

การศึกษากระบวนการผลิต โครงสร้างทางจุลภาค
และสมบัติในการจำรูปของวัสดุรูพรุนนิกเกิลไทเทเนียม (NiTi)
สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูป

Investigation on Processing, Microstructure and Shape-memory Property
of Porous NiTi for Metal Injection Molding

น.ส.กรรณก ทวีกิจ โภคัย 50550078

น.ส.จุฑาทิพย์ สัตย์บุตร 50550466

อ.ดร.อัมพิกา บันสิทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: fengakb@ku.ac.th

อ.ดร.ณัฐธิตา ชวนเกริกกุล

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail: nutthita.c@chula.ac.th

บทคัดย่อ

วัสดุรูพรุนนิกเกิลไทเทเนียมมีสมบัติและ โครงสร้างที่ นำสนใจต่อการประยุกต์ใช้เป็นกระดูกเทียมในอนาคตได้ การขึ้น รูปวัสดุรูพรุนนิกเกิลไทเทเนียม โดยอาศัยกระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อทำให้ได้มาซึ่งรูปทรงของกระดูกเทียมภายนอกที่ซับซ้อน ต้อง อาศัยตัวเชื่อมประสานในการผลิตที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป ใน โครงการนี้จึงมุ่งประเมินความเป็นไปได้ของการใช้ตัวเชื่อม ประสานใหม่ที่ประกอบด้วย โพลีเอทรีลีนไกลคอล โพลีเมทิลเม ทาครีเลตในการฉีดขึ้นรูปผงนิกเกิลไทเทเนียม โดยได้ศึกษาอิทธิพล ของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิ สัดส่วนปริมาณระหว่างตัวเชื่อม ประสาน สัดส่วนปริมาณของตัวเชื่อมประสานต่อนิกเกิล ไทเทเนียม รวมถึงการใช้วัสดุแทนที่รูพรุน ชนิด โพลีเมทิลเม ทาครีเลต และโซเดียมคลอไรด์ในการผลิต ผลการทดลองพบว่า สามารถใช้ตัวเชื่อมประสานโพลีเอทรีลีนไกลคอล โพลีเมทิลเม ทาครีเลตในการขึ้นรูปวัสดุรูพรุนนิกเกิลไทเทเนียม ให้มีความคง รูปหลังการขึ้นรูป และหลังการเผาผนึก โดยควรใช้กรดสเตียริก เป็นส่วนผสมร่วมเพื่อเพิ่มการยึดเกาะ โดยสัดส่วนระหว่างพอลิ เอทรีลีนไกลคอลต่อโพลีเมทิลเมทาครีเลตต่อกรดสเตียริกที่ เหมาะสม คือ 78:20:2 เฟอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ นิกเกิล ไทเทเนียมต่อตัวเชื่อมประสาน คือ 60:40 - 70:30 เฟอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร การใช้วัสดุแทนที่รูพรุนส่งผลกระทบต่อโครงสร้างรูพรุนของนิ กเกิลไทเทเนียม โดยวัสดุรูพรุนที่ผลิตได้มีลักษณะรูพรุนปรากฏที่ ผิวชิ้นงานล้อมรอบเนื้อ โลหะภายในที่มีความหนาแน่นสูง

Porous NiTi exhibits properties and microstructure promising for artificial bone

applications. In order to form porous NiTi with complex shape, injection molding is commonly used and proper binder system is required. In this work, a new binder system composed of polyethyleneglycol and polymethymethacrylate is evaluated and their process parameters such as binder composition, NiTi powder to binder ratio as well as effect of space holders (in this case, polymethacrylate and sodium chloride) are investigated. The result shows that this binder system, with help of stearic acid, can be used to produce porous NiTi with sufficient stability after compaction and sintering. The optimize binder composition and NiTi to binder ratio is 78:20:2 percent by weight and 60:40 - 70:30 percent by weight, respectively. Porous NiTi produced in this study shows high porosity on the outer part and high density in the center. Moreover, use of space holders affects porosity of the porous structure.

