

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปกระดูกเทียมจากไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้น มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและนำมาอ้างอิงเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 2.1.1 คุณสมบัติของกระดูก
- 2.1.2 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียม
- 2.1.3 เทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียม
- 2.1.4 การออกแบบการทดลองในการผลิต
- 2.1.5 เทคโนโลยีแม่พิมพ์
- 2.1.6 ทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ

2.1.1 คุณสมบัติของกระดูก

กระดูก(Bone)เป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย แคลเซียมฟอสเฟต 70 wt% น้ำ 10 wt% คอลลาเจน 20 wt% และสารอินทรีย์อื่นในปริมาณเล็กน้อย เช่น โปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ และไลปิด คอลลาเจน ดังแสดงในรูป 2.1 เป็นเส้นใยขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.2 ไมครอน หน้าที่หลักของคอลลาเจน คือ ทำให้เกิดความยืดหยุ่นและยืดเหนียวเนื้อกระดูกเอาไว้ แคลเซียมฟอสเฟตอยู่ในรูปผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์และแคลเซียมฟอสเฟต ออสติออน ทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงให้กับเนื้อเยื่อกระดูก เนื่องจากส่วนผสมและโครงสร้างของกระดูกในธรรมชาติไม่ได้แสดงถึงความแข็งแรงและความทนทานต่อการแตกหักที่สูงเพียงพอเพียงอย่างเดียว แต่ยังแสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเดิมได้ และมีความอดุลีความยืดหยุ่นต่ำ ดังนั้น สิ่งหนึ่งที่คาดหวังต่อการสร้างวัสดุทดแทนกระดูกตามทฤษฎี คือการนำวัสดุผสมของสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ผ่านการผสมกันของวัสดุเซรามิก ที่ตอบสนองทางชีวภาพ (Bioactive Ceramic) กับพอลิเมอร์ ด้วยการมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นต่ำ และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเดิมได้ คล้ายกับการเลียนแบบองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างกระดูก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาวัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ โครงสร้างของกระดูกและองค์ประกอบของกระดูกดังแสดงในรูป 2.2

Figure 2.2 illustrates the internal structure of the kidney. The left diagram shows a cross-section of the kidney with labels for the renal cortex, renal medulla, renal pelvis, and renal sinus. The right diagram shows a cross-section of the renal corpuscle, highlighting the glomerulus and Bowman's capsule, and the surrounding renal tubules.

โดยความต้องการในการสังเคราะห์วัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูกขึ้นอยู่กับระดับความบกพร่อง ตัวอย่างเช่น ถ้าเกิดความบกพร่องเล็กน้อย กระดูกสามารถงอกออกมาใหม่ได้ด้วยตัวเองภายในเวลา 2-3 สัปดาห์ ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการผ่าตัด ส่วนในกรณีความบกพร่องอย่างรุนแรงและมีความสูญเสียกระดูกส่วนใดๆ ไปนั้น กระดูกจะไม่สามารถรักษาตัวเองได้ จำเป็นต้องใช้กระดูกปลูกถ่ายทดแทนเพื่อซ่อมแซมการทำงาน โดยไม่ต้องสร้างความเสียหายต่อเนื่องข้างเคียง ปัจจุบันมีหลายวิธีสำหรับการรักษากระดูกและซ่อมแซมกระดูกที่เกิดความบกพร่องเนื่องจากอุบัติเหตุ หรือการติดเชื้อ รวมถึงวิธีการแบบดั้งเดิม (Bonfield et al., 1988) คือ

1) Autograft bone กระดูกทดแทนที่ได้จากตัวของผู้ป่วยเอง ซึ่งก็ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีการรักษาที่ดีมากในทางคลินิก แต่มีข้อจำกัด เช่น กระดูกของผู้ป่วยจะหาได้เฉพาะในปริมาณที่มีจำกัด ต้องทำการผ่าตัดถึง 2 ครั้ง อาจจะทำให้ตำแหน่งของกระดูกที่ถูกตัดออกมาเกิดการติดเชื้อและได้รับการบอบช้ำ และทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการผ่าตัดที่แพงขึ้น

2) Allograft bone กระดูกทดแทนที่ได้จากการบริจาคโดยบุคคลอื่น มีความเสี่ยงในกรณีผู้บริจาคกระดูกเป็นโรคติดต่อ เช่น โรคเอดส์ เป็นต้น

3) Xenograft bone กระดูกทดแทนที่ได้จากกระดูกสัตว์ เช่น กระดูกวัว ปะการัง เป็นต้น มีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ หรือเป็นพาหะนำโรค และมีข้อจำกัดด้านปริมาณที่ต้องการใช้

4) วัสดุในกลุ่มของโลหะ อลลอย เซรามิก พอลิเมอร์ วัสดุผสมทั่วไปและวัสดุผสมนาโน ทั้งหมดเป็นวัสดุที่ใช้ภายในร่างกายมนุษย์ได้ แต่การทำงานในร่างกายสิ่งมีชีวิตยังมีความแตกต่างจากกระดูกธรรมชาติอย่างมาก โดยเฉพาะในเรื่องส่วนประกอบและโครงสร้าง จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบวัสดุให้มีโครงสร้างและส่วนประกอบใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติ โดยการออกแบบวัสดุนั้นถึง

ออกแบบวัสดุเพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง ต้องคำนึงถึงอันตรกิริยาระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุ ซึ่งจำเป็นต้องทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้งถึงความแตกต่างระหว่างวัสดุที่ไม่มีชีวิต (Avital) กับวัสดุที่มีชีวิต (Vital) ในปี 1988 (Williams et al., 1998) ได้คิดค้นคำที่มีความหมายว่า วัสดุที่นำไปใช้งานในร่างกายสิ่งมีชีวิต (Biomaterials) และความสามารถในการเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับร่างกายมนุษย์ (Biocompatibility) เพื่อเป็นการบ่งบอกวัสดุที่แสดงสมบัติทางด้านชีวเวชศาสตร์ ดังนั้นวัสดุที่มีความสามารถในการเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับร่างกายมนุษย์จึงสามารถที่จะเป็นวัสดุที่นำไปใช้งานในร่างกายสิ่งมีชีวิตในร่างกายมนุษย์ได้ด้วย ในปี 1998 Black และคณะได้อธิบายถึงรูปแบบการเข้ากันได้ดีกับร่างกายมนุษย์ไว้ว่า วัสดุนั้นต้องแสดงการตอบสนองต่อเนื้อเยื่อต้นกำเนิดอย่างเหมาะสมในกรณีที่ต้องการ การนำไปใช้งานเฉพาะที่ ก่อนหน้านั้นปี 1995 (Wintermantel et al., 1995) ได้ขยายความของคำจำกัดความนี้ โดยแยกแยะความแตกต่างระหว่างพื้นผิวของวัสดุกับ

ความเข้ากันได้ในโครงสร้างของวัสดุทดแทนไว้ว่า ความสามารถในการเข้ากันได้ในโครงสร้าง หมายถึง การเข้ากันทางเคมี ทางชีววิทยา และทางกายภาพ (รวมทั้งสัณฐานวิทยาของพื้นผิว) อย่างเหมาะสม ระหว่างพื้นผิววัสดุทดแทน กับพื้นผิวเนื้อเยื่อในร่างกาย โครงสร้างที่เข้ากันได้ นี้ จะมีการปรับตัวอย่างเหมาะสมที่สุดต่อพฤติกรรมเชิงกลของเนื้อเยื่อต้นกำเนิด ดังนั้น โครงสร้างที่เข้ากันได้ จึงได้มีการพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุทดแทน เช่น ความแข็ง ค่าความเค้นจากแรงกด ยิ่งกว่านั้นความสำเร็จในการนำวัสดุมาใช้ในงานในร่างกายของมนุษย์นั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก ด้วย เช่น เทคนิคการผ่าตัด (ระดับขั้นของความบอบซ้ำในระหว่างการผ่าตัดเพื่อฝังวัสดุทดแทนเข้าไปภายใน และวิธีการฆ่าเชื้อ) สุขภาพจิตของผู้ป่วย และพฤติกรรมการใช้ชีวิตของผู้ป่วย

2.1.2 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียม

ไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีการตอบสนองแบบว่องไวทางชีวภาพ และมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับกระดูกมนุษย์และเนื้อเยื่อแข็งชนิดอื่นของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ยกตัวอย่างเช่น ไฮดรอกซีอะปาไทต์ประกอบด้วยไอออนที่คล้ายคลึงกันกับโครงสร้างของกระดูก และฟัน ไฮดรอกซีอะปาไทต์แสดงถึงความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดีเยี่ยม ไม่เฉพาะแต่ในเนื้อเยื่อแข็งเท่านั้น แต่ยังเข้ากันได้กับเนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม เช่น ผิวหนังและกล้ามเนื้อ นอกจากนั้นยังเป็นสื่อทำให้เกิดการขยายตัวของเซลล์กระดูก เมื่อนำไปปลูกฝังภายในเนื้อกระดูก ยกตัวอย่างเช่น ใน เนื้อฟัน แบ่งออกเป็นเนื้อเยื่อแข็ง 3 ชนิด 1. ชั้นนอกของฟัน (Enamel) 2. เนื้อฟัน (Dentine) 3. รากฟัน (Cementum) ชั้นนอกของฟันเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงมากที่สุดในร่างกายและมีผลึกไฮดรอกซีอะปาไทต์ถึง 97 wt% และเป็นสารอินทรีย์และน้ำ 3 wt% ในเนื้อฟันเป็นส่วนที่คล้ายกับกระดูกมากที่สุดในส่วนของรากฟันประกอบด้วย 45% wt เป็นผลึกไฮดรอกซีอะปาไทต์ และ 55 wt% เป็นสารอินทรีย์และน้ำ ในร่างกายมนุษย์ พบว่าไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นเซรามิกชีวภาพที่มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นแคลเซียมฟอสเฟต พฤติกรรมเชิงความร้อนของไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นพฤติกรรมหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเพราะกระบวนการผลิตเซรามิกส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงที่น่าสนใจคือไฮดรอกซิลไอออนยังคงเสถียรอยู่ในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะปาไทต์แม้ที่อุณหภูมิสูง (~1350 °C) (Park, 2007)

1) ไฮดรอกซีอะปาไทต์จากวัสดุธรรมชาติ

การเตรียมไฮดรอกซีอะปาไทต์จากวัสดุธรรมชาติ โดยการให้ความร้อนแก่เปลือกหอยหรือกระดูกสัตว์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตอื่น เช่น หอยครง หอยแครง หอยขม หอยแมลงภู่ กระดุกปลา กระดุกวัว ฟันและกระดูกหมู หรือจากปะการัง เป็นต้น การเตรียมไฮดรอกซีอะปาไทต์จากวัสดุธรรมชาติเป็นการประหยัดต้นทุนและ ไม่มีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม การเตรียมไฮดรอกซีอะ

