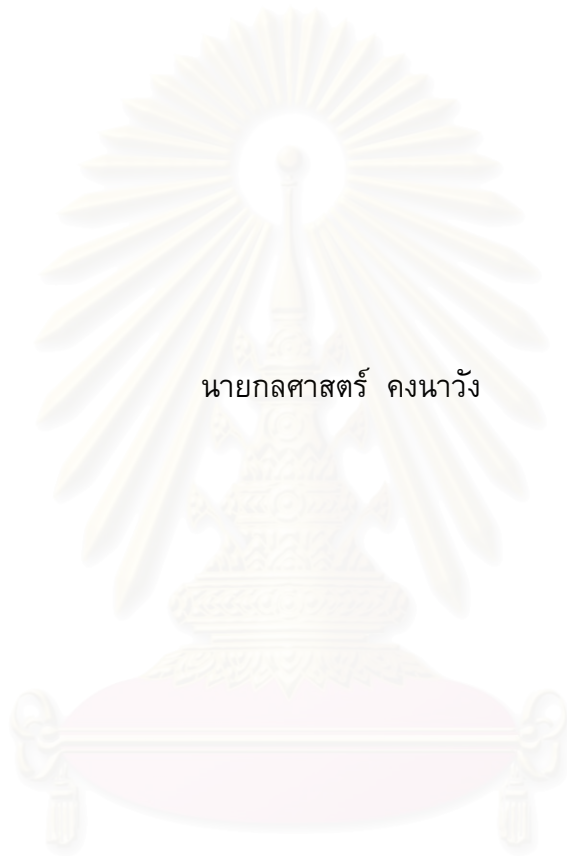


การศึกษาคำตัดวิเศษประณีตมีรูปพจน



นายกฤษฎา คองนาง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

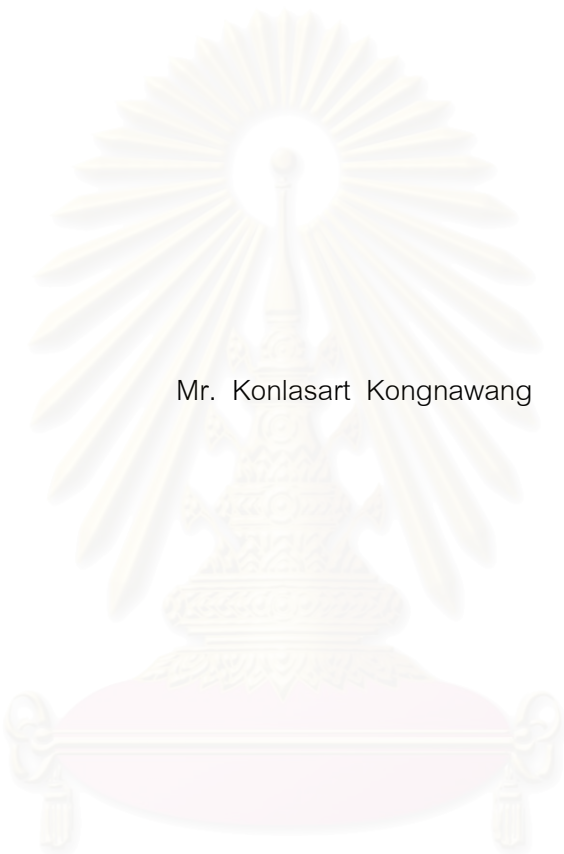
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1180-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF MACHAINING ON BRITTLE POROUS MATERIAL



Mr. Konlasart Kongnawang

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1180-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษาการตัดวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน  
โดย                              นายกลศาสตร์ คณาวิง  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมอุตสาหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เหรียญ บุญดีสกุลโชค)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ จันทนา จันทโร)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลศาสตร์ คงนาวัง : การศึกษาการตัดวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน (A Study of Machining on Brittle Porous Material) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร, 146 หน้า. ISBN 974-03-1180-6.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของคุณสมบัติวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน กับแรงในการตัดเจาะ

ผงวัสดุ HA ที่ใช้ในงานวิจัยได้จากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่าง  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$   $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  และ  $\text{NH}_4\text{OH}$  นำผงที่สังเคราะห์ได้ผสมกับแป้ง ที่ส่วนผสมระหว่าง 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วอัดลงในแม่พิมพ์ด้วยแรงอัดระหว่าง 2 ถึง 10MPa หลังจากนั้นนำไปเผาเพื่อให้อนุภาคของผงเชื่อมติด ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้ทดสอบคุณสมบัติดังต่อไปนี้ ความหนาแน่นบัลค์ เปอร์เซ็นต์ความพรุน ความแข็ง ความแข็งแรงดัด และโมดูลัส แล้วนำชิ้นงานทำการทดสอบแรงในการเจาะโดยใช้ Dynamometer สภาวะควบคุมในการเจาะมีดังต่อไปนี้ ความเร็วรอบระหว่าง 130 ถึง 920rpm อัตราการป้อนตัดระหว่าง 0.035 ถึง 0.14mm/รอบ ดอกสว่านชนิด High Speed Steel (HSS.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติด้านต่างๆของชิ้นงาน

จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงาน มีความหนาแน่นบัลค์อยู่ระหว่าง 1.48 ถึง 1.83g/cm<sup>3</sup> เปอร์เซ็นต์ความพรุนอยู่ระหว่าง 18.68 ถึง 42.49% ความแข็งอยู่ระหว่าง 28.20 ถึง 113.42HV ความแข็งแรงดัดอยู่ระหว่าง 4.00 ถึง 14.36MPa และโมดูลัสอยู่ระหว่าง 0.98 ถึง 2.35GPa จากการทดสอบแรงในการเจาะพบว่าแรงดัน (Thrust Force)อยู่ในช่วงระหว่าง 11.99 ถึง 21.98N และแรงบิด (Torque)อยู่ในช่วง 10.36 ถึง 14.89N.mm. ผลจากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าคุณสมบัติความหนาแน่นบัลค์ เปอร์เซ็นต์ความพรุน ความแข็ง ความแข็งแรงดัด และโมดูลัส สามารถใช้ประมาณการแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงานได้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติชิ้นงานมีดังต่อไปนี้ เมื่อความหนาแน่นบัลค์ ความแข็ง ความแข็งแรงดัด และโมดูลัสมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้แรงในการเจาะมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์ความพรุนเมื่อสูงขึ้น จะส่งผลให้แรงในการเจาะมีแนวโน้มลดลง

ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
สาขาวิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา \_\_\_\_\_ 2544 \_\_\_\_\_

ลายมือชื่อผู้นิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 4270210221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : BIOMATERIAL / HYDROXYAPATITE / CORAL / POROUS MATERIAL / DRILLING FORCE

Mr. KONLASART KONGNAWANG: A STUDY OF MACHINING ON BRITTLE POROUS MATERIAL. THESIS ADVISOR: ASSISTANT PROFESSOR SOMCHAI PUAJINDANETR, D.Eng. 146 pp. ISBN 974-03-1180-6.

This research was aimed to study the relations between drilling force and properties of brittle porous material of hydroxyapatite (HA).

The hydroxyapatite powder was produced by chemical reaction (Synthesis Process) between  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  and  $\text{NH}_4\text{OH}$ . The HA powder was mixed with starch powder ranging from 1 to 5 % by volume. The mixed powder was pressed using a single action die in uniaxial press at 2 to 10MPa and then sintered at  $1100^\circ\text{C}$  with the dwell time of 3hr followed by furnace cooling. The bulk density, %porosity, hardness, bending strength and modulus of sintered porous HA were analyzed. The sintered porous hydroxyapatite were drilled with the running speed of 130 to 920 rpm, feed of 0.035 to 0.14 mm/rev using dynamometer. The diameter of the High Speed Steel (HSS) drill used in this study was 3 mm.

The results showed that the properties of the porous hydroxyapatite were ranged from 1.48- 1.83  $\text{g}/\text{cm}^3$  of bulk density, 18.68-42.49 % of %porosity, 28.28-113.42 HV of hardness, 4.00-14.36MPa of bending strength and 0.98-2.35GPa of modulus. The results of drilling force test found that the thrust forces were ranged between 11.99 and 21.98N and the torque were ranged between 10.36 and 14.89N.mm. The regression analytical results showed that the drilling forces being the thrust force and the torque increased with increasing bulk density, hardness, bending strength and modulus, whereas drilling forces decreased with increasing %porosity.

Department.....INDUSTRIAL ENGINEERING

Student's signature.....

Concentration...INDUSTRIAL ENGINEERING.....

Advisor's signature.....

Academic year \_2001.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา ทั้งความรู้ ข้อแนะนำ ความคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ยิ่ง ตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เหรียญ บุญดีสกุลโชค ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคิก และ รองศาสตราจารย์ จันทนา จันทโร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ พันเอก รองศาสตราจารย์ ศุภชัย วงศ์พิเชษฐชัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ วัสดุประการัง เพื่อใช้ในการทดลองวัดแรงในการเจาะ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทบวงมหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือ และวัสดุ และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องเครื่องมือวัดแรง และเครื่องเจาะในการทดลอง ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ได้แก่ เจ้าหน้าที่ช่าง และเจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ซึ่งเป็นที่ยึดมั่น เคารพ บูชาตลอดมา และขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน ที่ได้ให้กำลังใจมาโดยตลอด

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการ และเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีพื้นฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 Biomaterials.....	5
2.2 คุณสมบัติของวัสดุ.....	5
2.2.1 ค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus / E).....	6
2.2.2 ค่าความแข็ง (Hardness / H).....	6
2.2.3 การหาค่าโมดูลัสของยังของเซรามิกส์ จากระอยตค้ำงที่เกิดจาก ตัวกดนุบ.....	8
2.2.4 การหาค่าความแข็ง.....	10
2.3 องค์ประกอบของการตัดวัสดุ.....	10
2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการตัด.....	12
2.5 แรงในการตัดวัสดุ (Cutting Forces).....	13
2.6 พื้นฐานเกี่ยวกับการแปรรูปวัสดุ.....	17
2.7 พื้นฐานการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์และผงโลหะ.....	17
2.8 การวิเคราะห์การถดถอย.....	23



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
3 การดำเนินงานวิจัย .....	33
3.1 การเตรียมชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA) .....	34
3.1.1 การสังเคราะห์ผง Hydroxyapatite (HA) .....	34
3.1.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA).....	36
3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของผง Hydroxyapatite (HA)ที่สังเคราะห์ และผงแป้ง .....	39
3.2.1 การตรวจสอบเฟสของสารโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ .....	39
3.2.2 การตรวจสอบขนาดอนุภาคผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง .....	39
3.2.3 การตรวจสอบรูปร่างของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง .....	39
3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA) .....	40
3.3.1 การทดสอบความหนาแน่นบัลค์ .....	40
3.3.2 การทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน.....	40
3.3.3 การศึกษาขนาด และลักษณะของรูพรุน .....	41
3.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA).....	42
3.4.1 การทดสอบความแข็ง .....	42
3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงดัด และโมดูลัส .....	44
3.5 การทดสอบแรงดัน และแรงบิดของการเจาะวัสดุ .....	46
3.5.1 การทดสอบแรงดัน.....	47
3.5.2 การทดสอบแรงบิด .....	48
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	48
3.6.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิด .....	48
3.6.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับปัจจัย ควบคุมการเจาะ และคุณสมบัติชิ้นงาน .....	48
3.6.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติ ชิ้นงาน .....	49
3.6.4 การเปรียบเทียบแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุ ปะการัง .....	49



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ .....	50
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง .....	51
4.1.1 ผลการตรวจสอบเฟสของสารโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ .....	51
4.1.2 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง .....	52
4.1.3 ผลการตรวจสอบลักษณะ และรูปทรงของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง .....	53
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA) .....	56
4.2.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นบัลค์ .....	57
4.2.2 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน .....	58
4.2.3 ผลการศึกษารูปร่างและลักษณะของรูพรุน .....	59
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA) .....	64
4.3.1 ผลการทดสอบความแข็ง .....	65
4.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัด และโมดูลัส .....	66
4.4 ผลการทดสอบแรงดัน และแรงบิดของการเจาะวัสดุ .....	68
4.4.1 ผลการทดสอบแรงดัน (Thrust Force) .....	68
4.4.2 ผลการทดสอบแรงบิด (Torque) .....	71
4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	74
4.5.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิด .....	74
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับปัจจัย ควบคุมการเจาะ และคุณสมบัติชิ้นงาน .....	76
4.5.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติ ชิ้นงาน .....	96
4.5.4 การเปรียบเทียบแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุ ปะการัง .....	105
4.6 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน HA และสมการที่สามารถ ประมาณการแรงในการเจาะ .....	107

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5	111
5.1	111
5.2	111
5.3	
ชนิดมีรูพรุน	111
6	115
6.1	115
6.2	116
รายการอ้างอิง	117
ภาคผนวก	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	146

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตารางผลการทดลองความแข็งแรงดัด ของการทดลองที่1.....	28
2.2 ตารางผลการทดลองความแข็งแรงดัด ของการทดลองที่2.....	28
2.3 ตารางสรุปกรรมวิธีการขึ้นรูป และคุณสมบัติของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน.....	31
3.1 ตารางแสดงส่วนผสมที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ HA.....	37
3.2 ตารางสรุปสภาวะในการขึ้นรูปขึ้นงาน HA .....	38
3.3 ตารางแสดงวัสดุที่ใช้ในการทดลองวัดแรงในการเจาะ .....	46
3.4 ตารางแสดงลำดับการทดสอบแรงดัน และแรงบิด.....	47
4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบความหนาแน่น.....	57
4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน.....	58
4.3 ตารางแสดงผลการทดสอบความแข็ง.....	65
4.4 ตารางแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดัด.....	66
4.5 ตารางแสดงผลการทดสอบโมดูลัส.....	67
4.6 ตารางแสดงผลการทดสอบแรงดัน(Thrust Force) ในการเจาะวัสดุ.....	69
4.7 ตารางแสดงผลการทดสอบแรงบิด(Torque) ในการเจาะวัสดุ.....	72
4.8 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน(Thrust Force) กับความหนาแน่นบัลค์ .....	77
4.9 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน(Thrust Force) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน.....	79
4.10 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน(Thrust Force) กับความแข็ง.....	81
4.11 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน(Thrust Force) กับความแข็งแรงดัด.....	83
4.12 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน(Thrust Force) กับโมดูลัส.....	85
4.13 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด(Torque) กับความหนาแน่นบัลค์ .....	87
4.14 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด(Torque) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน.....	89
4.15 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด(Torque) กับความแข็ง.....	91
4.16 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด(Torque) กับความแข็งแรงดัด.....	93
4.17 ตารางวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด(Torque) กับโมดูลัส.....	95
4.18 ตารางสรุปคุณสมบัติของวัสดุประเภทชนิดรูพรุน .....	107
4.19 ตารางสรุปแรงในการเจาะ ที่สภาวะ ความเร็วรอบ 130-920rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14mm/ รอบ ขนาดดอกสว่าน 3 มิลลิเมตร .....	108

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.20 ตารางสรุปสมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 จากการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลแรงดัน(Thrust Force).....	108
4.21 ตารางสรุปสมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 จากการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลแรงบิด(Torque).....	109
4.22 ตารางสรุปสมการเชิงเส้นตรง จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน(Thrust Force)กับคุณสมบัติวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน.....	110
4.23 ตารางสรุปสมการเชิงเส้นตรง จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(Torque)กับคุณสมบัติวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน.....	110

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1	ลักษณะตัวกดรูป และตัวกดวิกเกอร์ส ..... 7
2.2	วีรรอยความเสียหายที่เกิดจากหัวกดรูป..... 7
2.3	ความเสียหายที่เกิดจากหัวกดวิกเกอร์ส ..... 7
2.4	รอยตกค้างเนื่องจากหัวกดรูป ..... 9
2.5	รอยตกค้างเนื่องจากรอยกดวิกเกอร์ส ..... 9
2.6	ระนาบเฉือน และระนาบเสียดทานในการตัด ..... 14
2.7	แรงตัดที่เกิดขึ้นในการกลึงปอก ..... 14
2.8	แรงในการเจาะด้วยดอกสว่าน ..... 16
3.1	คุณสมบัติในการเผาขึ้นงาน..... 38
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับมุม $2\theta$ ของสารที่ได้จากการสังเคราะห์ ..... 51
4.2	ผลการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟระหว่าง HA มาตรฐาน กับ HA ที่สังเคราะห์ขึ้น ..... 52
4.3	กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของผง HA..... 52
4.4	กราฟการกระจายผง ของผงแป้ง ..... 53
4.5	ภาพถ่ายของผง HA ที่กำลังขยาย 500 เท่า ..... 54
4.6	ภาพถ่ายของผง HA ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ..... 54
4.7	กราฟแท่งแสดงค่าความหนาแน่นบัลค์ ของขึ้นงาน ..... 57
4.8	กราฟแท่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน ของขึ้นงาน..... 58
4.9	ภาพถ่ายขึ้นงานที่ส่วนผสม HA 100% แรงอัดขึ้นรูป 10MPa เเผาที่ $1100^{\circ}\text{C}$ ..... 60
4.10	ภาพถ่ายขึ้นงานที่ส่วนผสม 1%แป้ง แรงอัดขึ้นรูป 2MPa เเผาที่ $1100^{\circ}\text{C}$ ..... 61
4.11	ภาพถ่ายขึ้นงานที่ส่วนผสม 5%แป้ง แรงอัดขึ้นรูป 2MPa เเผาที่ $1100^{\circ}\text{C}$ ..... 62
4.12	ภาพถ่ายลักษณะและโครงสร้างรูพรุนของปะการัง ที่กำลังขยาย 50 เท่า ..... 63
4.13	กราฟแท่งแสดงค่าความแข็ง ของขึ้นงาน..... 65
4.14	กราฟแท่งแสดงค่าความแข็งแรงดัด ของขึ้นงาน..... 66
4.15	กราฟแท่งแสดงค่าโมดูลัส ของขึ้นงาน..... 67
4.16	กราฟแสดงอิทธิพลของของอัตราการป้อนตัด ต่อแรงดัน(Thrust Force) ในการเจาะขึ้นงาน ที่ความเร็วรอบ 130rpm..... 70

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.17 กราฟแสดงอิทธิพลของของความเร็วรอบ ต่อแรงดัน(Thrust Force) ในการเจาะชิ้นงาน ที่อัตราการป้อนตัด 0.07mm/รอบ.....	70
4.18 กราฟแสดงอิทธิพลของของอัตราการป้อนตัด ต่อแรงบิด(Torque) ในการเจาะชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบ 130rpm.....	73
4.19 กราฟแสดงอิทธิพลของของความเร็วรอบ ต่อแรงบิด(Torque) ในการเจาะชิ้นงาน ที่อัตราการป้อนตัด 0.07mm/รอบ.....	73
4.20 กราฟเปรียบเทียบแรงดัน และแรงบิดที่สภาวะการทดสอบเดียวกัน.....	75
4.21 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงดัน(Thrust Force) กับความหนาแน่นบัลค์ .....	98
4.22 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงดัน(Thrust Force) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน .....	98
4.23 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงดัน(Thrust Force) กับความแข็ง.....	99
4.24 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงดัน(Thrust Force) กับความแข็งแรงตัด.....	99
4.25 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงดัน(Thrust Force) กับโมดูลัส.....	100
4.26 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงบิด(Torque) กับความหนาแน่นบัลค์.....	102
4.27 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงบิด(Torque) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน.....	103
4.28 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงบิด(Torque) กับความแข็ง.....	103
4.29 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงบิด(Torque) กับความแข็งแรงตัด.....	104
4.30 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงบิด(Torque) กับโมดูลัส.....	104
4.31 กราฟแท่งเปรียบเทียบแรงดัน(Thrust Force) ของวัสดุ HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุประการัง.....	105
4.32 กราฟแท่งเปรียบเทียบแรงบิด(Torque) ของวัสดุ HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุประการัง.....	106
5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน(Thrust Force) ของวัสดุ HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุประการัง .....	114
5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(Torque) ของวัสดุ HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุประการัง .....	114

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการ และเหตุผล

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตวัสดุทางการแพทย์ มีผู้ให้ความสนใจในการวิจัย และพัฒนากันอย่างกว้างขวาง ทั้งนักวิทยาศาสตร์ นักวิจัย ทั้งยังรวมไปจนถึงตัวแพทย์เองอีกด้วย วัสดุทางการแพทย์ (Biomaterial) โดยทั่วไปแล้วแต่ละตัวจะมีคุณสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกับอวัยวะแต่ละส่วนของมนุษย์มากที่สุด และเข้ากับอวัยวะเดิมของร่างกายได้ดีไม่มีการต่อต้านจากร่างกาย (Biocompatible) สำหรับวัสดุทางการแพทย์มีตั้งแต่ วัสดุจำพวกโพลีเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์ สารในกลุ่มพวกโพลีเมอร์ และโลหะ จะทนต่อสภาวะแวดล้อมจำพวกของเหลวในร่างกาย (Biotolerent) แต่เนื้อเยื่อของร่างกายที่อยู่รอบๆวัสดุเหล่านี้จะตาย ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น ส่วนวัสดุสังเคราะห์จำพวกอลูมินาหรือคาร์บอน (เซรามิกส์) พวกนี้เมื่อใส่เข้าไปในร่างกายจะไม่ทำอันตรายกับเนื้อเยื่อแต่อย่างใด (Bioinert) หรือเนื้อเยื่ออยู่ชิดติดกับวัสดุสังเคราะห์ ถ้าหากวัสดุนั้นมีรูพรุนจะสามารถเป็นที่ยึดเกาะของเนื้อเยื่อได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

ดังนั้นในการผลิตวัสดุที่ใช้ทดแทนตา (ตาเทียม) จำเป็นจะต้องใช้วัสดุที่มีรูพรุนเพื่อให้เนื้อเยื่อยึดเกาะโดยมีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 150 – 600  $\mu\text{m}$  เมื่อเนื้อเยื่อยึดเกาะกับวัสดุสังเคราะห์แล้วจะสามารถทำให้วัสดุสังเคราะห์ หรือลูกตาเทียมสามารถเคลื่อนไหวได้ และไม่หลุดออกมา การผ่าตัดตาเทียมชนิดที่เคลื่อนที่ได้นี้ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ มีราคาประมาณลูกละ 1000 เหรียญสหรัฐ ผลิตจากปะการังที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน และความดันจนกลายเป็น cHA (Coralline Hydroxyapatite) ในส่วนของการพัฒนาตาเทียมที่สามารถเคลื่อนไหวได้ในประเทศไทยจัดทำโดย พันเอก รองศาสตราจารย์ ศุภชัย วงศ์พิเชษฐชัย โดยทำการวิจัยในโครงการวิจัยและพัฒนา ลูกตาเทียม ตาปลอมเคลื่อนไหวได้ หน้ากาก หน้าตา ตาปลอมครึ่งหน้า โดยงบประมาณจากสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทหารกลาโหม (สวพ.กท.) ได้พัฒนา และผลิตตาเทียมที่ทำจากกระดูกวัวที่มีรูพรุน bHA (Bovine Hydroxyapatite) เป็นผลสำเร็จ แล้วทำการผ่าตัดให้ผู้ป่วยจำนวน 21 คน ผลปรากฏว่าเคลื่อนไหวได้ แต่ยังไม่สามารถ ผ่าตัดครั้งที่สองเพื่อเจาะรูใส่เปลือกตาปลอมชนิดมีกล้ามเนื้อได้ เพราะเมื่อเจาะแล้ว bHA เพราะมากทำให้แตก ส่งผลทำให้กล้ามเนื้อเย็บ แต่ใน cHA ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศสามารถเจาะและเย็บได้ ดังนั้นจะเห็นว่ากระบวนการเจาะวัสดุรูพรุนในการผ่าตัดฝังลูกตาเทียมแบบเคลื่อนที่ได้จะเป็นกระบวนการที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เลย ผู้วิจัยจึงมีความสนใจเกี่ยวกับการเจาะวัสดุที่มีรูพรุนว่ามีคุณสมบัติของวัสดุ หรือปัจจัยจากกระบวนการตัดตัวใด ที่ส่งผลต่อแรงในการเจาะวัสดุรูพรุน แต่ทั้งนี้จากการสำรวจและจัดหาเครื่องมือในการวัดแรงในการเจาะพบว่ามีใช้อยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำเรื่องขอความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเข้าทดลองวัดแรงในการเจาะที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



ในงานวิจัยจะเป็นการหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไรกับแรงในการตัด เพื่อนำไปพัฒนากรรมวิธีการขึ้นรูป และปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุรูพรุนให้สามารถทนต่อแรงในการตัดได้เพื่อนำมาใช้ผลิตตาเทียมต่อไป ในงานวิจัยฉบับนี้ จะแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ คือ

1. จัดหาวัสดุ โดยใช้ Hydroxyapatite (HA) โดยการสังเคราะห์ผงจากปฏิกิริยาทางเคมี แล้วขึ้นรูปวัสดุขึ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ด้วยกรรมวิธีอัดผง HA กับผงแป้ง ลงในแม่พิมพ์ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง Sintering ผงแป้งจะเป็นตัวทำให้วัสดุขึ้นงานเกิดรูพรุน

2. ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน

3. ทำการทดลองวัดแรงตัดเจาะ โดยใช้ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ปรับค่าความเร็วรอบ (rpm) อัตราการป้อนตัด (mm/รอบ) และความลึกในการเจาะ 5 มิลลิเมตร แรงในการตัดเจาะใช้ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เป็นเครื่องมือในการวัด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยด้านคุณสมบัติของวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน ที่ส่งผลกระทบต่อการตัด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีการจำกัดขอบเขตของการศึกษาวิจัยไว้ดังนี้ คือ

1. วัสดุที่ทำการศึกษาคือ HA ที่จัดทำขึ้นเองโดยกรรมวิธีอัดผง HA ในแม่พิมพ์ แล้ว Sintering และ วัสดุซากประกรังจากธรรมชาติ

2. ผง HA ที่ใช้จะได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี

3. จะใช้ผงแบ่งเป็นส่วนผสมเพื่อทำให้วัสดุขึ้นงานเกิดรูพรุน

4. คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลที่ศึกษาของวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน ที่ส่งผลกระทบต่อการตัดมีดังนี้

4.1 ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density,  $\text{g/cm}^3$ )

4.2 เปอร์เซ็นต์ความพรุน (%Porosity, %)

4.3 ขนาดของรูพรุน (Porous Size,  $\mu\text{m}$ )

4.4 ความแข็ง Hardness (HV)

4.5 ความแข็งแรงดัด (3 Point Bending, MPa)

4.6 โมดูลัส (Modulus, GPa)

5. กระบวนการตัดจะศึกษาเพียงกระบวนการเจาะเท่านั้น

6. แรงที่เกิดขึ้นในการเจาะวัดด้วยเครื่อง Dynamometer

7. ดอกสว่านที่ใช้ในการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ประเภท HSS. ชนิด Twist

Drill

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. สํารวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน ให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 3 ระดับ และจัดหาซากปะการังจากธรรมชาติ
3. ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานที่เตรียมขึ้น ได้แก่ ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density,  $\text{g/cm}^3$ ) เปอร์เซ็นต์ความพรุน (%Porosity) ขนาดของรูพรุน (Porous Size,  $\mu\text{m}$ ) ความแข็ง (Hardness, HV) ความแข็งแรงดัด (3 Point Bending, MPa) และโมดูลัส (Modulus, GPa)
4. ศึกษาการตัดโดยกระบวนการเจาะวัสดุชิ้นงานทั้ง 3 ระดับ และซากปะการัง โดยปรับเปลี่ยนตัวแปรควบคุมในการเจาะ (Operation Variable) ได้แก่ ความเร็วรอบ (rpm) และอัตราการป้อนตัด (mm/รอบ) เพื่อหาแรงในการตัด
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. วิจัยผลผลการทดลอง
7. สรุป และข้อเสนอแนะ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน
2. ผลจากการศึกษาสามารถทราบถึงแนวโน้มในการเกิดแรงในการเจาะวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล
3. ผลของการศึกษาสามารถนำมาประยุกต์เพื่อสร้างโมเดลในการประมาณการแรงในการเจาะจากคุณสมบัติของวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุนได้
4. เป็นการพัฒนาด้านแรงในการตัดสำหรับวัสดุกลุ่มที่ไม่ใช่โลหะ
5. เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐาน และการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุทางการแพทย์ (Biomaterial)

วัสดุทางการแพทย์ (Biomaterial) คือ สารใด ๆ ก็ตามที่ไม่ใช่ยา อาจจะเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมา ซึ่งนำมาแทนที่อวัยวะหรือส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ตามระยะเวลาที่ต้องการใช้งาน ในวงการแพทย์ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการนำสาร Biomaterial มาใช้ทดแทนกระดูก สารสังเคราะห์ที่นำมาใช้นี้ได้แก่ วัสดุพวกโพลีเมอร์ โลหะ และเซรามิกซ์ และพบว่าเมื่อใส่วัสดุสังเคราะห์เหล่านี้เข้าไปในร่างกาย เนื้อเยื่อที่อยู่ใกล้เคียงจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น กล่าวคือ

1. พวกซีเมนต์กระดูก (โพลีเมอร์) และเหล็กกล้าปลอดสนิม (โลหะ) สารในกลุ่มนี้จะทนต่อสภาวะแวดล้อม และของเหลวในร่างกาย (Biotolorent) ได้ดี แต่เนื้อเยื่อรอบ ๆ วัสดุเหล่านี้จะตาย ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างเนื้อเยื่อ กับวัสดุสังเคราะห์
2. พวกอลูมินา หรือคาร์บอน (เซรามิกซ์) พวกนี้เมื่อใส่เข้าไปจะไม่ทำอันตรายกับเนื้อเยื่อแต่อย่างใด (Bioinert) เนื้อเยื่อจะอยู่ชิดติด กับวัสดุสังเคราะห์

#### 2.2 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุแบ่งออกเป็นหลายด้านแต่ในที่นี้ขอกล่าวเพียงคุณสมบัติเชิงกล และวิธีการหาค่าเหล่านี้ที่สามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุนเท่านั้นซึ่งจะมีดังนี้คือ

1. โมดูลัสของยัง
2. ความแข็ง
3. การหาค่าโมดูลัสโดยรอยแตกค้างที่เกิดจากห้วงคดรูป
4. การหาค่าความแข็งโดยห้วงคดวิกเกอร์

### 2.2.1 ค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus / E)

ค่าโมดูลัสของยัง คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด ในการศึกษา ค่าโมดูลัสนั้นโดยทั่วไปสำหรับวัสดุเหนียวจะเป็นค่าความชัน หรือสัดส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดนั่นเอง แต่วัสดุเปราะนั้นจะหายากมาก ดังนั้นจึงมีวิธีการที่นำมาประยุกต์ใช้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้การทดสอบการดัด การกดด้วยหัวกด Knoop เป็นต้น รายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

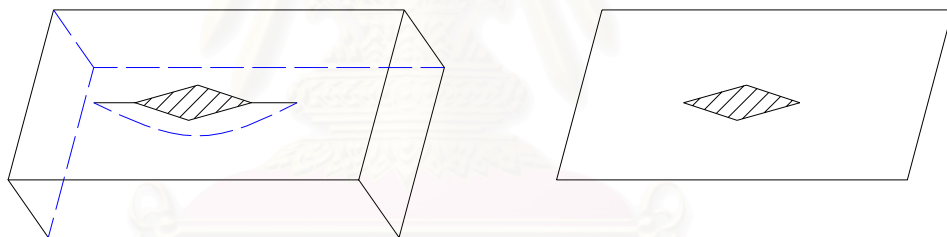
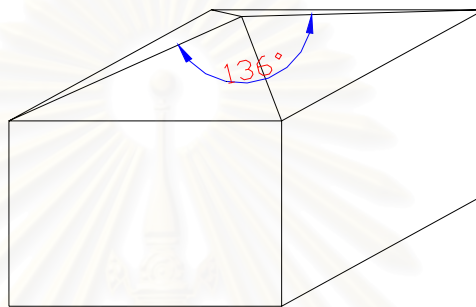
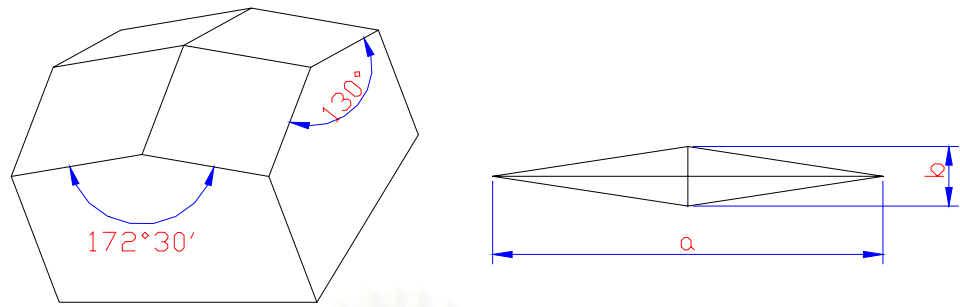
### 2.2.2 ค่าความแข็ง (Hardness / H)

ค่าความแข็ง คือ ค่าความต้านทานต่อการผิดรูปแบบพลาสติก เป็นค่าที่มีความสำคัญซึ่งได้จากการอินเดนเทนชันด้วยหัวกด Vicker มีขนาดมุม 136 องศา จนปรากฏรอยตกค้างขนาดใหญ่ ค่าความแข็งได้จากขนาดแรงกดต่อพื้นที่รอยตกค้างซึ่งได้จากการกด

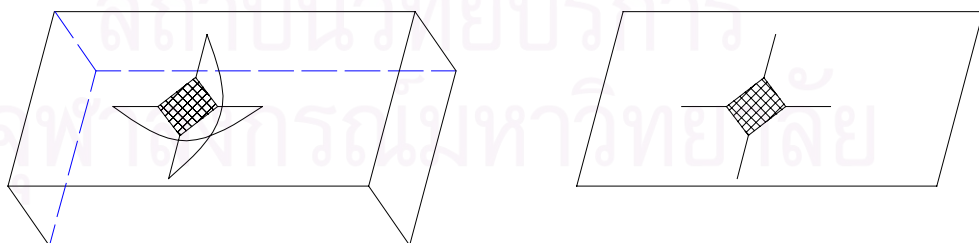
ตัวกดที่นิยมใช้มีอยู่หลายแบบ แต่จะขอกกล่าวเพียงเฉพาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น คือตัวกดประเภทปลายแหลม (Sharp Indenter) ซึ่งทำจากเพชร อันได้แก่ตัวกดนูป (Knoop Indenter) และตัวกดวิกเกอร์ (Vicker Indenter) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจะทำให้เกิดรอยสัมผัสแบบพลาสติก (Plastic Contact) กล่าวคือ เมื่อถอยหัวกดออกจากผิววัสดุ รอยสัมผัสระหว่างผิววัสดุกับตัวกด จะมีสภาพไม่เหมือนก่อนถูกกดจะเกิดเป็นรอยถาวร (Impression) ตรงบริเวณที่สัมผัส

ดังรูปที่ 2.2 แสดงรั้วรอยความเสียหายที่เกิดจากหัวกดนูป ซึ่งจะมีรอยตกค้างถาวรเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (บริเวณที่แรงเงา) และมีรอยรั้วออกมาจากมุมทั้งสองข้างของเส้นทะแยงมุมด้านยาว อันเนื่องมาจากรอยราวรูปครึ่งวงรี (บริเวณเส้นปะ)

ดังรูปที่ 2.3 แสดงรั้วรอยความเสียหายที่เกิดขึ้น เนื่องจากตัวกดวิกเกอร์ ซึ่งมีรอยตกค้างถาวรเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (บริเวณแรงเงา) ซึ่งมีรอยรั้วออกมาจากมุมทั้ง 4 ของรอยรั้วตกค้าง และมีรอยรั้วรูปครึ่งวงกลมบนระนาบ 2 ระนาบที่ตั้งฉาก และสมมาตรกัน



รูปที่ 2.2 เวกอนจ สดอกรง เสงเเวอช เอพเเวอช เอพเเวอช



รูปที่ 2.3 เวกอนจ สดอกรง เสงเเวอช เอพเเวอช เอพเเวอช

เนื่องจากผิววัสดุบริเวณที่ถูกกดด้วยปลายกดแหลมนั้น จะเกิดรอยร้าวตกค้างถาวรกำหนดโดยรูปร่างของตัวกด ซึ่งมีรูปแบบเรขาคณิตที่แน่นอน ดังนั้นเทคนิคอินเดนเทนชั่นทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่บอกพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุต่างๆได้โดยตรง

### 2.2.3 การหาค่าโมดูลัสของยังของเซรามิกซ์ จากรอยแตกค้างที่เกิดจากตัวกดรูป

รอยแตกค้าง เนื่องจากตัวกดรูปมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 (บริเวณที่แรงเงา) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดจริงของหัวกดรูป (บริเวณเส้นประ) เนื่องจากเมื่อเราถอนตัวหัวกดรูปออกจากเซรามิกซ์จะเกิดการคืนตัวแบบยืดหยุ่น ทำให้เส้นทแยงมุมด้านสั้น จะลดลงจาก  $b$  เป็น  $b'$  ในขณะที่เส้นทแยงมุมด้านยาวเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง ( $a \approx a'$ ) ขอบเขตการคืนตัวแบบยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความแข็ง กับค่าโมดูลัสของยังของเซรามิกซ์ ( $H/E$ ) อาจกล่าวได้ว่าในเซรามิกซ์ที่มีค่า  $H/E$  สูง การคืนตัวแบบ ยืดหยุ่นจะสูง แต่ถ้า  $H/E$  มีค่าต่ำการคืนตัวแบบยืดหยุ่นจะมีค่าต่ำด้วย

จากการทดลองวัดค่าโมดูลัสของยัง จากรอยแตกค้างที่เกิดจากตัวกดรูปลงบนผิวเซรามิกซ์ โดยมาร์แชล และคณะ พบว่า ระยะคืนตัวของรอยแตกค้างจะเป็น

$$b' / a' = b / a - \alpha (H / E) \quad (2.1)$$

$$\text{หรือ} \quad E = \alpha H / [(b / a) - (b' / a')] \quad (2.2)$$

$$\text{เมื่อ} \quad E = \text{ค่าโมดูลัสของยัง}$$

$$H = \text{ค่าความแข็งของเซรามิกซ์}$$

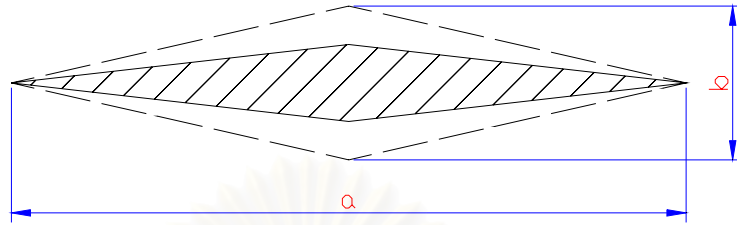
$b' / a' =$  ค่าอัตราส่วนเส้นทแยงมุมของรอยแตกค้างด้านสั้น ต่อเส้นทแยงมุมของรอยแตกค้างด้านยาว

$b / a =$  ค่าอัตราส่วนเส้นทแยงมุมของรอยแตกค้างด้านสั้นของหัวกดรูปต่อเส้นทแยงมุมของรอยแตกค้างด้านยาวของหัวกดรูป ซึ่งมีค่าประมาณ 1/7

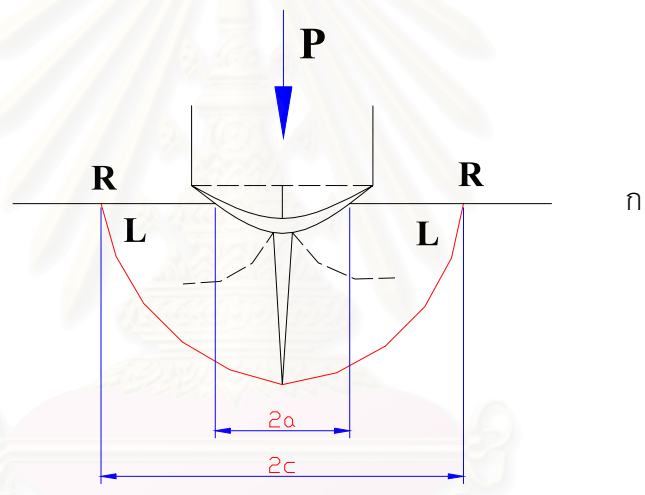
$$\alpha = \text{ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองของมาร์แชล และคณะ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.45}$$

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

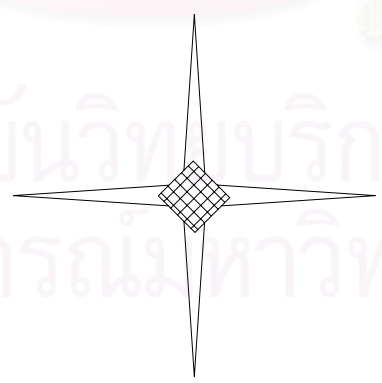




รูปที่ 2.4 แสดงรอยตกค้ำเนื่องจากตัวกดรูป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข

## 2.2.4 การหาค่าความแข็ง

เมื่อกดหัวกดปลายแหลมลงบนผิวเซรามิกซ์ ความเค้นที่เกิดขึ้นในเซรามิกซ์ตรงบริเวณที่สัมผัสกับปลายแหลมของตัวกดจะมีค่าสูงมาก จนกระทั่งสามารถทำให้เกิดการผิดรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ได้ดังได้แสดงไว้ด้วยบริเวณที่แรงเงาในรูปที่ 2.2 (ในกรณีที่ใช้หัวกดรูป) และรูปที่ 2.3 (ในกรณีที่ใช้ตัวกดวิกเกอร์) ขนาดบริเวณที่เกิดการผิดรูปแบบพลาสติกนี้ (สามารถกำหนดได้จากขนาดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยตกค้างที่ปรากฏให้เห็นบนผิวเซรามิกซ์) จะขึ้นอยู่กับค่าแรงกดอินเดนเทนชันที่กระทำเนื่องจากรูปทรงเรขาคณิตของรอยตกค้างมีลักษณะเหมือนเดิม (Geometrical Similarity) ไม่ขึ้นกับขนาดแรงกดอินเดนเทนชัน ดังนั้นความเค้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้น ณ บริเวณที่เกิดการผิดรูปแบบพลาสติก ได้ถูกนำมาใช้เป็นปริมาณที่บอกถึงความแข็งของเซรามิกซ์ ในกรณีของตัวกดวิกเกอร์ค่าความแข็งสามารถคำนวณได้จาก

$$H = P / 2a^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ	H	=	ค่าความแข็ง
	P	=	แรงกดอินเดนเทนชัน
	a	=	ครึ่งความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยตกค้าง