คำสำคัญ นิกเกิลไทเทเนียม กระบวนการฉีดขึ้นรูป วัสดุรูพรุน กรดสเตียริก โพลีเอทรีลีนไกลคอล โพลีเมทิลเมทาครีเลต วัสดุ แทนที่รูพรุน

1. บทนำ

นิเกิลไทเทเนียม(NiTi)เป็นโลหะผสมจัดอยู่ในประเภทวัสดุฉลาด (Smart Materials) เนื่องจากมีสมบัติพิเศษในการจำรูป โดยเมื่อได้รับแรงกระทำให้เปลี่ยนรูปไป ก็สามารถเปลี่ยนกลับคืนสู่รูปเดิมได้ภายหลังจากการคลายความร้อน หรือสามารถยึดหยุ่นกลับสู่รูปเดิมได้ภายหลังจากการคลายแรงกระทำ ซึ่งความเครียดในการคืนรูปจะสูงกว่าวัสดุประเภทโลหะ โดยทั่วไป ทำให้นิเกิลไทเทเนียมมีค่ามอดูลัสต่ำในขณะที่ยังคงมีความแข็งแรงสูง สามารถดูดซับพลังงานได้มาก ทนทานต่อการสึกกร่อน และไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อมนุษย์ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์

เนื่องจากวัสดุพอร์ซเซ่นิกเกิลไทเทเนียมมีโครงสร้างที่เป็นลักษณะเป็นรูพรุน ทำให้เนื้อเยื่อกระดูกสามารถเจริญเติบโตได้ ส่งผลให้กระดูกและกระดูกเทียมประสานรวมกันได้ และเนื่องจากความพรุนตัวนี้เองทำให้เป็นวัสดุตัวเลือกหนึ่งที่สามารถพัฒนาให้มีสมบัติความยืดหยุ่นคล้ายกระดูกจริง

วัสดุพอร์ซเซ่นิกเกิลไทเทเนียมสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น กระบวนการอัดขึ้นรูป กระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นวิธีที่สามารถผลิตวัสดุที่มีความซับซ้อนได้ และสามารถผลิตชิ้นงานได้ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน การลงทุนต่ำ ใช้แรงงานน้อย และชิ้นงานที่ได้มีขนาดและมิติที่แน่นอนตามที่กำหนด ซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปเชิงกล (Machining) ก่อนนำไปใช้งานอีกแต่อย่างใด การฉีดวัสดุพอร์ซเซ่นิกเกิลไทเทเนียมขึ้นรูปจำเป็นต้องมีการผสมตัวเชื่อมประสานให้มีสัดส่วนที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป โดยตัวเชื่อมประสาน(Binder) ที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป มีหลากหลายชนิด ได้แก่ ขี้ผึ้ง(Wax) กรดสเตียริก (Stearic Acid,SA) โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol,PEG) โพลีเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate,PMMA) ประโยชน์ของตัวเชื่อมประสานเหล่านี้ ก็คือ การช่วยยึดเกาะของผงโลหะ และอุดช่องว่างระหว่างผงโลหะ และยังช่วยในการหล่อลื่น รวมทั้งเพิ่มความสามารถในการไหล เพื่อทำให้การฉีดดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น โพลีเอทิลีนไกลคอล มีสมบัติเด่นคือการไหลตัวดีเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว และสามารถกำจัดออกได้ง่ายโดยการละลายน้ำ กรดสเตียริก ช่วยในการคงตัวของอนุภาค พร้อมทั้งช่วยในการไหลตัวที่ดี และโพลีเมทิลเมทาคริเลต เป็นตัวช่วยในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น ทนต่อการกัดและเบส และสามารถกำจัดออกจากชิ้นงานได้โดยการเผา

การทำให้เกิดรูพรุนโดยทั่วไปในวัสดุพอร์ซเซ่นิกเกิลไทเทเนียมเกิดฟองก๊าซ หรืออาศัยการเผาผนึก(Sintering)ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นไม่สามารถควบคุมได้ การใช้วัสดุแทนที่(Space holder) เพื่อการปรับให้ชิ้นงานมีรูพรุนมากขึ้นและสามารถ

