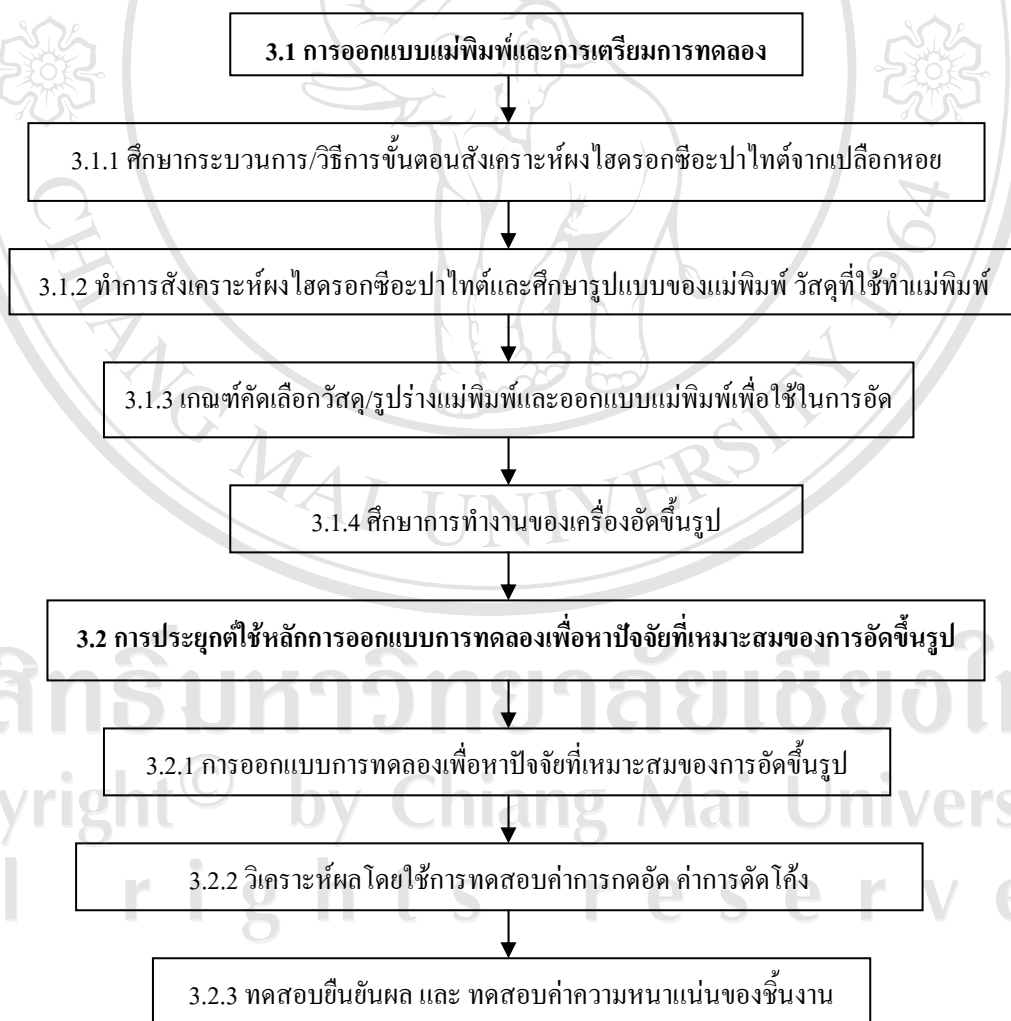


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการอัดขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยจะเข้าไปทำการศึกษาในอัตราส่วนผสมระหว่างตัวประสานกับไฮดรอกซีอะพาไทต์และทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปและทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมการจำลองการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป โดยมีแนวทางในการศึกษาดังนี้



รูป 3.1 ภาพรวมกระบวนการวิจัย

3.1 การออกแบบแม่พิมพ์และการเตรียมการทดลอง

3.1.1 ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์จากเปลือกหอย

ศึกษาขั้นตอนกระบวนการวิธีการสังเคราะห์จากเปลือกหอยจนได้ผงแคลเซียมออกไซด์ และผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีจนได้ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการขึ้นรูปกระดูกเทียม

3.1.2 คัดเลือกวัสดุ/รูปแบบแม่พิมพ์และ ศึกษารูปแบบของแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ และทำการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์

ในส่วนในเรื่องแม่พิมพ์ได้ทำการออกแบบและการสร้างแม่พิมพ์โดยใช้หลักการของวิชา Product Design Development (PDD) เป็นหลักการในการคัดเลือกวัสดุและการสร้างต้นแบบแม่พิมพ์ในครั้งนี้

3.1.2.1) กระบวนการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้การออกแบบผลิตภัณฑ์

การออกแบบ หมายถึง การวางแผนจัดตั้งขั้นตอน การรู้จักเลือกใช้วัสดุ วิธีการเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งต้องให้สอดคล้องกับลักษณะรูปแบบและคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดตามความคิดสร้างสรรค์ และการสร้างสรรค์สิ่งใหม่ขึ้นมา ดังในโครงการนี้ การออกแบบแม่พิมพ์นั้นจึงต้องมีการวางแผนจัดตั้งขั้นตอนต่างๆ ซึ่งจะใช้หลักการทางการออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Design) จะใช้หลักการ การสร้างแนวคิดผลิตภัณฑ์ (Concept Generation)

1) การสร้างแนวคิด (Concept Generation) เป็นการอธิบายหลักการการทำงาน, เทคโนโลยี และรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ซึ่งโดยส่วนมากจะนิยมทำออกมาในการร่างและให้มีมิติแบบไม่ละเอียด และทำการสรุปออกมาในรูปแบบของคำอธิบายในขั้นตอนการสร้างแนวคิดผลิตภัณฑ์ (Concept Generation) มี 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เข้าใจประเด็นปัญหาที่ชัดเจนจำแนกออกเป็น 4 ข้อดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์
2. สามารถทนต่อแรงกดอัดและการสึกหรอ
3. การเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
4. จำนวนช่องของแม่พิมพ์และลักษณะรูปทรงของช่องแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 2 หาข้อมูลจากภายนอก