## 2.3 องค์ประกอบของการตัดวัสดุ

### ● เครื่องจักรกล (Machine Tools)

ในที่นี้หมายถึงเครื่องจักรที่ใช้ในการนำมาตัดวัสดุ ในยุคเริ่มแรกเป็นเครื่องจักรกลแบบธรรมดาที่ควบคุมด้วยระบบกลไก และโดยคน เช่นเครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องไส เครื่องเจาะ เครื่องจักรเหล่านี้ตัดวัสดุโดยอาศัยใบมีดที่มีความแข็งสูง ต่อมาได้มีการนำเอาระบบควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control System, NC) ทำให้การทำงานได้รวดเร็วขึ้น แม่นยำมากยิ่งขึ้น และสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น จากนั้นได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบเชิงตัวเลขโดยคอมพิวเตอร์ (Computerized Numerical Control, CNC) ส่งผลไปให้ขยายขีดความสามารถเครื่องจักรกลให้สูงมากยิ่งขึ้นไปอีก และยังสามารถเปลี่ยนมีดตัดอัตโนมัติได้อีกด้วย

### ● ใบมีด (Cutting Tools)

เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ใช้ตัดชิ้นงานที่แข็งต่ำกว่าไบมีด ให้มีรูปร่างและขนาดให้เป็นไปตามความต้องการ ไบมีดตัดโลหะแบบดั้งเดิมที่ยังคงมีใช้กันอยู่ คือ ไบมีดเหล็กกล้าไฮสปีด ซึ่งมีราคาถูก ไบมีดที่เหมาะสมแก่การผลิตต้องทนความรวดเร็วรอบในการตัดที่สูงๆได้ ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักเป็นไบมีดอินเซอร์ท (Insert Tools) ซึ่งมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ อาจเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หรือเป็นแผ่นกลม ชั้นสกรูยึดติดกับด้ามมีด สามารถถอดเปลี่ยนคมได้ ไบมีดอินเซอร์ทมีหลายชนิด เช่น คาร์ไบด์ เซอร์เมท CBN เซรามิกซ์ และเพชร นอกจากนี้ยังมีการชุบผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของไบมีดอีกด้วย

- **ชิ้นงาน (Workpiece)**

โดยทั่วไปแล้วชิ้นงานที่เป็นรูปทรงกลมจะมาจากกรรกึ่ง ชิ้นงานที่มีผิวเรียบมักจะตัดโดยการกัด หรือการไส วัสดุชิ้นงานมีหลากหลายชนิดอาจแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มหลักๆดังนี้ โลหะกลุ่มเหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก อโลหะ และวัสดุผสม

- **น้ำยาช่วยในการตัด (Cutting Fluids)**

หรือบางทีเรียกว่า น้ำยาหล่อเย็น (Coolants) ปกติที่ใช้กันมาก คือ น้ำยาชนิดที่ผสมกับน้ำได้ หรือบางทีเรียกว่าน้ำยาที่มีน้ำเป็นฐาน (Water – Based Emulsions) นอกจากนี้ยังมีน้ำยาชนิดอื่น เช่น น้ำมันก๊าด หรือน้ำยาชนิดพิเศษที่ใช้ในงานตัดโดยเฉพาะ

- **ปัจจัยเกี่ยวกับมนุษย์ (Human-Related Factor, Peoplewares)**

หมายความรวมถึง คน ความรู้ของคน และข่าวสาร ที่นำมาใช้ในการควบคุมกรรมวิธีการตัดวัสดุ

## 2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการตัด

วัสดุชิ้นงานที่นำมาตัดมีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดผลต่อภาวะในการตัด เช่นความเร็วในการตัดแตกต่างกัน การศึกษาชิ้นงานทุกชนิดที่มีอยู่จึงยากลำบากยิ่ง คุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับการตัดมีอยู่หลายอย่าง แต่ไม่เป็นที่เข้าใจชัดเจนเหมือนคุณสมบัติพื้นฐาน เช่นคุณสมบัติที่ได้จากการดึง แต่ก็มีผู้พยายามทำการศึกษาเพื่อให้ได้แนวทางที่พอจะให้ประโยชน์ได้ ดังต่อไปนี้

- **ความแข็ง (Hardness)**

ในงานตัดวัสดุ ความแข็งของการตัดวัสดุชิ้นงานนิยมนวัดเป็นหน่วยรอกเวลสเกล C หรือสเกล B หรือบางทีแสดงเป็นหน่วยบริเนล ก็ได้ ส่วนวัสดุใบมีดนิยมนวัดเป็นหน่วยรอกเวลสเกล B ความแข็งในวัสดุหมายถึงพลังงานที่ใช้ในการกดนั้นใช้แปรรูปไปเป็นหนึ่งหน่วยปริมาตร พลังงานที่ใช้อาจแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะและขนาดหัวกด จึงจำเป็นต้องใช้วิธีที่เป็นมาตรฐานเพื่อทำการเทียบเคียงกันได้

แต่เดิมนั้น เข้าใจกันว่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าก่อนการตัด ระหว่างการตัด และหลังจากที่ตัดเสร็จแล้ว จะไม่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากปัจจุบันการตัดมักจะทำด้วยมีดคาร์ไบด์ซึ่งจะมีความเร็วในการตัดที่สูง ดังนั้นกรณีที่ผิวของชิ้นงานสามารถชุบแข็งได้ อุณหภูมิที่เกิดจากการตัดสามารถทำให้ชิ้นงานแข็งขึ้นได้

- **กำลังการครากในการดึง (Tensile Yield Strength, Y)**

กำลังด้านการครากในการดึง หมายถึง ค่าความเค้นสูงสุด ที่วัสดุชิ้นงานรับได้ โดยไม่เกิดการคราก มีความสำคัญในการตัดโลหะ เพราะในการป้องกันความบิดเบี้ยวการแปรรูป และการครากของชิ้นงานที่ถูกยึด โกง หรืออัด ในระหว่างการตัด

- **โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's Modulus, E)**

โมดูลัสของยังเป็นค่าแสดงความคงรูปของชิ้นงาน หรือความสามารถในการต้านแรงเพื่อไม่ให้เกิดการยืดหยุ่น

- กำลังในการต้านการเฉือน (Shearing Yield Strength ,  $\tau$ )

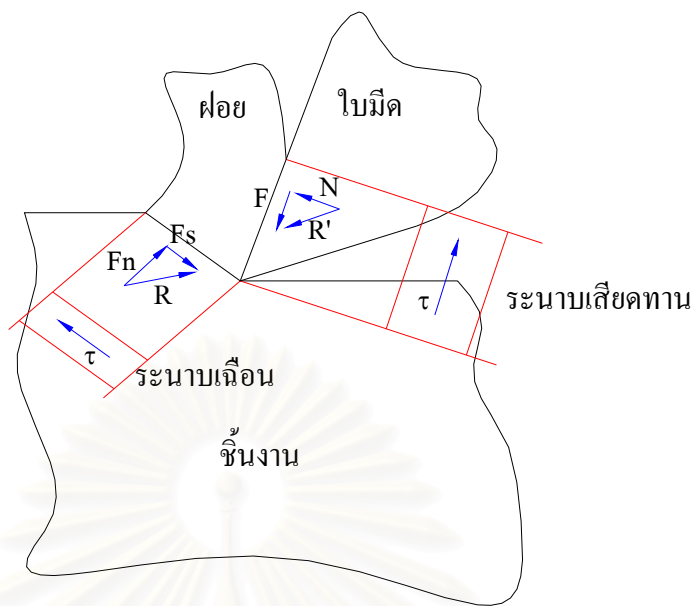
เป็นที่ทราบกันแล้วว่า การตัดโลหะแท้จริงเป็นการเฉือนของเนื้อโลหะชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แรงรวม  $R$  ที่กระทำบนระนาบเฉือน เป็นผลรวมของแรงเฉือน ( $F_s$ ) และ แรงกดตั้งฉาก ( $F_n$ ) แรงในการเฉือนจะขึ้นกับขนาดของพื้นที่ คุณกับกำลังต้านการครากในการเฉือน

(Shearing Yield Strength,  $\tau$ ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน แต่เนื่องจากการเฉือนในการตัดโลหะเกิดขึ้นที่ความเครียดสูง อัตราความเครียดสูง และอุณหภูมิสูง คือสูงกว่าสภาพปกติของการทดสอบวัสดุ ดังนั้นจึงไม่อาจนำค่าของ  $\tau$  ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีปกติไปใช้ในการตัดได้ แต่ต้องหาค่า  $\tau$  ที่ความเครียดสูง อัตราความเครียดสูง และอุณหภูมิสูง เท่าๆกับสภาวะการตัดโลหะ ซึ่งยังมีผู้ทดสอบแล้วนำมาเผยแพร่้อยมาก ไม่เพียงพอที่จะใช้ประโยชน์ได้

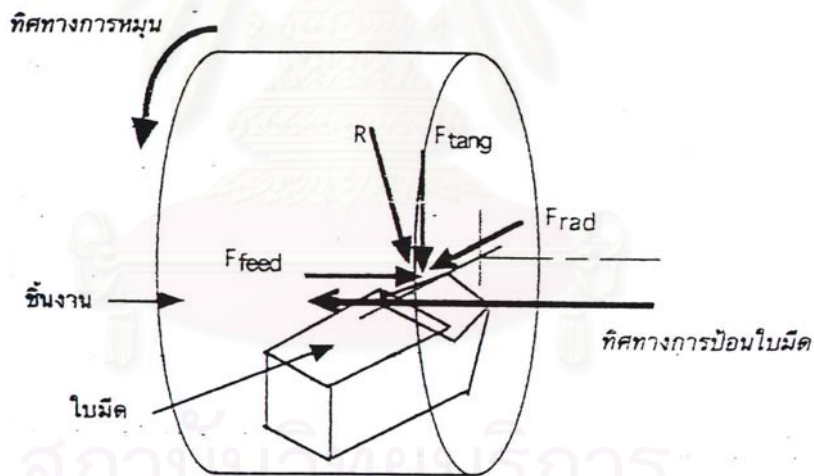
ค่า  $\tau$  ที่ได้จากการตัดวัสดุแล้วบันทึกค่าเก็บไว้อ้างอิงในอนาคตค่า  $\tau$  ที่หาได้จาก การตัดวัสดุนี้ได้มีการรวบรวมไว้บ้างแล้ว เพื่อแสดงในส่วนหนึ่งของเรื่องราวที่เกี่ยวกับกลศาสตร์การตัดวัสดุ

## 2.5 แรงในการตัดวัสดุ (Cutting Forces)

แรงในการตัดวัสดุ หมายถึงแรงที่ชิ้นงานกดลงบนคมมีด มีความสำคัญมาก และต้องมีการควบคุมให้มีค่าไม่สูงจนเกินไป เพราะถ้าแรงในการตัดมีค่าสูงเกินไปสามารถทำให้มีดตัดแตกหักได้ หรือแรงที่เพิ่มขึ้นลดลงเร็วเกินไปจะทำให้มีดล้าแล้วแตกหักในที่สุดได้ ทิศทางของแรงจะต้องไม่ทำให้เกิดความเครียดแบบยืด เพราะใบมีดส่วนใหญ่เป็นวัสดุเปราะรับความเครียดแบบยืดได้ไม่มากนักก็จะแตกหักหรือร้าว ความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติของแรงตัด เช่นการรู้ว่าแรงในการตัดเพิ่มหรือลดด้วยตัวแปรใด หรือการที่สามารถคำนวณได้ว่าเมื่อตัวแปรใดเปลี่ยนแปลงเท่าใด จะมีผลให้แรงตัดเปลี่ยนแปลงเป็นเท่าไร จะสามารถควบคุมขนาด และทิศทางของแรงตัดให้อยู่ ในช่วงที่เหมาะสม



รูปที่ 2.6 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในการกลึงปอก



รูปที่ 2.7 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในการกลึงปอก

สถาบันทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้แล้ว แรงตัดที่กระทำบนคมมีด และแรงที่เกิดขึ้นบนผิวหน้ามีด ยังเกี่ยวข้องกับ การเกิดความร้อน และอุณหภูมิในการตัดวัสดุ อุณหภูมิจะเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับการสึกหรอของมีด ความพยายามในการคำนวณหา ค่าของแรงตัดวัสดุ จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ที่มีผู้สนใจศึกษาค้นคว้าเป็นจำนวนมาก ครอบคลุมกรรมวิธีที่สำคัญที่ใช้กันมากเช่น การกลึง การกัด การไส การเจาะด้วยดอกสว่าน การเลื่อย เป็นต้น ซึ่งจะขอกล่าเพียงแรงในการกลึง และเจาะเท่านั้น

- **แรงตัดที่ได้จากการทดลองของการกลึง (Force Cylindrical Turning)**

งานกลึงปอกผิวทรงกระบอก เป็นงานที่ใช้กันมากแบบหนึ่ง แรงที่ขึ้นงานกระทำลงบนใบมีด R นิยมจำแนกออกเป็น 3 แรงย่อยในทิศทางที่ตั้งฉากกัน คือแรงในทิศทางของเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัด (Tangential Force,  $F_{\text{tang}}$ ) แรงในทิศทางของแนวรัศมี (Radial Force,  $F_{\text{rad}}$ ) และแรงในทิศทางการป้อนชิ้นงานเข้าหามีด (Feed Force,  $F_{\text{feed}}$ ) เมื่อสมมุติว่ามีดอยู่กับที่ ทั้งที่ความเป็นจริงใบมีดจะป้อนเข้าหาชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.7

สมการของแรงตัดที่ได้จากการทดลองมีมากมายหลายลักษณะ รูปแบบหนึ่งที่เราจักกันคืออยู่ในรูปของสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล นั่นคือ

$$T_{\text{tang}} = 10^{et} V^{evt} F^{eft} D^{eDt} \quad (2.5)$$

$$T_{\text{feed}} = 10^{ef} V^{evf} F^{eff} D^{eDf} \quad (2.6)$$

$$T_{\text{rad}} = 10^{er} V^{evr} F^{efr} D^{edr} \quad (2.7)$$

ในหลายกรณีอิทธิพลของความเร็วมีน้อยอาจไม่ต้องนำมาคิดก็ได้ หรืออาจกำหนดให้  $evt = evf = evr = 0$



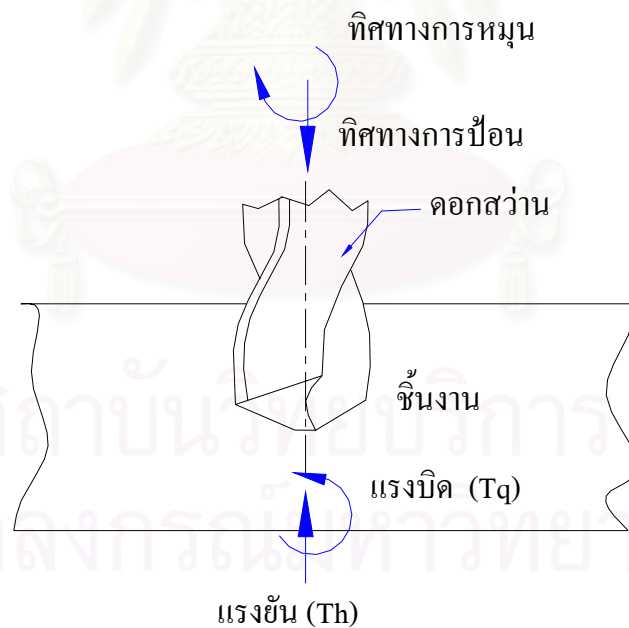
- สมการของแรงตัดที่ได้จากการทดลองของการเจาะ

ในการเจาะวัสดุด้วยดอกสว่าน (Drilling) ได้พบว่าแรงบิด (Torque ,  $T_q$ ) และแรงย่น (Thrust ,  $T_h$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะมีสมการดังนี้

$$T_q = k_{tq} V^{evq} F^{efq} D_i^{eDq} \quad (2.8)$$

$$T_h = k_{th} V^{evh} F^{efh} D_i^{eDh} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $T_q$  เป็นแรงบิด (Torque) ,  $T_h$  เป็นแรงย่น (Thrust force) ส่วน  $K_{tq}, K_{th}, evq, evh, efq, efh, eDq$  และ  $eDh$  เป็นค่าคงตัวที่ทราบจากผลการทดลองตัดวัสดุ ( $V$ ) เป็นความเร็วของการตัดที่วัดเส้นรอบวงของดอกสว่าน ( $f$ ) เป็นอัตราป้อน และ  $D_i$  เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกสว่าน ค่าคงตัวเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงได้บ้างตามลักษณะเรขาคณิตของมุมมีด



## 2.6 พื้นฐานการเกี่ยวกับการแปรรูปวัสดุ

กรรมวิธีการผลิตการขึ้นรูปวัสดุมีหลายวิธี ได้แก่

1. การหลอมละลาย หรือการหล่อ (Casting)
2. การขึ้นรูปด้วยแรงดันสูง (Forming Using High Pressure) เช่น การทุบขึ้นรูป (Forging) การรีด (Rolling)
3. การตัดวัสดุ (Machining) เช่น การเจาะ การกลึง การกัด การไส เป็นต้น
4. การเชื่อมประสาน (Joining)
5. การขึ้นรูปด้วยแรงดันสูง และอุณหภูมิสูง ได้แก่ การขึ้นรูปผง (Powder Metallurgy)

## 2.7 พื้นฐานการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกซ์ และผงโลหะ

ในการขึ้นรูปกรรมวิธีนี้โดยทั่วไปแล้วเรียกว่า (Powder Metallurgy) มีสัญลักษณ์ย่อคือ P/M ขึ้นส่วนของส่วนผสมผงนั้น ต้องทำการอัดผงที่มีส่วนผสมต่างๆ ผสมผงคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นอย่างดีแล้วจึงทำการอัดในแม่พิมพ์ให้มีรูปร่างตามต้องการ แล้งจึงนำชิ้นส่วนนั้นมาทำการเผา (Sintering) คือการให้ความร้อนให้ผงยึดติดกัน แต่ยังไม่ถึงขั้นหลอมละลาย การขึ้นรูปวัสดุผงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การทำผงวัสดุ
2. การผสม และการอัดให้เป็นรูปร่าง
3. การเผา

### 2.7.1 การทำผงวัสดุ

กรรมวิธีการทำผงกระทำได้หลายวิธีแตกต่างกันตามรูปร่าง และลักษณะของผงวัสดุ คือ

1. วิธีการพ่นเป็นไอเหลว วิธีการนี้อาศัยหลักการเป่าลม ไอน้ำ น้ำ หรือไฮโดรเจนผ่านรูเล็กๆ หยุดวัสดุเหลว หรือน้ำโลหะผ่าน วัสดุจะกระจายตัวออกเป็นรูปร่าง และขนาดตามขนาดของสารที่ใช้ในการเป่า
  - ผงที่ได้จากการเป่าด้วยลม จะเป็นเม็ดกลมผิวมัน
  - ผงที่ได้จากการเป่าด้วยไอน้ำ จะได้เม็ดกลม
  - ผงที่ได้จากการเป่าด้วยน้ำ จะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ
2. วิธีการอิเล็กโทรไลซิส จะทำโดยอาศัยหลักการเหมือนที่ทองแดงที่ได้จากวิธี อิเล็กโทรไลซิส ที่ขั้วแคโทด (Cathode) จะเกิดการจับตัวเป็นผงโลหะ ใช้ได้เฉพาะวัสดุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้าเท่านั้น

3. วิธีการคาร์บอนิล (Carbonyl Process) เป็นการรวมตัวกันของโลหะกลุ่มคาร์บอนมอนอกไซด์ (Co) ที่เป็นของเหลว ณ อุณหภูมิห้อง เช่น  $\text{Fe}(\text{Co})_5$  และ  $\text{Ni}(\text{Co})_4$  ที่อุณหภูมิสูงจะสลายตัวเป็นผงโลหะบริสุทธิ์รูปร่างกลม

4. วิธีการรีดักชัน โลหะออกไซด์ เช่นเหล็กไตรออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) วุลแฟรมไตรออกไซด์ ( $\text{WO}_3$ ) และโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ ( $\text{MoO}_3$ ) จะนำมารีดักชันด้วยการอบด้วยกระแสไฟฟ้าไฮโดรเจน จะได้ผงโลหะที่ค่อนข้างมีเม็ดหยาบ

## 2.7.2 กระบวนการผสม และอัดขึ้นรูป

### 2.7.2.1 การผสม (Mixing)

การผสมเป็นกระบวนการหนึ่งในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากผงวัสดุซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัด และการเผาต่อไป โดยนำผงต่างชนิดกันมาคลุกเคล้ากัน ดังนั้นผงวัสดุจำเป็นจะต้องเป็นเนื้อเดียวกัน

การผสมจะใช้เครื่องมือทางกล ซึ่งมีแบบต่างๆดังต่อไปนี้

1. Rotating Drum
2. Rotating Double Cone
3. Screw Mixer
4. Blade Mixer

ขนาดการบรรจุผงสำหรับการผสม ให้ใส่ผงลงไป ในเครื่องผสมประมาณ 20 – 40 เปอร์เซ็นต์ ของความจุ ในขั้นตอนการผสมนี้สารเติมแต่ง คือ

1. สารลื่น (Lubricant) เพื่อช่วยลดแรงเสียดทานผงวัสดุกับผนังแม่พิมพ์ โดยข้อสำคัญที่เลือกสารลื่น คือต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผงวัสดุชิ้นงาน และต้องระเหยกลายเป็นแก๊สในระหว่างขั้นตอนการเผา โดยทั่วไปได้แก่ ผงซิงก์สเตอเรต (Zinc-Stearate) ผงอลูมิเนียม ส่วนผสมในการเติมประมาณ 0.5 – 1 เปอร์เซ็นต์ ของผงวัสดุทั้งหมด

2. สารยึดติด (Binders) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุหลังการอัดให้เพียงพอต่อการจับตัวกันเป็นก้อน โดยยังไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา

3. สารป้องกันการเกาะตัว เพื่อป้องกันการไม่แห้งจับตัวกันเป็นก้อน ก่อนทำการอัด เป็นการช่วยในเรื่องการไหลของผงวัสดุลงสู่แม่พิมพ์ ถ้ามีการจับตัวกันเป็นก้อนแล้วทำให้การไหลไม่สะดวก มีผลต่อปริมาตรของชิ้นงาน

### 2.7.2.2 การอัด (Pressing)

การอัดเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการขึ้นรูปผงวัสดุ คือผงวัสดุจะต้องถูกอัดภายใต้แรงดัน ในแม่พิมพ์เหล็กกล้า เป็นการทำให้ช่องว่างระหว่างผงเล็กกลอง อนุภาคของผงเชื่อมติดกันด้วยแรงอัด ทำให้ผงวัสดุมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำการเผาต่อไป

กระบวนการอัดขึ้นรูปก่อนการเผามีอยู่หลายกรรมวิธีด้วยกัน ได้แก่ การอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์อย่างง่าย (Simple Die Compaction) และการอัดขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก-เพรสซึ่ง (Isostatic Pressing) ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึง การอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์อย่างง่ายเท่านั้น เครื่องอัดผงขึ้นรูปที่ใช้กันส่วนมากจะเป็นเครื่องอัดด้วยแรงกล (Mechanical Presses) เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Presses) เครื่องเหล่านี้ควรมีข้อกำหนดในการใช้งานพอสรุปได้ ดังต่อไปนี้

1. ระยะเวลาโตรก (Stroke) ในการอัดต้องเพียงพอ
2. ระยะเวลาโตรก และความเร็วของการอัดต้องสามารถปรับได้
3. เครื่องอัดต้องสามารถให้แรงอัดได้อย่างเพียงพอ และทำการอัดผงให้มีความสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน
4. ระยะเวลาโตรกในการทำงานจริงอาจมีหลายขั้นตอน แต่ต้องเป็นจังหวะที่เข้ากันได้โดยอัตโนมัติ

การอัดผงวัสดุโดยแม่พิมพ์อย่างง่าย (Simple Die Compaction) เครื่องอัดด้วยแรงเพลลาข้อเหวี่ยง (Mechanical Eccentric Presses) นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับการอัดผงขนาดเล็กๆ ที่ใช้แรงอัดประมาณ 5 – 30 ตัน/ตารางนิ้ว ผงถูกอัดแน่นประมาณ 50 – 80 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นตามทฤษฎี การใช้เครื่องแบบนี้จะทำการอัดด้วยความเร็วสูง และชิ้นงานควรมีพื้นที่หน้าตัดไม่เกิด 1 ตารางนิ้ว ถ้าชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่านี้ควรใช้เครื่องอัดแบบท็อกเกิล (Toggle) หรือเครื่องกดไฮดรอลิกส์ เป็นต้น

ตามหลักเกณฑ์ของการอัดแล้ว ความลึกของโพรง ควรประมาณ 2.5 เท่าของขนาดชิ้นงานที่อัดขึ้นรูป ชิ้นงานที่ถูกอัดขึ้นรูปแล้วเรียกว่า กรีนคอมแพค (Green Compact) หมายถึงชิ้นงานที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างจากการที่เข้ารูปกันเอง (Inter Lock) เพื่อให้มีปริมาตรเพียงพอที่จะบรรจุผงได้เต็มที่ ดังนั้นระยะเวลาโตรกของการใช้เครื่อง จึงมีขีดจำกัด ถ้าต้องการความยาวของชิ้นงานมากๆ ต้องใช้เครื่องกดอัดแบบไฮดรอลิกส์ เพราะมีสโตรกในการใช้งานที่ยาวกว่า และให้แรงในการกดอัดที่สูงกว่าอีกด้วย ออกแรงกดอัดได้ถึง 5,000 ตัน แต่โดยทั่ว

ไปแล้วจะอัดด้วยความเร็วที่ช้ากว่าเครื่องกดอัดด้วยแรงกล แต่สำหรับการอัดในสโตรกสั้นๆ หรือ การกดอัดซ้ำก็สามารถปรับอัตราความเร็วขึ้นได้

#### ขั้นตอนการอัด

1. เต็มผงที่ผ่านกระบวนการผสมลงในโพรงของแม่พิมพ์
2. ที่ป้อนผงเลื่อนเข้าที่ หัวกดด้านบนเริ่มทำการกด
3. หัวกดด้านล่างทำการดันขึ้นพร้อมกับหัวกดด้านบนดันลง จนสุดระยะสโตรกสุดท้าย
4. หัวกดด้านบนยกขึ้น หัวกดด้านล่างดันขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์

ปริมาณการผลิตขึ้นส่วนผงวัสดุนั้น โดยทั่วไปทำการผลิตครั้งละ จำนวน 10,000 ชิ้น เพื่อเป็นการพอเหมาะในการตั้งแม่พิมพ์ จำนวนชิ้นงานที่ผลิตต่อเวลานั้น ขึ้นอยู่กับขนาด และ รูปร่างที่ซับซ้อนของชิ้นงาน โดยรูปร่างที่ธรรมดาอัตราการผลิตจะสูงถึง 30 ชิ้นต่อนาที โดยใช้ เครื่องแบบเพลลาข้อเหวี่ยง ส่วนแบบที่ใช้เครื่องไฮดรอลิกส์จะเป็นชิ้นงานขนาดใหญ่ ดังนั้นทำให้อัตราในการผลิตต่ำ คือ 10 ชิ้นต่อนาที ยิ่งชิ้นงานมีความซับซ้อนมากขึ้นอัตราการผลิตก็จะลดลง ในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นจะออกแบบการผลิตเพื่อการผลิตระยะยาว คือ 150,000 – 200,000 ชิ้น ซึ่งราคาของแม่พิมพ์ จะอยู่ที่ความซับซ้อนของชิ้นงาน ส่วนด้านค่าแรงนั้นจะถูก เนื่องจากสามารถใช้แรงไฝ่มือในส่วนการอัดขึ้นรูป และกระบวนการเผา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.7.2.3 การเผา (Sintering)

หลังจากที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้วชิ้นงานจะมีความแข็งแรงที่ไม่มากนัก ทำให้ง่ายต่อการแตกหักไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จะต้องผ่านขั้นตอนการเผา โดยการให้ความร้อนเพื่อที่จะให้อนุภาคของผงละลายติดกันเป็นพันธะ ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน การเผาจะตั้งอุณหภูมิการเผาที่ 70 – 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ โดยให้วัสดุอยู่ในสถานะของแข็ง (Solid – Phase Sintering) มีได้หลอมละลาย

ในระหว่างการเผา จะมีขั้นตอน การยึดเกาะกัน คือ

1. การจัดเรียงตัว (Rearrangement Shrinkage) เมื่อผงวัสดุเชื่อมประสานละลาย ผงวัสดุหลักจะเรียงตัวเป็นระเบียบใหม่ ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง
2. การซึมแพร่ (Diffusion) เป็นขั้นตอนที่ขอบผิวของอนุภาคมีลักษณะเยิ้มติดกับผิวสัมผัสของอนุภาคอื่น
3. การเกิดผลึกและเกรนโต (Re-crystallization and Grain Growth) จะเกิดขึ้นระหว่างส่วนสัมผัสกันของผงอัดเป็นแขนยึดโครงสร้าง (Lattice Structure)

บรรยากาศในเตาเผาจะถูกควบคุม เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน โดยลดปริมาณออกซิเจนในเตาเผาและช่วยในการระเหยสารสิ้นในชิ้นงาน ตามปกติบรรยากาศในเตาจะเป็นก๊าซเฉื่อย ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ และ แอมโมเนีย (ไฮโดรเจน 75 เปอร์เซ็นต์ กับไนโตรเจน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ลักษณะเตาที่ใช้เป็นเตาชนิดสายพาน (Mesh-Beltconveyors) มีสายพานตลอดความยาวของเตาเผา โดยการใส่ชิ้นงานเป็นแบบต่อเนื่อง ใส่ชิ้นงานทางด้านหน้า ชิ้นงานจะวิ่งตามสายพานออกมาทางด้านหลัง ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง เตาชนิดนี้ มีคุณสมบัติป้องกันก๊าซจากภายนอกได้ดี มีการตั้งอุณหภูมิการเผาได้หลายค่า อีกทั้งยังสามารถปรับความเร็วของสายพาน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิในการเผา

### 2.7.3 การประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ผงวัสดุผสม

1. แผ่นกรอง แผ่นกรองที่ทำจากโลหะผง จะมีความแข็งแรงและทนต่อแรงเสียดสีได้ดีกว่าแผ่นกรองที่ทำจากเซรามิกส์ และสามารถควบคุมสมบัติได้ถึง 80-97% สามารถกรองโลหะทั้งที่ร้อนและเย็น ส่วนมากใช้กรองโลหะพวก บรอนซ์ และนิกเกิล

2. ซีเมนต์คาร์ไบด์ ( Cemented carbides) คือผงของทั้งสแตนคาร์ไบด์ นำมาผสมกับผงโคบอลต์ แล้วอัดขึ้นรูปจะมีคุณสมบัติ คือ มีทั้งความแข็งและเหนียว เมื่อขึ้นรูปงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะต้อง



นำไปผ่านกรรมวิธีอบร้อน โดยใช้อุณหภูมิเหนือจุดหลอมของโคบอลต์ ทั้งนี้เพราะโคบอลต์เป็นตัวเกาะยึด คือโคบอลต์จะหลอมละลายเกาะยึดทั้งสแตนคาร์ไบด์ ผลที่ได้จาก ซีเมนต์คาร์ไบด์ เช่น ใช้ทำแบบแม่พิมพ์ มีดตัดต่าง ๆ

3. เกียร์ และ บีม ทำจากผงเหล็กผสมกับผงกราไฟต์ ผลิตผลจากวิธีนี้จะมีขนาดที่เที่ยงตรงแน่นอน และสามารถควบคุมขนาดต่าง ๆ ได้ หลังจากผ่านกรรมวิธีอบร้อน แล้วนำชิ้นงานไปแช่น้ำมัน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการหล่อลื่น

5. แปร่งถ่าน โดยมากผลิตมาใช้กับมอเตอร์ มีส่วนผสมของทองแดงและ แกรไฟต์และอาจมีตะกั่ว ดีบุกผสมอยู่ด้วยเพียงเล็กน้อย เพื่อประโยชน์ในการต้านทานต่อการสึกหรอแกรไฟต์ที่ผสมลงไป เพื่อต้องการทำให้สิ้น คุณสมบัติที่เด่นของผลกราไฟต์ในกรรมวิธีผงวัสดุ คือ ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ทนต่อความร้อนได้ดี

6. ปลอกแบริ่ง ส่วนมากทำมาจากผงทองแดง ดีบุก และแกรไฟต์ และอาจมีผงอื่น ๆ ผสมอีกเล็กน้อย เมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้ว ต้องนำไปผ่านกรรมวิธีอบร้อน เมื่อผ่านการอบร้อนแล้วก็นำไปตกแต่งให้ได้ขนาดแล้วนำไปแช่น้ำมัน การอบร้อนจะดูดน้ำมันเอาไว้ และนอกจากจะมีช่องว่างสำหรับดูดน้ำมันแล้วยังมีดีแกรไฟต์เป็นตัวหล่อลื่นอีกด้วย

7. แม่เหล็ก การทำแม่เหล็กให้เป็นแม่เหล็กถาวร โดยวิธีอัดผลวัสดุ จะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด เพราะว่ามีส่วนผสมของผงโลหะพวกเหล็ก อลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ เมื่อนำผงดังกล่าว มารวมกันอัดลงในแบบตามที่ต้องการ จะได้โครงสร้างที่ละเอียด และมีการเรียงตัวอย่างดีจนได้เป็นแม่เหล็กถาวร

8. ชิ้นส่วนในงานไฟฟ้า ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ใช้กับงานไฟฟ้าส่วนมาก ต้องการให้มีคุณสมบัติที่ทนต่อการสึกหรอและอาจจะใช้เป็นตัวนำที่ดี ซึ่งมีส่วนผสมของทั้งสแตนกับทองแดงทั้งสแตนกับโคบอลต์ ทั้งสแตนกับเงิน เงินกับโมลิบดีนัม และทองแดงกับนิกเกิล เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้ เช่น ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ หรือไฟฟ้ากระแสตรง หรืออาจจะนำไปใช้เกี่ยวกับงานด้านอื่น ๆ เช่น แผ่นคลัส จานเบรก ลวดเชื่อม เป็นต้น



## 2.8 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ชนิดคือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หรือที่บางครั้งเรียกว่าตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) หนึ่งตัว กับตัวแปรอิสระ (Independent Variable) หรืออาจเรียกว่าเป็นตัวแปรถดถอย (Regression Variable) อีกหนึ่งตัวหรือมากกว่า โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้จะอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และมีชื่อเรียกเฉพาะว่าสมการถดถอย (Regression Equation)

สมการถดถอยถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างจำนวนหนึ่ง ซึ่งบ่อยครั้งที่แหล่งที่มาของข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผนเอาไว้ก่อน (Unplanned Experiment) เช่นเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการสังเกตปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่อยู่นอกเหนือการควบคุม หรือเป็นข้อมูลบันทึกในอดีต แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์การถดถอยจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อนำมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองที่มีการออกแบบการทดลองไว้ก่อนล่วงหน้า (Designed Experiment) เพราะโดยทั่วไปแล้ว การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลจะเป็นเทคนิคที่ช่วยให้ผู้วิเคราะห์เห็นว่าปัจจัยใดบ้างที่มีความสำคัญ หรือส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองของการทดลอง ในขณะที่การวิเคราะห์การถดถอยจะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงปริมาณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านั้นกับตัวแปรตอบสนอง

การนำการวิเคราะห์การถดถอยไปใช้อย่างผิด ๆ เกิดขึ้นเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้าใจที่ผิดพลาดในเรื่องของการวิเคราะห์การถดถอยดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการนำการวิเคราะห์การถดถอยไปใช้ ผู้วิเคราะห์จะต้องคำนึงถึงสิ่งสำคัญดังต่อไปนี้

1. การนำการวิเคราะห์การถดถอยไปใช้เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งต่างๆ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่น่าจะมีความสัมพันธ์กันเลย ถึงแม้ว่ารูปแบบของความสัมพันธ์ที่ได้จะมีความเหมาะสมกับข้อมูลมากเพียงไรก็ตาม แต่ความสัมพันธ์นั้นก็จะไม่มีความหมายใด ๆ เลย และไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบของความสัมพันธ์ที่ได้นั้นไม่ตั้งอยู่บนเหตุและผลจึงไม่สามารถเชื่อถือได้

2. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยนั้น จะเป็นจริงและถูกต้องเฉพาะเมื่อตัวแปรถดถอยมีค่าอยู่ในช่วงของข้อมูล ที่นำมาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เท่านั้น การที่จะทำนายค่าของตัวแปรตาม จากค่าของตัวแปรถดถอยที่อยู่ภายนอกช่วงดังกล่าว จะทำให้ค่าของตัวแปรตามที่ได้มีความน่าเชื่อถือน้อยลง เนื่องจากข้อสมมติเกี่ยวกับรูปแบบ ของความสัมพันธ์ที่อยู่นอกช่วงดังกล่าวมีความไม่แน่นอน

ในการทดลองบางอย่างรูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ อาจจะเป็นที่ทราบอย่างแน่ชัดแล้วแต่ในการทดลองส่วนใหญ่ ผู้ทดลองจะไม่ทราบรูปแบบของความสัมพัทธ์นั้นอย่างแน่ชัด ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของผู้วิเคราะห์ ที่ต้องหาฟังก์ชันที่จะใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด จากกลุ่มของข้อมูล ที่นำมาวิเคราะห์

รูปแบบของสมการถดถอยแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ใหญ่ ๆ คือ

1. Simple Linear Regression ได้แก่ สมการถดถอยที่แสดงถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัว กับตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัว ซึ่งมีแบบจำลองของความสัมพัทธ์เป็นดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (2.10)$$

เมื่อ  $y =$  ตัวแปรอิสระ  
 $x =$  ตัวแปรตอบสนอง

2. Multiple Linear Regression ได้แก่ สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวกับตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัว โดยมีแบบจำลองความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.11)$$

3. Other Linear Regression ได้แก่สมการถดถอยที่มีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นแบบอื่น เช่น ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล ดีกรี k ของของตัวแปรอิสระ และตัวแปรตอบสนองเพียงตัวแปรเดียว ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_k x^k + \epsilon \quad (2.12)$$

หรือความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 ของตัวแปรตอบสนอง 2 ตัว ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (2.13)$$

ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ในรูปแบบเหล่านี้ จะใช้วิธีการเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเส้นตรงก่อน แล้วจึงใช้วิธีการหาความสัมพันธ์แบบอื่น ๆ เพื่อหาสมการถดถอยอีกที่เหมาะสม

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ศุภชัย วงศ์พิเชษฐชัย (1999)

ได้ทำการผลิตวัสดุที่ใช้ในการทำตาเทียม 3 วิธี คือ sHA bHA และ cHA แต่สำเร็จเพียง bHA สามารถฝังให้กับผู้ป่วยได้จำนวน 21 คน ในการขึ้นรูป sHA จะเป็นการขึ้นรูปทางปฏิกิริยาเคมีบริสุทธิ์ แต่ไม่มีรูพรุน ส่วน cHA จะต้องมีการเปลี่ยนปะการังโดยเครื่องอัดความดันและอุณหภูมิสูงให้เป็น Coralline Hydroxyapatite เครื่องอัดความดัน (Reactor) ถ้าสั่งจากต่างประเทศจะมีราคาแพงมาก จำต้องออกแบบและสร้างขึ้นเองแต่ยังไม่สามารถทำงานได้ ส่วน bHA จากการเผากระดูกวัว ที่มีรูพรุน ที่  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  8 ชม. และ  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  8 ชม. ทำให้ได้วัสดุที่มีรูพรุน  $500\text{ }\mu\text{m}$  มีความบริสุทธิ์จากสารปนเปื้อนอยู่น้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์เป็นที่ยอมรับได้ แล้วทำการทดลองฝังในกระต่าย 2 ตัว เมื่อเวลาผ่านไป 3 เดือน พบว่าไม่มีปฏิกิริยาต่อต้านวัสดุ bHA และยังมีกรงอกของเส้นเลือดเข้าไปในลูกตาเทียม จากนั้นทำการฝังลูกตาเทียม bHA ให้ผู้ป่วยจำนวน 21 คน ณ โรงพยาบาลพระมงกุฎเกล้า ตาเทียมสามารถเคลื่อนไหวได้ ผู้ป่วยมีความรู้สึกทางจิตใจดีขึ้น ความมั่นใจในการทำงานมากขึ้นจากการกรอกแบบสอบถาม แต่ยังไม่สามารถผ่าตัดครั้งที่ 2 เจาะใส่เปลือกตาปลอมแบบมีก้านเสียบเพื่อให้มีความสวยงามยิ่งขึ้นได้ เพราะ bHA เปราะมาก เมื่อเจาะทำให้วัสดุ bHA แตก ส่งผลให้ก้านเสียบเอียง กำลังอยู่ในขั้นพัฒนา cHA ต่อแต่โครงการวิจัยได้หมดเวลาลงเสียก่อน

- **กนกอร อมรภิญโญ และเหลือองอุไร เสนะวัตติ (1995)**

เป็นโครงการวิจัยที่ทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงกลของสารเซรามิกส์ไฮดรอกซีแอบาไทต์โดยแบ่งนี้หาออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกจะเป็นการหาคูณสมบัติทางกายภาพของสารด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) วิธีการของอะคิมิดีส (Archimedes Method) และการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบคูณสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวกับค่าความแข็ง และความเหนียวโดยวิธีอินเดนเทนชัน ซึ่งจากผลการทดลองในส่วนแรกทำให้สามารถแยกสารเซรามิกส์ไฮดรอกซีแอบาไทต์ได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดแรก (TP 55) ลักษณะไม่สมบูรณ์ (Not Well Crystalline) และชนิดที่ 2 (TP 120) ลักษณะผลึกสมบูรณ์ (Well Crystalline) จากการทดลองส่วนที่ 2 ซึ่งได้จากการวัดขนาดรอยตกค้างจากหัวกด Vicker และ Knoop ทำให้สามารถหาความแข็ง และค่าโมดูลัสของยังของสารเซรามิกส์ไฮดรอกซีแอบาไทต์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ TP 55 มีความแข็ง  $0.70 \pm 0.01\text{ GPa}$  ค่าโมดูลัสของยัง  $20.23 \pm 3.80\text{ GPa}$  และค่าของ TP 120 มีความแข็ง  $5.63 \pm 0.35\text{ GPa}$  ค่าโมดูลัสของยังมีค่า  $182.87 \pm 12.6\text{ GPa}$  และจากการทดสอบความแข็งแรง (Strength Test) ทำให้สามารถคำนวณความ

ต้านทานการเกิดการยืดออกของสายร้าว หรือความเหนียว ( $K_{Ic}$ ) คือ TP 55 มีค่า  $0.27 \pm 0.03$  MPa mm<sup>1/2</sup> และ TP 120 มีค่า  $0.60 \pm 0.07$  MPa mm<sup>1/2</sup>

- A.S. Ribeiro, P.B. Malafaya and R.L. Reis (1998)

เป็นงานวิจัยที่ศึกษาถึงกรรมวิธีการขึ้นรูปวัสดุเซรามิกส์ทางการแพทย์ที่มีรูพรุน โดยนำเสนอวิธีการขึ้นรูป 2 กรรมวิธีคือ ใช้โพลิเมอร์ที่ผลิตจากยูรีเทน (PU) นำไปอบที่เตาอุณหภูมิสูงเพื่อสลายโพลิเมอร์เป็นการสร้างรูพรุน และอีกวิธีหนึ่งใช้แป้งข้าวโพด โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไพโรฟอโรเฟต อบด้วยเตาไมโครเวฟ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ คือชิ้นงานจากกรรมวิธีที่ 1 มีขนาดรูพรุน 600 – 1200  $\mu\text{m}$  และมีรูเล็กเชื่อมต่อระหว่างรูใหญ่ 3 – 5  $\mu\text{m}$  มีความหนาแน่น 0.3 ส่วนกรรมวิธีที่ 2 มีขนาดรูพรุน 5 – 20  $\mu\text{m}$  ความหนาแน่น 0.4 – 0.7 g/cm<sup>3</sup> ค่าโมดูลัสของยัง 0.525 GPa ความแข็งแรงกด 54 MPa