ควบคุมสัดส่วนปริมาณ และขนาดของรูพรุนได้ จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการผลิตวัสดุพอร์ซเซ่นิกเกิลไทเทเนียม โดยทั่วไปนิยมใช้ แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (NH_4HCO_3) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นวัสดุแทนที่

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปวัสดุพอร์ซเซ่นิกเกิลไทเทเนียม โดยใช้ตัวเชื่อมประสานคือ กรดสเตียริก โพลีเอทิลีนไกลคอล โพลีเมทิลเมทาคริเลต และใช้วัสดุแทนที่ คือ โซเดียมคลอไรด์ และโพลีเมทิลเมทาคริเลต เพื่อให้เกิดแนวทางในการผลิตวัสดุพอร์ซเซ่นิกเกิลไทเทเนียมที่มีรูปร่างภายนอกตามต้องการ มีขนาดและปริมาณรูพรุนที่ควบคุมได้ต่อไป

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียม Feedstock

1) ชั่งและนำผงนิเกิลไทเทเนียมผสมกับสารละลายโพลีเมทิลเมทาคริเลตในสัดส่วนที่ต้องการผสมน้ำกลั่นเล็กน้อย และคนเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันและนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ไอน้ำ

2) นำส่วนผสมนิเกิลไทเทเนียมและโพลีเมทิลเมทาคริเลตที่ได้มาผสมกับเกล็ดโพลีเอทิลีนไกลคอลและมีการใส่ผงกรดสเตียริกเพื่อศึกษาผลของกรดสเตียริกต่อการจับตัวของโลหะ โดยนำเกล็ดโพลีเอทิลีนไกลคอลไปหลอมในเตาที่อุณหภูมิ 57 องศาเซลเซียส ในสัดส่วนที่ต้องการและถ้าหากต้องการที่จะผสมวัสดุแทนที่รูพรุนก็สามารถใส่ไปได้ในขั้นตอนนี้โดยในงานวิจัยนี้ได้ใส่วัสดุแทนที่คือ เกล็ดโซเดียมคลอไรด์และผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต

3) นำแบบกดขึ้นรูปเข้าเตาอบเพื่อปรับอุณหภูมิของแบบกดให้เหมาะสมกับการกดและนำส่วนผสมที่ได้จากการผสมทั้งหมดมาทำการกดขึ้นรูปด้วยแบบตัวกดจะได้เป็น feedstock

2.2 การสลายตัวเชื่อมประสานด้วยน้ำ

นำ feedstock ที่ได้จากหัวข้อที่ 2.1 มาใส่ในตะแกรง เนื่องจากต้องการจะสลายตัวเชื่อมประสานได้ทุกทิศทาง นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และยกตะแกรงขึ้นทึดให้ชิ้นงานแห้งอีก 24 ชั่วโมง

2.3 การเผาผนึก

นำชิ้นงานที่ผ่านการสลายตัวเชื่อมประสานไปทำการเผาผนึกโดยใช้ชิ้นงานในภาชนะที่มีฝาปิดซึ่งทำมาจาก กราไฟต์ และนำไปเผาในสุญญากาศ

2.4 การฉีดขึ้นรูป

เนื่องจากการฉีดขึ้นรูปต้องอาศัยการใช้ feedstock ที่เพียงพอต่อการบรรจุในกระบอกฉีดและแม่พิมพ์ ซึ่งปริมาณของผงนิเกิลไทเทเนียมขนาดที่ใช้ในการวิจัยไม่เพียงพอ จึง

จำเป็นต้องปรับการทดลองในส่วนนี้เป็นการอัดรีดขึ้นรูปแทน โดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูประดับห้องปฏิบัติการเช่นเดิม ในการค้นคว้า feedstock ให้ไหลผ่านทางปากกระบอกรีด (Die) แทน

3. ขั้นตอนในการดำเนินโครงการงาน

3.1. การศึกษาช่วงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่าง นิกเกิลไทเทเนียมและโพลีเอทิลีนไกลคอล