ปาล์ไค้จากธรรมชาติมีหลายวิธี เช่น การเตรียมด้วยกระบวนการทางความร้อน (Thermal decomposition) การเตรียมด้วยกระบวนการสกัดโดยใช้น้ำที่กึ่งสภาวะวิกฤติ (Subcritical water) และการเตรียมด้วยกระบวนการทางเบส (Alkaline hydrothermal hydrolysis) เป็นต้น กระบวนการเตรียมทั้งหมดนี้เป็นการสกัดเอาสารอินทรีย์ออกจากเนื้อกระดูกสัตว์ ปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยด่างเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ในหม้อนึ่งแรงดันสูง (Autoclave) และอบด้วยเตาไมโครเวฟ การสกัดโดยใช้น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤติหรือมีการสกัดโปรตีนด้วยเทคนิคแรงดันต่ำ เป็นเทคนิคการใช้ความร้อนภายใต้แรงดัน อุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่าอุณหภูมิค่าวิกฤติของน้ำ แต่สูงกว่า 100 °C เป็นอุณหภูมิที่ใช้กันบ่อย การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขั้วของตัวทำละลาย เปลี่ยนแรงดึงดูด และเปลี่ยนความหนืด ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของน้ำลดลงด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้โมเลกุลน้ำไม่มีขั้วมากขึ้น การสกัดโดยใช้น้ำที่กึ่งสภาวะวิกฤติ โดยมากมักใช้เพื่อสกัดสารอินทรีย์ประเภทลิพิด โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจากเปลือกของเมล็ดพืช การสกัดด้วยอุณหภูมิ 275 °C มีประโยชน์ในการสกัดคอลลาเจนและสารอินทรีย์อื่นๆ ให้หมดไปจากกระดูกวัว เพื่อให้ได้ไฮดรอกซีอะปาทาइटบริสุทธิ์ ทั้ง 3 กระบวนการ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแบบดั้งเดิมที่มีจุดประสงค์เดียวกัน คือ การจัดของเหลือใช้ทางชีวภาพ การให้ความร้อนโดยตรงกับกระดูกวัวเป็นการสลายคอลลาเจนและสารอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งสามารถจัดโดยการให้ความร้อน (Calcination) และบดจนละเอียด และเมื่อนำไปวิเคราะห์ห่ออนุพันธ์อินฟราเรด วิเคราะห์เฟสของไฮดรอกซีอะปาทาइटด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการกระจายด้วยรังสีเอกซ์ ผลการวิจัยบ่งบอกว่ากระบวนการเตรียมด้วยความร้อน มีข้อดีคือ สามารถผลิตไฮดรอกซีอะปาทาइटรูปแท่งขนาดนาโนเมตรได้ และค่อนข้างพบได้มากกว่ากระบวนการโดยการใช้ไฟ้ และกระบวนการโดยใช้ด่างอย่างใดก็ตามการเตรียมด้วยกระบวนการใช้น้ำกับการใช้ด่างก็สามารถผลิตผงไฮดรอกซีอะปาทาइट ขนาดนาโนเมตรได้เช่นเดียวกัน โดยทั้ง 3 กระบวนการนำไปวิเคราะห์หาสัดส่วนต่อโมล พบว่ากระบวนการทางความร้อนได้ Ca:P = 1.65 โดยการใช้ไฟ้กึ่งวิกฤติได้ Ca:P = 1.86 ซึ่งค่าสัดส่วนโมลที่ได้เป็นค่าที่ยอมรับได้ในการเป็นไฮดรอกซีอะปาทาइटกระบวนการทั้ง 3 มีข้อดี คือสามารถผลิตไฮดรอกซีอะปาทาइटด้วยกระบวนการที่ง่ายและราคาถูกซึ่งผลิตด้วยกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากและสามารถผลิตได้ในปริมาณที่มาก (Charriere et al., 2003)

2) สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะปาทาइट

ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นกับเทคนิคการวัดค่า รูพรุน ขนาดเกรน และสิ่งปนเปื้อนในไฮดรอกซีอะปาทาइट ปัจจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูลยังมอดูลัสของไฮดรอกซีอะปาทาइटแบบเนื้อแน่นมีค่าในช่วง 35-120 GPa การทนต่อการบิดงอมีค่าในช่วง 44-115 GPa การทนต่อการกดมีค่าในช่วง 120-900 GPa และการทนต่อแรงดึงมีค่า

ในช่วง 38-300 GPa ตามลำดับ ขณะที่ยังมอดูลัสของกระดูกจริงมีค่าอยู่ในช่วง 10-20 GPa ซึ่งอยู่ในค่าที่เปรียบเทียบกันได้ แต่เนื่องจากการใช้งานจริงต้องคำนึงถึงการออกแบบให้เกิดความปลอดภัยเมื่อนำไปใช้เป็นวัสดุปลูกฝังภายในร่างกายมนุษย์ ดังนั้นถึงทำให้รู้ว่าสมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบเนื้อแน่นนั้นยังไม่เพียงพอต่อการรับน้ำหนัก ไฮดรอกซีอะปาไทต์มีค่าความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC}) และ Weibull modulus ประมาณ 5-8 ซึ่งหมายความว่าไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นเซรามิกที่มีความเปราะ มีการขยายตัวตามรอยแตกที่สูง และไม่คงทนภายใต้การรับน้ำหนักเป็นเวลานาน เช่น ฟันเทียมจากไฮดรอกซีอะปาไทต์จะแตกหักภายในเวลา 1 ปี (Charriere et al., 2003)

3) เปลือกหอย มีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลาย ส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนที่เหลือประกอบด้วย แคลเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซิลิเกต และโปรตีนประเภทคอนไดโอลิน แต่ละองค์ประกอบของเปลือกหอยจะมีปริมาณต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิด แหล่งที่อยู่อาศัย ตลอดจนสภาพแวดล้อมของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ ตัวอย่างเช่น เปลือกหอยกาบคู่หรือหอยสองฝาในคลาสเฟลิไซโปดา ประกอบด้วยแร่ธาตุหลักคือ แคลเซียม (25%) แมกนีเซียม (0.014%) สตรอนเตียม (0.007%) และโซเดียม (0.470%) ส่วนที่เหลือเป็นธาตุจำนวนน้อยมาก(อยู่ในระดับน้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน) ได้แก่ โพแทสเซียม เหล็ก แมงกานีส นิกเกิล สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว โคบอลต์ แคลเมียม และอะลูมิเนียม สรุปได้ว่าเปลือกหอยมีแร่ธาตุหลักเป็นแคลเซียม ซึ่งมีปริมาณที่มากเพียงพอสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตเซรามิกไฮดรอกซีอะปาไทต์ และแร่ธาตุส่วนที่เหลือไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ตามมาตรฐาน ASTM ในการใช้วัสดุอื่นที่มีโครงสร้างคล้ายกระดูกเพื่อทดแทนกระดูกมนุษย์ ได้แก่ (1) ไม่มีส่วนประกอบอินทรีย์สาร (2) ความเข้มข้นของโลหะหนักอันตรายต้องไม่มากเกินไปปริมาณนี้ อาร์เซนิก 3 พีพีเอ็ม แคดเมียม 5 พีพีเอ็ม เมอร์คิวรี 5 พีพีเอ็ม และตะกั่ว 30 พีพีเอ็ม โลหะหนักโดยรวมทั้งหมดต้องไม่เกิน 50 พีพีเอ็ม (3) โลหะและออกไซด์ทั้งหมดต้อง $\leq 0.1\%$ (4) โครงสร้างมากกว่า 95% ต้องเป็นไฮดรอกซีอะปาไทต์ (5) วัสดุต้องได้รับการทดสอบความเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต และ (6) ต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิต (วันทนา, 2539)

4) ตัวประสาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA)

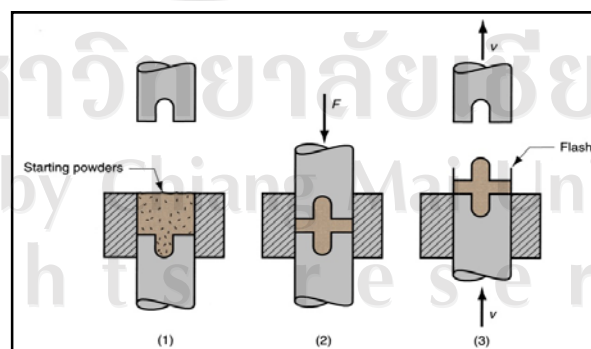
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Hermann และ Haehnel, 1924) ไฮโดรไลซิส พอลิไวนิล แอซิเตท (Polyvinyl Acetate) ในเอทานอล (Ethanol) กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ถูกผลิตขึ้นในเชิงพาณิชย์จากพอลิไวนิลแอซิเตท มักจะเป็นกระบวนการต่อเนื่อง ในกลุ่มแอซิเตทนั้นจะถูกไฮโดรไลซิสโดยเอสเทอ (Ester) ซึ่งเปลี่ยนเป็นเมทานอล (Methanol) ในสถานะที่ไม่มีโซเดียมเมทริเลต (Sodium Methylate) หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) ที่มีน้ำ ลักษณะทางกายภาพ และการนำไปใช้เฉพาะทางนั้นขึ้นอยู่กับ

ระดับของการพอลิเมอร์ไลเซชัน (Polymerization) และระดับของการไฮดรอลิซิส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ถูกจัดประเภทอยู่ใน 2 หมวด คือ ไฮดรอลิซิสเพียงบางส่วน และไฮดรอลิซิสทั้งหมด ซึ่งพอลิไวนิลที่ไฮดรอลิซิสเพียงบางส่วนนั้นถูกนำไปใช้ในอาหาร พอลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้นไม่มีกลิ่นและไม่มีรส โปร่งแสงผงแกรนูโลมีสีขาวหรือสีครีม นำไปใช้เป็นฟิล์มป้องกันความชื้นสำหรับยาเม็ด ผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและสำหรับอาหารซึ่งรวมบรรจุ หรือ บรรจุรวมในอาหารแห้งเพื่อป้องกันความชื้น ลักษณะพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สำหรับการใช้กับอาหารนั้น จะไม่มีกลิ่นและรส โปร่งแสง มีผงแกรนูโลสีขาวหรือครีม สามารถละลายน้ำได้ ละลายในเอทานอลได้เล็กน้อย แต่ไม่ละลายในสารละลายออร์แกนิกส์ โดยทั่วไปแล้วสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5% มีค่า pH อยู่ในช่วง 5.0 ถึง 6.5 มีจุดหลอมเหลว 180 ถึง 190°C น้ำหนักโมเลกุลมีค่าระหว่าง 26,300 และ 30,000 และมีระดับการไฮดรอลิซิสที่ 86.5 ถึง 89% (Dean-MO, 1996)