- Ichiro Ono, Tohur Tateshita, Masayuki Inoue and Yoshinori Kuboki (1998)

เป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุทางการแพทย์โดยการทดลองขึ้นรูปของส่วนผสมระหว่าง HA กับ BMP ชนิด rhBMP-2 (เป็นวัสดุที่ผลิตจากกรรมวิธีพันธุวิศวกรรม) เมื่อทำการขึ้นรูปแล้วได้ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติเชิงกล และมีการทดลองฝังเข้าร่างกายกระต่ายเป็นเวลา 3, 6 และ 9 สัปดาห์ เพื่อศึกษาการเกิดของเนื้อเยื่อ ผลจากการทดลองวัสดุที่ขึ้นรูปแล้วมีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 70 % ขนาดความพรุน 50 – 500  $\mu\text{m}$  ความแข็งแรงดัดก่อนฝังในกระต่าย  $30.2 \pm 2.7$  kg/cm<sup>2</sup> ความแข็งแรงอัด  $28.3 \pm 1.4$  kg/cm<sup>2</sup> หลังจากฝังในกระต่ายแล้ววัสดุมีเนื้อเยื่อยึดเกาะ และไม่มีปฏิกิริยาต่อต้านจากร่างกายของกระต่าย

- L.M. Rodriguez – Lorenzo, J.M.F. Ferreira and M. Vallet – Regf (1998)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงดัด ต่อปริมาณความพรุนของชิ้นงานตัวอย่าง HA ชิ้นงานตัวอย่างได้จากกรรมวิธีการผสมแป้งเพื่อทำให้เกิดรูพรุน โดยกำหนดความพรุนให้อยู่ในช่วง 45 – 69 % การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างเริ่มจากการสังเคราะห์สาร HAs แล้วเผาที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาบดด้วย Ball Mill ผงแป้งที่ใช้เตรียมให้มีขนาด 55  $\mu\text{m}$  นำผงแป้งผสมกับผง HA ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของแข็ง ลงในสารละลายแอมโมเนียโพลิคาร์บอเนต บดด้วยเครื่อง Stirrer เมื่อขึ้นแล้วเทลงในแม่พิมพ์ที่ทำมาจาก

พลาสติก (Slip) จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปเผาเพื่อสลายแป้งที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วนำไป Sintering ต่ออีกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนมากขึ้นความแข็งแรงดัดจะลดลง โดยที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำสุด 45 % มีความแข็งแรงดัด 15 MPa เปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงสุด 60 % ซึ่งมีความแข็งแรงดัดที่ 2 MPa

- J.D. Santos, S. Morrey, G.W. Hastings and F.J. Monteiro (1991)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุทั้งคุณสมบัติทางด้านเคมี และฟิสิกส์ ของวัสดุ HA โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดผงวัสดุ (P/M) โดยมีกรรมวิธีการขึ้นรูป 2 วิธีคือ ใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกส์อัดลงในแม่พิมพ์ด้วยแรงกดอัด 19 MPa และอีกวิธีหนึ่งใช้เครื่องอัด Isostatic ที่แรงอัด 100 MPa ผงที่ใช้ในการทดลองคือ P-120 ผลจากการทดลองด้วยเครื่อง XRD ปรากฏว่าผง P-120 เป็นสาร HA มีขนาดอนุภาค 5 – 6  $\mu\text{m}$  จากการทดลองยังพบอีกว่าเมื่ออุณหภูมิการ Sintering เพิ่มขึ้นที่ 1200 – 1350 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มจาก 450 – 500 HV คงที่ที่ 500 HV ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส สำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Isostatic ส่วนการขึ้นรูปด้วยเครื่องไฮดรอลิกส์ อยู่ในช่วง 250 – 480 HV และเริ่มคงที่ที่ 480 HV ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส



- Kazuo Yagi, Masataka Tokuda, Keijou Suzuki and Hiroshi Yoshidome (1999)

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการขึ้นรูปวัสดุ HAp โดยผสมกับ Tyranno เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง การขึ้นรูปขึ้นงานเริ่มตั้งแต่การสังเคราะห์ HA โดยกรรมวิธีปฏิกิริยาทางเคมี จากสูตร  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_3\text{PO}_3 \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{HO})_2$  ที่ความเข้มข้น 1.5 mol บดให้ได้ขนาด  $10 \mu\text{m}$  ผสม Tyranno fiber ขนาด 1 มิลลิเมตร ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การทดแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คืออัดผง แล้ว Sintering ที่อุณหภูมิ 900 1100 และ 1300 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนอีกการทดลองหนึ่งคือ อัดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Hot Press ที่อุณหภูมิ แล้ว Sintering ภายใต้บรรยากาศในเตาชนิดต่างๆ คืออากาศ สูญญากาศ และไนโตรเจน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงตารางผลการทดลองความแข็งแรงดัด ของการทดลองที่ 1

อุณหภูมิ (°C)	ความแข็งแรงดัด (MPa)	
	1 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง
900	11.62	11.71
1100	18.16	13.95
1300	29.60	33.49

ตารางที่ 2.2 แสดงตารางผลการทดลองความแข็งแรงดัด ของการทดลองที่ 2

บรรยากาศในเตา	ความแข็งแรงดัด (MPa)	
	1 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง
อากาศ	59.16	40.67
สูญญากาศ	38.58	42.66
ไนโตรเจน	40.10	40.10

- Piquet R (2000)

เป็นการศึกษากระบวนการเจาะแผ่น Corbon / Epoxy โดยใช้ดอกสว่านแบบ 2 ทาง (Twist) เนื่องจากกรรมวิธีการเจาะเดิมที่ได้ ไม่ได้ขนาด มีคืบมากบริเวณปากรูเจาะ และผิวที่ได้จากการเจาะไม่เรียบ จากการทดลองหาวิธีการแบบต่างๆมาใช้ในการเจาะสามารถทำให้การเจาะแม่นยำยิ่งขึ้น คืบที่เกิดลดน้อยลง และผิวของรูที่เจาะเรียบมากขึ้น

- Helen Iew, Dong H. Shin, Sang Y. Lee and Seong J. Kim (1999)

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการเกิดไขกระดูก (Bone Marrow) ในเบ้าตา กระต่ายโดยการฝัง cHA ด้วยการผ่าตัดแบบควักลูกตา (Evisceration) ในการทดลองจะใช้กระต่ายจำนวน 10 ตัว และลูกตาเทียมขนาด 12 มิลลิเมตร ใช้ระยะเวลาในการทดลอง 20 สัปดาห์ จากนั้นผ่าออกแล้วศึกษาการเปลี่ยนแปลง จากการทดลองพบว่ารูพรุนในลูกตาเทียมมีเนื้อเยื่อ และเกลือแคลเซียมแทรกอยู่ทั่วไปนอกจากนี้แล้วยังพบไขกระดูกที่เกิดขึ้นใหม่ และเนื้อเยื่อที่มีส่วนประกอบของไขมันเป็นหลัก การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาของร่างกายไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่นแต่อย่างใดช่วย

- Sakurai K , Adachi K, Kawai G, Sawai T and Ogawa K (2000)

เป็นการศึกษาการเจาะที่มีความเร็วรอบสูงสิ่งที่สนใจในวัสดุตัดนั้นจะต้องมี อัตราการป้อนสูง ใช้วัสดุตัดอลูมิเนียมอัลลอย A1050, A2012 และ A6061 โดยการเคลือบ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ได้ เจาะที่ 1500 rpm ทำการทดลองปรับค่า อัตราการป้อนมีด (f) ความเร็วตัด (V) แล้ววิเคราะห์การสึกของดอกเจาะ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เศษวัสดุที่เกิดจากการตัด จากการวิเคราะห์การสึกหรอของดอกสว่านพบว่า ที่อัตราการป้อนสูงสุด วัสดุ A1050 ไม่เหมาะสม ส่วน A6061 กลับใช้ได้ดีกว่า

- LinTR, ShyuRF (2000)

เป็นการศึกษาตัวแปรอัตราการป้อนในการ Machining มีผลต่ออายุวัสดุในการตัด การเกิดเสียงดังมากและทำให้การขึ้นรูป M/C ยากในรายงานจะเป็นการทดลองโดยใช้วัสดุเคลือบผิวดอกสว่าน 4 ชนิด คือ Tin Ticn CrN และ TiALN ผลของการทดลอง พบว่าที่อัตราการป้อน  $f = 0.6 \text{ mm/rev}$  ทำให้มีอายุการใช้งานของวัสดุตัดนานที่สุด หรือมีรอยสึกของมีดตัดน้อยที่



สุดท้ายวัสดุ Tin เคลือบ และ TiCN เคลือบจะมีการสึกหรอมากกว่า CrN เคลือบ และ TiALN เคลือบ เมื่อทำการเจาะสแตนเลสสตีล (Stainless Steel)จากรายงานนี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุเคลือบมีผลต่อการสึกหรอของมีดตัด

- Davim JP (2000)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับการสึกหรอของมีดตัด โดยใช้ Polycrystalline diamond (PCD) เป็นมีดตัด และใช้ A356/80-SiDp-t6 (อลูมิเนียม 7% ซิลิกอน 0.4 % และ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 20%) การทดลองจะทำการกลึงและเจาะ การวัดแรงจะใช้ Dynamometers การสึกหรอของมีดจะใช้เวลาเป็นตัววัดแล้วทำการวิเคราะห์โดยสแกนไมโครสโคป (SME) การทดสอบจะเป็นการหาค่าความสอดคล้องระหว่าง คมมีดตัด อัตราการป้อนมีด ความลึกในการตัด จากผลการทดลองสามารถนำไปทำนายการสึกหรอของมีดตัดได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 แสดงตารางสรุปกรรมวิธีการขึ้นรูป และคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน

ผู้ทดลอง	กรรมวิธีการขึ้นรูป	ชื่อย่อในการทดลอง	คุณสมบัติทางกายภาพ			คุณสมบัติเชิงกล			
			% P (%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Pour Size (µm)	Hardness (HV)	Bending (MPa)	Compressive (MPa)	Modulus (GPa)
ศุภชัย (1999)	เปลี่ยนกระดูกวัวเป็น HA โดยการเผา	bHA	-	0.49	600	156	-	203 ± 13	-
กนกพร (1995)	อัดขึ้นรูปผงกระดูก Sintering ที่ 1200 °C	TP55	39.75 ± 0.46	1.76 ± 0.01	-	70 ± 1	-	-	20.23 ± 3.8
		TP120	4.4 ± 0.4	2.96 ± 0.01	-	56.3 ± 0.35	-	-	182.87 ± 12
A. S. Ribeiro (1998)	ใช้การหล่อโดยมี โพรยูดีเทน เป็นตัวสร้างรูพรุน	-	-	0.3	600-1200	-	-	-	-
	ใช้การหล่อโดยมี แป้ง เป็นตัวสร้างรูพรุน	-	-	0.4-0.7	5-20	-	-	64	0.53
Ieniro Ono (1998)	ใช้ผง HA ผสมกับ rhBMP-2 (วัสดุทางพันธุวิศวกรรม)	-	70	-	50-500	-	3.02 ± 0.27	2.83 ± 0.14	-

ตารางที่ 2.3 ต่อ แสดงตารางสรุปกรรมวิธีการขึ้นรูป และคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน

ผู้ทดลอง	กรรมวิธีการขึ้นรูป	ชื่อย่อในการทดลอง	คุณสมบัติทางกายภาพ			คุณสมบัติเชิงกล			
			% P (%)	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Pour Size (μm)	Hardness (HV)	Bending (MPa)	Compressive (MPa)	Modulus (GPa)
L.M. Rodriguez – Lorenzo (1998)	ใช้กรรมวิธีการหล่อโดยผสมเบ้ง 50 %ของปริมาตรของเซิง เป็นตัวทำให้เกิดรูพรุน Sintering ที่ 1100 °C	-	40	-	80	-	15	-	-
J.D. Santos (1991)	อัดขึ้นรูปผง HA ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่ความดัน 19 MPa Sintering ที่ 1200-1350 °C	UP 1300 °C	-	-	-	550	-	-	-
	อัดขึ้นรูปผง HA ด้วยเครื่องอัด Isostatic ที่ความดัน 100 MPa Sintering ที่ 1200-1350 °C	IP 1300 °C	-	-	-	480	-	-	-

### บทที่ 3

#### การดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาการเจาะวัสดุเปราะชนิดที่มีรูพรุนนี้ ในงานวิจัยใช้วัสดุ Hydroxyapatite (HA) โดยทำการศึกษาและทำการขึ้นรูปเอง โดยใช้การสังเคราะห์สารตั้งต้นด้วยวิธีการทางปฏิกิริยาทางเคมี (Synthesis) การขึ้นรูปขึ้นงานใช้กรรมวิธีอัดผงลงในแม่พิมพ์ แล้วนำไปเผาเพื่อให้อนุภาคของผงเชื่อมติดกัน (Sintering) จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ แล้วจึงทดสอบแรงในการเจาะ

โดยมีขั้นตอนในการศึกษาวิจัยทั้งหมดดังต่อไปนี้

1. เตรียมชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)
  - 1.1 การสังเคราะห์ผง Hydroxyapatite HA
  - 1.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน Hydroxyapatite HA
    - 1) ส่วนผสม HA กับ แป้ง
    - 2) แรงในการอัดขึ้นรูป
    - 3) อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผา
2. ตรวจสอบคุณสมบัติของผง Hydroxyapatite (HA) ที่สังเคราะห์ และผงแป้ง
  - 2.1 ตรวจสอบเฟสของสารโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
  - 2.2 ตรวจสอบขนาดอนุภาค Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง
  - 2.3 ตรวจสอบลักษณะ และรูปทรงของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง
3. ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)
  - 3.1 ทดสอบความหนาแน่นบัลค์
  - 3.2 ทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน
  - 3.3 ศึกษาขนาด และลักษณะของรูพรุน
4. ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)
  - 4.1 ทดสอบความแข็ง
  - 4.2 ทดความแข็งแรงดัด และโมดูลัส
5. ทดสอบแรงดัน และแรงบิดของการเจาะวัสดุ

5.1 ทดสอบแรงดัน Thrust Force (N)

5.2 ทดสอบแรงบิด Torque (N.mm.)

6. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิด

6.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับปัจจัยควบคุมการเจาะ และคุณสมบัติชิ้นงาน

6.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติชิ้นงาน

6.4 การเปรียบเทียบแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุปะการัง

7. วิจารณ์ผลการทดลอง

8. สรุปผลการทดลอง และเสนอแนะ

### 3.1 การเตรียมชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)

ในการเตรียมชิ้นงานที่จะนำมาใช้ในการทดลองใช้วัสดุ HA โดยวัสดุ HA ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นเองด้วยกรรมวิธีปฏิกิริยาทางเคมี ใช้กรรมวิธีขึ้นรูป โดยอัดผง HA ลงในแม่พิมพ์ แล้วนำไปเผา Sintering

ขั้นตอนการสังเคราะห์ผง HA และขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน มีดังต่อไปนี้

1. การสังเคราะห์ผง Hydroxyapatite (HA)

2. การขึ้นรูปชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)

#### 3.1.1 การสังเคราะห์ผง Hydroxyapatite (HA)

ในการเตรียมผงวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้น มีขั้นตอนในการจัดเตรียม อยู่หลายขั้นตอนดังจะได้อธิบายเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 3.1.1.1 วัสดุ และอุปกรณ์

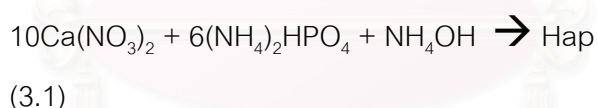
วัสดุ และอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ HA สำหรับการศึกษาวิจัยนี้คือ

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทางเคมีทั่วไป เช่น บีกเกอร์ แท่งแก้ว ช้อนตัก สาร ขวดหยดสารเคมี กระจกทรงกรวย กรวยกรวย ฯลฯ

2. เครื่องชั่งน้ำหนัก
3. เครื่องกวนสารเคมี
4. ตู้ดูดกลิ่น
5. เตาอบอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส
6. บีกเกอร์
7. เครื่องปั่น
8. สารเคมี
  - 8.1  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
  - 8.2  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$
  - 8.3  $\text{NH}_4\text{OH}$

### 3.1.1.2 วิธีการสังเคราะห์สารประกอบ Hydroxyapatite (HA)

ในการสังเคราะห์จะใช้กรรมวิธีปฏิกิริยาทางเคมี จากสูตร



โดยมีขั้นตอนในการทำการสังเคราะห์ จากสูตรเคมีในสมการที่ 3.1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวณน้ำหนักสารเคมีที่ต้องการเตรียมตามสมการที่ (3.1)
2. ชั่งน้ำหนักสารเคมีตามที่คำนวณได้
3. เติมน้ำเพื่อละลายสาร  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  โดยมีความเข้มข้น 1 โมลาร์ นำไปกวนในเครื่องกวนสาร
4. เติมน้ำเพื่อละลายสาร  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + \text{NH}_4\text{OH}$  โดยมีความเข้มข้น 1 โมลาร์ คนด้วยแท่งแก้วจนละลายหมด ใส่ในขวดหยดสารให้หยดลงในสารละลายในข้อ 3



5. กวนเครื่องพร้อมทั้งเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ในตู้ดูดกลิ่น 1 ชั่วโมง
6. ปิดเครื่องกวนทิ้งสารให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง
7. กรองสารที่ได้ในข้อ 6 โดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศช่วยในการกรอง
8. นำสารที่กรองได้เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อทำการไล่น้ำ ประมาณ 5 ชั่วโมง
9. ปั่นด้วยเครื่องปั่นเพื่อทำให้สารที่ได้เป็นผง

### 3.1.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)

ในการขึ้นรูปชิ้นงานจะใช้กรรมวิธีอัดผง แล้วนำไปเผาเพื่อให้อนุภาควัสดุเชื่อมติดกัน Sintering โดยมีผงแป้งเป็นตัวทำให้เกิดรูพรุน ในงานวิจัยจะทำการขึ้นรูปเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ โดยมีการปรับระดับปริมาณแป้ง และแรงในการอัดขึ้นรูป

อุปกรณ์ และกรรมวิธีในการขึ้นรูปชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA) มีดังต่อไปนี้

#### 3.1.2.1 วัสดุ และอุปกรณ์

วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน สำหรับงานวิจัยนี้ คือ

1. ผง HA ที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นเอง
2. ผงแป้งข้าวเจ้า
3. น้ำกลั่น
4. ชุดแม่พิมพ์ ขนาดของโพรง  $\phi 25 \times 50$  มิลลิเมตร
5. เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก
7. เครื่องปั่น
8. เครื่องทดสอบความแข็งแรง ของ Hounsfield Test Equipment.,

Ltd. รุ่น H10K-C



### 3.1.2.2 กรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน

วิธีการในการเตรียมขึ้นรูปชิ้นงาน HA สำหรับการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติของวัสดุ โดยการขึ้นรูปชิ้นงานต้องให้ชิ้นงานคุณสมบัติวัสดุ ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ในแต่ละระดับมีจำนวนชิ้นงาน 15 ชิ้น เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติด้านต่างๆ และทดสอบแรงในการเจาะ โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

#### 1) ส่วนผสมระหว่างผง HA กับผงแป้ง

ในการขึ้นรูปจะผสมแป้งเพื่อทำให้เกิดรูปทรง ปริมาณแป้งที่ผสมจะเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ตัวอย่างการคำนวณส่วนผสมแสดงใน ภาคผนวก ก ส่วนผสมที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงส่วนผสมที่ใช้การขึ้นรูปวัสดุ HA ชนิดมีรูปทรง

ชื่อวัสดุ	จำนวนชิ้นงาน (ชิ้น)	น้ำหนัก HA (g)	น้ำหนักแป้ง (g)
100 %HA	15	105	0
1%แป้ง	15	103.95	0.701
5%แป้ง	15	99.75	3.502

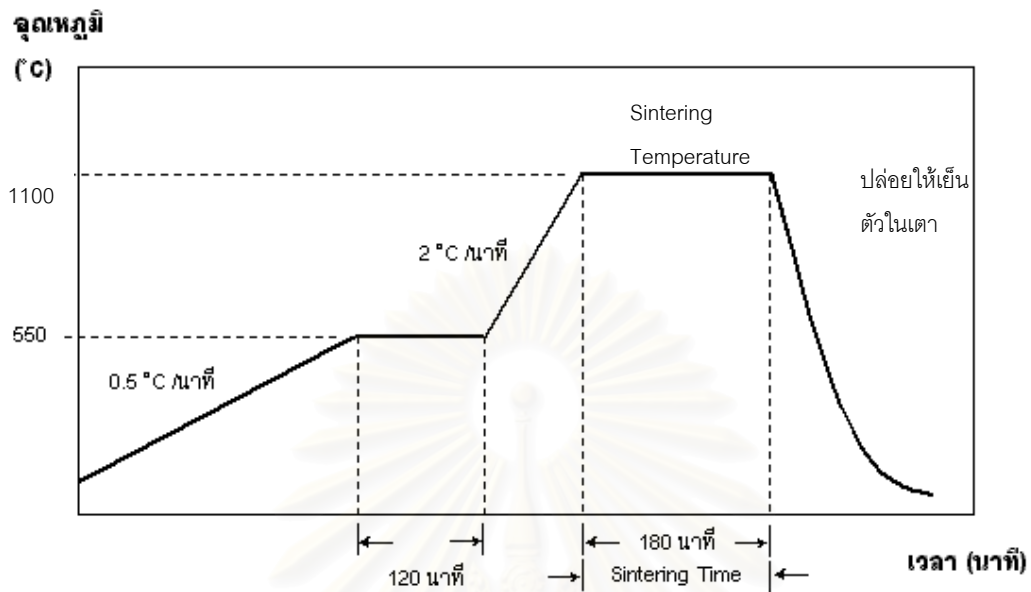
#### 2.) แรงในการอัดขึ้นรูป

เมื่อผสมผง HA กับผงแป้ง แล้วนำเข้าแม่พิมพ์เพื่อทำการอัด โดยแบ่งแรงในการอัดขึ้นรูปออกเป็น 2 ระดับด้วยกันคือ 2 MPa ใช้สำหรับชิ้นงาน 1 กับ 5 เปอร์เซ็นต์แป้งโดยปริมาตร และ 10 MPa สำหรับชิ้นงาน 100 เปอร์เซ็นต์ HA

#### 3.) อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผา

หลังจากที่ทำการอัดแล้ว นำชิ้นงานเข้าเตา เพื่อทำการเผาให้อุณหภูมิวัสดุเชื่อมติดกัน Sintering ใช้อุณหภูมิในการเผา 550 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อสลายแป้งแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 1100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 5 °C/min ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัว

ในเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน วัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน

ในการขึ้นรูปวัสดุขึ้นงาน HA จะมีวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 3 ระดับด้วยกัน ดังจะสรุปได้จากตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางสรุปสภาวะในการขึ้นรูปขึ้นงาน HA

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อวัสดุ	จำนวน (ชิ้น)	ปริมาณแป้ง (%โดยปริมาตรของ แข็ง)	แรงอัด (MPa)	อุณหภูมิเผา (°C)	ระยะเวลา เผา (ชั่วโมง)
100%HA 10MPa	15	0	10	1100	3
1%แป้ง 2MPa	15	1	2	1100	3
5%แป้ง 2MPa	15	5	2	1100	3

### 3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของผง Hydroxyapatite (HA) ที่สังเคราะห์ และผงแป้ง

เมื่อทำการสังเคราะห์ผง HA แล้วต้องตรวจสอบสารที่ได้ว่าเป็น สารประกอบ Hydroxyapatite หรือไม่ ตลอดจนตรวจสอบถึงขนาด และรูปร่างของผงที่ได้จากการสังเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบผง HA และผงแป้ง ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบเฟสของสารโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
2. ตรวจสอบขนาดอนุภาค Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง
3. ตรวจสอบรูปร่างของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง

#### 3.2.1 การตรวจสอบเฟสของสารโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เพื่อตรวจเฟส และหมู่ของสาร HA โดยการตรวจสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงสัมพัทธ์กับมุม  $2\theta$  แล้วทำการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน และตารางตรวจเฟสมาตรฐานของสาร HA งานวิจัยนี้ได้ส่งผง HA ไปตรวจสอบยังเครื่อง Philip X-ray diffractometer ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.2.2 การตรวจสอบขนาดอนุภาคผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง

หลังจากที่สังเคราะห์ผง HA เสร็จแล้วจะนำผงที่ได้ประมาณ 2 – 3 กรัม ส่งตรวจหาขนาดอนุภาค ในงานวิจัยนี้ได้จัดส่งตัวอย่างตรวจสอบที่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.2.3 การตรวจสอบรูปร่างของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง

การศึกษาลักษณะรูปร่าง ในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ในงานวิจัยนี้จะจัดส่งผง HA และผงแป้งตรวจด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของบริษัท Jeol Co., Ltd รุ่น JSM – 6400 ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยโรยผงติดกับแท่นทองเหลือง (Stud) นำไปฉายด้วยทอง แล้วจึงนำเข้าช่องที่กล้อง SEM เลือกตำแหน่ง และกำลังขยายที่ต้องการเพื่อถ่ายภาพ เมื่อถ่ายภาพแล้วนำภาพไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากการเผา มีดังต่อไปนี้ คือ

1. ความหนาแน่นบัลค์
2. เปอร์เซ็นต์ความพรุน
3. ขนาด และลักษณะของรูพรุน

#### 3.3.1 การทดสอบความหนาแน่นบัลค์

การทดสอบความหนาแน่นบัลค์ในงานวิจัยจะทำการหาโดย วัดขนาดชิ้นงาน แล้วคำนวณหาค่าปริมาตร เปรียบเทียบกับน้ำหนักชิ้นงาน (ชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้ว)

#### 3.3.2 การทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน

นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผา และเย็นตัวในอากาศแล้วมาทำการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน (%Porosity) ในงานวิจัยนี้จะใช้การหาตามมาตรฐาน ASTM – Designation : C372 – 72 (1982) มีอุปกรณ์ และกรรมวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

##### 3.3.2.1 วัสดุ และอุปกรณ์

วัสดุ และอุปกรณ์ในการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน มีดังต่อไปนี้

- 1.) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผา
- 2.) เส้นลวดถักเป็นตะแกรงใส่ชิ้นงาน
- 3.) บีกเกอร์ขนาด 100 ml
- 4.) เตาดัมน้ำ
- 5.) น้ำกลั่น

- 6.) เตาอบ 200 องศาเซลเซียส
- 7.) เครื่องชั่งน้ำหนัก

### 3.3.2.2 กรรมวิธีการทดสอบ

กรรมวิธีการทดลองหาค่าความพรุนตัว (%Prosity) ของชิ้นงานภายหลังการเผา มีดังต่อไปนี้

- 1.) นำชิ้นงานมาทำการต้มในน้ำกลั่นจนเดือด เป็นเวลา 1 ชม.
- 2.) แลชิ้นงานในน้ำต้มแล้ว 24 ชั่วโมง
- 3.) นำมาชั่งน้ำหนักโดยแขวนตัวอย่างอยู่ในน้ำ (S)
- 4.) นำชิ้นตัวอย่างมาเช็ดด้วยผ้าเปียก ให้ผิวแห้งหมาดๆ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักโดยแขวนตัวอย่างในอากาศ (M)
- 5.) นำชิ้นตัวอย่างไปอบในเตาที่ 110 °C 24 ชม.
- 6.) ชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นตัวอย่างโดยแขวนอยู่ในอากาศ (D)
- 7.) นำค่าที่ได้คำนวณจากสมการที่ 3.2

สูตรที่ใช้ในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน (%Prosity)

$$\% P = \frac{100 \times (M - D)}{M - S} \quad (3.2)$$

เมื่อ	%P	=	เปอร์เซ็นต์ความพรุน %Prosity (%)
	D	=	น้ำหนักชิ้นงานหลังออกจากเตาอบ (g)
	M	=	น้ำหนักชิ้นงานเปียกหลังเช็ดด้วยผ้าเปียก (g)
	S	=	น้ำหนักชิ้นงานชั่งในน้ำ (g)

### 3.3.3 การศึกษาขนาด และลักษณะของรูพรุน

การศึกษาขนาด และลักษณะรูพรุนในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบขนาด และลักษณะรูพรุนของการขึ้นรูปในแบบต่างๆ

ในงานวิจัยนี้จะจัดส่งตรวจด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของบริษัท Jeol Co., Ltd รุ่น JSM – 6400 ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬา

ลงกรรมมหาวิทยาลัย ขึ้นงานก่อนส่งตรวจกัดด้วยกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) ความเข้มข้น 5 % ติดขึ้นงานกับแท่นทองเหลือง (Stud) นำไปฉาบด้วยทอง แล้วจึงนำเข้าไปส่องด้วยกล้อง SEM เลือกตำแหน่ง และกำลังขยายที่ต้องการเพื่อถ่ายภาพ เมื่อถ่ายภาพแล้วนำภาพไปทำการวิเคราะห์หาขนาดรูพรุน และลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้น ขึ้นงานที่นำไปตรวจสอบมีสภาวะในการขึ้นรูปดังต่อไปนี้

1. แรงอัดขึ้นรูป 2 MPa 1% แบ่ง อุณหภูมิเผา 1100 องศาเซลเซียส
2. แรงอัดขึ้นรูป 2 MPa 5% แบ่ง อุณหภูมิเผา 1100 องศาเซลเซียส
3. แรงอัดขึ้นรูป 10 MPa 100% HA อุณหภูมิเผา 1100 องศาเซลเซียส
4. ปะการัง (Coralling)

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของขึ้นงาน Hydroxyapatite (HA)

ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุขึ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนในงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกล ดังต่อไปนี้คือ

1. ความแข็ง
2. ความความแข็งแรงดัด และโมดูลัส

#### 3.4.1 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งในงานวิจัยนี้จะเป็นการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker) วัสดุหัดกดเป็นเพชร ขึ้นงานที่วัดความแข็งจะเป็นขึ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผามาแล้ว การทดลองจะทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละขึ้นงาน

##### 3.4.1.1 วัสดุ และอุปกรณ์

วัสดุ และอุปกรณ์ในการทดสอบความแข็งในงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

1. ขึ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว ขนาด  $\phi 20 \times 8$  มิลลิเมตร
2. กระดาษทรายเบอร์ 600, 1000 และ 1200
3. ปากกาหมึกซึม
4. เครื่องขัดขึ้นงาน (Polisher)
5. เครื่องกดหัดกดวิกเกอร์ (Zwick 3212 indenter)

6. เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)
7. เตาอบ

### 3.4.1.2 กรรมวิธีการทดสอบ

ในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้  
นี้ คือ

1. ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษเบอร์ 600, 1000 และ 1200 ตามลำดับ (ให้ผิวแต่ละด้านเรียบ และขนานกัน)
2. ขัดด้วยผงอลูมินาขนาด 10  $\mu\text{m}$  ด้วยเครื่อง Polisher จนเป็นมันเงา
3. ทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดอุลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)
4. นำชิ้นงานเข้าเตาอบที่ 150 องศาเซลเซียสเพื่อให้แห้ง
5. ซีดตำแหน่งที่จะกดด้วยปากกาหมึกซึม
6. นำชิ้นงานทดสอบความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Zwick) กำหนดน้ำหนักในการกดที่ 0.5 kg และระยะเวลาในการกด 30 วินาที
7. ผลของการทดสอบแสดงในจอคอมพิวเตอร์ของเครื่องกด
8. บันทึกผลการทดลอง

สำหรับสูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็ง HV แสดงไว้ในสมการที่ (3.3) ตามมาตรฐาน ASTM: Designation: E92 – 82

$$HV = \frac{1.5544 P}{d^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ	HV	=	ค่าความแข็ง (HV)
	P	=	แรงในการกด (kgf)
	d	=	ค่าเฉลี่ยความยาวเส้นทแยงมุมรอยกด (mm.)



### 3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงดัด และโมดูลัส

การทดสอบหาค่าความเค้นดัด และโมดูลัสในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบแรงดัดชนิด 3 จุด (3 Point Bending) ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 15 มิลลิเมตร ในแต่ละการทดลองจะทำซ้ำ 5 ครั้ง

#### 3.4.2.1 วัสดุ และอุปกรณ์

วัสดุ และอุปกรณ์ในการทดสอบความแข็งแรงดัด และโมดูลัสในงานวิจัยมีดังนี้คือ

1. ชิ้นงาน ขนาด 5 x 5 x 20 มิลลิเมตร
2. เลื่อย
3. กระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1000
4. เครื่องทำความสะอาดอุตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)
5. เครื่องทดสอบความแข็งแรง (Hounsfield Test Equipment.,Ltd. รุ่น H10K - C)
6. ชุดอุปกรณ์ทดสอบความเค้นดัด ชนิด 3 จุด
7. เตาอบ

#### 3.4.2.2 กรรมวิธีการทดสอบ

กรรมวิธีการทดลองหาค่าความแข็งแรงดัดชนิด 3 จุด และโมดูลัสของวัสดุในงานวิจัยนี้มีกรรมวิธีตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ

1. ตัดชิ้นงานด้วยเลื่อยให้มีขนาดใกล้เคียงกับ 5 x 5 x 20 มิลลิเมตร
2. ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1000 ให้ได้ขนาด 5 x 5 x 20 มิลลิเมตร
3. ทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดอุตราโซนิก
4. นำเข้าเตาอบที่ 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้แห้งทิ้งไว้จนชิ้นงานเย็นตัว
5. นำชิ้นงานมาเข้าเครื่อง Hounsfield Test Equipment.,Ltd. รุ่น H10K - C ที่ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบความแข็งแรงดัดแบบ 3 จุดเรียบร้อยแล้ว ปรับที่โมท 3 Point Bending กำหนดความเร็วในการกดที่ 0.5 mm./min

6. แรงและระยะโก่งของชิ้นงานจะแสดงบนหน้าจอกอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบ

7. สั่งพิมพ์ผลการทดลอง แล้วคำนวณตามสมการที่ (3.4) และ(3.5)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความแข็งแรงดัดในงานวิจัยนี้ คือ

$$S = \frac{3PL}{2a^3} \quad (3.4)$$

เมื่อ

S	=	ความแข็งแรงดัด (MPa)
P	=	แรงกดที่ทำให้ระยะโก่งสูงสุด (N)
L	=	ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (mm.)
a	=	ยาวหน้าตัดด้านข้างชิ้นงาน (mm.)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสในงานวิจัยนี้ คือ

$$E = \frac{PL^3}{48Iy} \quad (3.5)$$

เมื่อ

E	=	ค่าโมดูลัส (GPa)
P	=	แรงกดที่ทำให้ระยะโก่งสูงสุด (N)
L	=	ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (mm.)
I	=	โมเมนต์ความเฉื่อย (mm. <sup>4</sup> )
y	=	ระยะโก่งสูงสุด (mm.)

### 3.5 การทดสอบแรงดัน และแรงบิดของการเจาะวัสดุ

การศึกษาการเจาะในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะในแต่ละวัสดุ ในการทดลองจะมีวัสดุอยู่ 2 กลุ่มหลักๆคือ วัสดุปะการัง และวัสดุ HA ที่ได้จากการจัดเตรียมขึ้นเอง ในส่วนของวัสดุที่เตรียมขึ้นเองนั้นยังแบ่งย่อยออกเป็น 3 ตัวด้วยกัน ดังจะมีรายการวัสดุในการศึกษาวัดแรงในการเจาะดังแสดงในตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงในการเจาะ(Dynamometer) ของบริษัท Kistler รุ่น9272 เครื่องเจาะใช้ของบริษัท Namsun Shizuoka รุ่นMSM – T ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของดอกสว่าน 3 มิลลิเมตร ปรับระดับความเร็วรอบ 3 ระดับคือ 130 460 และ920 rpm ตามลำดับ และอัตราการป้อนตัด 3 ระดับคือ 0.035 0.07 และ0.14 mm/รอบ ตามลำดับ ในแต่ละขั้นการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นแบบสุ่ม ต้องมีการจับฉลากเพื่อเลือกลำดับในการทดสอบแรงตัดในการเจาะดังแสดงในตารางแผนการทดสอบแรงในการตัดเจาะในตารางที่ 3.4 แรงเจาะที่ทำการทดสอบมี 2 แรงด้วยกันคือ

1. แรงดัน Thrust Force (N)
2. แรงบิด Torque (N.mm.)