ทำการหาส่วนผสมของนิกเกิลไทเทเนียมต่อโพลีเอทิลีนไกลคอลโดยผสมในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยปริมาตร พบว่าส่วนผสมเหลวเกินไปไม่สามารถขึ้นรูปได้จึงได้ทำการผสมในอัตราส่วนร้อยละ 60:40 – 70:30 โดยปริมาตร พบว่าในอัตราส่วนนี้สามารถทำการอัดขึ้นรูปได้แต่เนื่องจากอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตร มีความหนืดที่น้อยจึงได้หยุดการผสมไว้ในอัตราส่วนนี้

3.2. การศึกษาอิทธิพลของตัวเชื่อมประสานต่อการคงตัวของชิ้นงานภายหลังจากการขึ้นรูป สลายตัวในน้ำและการเผาผลาญ

ทำการหาส่วนผสมของนิกเกิลไทเทเนียมต่อโพลีเอทิลีนไกลคอลต่อโพลีเมทิลเมทาคริเลต เพื่อดูการคงรูปของชิ้นงานหลังการสลายโพลีเอทิลีนไกลคอลด้วยการแช่น้ำ โดยได้นำอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตร จากในหัวข้อที่ 3.1. มาใช้ในการหาส่วนผสมเนื่องจากว่าเป็นอัตราส่วนที่สามารถใส่ปริมาณของนิกเกิลไทเทเนียมได้มากที่สุดและเมื่อนำไปแช่น้ำผลปรากฏว่า ชิ้นงานไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ จึงได้นำส่วนผสมอัตราส่วนร้อยละ 60:40 โดยปริมาตร จากขั้นตอนแรกนำมาทำการทดลองอีกครั้งเนื่องจากคิดว่าในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตร มีปริมาณนิกเกิลไทเทเนียมมากทำให้ชิ้นงานไม่สามารถคงรูปได้ภายหลังจากการแช่น้ำเพื่อสลายโพลีเอทิลีน

3.3. การศึกษาอิทธิพลของวัสดุแทนที่รูพรุนต่อการคงตัวของชิ้นงานภายหลังจากการขึ้นรูปสลายในน้ำและ การเผาผลาญ

ได้มีการผสมวัสดุแทนที่รูพรุนคือ ผงโพลีเมทิลเมทาคริเลต และ โซเดียมคลอไรด์ โดยได้มีการผสมวัสดุแทนที่รูพรุนในอัตราส่วนของนิกเกิลไทเทเนียมต่อตัวเชื่อมประสานเป็นอัตราส่วนร้อยละ 60:40 โดยปริมาตร อัตราส่วนของตัวเชื่อมประสานคือ โพลีเอทิลีนต่อโพลีเมทิลเมทาคริเลตต่อกรดสเตียริกเป็นอัตราส่วนร้อยละ 83:15:2 และ 78:20:2 โดยปริมาตร และอัตราส่วนของนิกเกิลไทเทเนียมต่อตัวเชื่อมประสานต่อวัสดุแทนที่รูพรุนเป็นอัตราส่วนร้อยละ 80:20 โดยปริมาตร

3.4. การศึกษาการขึ้นรูป

ในการทดลองฉีดขึ้นรูปได้นำอัตราส่วนที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนนิกเกิลไทเทเนียมต่อตัวเชื่อมประสานเป็นอัตราส่วนร้อยละ 60:40 โดยปริมาตร โดยสัดส่วนของตัวเชื่อมประสานเป็น

อัตราส่วนร้อยละ 73:20:2 โดยปริมาตร ไปทำการทดลองฉีดขึ้นรูปและเนื่องจากผงนิกเกิลไทเทเนียมที่ทำการคัดกรองขนาดมามีจำนวนจำกัดไม่เพียงพอต่อการนำไปฉีดเข้าในแม่แบบ จึงได้ทำการฉีดเพื่อดูการไหลของชิ้นงาน

4. ผลการดำเนินโครงการงานและวิจารณ์

4.1. ผลการศึกษาช่วงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างนิกเกิลไทเทเนียมและโพลีเอทิลีนไกลคอล