ข้อมูลขั้นตอนและหลักการกระบวนการทำแม่พิมพ์วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่จะทำการขึ้นรูป

1) ประเภทแม่พิมพ์

แม่พิมพ์โลหะ หมายถึงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์โลหะ แม่พิมพ์โลหะสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

1. แม่พิมพ์ปั๊ม (Stamping)
2. แม่พิมพ์ขึ้นรูป (Forming)
3. แม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลึก (Deep Draw Die)
4. แม่พิมพ์ตีขึ้นรูป (Forging)
5. แม่พิมพ์ฉีดหล่อ (Die casting)

2) การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์

2.1) การออกแบบแม่พิมพ์

ในกระบวนการผลิต จำเป็นต้องอาศัยแม่พิมพ์ที่สามารถครอบคลุมถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ให้ได้ทั้ง รูปทรง ขนาด น้ำหนัก ตามที่ผู้ออกแบบกำหนดไว้ ซึ่งลักษณะของกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกันจะส่งผลโดยตรงมาจากแม่พิมพ์ที่นำมาใช้งาน ดังนั้น การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งต้องยึดหลักการที่ว่า

- แม่พิมพ์คุณภาพดี ผลผลิตที่ดีย่อมเกิดขึ้น
- แม่พิมพ์ผลิตขึ้นงานออกมาได้เร็ว
- แม่พิมพ์มีราคาที่เหมาะสม

การออกแบบแม่พิมพ์ที่ดีจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. มาตรฐานการออกแบบ ซึ่งในการออกแบบแต่ละครั้ง จำเป็นต้องมีมาตรฐานที่ดีโดยการกำหนดกฎเกณฑ์ต่างๆ นั้น สามารถกระทำได้ โดยผู้ผลิตแม่พิมพ์เอง หรือเป็นมาตรฐานที่ถูกกำหนดให้
2. เลือกใช้ชิ้นส่วนมาตรฐานที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดเวลาในการออกแบบ
3. สามารถนำแม่พิมพ์ไปใช้ในการผลิตได้โดยไม่มีอุปสรรคใดๆ เกิดขึ้น
4. เลือกวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ได้อย่างเหมาะสมกับปริมาณการผลิต เพื่อลดต้นทุนในการทำแม่พิมพ์

5. ลดความสลับซับซ้อน ในการทำงานของแม่พิมพ์ เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการซ่อมบำรุง เมื่อเกิดความเสียหายระหว่างกระบวนการผลิต

ในปัจจุบันการออกแบบแม่พิมพ์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยมีการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยให้การออกแบบมีความแม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น เนื่องจากในหน่วยความจำของระบบคอมพิวเตอร์ได้เก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการวิเคราะห์ความถูกต้องของการออกแบบไว้อย่างมากมาย ทำให้ลดระยะเวลาการทำงานขั้นตอนนี้เป็นอย่างมาก แต่การออกแบบจะให้สมบูรณ์ได้นั้น บุคลากรที่ทำงานด้านนี้ต้องมีความสามารถในการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแม่พิมพ์มาก่อน เพื่อนำประสบการณ์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในระหว่างการออกแบบต่อไป

2.2) วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์และเครื่องมือสำหรับงานแม่พิมพ์คือเหล็ก โดยเหล็กที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์จะอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าเครื่องมือ ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ในปริมาณสูง เพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูงเหมาะสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอ คุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือ ได้แก่

1) ความสามารถในการชุบแข็ง (Harden Ability) คือคุณสมบัติของเหล็กกล้าที่บ่งถึงความยากง่ายในการชุบแข็งและความลึกของเหล็กที่แข็งขึ้นจากการชุบแข็ง คุณสมบัตินี้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและขนาดของเกรนของเหล็กกล้า โดยเหล็กกล้าที่มีความสามารถในการชุบแข็งสูง จะสามารถทำการชุบแข็งได้ง่ายด้วยลม แต่ถ้าเหล็กกล้าที่มีความสามารถในการชุบแข็งต่ำ การชุบแข็งด้วยลมจะไม่สามารถทำให้ได้เฟสมาร์เทนไซต์ จึงอาจต้องทำการชุบแข็งด้วยน้ำหรือของเหลวอื่น ซึ่งจะมีผลต่อการบิดตัวของชิ้นงานที่ทำการชุบ คุณสมบัตินี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณธาตุผสม ดังนั้นการทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงตลอดชิ้น หรือสามารถชุบแข็งได้ลึก จึงควรเลือกใช้เหล็กกล้าที่มีธาตุผสมสูง โดยโคบอลต์เป็นเพียงธาตุเดียวที่ลดคุณสมบัตินี้

2) ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถในการรับพลังงานของวัสดุก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เหล็กกล้าเครื่องมือที่ถือว่ามีความเหนียวที่ดี คือ กลุ่มที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำหรือปานกลาง คุณสมบัตินี้จำเป็นสำหรับการใช้งานในสภาวะที่ต้องรับแรงกระแทก

3) ความทนต่อการเสียดสี (Wear Resistance) คือ ความสามารถทนต่อการถูกขัดสี ซึ่งรวมถึงการเสียดสีของคมตัดด้วย คุณสมบัตินี้จะเกี่ยวข้องกับความแข็งของเหล็ก และปริมาณคาร์ไบด์ที่ไม่ละลาย (คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว เมื่อมีการใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง) โดยหากเหล็กกล้าเครื่องมือมีความแข็งสูงก็จะทนการเสียดสีได้ดี หรือหากมีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลาย (แม้อุณหภูมิสูง) ก็จะทำให้ทนการเสียดสีได้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจากคาร์ไบด์จะมีความแข็งสูง

4) การรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Red-hardness) เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือที่ต้องได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 480 °C โดยธาตุผสมที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่เสถียรจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัตินี้ ซึ่งจะทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือไม่อ่อนลง (ความแข็งลดลง) อันเนื่องมาจากผลของความร้อนในขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง หรือในขณะทำการอบคืนตัว (Tempering)

5) ความสามารถในการตัดเฉือน (Machinability) คือ ความสามารถของโลหะที่ถูกตัดเฉือน ตกแต่งได้ง่าย และมีผิวที่เรียบภายหลังการตัดเฉือน

6) ความต้านทานการสูญเสียคาร์บอน (Resistance to Decarburization) การสูญเสียคาร์บอนซึ่งจะเกิดเมื่ออบเหล็กที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 °C (1300°F) เป็นผลให้ความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็ง ต่ำลง เหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคุณสมบัตินี้ต่ำจะต้องมีวิธีป้องกัน/ควบคุมบรรยากาศในการอบชุบความร้อนเพื่อไม่ให้ชิ้นงานสูญเสียคาร์บอนโดยเฉพาะที่ผิว สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลักจะสามารถต้านทานการสูญเสียคาร์บอนได้ดี

2.3) เหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก (Shock Resisting Tool Steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ ที่พัฒนาให้มีความเหนียว ความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอสูง เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทกซ้ำๆ กัน เช่น ค้อน (Chisel) หัวกด (Punch) และแม่พิมพ์โลหะ (Die) เป็นต้น โดยความเหนียวสูงเป็นผลจากปริมาณคาร์บอนในระดับปานกลาง และทำให้ภายหลังการอบความร้อนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และมีคาร์ไบด์ละเอียดที่กระจายตัว นอกจากนั้นธาตุแมงกานีส โครเมียม โมลิบดีนัม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (Tempering) ซิลิกอนจะเพิ่มความแข็งให้กับเฟอไรต์ และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัวด้วย แต่ข้อเสียของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้เป็นผลจากปริมาณซิลิกอน ซึ่งจะเร่งให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย ทำให้ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อความล้าต่ำลง ดังนั้นในการอบชุบความร้อนจะต้องระวังเรื่องนี้ให้มาก เกรดที่นิยมใช้งาน เช่น S1 S2 S5 และ S7 โดย S1 เป็นเกรดที่นิยมใช้งานมาก เพราะจะมีส่วนผสมของทั้งสแตนดาร์ด ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ เพิ่มความเหนียว และเพิ่มความสามารถในการรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงให้ดีกว่าเกรด S อื่นๆ จึงสามารถใช้งานที่ต้องทนต่อความร้อนได้ การใช้งาน เช่น ค้อน ไขควง แม่พิมพ์ขึ้นรูป ดอกเจาะหิน เป็นต้น

2.4) เครื่องจักรกล เครื่องมือและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์

เครื่อง CNC (Computerized Numerical Control) เป็นเครื่องจักรที่ถูกรับควบคุมการทำงานด้วยอนุกรมของรหัสควบคุมเครื่อง รหัสประกอบไปด้วยตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์อื่นๆ รหัสเหล่านี้จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วส่งไปกระตุ้นให้มอเตอร์และอุปกรณ์ต่างๆของเครื่องจักรทำงานในลักษณะของการเคลื่อนที่และการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วในการเคลื่อนที่รวมถึงการทำงานอื่นๆ ด้วย อนุกรมรหัสป้อนเข้าเครื่องจักรเพื่อควบคุมเครื่องจักรให้ผลิตชิ้นงานตามที่ต้องการเรียกว่าโปรแกรมชิ้นงาน (Part Program of Work Piece Program) ความยาวของโปรแกรมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานว่ามีความซับซ้อนของรูปร่างมากน้อยเพียงใด การป้อนโปรแกรมและการติดต่อกับเครื่องที่สะดวกขึ้น และการควบคุมเครื่องโดยผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องที่ง่ายขึ้นเหล่านี้ เครื่องจักรนั้นๆจะเรียกว่าเครื่องจักร CNC

ขั้นตอนที่ 3 ข้อมูลของผลิตภัณฑ์

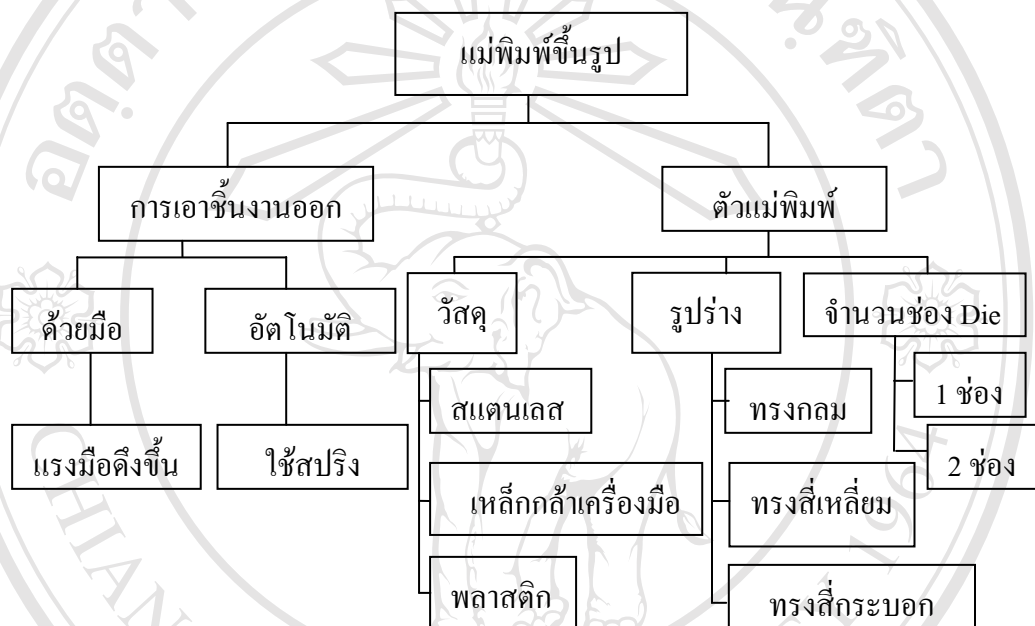
การออกแบบแม่พิมพ์ลักษณะเป็นแผ่น สำหรับการขึ้นรูปวัสดุต้นคอปเป็นแผ่น (Plate) และนำไปทดสอบทางกลตามมาตรฐาน ASTM C1161-90 ลักษณะชิ้นงานมีความกว้าง 8 มม. ความสูง 6 มม. ความยาว 45 มม. เป็นข้อมูลของแม่พิมพ์ที่จะสร้างในการอัดขึ้นรูปและได้ออกแบบลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปและวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ ดังแสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 วัสดุและรูปแบบของแม่พิมพ์ที่ทำการสร้างแม่พิมพ์