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงวัสดุที่ใช้ในการทดลองวัดแรงในการเจาะ

ชื่อวัสดุ	จำนวน (ชิ้น)	ขนาด (mm.)	แรงกดขึ้นรูป (MPa)	เปอร์เซ็นต์แป้ง (%)	อุณหภูมิเผา (°C)
100%HA 10MPa	5	φ20 x 6	10	0	1100
1%แป้ง 2MPa	5	φ20 x 6	2	1	1100
5%แป้ง 2MPa	5	φ20 x 6	2	5	1100
ปะการัง	10	20x20x20	ปะการัง		

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงลำดับการทดสอบวัดแรงดัน Thrust Force และแรงบิด Torque ในการเจาะ (ใช้วิธีแบบสุ่ม)

วัสดุ	จำนวนซ้ำ	ปะการัง			100%HA			1%แป้ง			5%แป้ง		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
n1	f1	42	25	67	5	66	18	59	30	31	50	32	69
	f2	97	44	101	43	60	102	11	49	68	19	7	51
	f3	24	77	4	76	15	47	65	98	10	79	80	83
n2	f1	45	78	40	86	39	87	1	38	95	37	8	52
	f2	89	23	88	22	63	29	58	96	20	71	33	85
	f3	41	103	3	64	14	104	21	36	82	84	81	53
n3	f1	26	105	62	70	47	61	12	75	56	13	34	107
	f2	108	16	9	27	93	72	57	74	94	106	73	92
	f3	17	99	46	2	100	28	54	35	90	6	91	55

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นลำดับในการทดลองวัดแรงในการเจาะ

n1 = 130 rpm                      f1 = 0.035 mm/รอบ

n2 = 460 rpm                      f2 = 0.07 mm/รอบ

n3 = 920 rpm                      f3 = 0.14 mm/รอบ

### 3.5.1 การทดสอบแรงดัน

แรงดัน Thrust Force (N) เป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งของดอกสว่าน (ขนาดแกนดอกสว่าน) การทดสอบแรงดันจะวัดด้วยเครื่องไดนามิโอมิเตอร์ Dynamometer วัสดุที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.3 ส่วนลำดับสภาวะในการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.4

### 3.5.2 การทดสอบแรงบิด

แรงดัน Torque (N.mm.) เป็นโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในรอบแกนดอกสว่าน การทดสอบแรงบิดจะวัดด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์ Dynamometer วัสดุที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.3 ส่วนลำดับสถานะในการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.4

### 3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ผลจากการทดลองดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิด
2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับปัจจัยควบคุมการเจาะ และคุณสมบัติชิ้นงาน
3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติชิ้นงาน
4. การเปรียบเทียบแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุปะการัง

#### 3.6.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิด

เพื่อเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิดที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเจาะวัสดุประเภทชนิดมีรูพรุน โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดัน และแรงบิด มาทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์

#### 3.6.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับปัจจัยควบคุมการเจาะ และคุณสมบัติชิ้นงาน

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลแรงในการเจาะเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล กับแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA โดยให้โปรแกรมสำเร็จรูป ชื่อ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ช่วยในการวิเคราะห์ ตัวอย่างการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค

### 3.6.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติชิ้นงาน

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ เป็นการศึกษาดังแนวโน้มของการเกิดแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติวัสดุ โดยการสร้างกราฟระหว่างแรงในการตัดเจาะ กับคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุชิ้นงาน HA

### 3.6.4 การเปรียบเทียบแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุปะการัง

เป็นการศึกษาดังแนวโน้มในการเจาะในกรณีที่เป็นวัสดุชนิดอื่น แต่ในกลุ่มเดียวกันกับวัสดุชิ้นงาน HA ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยการเปรียบเทียบจากกราฟแท่ง ของแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

การดำเนินงานวิจัยนี้ ได้ถูกกำหนดให้เป็นไปตามขั้นตอนการทดลองตามขั้นตอนที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 กล่าวคือ การสังเคราะห์ผง และการขึ้นรูปชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุน ตามหัวข้อ 3.1 ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชิ้นงาน HA ตามหัวข้อ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ทดสอบแรงในการเจาะ ตามหัวข้อ 3.4

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1. ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของผง Hydroxyapatite (HA) ที่สังเคราะห์และผงแป้ง
  - 1.1 ผลการตรวจสอบเฟสของสารโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
  - 1.2 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง
  - 1.3 ผลการตรวจสอบลักษณะ และรูปร่างของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง
2. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)
  - 2.1 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นบัลค์
  - 2.2 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน
  - 2.3 ผลการศึกษาขนาด และลักษณะรูพรุน
3. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)
  - 3.1 ผลการทดสอบความแข็ง
  - 3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัด และโมดูลัส
4. ผลการทดสอบแรงดัน และแรงบิดของการเจาะวัสดุ
  - 4.1 ผลการทดสอบแรงดัน Thrust Force (N)
  - 4.2 ผลการทดสอบแรงบิด Torque (N.mm.)
5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง
  - 5.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิด



5.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับปัจจัยควบคุมการเจาะ และคุณสมบัติชิ้นงาน

5.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติชิ้นงาน

5.4 ผลการเปรียบเทียบแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุปะการัง

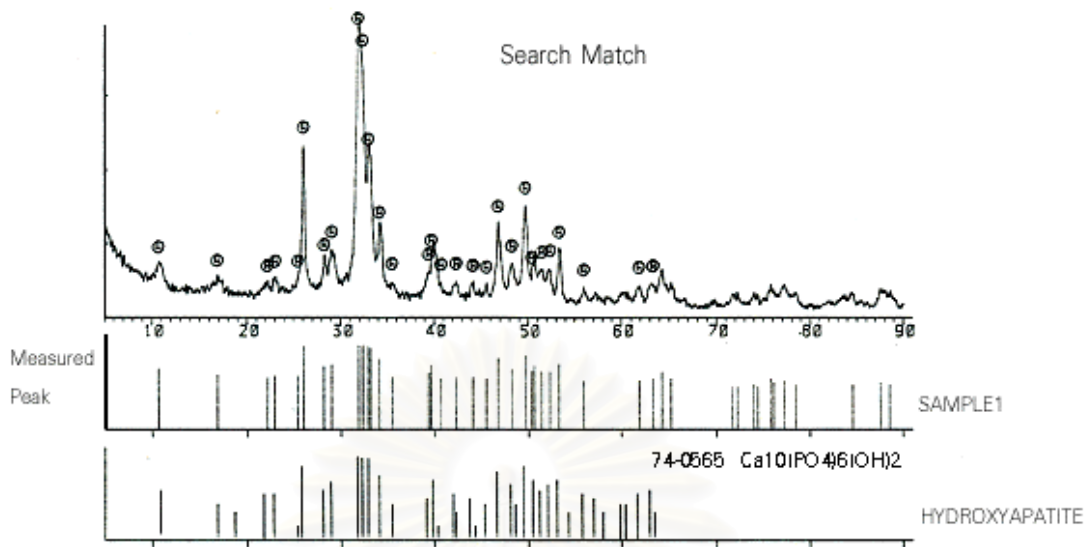
#### 4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง

##### 4.1.1 ผลการตรวจสอบเฟสของสารโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ผงที่ใช้ในการตรวจ คือผงที่ได้จากการสังเคราะห์ตามสมการที่ 3.1 และผลการตรวจสอบ แสดงเป็นกราฟความเข้มของรังสีเอ็กซ์ กับมุม  $2\theta$  แสดงในกราฟรูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบกับสาร HA มาตรฐาน ผล ปรากฏว่าผงที่ได้จากการสังเคราะห์ตรงกับ HA มาตรฐานดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.2



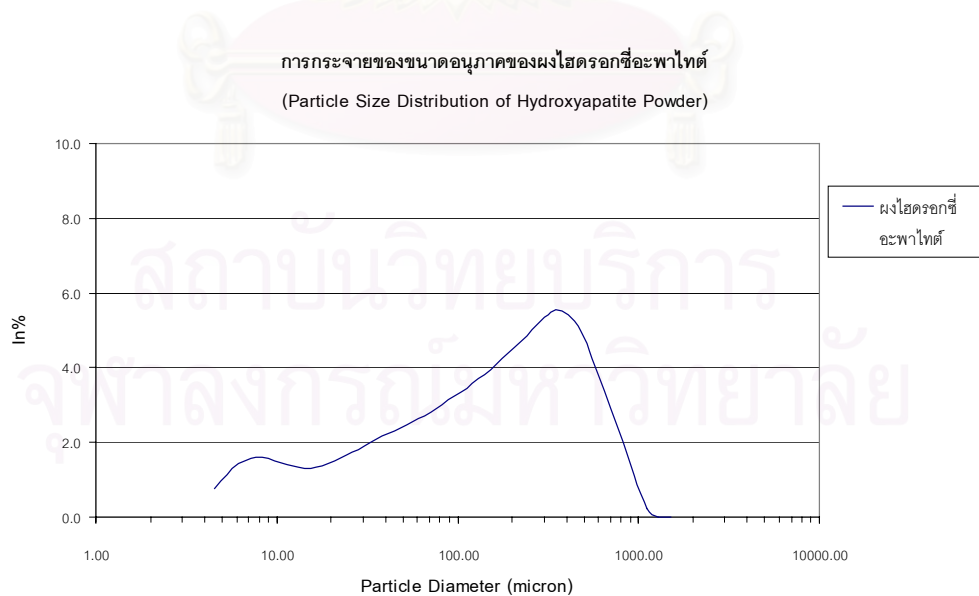
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงสัมพัทธ์กับมุม  $2\theta$  ของสารที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น



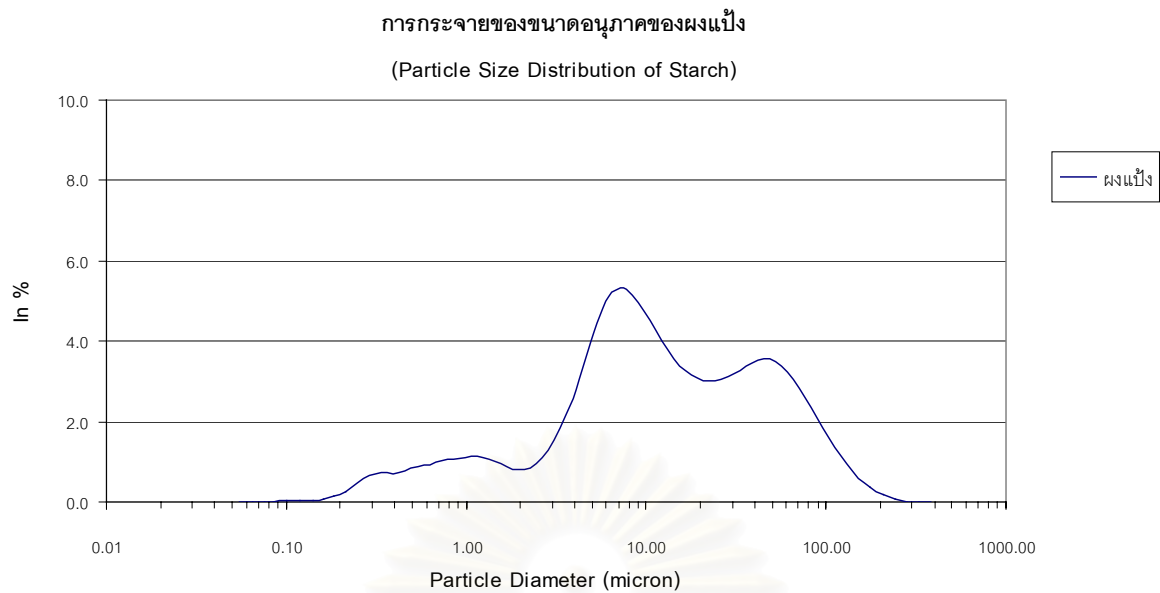
รูปที่ 4.2 แสดงผลการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟระหว่าง HA มาตรฐาน กับ HA ที่สังเคราะห์ขึ้นเอง

#### 4.1.2 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง

ผลจากการตรวจสอบขนาดอนุภาคพบว่าขนาดอนุภาคของผง HA มีขนาดเฉลี่ย  $245.37 \pm 13.7 \mu\text{m}$  และขนาดอนุภาคของผงแป้ง มีขนาดเฉลี่ย  $7.2 \pm 3.39 \mu\text{m}$  ผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 4.3 และ 4.4 ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข



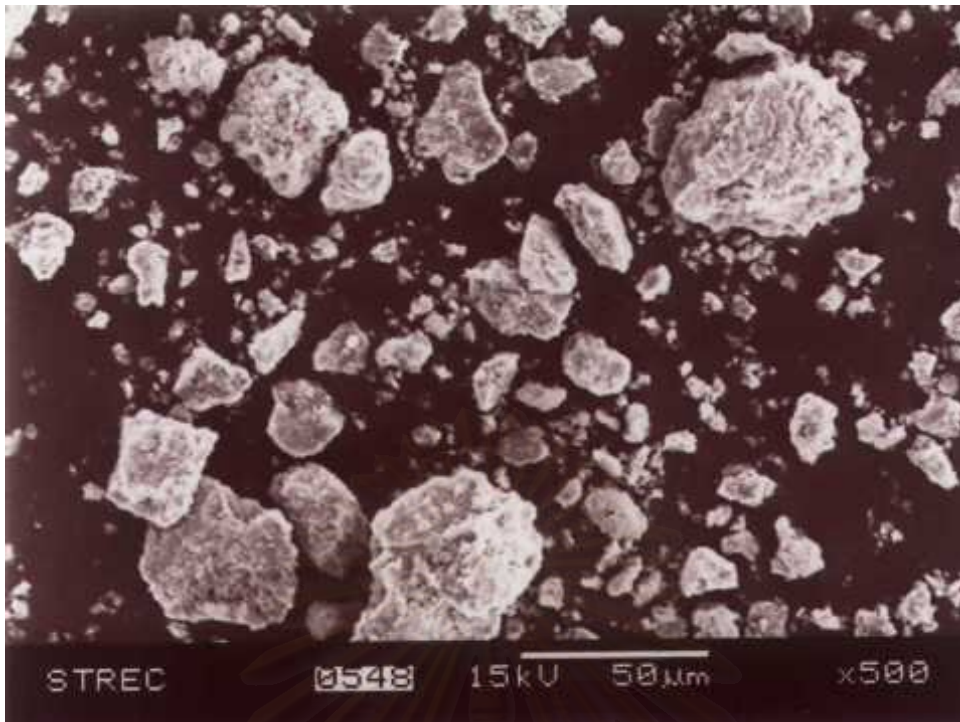
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟการกระจายของขนาดอนุภาค ของผง Hydroxyapatite (HA)



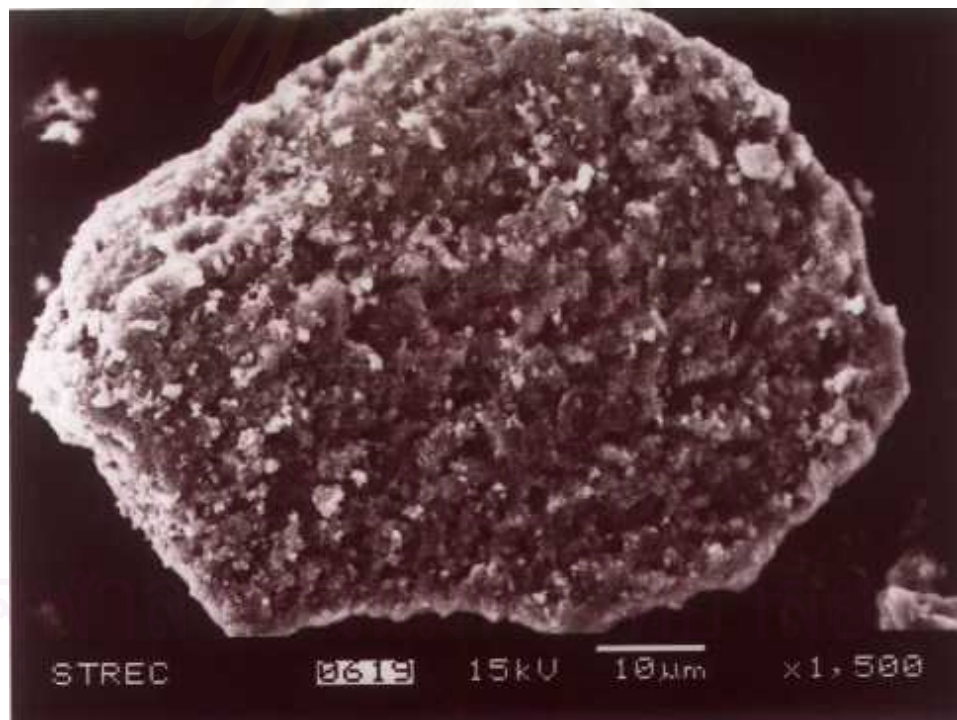
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการกระจายของขนาดอนุภาค ของผงแป้ง

#### 4.1.3 ผลการตรวจสอบลักษณะ และรูปทรงของผง Hydroxyapatite (HA) และผงแป้ง

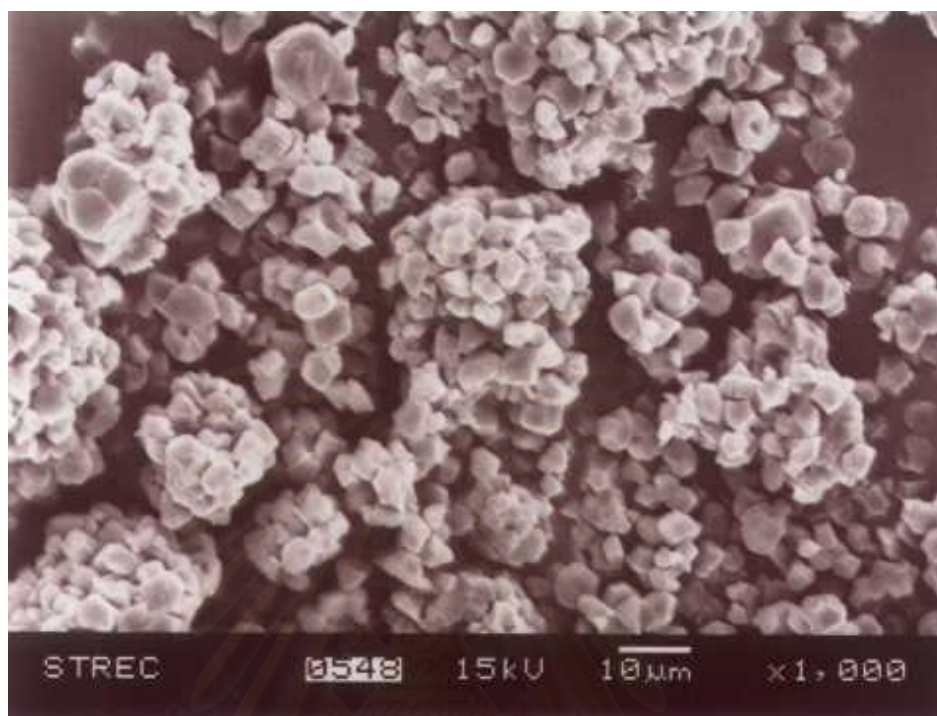
จากภาพถ่ายที่ได้จากเครื่อง SEM เป็นภาพถ่ายของผง HA ที่กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า และผงแป้งที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.5 - 4.7 ตามลำดับ ทำให้ทราบรายละเอียดของลักษณะ และรูปทรงของ ผง HA และผงแป้ง โดยพบว่า ผง HA มีลักษณะรูปทรงไม่แน่นอนโดยมีขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 200 - 500  $\mu\text{m}$  ส่วนแป้งมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 - 10  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของผง HA ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายของผง HA ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายของผงแป้งที่กำลังขยาย 1000 เท่า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพวัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้ ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพดังต่อไปนี้

1. ความหนาแน่นบัลค์
2. เปอร์เซ็นต์ความพรุน
3. ขนาด และลักษณะรูพรุน



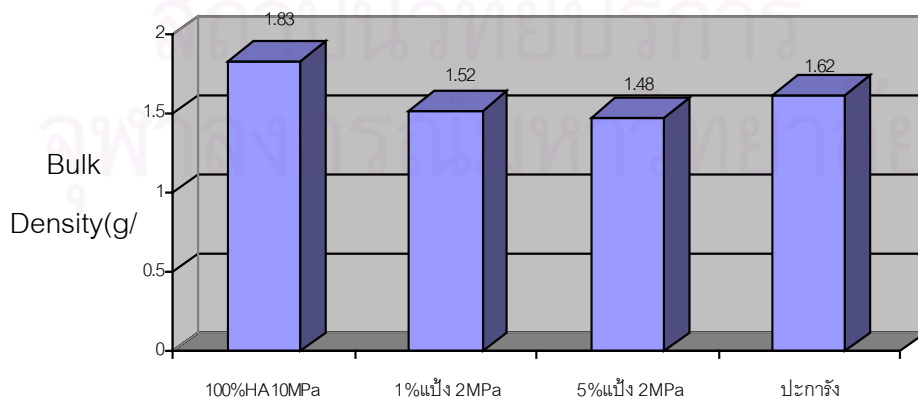
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นบัลค์

ในการทดสอบความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุขึ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุน และปะการัง โดยจะมีวัสดุทั้งหมด 4 ชนิด แบ่งเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปเอง 3 ชนิด และปะการังอีก 1 ชนิด มีผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟแท่งแสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบความหนาแน่น Bulk Density ( $\text{g/cm}^3$ )

วัสดุ	ลำดับชิ้นงาน (ชิ้น)	จำนวนการทดลองซ้ำ			ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )	
		1	2	3	เฉลี่ย	SD
100%HA 10MPa	1	1.82	1.80	1.79	1.83	0.03
	2	1.85	1.86	1.85		
1%แป้ง 2MPa	1	1.53	1.52	1.53	1.52	0.03
	2	1.56	1.47	1.53		
5%แป้ง 2MPa	1	1.49	1.48	1.46	1.48	0.04
	2	1.43	1.56	1.48		
ปะการัง	1	1.52	1.54	1.56	1.62	0.18
	2	1.54	1.99	1.57		



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟแท่งค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ของวัสดุ

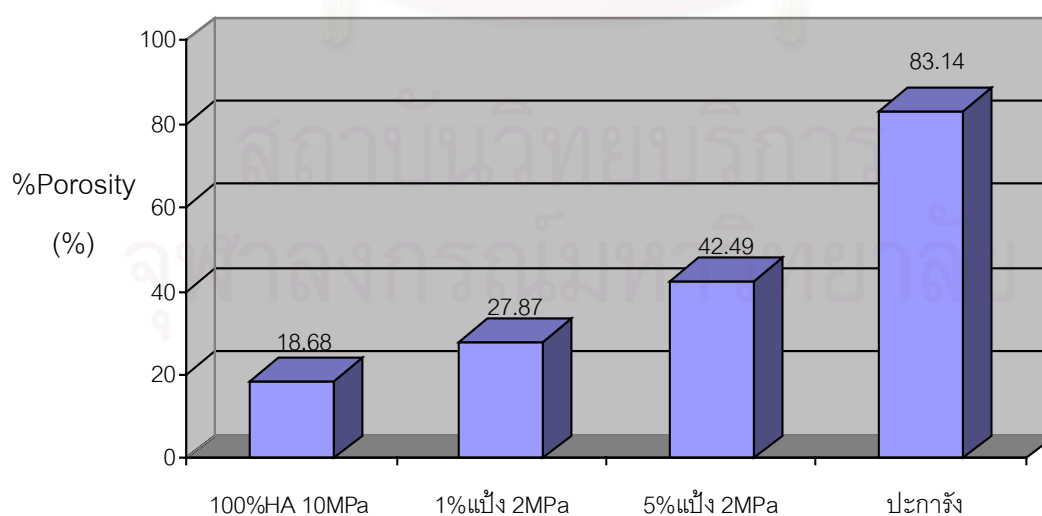


#### 4.2.2 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน

จากการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงาน HA และปะการังที่จะนำไปทดสอบแรงในการเจาะ มีจำนวน 4 ชนิด แต่ละชนิดใช้ชิ้นงานในการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน 2 ชิ้น ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2 และกราฟแท่งแสดงในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity (%)

วัสดุ	ลำดับชิ้นงาน (ชิ้น)	จำนวนการทดลองซ้ำ			%ความพรุน (%)	
		1	2	3	เฉลี่ย	SD
100%HA 10MPa	1	18.68	18.50	19.72	18.68	0.52
	2	18.50	18.30	18.39		
1%แป้ง 2MPa	1	31.10	27.40	31.98	27.87	3.28
	2	24.04	25.38	24.7		
5%แป้ง 2MPa	1	33.31	34.36	34.33	42.49	9.56
	2	51.72	47.21	54.03		
ปะการัง	1	82.59	82.00	86.07	83.14	4.20
	2	76.21	83.34	88.60		



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟแท่งค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน (%Porosity) ของวัสดุ

#### 4.2.3 ผลการศึกษาขนาดและลักษณะของรูพรุน

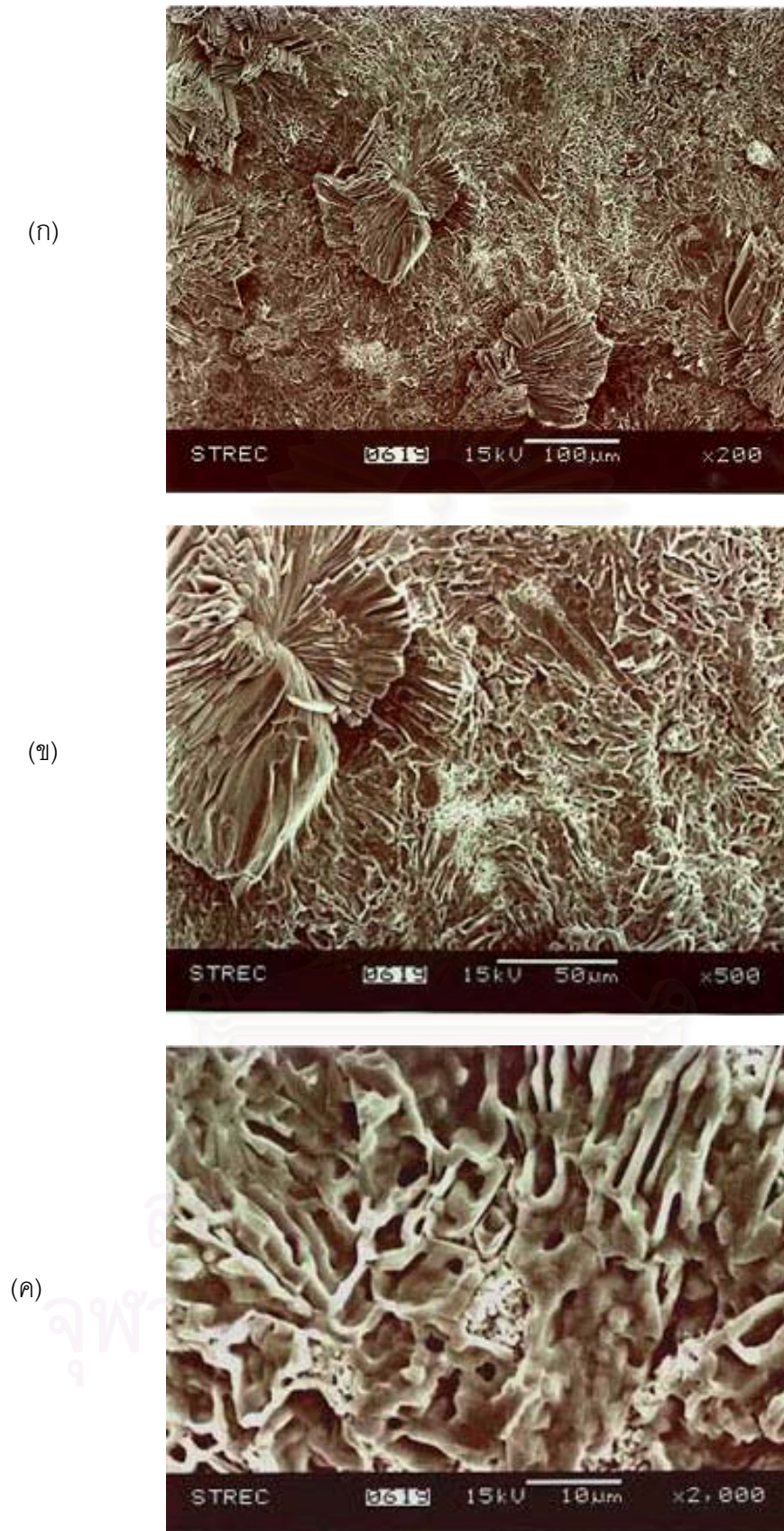
หลังจากนำวัสดุขึ้นงาน HA ที่ทำการขึ้นรูปไปส่องดูด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 200, 500 และ 2000 เท่า จะเห็นได้ว่าขนาด และลักษณะของรูพรุนวัสดุขึ้นงาน HA มีความแตกต่างกันตามสภาวะในการขึ้นรูป ดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.9 เป็นภาพขึ้นงานที่มีส่วนผสม HA 100 เปอร์เซ็นต์ แรงอัดขึ้นรูป 10 MPa เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นจะกระจายอยู่ทั่วไป แต่มีขนาดเล็กมากประมาณ 5 – 10  $\mu\text{m}$  เท่านั้น

รูปที่ 4.10 เป็นภาพขึ้นงานที่มีส่วนผสมแบ่ง 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแข็ง แรงในการอัดขึ้นรูป 2 MPa เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นว่ามีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป มีขนาดอยู่ระหว่าง 5 – 10  $\mu\text{m}$

รูปที่ 4.11 เป็นภาพขึ้นงานที่มีส่วนผสมแบ่ง 5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของแข็ง แรงอัดในการขึ้นรูป 2 MPa เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นว่า รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะกระจายอยู่ห่างกัน มีขนาด 20 – 30  $\mu\text{m}$

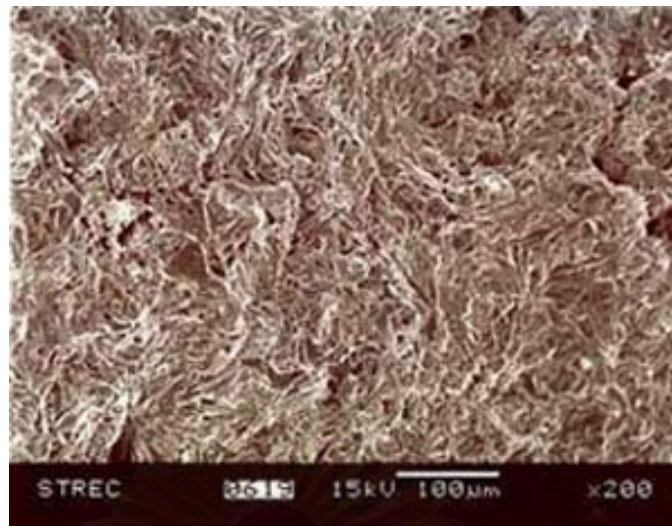
รูปที่ 4.12 เป็นภาพลักษณะรูพรุน และโครงสร้างของประการัง รูป(ก) แสดงภาพประการังด้านดอก รูป(ข) แสดงภาพประการังด้านก้าน ประการังทั้งด้านดอก และด้านก้านจะมีขนาดรูพรุนที่ 200 – 500  $\mu\text{m}$



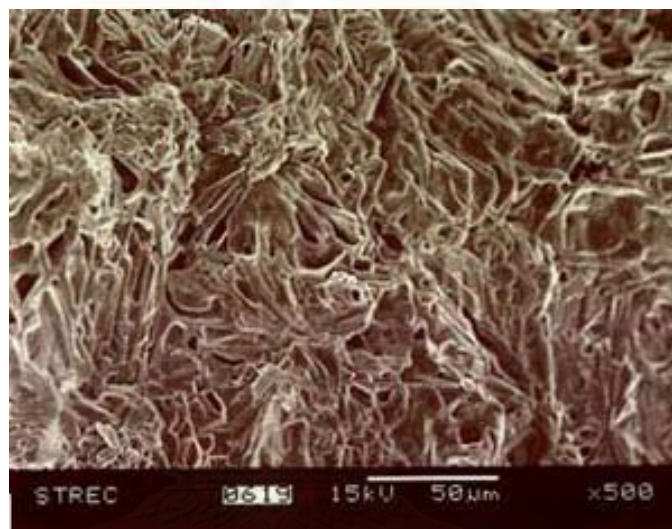
รูปที่ 4.9 แสดงภาพชิ้นงานที่ส่วนผสมผง HA 100% แรงอัดขึ้นรูป 10 MPa เเผที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง รูป(ก) (ข) (ค) ที่กำลังขยาย 200 500 และ 2000 เท่าตามลำดับ



(ก)



(ข)

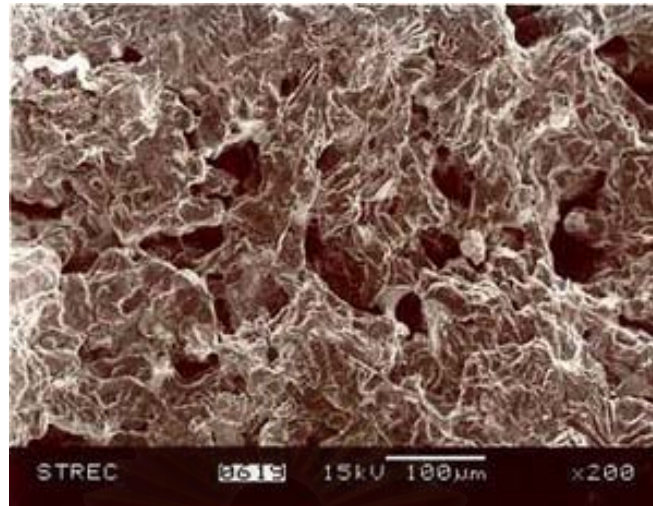


(ค)

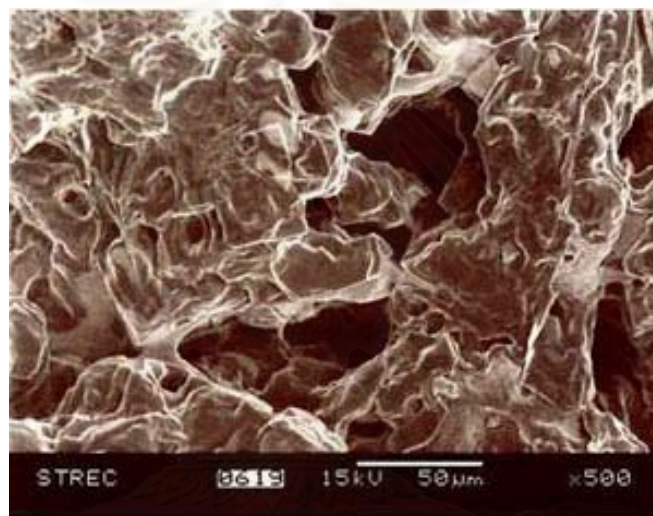


รูปที่ 4.10 แสดงภาพชิ้นงานที่ส่วนผสมผงแป้ง 1% โดยปริมาตร แรงอัดขึ้นรูป 2 MPa เเผที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง รูป(ก) (ข) (ค) ที่กำลังขยาย 200 500 และ 2000 เท่าตามลำดับ

(ก)



(ข)



(ค)

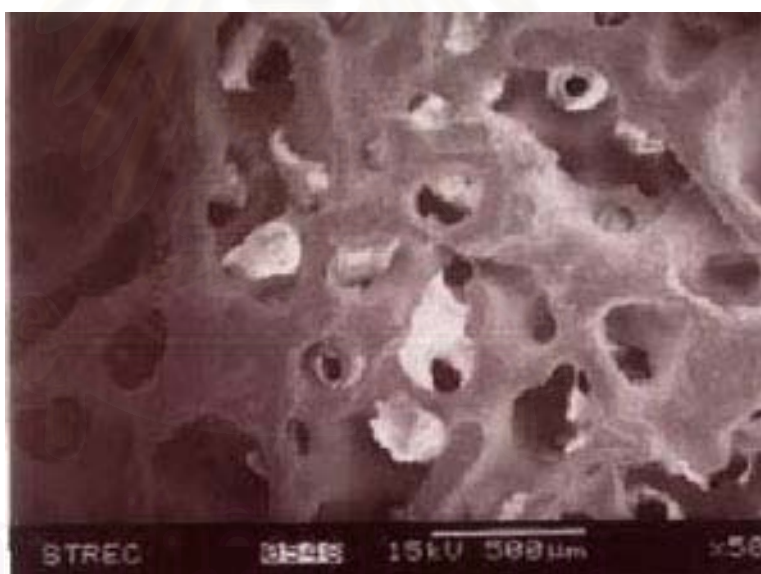


รูปที่ 4.11 แสดงภาพชิ้นงานที่ส่วนผสมผงแป้ง 5% โดยปริมาตร แรงอัดขึ้นรูป 2 MPa เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง รูป(ก) (ข) (ค) ที่กำลังขยาย 200 500 และ 2000 เท่าตามลำดับ

(ก)



(ข)



รูปที่ 4.12 แสดงภาพลักษณะ และโครงสร้างรูพรุนของปะการัง ด้านดอก (ก) และด้านก้าน (ข) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



#### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน Hydroxyapatite (HA)

ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ชิ้นงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน และปะการังดังนี้คือ ค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความแข็งแรงดัด (Bending) และค่าโมดูลัส (Modulus) สำหรับวัสดุที่ใช้ทำการทดลองจะเป็นวัสดุที่จะนำไปทำการทดลองในการวัดแรงในการเจาะประกอบไปด้วย 4 ชนิดด้วยกันคือ

- 1) วัสดุที่ขึ้นรูปจากส่วนผสมของ HA 100% แรงอัดขึ้นรูป 10MPa เผาที่ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2) วัสดุที่ขึ้นรูปจากส่วนผสมของปะการัง 1% แรงอัดขึ้นรูป 2MPa เผาที่ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 3) วัสดุที่ขึ้นรูปจากส่วนผสมของปะการัง 5% แรงอัดขึ้นรูป 2MPa เผาที่ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) วัสดุปะการัง

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุปะการังชนิดมีรูพรุนในงานวิจัยมีผล ดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

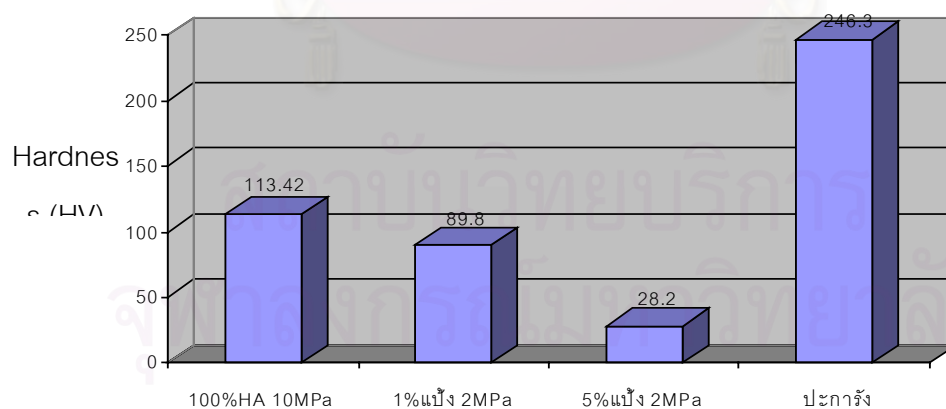


#### 4.3.1 ผลการทดสอบความแข็ง

จากการทดสอบความแข็งจากจำนวนชิ้นงานทั้งหมด 8 ชิ้น แต่ละชิ้นทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งในแต่ละครั้งของการทดลองจะได้ค่าความแข็งออกมา 2 ค่า ดังนั้นในการทดลองในแต่ละวัสดุจะมีข้อมูลทั้งหมด 12 ค่า ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3 และกราฟแท่งในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการทดสอบความแข็ง Hardness ( HV)

วัสดุ	ชิ้นงาน (ชิ้น)	จำนวนการทดลองซ้ำ						ความแข็ง (HV)	
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	SD
		1	2	1	2	1	2		
100%HA	1	104.9	108.7	109.4	107.3	104.5	103.7	113.4	7.7
10MPa	2	118.1	117.3	120.3	121.4	125.1	120.3	2	
1%แป้ง	1	88.7	92.4	108.7	92.9	95.4	108.5	89.8	12.4
2MPa	2	69.9	74.9	89.7	97.6	75.2	84.2		
5%แป้ง	1	38.2	33.2	20.7	20.4	20.6	28.8	28.2	7.1
2MPa	2	36.4	36.3	20.3	21.7	32.7	29.3		
ปะการัง	1	218.1	236.4	259.1	244.8	231.8	259.7	246.3	22.4
	2	239.7	245.6	263.3	227.2	237.4	239.9		



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟแท่งค่าความแข็ง (Hardness, HV) ของวัสดุ

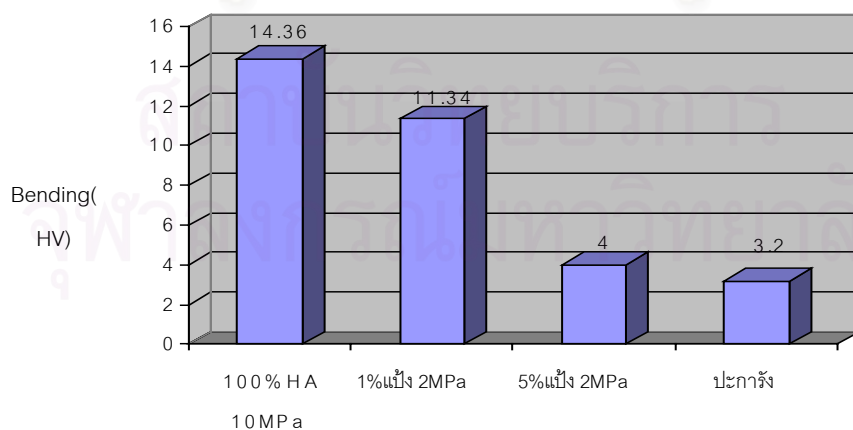
#### 4.3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัด และโมดูลัส

##### 4.3.2.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดัด

จากการทดสอบความแข็งแรงดัดจากจำนวนชิ้นงานทั้งหมด 20 ชิ้น โดยแต่ละวัสดุทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ดังนั้นในการทดลองวัสดุทั้งหมดจะมีข้อมูลทั้งสิ้น 20 ค่า ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4 และกราฟแท่งในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

วัสดุ	จำนวนการทดลองซ้ำ					Bending (MPa)	
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	SD
100%HA 10MPa 1100 °C	6.30	13.5	9.72	23.04	19.26	14.36	6.87
1%แป้ง 2MPa 1100 °C	10.98	10.80	14.04	9.72	11.16	11.34	1.67
5%แป้ง 2MPa 1100 °C	4.5	3.42	2.70	4.32	5.04	4	0.93
ปะการัง	3.87	2.79	3.15	3.33	2.67	3.2	0.8



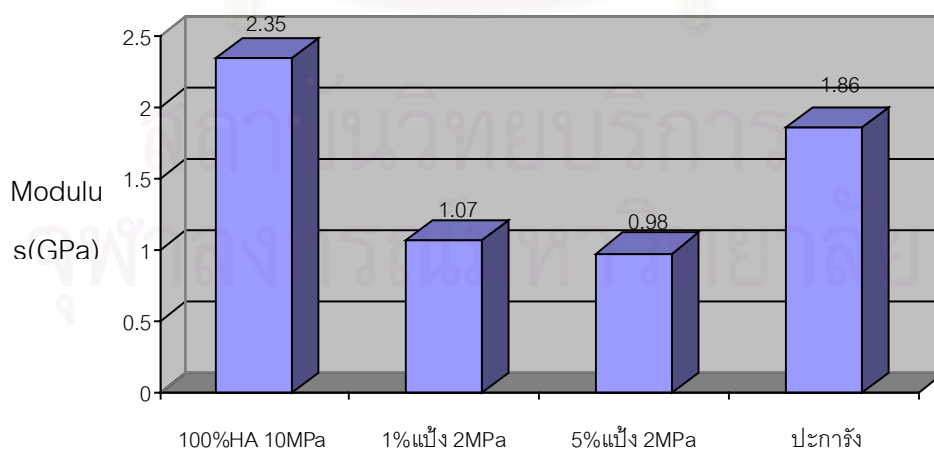
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟแท่งค่าความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

#### 4.3.2.2 ผลการทดลองหาค่าโมดูลัส (Modulus, GPa)

จากการทดลองหาค่าความแข็งแรงดัด โดยมีจำนวนชิ้นงานทั้งหมด 20 ชิ้น โดยแต่ละวัสดุทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ดังนั้นในการทดลองวัสดุทั้งหมดจะมีข้อมูลทั้งสิ้น 20 ค่า จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณเพื่อหาค่าโมดูลัส ดังแสดงในหัวข้อ 3.4.2.2 ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5 และกราฟแท่งในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลการทดสอบโมดูลัส Modulus (GPa)

วัสดุ	จำนวนการทดลองซ้ำ					Modulus (GPa)	
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	SD
100%HA 10MPa	2.63	2.11	1.55	2.88	2.58	2.35	0.53
1%แป้ง 2MPa	1.58	1.21	1.24	0.64	0.66	1.07	0.41
5%แป้ง 2MPa	1.78	0.95	0.75	0.82	0.61	0.98	0.46
ปะการัง	3.23	2.09	0.9	1.22	0.99	1.86	1.04



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟแท่งค่าโมดูลัส Modulus (GPa) ของวัสดุ

#### 4.4 ผลการทดสอบแรงดัน และแรงบิดของการเจาะวัสดุ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา และทดสอบแรงในการเจาะวัสดุ ดังในแผนการทดลองในหัวข้อที่ 3.4 วัสดุที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.3 โดยในสภาวะการเจาะจะแบ่งระดับ ความเร็วรอบดอกสว่าน ( $n$ , rpm) และอัตราการป้อนตัดดอกสว่าน ( $f$ , mm/รอบ) ออกเป็น 3 ระดับด้วยกัน คือ ความเร็วรอบ 130 460 และ 920 rpm ตามลำดับ ส่วนอัตราการป้อนตัดที่ 0.035 0.07 และ 0.14 mm/รอบ ตามลำดับ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร วัสดุ HSS. แรงในการเจาะวัดได้จาก Dynamometer แรงที่ทำการศึกษาแบ่งเป็น 2 แรงคือ แรงดัน (Thrust Force,  $T_n$ ) เป็นแรงที่เกิดในแนวตั้งขนานกับดอกสว่าน ซึ่งเกิดจากแรงกดในการป้อนดอกสว่านมีหน่วยเป็น นิวตัน(N) และแรงบิด (Torque,  $T_q$ ) เป็นแรงบิดรอบแกนดอกสว่าน ซึ่งเกิดจากการต้านของเนื้อวัสดุมีหน่วยเป็น นิวตันมิลลิเมตร(N.mm.) ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 ผลการทดสอบแรงดัน Thrust Force (N)

จากการทดสอบแรงดันในการเจาะ โดยวัดทั้งหมดจำนวน 108 ครั้ง จากวัสดุชิ้นงาน HA และปะการัง ลำดับในการทดลองได้จากการจับฉลากเพื่อให้ข้อมูลเป็นแบบสุ่ม ทดลองตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.4 ผลจากการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.16 – 4.17 ปรากฏว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ และอัตราการป้อนตัดสูงขึ้น จะทำให้แรงดันมีแนวโน้มสูงขึ้น ผลการทดสอบจะได้นำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านต่างๆของวัสดุ เพื่อทำการวิเคราะห์การถดถอย แล้วสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประมาณการแรงดันในการเจาะต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

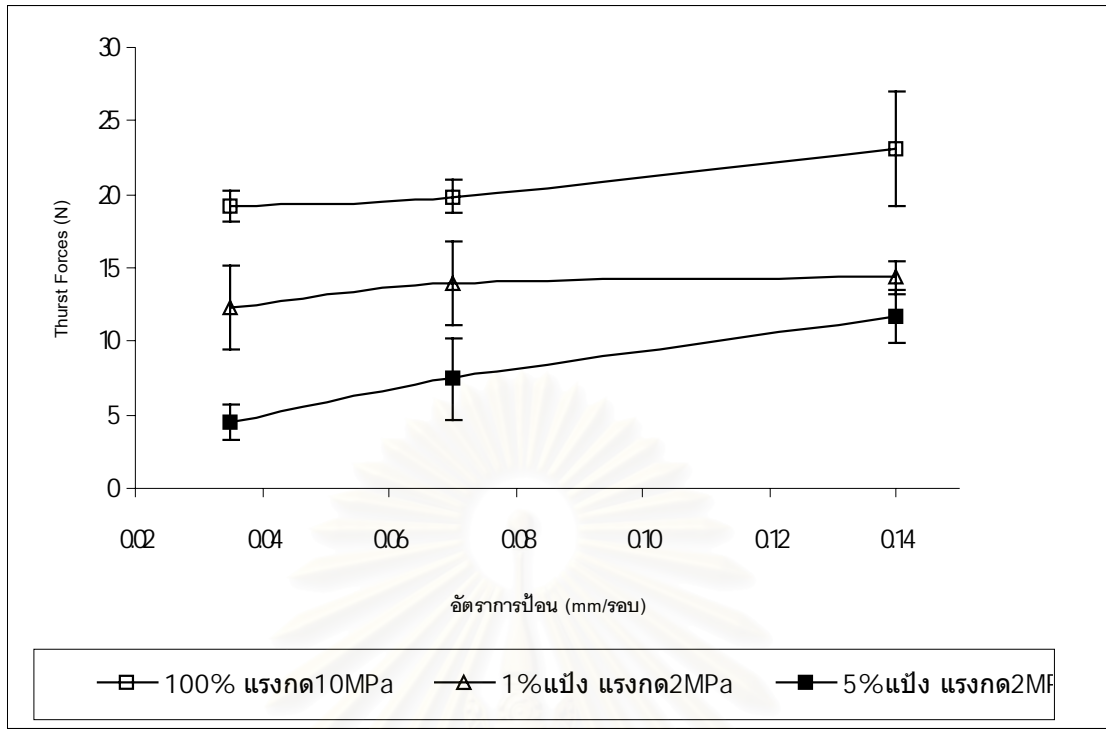
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงแรงดัน Thrust Force (N) ในกรณีทดสอบเจาะวัสดุฐาน