จากการนำนิกเกิลไทเทเนียมผสมกับโพลีเอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนนิกเกิลไทเทเนียมต่อโพลีเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 50:50 60:40 65:35 และ 70:30 โดยปริมาตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อนำส่วนผสมในช่วงที่ได้ไปทำการอัดขึ้นรูปเพื่อดูการคงรูปของชิ้นงานเริ่มมีความร่วนที่ 70:30 โดยปริมาตร จึงสรุปว่าช่วงอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบคือ 50:50 ถึง 70:30 โดยปริมาตร พบว่าสัดส่วน 50:50 มีลักษณะที่เหลวเกินไปที่จะทำการอัดขึ้นรูปได้เมื่อเพิ่มสัดส่วนของนิกเกิลไทเทเนียมเป็น 60:40 65:35 เพื่อให้มีความหนืดมากขึ้นพบว่าสามารถอัดขึ้นรูปได้และสามารถเพิ่มได้สูงสุดจนถึงสัดส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตร เนื่องจากพบว่าในการผสมส่วนผสมนี้มีความร่วนมากหรือมีความหนืดที่น้อยมาก

4.2. ผลการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารตั้งต้น

4.2.1. ศึกษาการขึ้นรูปและการคงตัวของชิ้นงานภายหลังจากการสลายตัวเชื่อมประสาน

จากการศึกษาในหัวข้อ 4.1 พบว่าอัตราส่วนนิกเกิลไทเทเนียมต่อตัวเชื่อมประสาน(PEG) ร้อยละ 54:46, 60:40, 65:35, 70:30 โดยปริมาตร สามารถขึ้นรูปและคงรูปได้ จึงได้นำอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตร ที่มีการใส่ผงนิกเกิลไทเทเนียมมากที่สุดและอัตราส่วนร้อยละ 60:40 โดยปริมาตร ในเบื้องต้นผลการขึ้นรูปของชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้ดีมาใช้โดยเปลี่ยนตัวเชื่อมประสานจากโพลีเอทิลีนไกลคอลส่วนเป็น โพลีเอทิลีนและโพลีเมทิลเมทาคริเลตดังเอกสารอ้างอิง[1] ทำการผสม PMMA ที่อัตราส่วนร้อยละ 85:15 โดยปริมาตรและสลาย PEG ออกโดยการละลายในน้ำเพื่อสังเกตการคงรูป แต่เมื่อทำการแช่น้ำสลายโพลีเอทิลีน ไคลอลออกพบว่า ชิ้นงานมีการยึดเกาะที่ไม่ดีสลายหมดภายในเวลา 1 นาที

เมื่อแช่น้ำชิ้นงานที่ 2 (60:40) พบว่าเมื่อเปลี่ยนโพลีเอทิลีนไกลคอลและโพลีเมทิลเมทาคริเลตอัตราส่วนให้มีปริมาณของนิกเกิลไทเทเนียม ที่น้อยลงแล้วชิ้นงานก็ยังสลายตัวเมื่อ

ผ่านการแช่น้ำจึงได้คาดว่าชนิดของตัวเชื่อมประสานไม่แข็งแรงพอที่จะช่วยให้ชิ้นงานคงรูปอยู่ได้จึงได้มีการเพิ่มตัวเชื่อมประสานคือ SA เนื่องจาก SA ช่วยในการคงตัวของอนุภาคและช่วยในการไหลตัวของอนุภาคเข้าสู่แม่พิมพ์

เมื่อมีการเพิ่มตัวเชื่อมประสานคือ กรดสเดียริก ในอัตราส่วนโพลีเอทิลีนไกลคอลต่อโพลีเมททิลเมทาคริเลตต่อกรดสเดียริก ในอัตราส่วนของตัวเชื่อมประสาน PEG:PMMA:SA เป็น 85:15:2 ผลที่ได้พบว่า ชิ้นงานไม่สลายตัว สังเกตเห็นฟองอากาศที่ตัวชิ้นงานและ PEG ที่สลายออกมาจากชิ้นงานที่ทำการแช่น้ำและชิ้นงานยังคงรูปอยู่ได้ภายหลังจากการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากการทดลองเพิ่มตัวเชื่อมประสานคือ SA เข้าไปในชิ้นงานทำให้พบว่าชิ้นงานเมื่อผ่านการแช่น้ำแล้วยังสามารถคงรูปอยู่ได้และมีการสลายของ PEG ออกมาหมด พบว่าน้ำหนักที่หายไปหลังจากการแช่น้ำมีปริมาณที่มากกว่าปริมาณของ PEG ที่ใส่เข้าไปเนื่องมาจากชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น ไม่ค่อยมีความแข็งแรงสังเกตจากตรงบริเวณขอบของชิ้นงานที่ทำการแช่น้ำที่สัมผัสกับตะแกรง หลังจากการแช่น้ำหลุดออกได้ง่ายทำให้น้ำหนักที่หายไปมีปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่ควรจะเป็น