2.1.3 เทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียม

1) การอัดขึ้นรูป (Press Forming)

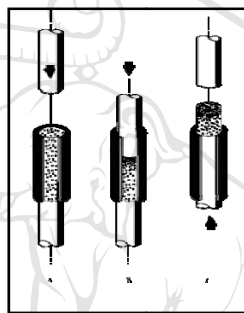
การอัดขึ้นรูปแบบแห้ง (Dry Pressing) โดยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว (Uniaxial Pressing) ในปัจจุบันนี้ มีการใช้เทคนิค การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว กันอย่างแพร่หลาย ในกระบวนการการขึ้นรูปเซรามิก กระบวนการการขึ้นรูปนี้ ประกอบด้วยการอัดผงแป้ง ซึ่งถูกบรรจุในช่องว่าง โดยการให้ความดันทิศทางเดียว อาจใช้หัวกดตัวเดียว หรือหลายตัว ช่องว่างทำขึ้นจากฐาน ซึ่งเคลื่อนที่ได้เรียกว่า Bottom Punch และ ผนัง ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ หรือ อยู่หนึ่งกับที่เรียกว่า แม่พิมพ์ (Mould Die) เทคนิคการอัดขึ้นรูป มีความแตกต่างกัน ในด้านการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ Top Punch, Bottom Punch และ Die และความดันที่ใช้ (ปรีดา, 2532) ดังแสดงในรูป 2.3



รูป 2.3 การอัดแบบทิศทางเดียว

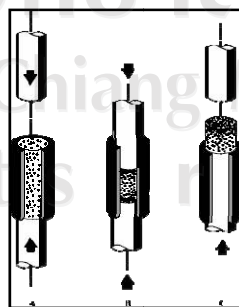
วิธีการอัดแบบทิศทางเดียว (Uniaxial Pressing) ได้แบ่งวิธีการอัดเป็น 2 วิธี คือ

1.1) การอัดแบบกดครั้งเดียว (Single Action Uniaxial Pressing) ให้ความดันผ่านทาง Top Punch ซึ่งเข้าไปในช่อง แล้วพักแป้นไว้ หัวกดอยู่ด้านบนกดลงมา และแม่พิมพ์ยังไม่เคลื่อนที่ในขั้นตอนนี้ หลังจากการอัดแป้นแล้ว หัวกดตัวบน จะเคลื่อนที่ออก หัวกดตัวล่าง จะเคลื่อนที่ เอาชิ้นงานออกจากแบบพิมพ์ ความเสียหายระหว่างอนุภาคแป้น ระหว่างอนุภาค และผนังแม่พิมพ์ เป็นสาเหตุที่ทำให้ ความหนาแน่นในชิ้นงานลดลง การขึ้นรูปแบบนี้ เป็นกระบวนการการผลิตสำหรับผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่าง รูปทรงง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน และความหนาของชิ้นงานลดลง (คณพล, 2550) ดังแสดงในรูป 2.4



รูป 2.4 การอัดแบบกดครั้งเดียว (Single Action)

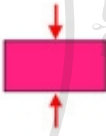
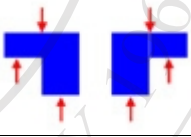
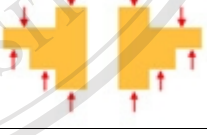
1.2) การอัดแบบกดสองครั้ง (Double Action Uniaxial Pressing) ใช้ในการผลิต เมื่อชิ้นงานมีความหนามาก เกินความสามารถในการผลิตชิ้นงานด้วยเทคนิค Single Action ในกรณีนี้ Top Punch และ Bottom Punch ส่งความดันไปยังแป้น ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ที่บรรจุไว้ในแบบพิมพ์ วัฏจักร 1 รอบสิ้นสุดลงเมื่อ Top Punch ถูกถอนออกไป และหัวกดตัวล่าง ดันชิ้นงานออกมา ในกรณีนี้ จะเกิดการกระจายความหนาแน่น อย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน ดังแสดงในรูป 2.5



รูป 2.5 การอัดแบบกดสองครั้ง (Double Action)

วิธีการอัดทิศทางเดียวก็จะประกอบไปด้วยการขับเคลื่อนหลายส่วนของการอัด ซึ่งการขับเคลื่อนการอัดแบบก็จะแบ่งตามลักษณะรูปร่างของชิ้นงานมีลักษณะอย่างไร ควรใช้การอัดแบบในการขับเคลื่อนที่ส่วน ซึ่งก็จะแบ่งการขับเคลื่อนของการอัดขึ้นรูป ดังแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 รูปแบบการอัดขึ้นรูปทิศทางเดียวแบบต่างๆ

ชนิดที่	การขับเคลื่อน	ลักษณะการให้แรงอัด	แรงอัดที่กระทำต่อชิ้นงาน
1	ส่วนเดียว	ให้แรงอัดทางเดียว (อัดชิ้นงานบาง)	
2	สองส่วน	ให้แรงอัดบนและล่าง (อัดชิ้นงานหนา)	
3	สองส่วน หลายจังหวะ	ให้แรงอัดบนและล่าง ตัวกดบนหรือล่างมี 2 ระดับ	
4	จังหวะ ซับซ้อน	ให้แรงอัดบนและล่าง ตัวกดบนหรือล่างมีหลาย ระดับ	

การอัดขึ้นรูปให้ได้ชิ้นงานที่มีความสม่ำเสมอ และมีรอยแตกร้าวน้อย นั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความสามารถในการไหลตัวของผงเข้าเดิมในแบบ ก่อนที่ผงจะถูกอัด การกระจายตัวของขนาดของผง การเติมสารเคมีลงในผงเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผงและผนังแบบ ลักษณะของตัวแบบสำหรับอัดและการเคลื่อนที่ของส่วนต่างๆ ของตัวแบบที่จะเอื้อให้เกิดการไหลตัวของผงได้ดีในขณะอัด ลักษณะการให้แรงอัด และลักษณะหรือจังหวะการดันขึ้นงานออกจากแบบหลังการอัด

2) การเผาพูนิก (Sintering)

กระบวนการที่เซรามิกถูกเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) เพื่อที่จะให้ผงอนุภาคผนึกตัวเป็นเนื้อเดียวกันและมีความแข็งแรงขึ้นในระหว่าง

การเผา โดยอาศัยการให้ความร้อนแก่อนุภาคผงที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมาแล้วด้วยการใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจะถูกควบคุม โดยเฉพาะคุณสมบัติของเนื้องาน บรรยากาศในการเผา ความเค้นที่เกิดขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ระยะเวลาในการเผา และรวมอัตราการขึ้น/ลง (Heating / Cooling Rates) ของอุณหภูมิที่ใช้ ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของชิ้นงานที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของการเผาขึ้นเตอรืคือองค์ประกอบและความหนาแน่นของอนุภาคผงที่ผ่านการขึ้นรูปมา ซึ่งการเลือกใช้เนื้องานที่มีความหนาแน่นสูง จะช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง และทำให้ความแข็งแรงเชิงกลสูงตามไปด้วย พฤติกรรมของการขึ้นเตอรืนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ รูปแบบของกลไกการขึ้นเตอรืแบบต่างๆ ไปได้แก่

การขึ้นเตอรืแบบสถานะของแข็ง (Solid State Sintering หรือ SSS) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับเฟสที่เป็นของแข็งและรูพรุนเท่านั้น

การขึ้นเตอรืแบบมีเฟสของเหลว (Liquid Phase Sintering หรือ LPS) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทั้งสาม แต่จะเน้นเฉพาะที่บริเวณส่วนประกอบของแข็ง เนื่องจากวัสดุส่วนใหญ่เป็นของแข็ง (มีของเหลวอยู่ไม่เกินร้อยละ 20)

การขึ้นเตอรืแบบแก้วหนืด (Viscous Glass Sintering หรือ VGS) ซึ่งเป็นกลไกที่อนุภาคผงแก้วเกิดการแน่นตัว หรือที่เรียกว่าการไหลหนืด (Viscous flow) เช่นในการเคลือบผิว (Glazing หรือ Enamelling) โดยจะเกี่ยวข้องกับของเหลว (แก้วที่หลอม) และรูพรุน

การขึ้นเตอรืแบบวัสดุผสมหนืด (Viscous Composite Sintering หรือ VCS) หรือ วิตริฟิเคชัน (Vitrification) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับระบบที่มีปริมาณของเหลวอยู่มากกว่าในกรณีของ LPS และเป็นบริเวณของการขึ้นเตอรืที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พวกถ้วยชามหลายๆ ชนิด เช่น พอร์ซเลน การขึ้นเตอรืแบบสถานะของแข็ง

การขึ้นเตอรื (Sintering) เป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้อนุภาคเกิดการสร้างพันธะกันอย่างสมดุล โดยมีโครงสร้างหลักเป็นของแข็งที่พัฒนามาจากการเคลื่อนย้ายมวลลักษณะต่างๆ ที่มักจะเกิดขึ้นในระดับของอะตอม การเกิดพันธะเชื่อมต่อกันดังกล่าวทำให้ระบบมีความแข็งแรงสูง และมีพลังงานลดลง นอกจากนี้ยังอาจจะกล่าวได้ว่าการขึ้นเตอรืนั้นหมายถึงการกำจัดรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคผงเริ่มต้น โดยอาศัยการหดตัวขององค์ประกอบที่เชื่อมอยู่ติดกันแล้วเกิดการเติบโตไปด้วยกัน โดยมีการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันขึ้นมาทุกขั้นตอนที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนสภาพชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป ไปเป็นโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยการยึดเกาะกันของเกรนต่างๆ ล้วนแต่เป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการขึ้นเตอรืทั้งสิ้น

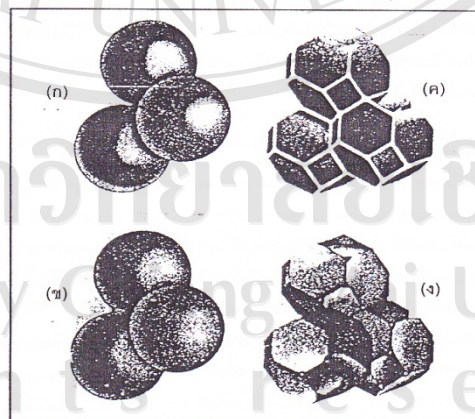
การหดตัวของชิ้นงานเซรามิกขณะที่ทำการเผาขึ้นเตอรื สามารถตรวจสอบการวัดขนาด หรือหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และเวลาในการเผา