วัสดุ	วิธีการเอาชิ้นงานออก	รูปทรงของแม่พิมพ์	จำนวนช่องของแม่พิมพ์
สแตนเลส	สปริง	ทรงกลม	1 ช่อง
เหล็กกล้า	มือดึงขึ้น	ทรงสี่เหลี่ยม	2 ช่อง
พลาสติก	-	ทรงกระบอก	-

ขั้นตอนที่ 4 ค้นหาแนวทางแก้ไขอย่างเป็นระบบ

จากการค้นหาแนวทางการแก้ไขปรับปรุงผลิตภัณฑ์ทั้งจากภายในและภายนอกดังที่ได้กล่าวมาในขั้นตอนที่ 2 และ 3 นำมาซึ่งแนวทางการแก้ไขปัญหาที่นำมาพิจารณาหาแนวทางที่ดีที่สุด สำหรับขั้นตอนนี้จะใช้ตารางประสานแนวคิด (Concept Combination Table) เป็นเครื่องมือในการจำแนกทางเลือก



รูป 3.2 ภาพรวมหลักการเลือกวัสดุและรูปแบบแม่พิมพ์

ได้แบ่งตารางประสานแนวคิด (Concept Combination Table) ด้วยกัน 4 แบบซึ่งเป็นเกณฑ์ในการเลือกรูปแบบของแม่พิมพ์และวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์เพื่อประกอบในการพิจารณาคัดสินใจเลือกความเหมาะสมเหมาะสมแก่การขึ้นรูปซึ่งประกอบไปด้วยแบบ A แบบ B และ แบบ C ดังแสดงในตาราง 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ตาราง 3.2 แนวความคิด Concept Combination แบบ A

วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์	รูปชิ้นงาน/ รูปทรง แม่พิมพ์	จำนวนช่อง Die	การนำชิ้นงานออกจาก แม่พิมพ์
สแตนเลส 304	ทรงกลม	1	แรงมือดึงขึ้น
เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง	ทรงสี่เหลี่ยม	2	สปริง
เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน	ทรงกระบอก	-	-

ตาราง 3.3 แนวความคิด Concept Combination แบบ B

วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์	รูปชิ้นงาน/ รูปทรง แม่พิมพ์	จำนวนช่อง Die	การนำชิ้นงานออกจาก แม่พิมพ์
สแตนเลส 304	ทรงกลม	1	แรงมือดึงขึ้น
เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง	ทรงสี่เหลี่ยม	2	สปริง
เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน	ทรงกระบอก	-	-

ตาราง 3.4 แนวความคิด Concept Combination แบบ C

วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์	รูปชิ้นงาน/ รูปทรง แม่พิมพ์	จำนวนช่อง Die	การนำชิ้นงานออกจาก แม่พิมพ์
สแตนเลส 304	ทรงกลม	1	แรงมือดึงขึ้น
เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง	ทรงสี่เหลี่ยม	2	สปริง
เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน	ทรงกระบอก	-	-

ต่อไปเป็นขั้นตอนของการคัดเลือกและคัดกรองเพื่อที่จะให้แม่พิมพ์มีคุณภาพและตรงตามความต้องการ โดยใช้หลักการของ Concept Selection

2) เกณฑ์คัดเลือก (Concept Selection) ในการเลือกรูปแบบและวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเงื่อนไขของผลิตภัณฑ์

- วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์มีความแข็งแรงต่อการกดอัด
- สามารถทนการสึกหรอและการเสียดสีขณะทำการขึ้นรูป
- การเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ออกร่าง
- ราคาวัสดุ
- ขั้นตอนกระบวนการทำแม่พิมพ์

ขั้นตอนที่ 2 Concept Screening

เป็นขั้นตอนของการเลือกแต่ละแบบของแม่พิมพ์โดยใช้สัญลักษณ์ในการให้ความสำคัญดังแสดงในตาราง 3.5

ตาราง 3.5 สัญลักษณ์ในการให้ความสำคัญ (Concept Screening) ของแต่ละแบบ

Selection Criteria	A	B	C	Ref
วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์มีความแข็งแรงต่อการกดอัด	+	0	-	0
สามารถทนการสึกหรอและการเสียดสีขณะทำการขึ้นรูป	+	0	-	0
การเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ออกร่าง	+	+	+	0
ความยากง่ายในการทำแม่พิมพ์	-	0	+	0
จำนวนชิ้นงานมากขึ้น	+	0	0	
Pluses	4	1	2	
Sames	0	4	1	
Minuses	1	0	2	
Net	3	1	0	

ตาราง 3.5 สัญลักษณ์ในการให้ความสำคัญ (Concept Screening) ของแต่ละแบบ (ต่อ)

Rank	1	2	3	
Continue ?	No	No	Yes	

ขั้นตอนที่ 3 Concept Scoring

เป็นขั้นตอนในการให้น้ำหนักความสำคัญของแต่ละ Criteria หลังจากที่ทำจาก (Concept Screening) ดังแสดงในตาราง 3.6