4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของวัสดุแทนที่รูพรุน

เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการสลายตัวเชื่อมประสานพบว่าชิ้นงานที่ได้ไม่ค่อยมีความแข็งแรงมากนักและเป็นชิ้นงานที่มีปริมาณของ NiTi (สัดส่วน 70:30 %vol) ที่มากและชิ้นงานที่มีการใส่ Space holder ที่เป็น NaCl ก็ยังคงไม่ค่อยมีความแข็งแรง จึงได้มีการปรับปรุงสัดส่วนของตัวเชื่อมประสานที่ใช้โดยเปลี่ยนสัดส่วนเป็นดังนี้ 78:20:2 (PEG:PMMA:SA) คือจะมีการเพิ่ม PMMA และลด PEG ลงเนื่องจากว่า PMMA ช่วยในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของผงและเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน ซึ่งผลที่ได้จากการเปลี่ยนสัดส่วนทำให้ความแข็งแรงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำวัสดุแทนที่รูพรุน ที่ใช้ในการทดลองก็คือ เกลือโซเดียมคลอไรด์ และผงโพลีเมททิลเมทาคริเลตใส่เพิ่มในอัตราส่วนในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งพบว่าเมื่อนำชิ้นงานที่ใส่ เกลือโซเดียมคลอไรด์ ไปทำการสลายตัวเชื่อมประสานจะสังเกตเห็นว่ามีเศษเกลือโซเดียมคลอไรด์ หลุดออกมาขณะทำการแช่น้ำและสังเกตเห็นว่าชิ้นงานมีรูพรุนเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากทั้งโพลีเอทิลีนไกลคอลและ เกลือโซเดียมคลอไรด์ สามารถละลายน้ำได้ดีซึ่งผลที่ได้จากการใส่ ผงโพลีเมททิลเมทาคริเลตก็จะคล้ายกัน

แต่ปริมาณเศษผงโพลีเมททิลเมทาคริเลตที่หลุดจะน้อยกว่าชิ้นงานที่ใส่เกลือโซเดียมคลอไรด์และเห็นรูพรุนที่ชิ้นงานไม่ชัดเจนเหมือนกับชิ้นงานที่ใส่เกลือโซเดียมคลอไรด์ด้วยเช่นกัน โดยหลังจากผ่านการแช่น้ำพบว่าชิ้นงานที่ใส่ เกลือโซเดียมคลอไรด์มีความแข็งแรงที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ใส่ผงโพลีเมททิลเมทาคริเลต

4.3. ผลการศึกษาการไหลของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูป

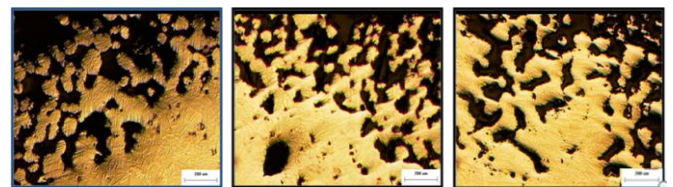
เนื่องจากปริมาณของผงที่ทำการคัดกรองขนาดมีปริมาณน้อยจึงไม่เพียงพอต่อการนำไปฉีดในแม่แบบขนาดความยาว 55 มิลลิเมตร กว้าง 5 มิลลิเมตร จึงทำการฉีดเพื่อดูการไหลของชิ้นงาน โดยนำสัดส่วนตัวเชื่อมประสาน PEG78:PMMA20:SA2 ไปทำการทดลองฉีด ผลที่ได้จากการฉีดเพื่อดูการไหลของชิ้นงานพบว่าสามารถไหลได้เมื่อผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป

4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างรูพรุนภายหลังจากการเผาผืนึก

ภายหลังจากการเผาผืนึก ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะยุบตัวลงและมีลักษณะบิดเบี้ยวเนื่องมาจากว่าในขณะที่ทำการสลายตัวเชื่อมประสาน มีการหลุดร่วงบริเวณขอบของชิ้นงาน และพบว่าชิ้นงานที่มีการผสมวัสดุแทนที่รูพรุนคือ ผงPMMA มีการยุบตัวของชิ้นงานที่มากกว่าชิ้นที่ไม่ได้ใส่วัสดุแทนที่รูพรุน

4.4.1. ศึกษาโครงสร้างรูพรุนบริเวณขอบของชิ้นงาน

เมื่อนำชิ้นงานที่ได้หลังการเผาผืนึกไปวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างภายในบริเวณขอบของชิ้นงานในสัดส่วนของนิกเกิลไทเทเนียมต่อตัวเชื่อมประสานที่ต่างกันมีลักษณะไม่ต่างกันมากนัก แต่จะเห็นว่าอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตร (PEG83:PMMA15:SA2) มีการเชื่อมกันได้ดีกว่าเนื่องจากมีผงนิกเกิลไทเทเนียมในปริมาณที่มากกว่าและเนื่องจากในขณะที่ทำการสลายตัวเชื่อมประสานด้วยการแช่น้ำมีการหลุดร่วงบริเวณขอบของชิ้นงานด้วย



60:40

65:35

70:30

(PEG83:PMMA15:SA2)

(PEG83:PMMA15:SA2)

(PEG83:PMMA15:SA2)

รูปที่ 1 โครงสร้างบริเวณขอบของชิ้นงานที่มีสัดส่วนของนิกเกิล

ไทเทเนียมต่อตัวเชื่อมประสานที่ต่างกัน

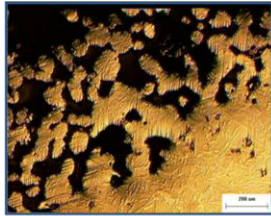
โครงสร้างภายในบริเวณขอบชิ้นงานในสัดส่วน

ตัวเชื่อมประสานที่ต่างกันพบว่า มีรูพรุน โดยในสัดส่วน

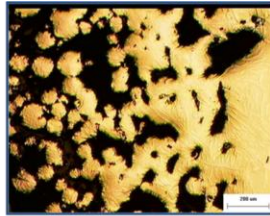
(PEG83:PMMA15:SA2) มีลักษณะเป็นเม็ดผงนิกเกิลไทเทเนียม

และในสัดส่วนของ(PEG78:PMMA20:SA2) ลักษณะมีเชื่อมต่อกัน

ของเม็ดผงมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2



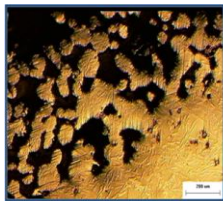
60:40
(PEG83:PMMA15:SA2)



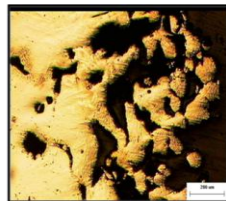
60:40
(PEG78:PMMA20:SA2)

รูปที่ 2 โครงสร้างบริเวณขอบของชิ้นงานที่มีสัดส่วนของตัวเชื่อมประสานที่ต่างกัน

โครงสร้างของสัดส่วนที่มีการใช้วัสดุแทนที่รูพรุน จะไม่ค่อยมีผลต่อลักษณะของรูพรุน เนื่องจากว่าปริมาณของวัสดุแทนที่รูพรุนน้อยเกินไปทำให้โครงสร้างของรูพรุนไม่ต่างกันมากนัก



60:40
(PEG83:PMMA15:SA2)

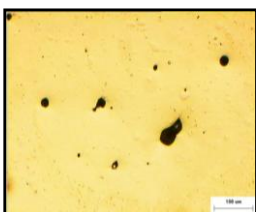


60:40 PMMA Space holder
(PEG78:PMMA20:SA2)

