form A	Form B	Form C
Maximum element size (mm)	10	10	10
Minimum element size (mm)	2	2	2
Element size for control mesh (mm)	3	3	3
Total element	79,449	79,005	52,865
Total node	53,600	51,576	40,748
Applied normal force (N)	50,000	50,000	50,000

Maximum distortion energy equation in the form of stress components, shown in equation 1

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]} \quad (1)$$

Average stress equation on the cross-sectional area, perpendicular to the direction of force applied, shown in equation 2

$$\sigma_{average} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

### Experimental Setup and Procedure for the Measurement

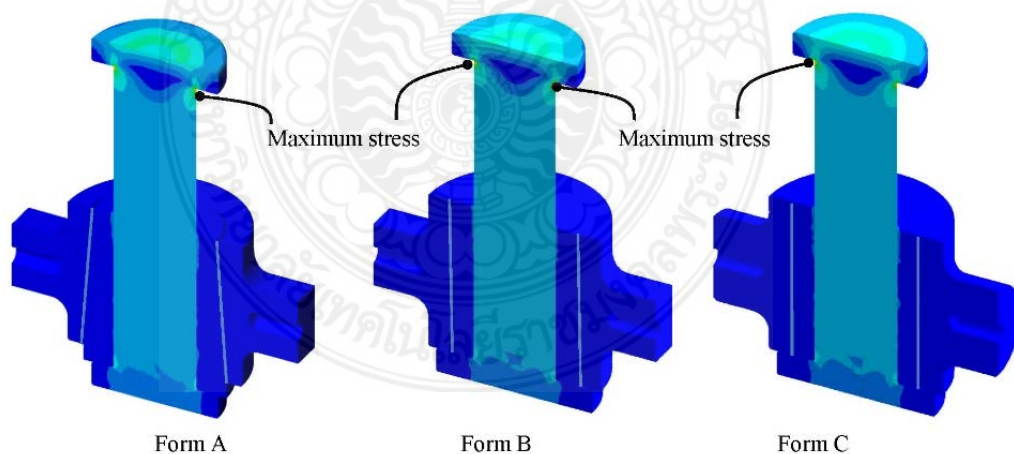
To test the stress value, the strain gages are set up and a sanding pad numbered 600 is applied to scrub the metal then wipe it clean before the installation as in Figure 3. The strain gages used are FLA-5-111LJC, with a gauge length of 5 mm. After installing, the resistance measurement is set at 23 ° C and 50% RH is to be measured during 120 ± 0.5 when installing the data logger called EDX-200A-4H (KYOWA) with the strain gages set at zero. Then, the mold is loaded into a 50,000 N compression test while the data logger is recording the stress at the compressor core and the mold during the whole time set.



**Fig. 3** Strain gages installation on upper punch and waveguide

#### Comparison of FEA and Experimental Results

The stresses obtained from the analysis by the finite element method are shown in Figure 4, of which the stress direction exists in the y-axis (see Figure 1) and corresponds to the strain obtained from the experiment under the 50,000 N compression. The strain comparison of the two methods is shown in Table 3, demonstrating the difference unexceeding 7% and the lowest is 3.24%. This means that FEA method can be used in the experiment; and SolidWorks simulation program with the ability to analyze the strength and natural frequency of the mold can also be applied. The stress analysis results in the calculation of the strain. In Figure 4, the maximum strain and stress occur at the neck of the compression core. When the core is compressed to a higher position, it will irregularly result in a higher stress than normal.



**Fig. 4** Analysis of Von-Mises stresses by finite element method

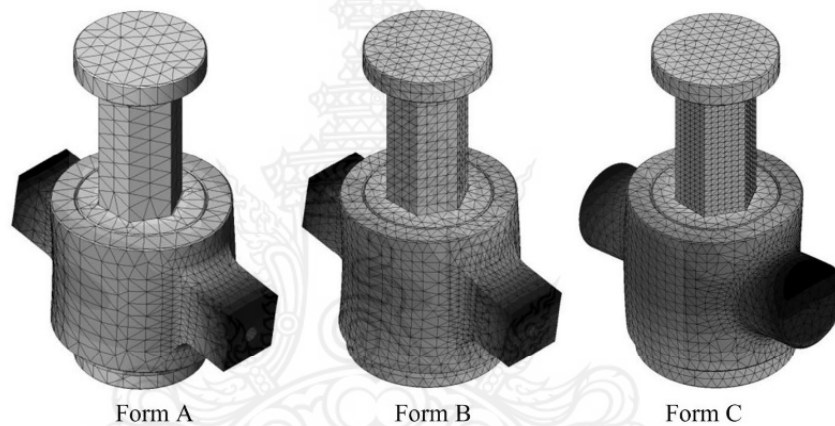


**Table 3** Comparison of experiment (EXP.) and FEA results under compressive force of 50,000 N

Position	Strains					
	1	2	3	4	5	6
EXP.	-0.00033	-0.000139	-0.000135	-0.000000422	-0.000011	-0.00000068
FEA	-0.00032	-0.000135	-0.000131	-0.000000401	-0.000010	-0.00000065
%	4.23	3.45	3.88	5.29	3.24	4.82

Position	7	8	9	10	11	12
	EXP.	-0.0002539	-0.000144	-0.000132	-0.0000004994	-0.00001136
FEA	0.0002443	-0.000135	0.000126	-0.0000004974	-0.00001095	-0.000000718
%	3.96	6.77	5.21	4.08	3.75	4.26

**Fig. 5** Natural frequency analysis results by finite element method at mode shape no.5**Table 4** Natural frequency at various mode shapes

Mode Shape	1	2	3	4	5
Natural Frequency (Hz) for Form A	7,386	9,200	12,587	11,616	12,340
Natural Frequency (Hz) for Form B	8,151	9,535	11,357	12,003	12,450
Natural Frequency (Hz) for Form C	7,432	8,931	11,001	11,680	12,042

The intensity of the stresses of the three molds is not different. However, the waveguide worn on the mold body generates different natural frequencies but similar in terms of the waveguide shape of Form B and Form C for the symmetric waveguide and non-internal slope.

### Summary

The ultrasonic mold has been redesigned to suit the compression molding of hexagonal ceramic armor and can support the compressive strength up to 1,500 kN. The waveguide features two new designs that are simple in shape to accommodate the ultrasonic waveforms of the waveguide typed B and C and can be used for the compression molding of ceramic armor plates under the ultrasonic wave generation at 12.00 to 12.45 kHz. However, the production of mold body and waveguide must be tightly fit in order that it can transmit the ultrasonic waves effectively.

### Acknowledgement

The authors would like to express the appreciation to the National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Thailand Ministry of Science and Technology for the financial support (Research grant code: SCH-NR2015-271), and Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP) for supportive facilities.

### References

- [1] B.J. Briscoe, P.D. Evans, "Wall friction in the compaction of agglomerated ceramic powders," *Powder Technology*, vol. 65, pp. 7–20, 1991.
- [2] E. Dvilis, L. Khasanov, V. Sokolov, Yu. Pokholkov, Patent of Euro No.1459823 to 11.03.2009. Method for pressing articles from powder materials and a mold for carrying out said method.
- [3] O.L. Khasanov, E.S. Dvilis, "Net-shaping nanopowders with powerful ultrasonic action and methods of the density distribution control," *Advances in Applied Ceramics*, vol. 107, no.3. p. 135–141, 2008.
- [4] Y. Li, H. Liu, A. Rockabrand, "Wall friction and lubrication during compaction of coal logs," *Powder Technology*, vol. 87 pp. 259–267, 1996.
- [5] B.J. Briscoe, S.L. Rough, "The effects of wall friction in powder compaction," *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 137, pp. 103–116, 1998.
- [6] D. Edgar, K. Oleg, C. Prakorb, and S. Vitaly, "Optimal design of the spiral type of collector die for dry powder compaction," in *Proceeding of 8th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Mongolia, vol. 1, 2013, pp. 25–28.
- [7] K. Oleg, D. Edgar, S. Vitaly, and C. Prakorb, "The comparison of model compaction method to make uniformly dense ceramic bodies," in *Proceeding of 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Russia, 2012, pp. 1–5.
- [8] H. R. Cha, "Densification of The Nanopowder by Using Ultrasonic Vibration Compaction," *Adv. Mater. Sci.*, vol. 28, pp. 90-93, 2011.
- [9] P. Chartpuk, S. Premjai, T. Sukmoonsiri, P. Srinurak and D. Surin, "Design and Making of Pressing Mold for Ceramic Armor Plate," in *Proceedings of the 2nd RMUTP Conference of Engineering and Technology*, Bangkok, Thailand, 19 May 2017, pp. 1-4.
- [10] V. Voranavin, S. Luangsod, and P. Chartpuk, "Analysis of stress concentration that occurs in the Reform with finite element method," *RMUTP Research Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 13-23, March 2011.

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล	นายชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์	
วัน เดือน ปีเกิด	12 มกราคม 2536	
ภูมิลำเนา	99 หมู่ 7 ต.ทุ่งโพธิ์ อ.ตะพานหิน จ.พิจิตร	
ประวัติการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วุฒิมัธยมศึกษา		
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	เซนต์จอร์จส์โพลีเทคนิค	2554
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2559