ดังเช่น ตัวอย่างของพฤติกรรมการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง (Solid-State Sintering) ทั่วๆ ไปที่แสดงในรูป 2.6 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักที่มีความคาบเกี่ยวต่อเนื่องกันอยู่คือ

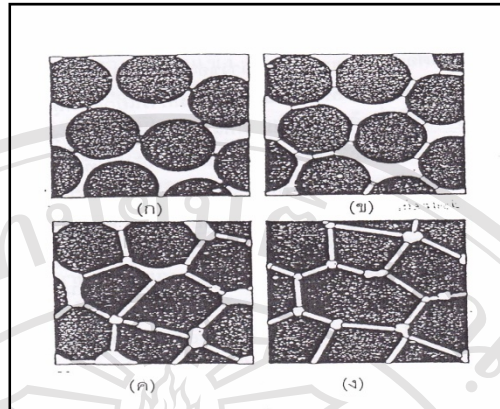
1) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น (Initial Sintering) จะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวกันใหม่อีกครั้งหนึ่งของอนุภาคผงภายในชิ้นงานและการเกิดพันธะที่แข็งแรง หรือคอ (Neck) ขึ้นมาที่บริเวณที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคผง ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานในช่วงนี้อาจจะเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ไปถึง 0.6 ได้ ส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจากการที่อนุภาคผงมีการแตกตัวกันมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูป 2.7 (ข)

2) การซินเตอร์ช่วงกลาง (Intermediate Sintering) เป็นช่วงที่ขนาดของคอเริ่มโตขึ้นและปริมาณของความพรุนในชิ้นงานจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคเริ่มเข้ามาใกล้ชิดติดกันมากยิ่งขึ้น ทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวลงอย่างชัดเจน เริ่มมีเกรนและขอบเกรนเกิดขึ้นพร้อมกับมีการเคลื่อนที่ของสิ่งเหล่านี้ ทำให้เกิดการเติบโตของเกรนบางเกรนขึ้น ขั้นตอนนี้จะมีการดำเนินการเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่องในขณะที่ช่องว่างของรูพรุนจะเริ่มเกิดการเชื่อมต่อกัน (พากรูพรุนเปิด) การหดตัวของชิ้นงานจะเกิดการหดตัวขึ้นมากที่สุดในการซินเตอร์ช่วงกลางนี้ และอาจจะทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.9 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ค)

3) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย (Final Stage Sintering) เป็นช่วงที่รูพรุนในชิ้นงานเริ่มปิดตัวเองลงและค่อยๆ ถูกกำจัดให้หมดไปจากชิ้นงานอย่างช้าๆ โดยอาศัยกลไกการแพร่ของอากาศจากรูพรุนออกมาตามแนวของขอบเกรน แล้วหลุดออกไปจากผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานเกิดการแน่นตัวเพิ่มมากขึ้นจากเดิมอีกเพียงเล็กน้อย ขนาดขอบเกรนจะเพิ่มขึ้นในการซินเตอร์ช่วงสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ง)



รูป 2.6 แสดงพฤติกรรมการซินเตอร์แบบสถานะของแข็งทั่วๆ ไปการเกาะยึดของโครงสร้างอนุภาคผง ที่มา: (สุพล, 2551)



รูป 2.7 โครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการซินเตอร์แบบสถานะของแข็ง
ที่มา: (สุพล, 2551)

2.1.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments : DOE)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments : DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time) จะให้ผลตอบแทนเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่เราต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมาก และยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ

1) การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองซ้ำ ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

2) การสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลอง และลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายตัวของปัจจัยแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

3) การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะเป็นอันหนึ่งอัน

เดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อก จะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ที่ต้องการจะศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่

1) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละซ้ำของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองรวมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ $a \times b$ การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนซ้ำทั้งหมด n ครั้ง

2) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้ จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่งๆ ใน 1 ซ้ำที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบ เช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ โดยปกติในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย “-”

3) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2 ระดับ หรือการออกแบบเชิง แฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทดลองสามารถละเลยอันตรกิริยาขึ้นสูงบางตัวได้ เนื่องจากถ้าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แบบเต็มมีจำนวนปัจจัยมาก จำนวนการทดลองอาจจะเพิ่มขึ้นมากเกินไปกว่าทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างครบถ้วน การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจึงถูกนำมาใช้ในการกรอง เพื่อหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจของผู้ทดลอง จึงใช้การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่ามีปัจจัยใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นการทดลอง เนื่องจากโดยมากแล้ว ในขณะนั้นจะมีปัจจัยจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป

4) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k หมายถึงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ และระดับทั้งสามของ

แต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ค่า ปานกลางและสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามเป็นตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามลำดับ สังเกตว่าการทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบที่สนใจ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบพหุนามกำลังสอง (Quadratic Model) การออกแบบ 3^k จะเหมาะสม เมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง แต่การออกแบบนี้ไม่ได้เป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด ในการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสอง โดยการออกแบบการทดลองที่เป็นทางเลือกที่ดีกว่า คือ การออกแบบพื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology : RSM) เป็นวิธีการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ ที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และผู้ทดลองมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบนี้ ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากมักจะไม่นิยามความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นแรก คือ ผู้ทดลองต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือ แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่ง ดังสมการ 2.1

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.1)$$

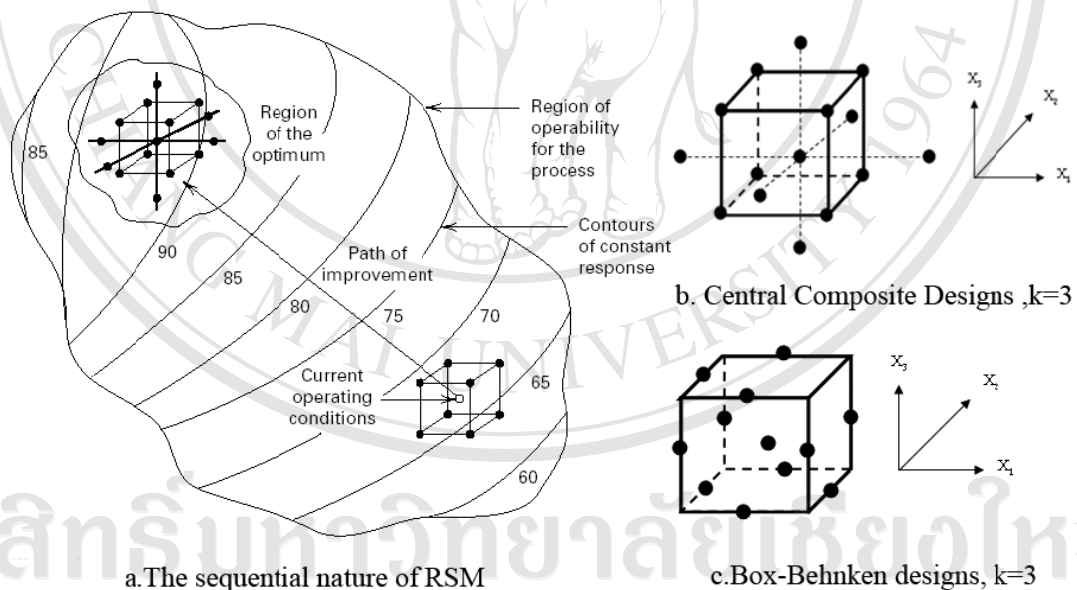
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จึงใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการ 2.2

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j < i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.2)$$

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมาก จะใช้แบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่งหรือกำลังสองในการหาคำตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ซึ่งถ้าพื้นผิวที่สนใจมีขนาดใหญ่ การออกแบบที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบจะมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการสืบความชันสูงสุด (Steepest Ascent) การออกแบบ

สำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองพหุนามกำลังสองของผลตอบซึ่ง มีวิธีการที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ

1) การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัวในการออกแบบต้องกำหนด คือ ระยะทาง α ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c โดยทั่วไปการออกแบบนี้จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี n_f รัน, 2^k รัน ในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว และ n_c รัน ที่จุดศูนย์กลาง การเลือก α ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่น่าสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลมการออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วย ตามรูป 2.9 ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์มีเสถียรภาพเป็นที่ยอมรับ ซึ่งการทดลองที่บริเวณของการออกแบบส่วนประสมกลางจะมีการเพิ่มข้อมูล เพื่อให้มีจุดเพียงพอที่จะหาแบบจำลองกำลังสองได้ เช่น $(x_1 = 0, x_2 = \pm 1.414)$ ($x_1 = \pm 1.414, x_2 = 0$)



รูป 2.8 ขั้นตอนวิธีการของวิธีการพื้นผิวผลตอบและวิธีการพื้นผิวผลตอบแบบต่างๆ

ที่มา: (Montgomery, 2006)

2) การออกแบบบ็อกซ์-เบนห์นเคน (Box-Behnken Design : BBD) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับการพิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้สร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบระหว่าง

แฟคทอเรียล 2^k และการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ (Balanced Incomplete Block Designs) ผลของการออกแบบประเภทนี้มีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ นอกจากนั้นการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย เนื่องจากการออกแบบนี้เป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ ซึ่งการกระทำดังกล่าวมีประโยชน์มากเพราะจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ

2.1.5 เทคโนโลยีแม่พิมพ์

1) ประเภทของแม่พิมพ์

ในการผลิตสินค้าที่ต้องการขนาด รูปร่าง คุณภาพและความเที่ยงตรง โดยที่หัวใจของกระบวนการผลิตคือ เครื่องมือที่เรียกว่า “แม่พิมพ์” ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัสดุที่ต้องการผลิตเป็นสินค้า ดังนั้นในบทนี้จะขอลำดับถึงลักษณะของแม่พิมพ์ กระบวนการสร้างแม่พิมพ์เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

ประเภทของแม่พิมพ์ แบ่งออกได้ 5 ประเภทดังต่อไปนี้คือ

1. แม่พิมพ์พลาสติก หมายถึงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งการที่จะสร้างแม่พิมพ์ชนิดใดจะขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ ชนิดพลาสติกและความสะดวกรวดเร็วในการผลิต โดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทแม่พิมพ์พลาสติกได้ดังต่อไปนี้ แม่พิมพ์ฉีด (Injection Moulding), แม่พิมพ์อัดและอัดฉีด (Compression and Transfer Moulding), แม่พิมพ์เป่า (Blow Moulding), แม่พิมพ์งานรีด (Extrusion) และแม่พิมพ์งานเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermoforming)