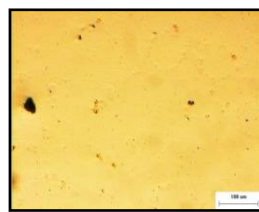
รูปที่ 3 โครงสร้างบริเวณขอบของชิ้นงานที่มีการใส่วัสดุแทนที่รูพรุน

4.4.2. ศึกษาโครงสร้างรูพรุนภายในบริเวณของชิ้นงาน

โครงสร้างรูพรุนภายในชิ้นงานพบว่ามีความหนาแน่นที่มากเหมือนกันทุกชิ้นงานเนื่องมาจากเกิดการปนเปื้อนของเฟสอื่นภายในชิ้นงาน



60:40



60:40 PMMA Space holder

รูปที่ 4 โครงสร้างบริเวณภายในของชิ้นงาน

5. สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

1) ตัวเชื่อมประสานประเภทโพลีเอทรีลีนไกลคอล

(PEG) โพลีเมทิลเมทาครีเลต(PMMA)แบบ emulsion สามารถประสานให้นิกเกิลไทเทเนียมมีการคงตัวได้ และช่วยในการขึ้นรูปของนิกเกิลไทเทเนียม โดยชิ้นงานสามารถคงตัวหลังการขึ้นรูปโดยสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างนิกเกิลไทเทเนียมต่อตัวเชื่อมประสาน ร้อยละ 60:40 ถึง 70:30 โดยปริมาตร

2) กรดอะซิติก (SA) ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเชื่อมประสาน PEG PMMA โดยจะช่วยให้เกิดการคงตัวภายหลังจากการสลายตัวเชื่อมประสาน ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมคือ 2 เปอร์เซ็นต์ของตัวเชื่อมประสาน

3) สัดส่วนตัวเชื่อมประสาน PEG:PMMA:SA คือ ร้อยละ 83:15:2 โดยปริมาตร มีประสิทธิภาพในการคงตัวของชิ้นงานภายหลังจากการสลายตัวเชื่อมประสานในน้ำได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรต้องมีการยืนยันเฟสที่เกิดขึ้นที่ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นตรงบริเวณกลางชิ้นงาน
- 2) ขนาดของวัสดุแทนที่รูพรุน (Space holder) คือ NaCl ที่ใช้ควรมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่านี้
- 3) ควร Hold เวลาทิ้งไว้ระหว่างการสลายตัวของตัวเชื่อมประสานภายในเตาเผาหนึ่ง
- 4) ควรให้ Heating rate ที่ช้ากว่านี้ โดยให้เป็น 2 องศาต่อ นาที

6. กิตติกรรมประกาศ

ปัญญานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก อ.ดร. อัมภิกา บันสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอ.ดร.ณัฐธิดา ชวนเกริกกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุพลาสม่า มหาวิทยาลัย อ.ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ ที่ให้ความกรุณาในการใช้ห้องปฏิบัติการ และ ขอขอบคุณ นายปฐมพงษ์ เชนไทสง ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา

6. บรรณานุกรม

- [1] Nutthaita Chuankrekkul, P. F. M. a. H. A. D. (2008). " Application of Polyethylene Glycol and PolymethylMethacrylate as a Binder for Powder Injection Moulding of Hardmetals." *Chiang Mai J. Sci* 35(1): 188-195.

[2] Guoxin, H., Z. Lixiang, et al. (2008). "Fabrication of high porous NiTi shape memory alloy by metal injection molding." Journal of Materials Processing Technology **206**(1-3): 395-399.

[3] J Mentz, L. K., M Bram, H P Buchkremer and D Stover (2006). "Using MIM to make porous implants with shape memory." Metal Powder Report **61**(3): 20-25.

[4] Köhl, M., M. Bram, et al. (2011). "Characterization of porous, net-shaped NiTi alloy regarding its damping and energy-absorbing capacity." Materials Science and Engineering: A **528**(6): 2454-2462.

[5] Manonukul, A., N. Muenya, et al. (2010). "Effects of replacing metal powder with powder space holder on metal foam produced by metal injection moulding." Journal of Materials Processing Technology **210**(3): 529-535