ตาราง 3.6 การให้น้ำหนักความสำคัญของแต่ละ Criteria เลือกที่จะไปพัฒนา

Concepts					
Selection Criteria	Weigh	A		B	
		Rating	WS	Rating	WS
วัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์มีความแข็งแรงต่อการกดอัด	35%	5	1.75	4	1.5
สามารถทนการสึกหรอและการเสียดสีขณะทำการขึ้นรูป	30%	5	1.5	3	1.5
การเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ออกง่าย	20%	5	1	5	1
ความยากง่ายในการทำแม่พิมพ์	10%	3	0.3	5	0.5
จำนวนชิ้นงานมากขึ้น	5%	5	0.25	3	0.15
Total Score		4.8		4.65	
Rank		1		2	
Continue ?		Develop		No	

จากการสร้างแนวความคิดแล้วจึงทำการสร้างแม่พิมพ์ โดยวัสดุที่ใช้เป็นสแตนเลส 304 รูปทรงของช่อง Die รูปทรงของช่องจะเป็นสี่เหลี่ยมมีสปริงเป็นตัวในการนำชิ้นงานออก และทำการชุบแข็งเพื่อให้วัสดุเกิดความแข็งแรงสามารถที่จะรับแรงกดอัดได้ดีไม่เกิดการสึกหรองง่าย และทำให้ผิวของแม่พิมพ์เรียบมันช่วยลดการเสียดสีของแม่พิมพ์ ชิ้นงานไม่ติดกับแม่พิมพ์เกิดการกระจายแรงอย่างทั่วถึงจึงได้ทำการออกแบบ

3.1.3 ออกแบบแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูปกระดูกเทียม

และการออกแบบแม่พิมพ์ ยึดรูปแบบแม่พิมพ์ตามมาตรฐาน ASTM C1161-90 เพื่อเป็นไปตามมาตรฐานในการทดสอบการดัดโค้งของชิ้นงานและการออกแบบชิ้นงานทดสอบโดยคำนึงถึงการนำไปใช้เป็นวัสดุยึดตรึงกระดูกต้นคอได้อิงลักษณะรูปทรงแผ่นเพลต โดยมีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 8 x 6 ตารางมิลลิเมตร ยาว 45 มิลลิเมตร

3.1.4 ศึกษาการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป

ลักษณะการทำงานของเครื่องไฮดรอลิกเพลสหลักการทำงานไม่ซับซ้อน ลักษณะของเครื่องเป็นระบบไฮดรอลิกในการเลื่อนตัวแผ่นปั๊มขึ้นลงโดยมีตัวคันโยกในการบังคับโดยมีมาตรวัดความดันในการควบคุมความดัน ในการทำงานมีเครื่องปั๊มลมเป็นตัวจ่ายความดันโดยมาตรวัดจะบอกสเกลการใช้งาน 2 แบบ แบบปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ แบบกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

3.2 การประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมของการอัดขึ้นรูป

3.2.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมของการอัดขึ้นรูป

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology : RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร โดยมีหลายเทคนิค ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) ได้กำหนดปัจจัยในการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนผสมของตัวประสานต่อไฮดรอกซีอะปาไทต์ ความดันในการอัดขึ้นรูป และระยะเวลาในการอัดขึ้นรูป จากการทดลองเบื้องต้นทำให้ทราบว่าค่าของอัตราส่วนผสมของตัวประสานต่อไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่ใช้ ความดันในการอัดขึ้นรูปที่ใช้ และ ระยะเวลาในการอัดขึ้นรูปที่ใช้ ในการอัดขึ้นรูปมีผลต่อค่าการกดอัดและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน และค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ถึงแม้ว่าอัตราส่วนผสมของตัวประสานต่อไฮดรอกซีอะปาไทต์เท่ากัน แต่หากไม่ได้กำหนด

ระยะเวลาในการอัดขึ้นรูปที่ใช้ กับ ความดันในการอัดขึ้นรูปที่ใช้ อาจส่งผลต่อค่าการกดอัดและค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน และ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพลสท์สำหรับการขึ้นรูป เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป โดยทำศึกษาจากหนังสือ, คู่มือ รวมทั้งสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญด้านการอัดขึ้นรูป ซึ่งในเบื้องต้นผู้วิจัยมีปัจจัยที่อยู่ในความสนใจปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอัดขึ้นรูปดังนี้

1) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูป

จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ผู้วิจัยให้ความสนใจว่าจะมีผลต่อค่าการกดอัด และค่าการดัดโค้งของชิ้นงาน และ ค่าความหนาแน่น มีทั้งหมด 3 ปัจจัยหลักได้แก่ อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA (กรัม) ความดันในการอัดขึ้นรูป (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และ ระยะเวลาในการอัดขึ้นรูป (วินาที) โดยปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยนี้ แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วยระดับต่ำและสูงโดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัย ระดับ ขอบเขตและสัญลักษณ์แสดง ดังตาราง 3.7

ตาราง 3.7 ปัจจัย ระดับขอบเขต และสัญลักษณ์สำหรับการอัดขึ้นรูป

ปัจจัย / หน่วย	ระดับการตั้งค่า		สัญลักษณ์
	ต่ำ (-)	สูง(+)	
1) อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA (กรัม)	0.2	0.6	PVA
2) ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	75	220	Pressure
3) ระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป (วินาที)	20	40	Time

อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA (กรัม) ได้กำหนดช่วงปัจจัยระดับต่ำ-สูง ไว้ในช่วง 0.2-0.6 (กรัม) เนื่องจากในการทำการทดลองเบื้องต้น พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่น้อยกว่า 0.2 กรัม ทำการผสมกับไฮดรอกซีอะปาไทต์นั้นไม่เกิดการเกาะตัวกันเป็นผงแกรนูล ซึ่งเมื่อทำการอัดขึ้นรูปแล้วเกิดการไม่จับตัวเป็นรูปชิ้นงาน และเมื่อทำการอัดขึ้นรูปแล้วพบว่าชิ้นงานไม่เป็นรูปทรง ส่งผลทำให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดที่ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ และเมื่อใช้อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ที่มากกว่า