2. แม่พิมพ์โลหะ หมายถึงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์โลหะ แม่พิมพ์โลหะสามารถจำแนกออกได้ดังนี้ แม่พิมพ์ปั๊ม (Stamping), แม่พิมพ์ขึ้นรูป (Forming), แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึก (Deep Draw Die), แม่พิมพ์ตีขึ้นรูป (Forging) และแม่พิมพ์ฉีดหล่อ (Die Casting)

3. แม่พิมพ์แก้ว หมายถึงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก้วซึ่งจะนำแก้วมาหลอมละลาย เมื่อแก้วถูกหลอมละลายแล้วจะนำไปผ่านเครื่องขึ้นรูปให้แก้วมีลักษณะเป็นท่อ (Parison) แล้วจึงนำเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อทำการเป่าให้ได้รูปทรงตามแบบ แล้วจึงปลดชิ้นงานออก แม่พิมพ์แก้วจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับแม่พิมพ์เป่าพลาสติกโดยทั่วไปแม่พิมพ์แก้วจะนำมาใช้ในการผลิตขวด แก้วน้ำ เป็นต้น

4. แม่พิมพ์เซรามิก เซรามิกเป็นวัสดุอินทรีย์ที่ไม่ใช่โลหะ อาศัยหลักการนำวัสดุที่ต่างกันมารวมเข้าด้วยกัน เช่น ดิน หิน แร่ ยิบซัม ซีเมนต์ เป็นต้น จากการประสานกันของวัสดุต่างๆ ทำให้เซรามิกมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น จุดหลอมเหลว การกัดกร่อน สภาพเปราะต่อภาระทางกล เป็นต้น ด้วยเหตุที่เซรามิกมีโครงสร้างที่แตกต่างกันทำให้การทำผลิตภัณฑ์จากเซรามิกมีอยู่หลายวิธี เช่น การอัดขึ้นรูปในสภาพอัดแห้ง การอัดขึ้นรูปในสภาพเปียก การอัดรีดขึ้นรูป การเผา และการเจียรไน

5. แม่พิมพ์ยาง หมายถึงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนที่เป็นยาง เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จะนำยางแท่งที่แข็งตัวมาผ่านความร้อนเพื่อให้ยางอยู่ในสภาพหลอมเหลวและจึงทำการฉีดหรืออัดยางที่อยู่ในสภาพหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์แล้วจะปล่อยให้ยางเย็นตัวเพื่อให้เกิดการแข็งตัวเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามแบบแม่พิมพ์

2) ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์
การออกแบบผลิตภัณฑ์ เป็นการกำหนดรูปแบบของผลิตภัณฑ์หรือผลของการสร้างรูปวัตถุ ให้เกิดเป็นลักษณะต่างๆ ออกมาให้สามารถมองเห็นและสัมผัสได้ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ทางออกแบบและการผลิต ตามรูป 2.10 ซึ่งโดยรวมแล้วจะพิจารณาจากวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนตามหลักเกณฑ์ที่ว่า ออกแบบทำไม เพื่อใคร ที่ไหน อะไร อย่างไร และมูลค่าเท่าไร ซึ่งนักออกแบบจำเป็นต้องนำเอาวัตถุประสงค์ดังกล่าวมาผสมผสานความคิดเพื่อให้ได้สินค้าที่มีความเหมาะสม และเป็นไปตามความต้องการของตลาด

ในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์นั้นประกอบด้วย 2 ประการ คือ

1. การศึกษาเบื้องต้น ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมแผนการออกแบบ ซึ่งได้มาจากวิธีการศึกษาค้นคว้าวิจัย และข้อมูลด้านอื่นๆ เช่น การตลาด การผลิต ต้นทุน ประเภทวัสดุที่ใช้รูปร่าง และ ความต้องการของผู้ใช้ เป็นต้น เพื่อกำหนดเป็นแนวทางในการออกแบบผลิตภัณฑ์

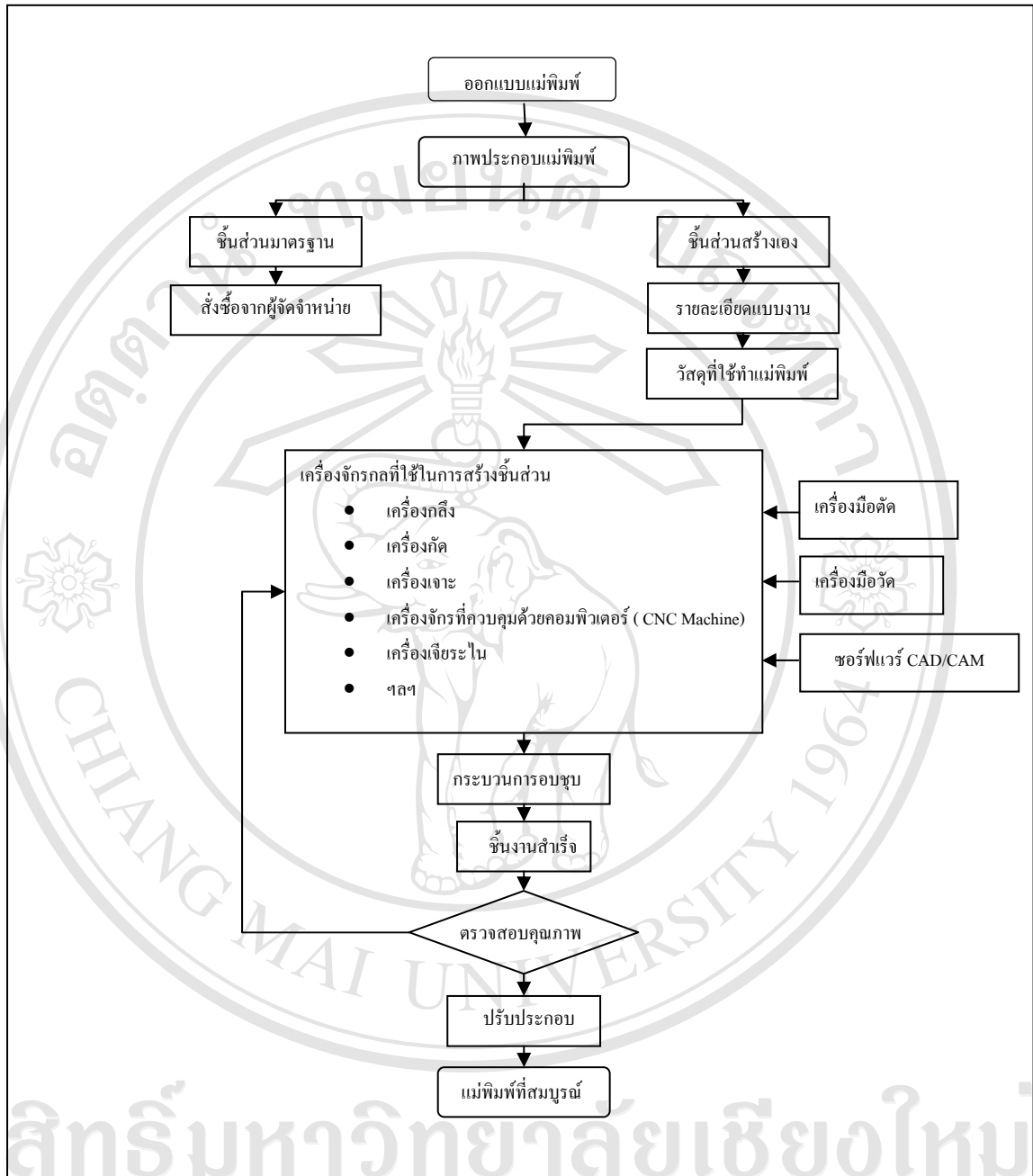
2. การออกแบบ เมื่อได้ข้อมูลเบื้องต้นและแนวทางของผลิตภัณฑ์แล้วจึงนำมาทำการประมวลผลเพื่อออกแบบให้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ ในรูปของหน้าที่การใช้งานและรูปทรงด้วยการร่างภาพหรือสร้างเป็นหุ่นจำลองที่มีรายละเอียด เพื่อประกอบการอธิบายในการตัดสินใจสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

การออกแบบเบื้องต้นได้รับการยืนยันให้ดำเนินการผลิต โดยที่ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ต้องการดำเนินการเสนอแบบจริงที่สื่อความหมายให้เป็นที่เข้าใจได้ ซึ่งในส่วนนี้คือการเขียนแบบงานที่แสดงโครงสร้างและสัดส่วน ตลอดจนรายละเอียดปลีกย่อยเพื่อขยายความชัดเจนของผลิตภัณฑ์นั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ใดๆ ก็ตามที่มีจำนวนมาก จำเป็นต้องอาศัยแม่พิมพ์ที่สามารถครอบคลุมถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ให้ได้ทั้ง รูปทรง ขนาด น้ำหนัก ตามที่ผู้ออกแบบ

กำหนดไว้ ซึ่งลักษณะของกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกันจะส่งผลโดยตรงมาจากแม่พิมพ์ที่นำมาใช้งาน ดังนั้น การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยแสดงลำดับขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์ตามรูป 2.9 ซึ่งต้องยึดหลักการที่ว่า

- แม่พิมพ์คุณภาพดี ผลผลิตที่ดีย่อมเกิดขึ้น
- แม่พิมพ์ผลิตชิ้นงานออกมาได้เร็วผลตอบแทนจากการลงทุนจะคืนกลับมาโดยเร็ว

แม่พิมพ์มีราคาที่เหมาะสม ย่อมส่งผลให้ได้เปรียบทางธุรกิจ ในปัจจุบันการออกแบบแม่พิมพ์ได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยมีการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบมีความแม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น เนื่องจากในหน่วยความจำของระบบคอมพิวเตอร์ได้เก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการวิเคราะห์ความถูกต้องของการออกแบบไว้อย่างมากมาย ทำให้ลดระยะเวลาการทำงานขั้นตอนนี้เป็นอย่างมาก แต่การออกแบบจะให้สมบูรณ์ได้นั้น บุคลากรที่ทำงานด้านนี้ต้องมีประสบการณ์ในการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแม่พิมพ์มาก่อน เพื่อนำประสบการณ์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในระหว่างการผลิตต่อไป



รูป 2.9 แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์

ที่มา: เอกสารสถาบันไทย-เยอรมันเรื่องเทคโนโลยีแม่พิมพ์โลหะ (2545)