วัสดุ	ประกาชัง					100%HA 10MPa					1% แป้ง 2MPa					5% แป้ง 2MPa					
	1			เฉลี่ย		SD		1			เฉลี่ย		SD		1			เฉลี่ย		SD	
ทดลองซ้ำ	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	
n1	f1	23.48	18.59	20.47	20.85	2.47	18.59	20.47	18.71	19.26	1.05	10.7	15.59	10.7	12.33	2.82	3.85	3.85	5.82	4.51	1.14
	f2	23.48	25.35	20.47	23.10	2.46	18.59	20.47	20.47	19.84	1.09	10.7	15.59	15.59	13.96	2.82	5.82	5.82	10.7	7.45	2.82
	f3	25.35	25.35	23.41	24.70	1.12	25.35	18.59	25.35	23.10	3.90	15.59	13.71	13.71	14.34	1.09	10.7	13.71	10.7	11.70	1.74
n2	f1	23.48	18.59	20.47	20.85	2.47	20.47	15.59	13.71	16.59	3.49	15.59	18.59	15.59	16.59	1.73	10.7	13.71	10.7	11.70	1.74
	f2	23.48	25.35	25.35	24.73	1.08	15.59	15.59	20.47	17.22	2.82	18.59	18.59	15.59	17.59	1.73	10.7	10.7	13.71	11.70	1.74
	f3	35.12	30.32	25.35	30.26	4.89	33.24	20.47	20.47	24.73	7.37	18.59	20.47	18.59	19.22	1.09	13.71	13.71	15.59	14.34	1.09
n3	f1	30.23	25.35	25.35	26.98	2.82	25.35	23.48	23.48	24.10	1.08	15.59	15.59	18.59	16.59	1.73	15.59	15.59	13.71	14.96	1.09
	f2	35.12	30.23	28.36	31.24	3.49	23.48	20.47	23.48	22.48	1.74	20.47	20.47	18.59	19.84	1.09	15.59	13.71	15.59	14.96	1.09
	f3	30.23	20.48	20.47	23.73	5.63	28.36	23.36	23.48	25.07	2.85	20.47	18.59	20.47	19.84	1.09	15.59	15.59	18.59	16.59	1.73

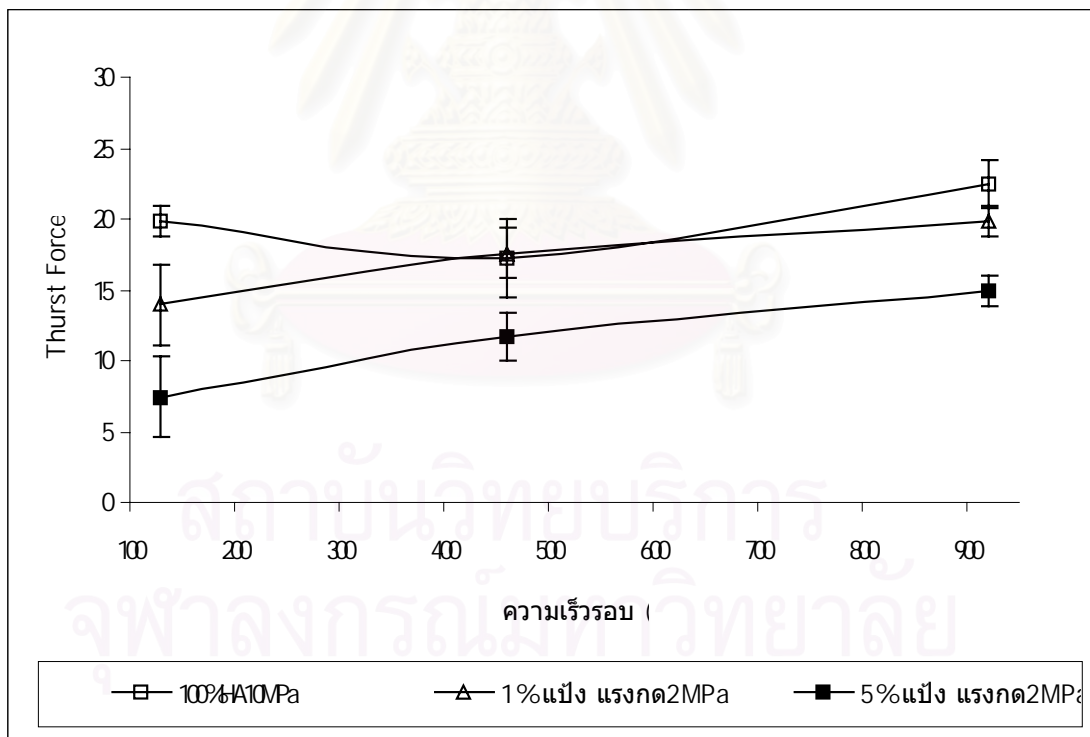
หมายเหตุ n1 = 130 rpm f1 = 0.035 mm / รอบ

n2 = 460 rpm f2 = 0.07 mm / รอบ

n3 = 920 rpm f3 = 0.14 mm / รอบ



การเจาะชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130 rpm



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟอิทธิพลของความเร็วรอบ (rpm) ต่อแรงดัน Thrust Fore(N) ในการเจาะวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่อัตราการป้อน 0.07 mm/รอบ

#### 4.4.2 ผลการทดสอบแรงบิด Torque (N.mm.)

จากการทดสอบแรงบิดในการเจาะ โดยวัดทั้งหมดจำนวน 108 ครั้ง จากวัสดุชิ้นงาน HA ที่เตรียมขึ้น และปะการัง ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.4 ผลจากการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.18 – 4.19 ปรากฏว่าเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบ และอัตราการป้อนตัดสูงขึ้น จะทำให้แรงบิดมีแนวโน้มสูงขึ้น จากผลการทดสอบจะได้นำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านต่างๆของวัสดุ เพื่อทำการวิเคราะห์การถดถอย แล้วสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประมาณการแรงบิดในการเจาะต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



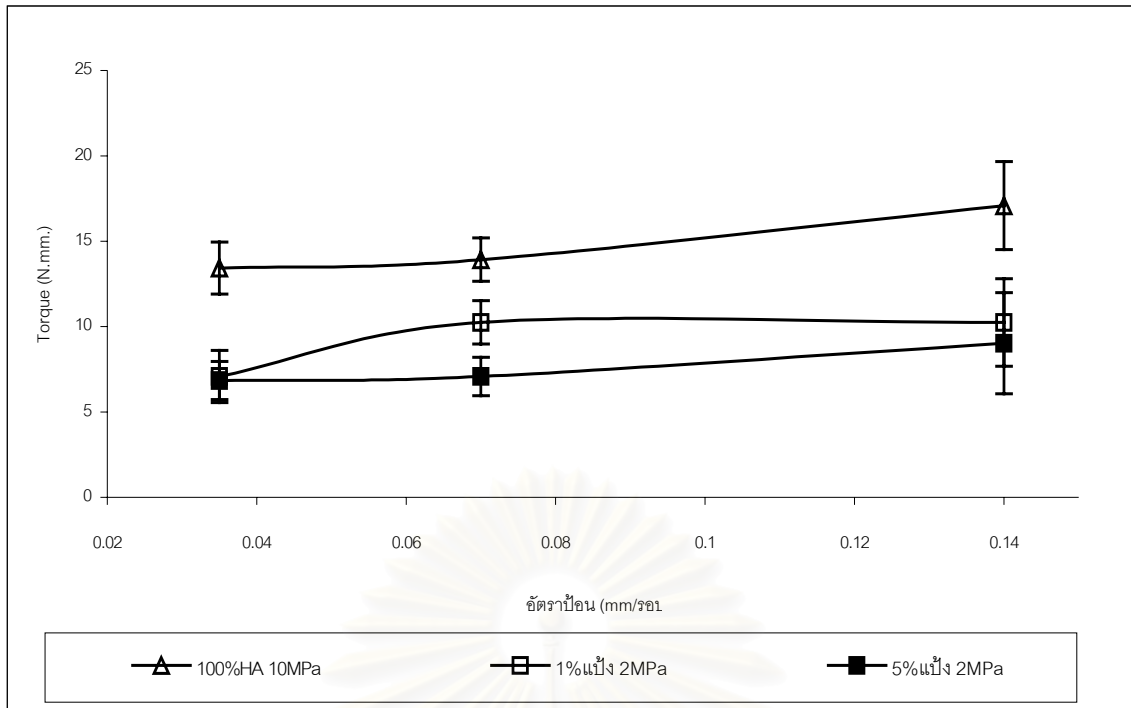
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงแรงบิด Torque (N.mm.) ในภาวะ ๖ ระดับความเร็ว

วัสดุ	प्रकार			เฉลี่ย	SD	100%HA			เฉลี่ย	SD	1% แป้ง 2 MPa			เฉลี่ย	SD	5% แป้ง 2 MPa			เฉลี่ย	SD	
	1	2	3			1	2	3			1	2	3			1	2	3			
n1	f1	15.35	13.18	13.92	14.15	1.10	14.65	13.92	11.72	13.43	1.53	8.06	7.32	5.86	7.08	1.12	8.06	6.59	5.86	6.84	1.12
	f2	14.64	15.35	16.11	15.37	0.74	12.45	14.65	14.65	13.92	1.27	8.06	9.52	13.18	10.25	2.64	8.06	5.86	7.32	7.08	1.12
	f3	16.69	16.11	14.65	15.78	1.01	16.85	19.78	14.65	17.09	2.57	9.52	8.79	12.45	10.25	1.94	12.45	7.32	7.32	9.03	2.96
n2	f1	20.51	18.31	19.04	19.29	1.12	12.45	10.99	10.25	11.23	1.12	7.32	8.06	10.99	8.79	1.94	10.99	9.52	13.18	11.23	1.84
	f2	13.18	11.72	10.25	11.72	1.47	10.99	10.99	8.79	10.25	1.27	10.99	9.59	9.59	10.06	0.81	10.25	8.06	8.06	8.79	1.26
	f3	39.55	32.96	32.23	34.91	4.03	16.85	19.04	16.85	17.58	1.26	15.35	15.38	17.58	16.10	1.28	16.11	14.65	10.99	13.92	2.64
n3	f1	24.90	24.17	21.24	23.44	1.94	12.45	10.99	14.65	12.70	1.84	13.92	10.25	8.79	10.99	2.64	8.79	9.52	9.52	9.28	0.42
	f2	22.71	24.17	21.97	22.95	1.12	17.58	19.78	16.11	17.82	1.85	17.57	13.92	10.25	13.91	3.66	14.65	10.99	10.25	11.96	2.36
	f3	23.44	21.24	23.44	22.71	1.27	24.90	17.56	17.56	20.01	4.24	19.04	14.65	15.38	16.36	2.35	16.11	15.38	13.92	15.14	1.12

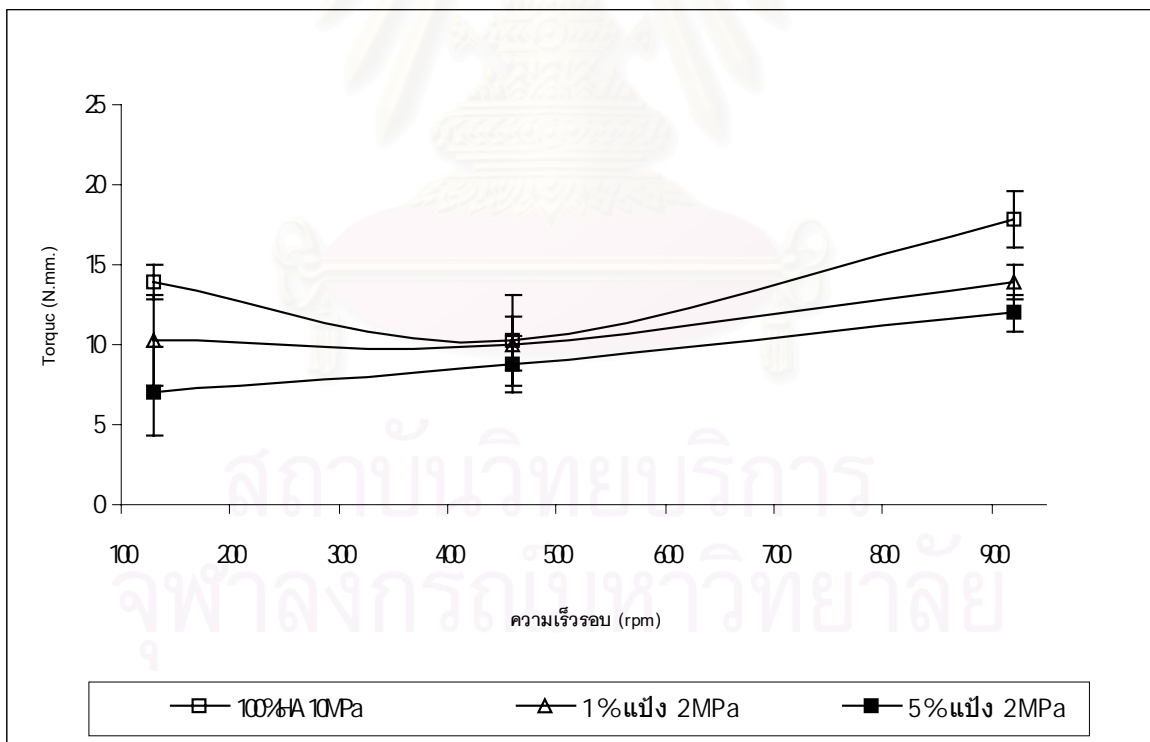
หมายเหตุ n1 = 130 rpm      f1 = 0.035 mm / รอบ

n2 = 460 rpm      f2 = 0.07 mm / รอบ

n3 = 920 rpm      f3 = 0.14 mm / รอบ



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟอิทธิพลของอัตราการป้อนตัด (mm/รอบ) ต่อแรงบิด Torque (N.mm) ในการเจาะชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130 rpm



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟอิทธิพลของความเร็วรอบ (rpm) ต่อแรงบิด Torque (N.mm) ในการเจาะชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุน ที่อัตราการป้อนตัด 0.07 mm/รอบ

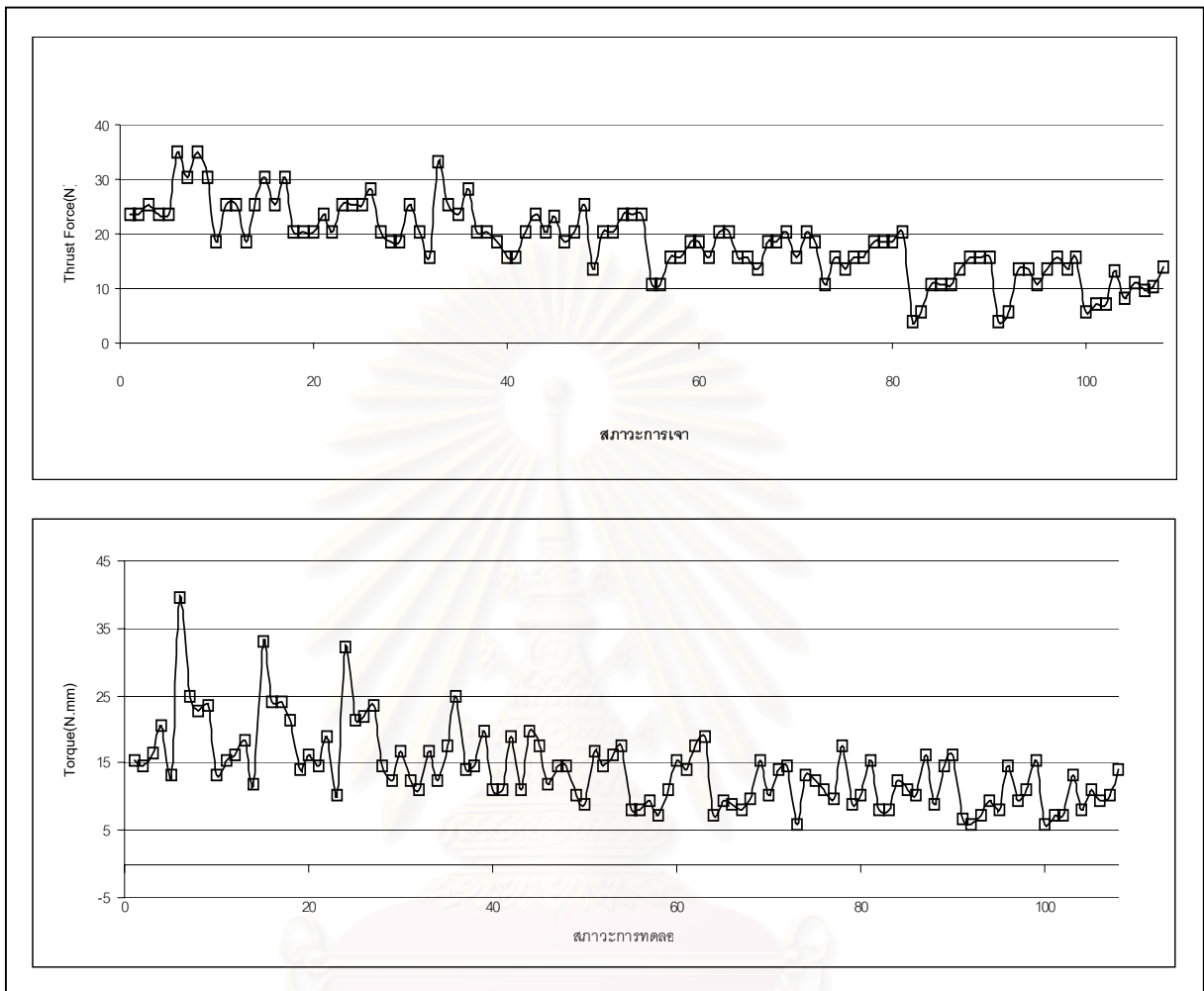
#### 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ตามหัวข้อที่ 3.6 โดยมีการแบ่งการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิด
2. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับปัจจัยควบคุมการเจาะ และคุณสมบัติชิ้นงาน
3. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติชิ้นงาน
4. ผลการเปรียบเทียบแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุปะการัง

##### 4.5.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิด

เมื่อนำข้อมูลแรงดัน และแรงบิดสร้างกราฟ เทียบกับสถานะในการทดสอบเดียวกัน จะพบว่าในสถานะการเจาะที่แรงดัน เพิ่มมากขึ้น แรงบิดมีจะมีค่ามาเช่นเดียวกัน สามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กับแรงบิดมีความสัมพันธ์กันในทางบวก ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงดัน และแรงบิดที่สภาวะการทดสอบเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับปัจจัยควบคุมการเจาะ และคุณสมบัติชิ้นงาน

เมื่อนำข้อมูลแรงในการเจาะ และคุณสมบัติวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุนที่วัดได้ มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ชื่อ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ช่วยในการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการ stepwise เป็นวิธีการเลือกตัวแปรนำเข้า จะได้ผลในการวิเคราะห์ดังนี้

##### 4.5.2.1 การวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน (Thrust Force) กับคุณสมบัติของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน

1) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน กับความหนาแน่น Bulk Density ( $\text{g/cm}^3$ )

เมื่อนำข้อมูลแรงดันในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสถานะ จากตารางที่ 4.6 และข้อมูลความหนาแน่นของวัสดุ จากตารางที่ 4.1 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.8

จากตารางที่ 4.8 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Thrust Force) กับความหนาแน่น (Bulk Density) ความเร็วรอบดอกสว่าน ( $n$ ) และอัตราการป้อนตัด ( $f$ ) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_1 = -293.326 X_3^2 + 997.727 X_3 + 0.0612 X_1 X_2 - 824.664 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $Y_1$  = แรงดัน Thrust Force (N)

$X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm

$X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ

$X_3$  = ความหนาแน่นบัลค์ ( $\text{g/cm}^3$ )

จากสมการถดถอยสมการที่ 4.1 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่า 81.30 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 2.3174

ตารางที่ 4.8 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงดัน Thrust Force (N) กับความหนาแน่น Bulk Density ( $\text{g/cm}^3$ )

Dependent Variable : THRUST					
Multiple R	0.902				
R square	0.813				
Adjusted R square	0.789				
Standard Error	2.3174				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	536.693	3	178.898	33.31	0.000
Residual	123.521	23	5.370		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	-824.664	228.650		-3.607	.001
$X_3$	997.727	277.745	31.560	3.592	.002
$X_1 X_2$	6.128E-02	.012	.461	5.109	.000
$X_3^2$	-293.326	83.523	-30.854	-3.512	.002

**หมายเหตุ**

$Y_1$  = แรงดัน Thrust Force (N)

$X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm

$X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ

$X_3$  = ความหนาแน่นบัลค์ ( $\text{g/cm}^3$ )

n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

2) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน Thrust Force (N) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน %porosity (%)

เมื่อนำข้อมูลแรงดันในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสถานะ จากตารางที่ 4.6 และข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความพรุนของวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดพรุน จากตารางที่ 4.2 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.9

จากตารางที่ 4.9 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Thrust Force) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน (% Porosity) ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_1 = -0.524X_3 + 45.144X_2 - 0.0207X_1X_2 + 0.0003X_1X_3 + 25.216 \quad (4.2)$$

เมื่อ	$Y_1$	= แรงดัน Thrust Force (N)
	$X_1$	= ความเร็วดอกสว่าน (rpm)
	$X_2$	= อัตราการป้อนตัด (mm/รอบ)
	$X_3$	= เปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity (%)

จากสมการถดถอยสมการที่ 4.2 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 89.60 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 1.7625

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.9 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงดัน Thrust Force (N) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน

Dependent Variable : THRUST					
Multiple R	0.947				
R square	0.896				
Adjusted R square	0.878				
Standard Error	1.7625				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	591.874	4	147.969	47.634	0.000
Residual	68.340	22	3.106		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	25.216	1.246		20.230	.000
X <sub>3</sub>	-.524	0.046	-1.043	-11.323	.000
X <sub>2</sub>	45.144	12.974	.399	3.480	.002
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-2.072E-02	.021	-.156	-1.004	.326
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	2.771E-04	.000	.629	4.509	.000

- หมายเหตุ**
- Y<sub>1</sub> = แรงดัน Thrust Force (N)
  - X<sub>1</sub> = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm
  - X<sub>2</sub> = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ
  - X<sub>3</sub> = เปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity (%)
  - n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

3) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน Thrust Force (N) กับความแข็ง Hardness (HV)

เมื่อนำข้อมูลแรงดันในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสถานะ จากตารางที่ 4.6 และข้อมูลความแข็ง Hardness (HV) ของวัสดุ จากตารางที่ 4.3 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.10

จากตารางที่ 4.10 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Thrust Force) กับความแข็ง Hardness (HV) ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้ เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_1 = 0.0077X_3^2 + 0.061X_1X_2 + 8.164 \quad (4.3)$$

เมื่อ  $Y_1$  = แรงดัน Thrust Force (N)  
 $X_1$  = ความเร็วรอบดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm  
 $X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ  
 $X_3$  = ความแข็ง Hardness (HV)

จากสมการถดถอย สมการที่ 4.3 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 80.50 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 2.3165

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงดัน Thrust Force (N) กับความแข็ง Hardness (HV)

Dependent Variable : THRUST					
Multiple R	0.897				
R square	0.805				
Adjusted R square	0.789				
Standard Error	2.3165				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	531.427	2	265.713	49.517	.000
Residual	128.788	24	5.366		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	8.614	.930		9.262	.000
$X_3^2$	7.672E-04	.000	.770	8.539	.000
$X_1 X_2$	6.128E-02	.012	.461	5.111	.000

**หมายเหตุ**

- $Y_1$  = แรงดัน Thrust Force (N)  
 $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm  
 $X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ  
 $X_3$  = ความแข็ง Hardness (HV)  
n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

4) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน Thrust Force (N) กับความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

เมื่อนำข้อมูลแรงดันในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสภาวะ จากตารางที่ 4.6 และความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa) ของวัสดุ จากตารางที่ 4.4 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ในแสดงตารางที่ 4.11

จากตารางที่ 4.11 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Thrust Force) กับความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa) ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_1 = 0.0488 X_3^2 + .0613 X_1 X_2 + 8.462 \quad (4.4)$$

เมื่อ  $Y_1$  = แรงดัน Thrust Force (N)  
 $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm  
 $X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ  
 $X_3$  = ความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

จากสมการถดถอย สมการที่ 4.4 สามารถประมาณการแรงดันในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 80.60 % และมีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 2.3073

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงดัน Thrust Force (N) กับความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

Dependent Variable : THRUST					
Multiple R	0.898				
R square	0.806				
Adjusted R square	0.790				
Standard Error	2.3073				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	532.442	2	266.221	50.005	.000
Residual	127.773	24	5.324		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	8.462	.938		9.020	.000
$X_3^2$	4.881E-02	.006	.771	8.584	.000
$X_1 X_2$	6.128E-02	.012	.461	5.132	.000

- หมายเหตุ**
- $Y_1$  = แรงดัน Thrust Force (N)
  - $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm
  - $X_2$  = อัตราการป้อนดัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ
  - $X_3$  = ความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)
  - n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

5) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงดัน Thrust Force (N) กับโมดูลัส Modulus (GPa)

เมื่อนำข้อมูลแรงดันในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสถานะ จากตารางที่ 4.6 และข้อมูลค่าโมดูลัส Modulus (GPa) ของวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุน จากตารางที่ 4.5 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.12

จากตารางที่ 4.12 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Thrust Force) กับโมดูลัส Modulus (GPa) ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_1 = -35.533 X_3^2 + 0.0613 X_1 X_2 + 125.175 X_3 - 79.075 \quad (4.5)$$

เมื่อ	$Y_1$	= แรงดัน Thrust Force (N)
	$X_1$	= ความเร็วรอบดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm
	$X_2$	= อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ
	$X_3$	= โมดูลัส Modulus (GPa)

จากสมการถดถอยสมการที่ 4.5 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 81.30 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 2.3174

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงดัน กับโมดูลัส Modulus (GPa)

Dependent Variable : THRUST					
Multiple R	0.902				
R square	0.813				
Adjusted R square	0.789				
Standard Error	2.3174				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	536.693	3	178.898	33.311	.000
Residual	123.521	23	5.370		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	-79.075	22.071		-3.583	.002
$X_3^2$	-35.533	9.187	-15.151	-3.868	.001
$X_1 X_2$	6.128E-02	.012	.461	5.109	.000
$X_3$	125.175	30.960	15.151	4.043	.001

- หมายเหตุ
- $Y_1$  = แรงดัน Thrust Force (N)
  - $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm
  - $X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ
  - $X_3$  = โมดูลัส Modulus (GPa)
  - n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)



#### 4.5.2.2 การวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด Torque(N.mm.) กับคุณสมบัติของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน

1) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด Torque(N.mm.) กับความหนาแน่นบัลค์

เมื่อนำข้อมูลแรงบิดในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสถานะ จากตารางที่ 4.7 และข้อมูลความหนาแน่นของวัสดุ จากตารางที่ 4.1 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.13

จากตารางที่ 4.13 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด Torque(N.mm.) กับความหนาแน่น (Bulk Density) ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_2 = 0.051 X_1X_2 + 13.379 X_2X_3 + 11.052X_3 - 9.402 \quad (4.6)$$

เมื่อ	$Y_2$	= แรงบิด Torque (N.mm.)
	$X_1$	= ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm
	$X_2$	= อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ
	$X_3$	= ความหนาแน่น Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )

จากสมการถดถอยสมการที่ 4.6 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square, R<sup>2</sup>) มีค่าเท่ากับ 81.70 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 1.6417

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงบิด Torque (N.mm.) กับความหนาแน่น Bulk Density ( $\text{g/cm}^3$ )

Dependent Variable : TORQUE					
Multiple R	0.904				
R square	0.817				
Adjusted R square	0.794				
Standard Error	1.6417				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	277.447	3	92.482	34.315	0.000
Residual	61.987	23	2.695		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	-9.402	3.296		-2853	.009
X <sub>3</sub>	11.053	2.070	.488	5.340	.000
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	5.139E-02	.011	.539	4.892	.000
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	13.379	5532	.271	2.418	.024

**หมายเหตุ**

- Y<sub>2</sub> = แรงบิด Torque (N.mm.)  
 X<sub>1</sub> = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm  
 X<sub>2</sub> = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ  
 X<sub>3</sub> = ความหนาแน่น Bulk Density ( $\text{g/cm}^3$ )  
 n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

2) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด Torque(N.mm.) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity

เมื่อนำข้อมูลแรงบิดในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสภาวะ จากตารางที่ 4.7 และข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity ของวัสดุ จากตารางที่ 4.2 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.14

จากตารางที่ 4.14 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด Torque(N.mm.) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_2 = 0.013X_3^2 + 115.26X_2^2 + 0.052X_1X_2 - 0.985X_3 + 25.64 \quad (4.7)$$

เมื่อ  $Y_2$  = แรงบิด Torque (N.mm.)  
 $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm  
 $X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ  
 $X_3$  = เปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity

จากสมการถดถอยสมการที่ 4.7 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 82.10 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 1.6617

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงบิด Torque (N.mm.) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity

Dependent Variable: TORQUE					
Multiple R	0.906				
R square	0.821				
Adjusted R square	0.788				
Standard Error	1.6617				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	278.684	4	69.671	25.230	0.000
Residual	60.751	22	2.761		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	25.640	4.654		5.509	.000
$X_3^2$	1300E-02	.005	2.252	2.487	.021
$X_2^2$	115.260	49.660	.258	2.321	.030
$X_1 X_2$	5.194E-02	.011	.545	4.899	.000
$X_3$	-.985	.326	-2.734	-3.019	.006

หมายเหตุ  $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน (rpm)  
 $X_2$  = อัตราการป้อนตัด (mm/รอบ)  
 $X_3$  = เปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity  
n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

3) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด Torque(N.mm.) กับความแข็ง Hardness (HV)

เมื่อนำข้อมูลแรงบิดในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสภาวะ จากตารางที่ 4.7 และข้อมูลความแข็ง Hardness (HV)ของวัสดุ จากตารางที่ 4.3 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.15

จากตารางที่ 4.15 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด Torque(N.mm.) กับความแข็ง Hardness (HV) ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_2 = 0.550 X_1 X_3 + 0.0047 X_2 + 6.439 \quad (4.8)$$

เมื่อ  $Y_2$  = แรงบิด Torque (N.mm.)  
 $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm  
 $X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ  
 $X_3$  = ความแข็ง Hardness (HV)

จากสมการถดถอยสมการที่ 4.8 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 72.30 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 1.9795

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.15 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงบิด Torque(N.mm.) กับความแข็ง Hardness (HV)

Dependent Variable : TORQUE					
Multiple R	0.850				
R square	0.723				
Adjusted R square	0.700				
Standard Error	1.9795				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	245.393	2	122.696	31.313	0.000
Residual	94.042	24	39.18		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	6.439	.867		7.422	.000
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	.550	.080	.735	6.839	.000
X <sub>2</sub>	4.683E-03	.001	.428	3.928	.001

**หมายเหตุ** Y<sub>2</sub> = แรงบิด Torque (N.mm.)

X<sub>1</sub> = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm

X<sub>2</sub> = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ

X<sub>3</sub> = ความแข็ง Hardness (HV)

n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

4) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด Torque(N.mm.) กับความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

เมื่อนำข้อมูลแรงบิดในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสถานะ จากตารางที่ 4.7 และข้อมูลความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa) ของวัสดุ จากตารางที่ 4.4 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล จะได้ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.16

จากตารางที่ 4.16 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด Torque(N.mm.) กับความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa) ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_2 = 4.437 X_2 X_3 + 0.0047 X_1 + 6.319 \quad (4.9)$$

เมื่อ  $Y_2$  = แรงบิด Torque (N.mm.)  
 $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm  
 $X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ  
 $X_3$  = ความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

จากสมการถดถอยสมการที่ 4.9 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 73.00 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 1.9555

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.16 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงบิด Torque(N.mm.) กับความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

Dependent Variable : TORQUE					
Multiple R	0.854				
R square	0.730				
Adjusted R square	0.707				
Standard Error	1.9555				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	247.655	2	123.827	32.130	.000
Residual	91.780	24	3.824		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	6.319	.865		7.302	.000
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	4.437	.637	.739	6.965	.000
X <sub>1</sub>	4.683E-03	.001	.484	4.031	.000

หมายเหตุ

Y<sub>2</sub> = แรงบิด Torque (N.mm.)

X<sub>1</sub> = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm

X<sub>2</sub> = อัตราการป้อนดัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ

X<sub>3</sub> = ความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

5) การวิเคราะห์การถดถอยของแรงบิด Torque(N.mm.) กับโมดูลัส Modulus (GPa)

เมื่อนำข้อมูลแรงบิดในการเจาะที่วัดได้ในแต่ละสถานะ จากตารางที่ 4.7 และข้อมูลค่าโมดูลัส Modulus (GPa) ของวัสดุ จากตารางที่ 4.5 มาทำการวิเคราะห์การถดถอย จะได้ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.17

จากตารางที่ 4.14 จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด Torque(N.mm.) กับโมดูลัส Modulus (GPa) ความเร็วรอบดอกสว่าน (n) และอัตราการป้อนตัด (f) ได้เป็นสมการถดถอยดังนี้

$$Y_2 = 31.559X_2X_3 + 0.0047X_1 + 6.126 \quad (4.10)$$

เมื่อ  $Y_2$  = แรงบิด Torque (N.mm.)  
 $X_1$  = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm  
 $X_2$  = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ  
 $X_3$  = โมดูลัส Modulus (GPa)

จากสมการถดถอยสมการที่ 4.10 สามารถประมาณการแรงในการเจาะได้ เนื่องจากค่า (R square,  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 77.40 % มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณการ (Standard Error) เท่ากับ 1.7887

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.17 ตารางการวิเคราะห์ การถดถอยของแรงบิด Torque (N.mm.) กับโมดูลัส Modulus (GPa)

Dependent Variable : TORQUE					
Multiple R	0.880				
R square	0.774				
Adjusted R square	0.755				
Standard Error	1.7887				
Analysis of Variance					
	Sum of Square	DF	Mean Square	F	Sig
Regression	262.648	1	131.324	41.046	0.000
Residual	76.786	24	3.199		
Coefficients					
Variable	B	SE B	Beta	t	Sig
(Constant)	6.126	.795		7.702	.000
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	31.559	3.987	.769	7.916	.000
X <sub>1</sub>	4.683E-03	.001	.428	4.407	.000

**หมายเหตุ**

Y<sub>2</sub> = แรงบิด Torque (N.mm.)

X<sub>1</sub> = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm

X<sub>2</sub> = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ

X<sub>3</sub> = โมดูลัส Modulus (GPa)

n = จำนวนชุดข้อมูล (เท่ากับ 81 ชุดข้อมูล)

#### 4.5.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน สามารถประมาณการแรงดัน Thrust Force และแรงบิด Torque ในกระบวนการเจาะได้ เพื่อให้อธิบายความสัมพันธ์ได้ดียิ่งขึ้น โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติของวัสดุ อธิบายได้จากกราฟความสัมพันธ์ใน รูปที่ 4.21 ถึง 4.30 โดยจะแบ่งเป็นความสัมพันธ์ ตามชนิดของแรงในการเจาะดังนี้

- 1) ความสัมพันธ์ของแรงดัน Thrust Force กับคุณสมบัติวัสดุ
- 2) ความสัมพันธ์ของแรงบิด Torque กับคุณสมบัติวัสดุ

##### 4.5.3.1 แนวโน้มของแรงดัน Thrust Force กับคุณสมบัติของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน

ในการพิจารณาความสัมพันธ์ จะแบ่งการพิจารณาออกตามคุณสมบัติของวัสดุ HA ชนิดที่มีรูพรุนดังนี้ ความหนาแน่น Bulk Density ( $\text{g/cm}^3$ ) เปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity (%) ความแข็ง Hardness (HV) ความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa) และโมดูลัส Modulus (GPa) ในการพิจารณา จะจำกัดสภาวะในการเจาะ ที่ความเร็วรอบ 130 – 920 rpm ที่อัตราการป้อนตัด 0.035 – 0.14 mm/รอบ ขนาดดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ชนิด HSS พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในการเจาะ กับคุณสมบัติชิ้นงาน HA มีดังต่อไปนี้

- 1) แนวโน้มในการเกิดแรงดัน Thrust Force กับความหนาแน่น Bulk Density

จากรูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงระหว่าง แรงดัน Thrust Force (N) กับความหนาแน่นบัลค์ มีค่า ( $R^2$ ) เท่ากับ 83.31%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.21 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้แรงดัน Thrust Force มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย

- 2) แนวโน้มในการเกิดแรงดัน Thrust Force กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity (%)

จากรูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงดัน Thrust Force (N) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity(%) ( $R^2$ ) เท่ากับ 98.34%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.22 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน เพิ่มมากขึ้น จะทำให้แรงดัน Thrust Force มีแนวโน้มลดลง

3) แนวโน้มในการเกิดแรงดัน Thrust Force กับความแข็ง Hardness (HV)

จากรูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงระหว่าง แรงดัน Thrust Force (N) กับความแข็ง มีค่า ( $R^2$ ) เท่ากับ 93.88%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.23 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าความแข็ง มากขึ้น จะทำให้แรงดัน Thrust Force มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย

4) แนวโน้มในการเกิดแรงดัน Thrust Force กับความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa)

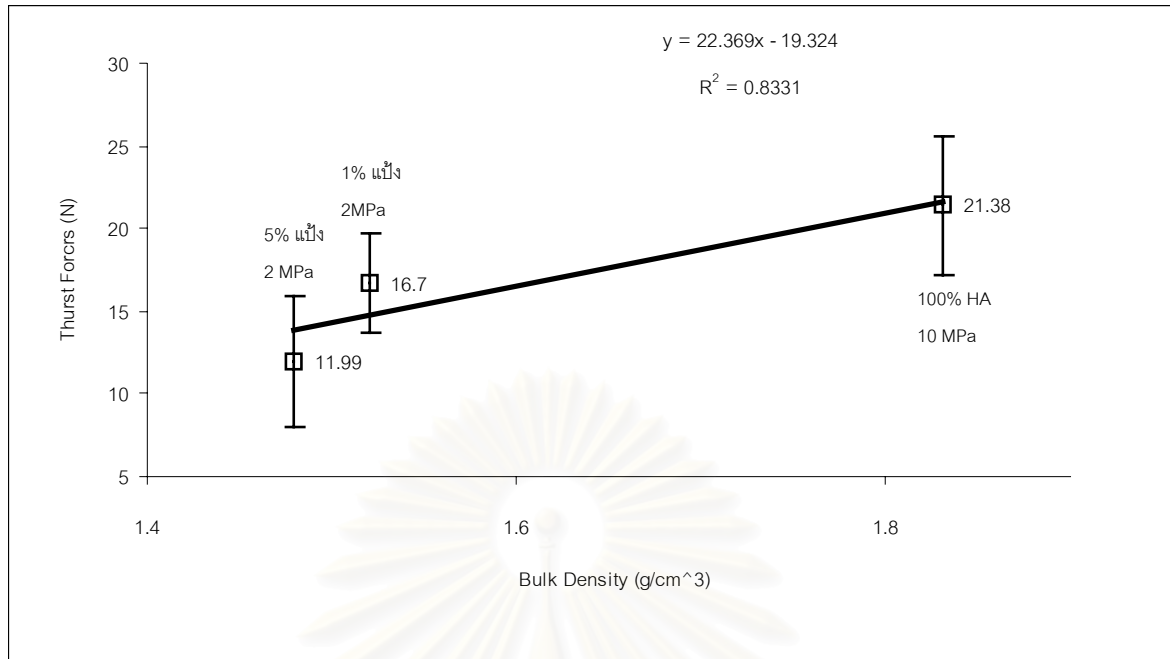
จากรูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงระหว่าง แรงดัน Thrust Force (N) กับความแข็งแรงดัด มีค่า ( $R^2$ ) เท่ากับ 94.61%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.24 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุน มีค่าความแข็งแรงดัดมากขึ้น จะทำให้แรงดัน Thrust Force มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย

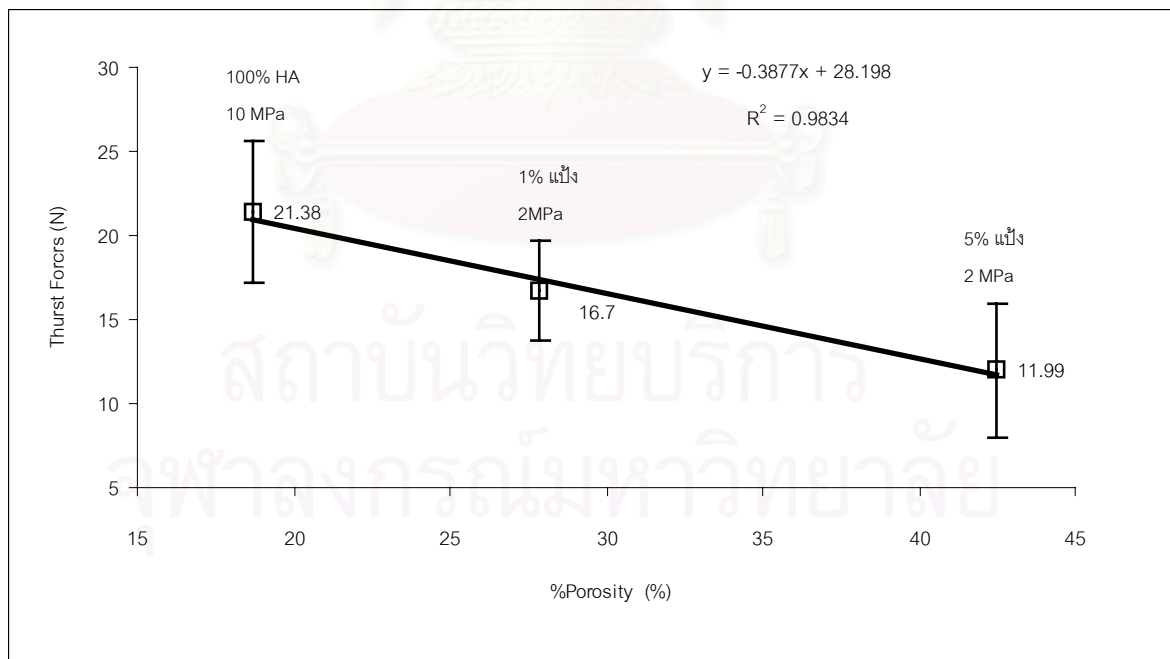
5) แนวโน้มในการเกิดแรงดัน Thrust Force กับโมดูลัส Modulus (GPa)

จากรูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงระหว่าง แรงดัน Thrust Force (N) กับโมดูลัส มีค่า ( $R^2$ ) เท่ากับ 79.76%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.29 และ 4.30 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าโมดูลัส มากขึ้น จะทำให้แรงดัน Thrust Force มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย

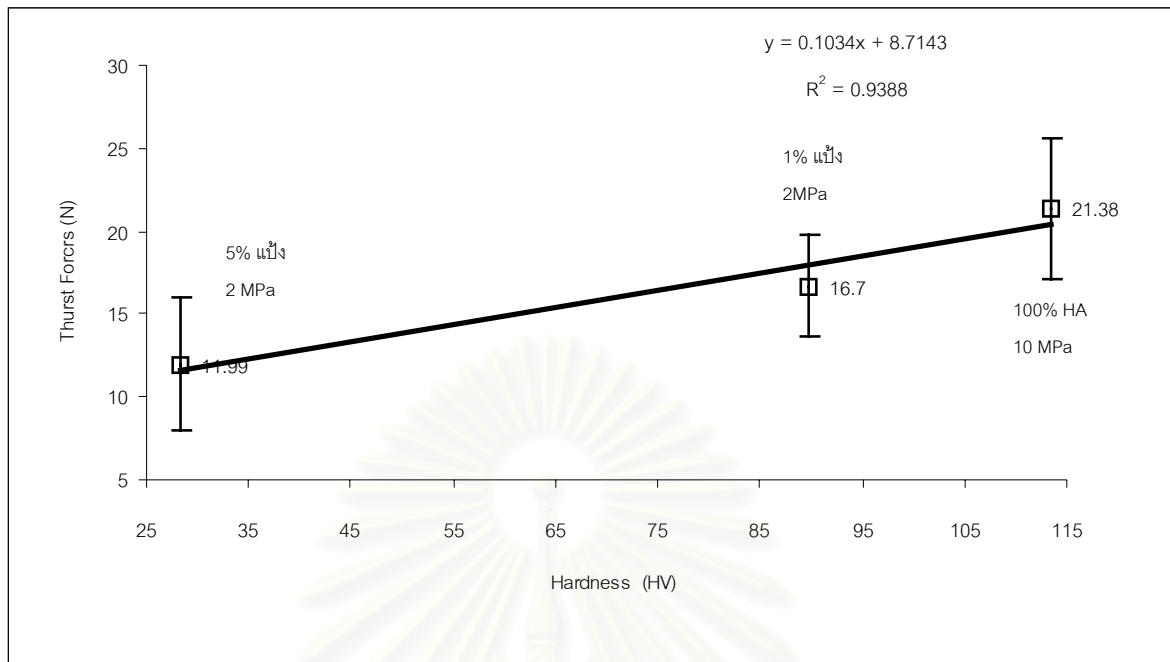


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงดัน(Thrust Forces, N) กับความหนาแน่นบัลค์ของวัสดุขึ้นงาน HA ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ขนาดดอกสว่าน เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

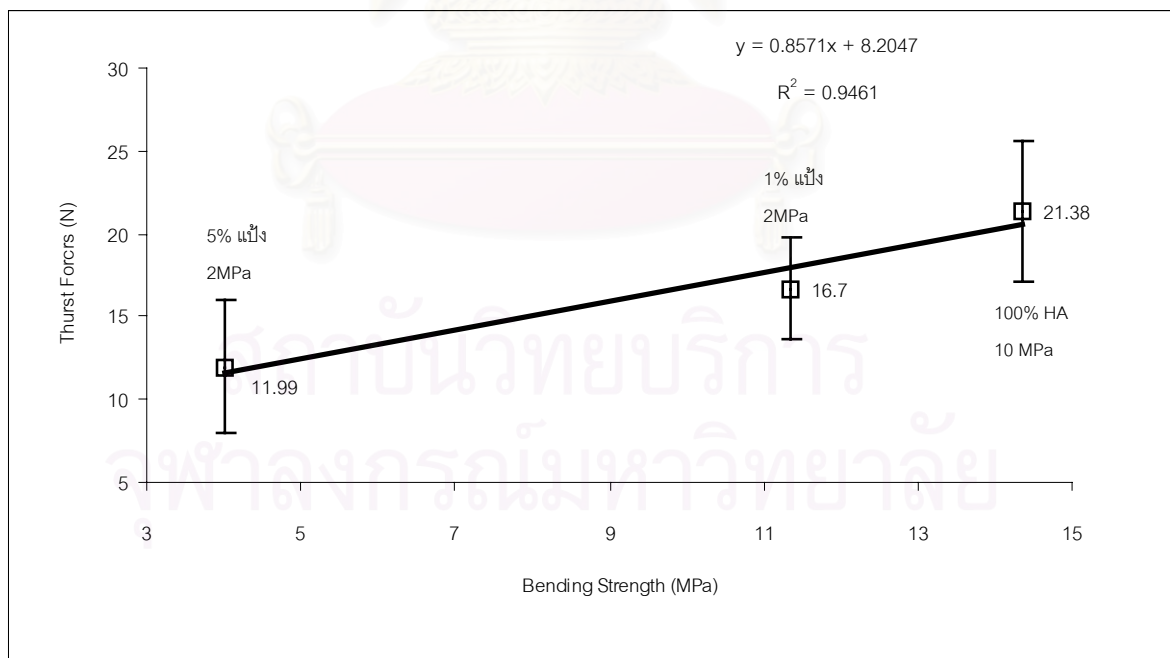


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ระหว่างแรงดัน(Thrust Forces) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

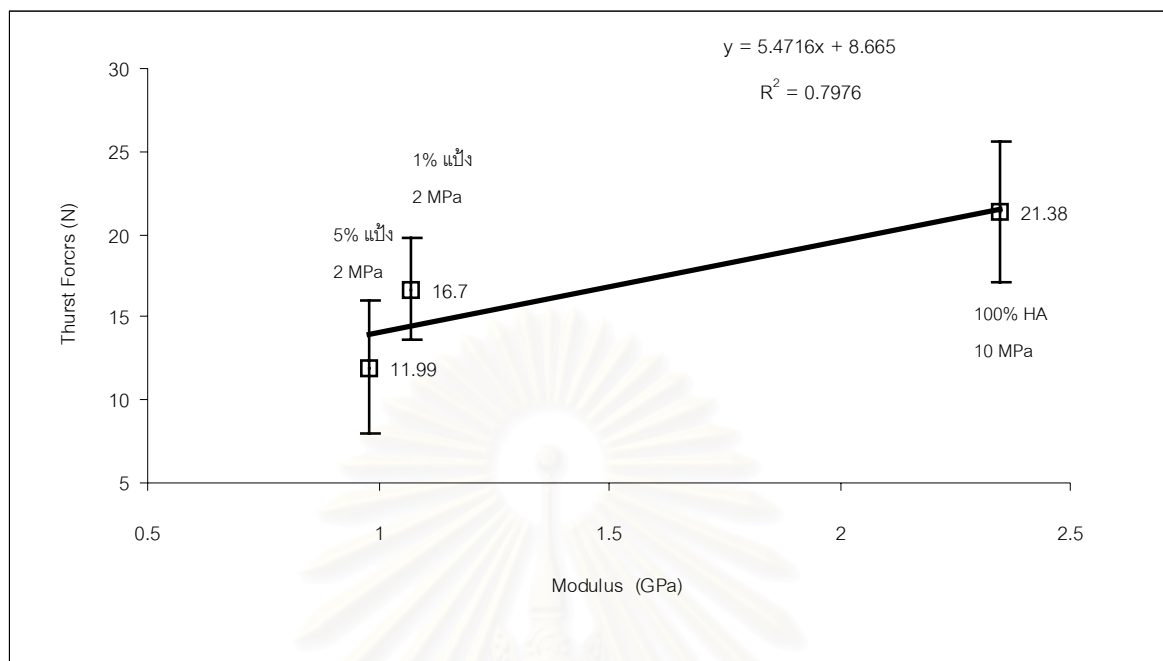




รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ระหว่างแรงดัน(Thrust Forces) กับความแข็งของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อน 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างแรงดัน(Thrust Forces) กับความแข็งแรงดัดของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนดัด 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงดัน (Thrust Forces) กับโมดูลัส ของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

#### 4.5.3.2 แนวโน้มของแรงบิด Torque กับคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุน

ในการพิจารณาความสัมพันธ์ จะแบ่งการพิจารณาออกตามคุณสมบัติของวัสดุ HA ชนิดที่มีรูพรุนดังนี้ ความหนาแน่น Bulk Density ( $\text{g/cm}^3$ ) เปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity (%) ความแข็ง Hardness (HV) ความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa) และโมดูลัส Modulus (GPa) ในการพิจารณา จะจำกัดสภาวะในการเจาะ ที่ความเร็วรอบ 130 – 920 rpm ที่ อัตราการป้อนตัด 0.035 – 0.14 mm/รอบ ขนาดดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ชนิด HSS

##### 1) แนวโน้มในการเกิดแรงบิด Torque กับความหนาแน่นบัลค์

จากรูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด Torque กับความหนาแน่นบัลค์ มี ( $R^2$ ) เท่ากับ 97.68%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.26 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าความหนาแน่นบัลค์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้แรงบิด Torque มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

##### 2) แนวโน้มในการเกิดแรงบิด Torque (N.mm.) กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน

จากรูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด Torque กับเปอร์เซ็นต์ความพรุน มี ( $R^2$ ) เท่ากับ 84.61%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.27 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น จะทำแรงบิด Torque มีแนวโน้มลดลง

##### 3) แนวโน้มในการเกิดแรงบิด Torque (N.mm.) กับความแข็ง

จากรูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด Torque กับความแข็งมี ( $R^2$ ) เท่ากับ 74.96%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.28 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น จะทำให้แรงบิด Torque มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

#### 4) แนวโน้มในการเกิดแรงบิด Torque (N.mm.) กับความแข็งแรงดัด

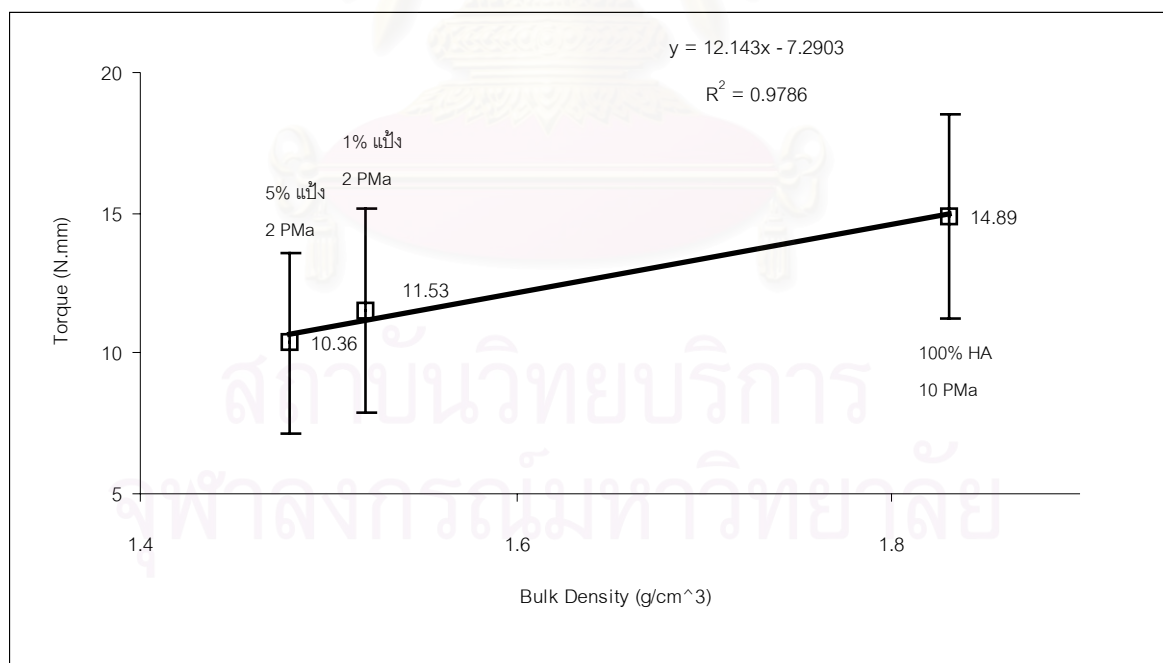
จากรูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด Torque กับความแข็งแรงดัด มี ( $R^2$ ) เท่ากับ 76.30%

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.29 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าความแข็งแรงดัด เพิ่มมากขึ้น จะทำให้แรงบิด Torque มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

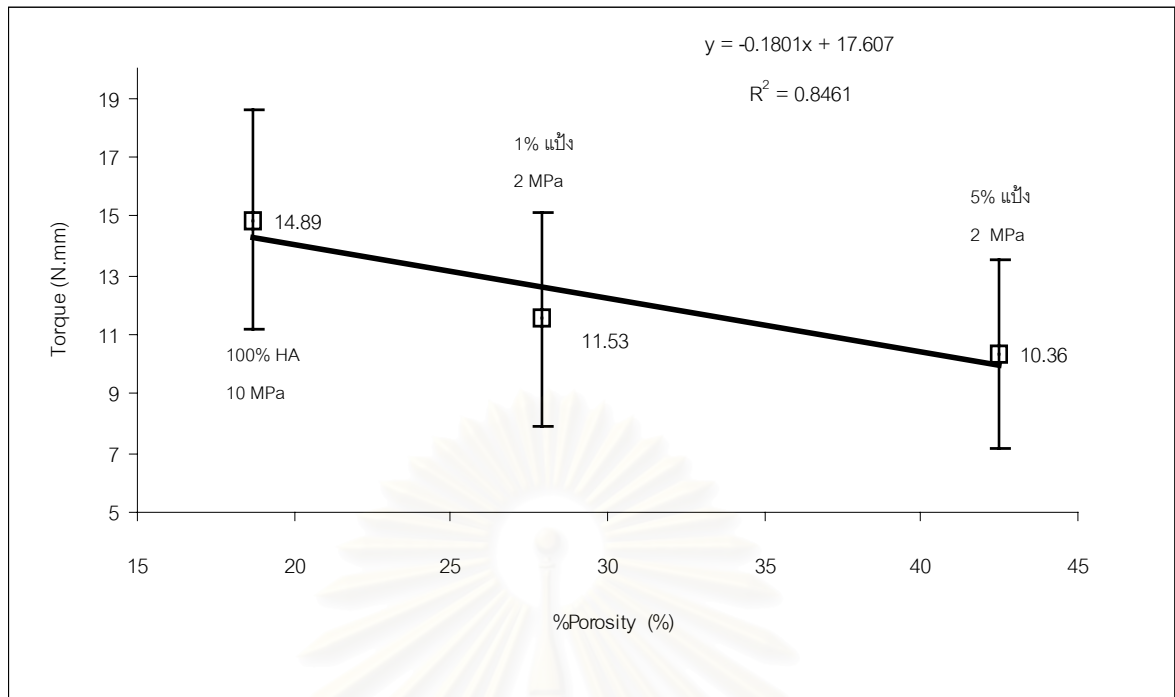
#### 5) แนวโน้มในการเกิดแรงบิด Torque (N.mm.) กับโมดูลัส Modulus (GPa)

จากรูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด Torque กับโมดูลัส มี ( $R^2$ ) เท่ากับ 96.33%

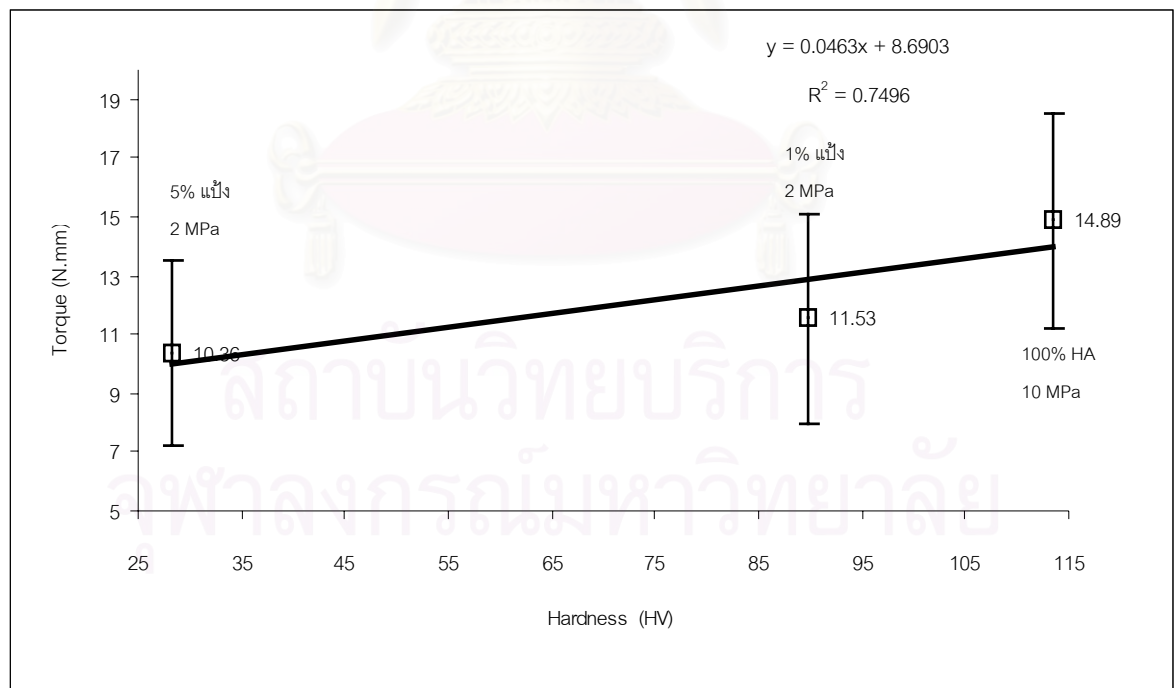
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.30 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุชิ้นงาน HA ชนิดมีรูพรุนมีค่าโมดูลัส เพิ่มมากขึ้น จะทำให้แรงบิด Torque มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย



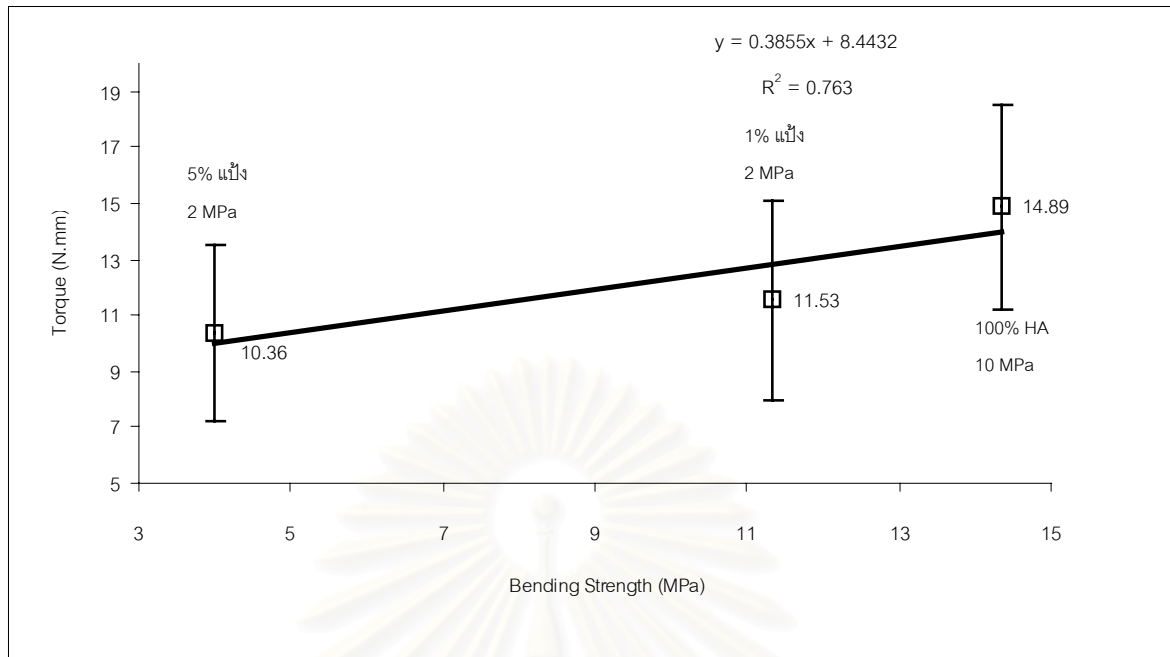
รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด Torque (N.mm.) กับความหนาแน่นบัลค์ ของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร



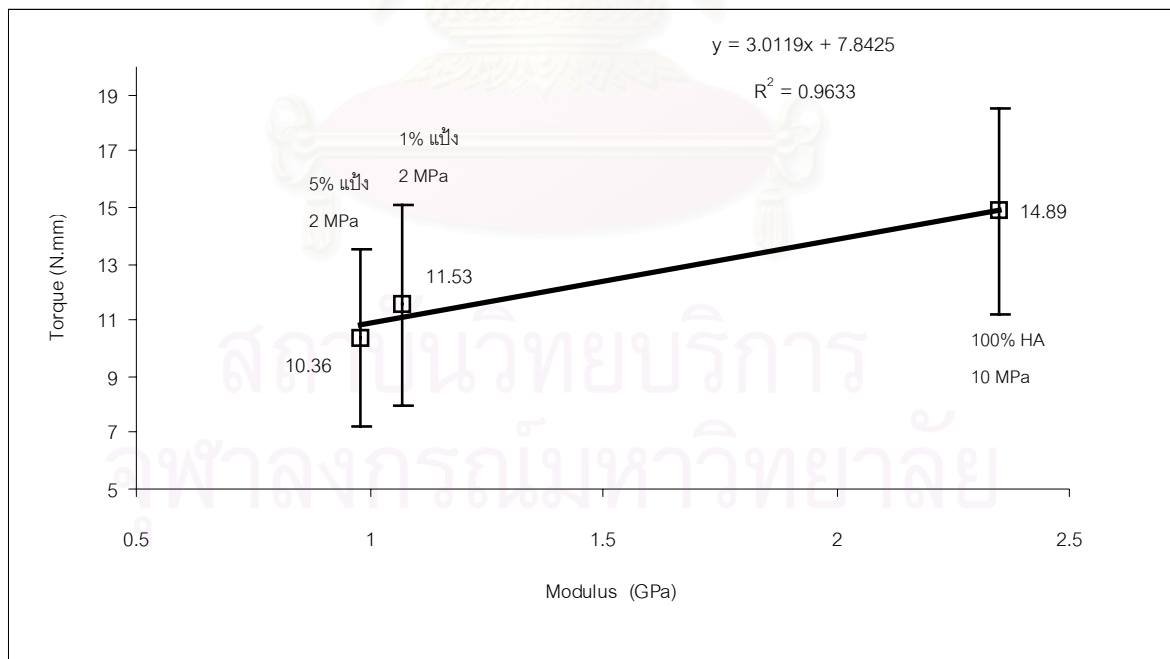
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด กับความแข็งของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร



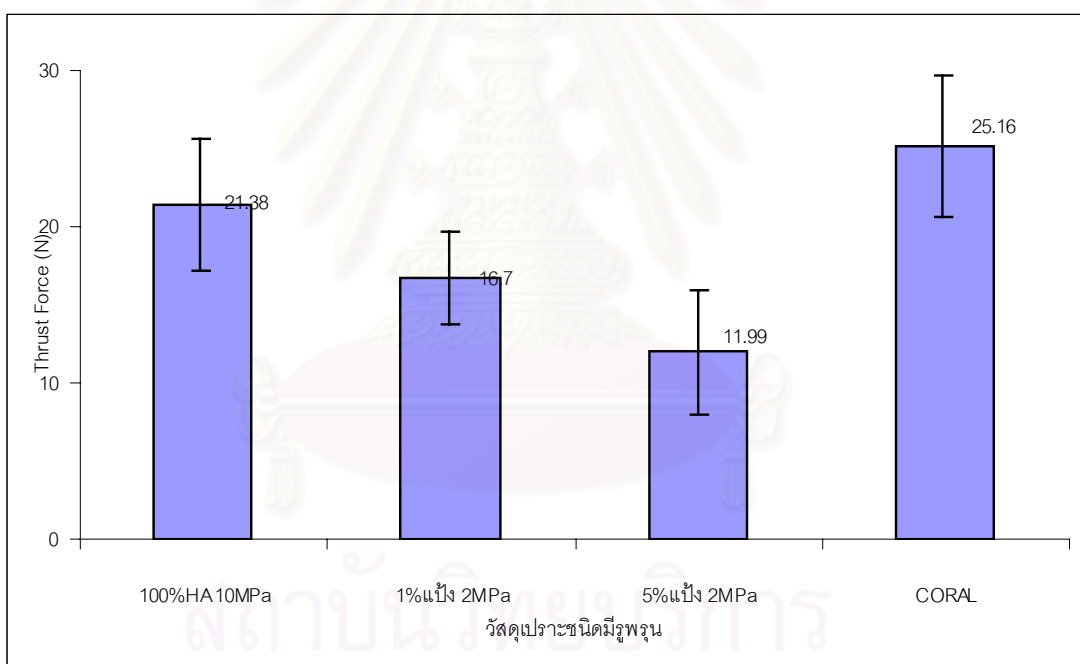
รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างแรงบิด กับความแข็งแรงดัด ของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง ระหว่างแรงบิด Torque(N.mm.) กับโมดูลัส ของวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

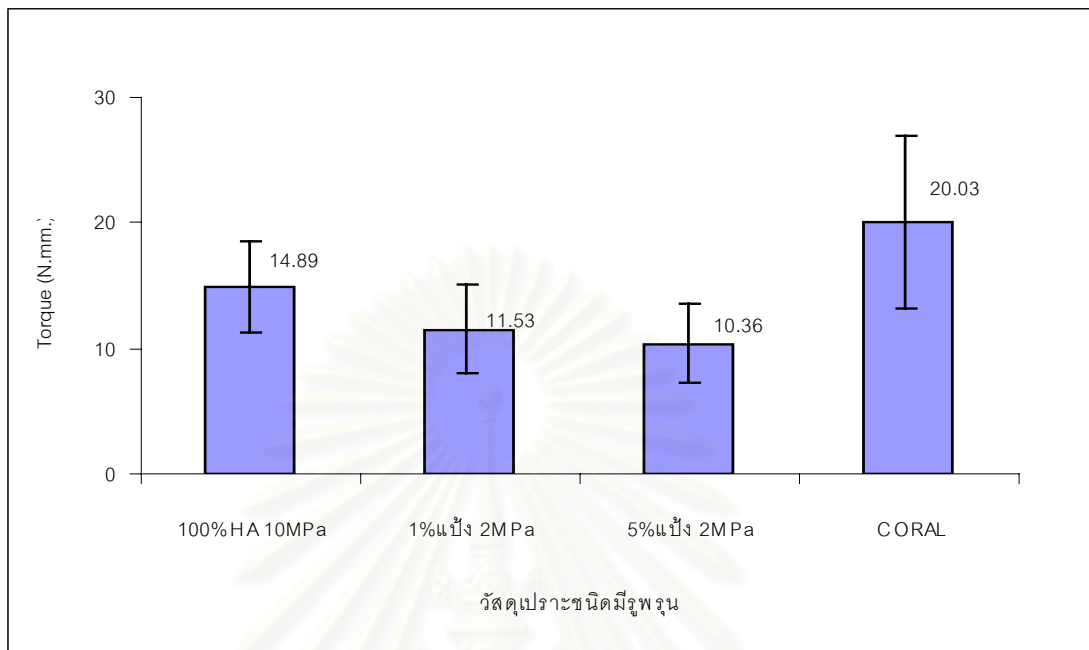
#### 4.5.4 ผลการเปรียบเทียบแรงในการเจาะวัสดุชิ้นงาน HA ที่ขึ้นรูป กับวัสดุกระจก

จะเป็นการเปรียบเทียบแรงในการเจาะของวัสดุที่ขึ้นรูปเอง กับวัสดุประกวกรังจากธรรมชาติ พบว่าวัสดุประกวกรังมีแรงดัน Thrust Force (N) มากกว่าวัสดุ HA ที่ขึ้นรูปเองถึง 1.5เท่า ดังแสดงในกราฟแท่งในรูปที่ 4.41 และยังพบว่าวัสดุประกวกรังมีแรงบิด Torque (N.mm.) มากกว่าวัสดุ HA 1.7 เท่า ดังแสดงในกราฟแท่งรูปที่ 4.42 โดยจำกัดสภาวะในการเจาะ ที่ความเร็วรอบ 130 – 920 rpm ที่อัตราการป้อนตัด 0.035 – 0.14 mm/รอบ ขนาดดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ชนิด HSS



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟแท่งเปรียบเทียบแรงดัน Thrust Force (N) ของวัสดุ HA ที่ขึ้นรูปเอง กับวัสดุประกวกรังธรรมชาติ





รูปที่ 4.32 แสดงกราฟแท่งเปรียบเทียบแรงบิด Torque (N.mm.) ของวัสดุ HA ที่ขึ้นรูปเอง กับวัสดุ  
ปะการังธรรมชาติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.6 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน HA และสมการที่สามารถประมาณการแรงในการเจาะ

จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ การวัดแรงในการเจาะ และการวิเคราะห์การถดถอยระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติของวัสดุเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับประมาณการแรงในการเจาะ มีผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

จากผลการทดลองคุณสมบัติของชิ้นงาน HA และวัสดุปะการัง ในตารางที่ 4.1 ถึง 4.5 สามารถสรุปเป็นคุณสมบัติของวัสดุดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ตารางสรุปคุณสมบัติของวัสดุประเภทหินมีรูพรุน

วัสดุ	%Porosity (%)		Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )		Hardness (HV)		Bending (MPa)		Modulus (GPa)	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
100%HA1 0MPa	18.68	0.52	1.83	0.03	113.42	7.70	14.36	6.87	2.35	0.53
1%แป้ง 2MPa	27.87	3.28	1.52	0.03	89.80	12.40	11.34	1.67	1.07	0.41
5%แป้ง 2MPa	42.49	9.59	1.48	0.04	28.20	7.10	4.00	0.93	0.98	0.46
ปะการัง	83.14	4.20	1.62	0.18	246.30	22.40	3.20	0.80	1.86	1.04

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบแรงในการเจาะชิ้นงาน HA และวัสดุปะการัง ในตารางที่ 4.6 ถึง 4.7 สามารถสรุปเป็นแรงในการเจาะ ดังแสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ตารางสรุปแรงในการเจาะของวัสดุประเภทชนิดมีรูพรุน ที่สภาวะการเจาะ ความเร็วรอบดอกสว่าน 130-920 rpm ที่อัตราการป้อนตัด 0.035-0.14 mm/รอบ ขนาดดอกสว่าน 3 มิลลิเมตร ชนิด HSS.

วัสดุ	Thrust Force (N)		Torque (N.mm.)	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
100%HA10MPa 1100 c°	21.38	4.2	14.89	3.66
1%แป้ง 2MPa 1100 c°	16.70	3.02	11.53	3.60
5%แป้ง 2MPa 1100 c°	11.99	3.99	10.36	3.18
ปะการัง	25.16	4.49	20.03	6.90

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยระหว่างแรงดัน(Thrust Force) กับคุณสมบัติของชิ้นงาน HA ในตารางที่ 4.8 ถึง 4.12 สามารถสรุปเป็นสมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 ดังแสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ตารางสรุปสมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 จากการวิเคราะห์การถดถอยข้อมูลแรงดัน

Thrust Force (N)

ลำดับ	ตัวแปร (X)	หน่วย	สมการโพลีโนเมียลดีกรี 2	R <sup>2</sup>
1	X <sub>3</sub> = Bulk Density	g/cm <sup>3</sup>	Y <sub>1</sub> = -293.326x <sub>3</sub> <sup>2</sup> +997.727X <sub>3</sub> +0.0612X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> -824.664	0.813
2	X <sub>4</sub> = %Porosity	%	Y <sub>1</sub> = -0.524X <sub>4</sub> +45.144X <sub>2</sub> - 0.027X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> +0.0003X <sub>1</sub> X <sub>4</sub> +25.216	0.896
3	X <sub>5</sub> = Hardness	HV	Y <sub>1</sub> = 0.0077X <sub>5</sub> <sup>2</sup> + 0.061X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> + 8.164	0.805
4	X <sub>6</sub> = Bending	MPa	Y <sub>1</sub> = 0.0488X <sub>5</sub> <sup>2</sup> + 0.613 X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> + 8.46	0.806
5	X <sub>7</sub> = Modulus	GPa	Y <sub>1</sub> = -35.533 X <sub>3</sub> <sup>2</sup> + 0.0613 X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> + 125.175 X <sub>3</sub> - 7.9075	0.813

**หมายเหตุ**

Y<sub>1</sub> = แรงดัน Thrust Force (N)

X<sub>1</sub> = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm

X<sub>2</sub> = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยระหว่างแรงบิด(Torque) กับคุณสมบัติของชิ้นงาน HA ในตารางที่4.13 ถึง4.17 สามารถสรุปเป็นสมการโพลีโนเมียลดีกรี2 ดังแสดงในตารางที่4.21

ตารางที่ 4.21 ตารางสรุปสมการโพลีโนเมียลดีกรี2 จากการวิเคราะห์การถดถอยข้อมูลแรงบิด Torque (N.mm.)

ลำดับ	ตัวแปร (X)	หน่วย	สมการโพลีโนเมียลดีกรี 2	R <sup>2</sup>
1	X <sub>3</sub> = Bulk Density	g/cm <sup>3</sup>	$Y_2 = 0.051 X_1 X_2 + 13.379 X_2 X_3 + 11.052 X_3 - 9.402$	0.817
2	X <sub>4</sub> = %Porosity	%	$Y_2 = 0.013 X_3^2 + 115.26 X_2^2 + 0.052 X_1 X_2 - 0.985 X_3 + 25.64$	0.821
3	X <sub>5</sub> = Hardness	HV	$Y_2 = 0.00004 X_1 X_5 + 0.32 X_2 X_5 + 8.677$	0.723
4	X <sub>6</sub> = Bending	MPa	$Y_2 = 0.550 X_1 X_3 + 0.0047 X_2 + 6.439$	0.730
5	X <sub>7</sub> = Modulus	GPa	$Y_2 = 4.437 X_2 X_3 + 0.0047 X_2 + 6.319$	0.774

หมายเหตุ Y<sub>2</sub> = แรงบิด Torque (N.mm.)

X<sub>1</sub> = ความเร็วดอกสว่าน ในช่วง 130 ถึง 920 rpm

X<sub>2</sub> = อัตราการป้อนตัด ในช่วง 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติของวัสดุ HA ในรูปที่ 4.21 ถึง 4.30 สามารถสรุปเป็นสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังแสดงในตารางที่ 4.22 และ 4.23

ตารางที่ 4.22 ตารางสรุปสมการเชิงเส้นตรง จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน Thrust Force (N) กับคุณสมบัติวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน

ลำดับ	ตัวแปร (X)	หน่วย	สมการเชิงเส้นตรง	R <sup>2</sup>
1	X <sub>1</sub> = Bulk Density	g/cm <sup>3</sup>	Y <sub>1</sub> = 22.369 X <sub>1</sub> - 19.324	0.833
2	X <sub>2</sub> = %Porosity	%	Y <sub>1</sub> = -0.3877 X <sub>2</sub> + 28.198	0.983
3	X <sub>3</sub> = Hardness	HV	Y <sub>1</sub> = 0.1034 X <sub>3</sub> + 8.7143	0.938
4	X <sub>4</sub> = Bending	MPa	Y <sub>1</sub> = 0.8571 X <sub>4</sub> + 8.2047	0.946
5	X <sub>5</sub> = Modulus	GPa	Y <sub>1</sub> = 5.4716X <sub>5</sub> + 8.665	0.797

หมายเหตุ Y<sub>1</sub> = แรงดัน Thrust Force (N)

ตารางที่ 4.23 ตารางสรุปสมการเชิงเส้นตรง จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด Torque (N.mm.) กับคุณสมบัติวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน

ลำดับ	ตัวแปร (X)	หน่วย	สมการเชิงเส้นตรง	R <sup>2</sup>
1	X <sub>1</sub> = Bulk Density	g/cm <sup>3</sup>	Y <sub>2</sub> = 12.143 X <sub>1</sub> - 7.2903	0.979
2	X <sub>2</sub> = %Porosity	%	Y <sub>2</sub> = -0.8461X <sub>2</sub> + 17.607	0.846
3	X <sub>3</sub> = Hardness	HV	Y <sub>2</sub> = 0.0463 X <sub>3</sub> + 8.6903	0.750
4	X <sub>4</sub> = Bending	MPa	Y <sub>2</sub> = 0.3855 X <sub>4</sub> + 8.4432	0.763
5	X <sub>5</sub> = Modulus	GPa	Y <sub>2</sub> = 3.0119 X <sub>5</sub> + 7.8425	0.963

หมายเหตุ Y<sub>2</sub> = แรงบิด Torque (N.mm.)

## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 การสังเคราะห์ผง Hydroxyapatite

จากการตรวจสอบเฟสของสาร HA โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะพบว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็นสาร Hydroxyapatite แต่เมื่อตรวจสอบรูปทรงด้วย SEM พบว่ามีขนาดใหญ่ และมีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งคุณสมบัติที่ได้ไม่เป็นไปตามคุณสมบัติ HA เริงพาณิชย์ ซึ่งมีคุณสมบัติของผงดังนี้ ขนาดตั้งแต่ 50 – 200  $\mu\text{m}$  มีรูปทรงกลม ซึ่งจากการสำรวจ ด้านราคาพบว่ามีความแพงมาก จึงไม่เหมาะ แก่การนำมาใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้

#### 5.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

เนื่องจากวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองไม่ใช่วัสดุทางการค้า ดังนั้นค่าคุณสมบัติด้านต่างๆที่ทดสอบได้จึงไม่มีมาตรฐานรับรอง อีกทั้งวิธีการขึ้นรูปเป็นเพียงกรรมวิธีที่คิดขึ้นเอง ผิดกับศึกษาจากรายงานการวิจัยหลายๆเล่มรวมกัน แต่จากผลการทดลองพบว่า คุณสมบัติทางกายภาพ เช่นความหนาแน่น เฟอร์เท็นต์ความพรุน ขนาดรูพรุนมีค่าใกล้เคียงกับรายงานหลายเล่ม แต่คุณสมบัติเชิงกลวัสดุที่ขึ้นรูปเองจะยังด้อยกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ผงวัสดุที่แตกต่างกัน แต่ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการขึ้นรูปเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติด้านต่างๆแตกต่างกันเท่านั้น จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประเภทนี้มีรูพรุน จะเห็นว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุในกลุ่มเซรามิกซึ่งในทางวัสดุศาสตร์มีช่วงในการยอมค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงถึง 30 เฟอร์เท็นต์ของค่าเฉลี่ย แต่ถ้าจะให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำลงจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนชิ้นงานในการทดสอบขึ้น

#### 5.2 ความสัมพันธ์ของแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติของวัสดุประเภทนี้มีรูพรุน

จากการทดสอบแรงในการเจาะ และนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์การถดถอยโดยการนำตัวแปรด้านคุณสมบัติของวัสดุแต่ละตัวเข้าไปทำการวิเคราะห์ จากผลการวิเคราะห์ จะสามารถตามตารางที่ 4.20 ถึง 4.21 พบว่าคุณสมบัติวัสดุชิ้นงาน HA สามารถนำไปประมาณการแรงดัน Thrust Force (N) และแรงบิด Torque (N.mm.) ในการเจาะได้ คุณสมบัติวัสดุที่สามารถใช้ประมาณการแรงในการเจาะ ได้แก่คุณสมบัติทางด้าน ความหนาแน่น บัลค์ เฟอร์เท็นต์ความ

พหุน ความแข็ง ความแข็งแรงดัด และโมดูลัส โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะเป็นแบบโพลีโนเมียล ดีกรี 2

ในการวิเคราะห์การถดถอย Regression Analysis เนื่องจากความยาวของสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบโพลีโนเมียล ดีกรี 2 ทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งาน ดังนั้นจึงทำการลดจำนวนตัวแปรนำเข้าไปปรากฏอยู่ในสมการลง โดยการตัดตัวแปรที่ไม่มีความจำเป็นต่อการประมาณการแรงในการเจาะออกจากสมการ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี Stepwise (The Stepwise Procedure) เป็นวิธีในการเลือกตัวแปรนำเข้าไป และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ชื่อ SPSS ช่วยในการวิเคราะห์ โดยพิจารณาตัวแปรนำตัวแรกจากค่า  $r$  (หรือ  $r^2$ ) ของตัวแปรที่มีค่าสูงที่สุดก่อน แล้วจึงพิจารณาเลือกตัวแปรนำตัวต่อไป จากค่า  $F$  (F Value) ที่สูงที่สุด และจะทำการตัดตัวแปรที่พบว่าไม่มีนัยสำคัญ ออกจากสมการ จนกระทั่งเหลือตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.01

จากสมการที่ใช้ในการประมาณการแรงในการเจาะซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองให้ใกล้เคียงกับการผ่าตัดเจาะตาเทียมมากที่สุด ซึ่งมีสภาวะในการเจาะต่างๆเช่น ความเร็วรอบดอกสว่าน ที่ 130 ถึง 920 rpm อัตราป้อนที่ 0.035 ถึง 0.14 mm/รอบ และดอกสว่านขนาด 3 มิลลิเมตร แต่ก็ยังมีสภาวะบางประการที่ไม่สามารถทำได้เช่น การจับยึดชิ้นงานซึ่งในการผ่าตัดจริงๆวัสดุจะสั่น และขยับได้เมื่อถูกแรงกระทำจากการเจาะ และอีกประการหนึ่งก็คือ ลักษณะของดอกสว่านซึ่งดอกสว่านที่ใช้ในการผ่าตัดจะมีคมตัดถึง 10 คมตัด เอียงทำมุมที่ปลาย  $45^\circ$  เพื่อลดแรงในการเจาะ จึงทำให้ค่าที่ทดสอบแรงในการเจาะในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าแรงที่ใช้เจาะในการผ่าตัดจริงๆ แต่ในสมการที่ได้ในงานวิจัยนี้สามารถประมาณการแรงในการเจาะวัสดุรูพรุนได้ เพื่อที่จะทดลองขึ้นรูปวัสดุรูพรุนตัวอื่นๆ ที่ใช้เป็นวัสดุตาเทียม ให้มีคุณสมบัติที่สามารถทนต่อแรงที่เกิดขึ้นจากการเจาะได้

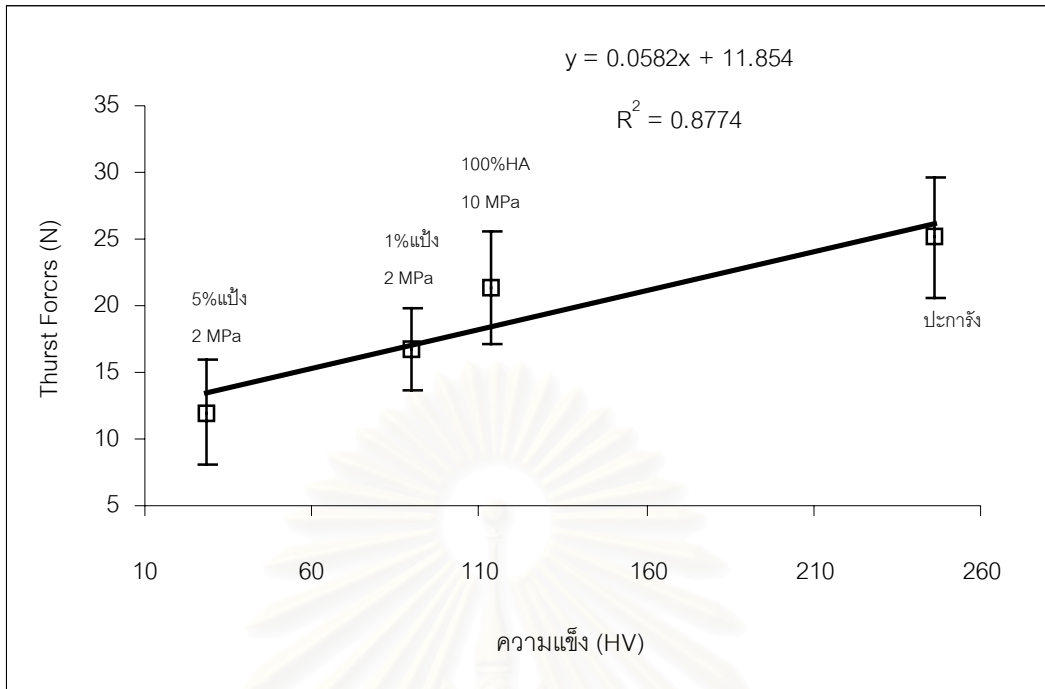
จากการวิเคราะห์แรงในการเจาะระหว่างวัสดุ HA ที่ขึ้นรูปเอง กับปะการังพบว่า ทั้งแรงดัน Thrust Force และแรงบิด Torque ในการเจาะปะการังจะมากกว่า เมื่อพิจารณาแรงในการเจาะเปรียบเทียบกับคุณสมบัติ ของวัสดุขึ้นงาน HA ที่ขึ้นรูปเอง กับวัสดุปะการัง พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มแรงดันในการเจาะจะลดลง แต่ปะการังนั้นมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนมากที่สุด กลับมีแรงดันในการเจาะมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุ 2 ชนิดแตกต่างกัน อธิบายได้จากความหนาแน่นที่ไม่เท่ากัน ดังนี้ วัสดุที่ขึ้นรูปเอง (HA) มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 29.68 % มีความหนาแน่น Bulk Density เฉลี่ย  $1.61 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งเป็นความ



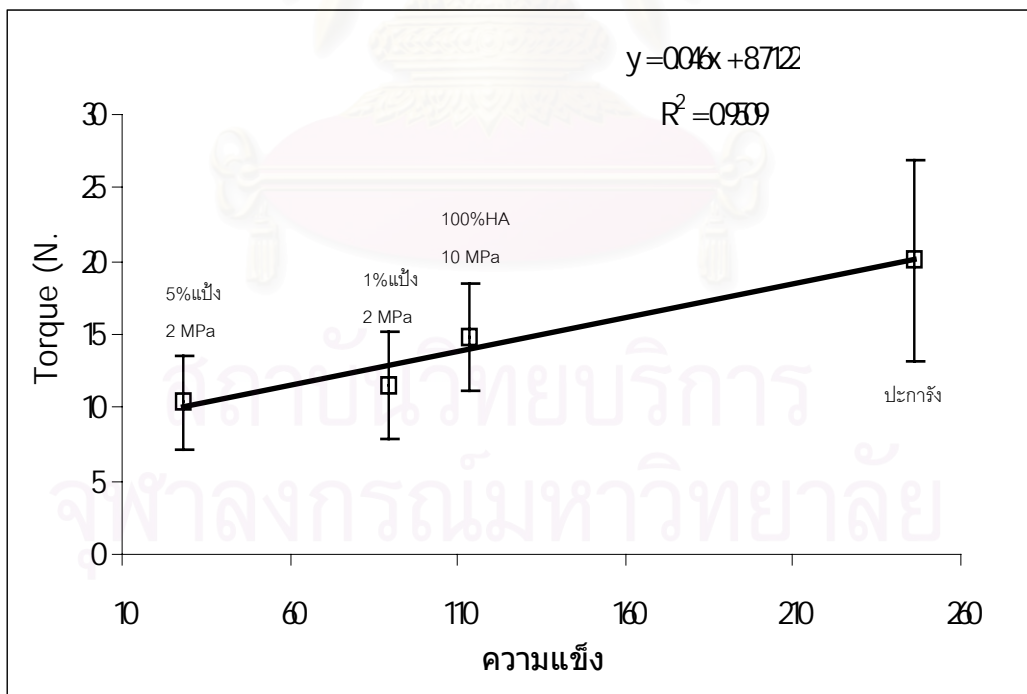
หนาแน่นที่รวมโพรงอากาศด้วย แต่เมื่อคิดความหนาแน่นที่เนื้อวัสดุจริง (เป็นค่าโดยประมาณ ค่าที่ถูกต้องหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ) โดยการหักปริมาตรอากาศออก ดังนี้  $1.61 / (100\% - 29.68\%) = 2.29 \text{ g/cm}^3$  แต่วัสดุปะการังมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนถึง 83.14 % มี Bulk Density เท่ากับ  $1.62 \text{ g/cm}^3$  ดังนั้นมีความหนาแน่นในเนื้อจริงสูงถึง  $9.61 \text{ g/cm}^3$  คุณสมบัติในด้านเปอร์เซ็นต์ความพรุนไม่สามารถใช้ประมาณการแรงเจาะได้ในกรณีวัสดุต่างชนิดกัน แต่จากการทดลองคุณสมบัติด้านอื่นๆพบว่า คุณสมบัติความแข็งแรงสามารถใช้ประมาณการแรงในการเจาะวัสดุต่างชนิดกันได้ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.1 และ 5.2



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (Thrust Forces) กับความแข็งของวัสดุพอรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราป้อน 0.035-0.14 mm/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกสว่าน 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) กับความแข็งของวัสดุพอรุน ที่ความเร็วรอบ 130-920 rpm อัตราป้อน 0.035-0.14 mm/รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกสว่าน 3 มิลลิเมตร

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาคคุณสมบัติของวัสดุ HAชนิดมีรูพรุนที่ส่งผลกระทบต่อแรงในการเจาะ โดยมีผลสรุปจากการทดลองดังต่อไปนี้

1. ความหนาแน่นบัลค์ Bulk Density ( $\text{g/cm}^3$ ) มีความสัมพันธ์ กับแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะ เมื่อวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน มีค่าความหนาแน่นบัลค์มากขึ้น จะส่งผลให้แรงในการเจาะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

2. เปอร์เซ็นต์ความพรุน %Porosity (%) มีความสัมพันธ์ กับแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะ เมื่อวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน มากขึ้น จะส่งผลให้แรงในการเจาะมีแนวโน้มลดลง

3. ความแข็ง Hardness (HV) มีความสัมพันธ์ กับแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะ เมื่อวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน มีค่าความแข็งมากขึ้น จะส่งผลให้แรงในการเจาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4. ความแข็งแรงดัด Bending Strength (MPa) มีความสัมพันธ์ กับแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะ เมื่อวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน มีค่าความแข็งแรงดัด มากขึ้น จะส่งผลให้แรงในการเจาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5. โมดูลัส Modulus (GPa) มีความสัมพันธ์ กับแรงที่เกิดขึ้นในการเจาะ เมื่อวัสดุ HA ชนิดมีรูพรุน มีค่าโมดูลัสมากขึ้น จะส่งผลให้แรงในการเจาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

6. คุณสมบัติวัสดุประเภทชนิดมีรูพรุน สามารถใช้พยากรณ์แรงในการเจาะได้

7. ความแข็งสามารถเป็นตัวบ่งบอกแนวโน้มของแรงในการเจาะสำหรับวัสดุประเภทชนิดมีรูพรุน ในกรณีที่วัสดุต่างชนิดกันได้

8. ปะการังมีแรงดัน Thrust Force ในการเจาะมากที่สุดที่ เท่ากับ  $25.16 \pm 4.49$  N คิดเป็น 1.18 เท่าของวัสดุ 100%HA10MPa 1100 c<sup>o</sup> 1.5 เท่าของวัสดุ1%แป้ง 2MPa 1100 c<sup>o</sup> และ 2.10 เท่าของวัสดุ5%แป้ง 2MPa 1100 c<sup>o</sup>

9. ประการังมีแรงบิด Torque ในการเจาะมากที่สุดเท่ากับ  $20.03 \pm 6.9$  N.mm คิดเป็น 1.35 เท่าของวัสดุ 100%HA10MPa 1100 c<sup>o</sup> 1.74 เท่าของวัสดุ1%แบ่ง 2MPa 1100 c<sup>o</sup> และ1.93 เท่าของวัสดุ5%แบ่ง 2MPa 1100 c<sup>o</sup>

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

หลังจากที่ทำการขึ้นรูปผง HA ทดสอบคุณสมบัติ วัดแรงในการเจาะ และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการเจาะ กับคุณสมบัติของวัสดุเปราะชนิดมีรูพรุน แล้วทางผู้วิจัยเห็นว่าควรจะมีการพัฒนาทางด้านวัสดุ HA ที่มีรูพรุนดังต่อไปนี้

1. จากการศึกษาพบว่าผง HA ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธีปฏิบัติทางเคมี ผงที่ได้มีขนาดประมาณ  $245.37 \pm 13.17 \mu\text{m}$  มีรูปทรงไม่แน่นอน ดังนั้นถ้ามีการพัฒนาทางด้าน การสังเคราะห์ผง HA ให้มีขนาดเล็ก และ มีรูปทรงที่กลม จะทำให้สามารถขึ้นรูปวัสดุ HA ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น และแข็งแรงขึ้นได้ ซึ่งในอนาคตสามารถผลิตได้ถึง  $50 \mu\text{m}$  มีรูปร่างกลม ราคาที่มีจำหน่ายในทางการค้า อยู่ที่ 4500 \$สหรัฐ ต่อกิโลกรัม
2. วิธีการดำเนินในงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีรูพรุนชนิดอื่นๆได้ ไม่จำเป็นต้องเป็นวัสดุ HA เพียงอย่างเดียวเท่านั้น อาจจะเป็นวัสดุประเภทเซรามิกซ์ เช่น อีฐก่อสร้าง กระเบื้อง เครื่องปั้นดินเผา เป็นต้น
3. ข้อมูลในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุง ประดิษฐ์วัสดุ HA หรือวัสดุทางการแพทย์ชนิดอื่นๆ ที่มีรูพรุนเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนตา (ตาเทียม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กนก อรมรภิญ โญ และ เหลืองอุไร เสนะวัตติ . Hardness, Toughness and Characteristics of Hydroxyapatite. ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

พิจิตร พิศสุวรรณ และศุภโชค วิริยโกมล. วิศวกรรมเครื่องมืองอก. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2530.

ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และจันทนา จันทโร. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

ศิริชัย พงษ์วิชัย. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ศุภชัย วงศ์พิเชษฐชัย. รายงานผลการวิจัยโคลงการวิจัย และพัฒนา ลูกตาเทียม ตาปลอมเคลื่อนไหวได้ หน้ากาก หน้าตา ตาปลอมครึ่งหน้าวิศวกรรมเครื่องมืองอก. , ทุนวิจัยสำนักงานวิจัย และพัฒนาการทหาร กลาโหม, 2542.

ศุภโชค วิริยโกมล. ทฤษฎีกลศาสตร์ของการตัดโลหะ. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2520.

สถาพร วุฒิพันธุ์. สมบัติเชิงกลของเซรามิกซีไฮดรอกซีแอบาไทด์. ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

สมเกียรติ ภาควิชา และลลิตา บริสุทธิ. การขึ้นรูปไฮดรอกซีแอบาไทด์ชนิดมีรูพรุน. ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาษาอังกฤษ

- Armarego, J.A. and Brown, R.H., The Machining of Metal, Prentice Hall, Englewoods Cliff, New Jersey, 1969.
- Marshall, D.B., et.al., A Simple Method for Detenmoning Elastic – Modulus – to – Hardness Ratio Using Koop Indentation Measurements, Com. am. Ceramic, 1982.
- White, E.W., Biomaterials innovation : It ' s A Long Road to The Operating Room. Mat Res. Innovat. (1997) : 57 – 63.
- Aoki, H., Science and Medical Applications of Hydroxyapatite. JAAS, 1991 : 106 - 108.
- Aoki, H., et.al., Effect of Strontium Content on the Mechanical Properties of Bone and Sintered Hydroxyapatite, Bioceramics, 4 (1991) : 87 – 90.
- Lew, H. and Jang, J.W., Osseous Metaplasia with Functioning Bone Marrow in Hydroxyapatite Orbital Implants. Gracfe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol. (21 July 1999) : 366 –368.
- Santos, J.D., et.al., The Production and Characterization of a Hydroxyapatite Ceramic Material. Bioceramics Vol4 (1991) : 71 – 77
- Kalpakjian, S., Manufacturing Processes of engineering Materials. 2<sup>nd</sup> ed., New York, Addison-Wesley, 1991.
- Kuczynski, G.C., Sintering Process. New York, Plenum Press, 1991.
- Rodriguez, L.M., et.al., Processing of Porous Hydroxyapatite by Starch Consolidation. Bioceramics Vol11 (November 1998) : 89 – 92.
- Montgomery, D.C., Design and Analysis of Experiment. 3<sup>rd</sup> ed. singapore, John Wiley & Sons, 1991.
- Wiriyacosol, S., and Armarego, E.A.J., Thrust and Torque Prediction in Drilling from a Mechanics of Cutting Approach, RP Annals., 2 (1979 ) : 20-25.
- Wiriyacosol, S., An Investigation of some Performance Aspects of Drilling, Ph.D. Thesis, the University of Melbourne, 1992.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ข  
ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผง HA และผงแป้ง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



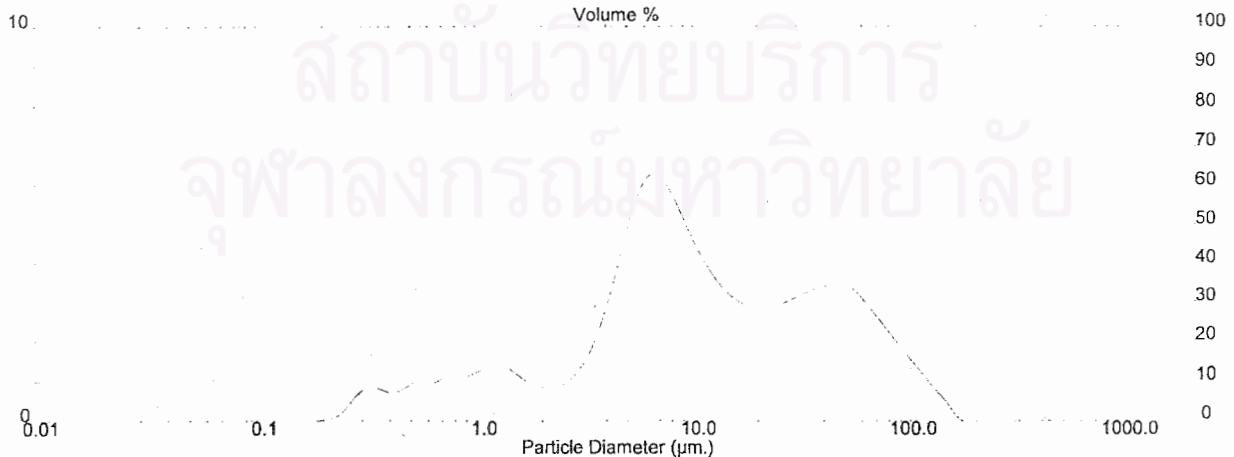
### Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: EXP1	Run Number: 4	Measurement Date: Wed, Sep 19, 2001 10:17AM
Sample File: KOLASART	Record Number: 4	Analysis Date: Wed, Sep 19, 2001 10:17AM
Sample Path: A:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Test by Pranee : Scientific and Technological Research Equipment Center Chulalongkorn University Liquid medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 23.3 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.342 %
Analysis Model: Polydisperse	Killed Data Channels: Low 0; High 2		
Modifications: Active -	Killed Result Channels: < 0.05 um; > 409.45 um.		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0213 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 1.7887 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 1.23 um	D (v, 0.5) = 9.67 um	D (v, 0.9) = 61.90 um
D [4, 3] = 22.84 um	D [3, 2] = 3.35 um	Span = 6.277E+00	Uniformity = 1.885E+00

Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%	Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	6.15	7.72	42.15
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	5.54	9.00	47.69
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	4.72	10.48	52.40
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	4.02	12.21	56.43
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	3.48	14.22	59.90
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	3.11	16.57	63.01
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	2.90	19.31	65.91
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	2.83	22.49	68.73
0.17	0.01	0.20	0.01	22.49	2.88	26.20	71.61
0.20	0.06	0.23	0.07	26.20	3.03	30.53	74.64
0.23	0.28	0.27	0.35	30.53	3.21	35.56	77.85
0.27	0.70	0.31	1.05	35.56	3.35	41.43	81.20
0.31	0.85	0.36	1.90	41.43	3.43	48.27	84.63
0.36	0.73	0.42	2.62	48.27	3.40	56.23	88.03
0.42	0.79	0.49	3.41	56.23	3.06	65.51	91.08
0.49	0.99	0.58	4.41	65.51	2.60	76.32	93.68
0.58	0.95	0.67	5.35	76.32	2.13	88.91	95.81
0.67	1.09	0.78	6.44	88.91	1.67	103.58	97.48
0.78	1.07	0.91	7.51	103.58	1.22	120.67	98.71
0.91	1.20	1.06	8.71	120.67	0.77	140.58	99.48
1.06	1.34	1.24	10.05	140.58	0.34	163.77	99.82
1.24	1.36	1.44	11.41	163.77	0.00	190.80	99.82
1.44	1.14	1.68	12.55	190.80	0.00	222.28	99.82
1.68	0.90	1.95	13.45	222.28	0.00	258.95	99.82
1.95	0.83	2.28	14.28	258.95	0.00	301.68	99.82
2.28	0.89	2.65	15.16	301.68	0.04	351.46	99.86
2.65	1.17	3.09	16.33	351.46	0.14	409.45	100.00
3.09	1.69	3.60	18.02	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	2.60	4.19	20.62	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	3.89	4.88	24.51	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	5.31	5.69	29.82	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	6.18	6.63	36.00	754.23	0.00	878.67	100.00





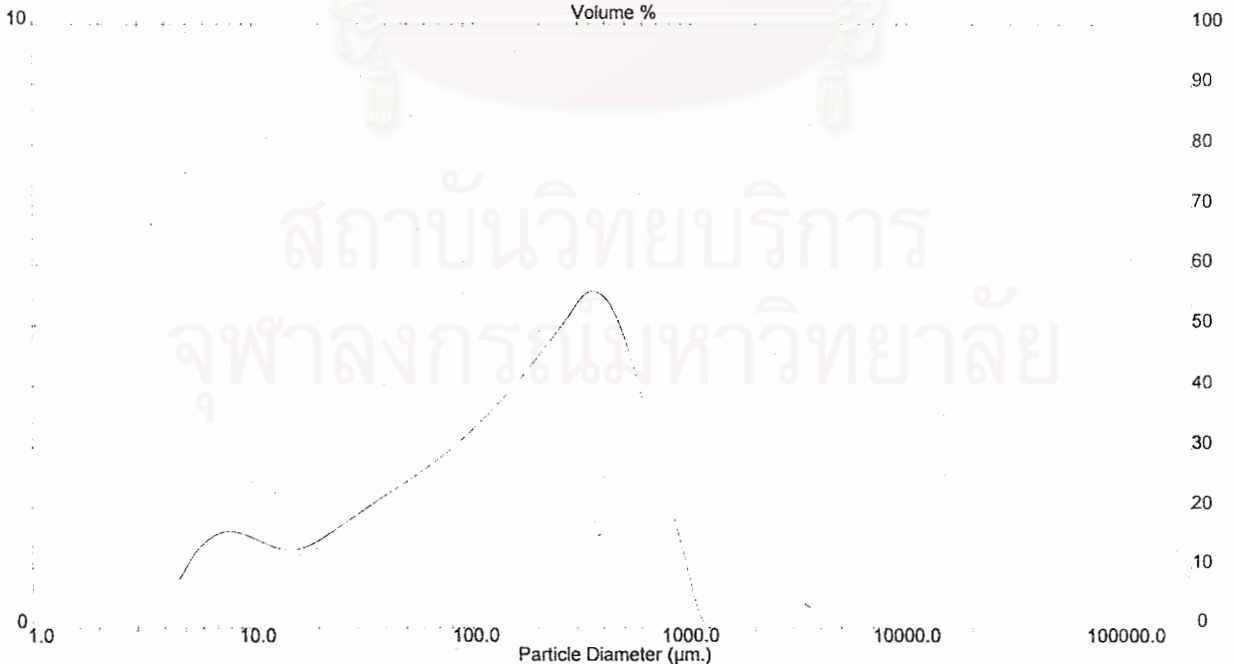
**Result: Analysis Report**

Sample Details		
Sample ID: Sample 1	Run Number: 15	Measurement Date: Thu, Aug 9, 2001 9:57AM
Sample File: KOLSART	Record Number: 26	Analysis Date: Thu, Aug 9, 2001 9:57AM
Sample Path: A:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Test by Pranee : Scientific and Tecnological Research Equipment Center Chulalongkorn University Liquid medium : water		

System Details		
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersion R.I. = 1.3300]
Analysis Model: Polydisperse		Obscuration: 21.6 %
Modifications: None		Residual: 0.841 %

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1354 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1429 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 13.02 um	D (v, 0.5) = 162.85 um	D (v, 0.9) = 557.82 um
D [4, 3] = 232.03 um	D [3, 2] = 41.98 um	Span = 3.345E+00	Uniformity = 1.056E+00

Size_Low (um)	ln %	Size_High (um)	Under%	Size_Low (um)	ln %	Size_High (um)	Under%
4.19	0.76	4.88	0.76	120.67	3.70	140.58	46.19
4.88	1.14	5.69	1.90	140.58	3.96	163.77	50.15
5.69	1.43	6.63	3.32	163.77	4.25	190.80	54.40
6.63	1.58	7.72	4.90	190.80	4.55	222.28	58.95
7.72	1.60	9.00	6.50	222.28	4.86	258.95	63.81
9.00	1.52	10.48	8.02	258.95	5.18	301.68	68.99
10.48	1.41	12.21	9.43	301.68	5.49	351.46	74.48
12.21	1.33	14.22	10.76	351.46	5.53	409.45	80.01
14.22	1.30	16.57	12.06	409.45	5.25	477.01	85.26
16.57	1.36	19.31	13.42	477.01	4.64	555.71	89.90
19.31	1.49	22.49	14.91	555.71	3.82	647.41	93.72
22.49	1.66	26.20	16.57	647.41	2.92	754.23	96.64
26.20	1.82	30.53	18.39	754.23	2.02	878.67	98.66
30.53	1.99	35.56	20.38	878.67	1.12	1023.66	99.78
35.56	2.16	41.43	22.54	1023.66	0.22	1192.56	100.00
41.43	2.31	48.27	24.85	1192.56	0.00	1389.33	100.00
48.27	2.47	56.23	27.32	1389.33	0.00	1618.57	100.00
56.23	2.64	65.51	29.96	1618.57	0.00	1885.64	100.00
65.51	2.82	76.32	32.78	1885.64	0.00	2196.77	100.00
76.32	3.02	88.91	35.80	2196.77	0.00	2559.23	100.00
88.91	3.23	103.58	39.03	2559.23	0.00	2981.51	100.00
103.58	3.46	120.67	42.49	2981.51	0.00	3473.45	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211  
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University  
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

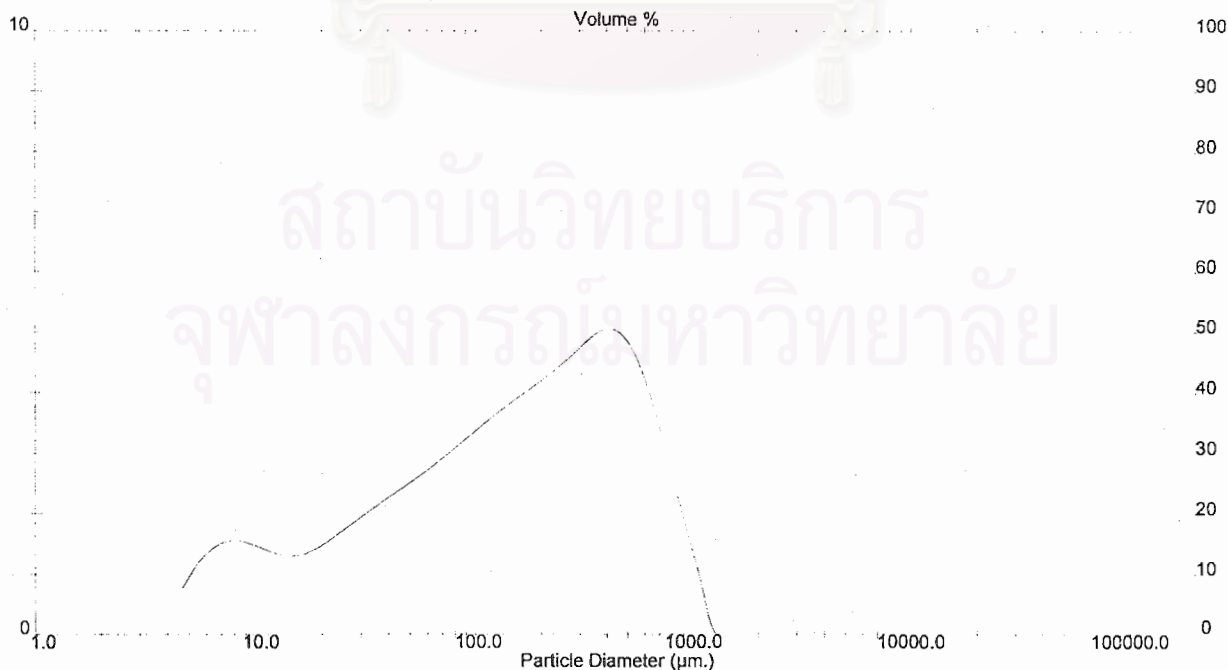
### Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 1	Run Number: 9	Measurement Date: Thu, Aug 9, 2001 9:54AM
Sample File: KOLSART	Record Number: 22	Analysis Date: Thu, Aug 9, 2001 9:55AM
Sample Path: A:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Test by Pranee : Scientific and Tecnological Research Equipment Center Chulalongkorn University Liquid medium : water		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 20.5 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.414 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1300 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1407 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 13.50 um	D (v, 0.5) = 160.26 um	D (v, 0.9) = 607.63 um
D [4, 3] = 244.69 um	D [3, 2] = 42.64 um	Span = 3.707E+00	Uniformity = 1.156E+00

Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%	Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%
4.19	0.72	4.88	0.72	120.57	3.69	140.58	46.69
4.88	1.09	5.69	1.81	140.58	3.87	163.77	50.56
5.69	1.37	6.63	3.18	163.77	4.04	190.80	54.60
6.63	1.52	7.72	4.70	190.80	4.22	222.28	58.81
7.72	1.55	9.00	6.25	222.28	4.40	258.95	63.22
9.00	1.49	10.48	7.74	258.95	4.61	301.68	67.83
10.48	1.39	12.21	9.13	301.68	4.84	351.46	72.67
12.21	1.32	14.22	10.45	351.46	5.01	409.45	77.68
14.22	1.31	16.57	11.75	409.45	5.01	477.01	82.69
16.57	1.38	19.31	13.13	477.01	4.76	555.71	87.45
19.31	1.52	22.49	14.65	555.71	4.22	647.41	91.67
22.49	1.69	26.20	16.34	647.41	3.44	754.23	95.12
26.20	1.87	30.53	18.21	754.23	2.54	878.67	97.65
30.53	2.05	35.56	20.26	878.67	1.63	1023.66	99.28
35.56	2.22	41.43	22.48	1023.66	0.72	1192.56	100.00
41.43	2.39	48.27	24.86	1192.56	0.00	1389.33	100.00
48.27	2.55	56.23	27.42	1389.33	0.00	1618.57	100.00
56.23	2.73	65.51	30.15	1618.57	0.00	1885.64	100.00
65.51	2.92	76.32	33.07	1885.64	0.00	2196.77	100.00
76.32	3.11	88.91	36.18	2196.77	0.00	2559.23	100.00
88.91	3.31	103.58	39.49	2559.23	0.00	2981.51	100.00
103.58	3.51	120.67	43.00	2981.51	0.00	3473.45	100.00







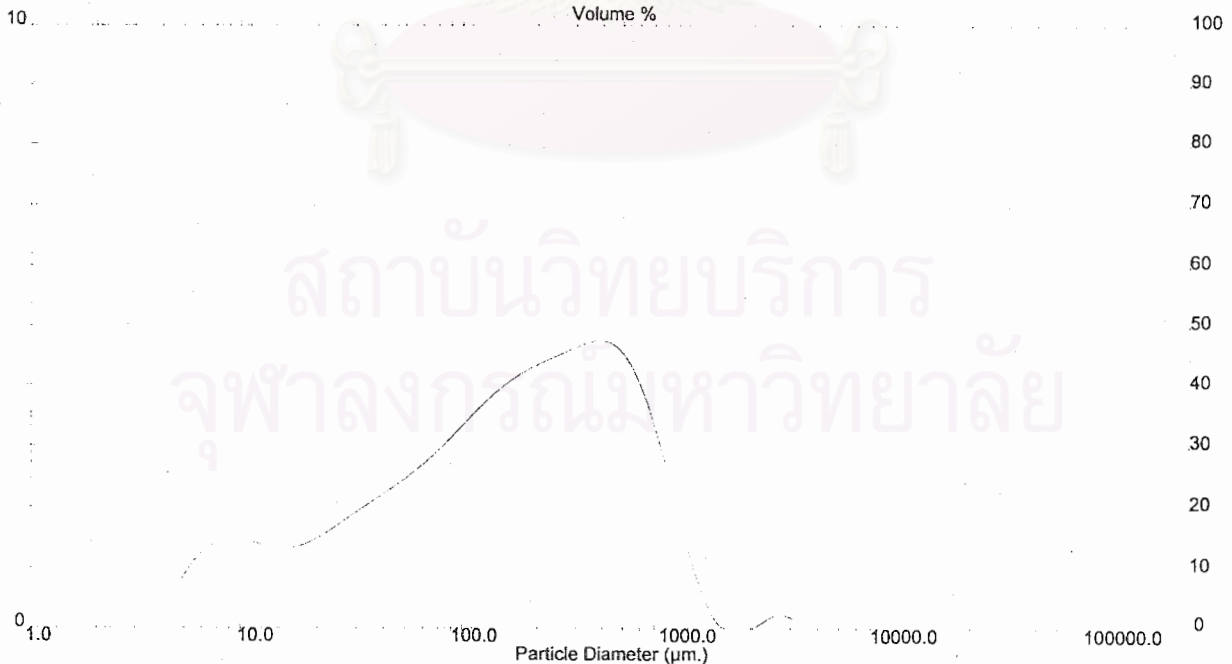
## Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 1	Run Number: 8	Measurement Date: Thu, Aug 9, 2001 9:54AM
Sample File: KOLSART	Record Number: 21	Analysis Date: Thu, Aug 9, 2001 9:54AM
Sample Path: A:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Test by Pranee : Scientific and Technological Research Equipment Center Chulalongkorn University Liquid medium : water		

System Details			
Range Lens: 1000 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 20.7 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.486 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1354 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1370 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 14.14 um	D (v, 0.5) = 159.59 um	D (v, 0.9) = 623.72 um
D [4, 3] = 259.40 um	D [3, 2] = 43.78 um	Span = 3.820E+00	Uniformity = 1.247E+00

Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%	Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%
4.19	0.67	4.88	0.67	120.67	3.89	140.58	46.63
4.88	1.01	5.69	1.68	140.58	4.08	163.77	50.70
5.69	1.28	6.63	2.96	163.77	4.23	190.80	54.93
6.63	1.44	7.72	4.40	190.80	4.36	222.28	59.29
7.72	1.49	9.00	5.88	222.28	4.47	258.95	63.76
9.00	1.45	10.48	7.33	258.95	4.58	301.68	68.34
10.48	1.38	12.21	8.72	301.68	4.68	351.46	73.02
12.21	1.33	14.22	10.05	351.46	4.74	409.45	77.76
14.22	1.34	16.57	11.39	409.45	4.69	477.01	82.45
16.57	1.40	19.31	12.79	477.01	4.46	555.71	86.91
19.31	1.53	22.49	14.32	555.71	4.01	647.41	90.93
22.49	1.68	26.20	16.00	647.41	3.34	754.23	94.27
26.20	1.85	30.53	17.85	754.23	2.49	878.67	96.76
30.53	2.01	35.56	19.86	878.67	1.60	1023.66	98.36
35.56	2.17	41.43	22.03	1023.66	0.81	1192.56	99.16
41.43	2.33	48.27	24.36	1192.56	0.24	1389.33	99.41
48.27	2.50	56.23	26.86	1389.33	0.00	1618.57	99.41
56.23	2.70	65.51	29.56	1618.57	0.00	1885.64	99.41
65.51	2.92	76.32	32.49	1885.64	0.03	2196.77	99.44
76.32	3.17	88.91	35.65	2196.77	0.17	2559.23	99.61
88.91	3.42	103.58	39.08	2559.23	0.23	2981.51	99.84
103.58	3.67	120.67	42.74	2981.51	0.16	3473.45	100.00





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 อาคารสถาปน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211  
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University  
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

**Result: Analysis Report**

Sample Details		
Sample ID: ExP1	Run Number: 2	Measurement Date: Wed, Sep 19, 2001 10:16AM
Sample File: KOLASART	Record Number: 2	Analysis Date: Wed, Sep 19, 2001 10:16AM
Sample Path: A1		Result Source: Analysed
Sample Notes: Test by Pranee : Scientific and Technological Research Equipment Center Chulalongkorn University Liquid medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 21.9 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.416 %
Analysis Model: Polydisperse	Killed Data Channels: Low 0; High 2		
Modifications: Active --	Killed Result Channels: < 0.05 um; > 301.68 um.		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0170 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 1.8991 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 1.23 um	D (v, 0.5) = 10.97 um	D (v, 0.9) = 67.48 um
D [4, 3] = 25.01 um	D [3, 2] = 3.16 um	Span = 6.041E+00	Uniformity = 1.830E+00

Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%	Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	5.63	5.32	7.72	38.79
0.06	0.00	0.07	0.01	7.72	5.16	9.00	43.95
0.07	0.01	0.08	0.01	9.00	4.74	10.48	48.68
0.08	0.01	0.09	0.02	10.48	4.25	12.21	52.93
0.09	0.02	0.11	0.04	12.21	3.78	14.22	56.71
0.11	0.02	0.13	0.06	14.22	3.40	16.57	60.11
0.13	0.04	0.15	0.10	16.57	3.15	19.31	63.25
0.15	0.07	0.17	0.18	19.31	3.02	22.49	66.27
0.17	0.14	0.20	0.32	22.49	3.02	26.20	69.30
0.20	0.27	0.23	0.58	26.20	3.12	30.53	72.42
0.23	0.46	0.27	1.04	30.53	3.27	35.56	75.69
0.27	0.65	0.31	1.69	35.56	3.47	41.43	79.16
0.31	0.72	0.36	2.40	41.43	3.55	48.27	82.71
0.36	0.71	0.42	3.12	48.27	3.48	56.23	86.19
0.42	0.77	0.49	3.88	56.23	3.23	65.51	89.42
0.49	0.88	0.58	4.76	65.51	2.83	76.32	92.25
0.58	0.92	0.67	5.68	76.32	2.36	88.91	94.61
0.67	1.04	0.78	6.71	88.91	1.85	103.58	96.46
0.78	1.07	0.91	7.78	103.58	1.37	120.67	97.83
0.91	1.12	1.06	8.91	120.67	0.95	140.58	98.78
1.06	1.14	1.24	10.05	140.58	0.60	163.77	99.39
1.24	1.08	1.44	11.13	163.77	0.35	190.80	99.73
1.44	0.94	1.68	12.07	190.80	0.17	222.28	99.91
1.68	0.82	1.95	12.90	222.28	0.08	258.95	99.99
1.95	0.82	2.28	13.72	258.95	0.01	301.68	100.00
2.28	0.96	2.65	14.67	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	1.29	3.09	15.96	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	1.82	3.60	17.78	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	2.59	4.19	20.38	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	3.53	4.88	23.90	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	4.46	5.69	28.36	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	5.11	6.63	33.47	754.23	0.00	878.67	100.00

10

Volume %

100

สแกนโดยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.01

0.1

1.0

10.0

100.0

1000.0

0

Particle Diameter (µm.)





ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188029-32, 2188101 โทรสาร 2540211  
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University  
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Phatumwan Bangkok 10330 Tel. 2188029-32, 2188101 Fax. 2540211

Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: ExP1	Run Number: 3	Measurement Date: Wed, Sep 19, 2001 10:17AM
Sample File: KOLASART	Record Number: 3	Analysis Date: Wed, Sep 19, 2001 10:17AM
Sample Path: A:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Test by Pranee : Scientific and Technological Research Equipment Center Chulalongkorn University Liquid medium : water		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 23.0 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.388 %
Analysis Modet: Polydisperse	Killed Data Channels: Low 0; High 2		
Modifications: Active --	Killed Result Channels: < 0.05 um; > 409.45 um.		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0178 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 1.8239 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 1.27 um	D (v, 0.5) = 11.08 um	D (v, 0.9) = 79.16 um
D [4, 3] = 29.48 um	D [3, 2] = 3.29 um	Span = 7.030E+00	Uniformity = 2.211E+00

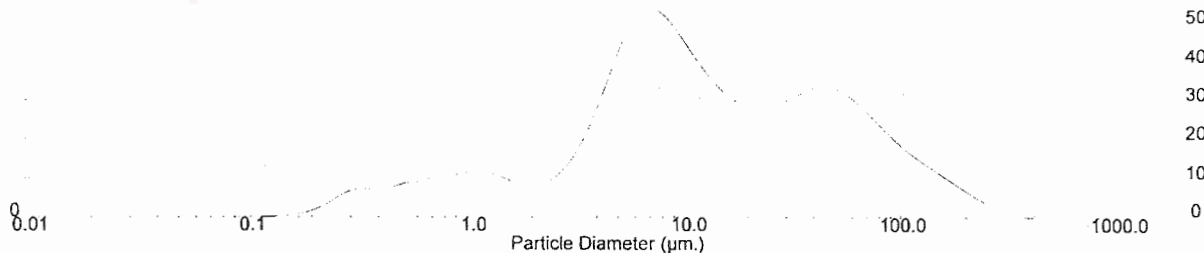
Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%	Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	5.33	7.72	38.75
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	5.10	9.00	43.84
0.07	0.00	0.08	0.01	9.00	4.61	10.48	48.45
0.08	0.01	0.09	0.01	10.48	4.08	12.21	52.53
0.09	0.01	0.11	0.02	12.21	3.58	14.22	56.11
0.11	0.01	0.13	0.03	14.22	3.19	16.57	59.31
0.13	0.03	0.15	0.06	16.57	2.94	19.31	62.24
0.15	0.05	0.17	0.11	19.31	2.82	22.49	65.06
0.17	0.11	0.20	0.22	22.49	2.82	26.20	67.88
0.20	0.23	0.23	0.45	26.20	2.92	30.53	70.80
0.23	0.43	0.27	0.87	30.53	3.08	35.56	73.88
0.27	0.64	0.31	1.51	35.56	3.27	41.43	77.15
0.31	0.71	0.36	2.22	41.43	3.35	48.27	80.50
0.36	0.70	0.42	2.92	48.27	3.26	56.23	83.75
0.42	0.75	0.49	3.67	56.23	3.01	65.51	86.76
0.49	0.87	0.58	4.54	65.51	2.66	76.32	89.42
0.58	0.91	0.67	5.45	76.32	2.28	88.91	91.70
0.67	1.03	0.78	6.48	88.91	1.92	103.58	93.62
0.78	1.06	0.91	7.54	103.58	1.62	120.67	95.24
0.91	1.12	1.06	8.66	120.67	1.36	140.58	96.59
1.06	1.15	1.24	9.81	140.58	1.11	163.77	97.71
1.24	1.10	1.44	10.91	163.77	0.88	190.80	98.58
1.44	0.96	1.68	11.87	190.80	0.63	222.28	99.22
1.68	0.83	1.95	12.70	222.28	0.40	258.95	99.62
1.95	0.82	2.28	13.52	258.95	0.23	301.68	99.85
2.28	0.95	2.65	14.48	301.68	0.12	351.46	99.97
2.65	1.28	3.09	15.75	351.46	0.03	409.45	100.00
3.09	1.81	3.60	17.57	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	2.60	4.19	20.16	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	3.56	4.88	23.72	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	4.52	5.69	28.24	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	5.17	6.63	33.41	754.23	0.00	878.67	100.00

10

Volume %

100

สถาบันวิจัยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ค

## ตัวอย่างผลการวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรม SPSS.

1. ผลการวิเคราะห์การถดถอยระหว่างแรงดูล(Thrust Force) กับความแข็งของวัสดุชิ้นงาน

## Regression

Variables Entered/Removed<sup>a</sup>

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	HXH	.	Stepwise (Criteria: Probability -of-F-to-e nter <= .050, Probability -of-F-to-r emove >= .100).
2	NXF	.	Stepwise (Criteria: Probability -of-F-to-e nter <= .050, Probability -of-F-to-r emove >= .100).

a. Dependent Variable: Y1

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.770 <sup>a</sup>	.593	.576	3.2802
2	.897 <sup>b</sup>	.805	.789	2.3165

a. Predictors: (Constant), HXH

b. Predictors: (Constant), HXH, NXF

**ANOVA<sup>c</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	391.228	1	391.228	36.361	.000 <sup>a</sup>
	Residual	268.986	25	10.759		
	Total	660.214	26			
2	Regression	531.427	2	265.713	49.517	.000 <sup>b</sup>
	Residual	128.788	24	5.366		
	Total	660.214	26			

- a. Predictors: (Constant), HXH  
b. Predictors: (Constant), HXH, NXF  
c. Dependent Variable: Y1

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	11.133	1.117		9.968	.000
	HXH	7.672E-04	.000	.770	6.030	.000
2	(Constant)	8.614	.930		9.262	.000
	HXH	7.672E-04	.000	.770	8.539	.000
	NXF	6.128E-02	.012	.461	5.111	.000

- a. Dependent Variable: Y1

**Excluded Variables<sup>§</sup>**

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
						Tolerance
1	N	.439 <sup>a</sup>	4.633	.000	.687	1.000
	F	.306 <sup>a</sup>	2.681	.013	.480	1.000
	NXN	.423 <sup>a</sup>	4.333	.000	.663	1.000
	FXF	.307 <sup>a</sup>	2.685	.013	.481	1.000
	NXF	.461 <sup>a</sup>	5.111	.000	.722	1.000
	H	-.667 <sup>a</sup>	-.692	.495	-.140	1.793E-02
	NXH	.394 <sup>a</sup>	2.969	.007	.518	.705
	FXH	.342 <sup>a</sup>	2.286	.031	.423	.623
2	N	.224 <sup>b</sup>	1.831	.080	.357	.494
	F	.052 <sup>b</sup>	.462	.648	.096	.651
	NXN	.198 <sup>b</sup>	1.627	.117	.321	.514
	FXF	.057 <sup>b</sup>	.502	.620	.104	.658
	H	-.667 <sup>b</sup>	-.990	.332	-.202	1.793E-02
	NXH	.071 <sup>b</sup>	.496	.625	.103	.414
	FXH	.043 <sup>b</sup>	.314	.756	.065	.446

- a. Predictors in the Model: (Constant), HXH  
b. Predictors in the Model: (Constant), HXH, NXF  
c. Dependent Variable: Y1

2. ผลการวิเคราะห์การถดถอยระหว่างแรงบิด(Torque) กับความหนาแน่นบัลค์วัสดุขึ้นงาน

## Regression

**Variables Entered/Removed<sup>a</sup>**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	NXF		Stepwise (Criteria: Probability -of-F-to-enter <= .050, Probability -of-F-to-remove >= .100).
2	B		Stepwise (Criteria: Probability -of-F-to-enter <= .050, Probability -of-F-to-remove >= .100).
3	FXB		Stepwise (Criteria: Probability -of-F-to-enter <= .050, Probability -of-F-to-remove >= .100).

a. Dependent Variable: Y2

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.696 <sup>a</sup>	.484	.463	2.6471
2	.878 <sup>b</sup>	.771	.752	1.7999
3	.904 <sup>c</sup>	.817	.794	1.6417

a. Predictors: (Constant), NXF

b. Predictors: (Constant), NXF, B

c. Predictors: (Constant), NXF, B, FXB

**ANOVA<sup>d</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	164.256	1	164.256	23.441	.000 <sup>a</sup>
	Residual	175.179	25	7.007		
	Total	339.435	26			
2	Regression	261.686	2	130.843	40.389	.000 <sup>b</sup>
	Residual	77.749	24	3.240		
	Total	339.435	26			
3	Regression	277.447	3	92.482	34.315	.000 <sup>c</sup>
	Residual	61.987	23	2.695		
	Total	339.435	26			

a. Predictors: (Constant), NXF

b. Predictors: (Constant), NXF, B

c. Predictors: (Constant), NXF, B, FXB

d. Dependent Variable: Y2

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	9.536	.759		12.558	.000
	NXF	6.633E-02	.014	.696	4.842	.000
2	(Constant)	-10.016	3.603		-2.780	.010
	NXF	6.633E-02	.009	.696	7.121	.000
	B	12.144	2.214	.536	5.484	.000
3	(Constant)	-9.402	3.296		-2.853	.009
	NXF	5.139E-02	.011	.539	4.892	.000
	B	11.052	2.070	.488	5.340	.000
	FXB	13.379	5.532	.271	2.418	.024

a. Dependent Variable: Y2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Excluded Variables<sup>d</sup>

Model		Beta In	t	Sig.	Partial Correlation	Collinearity Statistics
						Tolerance
1	N	-.136 <sup>a</sup>	-.657	.518	-.133	.494
	F	.257 <sup>a</sup>	1.475	.153	.288	.651
	NXN	-.123 <sup>a</sup>	-.605	.551	-.122	.514
	FXF	.258 <sup>a</sup>	1.492	.149	.291	.658
	B	.536 <sup>a</sup>	5.484	.000	.746	1.000
	BXB	.535 <sup>a</sup>	5.465	.000	.745	1.000
	NXB	.006 <sup>a</sup>	.028	.978	.006	.510
	FXB	.401 <sup>a</sup>	2.507	.019	.456	.665
2	N	-.136 <sup>b</sup>	-.976	.339	-.199	.494
	F	.257 <sup>b</sup>	2.302	.031	.433	.651
	NXN	-.123 <sup>b</sup>	-.897	.379	-.184	.514
	FXF	.258 <sup>b</sup>	2.333	.029	.437	.658
	BXB	-7.704 <sup>b</sup>	-.804	.430	-.165	1.054E-04
	NXB	-.157 <sup>b</sup>	-1.130	.270	-.229	.487
	FXB	.271 <sup>b</sup>	2.418	.024	.450	.633
	3	N	.196 <sup>c</sup>	1.051	.305	.219
F		-.596 <sup>c</sup>	-.637	.531	-.135	9.304E-03
NXN		.179 <sup>c</sup>	1.021	.318	.213	.257
FXF		-.035 <sup>c</sup>	-.065	.949	-.014	2.952E-02
BXB		-7.704 <sup>c</sup>	-.883	.387	-.185	1.054E-04
NXB		.145 <sup>c</sup>	.770	.449	.162	.228

- a. Predictors in the Model: (Constant), NXF  
 b. Predictors in the Model: (Constant), NXF, B  
 c. Predictors in the Model: (Constant), NXF, B, FXB  
 d. Dependent Variable: Y2

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

มาตรฐานการทดสอบความแข็ง ASTM: Designation: E92 - 82



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





Designation: E 92 - 82 (Reapproved 1992)<sup>ε1</sup>

## Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation E 92; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

<sup>ε1</sup> NOTE—Editorial changes were made throughout in August 1992.