0.6 กรัมทำการผสมกับไฮดรอกซีอะปาไทต์ พบว่าเกิดการเหนียวเหนียวนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปและเมื่อทำการอัดขึ้นรูปแล้วพบว่าชิ้นงานเกาะติดกับแม่พิมพ์ทำให้การแกะเอาชิ้นงานออกเกิดการแตกหักไม่เป็นรูปทรงส่งผลทำให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์และทำให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดที่ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดช่วงปัจจัยระดับต่ำ-สูง ไว้ในช่วง 0.2-0.6 (กรัม) ในการทดลอง

ระยะเวลาในการอัดขึ้นรูป (วินาที) ได้กำหนดช่วงปัจจัยระดับต่ำ-สูง ไว้ในช่วง 20-40 วินาที เนื่องจากในการทำการทดลองเบื้องต้น พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการอัดที่น้อยกว่า 20 วินาทีในการอัดขึ้นรูป ชิ้นงานมีการแตกร้าวที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลทำให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ ชิ้นงานบางส่วนไม่แข็งตัว ทำให้เกิดปัญหาเวลาถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และเมื่อใช้ระยะเวลาในการอัดที่มากกว่า 40 วินาที ในการอัดขึ้นรูป พบว่าชิ้นงานมีการอัดตัวนานเกินไป ทำให้ความดันระหว่างผิวหน้าแม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมีย ส่งผลให้ชิ้นงานแน่นกับผิวหน้าแม่พิมพ์ส่งผลทำให้เกิดความยากลำบากในการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ทำให้ได้ชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ตามที่กำหนดไว้ อีกทั้งอาจส่งผลกระทบต่อชุดแม่พิมพ์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดช่วงปัจจัยระดับต่ำ-สูง ไว้ในช่วง 20-40 วินาที ในการทดลอง

ความดันที่ใช้ในการอัด (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ได้กำหนดช่วงปัจจัยระดับต่ำ-สูง ไว้ในช่วง 75-220 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เนื่องจากในการทำการทดลองเบื้องต้น พบว่าเมื่อใช้แรงอัดที่น้อยกว่า 75 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการอัดขึ้นรูป ชิ้นงานยังไม่ได้จับตัวกันแน่นเมื่อทำการแกะออกจากแบบแม่พิมพ์ชิ้นงานมีความเปราะแตกหักง่าย และเมื่อใช้ความดันอัดที่มากกว่า 220 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการอัดขึ้นรูป พบว่าชิ้นงานมีการอัดตัวมากเกินไป ทำให้แรงดันในแม่พิมพ์สูงส่งผลให้ชิ้นงานดันตัวออกนอกแม่พิมพ์ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดที่ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดช่วงปัจจัยระดับต่ำ-สูง ไว้ในช่วง 75-220 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการทดลอง

2) การเลือกการออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองตามหลักการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) แบบส่วนประสมกลาง เนื่องจากมีจำนวนของปัจจัยเพียง 3 ปัจจัย กำหนดระดับขอบเขตเพียง 2 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง ทำให้มีจำนวนชุดการทดลองเพียง 40 ชุดเท่านั้น ซึ่งสามารถทำการผลิตจริงได้ โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองตามค่าที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งรูปแบบการทดลองแสดง ตามตาราง 3.8

ตาราง 3.8 รูปแบบและลำดับขั้นการออกแบบการทดลองในการทดลอง

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	อัตราส่วนผสม ของตัว ประสาน (กรัม)	ความดันในการ อัด(ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	เวลา (วินาที)
16	1	-1	1	0.4	270	30
20	2	0	1	0.4	148	30
19	3	0	1	0.4	148	30
14	4	-1	1	0.7	148	30
18	5	-1	1	0.4	148	47
17	6	-1	1	0.4	145	14
15	7	-1	1	0.4	26	30
13	8	-1	1	0.1	148	30
6	9	1	1	0.6	75	40
4	10	1	1	0.6	220	20
11	11	0	1	0.4	148	30
1	12	1	1	0.2	75	20
5	13	1	1	0.2	75	40
12	14	0	1	0.4	148	30
2	15	1	1	0.6	75	20
9	16	0	1	0.4	148	30
7	17	1	1	0.2	220	40
10	18	0	1	0.4	148	30
3	19	1	1	0.2	220	20
8	20	1	1	0.6	220	40

3) ผลตอบของกระบวนการ

หลังจากทำการทดลองจากการออกแบบที่ได้กำหนดตามแนวทฤษฎี DOE จำนวน 1 การทำซ้ำแล้ว ผู้วิจัยทำการส่งต่อชิ้นงานไปเผาผนิกที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานไปทำการทดสอบ เพื่อทำการวัดค่าการกดอัดของชิ้นงาน และการตัดโค้งของชิ้นงาน และนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมไปทำการอัดขึ้นรูปและทำการเผาผนิกเพื่อทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นต่อไป

4) การวิเคราะห์ผลตอบในรอบของ DOE และการวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลังจากทำการทดลอง DOE จำนวน 1 การทำซ้ำ (40 การทดลอง) เสร็จแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบได้แก่ ค่าการกดอัดของชิ้นงาน และค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน เพื่อยืนยันว่าปัจจัย 3 ปัจจัยนี้มีผลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญ และเพื่อหาอันตรกิริยาที่มีผลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญ โดยผู้วิจัยได้ทำการสร้างกราฟเชิงสถิติ (Statistical Graphic Summary) และกราฟการวิเคราะห์แปรปรวนแบบพาเรโต (Pareto ANOVA) เพื่ออธิบายธรรมชาติของข้อมูลการทดลอง

3.2.2 วิเคราะห์ผลโดยใช้การทดสอบค่าการกดอัดและค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน

ใช้การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลวิเคราะห์ค่าผลตอบ ได้แก่ ค่าการกดอัดของชิ้นงาน และค่าการตัดโค้งของชิ้นงาน การวิเคราะห์ผลจะทดลองซ้ำ 1 ครั้ง จากนั้นนำผลที่ได้ของแต่ละการทดลองมาทำการศึกษาหาความสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองการถดถอย และการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อนำผลของความสัมพันธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมกับเกณฑ์ที่กำหนดไว้ สำหรับค่าผลตอบทั้ง 2 ค่า คือ ค่าการกดอัดของชิ้นงานและค่าการตัดโค้งของชิ้นงานให้อยู่ในระดับมากที่สุดของค่าที่วัดได้ จากผลการทดลองในการวัดค่าความเรียบของชิ้นงาน โดยทำการวัดค่าการกดอัดของชิ้นงานโดยเครื่อง Universal Testing Machine ตามรูป 3.3 การวัดค่าการกดอัดของชิ้นงานจะนำชิ้นงานมาวางที่แผ่นเหล็กที่รองชิ้นงานแล้วทำการเลื่อนแผ่นรองชิ้นงานขึ้นจนถึงตัวแท่งเหล็กที่จะทำการกดอัดชิ้นงาน และทำการอัดชิ้นงานจนชิ้นงานแตกหัก ทำการอ่านค่าและบันทึกค่า ซึ่งค่าที่ได้ต้องทำการแปลงหน่วยเป็นกิโลกรัมแล้วคำนวณตามสูตรของค่าการกดอัด วิธีการทดสอบการกดอัดตามรูป 3.4 และทำการทดสอบการตัดโค้งของชิ้นงาน โดยวางชิ้นงานที่แท่นเหล็กซึ่งได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบแบบสามจุด โดยมีเหล็กที่ติดกับตัวแท่งเหล็กด้านบนเมื่อทำการทดสอบเลื่อนชิ้นงานขึ้นจนถึงเหล็กที่ติดกับตัวแท่งเหล็กด้านบน แล้วทำการตัดโค้งชิ้นงานจนหัก อ่านค่าการตัดโค้งแล้วทำการบันทึกค่า ซึ่งค่าที่ได้ต้องทำการแปลงหน่วยเป็นกิโลกรัมแล้วคำนวณตามสูตรของค่าการตัดโค้ง วิธีการทดสอบการตัดโค้ง ตามรูป 3.5



รูป 3.3 เครื่อง Universal Testing Machine สำหรับวิเคราะห์ค่าการกดอัดและค่าการดึงของชิ้นงาน



รูป 3.4 วิธีการทดสอบการกดอัดของชิ้นงาน



รูป 3.5 วิธีการทดสอบการดัดโค้งของชิ้นงาน

3.2.3 ทดสอบยืนยันผล และ ทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการหาโดยพื้นผิวผลตอบหลายตัว โดยทำการทดสอบยืนยันผลการทดสอบ 10 ชิ้นงานทดสอบ แล้วทำการวัดค่าการกดอัดชิ้นงานและค่าการดัดโค้งของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป และ ทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานโดยการนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการอัดขึ้นรูปกระดูกเทียมมาทำการอัดขึ้นรูปและทำการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงได้ชิ้นงานสำเร็จ นำมาทดสอบหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น ซึ่งค่าความหนาแน่นประกอบไปด้วย ค่าความหนาแน่นโดยรวม ค่าความหนาแน่นปรากฏ ค่าความหนาแน่นจริง ด้วยวิธีการทดลองดังนี้

3.2.3.1 วิธีการทดสอบความหนาแน่นโดยรวม และ ความหนาแน่นปรากฏ

- 1) นำตัวอย่างชิ้นงานสำเร็จมาอบที่ตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง เพื่อนำหนักแห้งวัดค่าและบันทึกค่าน้ำหนักแห้ง (D)
- 2) นำไปขึ้นงานที่ได้จากการอบแห้ง นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้ในน้ำอีก 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งด้วยทริชซูให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก วัดค่าและ บันทึกค่าน้ำหนักเปียก (S-I)
- 3) นำชิ้นงานที่ได้จากการชั่งทริชซูนำไปใส่บีกเกอร์แล้วทำการชั่งวัดค่าและบันทึกค่าน้ำหนัก (D-I)

3.2.3.2 วิธีการทดสอบความหนาแน่นจริง

นำขวดโนมิเตอร์ 50 มิลลิลิตร ชั่งน้ำหนักขวดเปล่า ทำการชั่งน้ำหนักวัดค่าและบันทึกค่า (W1) นำชิ้นงานที่ได้จากการวัดค่าเสร็จมาทำลายเพื่อทำลายรูปจนเป็นผงละเอียด แล้วนำผงที่ได้

ใส่ขวดโนมิเตอร์ ปริมาณ 1 ส่วน 3 ของขวดแล้วทำการชั่งน้ำหนักวัดค่าและทำการบันทึกค่า (W2) แล้วทำการเติมน้ำกลั่นลงไปเกือบเต็มทำการชั่งใส่ฟองอากาศรอให้เย็นทำการชั่งน้ำหนักวัดค่าและบันทึกค่า (W3) ขั้นตอนต่อไปเติมน้ำให้เต็มแล้วชั่งน้ำหนักวัดค่าและบันทึกค่า (W4)

3.3 การเตรียมองค์ประกอบในการอัดขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ในการทดลองโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Hydraulic Press) ในการอัดขึ้นรูป ดังรูป 3.6



รูป 3.6 เครื่องกดอัดขึ้นรูปไฮดรอลิกเพลส (Hydraulic Press)

- 2) ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกหอยผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งนำมาเป็นสารตั้งต้นในการขึ้นรูปกระดูกเทียม ดังรูป 3.7



รูป 3.7 ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกหอย

3) สารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA) มีหน้าที่เป็นตัวยึดประสาน จะช่วยให้อนุภาคเกิดการเชื่อมต่อกันจนมีลักษณะเป็นแกรนูล (Granulation) ซึ่งจะช่วยทำให้เนื่องานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น ตามรูป 3.8



รูป 3.8 สารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA)

4) ชุดแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูป (Press Forming Mould) ดังรูป 3.9

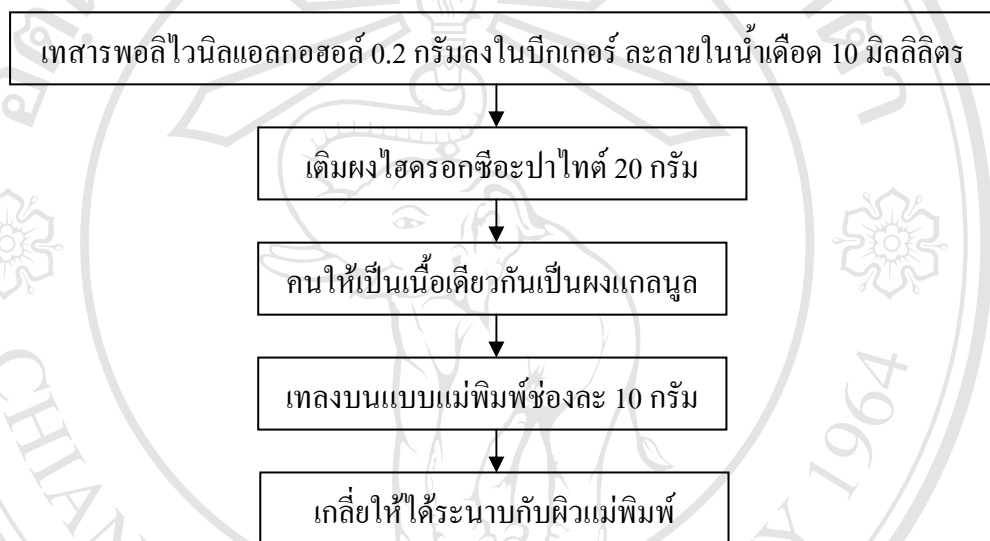


รูป 3.9 ชุดแม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูป (Press Forming Mould)

3.3.2 การอัดขึ้นรูป (Press Forming)

ตามเงื่อนไขและการเตรียมองค์ประกอบในการอัดขึ้นรูป ด้วยการใช้อัตราส่วนผสมของตัวประสาน PVA ในการอัดขึ้นรูป โดยกำหนดช่วงปัจจัยสูงต่ำ คือ 0.2-0.6 กรัม ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป โดยกำหนดช่วงปัจจัยสูงต่ำ คือ 75-225 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป โดยกำหนดช่วงปัจจัยสูงต่ำ คือ 20-40 วินาที

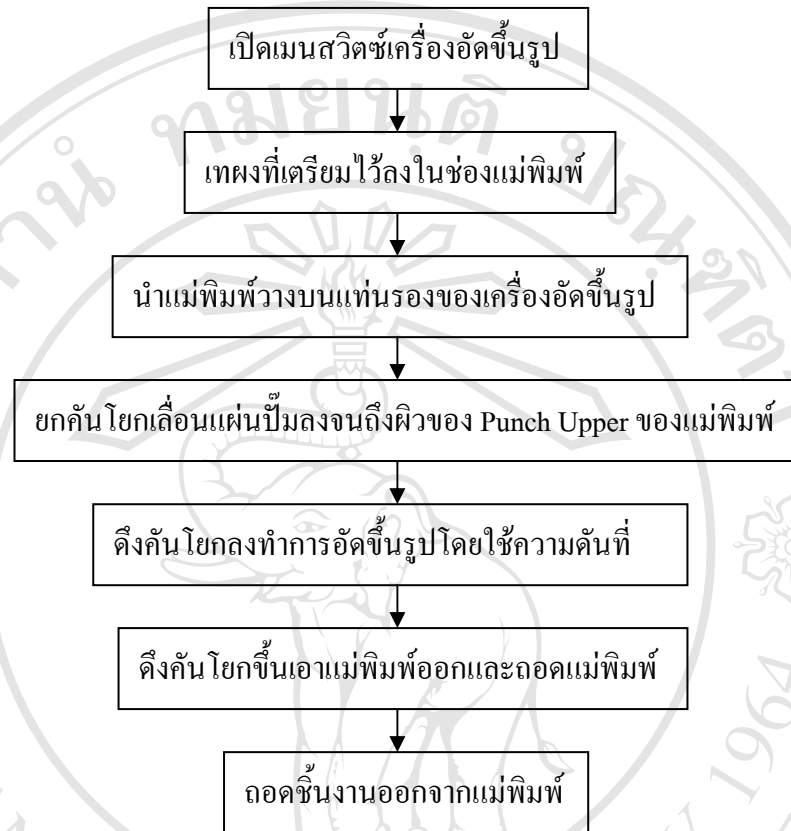
1. การเตรียมขึ้นรูปกระดูกเทียม (ผงไฮดรอกซีอะปาไทต์ กับ สารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์) (ในกรณีที่ใช้สารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 0.2-0.6 กรัม หรือ 0.1-0.3 % โดยน้ำหนัก ในกรณี 0.2 กรัม)



รูป 3.10 ขั้นตอนการเตรียมผงในการขึ้นรูปกระดูกเทียม

ในการอัดขึ้นรูป เพื่อให้ชิ้นงานติด ขณะทำการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ผู้วิจัยได้ใช้น้ำมันหล่อลื่น ในการทาผิวของตัว Die กับ ตัว Punch ของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ก่อนทำการอัดขึ้นรูป หลังจากการแกะชิ้นงานเสร็จก็ทำความสะอาดก่อนที่จะทำการอัดขึ้นรูปครั้งต่อไป โดยการใช้แปรงพิเศษเพื่อไม่ให้เกาะติดแม่พิมพ์เวลาทำการอัดขึ้นรูป

2. ขั้นตอนการอัดขึ้นรูป



รูป 3.11 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูป

นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาเผาผนึก (Sintering) ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และผนึกตัวเป็นเนื้อเดียวกันและมีความแข็งแรงขึ้น เผาชิ้นงานด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงซึ่งการตั้งค่าของเตาเผานั้นต้องใช้ระยะเวลาในการเผา 1 วัน