ที่ผ่านมาได้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อชิ้นงานและแม่พิมพ์ต่างๆ เช่น ระยะช่องว่างระหว่างพินซ์และคาย (Clearance) ชนิดของวัสดุทำพิมพ์ ชนิดของวัสดุขึ้นงาน รวมทั้ง การศึกษาการสึกหรอของแม่พิมพ์ (ณัฐศักดิ์, 2545) รวมไปถึงการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการ

วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ เช่น แรงที่กระทำต่อด้านข้างพื้นผิวและคาย (พงศพันธ์, 2543) เพื่อพัฒนาคุณภาพของแม่พิมพ์ให้มีสมบัติที่ได้มาตรฐานและเพื่อให้แม่พิมพ์มีความเหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งานมากที่สุด

3) วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

วัตถุดิบหลักที่นิยมใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ และเครื่องมือสำหรับงานแม่พิมพ์คือ เหล็ก โดยเหล็กที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์จะอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าเครื่องมือ ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆในปริมาณสูง เพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูงเหมาะสำหรับการปรับปรุงสมบัติด้านทานการสึกหรอ สมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือ ได้แก่

1. ความสามารถในการชุบแข็ง (Harden Ability)
2. ความเหนียว (Toughness)
3. ความทนต่อการเสียดสี (Wear Resistance)
4. การรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Red-Hardness)
5. ความสามารถในการตัดเฉือน (Machine Ability)
6. ความต้านทานการสูญเสียคาร์บอน (Resistance to Decarburization)
7. การไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือขนาด (Non Deformation Properties)

เหล็กกล้าเครื่องมือที่นำมาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ และเครื่องมือชิ้นสามารถที่จะแบ่งออกได้ตามลักษณะการใช้งานได้ 6 ประเภทดังนี้

1. เหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon) ที่มีผสมคาร์บอน ตั้งแต่ 0.60-1.40 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสมบัติด้านการชุบแข็ง หรือความลึกของผิวชุบแข็งจึงต่ำ และจำเป็นต้องชุบแข็งด้วยน้ำ ในบางกรณีอาจมีการผสมโครเมียมหรือวานาเดียมลงไปเล็กน้อย เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และทนต่อการเสียดสี เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีราคาถูกกว่ากลุ่มอื่น และมีจุดเด่น คือ สามารถกลึงไสเพื่อตกแต่งชิ้นงานได้ง่าย สูญเสียคาร์บอนที่ผิวยาก จุดด้อยของเหล็กกลุ่มนี้ คือ การชุบแข็งด้วยน้ำอาจมีผลทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยวได้ง่าย และไม่สามารถทนต่อความร้อนได้ จึงไม่สามารถใช้สำหรับงานตัดที่รุนแรงหรือใช้งานซ้ำๆ กันจนเกิดความร้อนได้ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงไม่นิยมใช้งานกัน อาจมีการใช้งานบ้างสำหรับทำเครื่องมือตัดที่ใช้ความเร็วต่ำและตัดด้วยแรงเบาๆ เช่น ไม้ อะลูมิเนียม แม่พิมพ์สำหรับทุบขึ้นรูปเย็น (Cold Heading) เป็นต้น ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกลุ่มนี้ เช่น W1 W2 และ W5

2. เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steels) เป็นกลุ่มที่ใช้ผลิตเครื่องมือสำหรับนำไปใช้งานแปรรูปโลหะที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการแปรรูป เช่น แม่พิมพ์ตัดแผ่น

โลหะเย็น ใบมีดตัดกระดาษคัตเตอร์ เป็นต้น สมบัติสำคัญที่ต้องการสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสดี เปลี่ยนแปลงขนาดน้อยหลังการชุบแข็ง (เนื่องจากการชุบแข็งจะทำโดยการชุบน้ำมันหรือให้เย็นตัวในอากาศ) ด้านทานการสึกหรอสูง และมีความเหนียวทนแรงอัดกระแทกได้ดีกว่าเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น

3. เหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก (Shock Resisting Tool Steels) เป็นเหล็กเครื่องมือ ที่พัฒนาให้มีความเหนียว ความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอสูง เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทกซ้ำๆ กัน เช่น ค้อน (Chisel) หัวกด (Punch) และแม่พิมพ์โลหะ (Die) เป็นต้น โดยความเหนียวสูงเป็นผลจากปริมาณคาร์บอนในระดับปานกลาง และทำให้ภายหลังการอบความร้อนที่เป็น โครงสร้างมาร์เทนไซต์ และมีคาร์ไบด์ละเอียดที่กระจาย นอกจากนี้นิธาตุแมงกานีส โครเมียม โมลิบดีนัม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (Tempering) ซิลิกอนจะเพิ่มความแข็งให้กับเฟอไรต์ และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัวด้วย แต่ข้อเสียของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้เป็นผลจากปริมาณซิลิกอน ซึ่งจะเร่งให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย ทำให้ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อความล้าต่ำลง ดังนั้นในการอบชุบความร้อนจะต้องระวังเรื่องนี้ให้มาก เกรดที่นิยมใช้งาน เช่น S1 S2 S5

4. เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot Work Tool Steels) ในงานบางประเภทที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการแปรรูป เช่น งานตีขึ้นรูปร้อน (Hot Forging) งานฉีดหล่อ (Die Casting) งานรีดร้อน (Hot Extrusion) งานตัดร้อน (Hot Shear Blade) งานอัดร้อน (Hot Press) สิ่งสำคัญ คือ เหล็กกล้าเครื่องมือจะต้องรักษาสมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดี (Red Hardness) ด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Shock) ด้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง และมีความเหนียวที่ดี วัสดุผสมที่จะทำให้ได้สมบัติเหล่านี้ ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม และทังสเตน ซึ่งผลรวมของธาตุเหล่านี้จะต้องมีปริมาณอย่างน้อย 5 เปอร์เซ็นต์ เช่น SKD-61

5. เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High Speed Tool Steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีจุดมุ่งหมายหลัก สำหรับใช้เป็นวัสดุในการตัดโลหะด้วยความเร็วสูง เช่น ใบเลื่อย (Saws) ใบตัด (Milling Cutters) เป็นต้น สมบัติสำคัญของเหล็กกล้ากลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการรักษาความแข็งของคมตัดที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติไว้ได้ (ความแข็งของคมตัดยังคงสภาพเดิม แม้จะเกิดความร้อนจนร้อนจัดเป็นสีแดง)

6. เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic Mould Steels) เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 175-200 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสูง มีการกัดกร่อนจากสารเคมี และต้องรับแรงเสียดสีกับผงพลาสติกด้วย ดังนั้นสมบัติสำคัญจะต่างไปจาก

เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มอื่น โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาถึงได้แก่ ความสามารถในการกลึงไส ความต้านทานแรงอัด ความแข็งที่ผิวสูง ความแข็งแรงที่แกนสูง ความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง ความสามารถในการขัดผิวให้เรียบ ความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิว ซึ่งจากสมบัติข้างต้นหากนำเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มทำงานเย็นหรือทำงานร้อนมาใช้ก็อาจจะไม่ได้ผลดีเท่ากับการใช้งานเหล็กกล้าที่ใช้งานเฉพาะสำหรับกลุ่มนี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถใช้ผลิตแม่พิมพ์งานหล่อแบบฉีดสำหรับโลหะผสมที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ เช่น สังกะสี และตะกั่วได้เช่นกัน ที่มา: (เอกสารสถาบันไทย-เยอรมันเรื่องเทคโนโลยีแม่พิมพ์โลหะ, 2545)

2.1.6 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ

1) ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

1.1 การกดอัด (Compression)

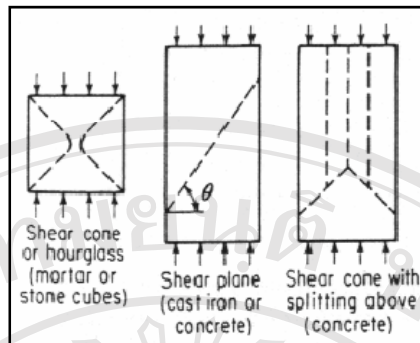
การทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบที่มีลักษณะการใส่แรงกระทำในแบบตรง ข้ามกับการทดสอบแรงดึง คือการทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบในลักษณะการดึงยืดขึ้นทดสอบส่วนการทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบในลักษณะการกดอัดขึ้นทดสอบโดยการทดสอบแรงอัดจะนิยมทดสอบกับวัสดุที่เปราะ เช่น คอนกรีต อิฐ และผลิตภัณฑ์เซรามิกซึ่งมีความแข็งแรงดึงค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับความแข็งแรงอัด ประกอบกับวัสดุประเภทนี้จะใช้งานในรูปของการรับแรงอัดมากกว่า ดังนั้นการทดสอบแรงอัดกับวัสดุประเภทนี้จึงให้ข้อมูลมากกว่าการทดสอบแรงดึง โดยแรงเค้นอัดเกิดจากแรงอัดที่ให้กับชิ้นทดสอบ ซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการหดตัวหรืออัดตัวภายใต้แรงอัดนั้นและแสดงลักษณะของแรงที่เกิดจากการทดสอบการกดอัด (ศักดิ์พล, 2550) ดังรูปที่ 2.10 โดยสามารถคำนวณค่าแรงกดอัด (Compressive Strength) ตามสูตร

$$S = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

S = ค่าแรงกดอัด (kg/cm^2)

F = แรงที่ใช้กด (kg)

A = ค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวรับแรงกด (cm^2)



รูป 2.10 ลักษณะของแรงที่เกิดจากการทดสอบการกดอัด

1.2 การดัดโค้ง (Bending)

การทดสอบการดัดโค้ง เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการแปรรูปของวัสดุหลังจากทำการดัดโค้ง โดยพิจารณาว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำการดัดโค้งเกิดรอยแตก หลังจากทำการดัดโค้งชิ้นทดสอบ ทำการตรวจสอบดูว่าที่พื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ดัดโค้ง ซึ่งจะเป็นบริเวณที่รับความเค้นแรงดึงในระหว่างการดัดโค้ง มีรอยแตกเกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าหลักการของการทดสอบการดัดโค้ง แตกต่างจากการทดสอบสมบัติเชิงกลประเภทอื่นๆ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ออกมาในเชิงปริมาณ คือ ได้ค่าสมบัติเชิงกลออกมาเป็นตัวเลข เช่น ค่าความแข็งแรง ความเค้นจุดคราก ในขณะที่ผลจากการทดสอบการดัดโค้งจะเป็นผลโดยยึดตามมาตรฐาน ASTM C 1161-90 โดยชิ้นงานมีขนาด 8 x 6 ตารางมิลลิเมตร ยาว 45 มิลลิเมตรโดยคำนวณได้จากสูตร

$$S = \frac{3FL}{2Bh^2} \quad (2.4)$$

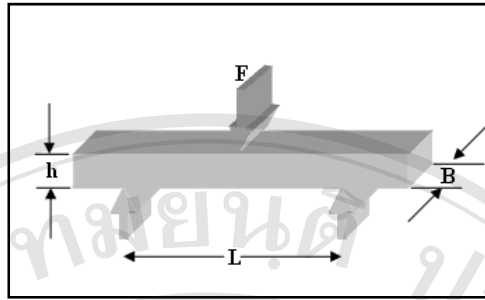
S = ค่าการดัดโค้ง (kg/cm^2)

P = แรงกระทำ (kg)

L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (cm)

h = ความหนา (cm)

B = ความกว้าง (cm)



รูป 2.11 การทดสอบการดัดโค้งของวัสดุ (Bending)

2) ทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ

ความหนาแน่น (Density) คือ คำนวณน้ำหนักต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยสาร ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นขนาดของน้ำหนักเป็นองค์ประกอบ การจัดเรียงตัวของอะตอมในระบบผลึกและปริมาณรูพรุนในโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งก็ประกอบไปด้วย ความหนาแน่นโดยรวม ความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริง โดยได้ยึดการทดสอบเชิงกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C373 โดยมีวิธีการคำนวณหาดังนี้

2.1 ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density: BD) เป็นค่าความหนาแน่นของเนื้อสารซึ่งนอกจากเนื้อสารแล้ว ในชิ้นงานยังประกอบไปด้วยรูพรุนเปิด รูพรุนปิด

$$\text{ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density: BD)} = \frac{D}{S-I} \text{ g/cm}^3 \quad (2.5)$$

2.2 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density: AD) เป็นค่าความหนาแน่นของสารซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อสารและรูพรุนปิด เท่านั้น ซึ่งค่าที่คำนวณได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นจริงก็จะประมาณค่ารูพรุนปิดได้

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density: AD)} = \frac{D}{D-I} \text{ g/cm}^3 \quad (2.6)$$

2.3 ความหนาแน่นจริง (True Density: TD) เป็นค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของสารซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อสารเท่านั้น ไม่รวมรูพรุนเปิดและรูพรุนปิด

$$\text{ความหนาแน่นจริง (True Density: TD)} = \frac{W2-W1}{(W4-W1)-(W3-W2)} \text{ g/cm}^3 \quad (2.7)$$

2.4 หาปริมาณรุกรานของชิ้นงานชิ้นงานจะมีทั้งรุกรานเปิดและรุกรานปิดในชิ้นงานซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นส่งผลทำให้ค่าการกดอัดและค่าการคดโค้งชิ้นงานด้วยดังนั้นจึงต้องทราบปริมาณรุกรานเปิดและปริมาณรุกรานปิดโดยคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{ปริมาณรุกรานรวม} = \text{ปริมาณรุกรานเปิด} + \text{ปริมาณรุกรานปิด} \quad (2.7)$$

$$\text{ปริมาณรุกรานเปิด} = \text{ความหนาแน่นปรากฏ} - \text{ความหนาแน่นโดยรวม} \quad (2.8)$$

$$\text{ปริมาณรุกรานปิด} = \text{ความหนาแน่นจริง} - \text{ความหนาแน่นปรากฏ} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{หาเปอร์เซ็นต์ปริมาณของรุกรานเปิด} \\ = \frac{\text{ปริมาณรุกรานเปิด}}{\text{ปริมาณรุกรานรวม}} \times 100 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{หาเปอร์เซ็นต์ปริมาณของรุกรานปิด} \\ = \frac{\text{ปริมาณรุกรานปิด}}{\text{ปริมาณรุกรานรวม}} \times 100 \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันได้มีการคิดค้นพัฒนาวัสดุทดแทนกระดูกสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรคกระดูกแตกหักที่เกิดจากการได้รับอุบัติเหตุต่างๆ จำนวนมาก ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้คำนึงถึงความสำคัญของวัสดุทดแทนกระดูกได้มีงานวิจัยที่พัฒนากระบวนการผลิตวัสดุทดแทนกระดูกบริเวณต่างเกิดขึ้น เพื่อจะนำไปทดแทนซ่อมแซมส่วนที่ได้ขาดหายหรือชำรุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้เป็นแนวความรู้พื้นฐานในการวิจัย ดังนี้คือ

2.2.1 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียมและวิธีการขึ้นรูป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Chan et al., 2002) โดยการเตรียมผงไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกหอยผสมสารเติมแต่ง เพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับผลิตกระดูกเทียมชนิดกระดูกแข็งเนื้อแน่นและเนื้อพรุน โดยการบดเปลือกหอยด้วยวิธีการบดแบบอัตราเร็วสูง ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถเตรียมผงเปลือกหอยขนาดนาโนเมตรได้ปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์สูงในเวลาอันสั้น จากนั้นนำไปผสมกับสารเติมแต่ง เพื่อสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะ

ปาไทต์ ที่มีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติมากที่สุด และได้นำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์จากการสังเคราะห์จากเปลือกหอยด้วยวิธีดังกล่าวมาผสมกับตัวประสานเพื่อทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Press Forming) โดยอัตราส่วนผสมและวิธีการผลิตได้นำแนวคิดจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Gang , 2008) ซึ่งศึกษาอัตราส่วนผสมของตัวประสานกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ในการขึ้นรูปกระดูกเนื้อพรุน โดยพบว่าที่อัตราส่วนผสมของตัวประสานต่อไฮดรอกซีอะพาไทต์ระหว่าง 1-3 เปอร์เซนต์ตามน้ำหนักในการขึ้นรูปกระดูกเนื้อพรุนและนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปไปเผาผนึก (Sintering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และผนึกตัวเป็นเนื้อเดียวกันและมีความแข็งแรงขึ้น ใช้อุณหภูมิการเผาผนึกที่ 1200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สำหรับในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปของงานวิจัยนี้เป็นการอัดในลักษณะการอัดแบบแห้ง (Dry Pressing) ซึ่งเป็นการอัดแบบทิศทางเดียว (Uniaxial Pressing) กระบวนการนี้จะขึ้นรูปด้วยการอัดผงซึ่งถูกบรรจุในช่องว่าง โดยการให้แรงกดอัดในการอัดแบบทิศทางเดียวให้แรงกดอัดผ่านทาง Top Punch แล้วทำการอัดผงโดยตัว Top Punch จะเลื่อนลงมา แม่พิมพ์จะไม่เคลื่อนที่หลังจากการอัดผงแล้ว หัวกดด้านบนจะเคลื่อนที่ออกหัวกดตัว Bottom Punch จะเคลื่อนที่เอาชิ้นงานออกมาจากแบบพิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูป โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของแท่งอัดจากด้านบนอาศัยแรงกดอัดในการขึ้นรูปเป็นวิธีต้นทุนการผลิตต่ำ ใช้เวลาน้อย ขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่สลับซับซ้อนและไม่ต้องการรายละเอียดสูง (Zhu , 2003) โดยเงื่อนไขในการขึ้นรูปวัสดุผงเซรามิกส์ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแร่ธรรมชาติด้วยวิธีการกดอัดเป็นแท่ง ควรใช้ความดันในการอัดระหว่าง 75 ถึง 220 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และใช้เวลาในการอัด 30 วินาที เพื่อที่จะให้ชิ้นงานสามารถคงรูปอยู่ได้หลังจากการถอดแม่พิมพ์

การทดสอบคุณภาพของการขึ้นรูปชิ้นงานในงานวิจัย ได้ปฏิบัติตามแนวทางของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [10] โดยการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานสำเร็จที่ได้ จากการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ผสมกับแก้วมาอัดขึ้นก่อนเผาผนึก ซึ่งวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลจะประกอบไปด้วย การทดสอบแรงกดอัดและการดัดโค้งของชิ้นงานเพื่อดูความสามารถในการรับแรงกดและการดัดโค้งของชิ้นงานสำเร็จ ได้ทำการวิจัยพบว่า การขึ้นรูปโดยใช้เทคนิค Drip Casting โดยการใช้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ผสม Ca(OH)_2 และ H_2PO_4 เป็นสารตั้งต้น โดยอัตราส่วน Ca/P เท่ากับ 1.67 เดม น้ำกลั่น ผสมสารอื่นๆจากนั้นให้ความร้อนจนอุณหภูมิ 500°C แล้วนำไปเผา 1200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก็ทำการขึ้นรูปไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้มีรูพรุนได้สำเร็จ โดยสามารถควบคุมรูพรุน คุณลักษณะของรูพรุน ขนาดของรูพรุนโดยรูมีขนาด ประมาณ 95 ถึงประมาณ 400 ไมโครเมตร, และมีขนาด 0.7 มิลลิเมตรถึงประมาณ 4 มิลลิเมตร ประสบผลสำเร็จ ด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถขึ้นรูป

ให้มีคุณลักษณะของรูพรุนกระดูกตามธรรมชาติ (Dean-MO , 1996) และมีงานวิจัยที่ทำการศึกษา เนื้อเซรามิกที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับกระดูกและฟัน มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการสึกหรอ ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี ไม่ทำปฏิกิริยาที่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ บางชนิดมีสมบัติในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีเร่งการปลูกสร้างเนื้อเยื่อได้ด้วย ในช่วงระยะเวลา 40 ปีที่ผ่านมา เซรามิกจึงถูกปฎิบัติการใช้งาน นำมาใช้สำหรับเพิ่มคุณภาพให้กับชีวิต ทำให้เกิดคำว่า เซรามิกชีวภาพ หรือ Bioceramics ขึ้น วัสดุนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ใน ทางการแพทย์และทันตกรรม เพื่อทดแทน ซ่อมแซมอวัยวะที่สูญเสียไป โดยเฉพาะส่วนของกระดูกและฟัน เซรามิกชีวภาพที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ อลูมินาเซอร์โคเนีย ไตรแคลเซียมฟอสเฟต โดยเฉพาะไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งเป็นชีววัสดุที่เร่งปฏิกิริยาการสร้างเนื้อเยื่อ (Bioactive Material) นิยมนำมาผลิตข้อกระดูกเทียม รากฟันเทียม เพราะสามารถเร่งการสร้างเซลล์กระดูก และเซลล์เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective Tissue) ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างวัสดุปลูกถ่าย และเนื้อเยื่อประสานกันอย่างรวดเร็วและแข็งแรง โดยเฉพาะวัสดุชนิดพรุน ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า 100-150 ไมครอน เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้เลือดและสารเคมีที่จำเป็นในการสร้างเนื้อเยื่อสามารถผ่านเข้าออกได้ดี ช่วยย่นระยะเวลาในการรักษาให้ลดลงได้ (Larry and Hench, 1998)

ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการขึ้นรูปไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยทำการศึกษาปัจจัยของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนของเซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในการศึกษาได้สังเคราะห์สารไฮดรอกซีอะพาไทต์จากปฏิกิริยาการตกตะกอนทางเคมีระหว่าง Ca_3NO_2 และ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_2$ และขึ้นรูปขึ้นงานให้มีลักษณะเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการใช้วัสดุสร้าง ความพรุน 2 ชนิด คือ ฟองน้ำ และผงแป้ง การขึ้นรูปขึ้นงานเซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ จะเตรียมขึ้นงานโดยผสมฟองน้ำตั้งแต่ 0.05-0.20 กรัม ต่อผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ 10 กรัม และขึ้นรูปด้วยแรงกดในช่วงระหว่าง 2-8 MPa สำหรับขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ผงแป้งจะเตรียมขึ้นงานโดยผสมปริมาณผงแป้ง ตั้งแต่ 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และขึ้นรูปด้วยแรงกดในช่วงระหว่าง 2-36 MPa จากนั้นจึงนำขึ้นงานทั้งหมดไปเผาที่อุณหภูมิ 1050 , 1100 และ 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง ขึ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วจะถูกนำมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ความพรุน ความหนาแน่นบัลค์ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น ความแข็งของวัสดุ ความแข็งแรงภายใต้แรงกดของวัสดุ และโมดูลัสของยังภาคใต้แรงกด จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยของกระบวนการขึ้นรูปที่มีผลต่อความพรุน คือ ปริมาณวัสดุสร้าง ความพรุน ได้แก่ ฟองน้ำและผงแป้ง เมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ความพรุนของขึ้นงานเพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงกดขึ้นรูป และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นงานที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ความพรุนของขึ้นงานลดลง โดยขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการใช้ฟองน้ำ จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน ความหนาแน่นบัลค์

ความแข็งของวัสดุ ความแข็งแรงภายใต้แรงกดและโมดูลัสของยังภายใต้แรงกด ในช่วงระหว่าง 14-75% 1.2-1.9 g/cm³ 27-113HV 1-44MPa และ 6-368MPa ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยผงแป้ง จะมีค่าในช่วงระหว่าง 17-45% 1.4-1.9g/cm³ 29-120HV 5-67MPa และ 30-611MPa ตามลำดับและผลจากภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ชิ้นงานทั้งสองชนิดจะมีรูพรุนขนาดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 5-30 ไมโครเมตร (สุจินต์, 2001)

2.2.2 การออกแบบการทดลอง

ในด้านการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด หรือกระบวนการที่ดีที่สุด ได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองนี้ไปใช้กันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ (ทวีป, 2538) ได้ทำการศึกษาวิจัยด้านการศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็ม โดยได้ทำการศึกษาเงื่อนไขการแปรรูปของโลหะ โดยมีตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ กระแส ช่วงพัลส์ และเซอร์โว ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ ความหยาบผิว และโอเวอร์คัต โดยอาศัยวิธีแฟคทอเรียลตามหลักการออกแบบ และวิเคราะห์การทดลองเป็นพื้นฐานของการวิจัยและสร้างสมการออร์ทोगอนอลโพลิโนเมียลของอัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ ความหยาบ และโอเวอร์คัต จากผลงานวิจัยของ (วิชัย, 2540) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) และการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์ โดยได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงเทปและหาค่าของปัจจัยเหล่านั้นที่ทำให้ค่าแรงดึงเทปใกล้เคียง 70 กรัมแรง (gram*f.) ต่อมาการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม เช่น (กฤษดา, 2542) ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลต่อการเกิดรอยบิ่น และรอยร้าวในกระบวนการตัดชิ้นคอนกรีตท้ายของการตัดหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ และหาเงื่อนไขหรือวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ทางวิธีการสถิติสามารถหาปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดรอยบิ่นและรอยร้าว คือ ความเร็วรอบในการตัด และทิศทางการตัด ในขณะที่ผลงานวิจัยของ (สุรพล, 2542) ได้ทำการศึกษาวิจัยด้านการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมดินบุก-ตะกั่วบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยได้นำวิธีการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

งานวิจัยเกี่ยวกับการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองถือว่ามีส่วนสำคัญในงานวิจัยอย่างมาก จากผลงานวิจัยของ (สรียา, 2543) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิลจากการตัดริบมาเป็นส่วนผสมในหาผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล โดยได้ศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและความคงขนาดของแผ่นพาร์ทิเคิล และหาเงื่อนไขส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิล

จากการตัดริมนมาเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล โดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลอง เพื่อเพิ่มมูลค่าของเศษแผ่นพาร์ทิเคิลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ โดยผ่านพาร์ทิเคิลที่ผลิตได้ต้องมีคุณภาพตรงตามมาตรฐานและเหมาะสมต่อการใช้งาน ในส่วนของงานวิจัยของ สมเกียรติ และคณะ, (2545) ได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาใช้ในการศึกษาปัจจัยและเงื่อนไขที่เหมาะสมของงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนทนแรงดึงสูงชนิด DIN ST 52-3 ในส่วนของ (สุเทพ และคณะ, 2545) ได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการชุบ อลูมิเนียม เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ผลิตต่อความหนาผิว Al_2O_3 ที่เหมาะสมต่อกระบวนการทำอะโนไดซ์ และวิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อความไม่สม่ำเสมอของผิว Al_2O_3 การวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาปัจจัยภายนอก ได้แก่ ความแตกต่างของวัสดุ และลักษณะรูปร่างชิ้นงาน รวมถึงการศึกษาความไม่สม่ำเสมอของผิว Al_2O_3 และ ศึกษาปัจจัยที่จำเป็นต้องควบคุมในกระบวนการทำอะโนไดซ์ และ (อนุสิทธิ์, 2547) ได้ทำการศึกษารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมอัตโนมัติแบบลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ สำหรับเหล็กกล้า เอสที 37 พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึง คือ กระแสไฟเชื่อมตั้งค่าที่ 320 แอมป์ แรงดันเชื่อมตั้งค่าที่ 31 โวลต์ ระยะโผล่ของลวดเชื่อมตั้งค่าที่ 45 มิลลิเมตร และมุมของลวดเชื่อม ตั้งค่าที่ 66 องศา ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุดคือ 8,400 กิโลกรัมแรง (kgf.) ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.05 จากงานวิจัยของ (สืบสกุล และคณะ, 2547) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำมันข้าว โดยใช้หลักการพื้นผิวผลตอบ แบบส่วนประสมกลาง โดยมี 3 ตัวแปร ดังนี้คือ อุณหภูมิอากาศร้อน อัตราการไหลของอากาศร้อนและอัตราการป้อนสาร ที่มีอิทธิพลต่อค่าปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกติวิตีดัชนีการดูดซับน้ำ และดัชนีการละลายน้ำ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิอากาศร้อน 192.5 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศร้อน 35 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/h) และอัตราการป้อนสาร 740 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง (ml/h)

ในด้านการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อทำการทดลองเกี่ยวกับเครื่องจักรกลมีผลการศึกษาวิจัยของ (พิมพ์สกุล และ ก่อพงศ์, 2547) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยการอาร์คด้วยไฟฟ้า จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน มีดังต่อไปนี้คือ Main Supply Voltage, Arc Detection Level, Servo Voltage, Loran Speed and Direction, Jump-Down Machining Time, และ Jump-Up Time โดยที่ Main Supply Voltage ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคือ Main Supply Voltage ที่ระดับความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญที่มีค่าเท่ากับ 0.05 และในงานวิจัยของ (วรรณุช และคณะ, 2551) ได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ไปใช้เพื่อศึกษากระบวนการสเตบิไรเซชันรำข้าว กข 6 และรำข้าวหอมมะลิ

105 โดยใช้เครื่องเอ็กทราเตอร์ โดยมีปัจจัย 3 อย่างคือ ความเร็วในการป้อน ความเร็วสกรู และ อุณหภูมิหัวใด จากการศึกษพบว่า รำข้าว กข6 และรำข้าวหอมมะลิ 105 ที่ทำให้มีปริมาณไขมัน อิสระน้อยที่สุด ที่สภาวะดังนี้คือ ความเร็วรอบในการป้อน 40 รอบต่อนาที ความเร็วสกรู 158 รอบ ต่อนาที และอุณหภูมิหัวใด 120 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยัง มีงานวิจัยของ (บุญฤทธิ์ และคณะ, 2552) ได้นำหลักการพื้นผิวผลตอบ(Response Surface Methodology : RSM) แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) เพื่อหาค่าสภาวะ ที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยได้แก่ ความดันในถังหมักผักกาดดองและ ระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก จากการศึกษพบว่า การหมักผักกาดเขียวปลีที่ให้ผลใกล้เคียงกับการหมักแบบปกติ คือ ความดันที่ 2 บาร์ และใช้ระยะเวลาในการหมัก 2 วัน จะทำให้ได้ค่าความเค็ม ความหวาน และค่าความเป็นกรด ด่าง เท่ากับ 7.49, 7.73 และ 5.10 ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า การนำเทคนิคการออกแบบการทดลองและการ วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติ ได้ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมหลาย ๆ แขนง ทั้งนี้ เพื่อที่จะสามารถยืนยันผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองของสิ่งที่ต้องการทำการทดลองในเชิง สถิติ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่น มีความเที่ยงตรง และแม่นยำ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนา กระบวนการด้านต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นในการทำงานวิจัยนี้ได้นำหลักการออกแบบ การทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ แบบส่วนประสมกลาง มาใช้ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ กระบวนการขึ้นรูปกระดูกเทียมจากไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยได้ทำการกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องใน การออกแบบการทดลอง 3 ปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ อัตราส่วนผสมของตัวประสานที่ใช้ในการอัดขึ้น รูป (กรัม) ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ขึ้นงาน (วินาที) ทั้งนี้เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการกดอัดของชิ้นงาน และค่าการคดโค้งของชิ้นงานโดยที่สภาวะดังกล่าวที่เหมาะสมนำมาหาค่าความหนาแน่นของ ชิ้นงาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนทางการแพทย์ในอนาคตต่อไป