### 1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the Vickers hardness of metallic materials, using applied loads of 1 kgf to 120 kgf,<sup>2</sup> the verification of Vickers hardness testing machines (Part B), and the calibration of standardized hardness test blocks (Part C). Two general classes of standard tests are recognized:

1.1.1 *Verification, Laboratory, or Referee Tests*, where a high degree of accuracy is required.

1.1.2 *Routine Tests*, where a somewhat lower degree of accuracy is permissible.

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

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>3</sup>

E 140 Hardness Conversion Tables for Metals (Relationship Between Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Rockwell Superficial Hardness, and Knoop Hardness)<sup>3</sup>

E 384 Test Method for Microhardness of Materials<sup>3</sup>

### 3. Terminology

3.1 *Vickers hardness number, HV*—a number related to the applied load and the surface area of the permanent impression made by a square-based pyramidal diamond indenter having included face angles of 136° (see Fig. 1 and Table 1), computed from the equation:

$$HV = 2P \sin(\alpha/2)/d^2 = 1.8544P/d^2$$

where:

$P$  = load, kgf,

$d$  = mean diagonal of impression, mm, and

$\alpha$  = face angle of diamond = 136°.

3.2 *Vickers hardness test*—an indentation hardness test using calibrated machines to force a square-based pyramidal diamond indenter having specified face angles, under a pre-determined load, into the surface of the material under test and to measure the diagonals of the resulting impression after removal of the load.

3.2.1 Vickers hardness tests are made at test loads of 1 kgf to 120 kgf.

3.2.2 For practical purposes the Vickers hardness number is constant when a square-based diamond pyramid with a face angle of 136° is used with applied loads of 5 kgf and higher. At lower test loads the Vickers hardness may be load-dependent. In Table 2 are given the Vickers hardness numbers for a test load of 1 kgf. For obtaining hardness numbers when other test loads are used, the Vickers hardness

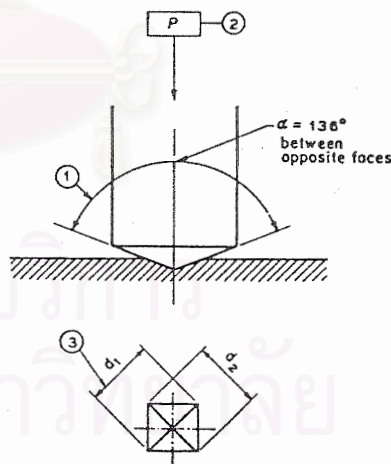


FIG. 1 Vickers Hardness Test (see Table 1)

TABLE 1 Symbols and Designations Associated with Fig. 1

Number	Symbol	Designation
1	...	Angle at the vertex of the pyramidal indenter (136°)
2	$P$	Test load in kilograms-force
3	$d$	Arithmetic mean of the two diagonals $d^1$ and $d^2$

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E-28 on Mechanical Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved July 30, 1982. Published December 1982. Originally published as E 92 - 52 T. Last previous edition E 92 - 72 (1977).

<sup>2</sup> A procedure covering Vickers tests using applied loads of 1 gf to 1000 gf (1 kgf) may be found in Test Method E 384, Test Method for Microhardness of Materials, appearing in the *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

number obtained from Table 2 is multiplied by the test load in kilograms-force (Table 3).

NOTE 1—The Vickers hardness number is followed by the symbol HV with a suffix number denoting the load and second suffix number indicating the duration of loading when the latter differs from 10 to 15 s, which is the normal loading time.

Example:

440 HV 30 = Vickers hardness of 440 measured under a load of 30 kgf

applied for 10 to 15 s.  
440 HV 30/20 = Vickers hardness of 440 measured under a load of 30 kgf applied for 20 s.

3.3 verification—checking or testing to assure conformance with the specification.

3.4 calibration—determination of the values of the significant parameters by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.

TABLE 2 Vickers Hardness Numbers  
(Diamond, 136° Face Angle, Load of 1 kgf)

Diagonal of Impression, mm	Vickers Hardness Number for Diagonal Measured to 0.0001 mm									
	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.005	74 170	71 290	68 580	66 020	63 590	61 300	59 130	57 080	55 120	53 270
0.006	51 510	49 840	48 240	46 720	45 270	43 890	42 570	41 310	40 100	38 950
0.007	37 840	36 790	35 770	34 800	33 860	32 970	32 100	31 280	30 480	29 710
0.008	28 970	28 260	27 580	26 920	26 280	25 670	25 070	24 500	23 950	23 410
0.009	22 890	22 390	21 910	21 440	20 990	20 550	20 120	19 710	19 310	18 920
0.010	18 540	18 180	17 820	17 480	17 140	16 820	16 500	16 200	15 900	15 610
0.011	15 330	15 050	14 780	14 520	14 270	14 020	13 780	13 550	13 320	13 090
0.012	12 880	12 670	12 460	12 260	12 060	11 870	11 680	11 500	11 320	11 140
0.013	10 970	10 810	10 640	10 480	10 330	10 170	10 030	9 880	9 737	9 598
0.014	9 461	9 327	9 196	9 068	8 943	8 820	8 699	8 581	8 466	8 353
0.015	8 242	8 133	8 026	7 922	7 819	7 718	7 620	7 523	7 428	7 335
0.016	7 244	7 154	7 066	6 979	6 895	6 811	6 729	6 649	6 570	6 493
0.017	6 416	6 342	6 268	6 196	6 125	6 055	5 986	5 919	5 853	5 787
0.018	5 723	5 660	5 598	5 537	5 477	5 418	5 360	5 303	5 247	5 191
0.019	5 137	5 083	5 030	4 978	4 927	4 877	4 827	4 778	4 730	4 683
0.020	4 636	4 590	4 545	4 500	4 456	4 413	4 370	4 328	4 286	4 245
0.021	4 205	4 165	4 126	4 087	4 049	4 012	3 975	3 938	3 902	3 866
0.022	3 831	3 797	3 763	3 729	3 696	3 663	3 631	3 599	3 567	3 536
0.023	3 505	3 475	3 445	3 416	3 387	3 358	3 329	3 301	3 274	3 246
0.024	3 219	3 193	3 166	3 140	3 115	3 089	3 064	3 039	3 015	2 991
0.025	2 967	2 943	2 920	2 897	2 874	2 852	2 830	2 808	2 786	2 764
0.026	2 743	2 722	2 701	2 681	2 661	2 641	2 621	2 601	2 582	2 563
0.027	2 544	2 525	2 506	2 488	2 470	2 452	2 434	2 417	2 399	2 382
0.028	2 365	2 348	2 332	2 315	2 299	2 283	2 267	2 251	2 236	2 220
0.029	2 205	2 190	2 175	2 160	2 145	2 131	2 116	2 102	2 088	2 074
0.030	2 060	2 047	2 033	2 020	2 007	1 993	1 980	1 968	1 955	1 942
0.031	1 930	1 917	1 905	1 893	1 881	1 869	1 857	1 845	1 834	1 822
0.032	1 811	1 800	1 788	1 777	1 766	1 756	1 745	1 734	1 724	1 713
0.033	1 703	1 693	1 682	1 672	1 662	1 652	1 643	1 633	1 623	1 614
0.034	1 604	1 595	1 585	1 576	1 567	1 558	1 549	1 540	1 531	1 522
0.035	1 514	1 505	1 497	1 488	1 480	1 471	1 463	1 455	1 447	1 439
0.036	1 431	1 423	1 415	1 407	1 400	1 392	1 384	1 377	1 369	1 362
0.037	1 355	1 347	1 340	1 333	1 326	1 319	1 312	1 305	1 298	1 291
0.038	1 284	1 277	1 271	1 264	1 258	1 251	1 245	1 238	1 232	1 225
0.039	1 219	1 213	1 207	1 201	1 195	1 189	1 183	1 177	1 171	1 165
0.040	1 159	1 153	1 147	1 142	1 136	1 131	1 125	1 119	1 114	1 109
0.041	1 103	1 098	1 092	1 087	1 082	1 077	1 072	1 066	1 061	1 056
0.042	1 051	1 046	1 041	1 036	1 031	1 027	1 022	1 017	1 012	1 008
0.043	1 003	998	994	989	985	980	975	971	967	962
0.044	958	953	949	945	941	936	932	928	924	920
0.045	916	912	908	904	900	896	892	888	884	880
0.046	876	873	869	865	861	858	854	850	847	843
0.047	839	836	832	829	825	822	818	815	812	808
0.048	805	802	798	795	792	788	785	782	779	775
0.049	772	769	766	763	760	757	754	751	748	745
0.050	742	739	736	733	730	727	724	721	719	716
0.051	713	710	707	705	702	699	696	694	691	688
0.052	686	683	681	678	675	673	670	668	665	663
0.053	660	658	655	653	650	648	645	643	641	638
0.054	636	634	631	629	627	624	622	620	617	615

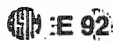
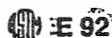


TABLE 2. Continued

Vickers Hardness Number for Diagonal Measured to 0.0001 mm

Diagonal of Impression, mm	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.055	613	611	609	606	604	602	600	598	596	593
0.056	591	589	587	585	583	581	579	577	575	573
0.057	571	569	567	565	563	561	559	557	555	553
0.058	551	549	547	546	544	542	540	538	536	535
0.059	533	531	529	527	526	524	522	520	519	516.8
0.060	515.1	513.4	511.7	510.0	508.3	506.6	505.0	503.3	501.6	500.0
0.061	498.4	496.7	495.1	493.5	491.9	490.3	488.7	487.1	485.5	484.0
0.062	482.4	480.9	479.3	477.8	476.2	474.7	473.2	471.7	470.2	468.7
0.063	467.2	465.7	464.3	462.8	461.3	459.9	458.4	457.0	455.6	454.1
0.064	452.7	451.3	449.9	448.5	447.1	445.7	444.4	443.0	441.6	440.3
0.065	438.9	437.6	436.2	434.9	433.6	432.2	430.9	429.6	428.3	427.0
0.066	425.7	424.4	423.1	421.9	420.6	419.3	418.1	416.8	415.6	414.3
0.067	413.1	411.9	410.6	409.4	408.2	407.0	405.8	404.6	403.4	402.2
0.068	401.0	399.9	398.7	397.5	396.6	395.2	394.0	392.9	391.8	390.6
0.069	389.5	388.4	387.2	386.1	385.0	383.9	382.8	381.7	380.6	379.5
0.070	378.4	377.4	376.3	375.2	374.2	373.1	372.0	371.0	369.9	368.9
0.071	367.9	366.8	365.8	364.8	363.7	362.7	361.7	360.7	359.7	358.7
0.072	357.7	356.7	355.7	354.7	353.8	352.8	351.8	350.9	349.9	348.9
0.073	348.0	347.0	346.1	345.1	344.2	343.3	342.3	341.4	340.5	339.6
0.074	338.6	337.7	336.8	335.9	335.0	334.1	333.2	332.3	331.4	330.5
0.075	329.7	328.8	327.9	327.0	326.2	325.3	324.5	323.6	322.7	321.9
0.076	321.0	320.2	319.4	318.5	317.7	316.9	316.0	315.2	314.4	313.6
0.077	312.8	312.0	311.1	310.3	309.5	308.7	307.9	307.2	306.4	305.6
0.078	304.8	304.0	303.2	302.5	301.7	300.9	300.2	299.4	298.6	297.9
0.079	297.1	296.4	295.6	294.9	294.1	293.4	292.7	291.9	291.2	290.5
0.080	289.7	289.0	288.3	287.6	286.9	286.2	285.4	284.7	284.0	283.3
0.081	282.6	281.9	281.2	280.6	279.9	279.2	278.5	277.8	277.1	276.5
0.082	275.8	275.1	274.4	273.8	273.1	272.4	271.8	271.1	270.5	269.8
0.083	269.2	268.5	267.9	267.2	266.6	266.0	265.3	264.7	264.1	263.4
0.084	262.8	262.2	261.6	260.9	260.3	259.7	259.1	258.5	257.9	257.3
0.085	256.7	256.1	255.5	254.9	254.3	253.7	253.1	252.5	251.9	251.3
0.086	250.7	250.1	249.6	249.0	248.4	247.8	247.3	246.7	246.1	245.6
0.087	245.0	244.4	243.9	243.3	242.8	242.2	241.6	241.1	240.6	240.0
0.088	239.5	238.9	238.4	237.8	237.3	236.8	236.2	235.7	235.2	234.6
0.089	234.1	233.6	233.1	232.5	232.0	231.5	231.0	230.5	230.0	229.4
0.090	228.9	228.4	227.9	227.4	226.9	226.4	225.9	225.4	224.9	224.4
0.091	223.9	223.4	222.9	222.5	222.0	221.5	221.0	220.5	220.0	219.6
0.092	219.1	218.6	218.1	217.7	217.1	216.7	216.3	215.8	215.3	214.9
0.093	214.4	213.9	213.5	213.0	212.6	212.1	211.7	211.2	210.8	210.3
0.094	209.9	209.4	209.0	208.5	208.1	207.6	207.2	206.8	206.3	205.9
0.095	205.5	205.0	204.6	204.2	203.8	203.3	202.9	202.5	202.1	201.6
0.096	201.2	200.8	200.4	200.0	199.5	199.1	198.7	198.3	197.9	197.5
0.097	197.1	196.7	196.3	195.9	195.5	195.1	194.7	194.3	193.9	193.5
0.098	193.1	192.7	192.3	191.9	191.5	191.1	190.7	190.4	190.0	189.6
0.099	189.2	188.8	188.4	188.1	187.7	187.3	186.9	186.6	186.2	185.5




**TABLE 3 Decimal Point Finder for Use with Table 2**

An example of determination of hardness numbers follows the table.

Diagonal Length, mm	Vickers Hardness (HV), 1-kgf Load
0.005	74 200
0.006	51 500
0.007	37 800
0.008	29 000
0.009	22 900
0.010	18 540
0.020	4 640
0.030	2 060
0.040	1 159
0.050	742
0.060	515
0.070	378
0.080	290
0.090	229
0.100	185.4
0.200	46.4
0.300	20.6
0.400	11.6
0.500	7.42
0.600	5.15
0.700	3.78
0.800	2.90
0.900	2.29
1.000	1.85
1.100	1.53
1.200	1.29
1.300	1.10
1.400	0.946
1.500	0.824
1.600	0.724
1.700	0.642
1.800	0.572
1.900	0.514
2.000	0.464

*Example*—Using a 50-kgf test load, the average measured diagonal length is 0.644 mm.

In Table 2 read:

HV = 447 at 0.0644-mm diagonal length at 1-kgf load.

Using Table 3 determine:

HV = 4.47 at 0.644-mm diagonal length at 1-kgf load.

$50 \times 4.47 = 224$  HV for 50-kg test load.

## A. GENERAL DESCRIPTION AND TEST PROCEDURE FOR VICKERS HARDNESS TESTS

### 4. Apparatus

4.1 *Testing Machine*—Equipment for Vickers hardness testing usually consists of a testing machine which supports the specimen and permits the indenter and the specimen to be brought into contact gradually and smoothly under a predetermined load, which is applied for a fixed period of time. The design of the machine should be such that no rocking or lateral movement of the indenter or specimen is permitted while the load is being applied or removed. A measuring microscope is usually mounted on the machine in such a manner that the impression in the specimen may be readily located in the optical field.

#### 4.2 Indenter.

4.2.1 The indenter shall be a highly polished, pointed, square-based pyramidal diamond with face angles of  $136^\circ \pm 30$  min.

4.2.2 All four faces of the indenter shall be equally inclined to the axis of the indenter (within  $\pm 30$  min) and

meet at a sharp point, that is, the line of junction between opposite faces shall not be more than 0.001 mm in length as shown in Fig. 2.

4.2.3 The diamond should be examined periodically and if it is loose in the mounting material, chipped, or cracked, it should be discarded or reconditioned.

NOTE 2—The condition of the point of the indenter is of considerable importance where the test load is light and the impression is small. It is recommended that the point be periodically checked by examining an impression made in a polished steel block. Under a magnification of 600 $\times$  or more, using a vertical illuminator, any chipping or rounding of the point can be detected and the extent of the defect measured with a filar micrometer. It is recommended that a diamond pyramid indenter should not be used for tests in which the maximum length of such a defect exceeds 5% of the length of the impression diagonal.

4.3 *Measuring Microscope*—The divisions of the micrometer scale of the measuring microscope or other measuring device shall be so constructed that the length of the diagonals of an impression in a properly surface-finished

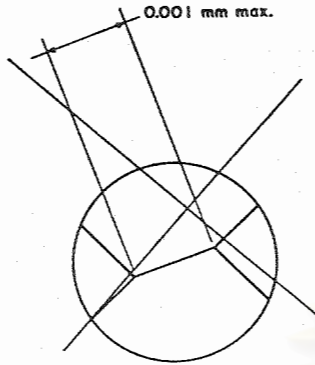


FIG. 2 Junction of Indenter Faces

specimen (see 5.1.2) can be measured to within  $\pm 0.0005$  mm or  $\pm 0.5\%$ , whichever is larger.

## 5. Test Specimens

5.1 The Vickers hardness test is adaptable to a wide variety of test specimens ranging from large bars and rolled sections to minute pieces in metallographic mounts. In general the backs of the specimens shall be so finished or the specimens shall be so clamped that there is no possibility of their rocking or shifting under the test load. The specimens shall also conform to the requirements given in the following 5.1.1, 5.1.2, and 5.1.3.

5.1.1 *Thickness*—The thickness of the test specimen shall be such that no bulge or marking showing the effect of the load appears on the side of the specimen opposite the impression. In any event the thickness of the specimen shall be at least one and one half times the length of the diagonal. When laminated material is tested, the thickness of the individual component being tested shall be used for the thickness-diagonal length relationship.

5.1.2 *Finish*—The surface of the specimen should be so prepared that the ends of the diagonals are clearly defined and can be read with precision of  $\pm 0.0005$  mm or  $\pm 0.5\%$  of the length of the diagonals, whichever is larger. Care should be taken in specimen preparation to avoid tempering during grinding, or work-hardening the surface during polishing.

5.1.3 *Alignment*—The specimen should be so prepared or mounted that the surface is normal to the axis of the indenter within  $\pm 1^\circ$  of angle. This can readily be accomplished by surface grinding (or otherwise machining) the opposite side of the specimen to parallelism with the side to be tested.

5.1.4 *Radius of Curvature*—Until further investigative work is accomplished to determine the effect of the radius of curvature on readings, due caution should be used in interpreting or accepting the results of tests made on cylindrical surfaces.

NOTE 3—A method recommended by the International Organization for Standardization for correcting Vickers hardness readings taken on spherical or cylindrical surfaces is given in Tables 4, 5, and 6.

NOTE 4—These tables give correction factors to be applied to Vickers hardness values obtained when tests are made on spherical or cylindrical surfaces. The correction factors are tabulated in terms of the ratio of the mean diagonal  $d$  of the indentation to the diameter  $D$  of the sphere or cylinder. Examples of the use of these tables are:

TABLE 4 Correction Factors for Use in Vickers Hardness Tests Made on Spherical Surfaces

Convex Surface		Concave Surface	
$d/D^A$	Correction Factor	$d/D^A$	Correction Factor
0.004	0.995	0.004	1.005
0.009	0.990	0.008	1.010
0.013	0.985	0.012	1.015
0.018	0.980	0.016	1.020
0.023	0.975	0.020	1.025
0.028	0.970	0.024	1.030
0.033	0.965	0.028	1.035
0.038	0.960	0.031	1.040
0.043	0.955	0.035	1.045
0.049	0.950	0.038	1.050
0.055	0.945	0.041	1.055
0.061	0.940	0.045	1.060
0.067	0.935	0.048	1.065
0.073	0.930	0.051	1.070
0.079	0.925	0.054	1.075
0.086	0.920	0.057	1.080
0.093	0.915	0.060	1.085
0.100	0.910	0.063	1.090
0.107	0.905	0.066	1.095
0.114	0.900	0.069	1.100
0.122	0.895	0.071	1.105
0.130	0.890	0.074	1.110
0.139	0.885	0.077	1.115
0.147	0.880	0.079	1.200
0.156	0.875	0.082	1.125
0.165	0.870	0.084	1.130
0.175	0.865	0.087	1.135
0.185	0.860	0.089	1.140
0.195	0.855	0.091	1.145
0.206	0.850	0.094	1.150

<sup>A</sup> $D$  = diameter of cylinder.

$d$  = mean diagonal of impression in millimeters.

### Example 1. Convex Sphere:

Diameter of sphere,  $D$  = 10 mm  
 Load = 10 kgf  
 Mean diagonal of impression,  $d$  = 0.150 mm  
 $d/D = 0.150/10 = 0.015$   
 From Tables 2 and 3, HV = 824  
 From Table 4, by interpolation, correction factor = 0.983

Hardness of sphere =  $824 \times 0.983 = 810$  HV 10

### Example 2. Concave Cylinder, One Diagonal Parallel to Axis:

Diameter of cylinder,  $D$  = 5 mm  
 Load = 30 kgf  
 Mean diagonal of impression,  $d$  = 0.415 mm  
 $d/D = 0.415/5 = 0.083$

From Tables 2 and 3, HV = 323

From Table 6, correction factor = 1.075

Hardness of cylinder =  $323 \times 1.075 = 347$  HV 30.

## 6. Verification of Apparatus

6.1 The hardness testing machine shall be verified as specified in Part B.

6.1.1 Two acceptable methods of verifying Vickers hardness testing machines are given in Part B.

## 7. Procedure

7.1 *Magnitude of Test Load*—Test loads of 1 kgf to 120

**TABLE 5 Correction Factors for Use in Vickers Hardness Tests Made on Cylindrical Surfaces (Diagonals at 45° to the axis)**

Convex Surface		Concave Surface	
$d/D^A$	Correction Factor	$d/D^A$	Correction Factor
0.009	0.995	0.009	1.005
0.017	0.990	0.017	1.020
0.026	0.985	0.025	1.015
0.035	0.980	0.034	1.020
0.044	0.975	0.042	1.025
0.053	0.970	0.050	1.030
0.062	0.965	0.058	1.035
0.071	0.960	0.066	1.040
0.081	0.955	0.074	1.045
0.090	0.950	0.082	1.050
0.100	0.945	0.089	1.055
0.109	0.940	0.097	1.060
0.119	0.935	0.104	1.065
0.129	0.930	0.112	1.070
0.139	0.925	0.119	1.075
0.149	0.920	0.127	1.080
0.159	0.915	0.134	1.085
0.169	0.910	0.141	1.090
0.179	0.905	0.148	1.095
0.189	0.900	0.155	1.100
0.200	0.895	0.162	1.105
		0.169	1.110
		0.176	1.115
		0.183	1.120
		0.189	1.125
		0.196	1.130
		0.203	1.135
		0.209	1.140
		0.216	1.140
		0.222	1.150

<sup>A</sup>  $D$  = diameter of sphere.  
 $d$  = mean diagonal of impression in millimeters.

kgf may be used, depending on the requirements of the test. Although tests on homogeneous materials indicate that the Vickers hardness number is nearly independent of the test load, this condition will not be present in cases where there is a hardness gradient from the specimen surface to the interior of the specimen. The magnitude of the test load should therefore be stated in the test report (Section 11).

**7.2 Application of Test Load**—Apply the test load and release smoothly without shock or vibration. The time of application of the full test load shall be 10 to 15 s, unless otherwise specified.

**7.3 Spacing of Indentations**—The center of the impression shall not be closer to any edge of the test specimen or to another impression than a distance equal to two and one half times the length of diagonal of the impression. When laminated material is tested, a bond surface shall be considered as an edge for spacing of indentation calculations.

## 8. Measurement of Impression

**8.1** Both diagonals of the impression shall be measured and their mean value used as a basis for calculation of the Vickers hardness number. It is recommended that the

**TABLE 6 Correction Factors for Use in Vickers Hardness Tests Made on Cylindrical Surfaces (One diagonal parallel to axis)**

Convex Surface		Concave Surface	
$d/D^A$	Correction Factor	$d/D^A$	Correction Factor
0.009	0.995	0.048	1.035
0.019	0.990	0.053	1.040
0.029	0.985	0.058	1.045
0.041	0.980	0.063	1.050
0.054	0.975	0.067	1.055
0.068	0.970	0.071	1.060
0.085	0.965	0.076	1.065
0.104	0.960	0.079	1.070
0.126	0.955	0.083	1.075
0.153	0.950	0.087	1.080
0.189	0.945	0.090	1.085
0.243	0.940	0.093	1.090
		0.097	1.095
		0.100	1.100
		0.103	1.105
		0.105	1.110
		0.108	1.115
		0.111	1.120
		0.113	1.125
		0.116	1.130
		0.118	1.135
		0.120	1.140
		0.123	1.145
		0.125	1.150

<sup>A</sup>  $D$  = diameter of cylinder.  
 $d$  = mean diagonal of impression in millimeters.

measurement be made with the impression centered as nearly as possible in the field of the microscope.

**8.2** In the case of anisotropic materials, for example materials that have been heavily cold worked, there may be a difference between the lengths of the two diagonals of the impression. In such cases, the test specimen should be reoriented so that the diagonals of a new impression are approximately of equal length.

## 9. Accuracy

**9.1** The accuracy of the Vickers hardness method is a function of the accuracies of the test force, indenter, and measuring device. The condition of the test and support surfaces and support of the test piece during application of the test force also affect accuracy. Under optimum conditions of these factors the accuracy that can be expected is the equivalent of 4 % of the Vickers hardness number of the standardized reference hardness test blocks (see 18.2). Under less than ideal conditions the reduction in accuracy, when required, can be established empirically by employing statistical methods.

## 10. Conversion to Other Hardness Scales or Tensile Strength Values

**10.1** There is no general method for converting accurately Vickers hardness numbers to other hardness scales or tensile strength values. Such conversions are, at best, approximations and therefore should be avoided, except for special cases where a reliable basis for the approximate conversions has been obtained by comparison tests.

NOTE 5—Standard E 140 give approximate conversion values for specific materials such as steel, nickel and high-nickel alloys, and cartridge brass.



## 11. Report

11.1 The report shall include the following information:

- 11.1.1 The Vickers hardness number,
- 11.1.2 The test load used (see 3.2.2, Note 1), and
- 11.1.3 The loading time, if other than 10 to 15 s (see 3.2.2, Note 1).

## 12. Precision and Bias

12.1 Due to the wide variety of materials tested by this method and the possible variations in test specimens, the precision of this method has not been established. The accepted practice is to utilize the information in 9.1 when establishing hardness tolerances for specific applications. The precision of this method, whether involving a single operator, multiple operators, or multiple laboratories, can be established by employing statistical methods.

## B. VERIFICATION OF VICKERS HARDNESS TESTING MACHINES

### 13. Scope

13.1 Part B covers two procedures for the verification of Vickers hardness testing machines and a procedure that is recommended for use to confirm that the machine has not become maladjusted in the intervals between the periodical routine checks. The two methods of verification are:

13.1.1 Separate verification of load application, indenter, and measuring microscope.

13.1.2 Verification by standardized test block method.

13.2 The first procedure (13.1.1) is mandatory for new and rebuilt machines.

13.3 The second procedure (13.1.2) shall be used for verifying machines in service.

### 14. General Requirements

14.1 Before a Vickers hardness testing machine is verified the machine shall be examined to ensure that:

- 14.1.1 The machine is properly set up.
- 14.1.2 The indenter holder is mounted normally in the plunger.
- 14.1.3 The load can be applied and removed without shock or vibration in such a manner that the readings are not influenced.

14.2 If the measuring device is integral with the machine, the machine shall be examined to ensure that:

- 14.2.1 The change from loading to measuring does not influence the readings.
- 14.2.2 The method of illumination does not affect the readings.
- 14.2.3 The center of the impression is in the center of the field of view.

### 15. Verification

15.1 *Separate Verification of Load Application, Indenter, and Measuring Microscope:*

15.1.1 *Load Application*—The applied load shall be checked by the use of dead weights and proving levers, or by an elastic calibration device or springs in the manner described in Practices E 4. Such dead weights or other loading devices shall be accurate to  $\pm 0.2\%$ . Vickers hardness testing machines shall be verified at a minimum of three applied loads including the test load specified. A minimum of three readings should be taken at each load. A Vickers hardness testing machine is acceptable for use over a loading range within which the machine error does not exceed  $\pm 1\%$ .

15.1.2 *Indenter*—The form of the diamond indenter shall be verified by direct measurement of its shape or by measurements of its projection on a screen. The angle

between opposite faces of the pyramid shall be  $136^\circ \pm 30$  min. All four faces shall be equally inclined to the axis of the pyramid within  $\pm 30$  min. The four faces of indenters used for laboratory, or routine tests, shall meet at a point no more than 0.001 mm in length (see Fig. 2). The four faces of indenters used in calibrating standardized hardness test blocks, shall meet at a point in which the line of junction between opposite faces is no more than 0.0005 mm in length (see Fig. 3). The quadrilateral that would be formed by the intersection of the four faces with a plane perpendicular to the axis of the indenter shall have angles of  $90^\circ \pm 12$  min.

15.1.3 *Measuring Microscope*—The measuring microscope or other device for measuring the diagonals of the impression shall be calibrated against an accurately ruled line scale (stage micrometer). The errors of the line scale shall not exceed  $0.05\ \mu\text{m}$  (0.00005 mm) or 0.05 % of any interval, whichever is greater. The measuring microscope shall be calibrated throughout its range of use and a calibration factor chosen such that the error shall not exceed  $\pm 0.5\%$ . It may be necessary to divide the complete range of the micrometer microscope into several subranges, each having its own factor.

15.2 *Verification by Standardized Test Block Method:*

15.2.1 A Vickers hardness testing machine used only for routine testing may be checked by making a series of impressions on standardized hardness test blocks (Part C).

15.2.2 A minimum of five Vickers hardness readings shall be taken on at least three blocks having different levels of hardness using a test load or loads as specified by the user with the test load applied for 12 s.

15.2.3 Vickers hardness testing machines shall be considered verified if the mean diagonal for five hardness impres-

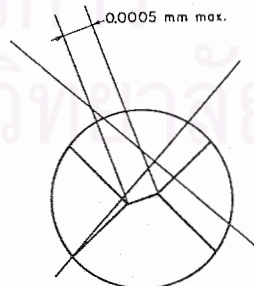


FIG. 3 Junction of Indenter Faces



sions meets the requirements of 17.2.

## 16. Procedure for Periodic Checks by the User

16.1 Verification by the standardized test block method (15.2.2) is too lengthy for daily use. Instead the following is recommended:

16.1.1 Make at least one routine check each day that the testing machine is used.

16.1.2 Before making the check, verify that the zero reading of the measuring apparatus is correctly adjusted.

16.1.3 Make at least five hardness readings on a standardized hardness test block on the scale and at the hardness level at which the machine is being used. If the values fall within the range of the standardized hardness test block the machine may be regarded as satisfactory; if not the machine should be verified as described in 15.2.2.

## 17. Repeatability and Error

### 17.1 Repeatability:

17.1.1 For each standardized block, let  $d_1, d_2, \dots, d_5$  be the arithmetic means of the two diagonals of the indentations, arranged in increasing order of magnitude.

17.1.2 The repeatability of the machine under the particular verification conditions is expressed by the quantity  $d_5 - d_1$ .

### 17.2 Error:

17.2.1 The error of the machine under the particular verification conditions is expressed by the quantity  $\bar{d} - d$ , where  $\bar{d} = (d_1 + d_2 + \dots + d_5)/5$ , and  $d$  is the reported mean diagonal of impressions on the standardized hardness test block.

## 18. Assessment of Verification

18.1 Repeatability—The repeatability of the machine verified is considered satisfactory if it satisfies the conditions given in Table 7.

18.2 Error—The mean diagonal for five impressions should not differ from the mean diagonal corresponding to the Vickers hardness of the standardized test block by more than 2 % or 0.5  $\mu\text{m}$  (0.0005 mm), whichever is greater.

TABLE 7 Repeatability of Machines

Range of Standardized Hardness of Test Blocks	The Repeatability of the Machine Should be Less Than:	Examples of Equivalents in Hardness Units
100 to 240, incl	4 % of $d^{A,B}$	8 at 100 HV; 16 at 200 HV
Over 240 to 600, incl	3 % of $d^{A,B}$	18 at 300 HV; 36 at 600 HV
Over 600	2 % of $d^{A,B}$	28 at 700 HV

<sup>A</sup>  $d = (d_1 + d_2 + \dots + d_5)/5$ .

<sup>B</sup> In all cases the repeatability is the percentage given or 1  $\mu\text{m}$  (0.001 mm) whichever is the greater.

## C. CALIBRATION OF STANDARD HARDNESS TEST BLOCKS FOR VICKERS HARDNESS MACHINES

### 19. Scope

19.1 Part C covers the calibration of standardized hardness test blocks for the verification of Vickers hardness testing machines as described in Part B.

### 20. Manufacture

20.1 Each metal block to be standardized shall be not less than 1/4 in. (6 mm) in thickness.

20.2 Each block shall be specially prepared and heat treated to give the necessary homogeneity and stability of structure.

20.3 Each block, if of steel, shall be demagnetized by the manufacturer and maintained demagnetized by the user.

20.4 The lower surface of the test block shall have a fine ground finish.

20.5 The test (upper) surface shall be polished and free of scratches which would interfere with measurements of the diagonals of the impression.

20.5.1 The mean surface roughness height rating shall not exceed 4  $\mu\text{in.}$  (0.0001 mm) center line average.

20.6 To ensure that no material is subsequently removed from the test surface of the standardized test block, an official mark or the thickness at the time of calibration shall be marked on the test surface to an accuracy of  $\pm 0.005 \text{ in.}$  ( $\pm 0.1 \text{ mm}$ ).

### 21. Standardizing Procedure

21.1 The standardized hardness test blocks shall be calibrated on a Vickers hardness testing machine verified in accordance with the requirements of 13.1.1.

21.2 The mechanism that controls the application of load should either:

21.2.1 Employ a device such as a spring to reduce the velocity of indentation of the indenter during the period of indentation, or

21.2.2 Employ a device to maintain a constant velocity of indentation of the indenter.

21.3 The full load shall be applied for 12 s.

### 22. Number of Indentations

22.1 At least five and preferably ten randomly distributed indentations shall be made on each test block.

### 23. Measurement of the Diagonals of the Indentation

23.1 The illuminating system of the measuring microscope shall be adjusted to give uniform intensity over the field of view and maximum contrast between the indentation and the undistributed surface of the block.

23.2 The measuring microscope shall be graduated to 0.001 mm with estimates made to the nearest  $\pm 0.0002 \text{ mm}$ .

23.3 The measuring microscope shall be checked by stage micrometer, or by other suitable means, to ensure the difference between readings corresponding to any divisions of the instrument is correct within  $\pm 0.0005 \text{ mm}$ .

23.4 It is recommended that each indentation be measured by two observers.

### 24. Repeatability

24.1 Let  $d_1, d_2, \dots, d_n$  be the mean values of measured diagonals as determined by one observer, arranged in increasing order of magnitude.

E 92<sup>2</sup>

ASTM Standard E 92-80 - 2001 2 months ago



24.2 The repeatability of the hardness readings on the block is defined as  $(d_{10} - d_1)$ , when ten readings have been made or  $1.32 (d_5 - d_1)$  when five readings are taken on the block.

## 25. Uniformity of Hardness

25.1 Unless the repeatability of hardness readings as measured by the mean diagonals of five or ten impressions is within the limits given in Table 8, the block cannot be regarded as sufficiently uniform for standardization purposes.

## 26. Marking

26.1 Each block shall be marked with the following:

26.1.1 Arithmetic mean of the hardness values found in the standardization test (see also 3.2.2, Note 1).

TABLE 8 Repeatability of Hardness Readings

Range of Standardized Hardness of Test Block	The Repeatability of the Test Block Readings Shall be Less Than:
100 to 240, incl	3 % of $d^{A,B}$
Over 240 to 600, incl	2 % of $d^{A,B}$
Over 600	1.5 % of $d^{A,B}$

$$^A d = (d_1 + d_2 + \dots + d_n)/n.$$

<sup>B</sup> In all cases the repeatability is the percentage given or 1  $\mu\text{m}$  (0.001 mm), whichever is the greater.

26.1.2 The name or mark of the supplier,

26.1.3 The serial number of the block, and

26.1.4 The thickness of the test block or an official mark on the top surface (see 19.6).

NOTE 6—All of the markings except the official mark or thickness should be placed on the side of the block, the markings being upright when the test surface is the upper face.

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

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

ภาคผนวก จ

มาตรฐานการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน ASTM: Designation: C373 – 88



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





Designation: C 373 - 88 (Reapproved 1994)

# Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products<sup>1</sup>

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

## 1. Scope

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

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

## 2. Significance and Use

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

## 3. Apparatus and Materials

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

3.2 *Oven*, capable of maintaining a temperature of 150 ± 5°C (302 ± 9°F).

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

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

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

3.6 *Distilled Water*.

## 4. Test Specimens

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

## 5. Procedure

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

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

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

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

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

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

## 6. Calculation

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

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

$$V = \frac{M - S}{\rho}$$

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-21 on Ceramic Whitewares and Related Products and is the direct responsibility of Subcommittee C21.03 on Fundamental Properties. Current edition approved Sept. 30, 1988. Published November 1988. Originally published as C 373 - 55 T. Last previous edition C 373 - 72 (1982).

C 373

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$B = D/V$$

## 7. Report

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

## 8. Precision and Bias

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

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

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกลศาสตร์ คงาวัง เกิดเมื่อวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดชัยภูมิ เข้ารับการศึกษาในระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนชุมชนบ้านแก้งคร้อหนองไผ่ ปีการศึกษา 2528 ถึง 2531 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนแก้งคร้อวิทยา ปีการศึกษา 2531 ถึง 2534 ระดับอาชีวศึกษา ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น ปีการศึกษา 2534 ถึง 2537 ระดับวิทยาลัย ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปีการศึกษา 2537 ถึง 2539 ระดับปริญญาตรี ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2539 ถึง 2541 วุฒิทางการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในปีการศึกษา 2542 ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย