



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับการผลิต
วัสดุเชิงประกอบสำหรับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์
(The Construction of a Small-Scaled Powder Injection
Moulding Machine for Automotive Based Composites)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับการผลิต
วัสดุเชิงประกอบสำหรับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์
(The Construction of a Small-Scaled Powder Injection
Moulding Machine for Automotive Based Composites)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐาปนีย์ พัทธวิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธิดา ชวนเกริกกุล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2564

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย และผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล อาจารย์และนักวิจัยประจำสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (MMRI) ที่ให้การสนับสนุนด้านความรู้เครื่องมือชนิดขั้นสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการอำนวยความสะดวกเรื่องสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือในการวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือฯ F6 F4 F10 และ F11 ที่ให้ความร่วมมือช่วยเหลือและสนับสนุนตลอดระยะเวลาการทำวิจัยอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณโอภาส ไทยดี เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการออกแบบเครื่องมือ สุดท้ายขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สาร์มภ์ บุญมี ในการให้คำแนะนำช่วยเหลือทางด้านวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบ คำคือ สำหรับคำแนะนำและการสนับสนุนเป็นอย่างดี และโดยเฉพาะอย่างยิ่งนักศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ดังรายนาม

นายนิติธร	เส็งนา
นายพงศธร	ทองบ่อ
นายปิยะณัฐ	อัคราชน
นายเจษฎา	ทองดี
นายวิทวัส	อินทรนุช

ในการดำเนินการศึกษาวิจัยด้วยความมุ่งมั่นและตั้งใจทุกท่าน จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ออกแบบพัฒนาและสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กในแนวนอนขับเคลื่อนด้วยสกรู โดยการทำงานนั้นสามารถควบคุมได้ด้วยหน้าจอสัมผัสแสดงผล ซึ่งเอื้ออำนวยให้สามารถทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก รูปทรงซับซ้อน และสามารถที่จะพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ หรือทางชีวการแพทย์ เป็นต้น นอกจากนี้ ได้ศึกษาทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเกรดทางการค้า เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพื่อประเมินตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป คือ i) อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปที่ 280 – 300 องศาเซลเซียส ii) ความเร็วการฉีดขึ้นรูปที่ 1600 – 1800 รอบต่อนาที และ iii) การเตรียมส่วนผสมเม็ดที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง โดยควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 80 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรการฉีดขึ้นรูปเหล่านี้ต่อความสามารถในการฉีดขึ้นรูป โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่นและความแข็งของชิ้นงาน ตลอดจนการหดตัวและการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปได้ จากผลการทดลองพบว่า การเตรียมส่วนผสมเม็ดที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ในบางครั้งจะพบปัญหาครีบในการฉีดขึ้นรูป ในขณะที่การฉีดขึ้นรูปด้วยส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะค่อนข้างหนืดที่จะฉีดให้เต็มเต็มทั้ง 4 โพรงแบบที่มีรูปทรงโดนัท นอกจากนี้พบว่า ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปไม่ส่งผลที่แตกต่างมากนัก สำหรับการเติมเต็มแม่พิมพ์และสมบัติโดยรวมของชิ้นงาน ภายหลังจากการเผาขึ้นที่ 655 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปไม่เหมาะสม อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวล้อมรอบอะลูมิเนียมซึ่งเป็นเฟสพื้น และเกิดการเผาขึ้นเฟสของเหลวซึ่งสังเกตได้จากพื้นผิวระหว่างรอยต่อที่ติระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และเฟสพื้นอะลูมิเนียม สภาวะการฉีดขึ้นรูปที่ดีที่สุดคือ เมื่อเตรียมส่วนผสมเม็ดที่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ฉีดขึ้นรูปที่ 290 – 300 องศาเซลเซียส และความเร็ว 1800 รอบต่อนาที ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาขึ้นที่ 2.80 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็นมากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นทางทฤษฎี และได้ค่าความแข็งวิกเกอร์สแบบจุลภาค 125.2 Hv อย่างไรก็ดี พบว่าชิ้นงานมีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรค่อนข้างสูง รวมถึงเกิดการบิดเบี้ยวเล็กน้อยภายหลังการเผาขึ้นสอดคล้องกับเกิดการเผาขึ้นเฟสของเหลว ส่งผลให้เกิดความแน่นตัวซึ่งเกิดจากการเติมเต็มรูพรุนและการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคผง นอกจากนี้ หากพิจารณาค่าการหดตัวของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (δ_m) และหลังการเผาขึ้น (δ_s) จากมิติความหนา (t) ของชิ้นงานโดนัท เพื่อนำมาหาค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงานจากการฉีดขึ้นรูป (Z_m) และการเผาขึ้น (Z_s) ตามลำดับ จะได้ค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงานทั้งหมด (Z_{ms}) มีค่าเท่ากับ 1.3113 และ 1.2942 สำหรับส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ และสามารถนำมาคำนวณกลับเพื่อหาขนาดแม่พิมพ์เริ่มต้น (L_i) ที่สอดคล้องกับขนาดชิ้นงานสุดท้าย (L) ที่ต้องการ โดยสรุปแล้วเครื่องมือที่ถูกสร้างขึ้นนี้สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบได้อย่างต่อเนื่องและให้ผลการศึกษาน่าพอใจ

Abstract

A small – scaled powder injection moulding machine has been constructed in this research. Injection moulding in a horizontal direction together with screw driven controlled by a touch screen display allows continuous production of small – complex shape products applicable in the automotive, electronics and bio – medical areas. Trial on injection moulding of the commercial aluminium alloy reinforced with 15 vol.% SiC particulate was carried out to evaluate the moulding parameters; i) injection moulding temperature at 280 – 300 °C, ii) injection speed at 1600 – 1800 rpm and iii) feedstocks prepared at 55 % and 60 % solid loading, while the mould temperature was controlled within 80 – 90 °C. Effects of these parameters on mouldability, microstructure, density and hardness of the composite were studied together with density, shrinkage and distortion for injection mould design consideration. It was found that feedstock of 55 % solid loading occasionally led to flash problem while that of higher solid loading experienced higher viscosity to fulfill a four-cavity, torus - shaped mould. Moulding speed investigated did not significantly affect mould filling and overall properties. After sintering at 655 °C for 3 h, the microstructures generally showed well - distributed SiC particulate in the aluminium matrix. Liquid phase sintering was attained, indicated by good interface between SiC particulate and aluminium matrix. The optimum injection moulding condition was the feedstock prepared at 60% solid loading, moulding at 290 – 300 °C, and 1800 rpm speed, which offered sintered density of 2.80 g.cm^{-3} , or greater than 98 % theoretical density, and micro Vickers hardness of 125.2 Hv. However, high volumetric shrinkage and minor degree of distortion after sintering was observed, corresponding to liquid phase sintering to render densification by pore - filling and particle rearrangement. Moreover, by taking the thickness (t) dimension of the torus shaped sample, the moulding shrinkage (δ_m) and the sintering shrinkage (δ_s) can be achieved in order to obtain the oversize design factor for moulding (Z_m) and sintering (Z_s) respectively. As a result, the total oversize design factors (Z_{ms}) were obtained at 1.3113 and 1.2942 for feedstocks prepared at 55 % and 60 % solid loading respectively. These values can be correlated back to the initial mould size (L_i), relevant to the desired final product size (L). In summary, the constructed machine was found to satisfy continuous injection moulding of the composites investigated.

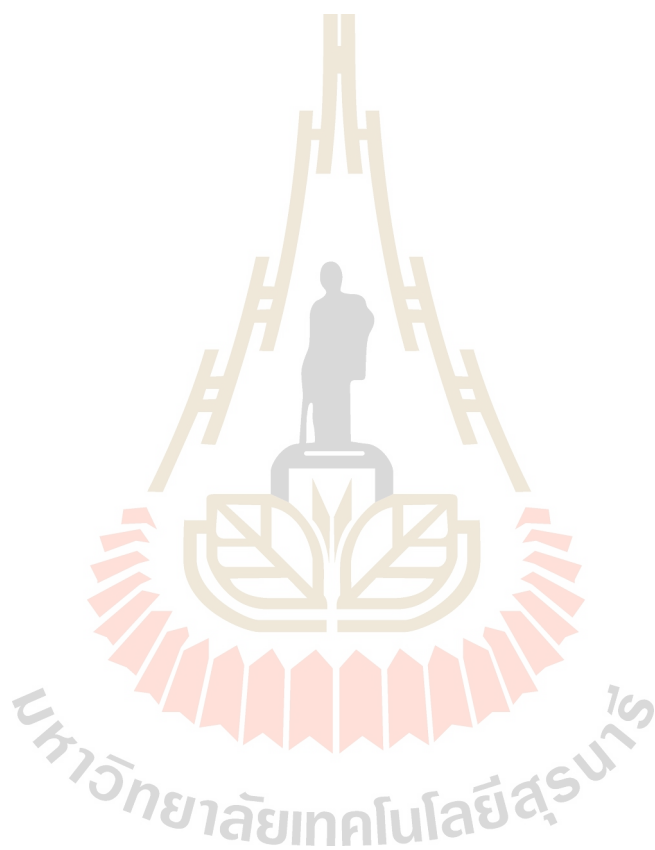
สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
เอกสารอ้างอิง	4
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม	5
2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูปผง	5
2.2 ตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	6
2.3 การศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปต่อสมบัติของวัสดุ	9
2.4 เครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	12
2.5 การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	13
เอกสารอ้างอิง	16
บทที่ 3 การสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	16
3.1 การออกแบบเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ	16
3.2 การสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ	17
3.3 การทำงานของเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ	18
3.4 การทำงานของชุดควบคุม	20
3.5 การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	13
เอกสารอ้างอิง	16
บทที่ 4 ระเบียบวิธีวิจัยการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ	22
4.1 วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ	22
4.2 ระเบียบวิธีวิจัย	23
4.2.1 การวิเคราะห์ผงวัสดุ	23
4.2.2 การเตรียมส่วนผสมเม็ด	23
4.2.3 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	23
4.2.4 กำจัดสารยึดด้วยสารละลาย	24

4.2.5 การเผาผนึก	24
4.2.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม	24
บทที่ 5 ผลการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ	27
5.1 ผลการวิเคราะห์ผงวัสดุ	27
5.2 สมบัติของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป	28
5.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป	29
5.2.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป	31
5.2.3 ความแข็งของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป	32
5.2.4 กำจัดสารยึดด้วยสารละลาย	32
5.3 สมบัติของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก	33
5.3.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาผนึก	33
5.3.2 ค่าความแข็งวิกเกอร์สแบบจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาผนึก	35
5.3.3 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึก	36
5.3.4 ความสามารถในการคงขนาด	37
บทที่ 6 บทวิเคราะห์และสรุปผล	39
6.1 บทวิเคราะห์	39
6.2 บทสรุป	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	ก 1-3
ประวัติผู้วิจัย	ข 1-3

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูป	9
ตารางที่ 2.2	ตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม	11
ตารางที่ 4.1	สภาวะการทดลองฉีดขึ้นรูปและการเผาพูนีก	23
ตารางที่ 5.1	ผลวิเคราะห์ขนาดผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์	28
ตารางที่ 5.2	องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF	28
ตารางที่ 6.1	ค่าการหดตัวและค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดขึ้นงาน	41



สารบัญรูปลูกภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	กลุ่มอุตสาหกรรมเป้าหมาย กลไกขับเคลื่อนเศรษฐกิจ	1
รูปที่ 2.1	การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	5
รูปที่ 2.2	โครงสร้างจุลภาคภายหลังกการเผาพูนิก ของวัสดุเชิงประกอบพื่นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดวัสดุผง	6
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับค่าปริมาณของแข็งของส่วนผสมเม็ด สองชนิดคือเหล็กและนิเกิลอะลูมิเนียมไนด์ แสดงช่วงของค่าวิกฤติปริมาณของแข็ง ของส่วนผสมเม็ดแต่ละชนิด	7
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป	9
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ส่วนผสมเม็ดที่มีความหนาแน่นคงที่	9
รูปที่ 2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราความเครียดที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ส่วนผสมเม็ดที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งในช่วง 50-65	10
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป ตามสภาวะการทดลองในตารางที่ 2.2	11
รูปที่ 2.8	เครื่องมือฉีดขึ้นรูปผงแนวนอน (horizontal injection moulding machine)	12
รูปที่ 2.9	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป	13
รูปที่ 3.1	รายละเอียดแต่ละส่วนประกอบของเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็ก สำหรับห้องปฏิบัติการ	16
รูปที่ 3.2	รายละเอียดเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ	17
รูปที่ 3.3	แบบเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงแนวนอนขนาดเล็ก พัฒนาขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ปรับปรุงแบบโดยบริษัท ที เอ็น แมชชีนเนอร์รี่ จำกัด)	17
รูปที่ 3.4	องค์ประกอบเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (ซ้าย) และชุดควบคุม (ขวา)	18
รูปที่ 3.5	การออกแบบองค์ประกอบต่าง ๆ ของสกรูภายในห้องอัด (screw in chamber)	19
รูปที่ 3.6	รายละเอียดแม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูปวัสดุผง รูปทรง torus ซึ่งมี 4 โพรงแบบ (4 cavities)	20
รูปที่ 3.7	ส่วนประกอบของหน้าจอหลัก (main display) ควบคุมการทำงาน	21
รูปที่ 3.8	ส่วนประกอบหน้าจอกำหนดตัวแปรการฉีดขึ้นรูป (setting display)	21
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงอุณหภูมิ - เวลาในการเผาพูนิกสำหรับชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ พื่นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	24
รูปที่ 4.2	มิติของชิ้นงานรูปทรง torus	25
รูปที่ 4.3	ขั้นตอนระเบียบวิธีดำเนินงานวิจัย	26
รูปที่ 5.1	ภาพถ่ายกล้องอเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงอะลูมิเนียม และอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์	28

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.2 ชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป เตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที	29
รูปที่ 5.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป เตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที	30
รูปที่ 5.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที เปรียบเทียบที่กำลังขยาย 1000 เท่า a) 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และ b) 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	30
รูปที่ 5.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป ณ a) ขอบชิ้นงาน และ b) รอยเชื่อมต่อชน (weld line)	31
รูปที่ 5.6 ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป	32
รูปที่ 5.7 ค่าความแข็ง (Shore D) ของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป เปรียบเทียบ การเตรียมส่วนผสมเม็ดที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง (ซ้าย) และเปรียบเทียบการทดสอบ ณ ตำแหน่ง P1 – P4 (ขวา)	32
รูปที่ 5.8 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียสารยึด (% binder loss) เมื่อกำจัดสารยึด ด้วยสารละลายเฮกเซน	33
รูปที่ 5.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาผนึก เตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที	34
รูปที่ 5.10 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงาน หลังการเผาผนึกในแต่ละสภาวะการทดลอง	34
รูปที่ 5.11 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อม ผลวิเคราะห์ EDS แบบแผนที่ของชิ้นงานหลังการเผาผนึก เตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ฉีดขึ้นรูปที่ 1800 รอบต่อนาที	35
รูปที่ 5.12 ค่าความแข็งวิกเกอร์สแบบจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาผนึก	35
รูปที่ 5.13 ความหนาแน่นและความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป	36
รูปที่ 5.14 ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังการเผาผนึกในมิติต่าง ๆ คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก (D) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) และความสูง (h)	37
รูปที่ 5.15 ความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปและชิ้นงานหลังการเผาผนึก	38
รูปที่ 6.1 ขนาดความหนา (T) ของรูปทรง torus ในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผงวัสดุ	41

บทที่ 1 บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่จัดเป็น 1 ใน 10 อุตสาหกรรมเป้าหมาย ที่เป็นกลไกการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ (New engine of growth) อยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรม S-curve เดิมที่ได้รับการสนับสนุนเพื่อเพิ่มมูลค่าจากฐานอุตสาหกรรมเดิมที่เข้มแข็ง และในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมดังกล่าว นอกจากจะต้องการเทคโนโลยีด้านยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่แล้ว การพัฒนาวัสดุให้ตอบสนองต่อการใช้งานดังกล่าว เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ต้องดำเนินการให้สอดคล้องกันเพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีการผลิตจากต่างประเทศ อีกทั้งยังจำเป็นต้องสร้างบุคลากรด้านการผลิตให้มีความชำนาญเฉพาะ สามารถสร้างและพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยี มีทักษะการแก้ไขปัญหาเพื่อให้เกิดสมรรถภาพองค์รวมและเป็นกลไกหนึ่งในการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน



รูปที่ 1.1 กลุ่มอุตสาหกรรมเป้าหมาย กลไกขับเคลื่อนเศรษฐกิจ (new engine of growth) [1]

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดงานวิจัยที่สนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะและวัสดุ ที่สามารถปรับใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโลหะและวัสดุเพื่อเพิ่มขอบเขตการใช้งาน เป็นต้น การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุจำพวกเหล็กและเหล็กกล้าได้ดีเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและทนต่อสภาวะการกัดกร่อนที่สภาวะปกติได้ดีกว่า และหากเปรียบเทียบกับโลหะอะลูมิเนียมจะพบว่าวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นกว่าโลหะอะลูมิเนียม อีกทั้งมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอและมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ที่มีแนวโน้มในการพัฒนาไปสู่การผลิตยานยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (electric vehicles) มากขึ้น เพื่อลดอัตราการใช้น้ำมันที่มีราคาสูงมากในปัจจุบันรวมถึงลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การวิจัยขั้นต้น โดยความร่วมมือของสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงในระดับห้องทดลอง (lab-scaled powder injection moulding machine) ที่พัฒนาขึ้นโดยสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าสามารถผลิตวัสดุเชิงพื้นที่อะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ [2] มีความหนาแน่นประมาณ 2.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีสมบัติความแข็งที่ดีอยู่ในช่วง 166 Hv ในสภาวะภายหลังการบ่มแข็ง และพบว่ามีสมบัติทนต่อการสึกหรอที่ดีมีอัตราการสึกหรอที่ $9.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ เมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ในงานวิจัยที่ผ่านมาเน้นถึงการศึกษิตัวแปรในการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนและองค์ประกอบของวัสดุเริ่มต้น สภาวะในการกำจัดสารยึดอุณหภูมิมบรรยากาศในการเผาผนึกและสภาวะในเพิ่มความแข็งแรงด้วยการบ่มแข็งเพื่อให้สามารถผลิตขึ้นส่วนวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ดังนั้นเพื่อเป็นการขยายขอบเขตการศึกษาของโครงการวิจัยที่ผ่านมา โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็ก (small-scaled powder injection moulding machine) สำหรับการขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาวิจัยและพัฒนาการผลิตขึ้นรูปขึ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กเชิงอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพื่อศึกษาตัวแปรสำหรับการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิและความเร็วในการฉีดขึ้นรูป เป็นต้น

นอกจากนี้ การศึกษาวิจัยและพัฒนาในโครงการถือเป็นส่วนหนึ่งของศูนย์วิจัยนวัตกรรมการผลิตและรีไซเคิลโลหะ (Innovative Processing and Recycling of Metals Research Center: IPRMRC) ของสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการผลิตขึ้นรูปโลหะและวัสดุ เช่น การผลิตขึ้นส่วนขนาดเล็กสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ หรือ อาจขยายขอบเขตไปสู่อุตสาหกรรมผลิตขึ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และทางการแพทย์ รวมถึงการนำวัสดุที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ด้วย เพื่อผลักดันให้เกิดเทคโนโลยีที่มีต้นทุนต่ำขึ้นภายในประเทศ อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาบุคลากรที่มีคุณภาพทั้งในระดับปริญญาตรี และปริญญาโท - เอก ต่อประเทศในอนาคต

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.1.1 เพื่อพัฒนาเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็ก (small-scaled powder injection moulding machine) สำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบ
- 1.1.2 เพื่อศึกษาตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง เช่น อุณหภูมิและความเร็วในการฉีดขึ้นรูป สำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นที่อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ในปริมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสม โดยมีขอบเขตในการวิจัยดังนี้

- 1.2.1 ศึกษาช่วงอุณหภูมิและความดันในการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสม ดังนี้
อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป 280 – 300 องศาเซลเซียส (วัดที่ผิวนอกของผนังห้องอัด)
ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป 1600 – 1800 รอบต่อนาที
โดยกำหนดอุณหภูมิแม่พิมพ์ในการฉีดขึ้นรูปอยู่ในช่วง 80 - 90 °C

- 1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการขึ้นรูปต่อสมบัติของชิ้นงาน เช่น โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่น การหดตัว การคงขนาดชิ้นงานและสมบัติความแข็ง

1.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย (Conceptual framework)

การใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการผลิตขึ้นรูปวัสดุวิศวกรรม นอกจากจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อต้นทุนการผลิตแล้วยังส่งผลถึงคุณภาพของชิ้นงานวัสดุเป็นสำคัญ ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับขั้นตอน เทคนิคและวิธีการในกระบวนการผลิต ความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตจริงในเชิงพาณิชย์ การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรใด ๆ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปย่อมส่งผลกระทบต่อตัวแปรอื่น ๆ ด้วย จึงทำให้เกิดความแปรปรวนของคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ทำการผลิตขึ้นรูป ช่วงของอุณหภูมิและความดัน (หรือความเร็ว) ที่เหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะมีความแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของวัสดุผง สัดส่วนระหว่างวัสดุผงและสารยึดหรือเปอร์เซ็นต์ของแข็ง (% solid loading) รวมถึงอุณหภูมิแม่พิมพ์และหัวฉีด ซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลตัวของส่วนผสมเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์ และเป็นตัวกำหนดคุณภาพของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป โดยส่วนผสมเม็ด (feedstock) ที่ประกอบไปด้วยวัสดุผงและสารยึดที่เหมาะสม จะทำให้สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่ปราศจากข้อบกพร่อง (green defect) หรือเรียกได้ว่ามีความสามารถในการฉีดขึ้นรูป (moldability) ที่ดี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีกรอบแนวความคิดที่จะศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิและความเร็วในการฉีดขึ้นรูป และช่วงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เหมาะสม รวมถึงเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ใช้ในการเตรียมส่วนผสมเม็ดที่จะสามารถผลิตขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบได้ โดยเลือกศึกษาการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

งานวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการไหลตัวของส่วนผสม จากการศึกษาการฉีดขึ้นรูปโดยการเตรียมส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 52 55 และ 58 พบว่า เมื่อส่วนผสมมีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 52 จะสามารถฉีดขึ้นรูปได้ง่ายที่สุด รองลงมาคือส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 55 แต่เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแข็งเป็น 58 พบว่าได้ชิ้นงานไม่เต็มแบบ แต่เมื่อนำชิ้นงานทั้งหมดไปผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 660 ถึง 700 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 58 จะให้โครงสร้างจุลภาคที่มีความสม่ำเสมอ มีรูพรุนน้อยที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 55 ส่วนชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้เปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่ากับ 52 นั้นจะมีโครงสร้างจุลภาคที่มีปริมาณรูพรุนมากที่สุด [4] ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ 55 และใช้สารยึดที่ประกอบด้วยพาราฟินแว็กซ์ โพลีฟอสฟีน และกรดสเตียริกในการเตรียมส่วนผสมดังกล่าวซึ่งการใช้สารยึดหลายชนิด (multi-component binder) นั้นจะช่วยทำให้พฤติกรรมการไหลตัวดี สามารถกำจัดสารยึดออกได้โดยยังคงความแข็งแรงของชิ้นงานไว้ได้เนื่องจากสารยึดแต่ละชนิดนั้นมีจุดหลอมตัวที่แตกต่างกัน

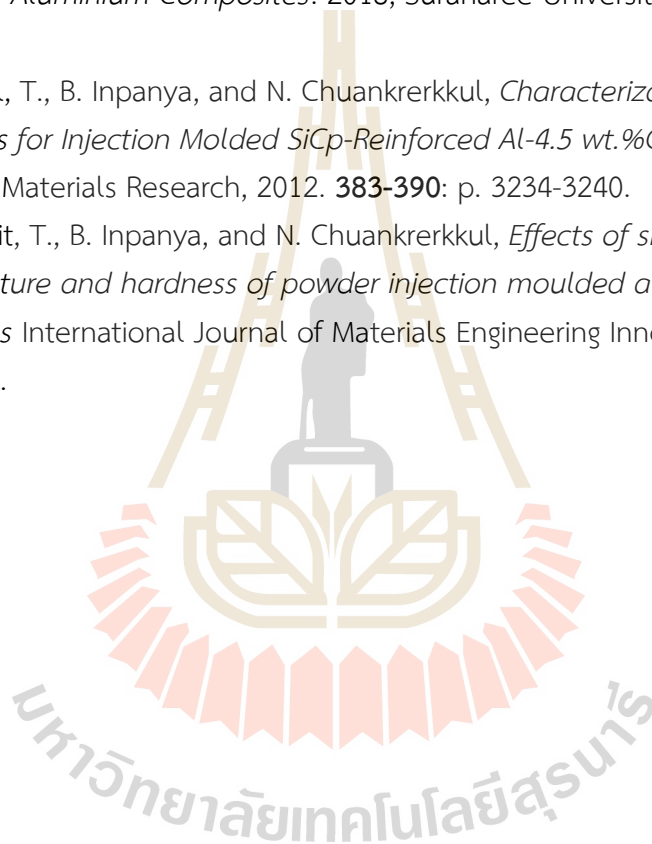
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถพัฒนาเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็ก (small-scaled powder injection moulding machine) สำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบ
- 1.4.2 ทราบตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิและความเร็วในการฉีดขึ้นรูป สำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

- 1.4.3 สามารถเผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการ ระดับชาติหรือนานาชาติ รวมถึงเผยแพร่ผลงานในการประชุมวิชาการในประเทศหรือต่างประเทศ
- 1.4.4 เพื่อผลิตบุคลากร ผู้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษา ที่มีความรู้ความสามารถทางด้านเทคโนโลยีการผลิตชิ้นรูปวัสดุผงให้กับภาคอุตสาหกรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม.
- [2] Patcharawit, T., et al., *Wear Resistance in Powder Metallurgy Silicon Carbide-Reinforced Aluminium Composites*. 2018, Suranaree University of Technology. p. 105.
- [3] Udomphol, T., B. Inpanya, and N. Chuankrerkkul, *Characterization of Feedstocks for Injection Molded SiCp-Reinforced Al-4.5 wt.%Cu Composite*. *Advanced Materials Research*, 2012. **383-390**: p. 3234-3240.
- [4] Patcharawit, T., B. Inpanya, and N. Chuankrerkkul, *Effects of sintering on microstructure and hardness of powder injection moulded aluminium composites* *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 2014. **5(2)**: p. 151-158.

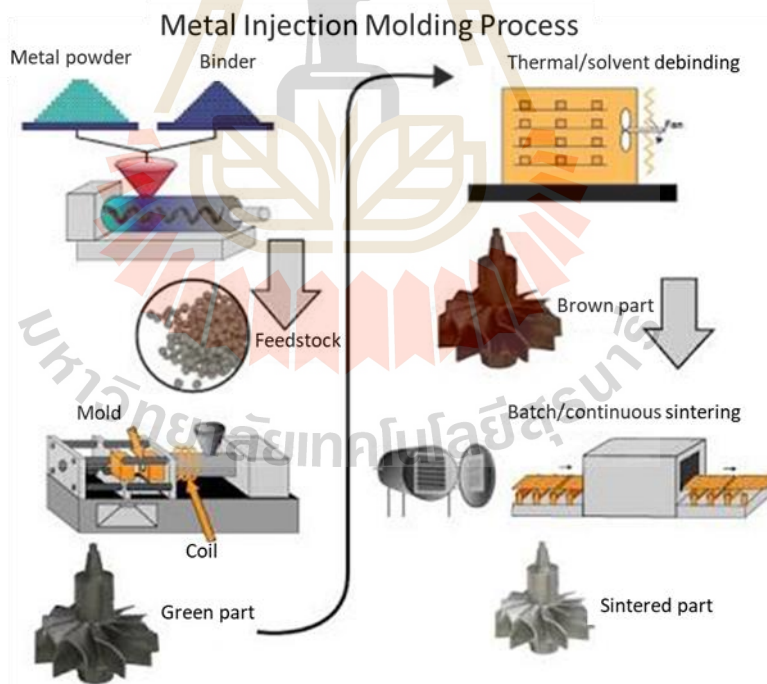


บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม

ในบทนี้ จะกล่าวถึงกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง (metal injection moulding: MIM) และตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการผลิต รวมถึงงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตชิ้นส่วนโลหะผงและวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะสำหรับการใช้งานทางวิศวกรรม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง [1, 2] เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความนิยมโดยมีการดัดแปลงและพัฒนาจากการฉีดเม็ดพลาสติก ซึ่งเหมาะกับการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กที่มีรูปร่างซับซ้อน ต้องการผลิตในปริมาณมากและชิ้นงานมีราคาสูง แต่การฉีดขึ้นรูปโลหะผงนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของรูปทรง การสึกหรอของแม่พิมพ์และอุปกรณ์การขึ้นรูป เนื่องจากธรรมชาติของโลหะที่มีความแข็งสูงและต้องใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปสูงกว่าการขึ้นรูปเม็ดพลาสติก ในการฉีดขึ้นรูปโลหะผงจะมีความแตกต่างไปจากกระบวนการโลหวิทยาโลหะผงเล็กน้อย คือ มีการใช้ปริมาณของสารยึดที่มากกว่า โดยใช้อุณหภูมิฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมเพื่อให้สารยึดเกิดการไหลตัวที่ดีและนำเอาผงโลหะหรือผงวัสดุเข้าสู่โพรงแบบได้ง่ายขึ้น แต่สามารถใช้แรงดันในการฉีดขึ้นรูปที่ต่ำกว่าการอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการโลหวิทยาโลหะผงแบบดั้งเดิม เช่น การขึ้นรูปโลหะผงโดยใช้แรงอัด (powder compaction) โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงโลหะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



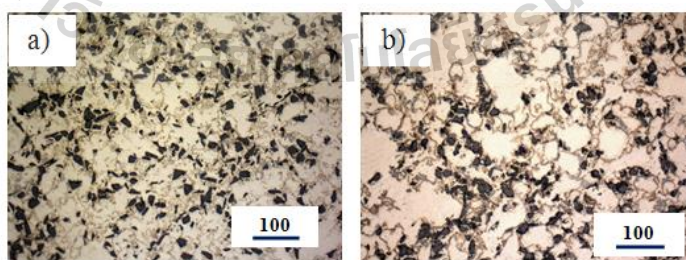
รูปที่ 2.1 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (powder injection molding) (<https://www.mpif.org>)

- การผสมผงโลหะ (powder mixing) สามารถทำได้ในสถานะผสม เช่น หม้ออบเพื่อให้ผงโลหะหรือผงวัสดุเข้ากันได้ดี ตามอัตราส่วนผสมที่ต้องการ
- การผสมสารยึดเพื่อเตรียมส่วนผสมเม็ด (feedstock preparation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการใช้สารยึดที่ดีและในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานมี

ความสามารถในการอัดตัวของผงสูง (high compaction) และก่อให้เกิดการไหลตัวที่ดี (good flowability)

- การฉีดขึ้นรูป (*Injection moulding*) จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำให้สารยึดค้อย ๆ สร้างความแข็งแรงให้กับชิ้นงานระหว่างการผลิตขึ้นรูป
- การกำจัดสารยึด (*debinding*) ซึ่งประกอบด้วยการกำจัดสารยึดใช้สารละลาย เพื่อชะเอาสารยึดบางชนิดออกก่อนทำการกำจัดสารยึดโดยใช้ความร้อน ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และระยะเวลาที่เหมาะสม โดยจะทำให้สารยึดค้อย ๆ เสื่อมสภาพไปเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงพอและไม่ทำให้เกิดการบวมพอง
- การเผาผนึก (*sintering*) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความหนาแน่นเริ่มต้น (*initial density*) ชนิดและขนาดของผงวัสดุ บรรยากาศ อุณหภูมิ ระยะเวลาและอัตราการให้ความร้อนในการเผาผนึก

จากผลงานวิจัยของ T. Patcharawit และคณะ [3] ที่ผ่านมา ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม (ทองแดง 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 18.9 ไมครอน ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงพบว่า การผสมผงวัสดุด้วยหม้ออบสำหรับการฉีดขึ้นรูปผงและการเผาผนึกในช่วงอุณหภูมิ 660-700 องศาเซลเซียส สามารถทำได้ โครงสร้างวัสดุเชิงประกอบภายหลังการเผาผนึก มีการกระจายของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์อย่างความสม่ำเสมอในโลหะพื้นอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 a) - b) โดยวัสดุเชิงประกอบที่ได้มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยประมาณ 78 - 82 H_v นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ทำให้ต้องเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จาก 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรไปเป็น 40 % โดยปริมาตร ต้องเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นในการเผาผนึกจาก 660 องศาเซลเซียส ไปเป็น 780 องศาเซลเซียส เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อชิ้นงานมีปริมาณของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มากขึ้นจะเกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่รอยต่อระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยตัวเอง เป็นผลทำให้การแพร่เกิดได้ยากมากขึ้น อนุภาคที่ทำ การเผาผนึก และยังพบว่าเกิดการหลุดออกของกลุ่มอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคภายหลังการเผาผนึก ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดวัสดุผง [3]

2.2 ตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบนอกจากจะขึ้นอยู่กับ การเลือกสรรวัสดุเริ่มต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีการขึ้นรูปเป็นสำคัญซึ่งจำเป็นต้องทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรงอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้นโลหะอะลูมิเนียม สมบัติของส่วนผสมเม็ด นั้นมี

ความสำคัญมากที่จะกำหนดพฤติกรรมการไหลตัวของส่วนผสมในระหว่างเคลื่อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์ ตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญได้แก่

2.2.1 อัตราส่วนระหว่างผงวัสดุและสารยึด

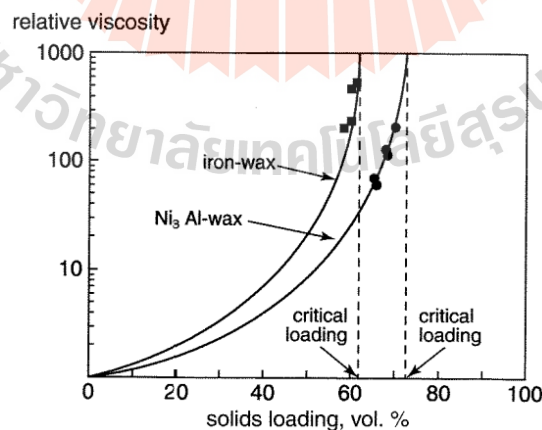
อัตราส่วนระหว่างผงวัสดุและสารยึด เรียกว่า ค่าปริมาณของแข็ง (solid loading, Φ) สามารถหาค่าได้จากสมการ 2.1 หรืออาจเรียกในอีกรูปแบบคือค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็ง (% solid loading)

$$\Phi = \frac{\frac{W_P}{\rho_P}}{\frac{W_P}{\rho_P} + \frac{W_B}{\rho_B}} \quad \text{สมการ 2.1}$$

โดยที่ W_P และ W_B คือ น้ำหนักของผงวัสดุและสารยึด ส่วน ρ_P และ ρ_B คือความหนาแน่นของผงวัสดุและสารยึด ตามลำดับ ค่าปริมาณของแข็งที่เหมาะสมนั้นควรน้อยกว่าค่าวิกฤติ (critical solid loading) เพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.3 [4] เพื่อที่จะทำให้เกิดการอัดแน่นของอนุภาคหรือผงวัสดุให้ได้มากที่สุด แต่ไม่ควรที่จะมากเกินไปที่จะทำให้เกิดความหนืดที่สูงเกินไป โดยเราสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของส่วนผสม (mixture density, ρ_M) ได้จากสมการที่ 2.2

$$\rho_M = \Phi\rho_P + (1-\Phi)\rho_B \quad \text{สมการ 2.2}$$

โดยทั่วไปแล้ว ค่าความหนาแน่นของส่วนผสมจะมีค่าที่น้อยกว่าค่าทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณในสมการ 2.2 เนื่องจากโดยปกติชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปมักปรากฏรูพรุนอยู่ในชิ้นงาน อย่างไรก็ตามก็ตีค่าความหนาแน่นของส่วนผสมนี้เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดค่าความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก ชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปที่มีค่าความหนาแน่นของส่วนผสมสูงมักจะให้ค่าความหนาแน่นหลังการเผาผนึกที่สูงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากมีจุดสัมผัสบริเวณรอยต่อของผงวัสดุที่มากกว่าซึ่งเอื้ออำนวยให้เกิดการแพร่ของอะตอมระหว่างการเผาผนึกได้ดีกว่านั่นเอง



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับค่าปริมาณของแข็งของส่วนผสมเม็ดสองชนิด คือเหล็กและนิเกิลอะลูมิเนียม แสดงช่วงของค่าวิกฤติปริมาณของแข็งของส่วนผสมเม็ดแต่ละชนิด [4]

2.2.2 สมบัติการไหลตัว (Rheology)

ความสามารถในการเติมเต็มแม่พิมพ์ในระหว่างการฉีดขึ้นรูปนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติความหนืด (viscosity, η) ของส่วนผสมซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเค้นเฉือน (shear stress, τ) และค่าความเครียดเฉือน (shear strain, γ) รวมถึงค่าอีลาสติกของผงโลหะ ดังนั้น ส่วนผสมเม็ดจะแสดงพฤติกรรมร่วมระหว่างความหนืดและอีลาสติก เรียกว่าพฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) โดยส่วนผสมเม็ดที่มีความหนืดจะไหลด้วยแรงเฉือน และความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและความเค้นเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3

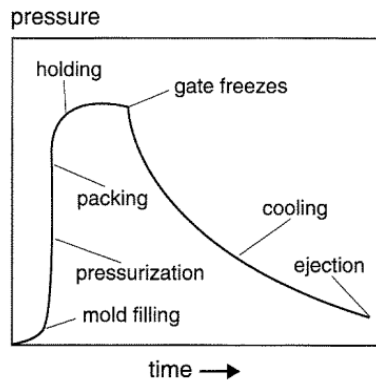
$$\tau = \eta \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^m \quad \text{สมการ 2.3}$$

โดยทั่วไปแล้วค่าความหนืดของส่วนผสมเม็ดยิ่งขึ้นขึ้นอยู่กับอัตราความเครียดเฉือน ($d\tau/dt$) รวมถึงอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วย โดยจะถูกกำหนดด้วยชนิด (จุดหลอมตัว) และปริมาณของสารยึด ส่วน m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่บอกคุณลักษณะการไหล จากสมการจะพบว่า ค่าความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดเฉือนเนื่องจากการเกิด shear thinning [4]

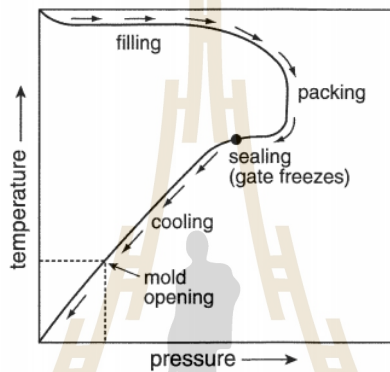
2.2.3 อุณหภูมิและความดันในการฉีดขึ้นรูป

อุณหภูมิและความดันในการฉีดขึ้นรูปเป็นปัจจัยสำคัญที่จะกำหนดพฤติกรรมการไหลตัวของส่วนผสมเข้าสู่แม่พิมพ์ ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ใช้เตรียมส่วนผสมและชนิดของสารยึด โดยสามารถกำหนดได้โดยการวิเคราะห์ทาง thermo-physical analysis เช่น ด้วยเครื่องมือ DSC (differential scanning calorimeter) เพื่อทำการตรวจสอบจุดหลอมตัวของสารยึดที่ใช้แต่ละชนิด [5] โดยอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปควรมากกว่าจุดหลอมตัวของสารยึดเพื่อให้ส่วนผสมเม็ดมีพฤติกรรมการไหลตัวที่เหมาะสม หากอุณหภูมิฉีดขึ้นรูปต่ำเกินไปส่วนผสมเม็ดจะมีความหนืดสูง และหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจจะทำให้ส่วนผสมเม็ดมีความหนืดต่ำมากเกินไป เกิดการแยกชั้น และไม่อาจพาเอาผงวัสดุเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ รวมถึงอาจเกิดการไหม้ของสารยึดบางชนิดได้

รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาระหว่างการฉีดขึ้นรูป ซึ่งจะเห็นได้ว่าความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่ส่วนผสมเม็ดเคลื่อนที่เข้าสู่โพรงแบบ (mould cavity) และมีค่าสูงสุดเมื่อส่วนผสมที่บริเวณทางเข้าแม่พิมพ์เกิดการแข็งตัว (gate freezes) จากนั้นเมื่อส่วนผสมเกิดการเย็นตัวก็จะส่งผลให้ความดันภายใน (cavity pressure) ลดลงเนื่องจากเกิดการหดตัว และมีความดันต่ำสุดเมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ความดันที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปนั้นจะทำให้เกิดการเติมเต็มที่สมบูรณ์ในโพรงแบบ (complete mould filling) รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเติมเต็มเกิดขึ้นเมื่อส่วนผสมได้รับความร้อนและความดันพร้อมกันจนถึงจุดที่ส่วนผสมที่บริเวณทางเข้าแม่พิมพ์เกิดการแข็งตัว จากนั้นระดับอุณหภูมิและความดันจะลดลงระหว่างส่วนผสมเกิดการเย็นตัว (cooling) เข้าสู่ในช่วงสุดท้ายคือการเปิดแม่พิมพ์ออก (mould opening) ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป [4]



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป [4]



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ส่วนผสมเม็ดที่มีความหนาแน่นคงที่ [4]

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูป [4]

Parameter	Typical range
Barrel temperature, °C	100 to 200
Nozzle temperature, °C	80 to 200
Mold temperature, °C	20 to 100
Screw rotation speed, rpm	35 to 70
Peak injection pressure, MPa	0.1 to 130
Packing pressure, MPa	0 to 10
Fill time, s	0.2 to 3
Packing time, s	2 to 60
Cooling time, s	18 to 45
Cycle time, s	8 to 360

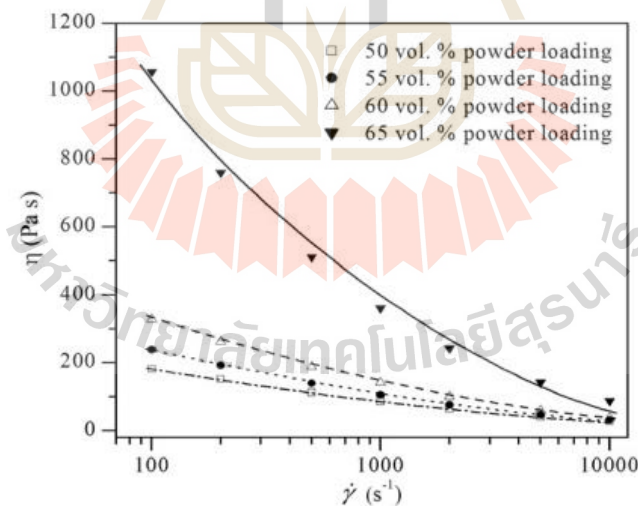
2.3 การศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปต่อสมบัติของวัสดุ

การฉีดขึ้นรูปผงนั้นถูกนำมาศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายสำหรับการขึ้นรูปวัสดุเซรามิกและโลหะ แต่สำหรับการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบนั้นยังมีการศึกษาวิจัยกันอยู่ค่อนข้างจำกัด ทั้งนี้เนื่องจาก

ลักษณะเฉพาะของวัสดุพื้นโลหะและวัสดุเสริมแรงที่เป็นเซรามิกมีความแตกต่างกัน จึงทำให้พฤติกรรมทางด้านความร้อนและเชิงกลที่ค่อนข้างแตกต่างกันออกไป

การศึกษาตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปของผงโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม [2] โดยศึกษาผลกระทบของการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแข็งในช่วง 60 - 72 ต่อสมบัติความเหนียวและสมบัติเชิงกลอื่น ๆ พบว่า การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแข็งทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นและทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน แต่หากมีเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่น้อยเกินไปก็จะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถทรงตัวได้ (compact slumping) ผลการทดสอบสมบัติด้านความหนาแน่น ความแข็งและสมบัติแรงดึงพบว่าชิ้นงานที่มีสมบัติที่ดีที่สุดได้จากการเตรียมส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ดี จากผลการวิจัยได้สรุปว่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ดีที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ควรมีค่าเท่ากับ 68 เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ง่ายควบคุมขนาดดีและมีสมบัติเชิงกลที่ต้องการ

งานวิจัยโดย M.E. Sotomayor และคณะ [6] ได้ศึกษาอิทธิพลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่อสมบัติการไหลตัวของส่วนผสมเม็ดของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L พบว่า ที่เปอร์เซ็นต์ของแข็งสูง เช่นที่ 65 จะเกิดแรงบิด (torque) สูงขึ้นมากเมื่อขนาดของอนุภาคหรือผงลดลงเนื่องจากเกิดความฝืด (friction) ขึ้นระหว่างอนุภาค แต่หากใช้เปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ไม่สูงมากนัก อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อพฤติกรรมการไหลตัวจะส่งผลไม่มาก นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแข็งจะทำให้ส่วนผสมเม็ดมีพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับค่าความหนืดมากขึ้นด้วยที่อัตราความเครียดต่ำ ๆ ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอัตราความเครียดของส่วนผสมเม็ดที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งระหว่าง 50 - 65



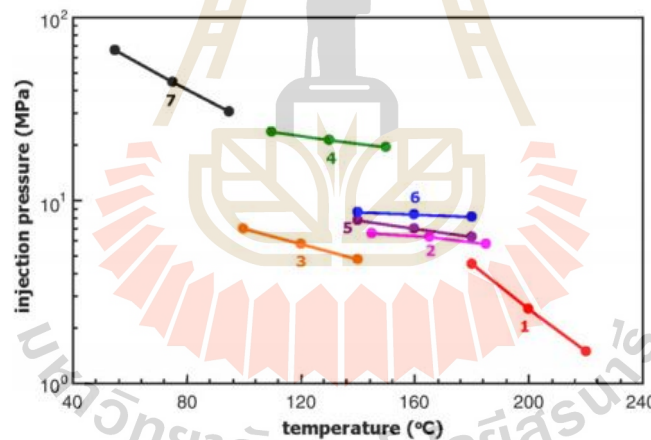
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราความเครียดที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ส่วนผสมเม็ดที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งในช่วง 50-65 [6]

นอกจากนี้ งานวิจัยของ S. Ahn และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของผงโลหะและสารยึดต่อสมบัติของวัสดุและตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของผงเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม โดยพบว่า ตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่เกี่ยวข้องกับความดัน (pressure-related parameters) เช่น ค่าความเค้นเฉือน แรงดันการฉีดขึ้นรูป (injection pressure) และแรงจับแม่พิมพ์ (clamping force) นั้นได้รับอิทธิพลอย่างมากจากสารยึดที่เลือกใช้ ส่วนตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่เกี่ยวข้องกับ

อุณหภูมิ (temperature-related parameters) เช่น ความแตกต่างของอุณหภูมิ ณ หน้าโลหะหลอม (melt front) และระยะเวลาในการเย็นตัว (cooling time) นั้นก็ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้สารยึดมากกว่า การเลือกใช้ผงโลหะ นอกจากนี้ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ตัวแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่เกี่ยวข้องกับ ค่าความหนืด (viscosity-related parameters) เช่น อัตราความเครียดสูงสุด รวมถึงการเลือกใช้สารยึด และผงโลหะ นั้นล้วนมีความสำคัญต่อการควบคุมสมบัติของชิ้นงาน ตารางที่ 2.2 แสดงถึงตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนรูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิฉีดขึ้นรูป ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปจะสามารถใช้ความดันในการฉีดขึ้นรูปลดลง

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม [7]

Feedstock ID	1	2	3	4	5	6	7
Filling time (s)				1.0			
Switch-over point (%)				98			
Injection temperature (°C)	180	145	100	110	140	140	55
	200	165	120	130	160	160	75
	220	185	140	150	180	180	95
Mold-wall temperature (°C)	70	60	40	45	55	55	20

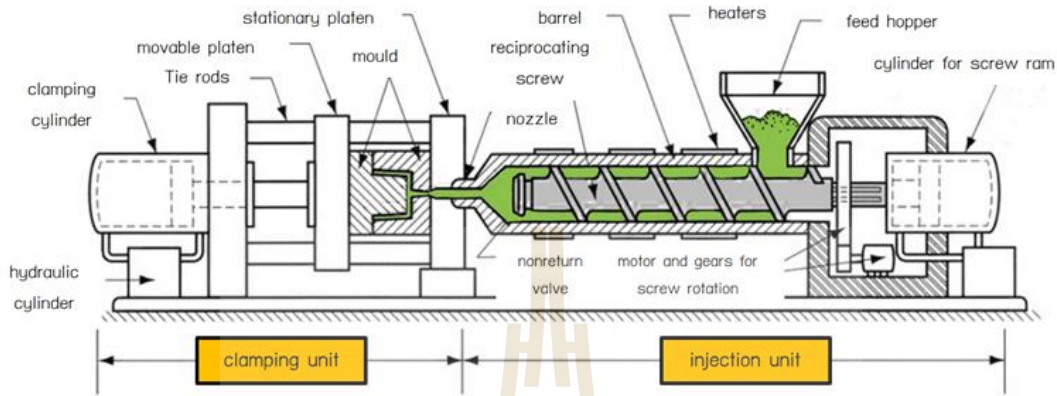


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป ตามสภาวะการทดลองใน ตารางที่ 2.2 [7]

งานวิจัยจำนวนน้อยที่ได้ทำการศึกษาศักยภาพในการฉีดขึ้นรูปต่อสมบัติของ ส่วนผสมเม็ด สำหรับ วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม งานวิจัยของ Z.Y.Liu และคณะ [1] ได้ศึกษาการฉีดขึ้นรูปของวัสดุเชิง ประกอบพื้นอะลูมิเนียมเกรด AA6061 เสริมแรงด้วยอะลูมิเนียมไนไตรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ เต็มติบูก 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปที่ 165 องศาเซลเซียส และความดัน 30 MPa พบว่า สามารถขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดี โดยสามารถให้ค่าความหนาแน่น ทางทฤษฎี (theoretical density) สูงถึง 97 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังจากเผาพูนที่อุณหภูมิ 640 องศา เซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงในบรรยากาศไนโตรเจน ชิ้นงานที่ได้มีค่าความแข็งสูงถึง 82 HRH มีค่า ความแข็งแรงดึงอยู่ที่ 184 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 6.6

2.4 เครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (Powder injection moulding machine)

เครื่องมือฉีดขึ้นรูปผงโลหะและวัสดุโดยทั่วไปถูกพัฒนามาจากเครื่องมือฉีดขึ้นรูปพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [4] ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ชุดเครื่องมือฉีด (injection unit) และชุดเครื่องมือแม่พิมพ์ (mould clamping unit) ในแต่ละส่วนมีองค์ประกอบย่อยดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 เครื่องมือฉีดขึ้นรูปผงแนวนอน (horizontal injection moulding machine) [4]

ส่วนของชุดเครื่องมือฉีดขึ้นรูป ประกอบไปด้วย

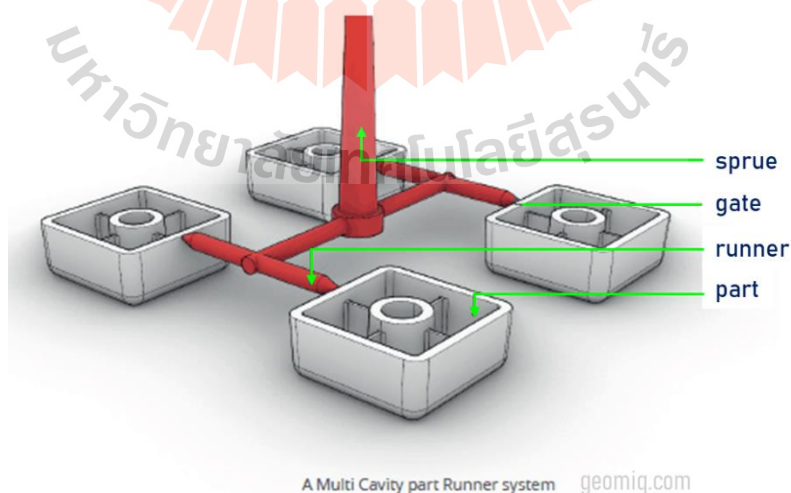
- **กรวยเติม (hopper)** ซึ่งใช้บรรจุส่วนผสมเม็ดป้อนเข้าสู่กระบอกลูกฉีด โดยติดตั้งอยู่ตรงส่วนต้นของกระบอกลูกฉีด
- **กระบอกลูกฉีด (barrel)** ทำจากวัสดุที่แข็งแรงถูกห่อหุ้มด้วยแผงให้ความร้อน (heating jacket) เพื่อให้อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูป ทำให้ส่วนผสมเม็ดหลอมตัว และสร้างแรงดันขับไปด้านหน้าด้วยสกรูที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกลูกฉีดและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ (driven motor) ส่วนปลายของกระบอกลูกฉีดจะต่อเข้ากับหัวฉีด
- **สกรู (screw)** เป็นตัวขับเคลื่อนส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวเข้าสู่ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปผง โดยสกรูแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ feeding zone, transition zone และ metering zone นอกจากนี้ การออกแบบลักษณะของเกลียวสกรู (screw thread) จะก่อให้เกิดอัตราแรงอัด (compression ratio) ที่เหมาะสมทำให้ส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวถูกอัดป้อนไปด้านหน้าสู่ปลายกระบอกลูกฉีด สามารถเคลื่อนที่ถอยหลังและดันกลับในช่วงจังหวะการฉีดขึ้นรูปผงโลหะ ส่วนปลายสกรู (screw tip) อยู่ในตำแหน่งที่ประกบเข้ากับหัวฉีด โดยปลายสกรูยังประกอบไปด้วย retainer, check ring และ rear seat ช่วยในการปรับตั้งปริมาณการฉีดหรือระยะการฉีด (shot size) ที่เหมาะสม
- **หัวฉีด (nozzle)** เป็นส่วนต่อปลายกระบอกลูกฉีดเข้ากับช่องทางไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ หัวฉีดมีรูขนาดเล็ก เพื่อให้ส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่โพรงแบบด้วยความรวดเร็ว

และในส่วนของคุณเครื่องมือแม่พิมพ์ ประกอบไปด้วย

- **แม่พิมพ์ (mould)** ถูกออกแบบให้มีช่องว่างด้านในตามรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตแต่มีขนาดที่ใหญ่กว่าเนื่องจากต้องเผื่อการหดตัวจากการฉีกขึ้นรูปและการเผาผนึก แม่พิมพ์โดยทั่วไปมักออกแบบให้มี 2 ชั้น ประกอบกันที่รอยต่อ (parting line) เพื่อให้สะดวกต่อการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ นอกจากนี้ มีองค์ประกอบด้านในคือ ทางเข้าแม่พิมพ์ เรียกว่าสปรู (sprue) ทางวิ่ง (runner) ทางเข้า (gate) ช่องทางออกก๊าซ (vent)
- **ชุดอุปกรณ์หนีบยึดแม่พิมพ์ (clamping unit)** มีกลไกขับเคลื่อนด้วยกำลังไฮดรอลิกเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของ moving platen สำหรับเปิดและปิดฝาแม่พิมพ์ โดยถูกวางแนวกำหนดตำแหน่งไว้ด้วย tie rod นอกจากนี้ ยังมีส่วนของอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ ก่อนฉีด และอุปกรณ์ทำความสะอาดเพื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ เพื่อทำให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวก่อนถอดออกจากแม่พิมพ์

2.5 การออกแบบแม่พิมพ์เพื่อการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (mould design consideration)

แม่พิมพ์ที่ออกแบบที่ได้เหมาะสม จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบแม่พิมพ์ เช่น การวางตำแหน่งของทางเข้าโพรงแบบ (gate) ควรต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก เพราะจะมีผลต่อเส้นทางการวิ่งเข้าของเนื้อโลหะเข้าสู่โพรงแบบ (cavity) ซึ่งโดยปกติเมื่อทำการฉีดผงโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์ผ่านทางสปรู (sprue) ทางวิ่ง (runner) และวิ่งเข้าสู่โพรงแบบโดยผ่านทางเข้า (gate) เพื่อกระจายเนื้อโลหะเข้าสู่โพรงแบบในเวลาเดียวกันและภายใต้แรงดันเดียวกันขนาดของทางวิ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานแบบของแม่พิมพ์และชนิดของผงวัสดุ ทางวิ่งจะมีผลต่อปริมาณเศษเนื้อวัสดุที่เกิดจากการผลิต และเวลาในการเย็นตัวถ้าหน้าตัดของทางวิ่งมีขนาดใหญ่เกินไปไม่เหมาะสมกับขนาดชิ้นงานจะทำให้เกิดการลื่นเป็ลืองและเป็นเศษเหลือจำนวนมากในการผลิต รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป

อย่างไรก็ดี ในการออกแบบแม่พิมพ์จำเป็นต้องเผื่อขนาดชิ้นงานเนื่องจากการหดตัวภายหลังการฉีดขึ้นรูปและการเผาผนึก หรือเรียกว่าค่าตัวประกอบการออกแบบเผื่อขนาดชิ้นงาน หรือ oversize

design factor (Z factor) หรือค่าการขยายตัวของช่องว่างในชิ้นงาน (tool cavity expansion factor) ซึ่งคำนวณได้จากค่าการหดตัวของชิ้นงาน (shrinkage, δ) ดังสมการ 2.4 – 2.7 [4, 9]

$$\delta = \frac{L_0 - L}{L_0} \quad \text{สมการ 2.4}$$

โดยที่ L_0 คือ ความยาวชิ้นงานก่อนเผา
 L คือ ความยาวชิ้นงานหลังเผา

$$Z = \frac{L}{L_0} \quad \text{สมการ 2.5}$$

ซึ่ง Z factor สามารถคำนวณได้จากการหดตัวดังนี้

$$Z = \frac{1}{1 - \delta} \quad \text{สมการ 2.6}$$

ดังนั้นจึงสามารถนำค่า Z factor มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าความยาวหรือขนาดเริ่มต้นของชิ้นงานที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ดังสมการ 2.7

$$L_0 = Z \times L \quad \text{สมการ 2.7}$$

การฉีดขึ้นรูปผงโลหะและวัสดุนั้นถือเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญที่สุด เนื่องจากการแปรสภาพส่วนผสมเม็ดให้เป็นรูปทรงชิ้นงานตามต้องการ โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการฉีดขึ้นรูปผง เช่น อุณหภูมิและความเร็วการฉีดขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เป็นต้น โดยตัวแปรที่กล่าวมานี้ล้วนส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลตัวของส่วนผสมเม็ดเมื่อถูกให้อุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้สารยึดหลอมตัวและนำพาเอาผงโลหะและวัสดุไหลเข้าสู่โพรงแบบในแม่พิมพ์

อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูป (moulding temperature) และความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (moulding speed) มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดพฤติกรรมการไหลตัวของส่วนผสมเม็ดที่อยู่ในสถานะหนืด หากอุณหภูมิและความเร็วที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปผงนั้นต่ำเกินไป ก็จะส่งผลให้ส่วนผสมเม็ดมีความหนืด (viscosity) สูงเกินไป ทำให้ไหลเข้าสู่โพรงแบบได้ยาก อาจก่อให้เกิดตำหนิ เช่น ฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ (short shot) และรอยเชื่อมต่อชน (weld line) เป็นต้น แต่หากอุณหภูมิและความเร็วในการฉีดขึ้นรูปที่สูงเกินไป จะส่งผลทำให้ส่วนผสมเม็ดมีความหนืดต่ำเกินไป อาจทำให้เกิดการแยกตัวของสารยึดออกจากผงโลหะ (binder separation) ทำให้ฉีดขึ้นรูปได้ชิ้นงานที่มีความแน่นตัวไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน และอาจทำให้เกิดปัญหาครีป (flash) เป็นต้น

โครงการวิจัยที่ผ่านมา [3, 8] สามารถขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้เป็นชิ้นงานขนาดเล็ก โดยเตรียมส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 52 - 58 ใช้ อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปที่ 190 องศาเซลเซียส และแรงดันเท่ากับ 45 MPa ชิ้นงานภายหลังการเผาเหนืกที่ 660-700 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 78-82 H_v อย่างไรก็ดี คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นใกล้เคียงกับชิ้นงานในอุตสาหกรรม โดยจะดำเนินการพัฒนาเครื่องมือฉีดขึ้นรูปจากต้นแบบเดิมที่ถูกสร้างขึ้นที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรในการขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิและแรงดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป

อุณหภูมิแม่พิมพ์ และการออกแบบแม่พิมพ์ต่อความสามารถในการฉีดขึ้นรูป รวมถึงโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ หรือพัฒนาสำหรับการฉีดขึ้นรูปโลหะและวัสดุอื่น ๆ เพื่อที่จะสามารถนำไปขยายผลต่อยอดถึงความเป็นไปได้ในการผลิตในขั้นอุตสาหกรรม เช่น ในการผลิต ชิ้นส่วนขนาดเล็กในอุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ และทางการแพทย์ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

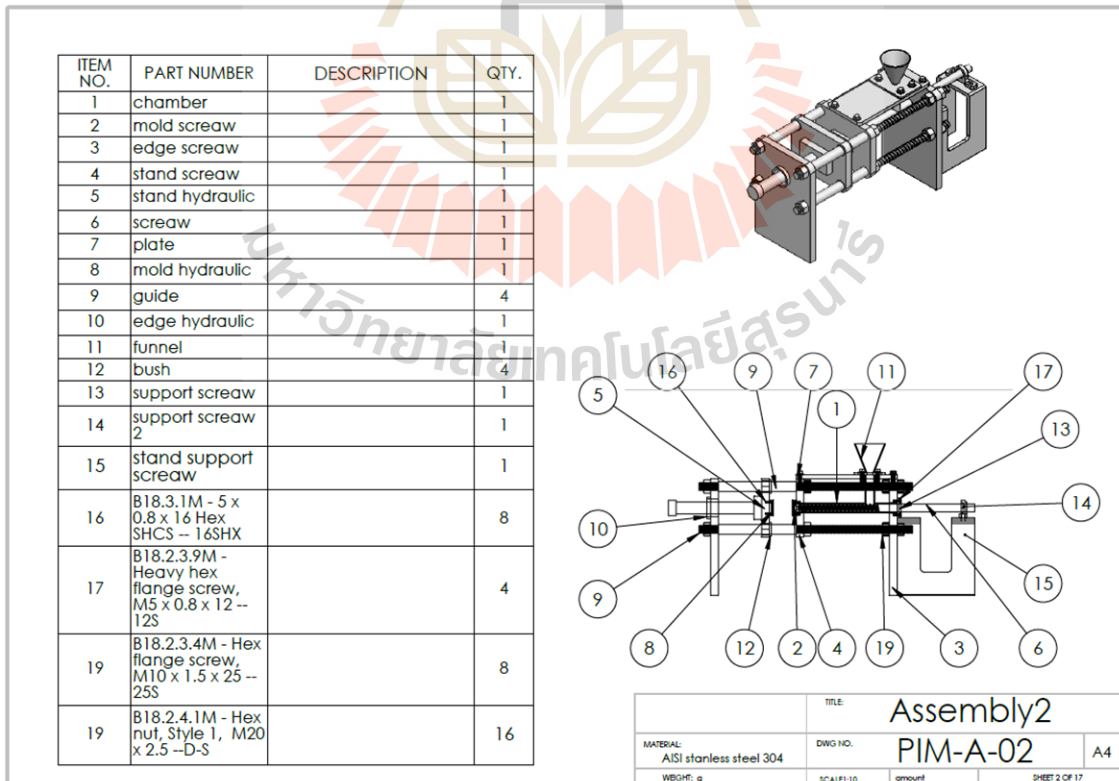
- [1] Liu, Z.Y., D. Kent, and G.B. Schaffer, Powder injection moulding of an Al-AlN metal matrix composite. *Materials Science and Engineering: A*, 2009. 513-514: p. 352-356.
- [2] Loh, N.H., S.B. Tor, and K.A. Khor, Production of metal matrix composite part by powder injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001. 108(3): p. 398-407.
- [3] Patcharawit, T., B. Inpanya, and N. Chuankrerkkul. Silicon Carbide-Reinforced Aluminum Matrix Composite Fabricated by Powder Injection Molding. in *The 2nd International Conference on Process Engineering and Advanced Materials (ICPEAM2012)*. June 2012. Kuala Lumpur, Malaysia.
- [4] German, R.M. and A. Bose, *Injection molding of metals and ceramics*. 1 ed. Vol. 1. 1997: Metal Powder Industries Federation. 413.
- [5] Mohsin, I.U., *Kinetic modeling of thermal debinding & sintering in MIM process*. 2011, Lambert academic publishing.
- [6] Sotomayor, M.E., A. Várez, and B. Levenfeld, Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316L powder injection moulding feedstocks. *Powder Technology*, 2010. 200(1-2): p. 30-36.
- [7] Ahn, S., et al., Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process. *Powder Technology*, 2009. 193(2): p. 162-169.
- [8] Patcharawit, T., et al., Powder Injection Molding of 20-40 Vol.% Silicon Carbide Particulate-Reinforced Aluminum Composites. *Applied Mechanics and Materials*, 2013. 376: p. 17-22.
- [9] Heaney, D.F. (2012) *Handbook of metal injection molding*, Woodland Publishing Limited, USA, ISBN: 978-0-85709-066-9.

บทที่ 3 การสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

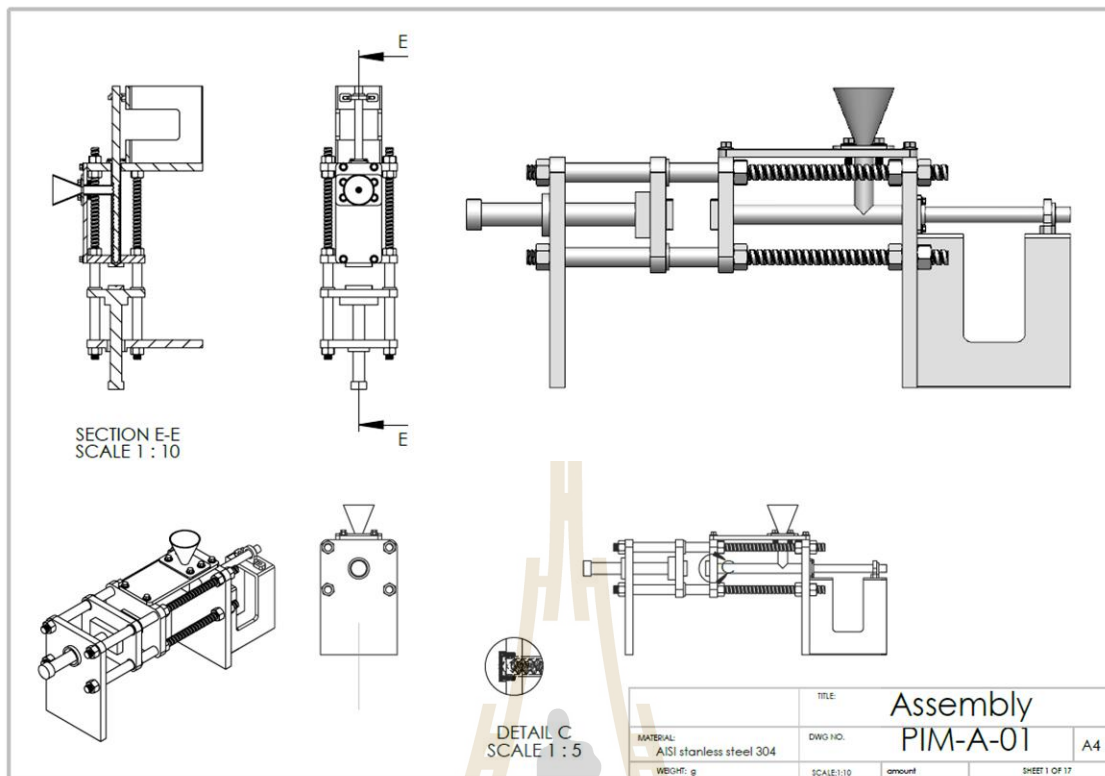
ในบทนี้ นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและการสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงแนวอนขนาดเล็กสำหรับใช้วิจัยในห้องปฏิบัติการ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยการผลิตชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีขนาดเล็กและรูปทรงซับซ้อนและสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การออกแบบเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ

เครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก ขับเคลื่อนด้วยสกรูและมอเตอร์ในแนวอน เหมาะสำหรับการทดลองใช้งานในห้องปฏิบัติการ ถูกพัฒนาขึ้นมาจากเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดใหญ่ที่ถูกพัฒนาขึ้น ณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ฉีดขึ้นรูปในแนวตั้งโดยใช้หัวอัดแบบ plunger อัดส่วนผสมเม็ดในกระบอกอัดลงสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงอัดระบบนิวเมติก (pneumatic) จากปั๊มลม โดยเครื่องมือฉีดขึ้นรูปที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่นี้ได้ปรับเปลี่ยนให้เป็นเครื่องมือฉีดขึ้นรูปในแนวอนโดยใช้หัวอัดแบบสกรูเพื่ออัดส่วนผสมเม็ดในกระบอกอัดหรือห้องอัด ผ่านเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยมอเตอร์สายพานที่สามารถปรับระดับความเร็วได้ นอกจากนี้แม่พิมพ์ได้ถูกออกแบบให้มี 2 ด้านประกบกัน โดยด้านหนึ่งอยู่กับที่และยึดติดกับหัวฉีด (nozzle) ส่วนอีกด้านหนึ่งติดกับแผ่นโลหะเคลื่อนที่เข้า-ออก เมื่อประกบและถอดแม่พิมพ์ออกภายหลังฉีดขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อย รายละเอียดส่วนประกอบของเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประกอบไปด้วยห้องอัด (chamber) สกรูชุดแม่พิมพ์ (mould screw) ชุดไฮดรอลิก (hydraulic) แผ่นประกบ (plate) ชุดขาตั้ง (stand support) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1- 3.2



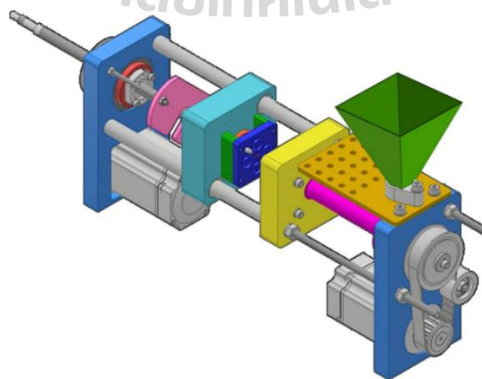
รูปที่ 3.1 รายละเอียดแต่ละส่วนประกอบของเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ



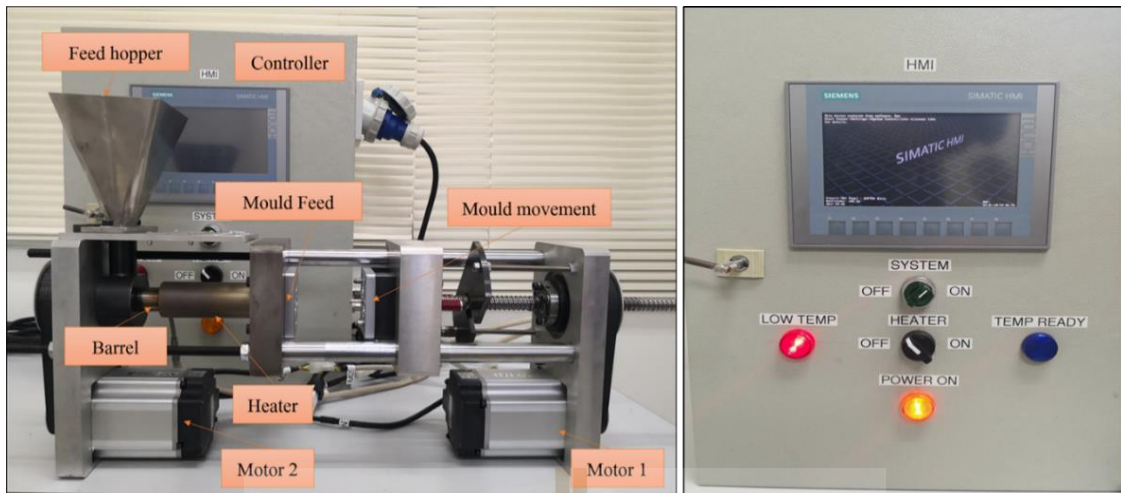
รูปที่ 3.2 รายละเอียดเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ

3.2 การสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ

ในส่วนของการสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปนั้น ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงแบบให้สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนสกรูผ่านหน้าจอสถงผล โดยที่ตัวเครื่องมือประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นห้องอัด (ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ 2) และส่วนที่เป็นชุดแม่พิมพ์ (ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ 1) ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงภาพเขียนแบบเครื่องมือประกอบไปด้วยห้องอัด (chamber) สกรูขับภายในห้องอัด (mold screw) แผ่นโลหะ (plate) แม่พิมพ์ (mould) ส่วนรูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือฉีดขึ้นรูปที่ถูกสร้างขึ้นพร้อมชุดควบคุมการทำงาน (controller) ภายในมีหน้าจอสถงผล ซึ่งประกอบด้วยหน้าจอสถงผลหลัก (main display) และหน้าจอกำหนดตัวแปรการฉีดขึ้นรูป (setting display)



รูปที่ 3.3 แบบเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงแวนอนขนาดเล็ก พัฒนาขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ปรับปรุงแบบโดยบริษัท ที เอ็น แมชชีนเนอร์รี่ จำกัด)



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (ซ้าย) และชุดควบคุม (ขวา)

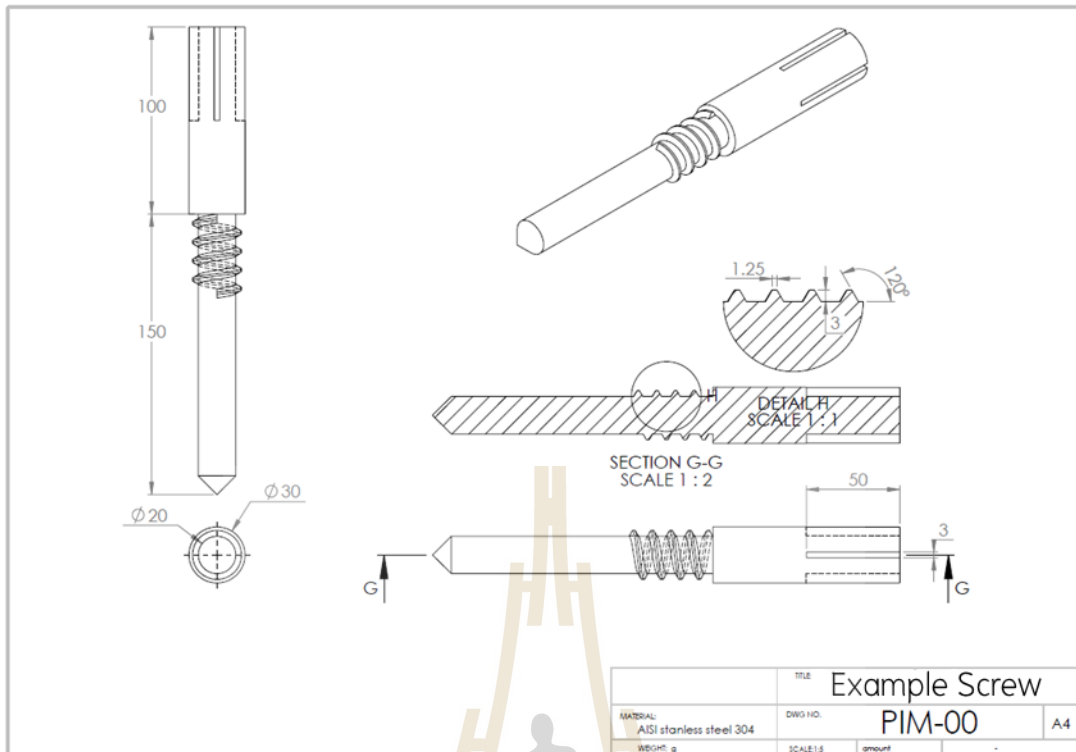
3.3 การทำงานของเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ

การทำงานของเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อน 2 ตัว คือ มอเตอร์ 1 และ มอเตอร์ 2 (motor 1 and motor 2) ซึ่งมอเตอร์ 1 เป็นส่วนที่ทำการเคลื่อนที่อัดส่วนผสมเม็ดเข้า – ออกของแม่พิมพ์ ส่วนมอเตอร์ 2 ช่วยในการขับเคลื่อนสกรูเพื่อส่งให้ส่วนผสมเม็ดที่ได้รับความร้อนจนไหลตัวเข้าสู่โพรงแบบ โดยควบคุมความเร็วในการฉีดขึ้นรูปได้สูงสุดที่ 1800 รอบต่อนาที

ช่องใส่ส่วนผสมเม็ด (feed hopper) ติดตั้งอยู่ด้านบนเพื่อรับส่วนผสมแล้วลำเลียงเข้าสู่ห้องอัดซึ่งทำจากโลหะชุบแข็งที่มีความแข็งแรงสูง ภายในจะมีสกรูเพื่อทำการลำเลียงส่วนผสมไหลลงเข้าสู่โพรงแบบในแม่พิมพ์

ในส่วนของสกรูภายในห้องอัดถูกออกแบบให้สามารถช่วยส่งดันส่วนผสมไหลอมให้เคลื่อนที่ไปด้านหลัง มีระยะสกรู 1 ใน 3 ของความยาว ส่วนด้านปลายเป็นลักษณะกรวย (cone) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงองค์ประกอบส่วนต่าง ๆ ของสกรูภายในห้องอัด (screw in chamber)



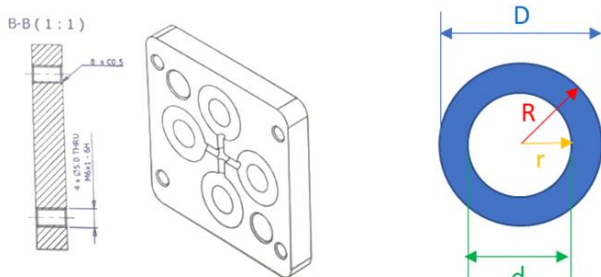


รูปที่ 3.5 การออกแบบของค้ประกอบต่าง ๆ ของสกรูภายในห้องอัด (screw in chamber)

ด้านนอกของห้องอัดจะถูกครอบด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อน (heating jacket) ซึ่งทำมาจากขดลวดความร้อนเพื่อทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ส่วนผสมเม็ดที่ถูกอัดและลำเลียงไปด้านหน้าผ่านผนังของห้องอัดให้เกิดการไหลตัวที่ดีเพียงพอ โดยอุณหภูมิจะถูกควบคุมและแสดงผลบนหน้าจอ (display) มีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 100 - 300 องศาเซลเซียส รวมถึงมีเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วงที่กำหนด

ในส่วนของชุดแม่พิมพ์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมชุบเคลือบภายในโพรงแบบด้วยโครเมียม ประกอบไปด้วยแม่พิมพ์ 2 ชิ้น ซึ่งสามารถประกบซ้าย - ขวา ติดอยู่กับแผ่นประกบ (plate) ด้านหนึ่งยึดติดกับห้องอัดและหัวฉีดซึ่งอยู่กับที่ (stationery) ส่วนอีกด้านติดกับสกรูที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ 1 เพื่อทำหน้าที่เปิด - ปิดแม่พิมพ์

แม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 3.6 ถูกออกแบบเป็นรูปทรงโดนัท หรือ torus มี 4 โพรงแบบ (4 cavity torus mould) โดย torus มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมีความสูง (h) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยส่วนผสมเม็ดหลอมจะเคลื่อนที่ไหลตัวเข้าสู่สปูร์ (spure) ในตำแหน่งตรงกลางแล้วแยกออก 4 ทิศทาง เข้าสู่ทางวิ่ง (runner) และทางเข้า (gate) เพื่อเข้าสู่โพรงแบบ (mould cavity) ทำการตรวจสอบขนาดแม่พิมพ์ด้วยกล้องสเตอริโอ รุ่น Leica EZ4D และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ LAS EZ โดยการเลือกใช้แม่พิมพ์รูปทรง torus ที่มี 4 โพรงแบบนี้ เพื่อจำลองการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีระบบการไหลตัวเพื่อให้ส่วนผสมเม็ดถูกฉีดเข้าสู่โพรงแบบ เพื่อสามารถนำไปปรับปรุงพัฒนาต่อ ยอดสำหรับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีขนาดเล็ก หรืออุปกรณ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และทางการแพทย์ เป็นต้น



รูปที่ 3.6 รายละเอียดแม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูปวัสดุผง รูปทรง torus ซึ่งมี 4 โพรงแบบ (4 cavities)

3.4 การทำงานของชุดควบคุม (Controller)

การทำงานของชุดควบคุมด้วยหน้าจอแสดงผล ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ หน้าจอแสดงผลหลัก (main display) และหน้าจอกำหนดตัวแปรการฉีดขึ้นรูป (setting display) ดังรูปที่ 3.7 – 3.8

3.4.1 หน้าจอแสดงผลหลัก (main display)

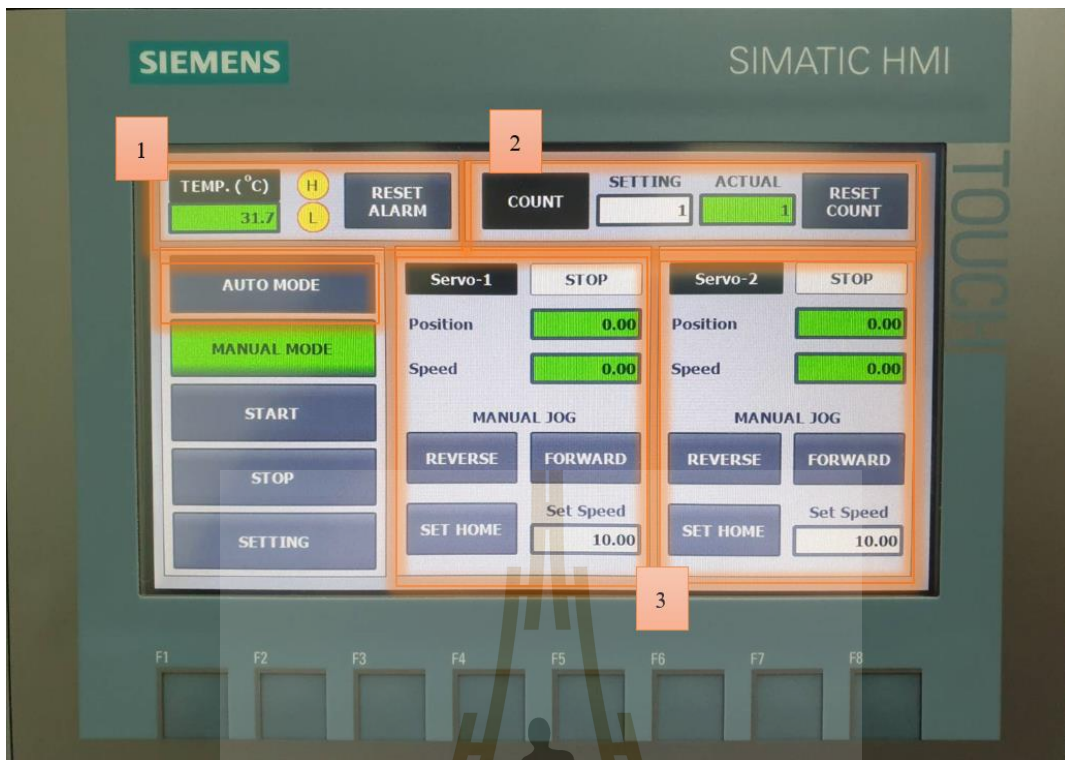
- ช่อง temp. ตำแหน่ง [1] จะแสดงอุณหภูมิจริงตามการทำงานของอุปกรณ์ให้ความร้อน
- ช่อง count ตำแหน่ง [2] จะสังเกที่ช่อง actual สามารถนับจำนวนชิ้นงานจริงที่เครื่องกำลังผลิตชิ้นงานอยู่ หากเครื่องผลิตชิ้นงานครบแล้วและต้องการกำหนดใหม่ สามารถกดปุ่ม reset เพื่อให้จำนวนนับเป็น 0 (หมายเหตุ: หากไม่กดปุ่ม reset แล้วกด start ครั้งต่อไป จำนวนนับจะถูกนับเป็น 0 โดยอัตโนมัติ)

- ช่อง servo-1 และ servo-2 ตำแหน่ง [3] ให้สังเกที่ช่อง position จะแสดงตำแหน่งของมอเตอร์และที่ช่อง speed สามารถใช้เพื่อกำหนดความเร็วของมอเตอร์ในการฉีดขึ้นรูปตามที่กำหนดไว้แล้วใน setting display

3.4.2 หน้าจอ กำหนดตัวแปรการฉีดขึ้นรูป (setting display)

- count ตั้งค่าจำนวนชิ้นงานที่ต้องการในแต่ละรอบ
- servo-1 compress position (mm.) ค่าตำแหน่งของ motor 1 (ตั้งตามค่าเดิมจากผู้ผลิต)
- servo-1 compress speed ตั้งค่าความเร็วของ motor 1
- servo-2 feed position ตั้งค่ารอบของ motor 2 ในการ feed ผงวัสดุ
- servo-2 feed speed ตั้งความเร็ว motor 2 ในการ feed ผงวัสดุ
- delay time (sec.) ตั้งเวลาในการรอบผงวัสดุหลังจาก feed
- servo-2 feed reverse distance (mm.) ตั้งรอบการ feed ผงวัสดุกลับหลังอัดแล้ว
- temp. high ตั้งค่าอุณหภูมิสูง (ควรตั้งตาม specification ของ heating jacket)
- temp. low ตั้งค่าอุณหภูมิต่ำ

ดังนั้น เครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมานั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยเพื่อการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ทางวิศวกรรมที่มีขนาดเล็ก รูปทรงซับซ้อนได้ ซึ่งในบทที่ 4 – 6 จะกล่าวถึงการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์สำหรับชิ้นงานทางด้านวิศวกรรมที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของหน้าจอหลัก (main display) ควบคุมการทำงาน



รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบหน้าจอกำหนดตัวแปรการฉีดขึ้นรูป (setting display)

บทที่ 4 ระเบียบวิธีวิจัยการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

ในบทนี้ จะนำเสนอระเบียบวิธีวิจัยการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ด้วยแม่พิมพ์รูปทรง torus มี 4 โพรงแบบ การทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตจากการฉีดขึ้นรูป รวมถึงการวิเคราะห์การหดตัวและการคงขนาดชิ้นงาน โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนของวัสดุและอุปกรณ์ และระเบียบวิธีวิจัย ดังต่อไปนี้

4.1 วัสดุ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ

4.1.1 วัสดุและสารเคมี

- ผงอะลูมิเนียม เกรดทางการค้า Alumix 123 ที่มีธาตุผสมหลักคือทองแดงและแมกนีเซียม
- อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC_p)
- สารยึดประกอบไปด้วยโพลีโพรพิลีน พาราฟินแวกซ์ และกรดสเตียริก
- ก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.995 %
- สารละลายเฮกเซน (hexane)

4.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- เครื่องชั่งน้ำหนัก 3 ตำแหน่ง
- ชุดหม้อบดผสม (ball mill mixer set)
- เครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ (small-scaled powder Injection moulding machine)
- เตาอบไฟฟ้า (electric furnace)
- เตาเผาแบบท่อ (tube furnace) พร้อมชุดอุปกรณ์วัดและบันทึกอุณหภูมิ
- ชุดอุปกรณ์ตัด-ขัดเตรียมผิวสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
- กล้องสเตอริโอพร้อมซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ รุ่น Leica EZ4D
- กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) พร้อมซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ
- เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์ (laser particle size analyser)
- เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด+อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM + EDS)
- เครื่องมือทดสอบความแข็งวิกเกอร์สแบบจุลภาค (micro-Vickers hardness tester)
- เครื่องมือทดสอบความแข็งสเกลชอร์ (Shore scale hardness tester)

4.2 ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนทดสอบการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง ใช้ผงอะลูมิเนียมเกรด Alumix 123 และอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งให้โครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอและมีสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีที่สุดจากการศึกษาวิจัยเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5 - 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ผงวัสดุ (powder characterization)

ผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกนำมาวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์ (laser particle size analyser) และวิเคราะห์รูปทรงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมด้วยเทคนิค XRF

4.2.2 การเตรียมส่วนผสมเม็ด (feedstock preparation)

เตรียมผิวอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยการเผาในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเกิดผิวซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) สำหรับป้องกันการเกิดเฟสอะลูมิเนียมคาร์ไบด์ (Al₄C₃) ที่มีความเปราะสูง และเพิ่มความสามารถในการเปียกระหว่างผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

จากนั้นทำการเตรียมส่วนผสมเม็ดโดยใช้ผงอะลูมิเนียมเกรดทางการค้า Alumix 123 โดยทดลองเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยนำผสมในหม้อบด (ball mill) ขนาดปริมาตร 250 มิลลิลิตร ด้วยความเร็วรอบ 280 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำผงวัสดุมาผสมกับสารยึดเพื่อเตรียมส่วนผสมเม็ดสำหรับฉีดขึ้นรูปที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง

4.2.3 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (powder injection molding)

เตรียมแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิ 80 – 90 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการอุ่นส่วนผสมเม็ดและฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องมือฉีดขึ้นรูปขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 280 - 300 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป 2 ระดับ คือ ที่อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 1600 และ 1800 รอบต่อนาที ดังแสดงรายละเอียดของสภาวะการทดลองฉีดขึ้นรูปผงดังตารางที่ 3.1 ภายหลังจากฉีดขึ้นรูปนำชิ้นงานภายหลังฉีดขึ้นรูป (green part) ออกจากแม่พิมพ์ วัดขนาดชิ้นงานด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ เพื่อคำนวณปริมาตรและค่าการหดตัวของชิ้นงาน และทดสอบความแข็งสเกลเลอร์ โดยทดสอบชิ้นงานละ 4 ตำแหน่ง จำนวนอย่างน้อย 6 - 8 ชิ้นงาน แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.1 สภาวะการทดลองฉีดขึ้นรูปและการเผาพูน

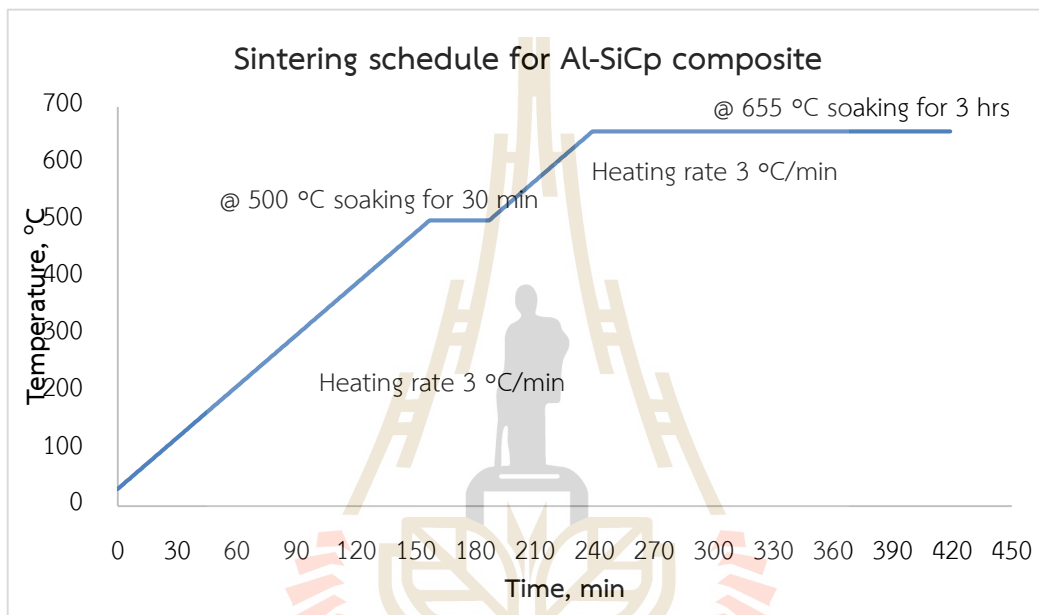
% solid loading	Moulding speed (rpm)	Sintering condition
55	1600	655 °C/ 3 h
	1800	
60	1600	
	1800	

4.2.4 กำจัดสารยึดด้วยสารละลาย (solvent debinding)

กำจัดสารยึดด้วยสารละลายโดยแช่ในสารละลายเฮกเซน (hexane) เป็นระยะเวลา 0 – 10 ชั่วโมง โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานทุก ๆ 1 ชั่วโมง หลังนำออกจากภาชนะแช่และปล่อยให้แห้งตัว เพื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียสารยึด (% binder loss)

4.2.5 การเผาผนึก (sintering)

เผาผนึกชิ้นงานที่กำจัดสารยึดด้วยสารละลายแล้ว ที่อุณหภูมิ 655 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในเตาทำอในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลของก๊าซ 1.0 ลิตรต่อนาที สำหรับสูตรส่วนผสมเม็ดที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิ – เวลาในการเผาผนึกสำหรับชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.2.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม

4.2.6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (microstructural analysis)

ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยายต่ำ - สูง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS

4.2.6.2 การทดสอบความแข็ง (hardness test)

ทดสอบความแข็งในชิ้นงานหลังการเผาผนึกด้วยเครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์สแบบจุลภาค (micro-Vickers hardness testing machine) ที่ 100 กรัมแรง (gf) โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 4 ตำแหน่ง ของแต่ละชิ้นงาน โดยใช้ชิ้นงานอย่างน้อย 6 - 8 ชิ้นงานในแต่ละสภาวะการทดลอง แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย

4.2.6.3 การทดสอบความหนาแน่น (density measurement)

ทดสอบความหนาแน่นรวม (bulk density) ของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปและภายหลังทำการเผาผนึก โดยค่าความหนาแน่นที่วัดได้ ρ_{measured} สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1

$$\rho_{\text{measured}} = \frac{m}{V} \quad \text{สมการ 4.1}$$

$$\rho_{\text{green, th}} = \rho_{\text{Al}} V_{\text{Al}} + \rho_{\text{SiC}} V_{\text{SiC}} + \rho_{\text{binder}} V_{\text{binder}} \quad \text{สมการ 4.2}$$

$$\rho_{\text{sintered, th}} = \rho_{\text{Al}} V_{\text{Al}} + \rho_{\text{SiC}} V_{\text{SiC}} \quad \text{สมการ 4.3}$$

$$\% \rho_{\text{th}} = \frac{\rho_{\text{measured}}}{\rho_{\text{th}}} \times 100 \quad \text{สมการ 4.4}$$

นอกจากนี้ คำนวณค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป $\rho_{\text{green, th}}$ และภายหลังการเผาผนึก $\rho_{\text{sintered, th}}$ ได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ ρ_{Al} ρ_{SiC} และ ρ_{binder} เป็นความหนาแน่นของอะลูมิเนียมเกรด Alumix 123 อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ และสารยึดตามลำดับ นอกจากนี้ เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นทางทฤษฎี (% theoretical density) คำนวณได้จากสมการ 4.4

4.2.6.4 การวัดค่าการหดตัว (shrinkage measurement)

คำนวณค่าการหดตัว (linear shrinkage) ของชิ้นงาน torus ในมิติที่เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) และความสูงชิ้นงาน (h) ดังรูปที่ 4.2 โดยวัดขนาดชิ้นงานก่อน - หลังฉีดขึ้นรูป และหลังเผาผนึกเพื่อคำนวณค่าการหดตัวเชิงเส้น (δ_L) ดังสมการ 4.5

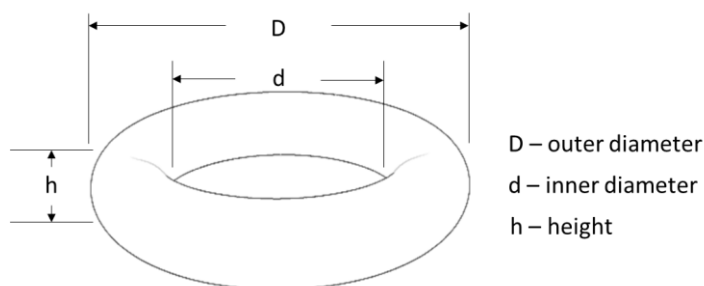
$$\delta_L = \frac{L_0 - L}{L_0} \quad \text{สมการ 4.5}$$

นอกจากนี้ คำนวณปริมาตรของชิ้นงานรูปทรง torus ดังสมการ 4.6 เพื่อคำนวณค่าการหดตัวโดยปริมาตร (δ_V) ในสมการ 4.7

$$\text{Torus volume} = \frac{1}{4} \pi^2 (R^2 - r^2) (R - r) \quad \text{สมการ 4.6}$$

$$\delta_V = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad \text{สมการ 4.7}$$

โดยที่ R คือ รัศมีภายนอก และ r คือ รัศมีภายใน



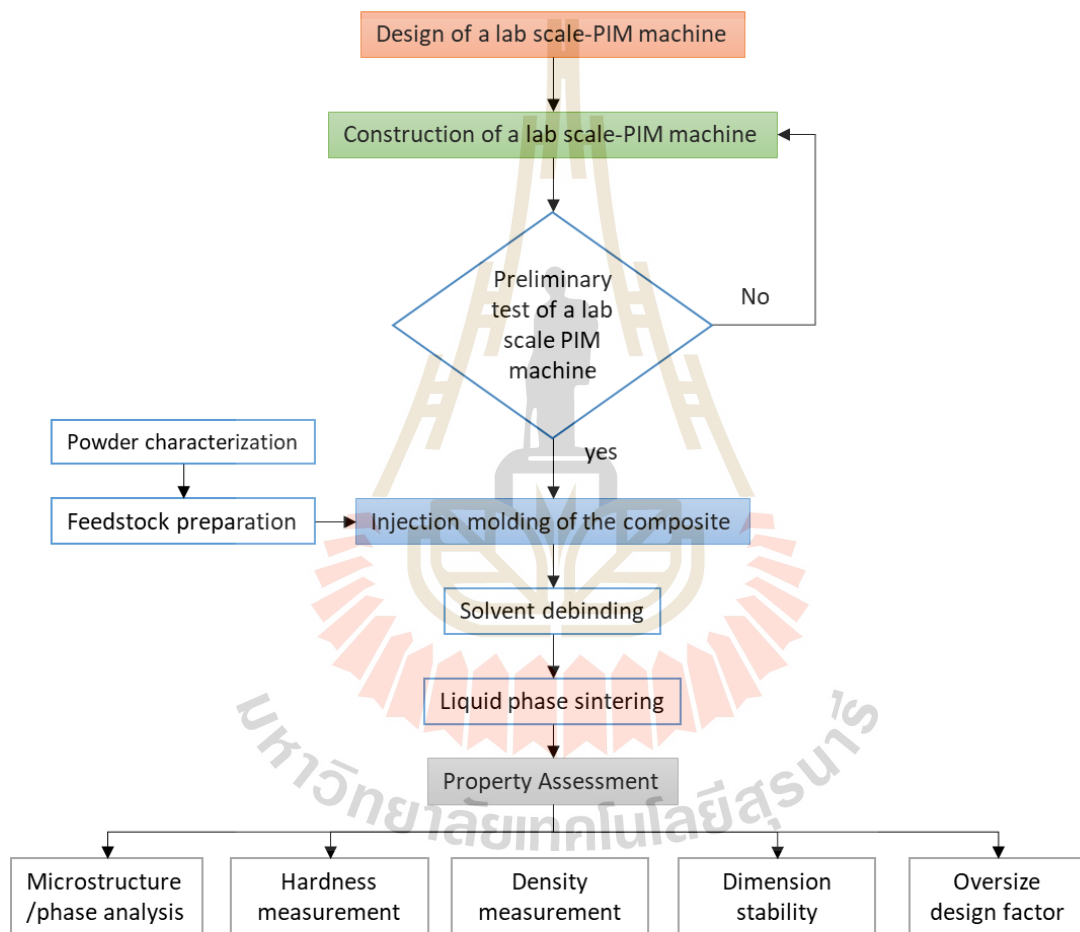
รูปที่ 4.2 มิติของชิ้นงานรูปทรง torus

4.2.6.5 การประเมินความสามารถในการคงขนาด (dimensional stability)

วิเคราะห์ความสามารถในการคงขนาด (dimensional stability) หรือการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน คำนวณได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการหดตัวในแต่ละมิติของชิ้นงาน

4.2.6.6 ค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงาน (oversize design factor: Z)

นำค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปและหลังการเผาผนึกมาคำนวณค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดสำหรับชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปโดยใช้ผสมเม็ดเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง โดยรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงโดยสรุปในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนระเบียบวิธีดำเนินงานวิจัย

บทที่ 5 ผลการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

ในบทนี้ รายงานผลการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุผงด้วยเครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงแนวอนขนาด เล็กสำหรับห้องปฏิบัติการที่ถูกออกแบบพัฒนาและสร้างขึ้นมา โดยจะทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้แม่พิมพ์ขึ้นงาน รูปทรง torus จำนวน 4 โพรงแบบ โดยภายหลังการทดสอบการฉีดขึ้นรูป จะนำเสนอผลการ วิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตจากการฉีดขึ้นรูปผง ดัง รายละเอียดต่อไปนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์ผงวัสดุ (powder characterization)

ผงอะลูมิเนียมเกรด Alumix 123 ภายหลังจากการร่อนด้วยตะแกรง 100 เมช หรือ 150 ไมครอน มีผลวิเคราะห์การกระจายตัวของผงดังแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่า ผงอะลูมิเนียมมีขนาดเฉลี่ย ที่ 72.61 ไมครอน และมีค่า D_{10} , D_{50} , D_{90} และ S_w ดังแสดงในตาราง ซึ่งการนำผงอะลูมิเนียมผ่านการ กรองด้วยตะแกรงเพื่อคัดกรองผงที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง ดังจะเห็นได้ว่า ค่า D_{90} ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคเฉลี่ยสะสมที่ 90 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 131.01 ไมครอน ซึ่งเล็กกว่าขนาด ตะแกรง 100 เมช และหากเปรียบเทียบกับผงอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการกรองตะแกรงจะพบว่ามีขนาด อนุภาคเฉลี่ย ไมครอน และมีค่า D_{90} อยู่ที่ 251.95 ไมครอน ดังนั้นในการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิง ประกอบในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ผงอะลูมิเนียมที่ผ่านการกรองตะแกรงขนาด 100 เมช แล้ว อนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่า คือ 21.02 ไมครอน โดยมีค่าความชันของกราฟเมื่อแสดง กราฟแจกแจงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสม (cumulative particle size distribution) คือ S_w ซึ่งหากค่า S_w มีค่าที่มากนั้นหมายถึงกราฟมีความชันมาก นั่นคืออนุภาคมีช่วงการกระจายตัวที่ ค่อนข้างแคบ ดังนั้นค่าอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่า S_w เท่ากับ 3.6 ซึ่งมากกว่าค่า S_w ของผงอะลูมิเนียม คือ 2.46 หมายถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์แคบกว่าการกระจายตัวของขนาด ผงอะลูมิเนียม

ส่วนผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองด้วย ตะแกรงขนาด 100 เมช ด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตารางที่ 5.2 โดยพบว่าผงอะลูมิเนียมที่ผ่านการกรอง ด้วยตะแกรงจะมีปริมาณของทองแดงที่เป็นโลหะผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 4.38 เป็น 5.44 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และพบปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยคือ 0.12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ผลการตรวจสอบโครงสร้างของผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าผงอะลูมิเนียมมีทั้งรูปร่างค่อนข้างกลม (globular) และรูปร่าง ยาว (elongated) ปะปนกัน เนื่องจากกระบวนการผลิตแบบ gas atomization ซึ่งผงอะลูมิเนียม ดังกล่าวนี้จะมีชั้นฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ปรากฏอยู่ ซึ่งออกไซด์ดังกล่าวเกิดขึ้นโดยธรรมชาติและ ช่วยป้องกันการติดไฟระหว่างการขนส่ง อย่างไรก็ตามชั้นออกไซด์นี้เป็นอุปสรรคสำคัญในการเผาผนึก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เมื่อตรวจสอบลักษณะอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์พบว่ามีขนาดเล็กกว่าและมี รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม (angular) ซึ่งเนื่องมาจากกระบวนการผลิตอนุภาคด้วยการบด

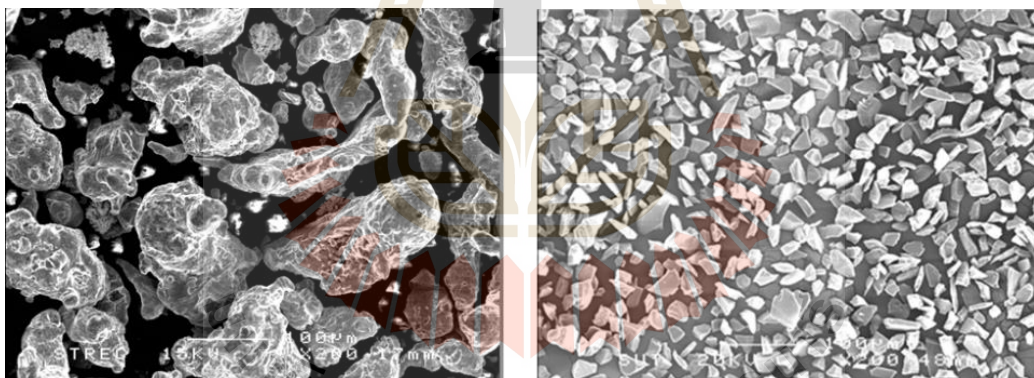
ตารางที่ 5.1 ผลวิเคราะห์ขนาดผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

Powder/particulate	Particle size (micron)				S _w
	D _{av}	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	
Aluminium powder (sieved)*	72.61	11.90	71.22	131.01	2.46
Aluminium powder (unsieved)	139.66	22.84	131.34	251.95	2.46
SiC _p	21.02	11.81	19.98	31.78	3.60

หมายเหตุ: D_{av} คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย
D₁₀, D₅₀ และ D₉₀ คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยสะสมที่ 10, 50 และ 90 เปอร์เซ็นต์
S_w คือ ค่าความชันของกราฟ
* ผ่านการกรองด้วยตะแกรงเบอร์ 100 เมช (<150 ไมครอน)

ตารางที่ 5.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

Aluminium powder	Al	Si	Cu	Ti	Fe
Sieved	93.68	0.70	5.44	0.06	0.12
Unsieved	94.92	0.52	4.38	0.07	0.12



a) ผงอะลูมิเนียม b) อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

5.2 สมบัติของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (green properties)

ในการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้ส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง พบว่า สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีเมื่อควบคุมตัวแปรในการขึ้นรูปดังนี้ คือ ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปที่ 1600 – 1800 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปที่ 280 – 300 องศาเซลเซียส (วัดที่ด้านนอกผนังห้องอัด) นอกจากนี้ พบว่าการควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ที่ 80 – 90 องศาเซลเซียส จะช่วยให้การฉีดขึ้นรูปวัสดุผงและการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายและไม่ติดแม่พิมพ์ การควบคุมอุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปต่ำกว่า 280 องศาเซลเซียส ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปต่ำกว่า 1600 รอบต่อนาที รวมถึงใช้อุณหภูมิ

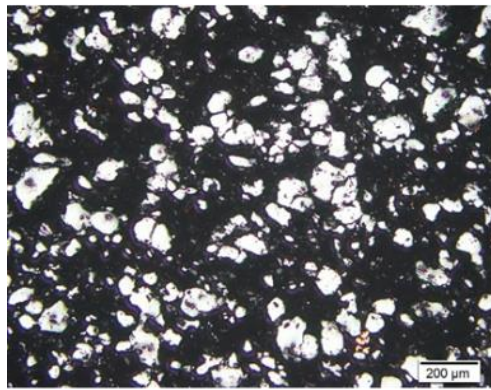
แม่พิมพ์ที่ต่ำกว่า 75 องศาเซลเซียส จะไม่สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานได้เต็มแบบ สมบัติของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป (green microstructure)

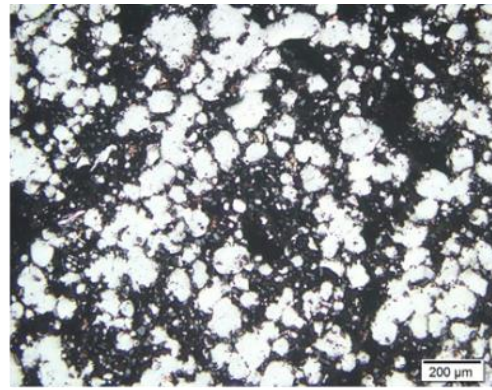
ชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (green samples) มีรูปร่าง torus ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที พบว่าชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปมีผิวชิ้นงานเรียบและเป็นเงามัน ในบางชิ้นงานจะปรากฏครีบลึก ๆ บริเวณรอยประกบแม่พิมพ์ (parting line) แต่สามารถตัดออกได้ง่าย เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงดังรูปที่ 5.3 - 5.4 พบว่า โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปประกอบไปด้วยผงอะลูมิเนียม (เฟสสว่าง) ล้อมรอบด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (สีเทา) ที่มีขนาดเล็กกว่า และทั้ง 2 เฟส กระจายอยู่ในเฟสพื้นที่เป็นสารยึด (สีดำ) บางบริเวณสังเกตเห็นรูพรุนที่เกิดจากโพรงแก๊สที่ถูกกักไว้ระหว่างการฉีดขึ้นรูปปรากฏในบริเวณที่เป็นสารยึด อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี แต่บางกรณีสังเกตเห็นการรวมกลุ่ม (cluster) และเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง พบว่า ชิ้นงานเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะมีปริมาณของผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มากกว่าชิ้นงานเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ความเร็วการฉีดขึ้นรูปพบว่า การฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที จะให้โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานภายหลังฉีดขึ้นรูปมีความหนาแน่นของผงโลหะและวัสดุที่มากกว่าเล็กน้อย



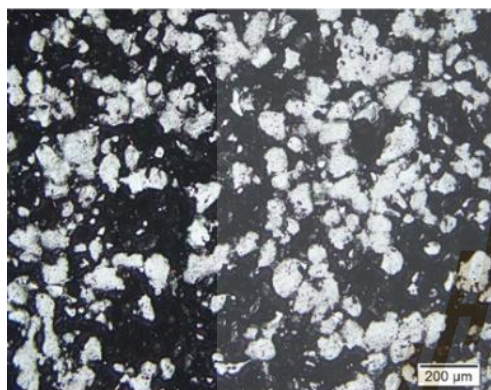
รูปที่ 5.2 ชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป เตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที



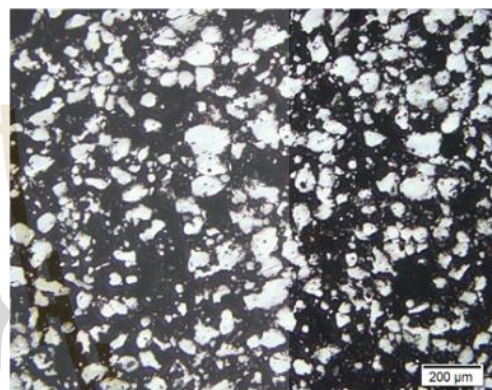
a) 55 % solid loading, 1600 rpm



b) 55 % solid loading, 1800 rpm

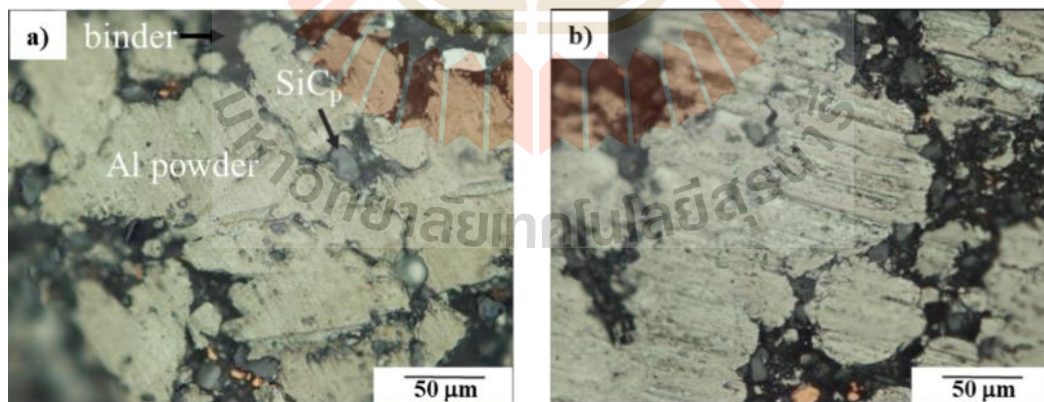


c) 60 % solid loading, 1600 rpm

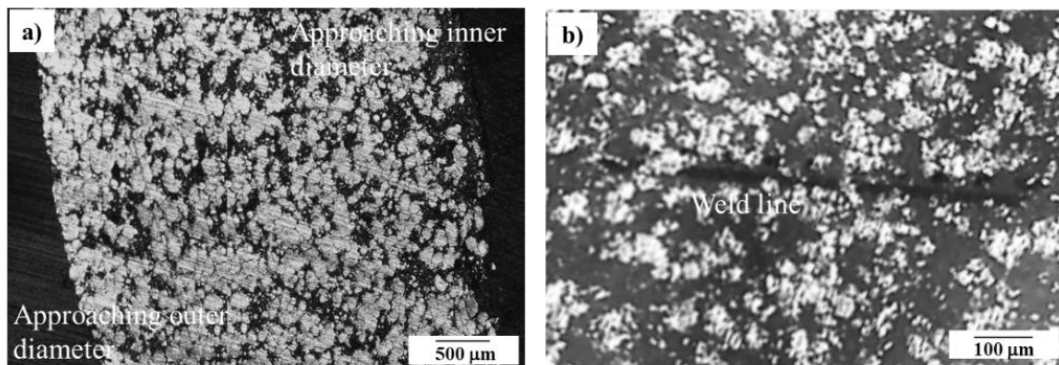


d) 60 % solid loading, 1800 rpm

รูปที่ 5.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป เตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที เปรียบเทียบที่กำลังขยาย 1000 เท่า a) 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และ b) 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง

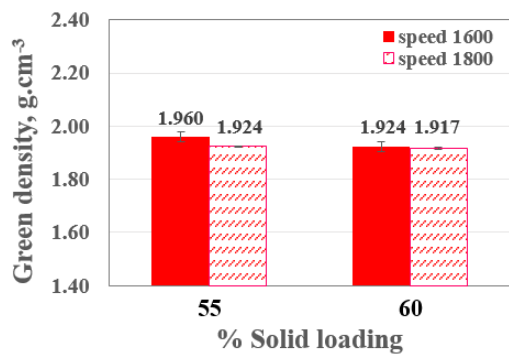


รูปที่ 5.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป ณ a) ขอบชิ้นงาน และ b) รอยเชื่อมต่อชน (weld line)

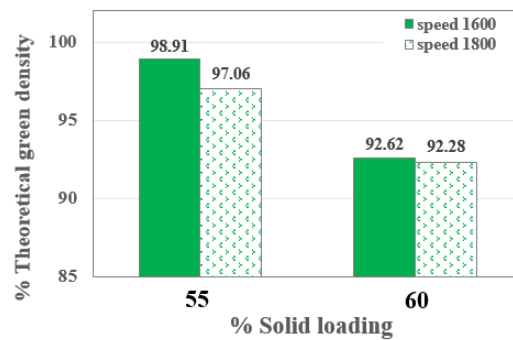
อย่างไรก็ดี เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป ณ บริเวณต่าง ๆ เช่น ที่ขอบของชิ้นงานบริเวณขอบรอยประกบแม่พิมพ์และที่บริเวณทางเข้าโพรงแบบ พบการกระจายตัวของผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงรอยเชื่อมต่อชน ดังรูปที่ 5.5 a) – b) ทั้งนี้ โครงสร้างจุลภาคที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณรอยต่อแม่พิมพ์นี้อาจเนื่องมาจากแรงดันในการฉีดขึ้นรูปที่ต่ำส่วนที่เป็นสารยึดที่มีความหนืดน้อยกว่าถูกรีดออกไปปรากฏเป็นครีบ จึงเห็นผงอะลูมิเนียมหนาแน่นกว่าบริเวณภายใน ส่วนรอยเชื่อมต่อชนที่เกิดขึ้นนั้น อาจเนื่องมาจากการไหลตัวของส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวเข้าสู่โพรงแบบรูปทรง torus ทำให้เกิดรอยเชื่อมต่อชนขึ้น และหากส่วนผสมเม็ดเกิดการเย็นตัวก่อนที่จะไหลประกบเข้ากันสนิท ก็อาจจะทำให้เกิดรอยเชื่อมต่อชนดังกล่าว เป็นต้น

5.2.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป (density of green samples)

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 5.6 พบว่าการฉีดขึ้นรูปด้วยความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที จะให้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นรวมที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง พบว่า ชิ้นงานฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ให้ค่าความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นทางทฤษฎี (สมการ 4.2 และ 4.3) ที่มากกว่าชิ้นงานฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องมาจากระหว่างการฉีดขึ้นรูปนั้นพบว่าการฉีดขึ้นรูปที่ใช้ส่วนผสมเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะมีความหนืดค่อนข้างสูง ส่วนส่วนผสมเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง นั้นจะมีความหนืดที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีปริมาณสารยึดที่มากกว่า จึงส่งผลทำให้ระหว่างการฉีดขึ้นรูปนั้นชิ้นงานเกิดครีบขึ้นและพบในปริมาณที่มากกว่าชิ้นงานฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ดังนั้น อาจเป็นไปได้ว่าสารยึดที่หลอมเหลวถูกรีดออกมาผ่านรอยประกบแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 5.5 a) จึงอาจทำให้ชิ้นงานเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มีความหนาแน่นที่มากกว่าเนื่องจากสารยึดที่มีความหนาแน่นต่ำถูกรีดออกไป ซึ่งส่งผลเช่นเดียวกันเมื่อคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นทางทฤษฎี



a) Green density

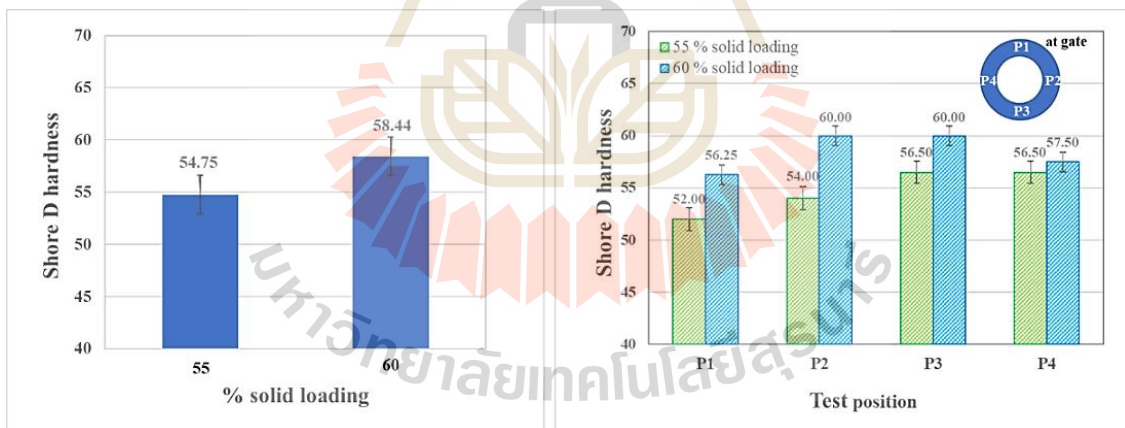


b) % Theoretical green density

รูปที่ 5.6 ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป

5.2.3 ความแข็งของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป (hardness of green samples)

ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปในสเกลชอร์ (Shore D) พบว่า ค่าความแข็งของชิ้นงานเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.44 ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งของชิ้นงาน เตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง คือ 54.75 ดังรูปที่ 5.7 (ซ้าย) เนื่องจากมีปริมาณผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่วัดได้ ณ บริเวณ 4 ตำแหน่ง คือ P1 – P4 โดย P1 คือ ตำแหน่งทางเข้าโพรงแบบแสดงดังรูปที่ 5.7 (ขวา) พบว่า ณ ตำแหน่งทางเข้ามีค่าความแข็งเฉลี่ยที่น้อยกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งอาจเนื่องมาจากบริเวณทางเข้ามีการกระจายตัวของผงที่น้อยกว่าบริเวณอื่น

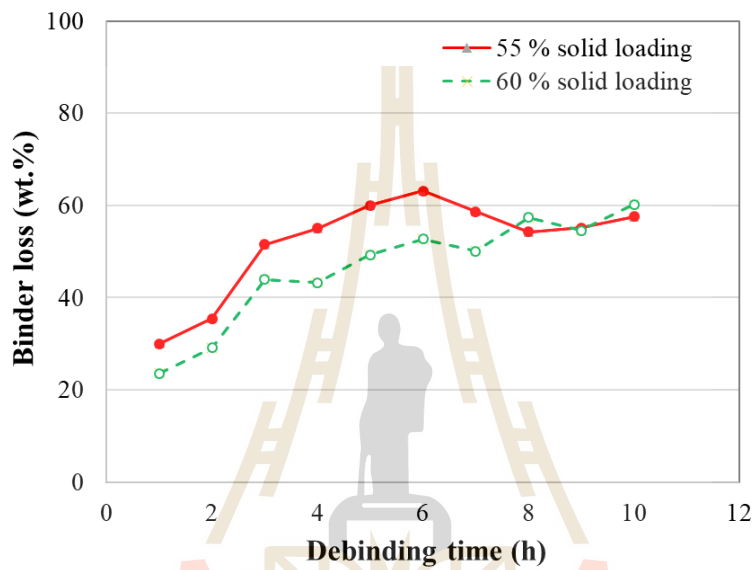


รูปที่ 5.7 ค่าความแข็ง (Shore D) ของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป เปรียบเทียบการเตรียมส่วนผสมเม็ดที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง (ซ้าย) และเปรียบเทียบการทดสอบ ณ ตำแหน่ง P1 – P4 (ขวา)

5.2.4 การกำจัดสารยึดด้วยสารละลาย (solvent debinding)

เมื่อนำชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มากำจัดสารยึดด้วยสารละลายเฮกเซน เป็นระยะเวลา 1- 10 ชั่วโมง เพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียสารยึด (% binder loss) มีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.8 พบว่า เมื่อเริ่มต้นการกำจัดสารยึด ชิ้นงานฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะมีการสูญเสียสารยึดที่มากกว่า โดยจะเริ่มหยุดการสูญเสียสารยึดที่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงสำหรับชิ้นงานฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 55 และ 60

เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะมีปริมาณของสารยึดที่มากกว่า จึงทำให้สารยึดนั้นถูกละลายออกมาในอัตราที่มากกว่า และถูกกำจัดได้เกือบหมดในระยะเวลาที่สั้นกว่า โดยสารยึดที่ใช้ในระบบนี้ประกอบด้วย โพลีโพรพิลีน พาราฟินแวกซ์ และกรดสเตียริก ในสัดส่วน 30: 65: 5 โดยน้ำหนัก ดังนั้น สารยึดที่เป็นพาราฟินแวกซ์ และกรดสเตียริกจะถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนนี้ และเหลือโพลีโพรพิลีนที่ยังคงทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักเพื่อยึดผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เข้าด้วยกัน ก่อนเข้าสู่การกำจัดสารยึดด้วยความร้อนและการเผาผนึกต่อไป ดังนั้น ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารยึดสำหรับชิ้นงานเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง อยู่ที่ 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ

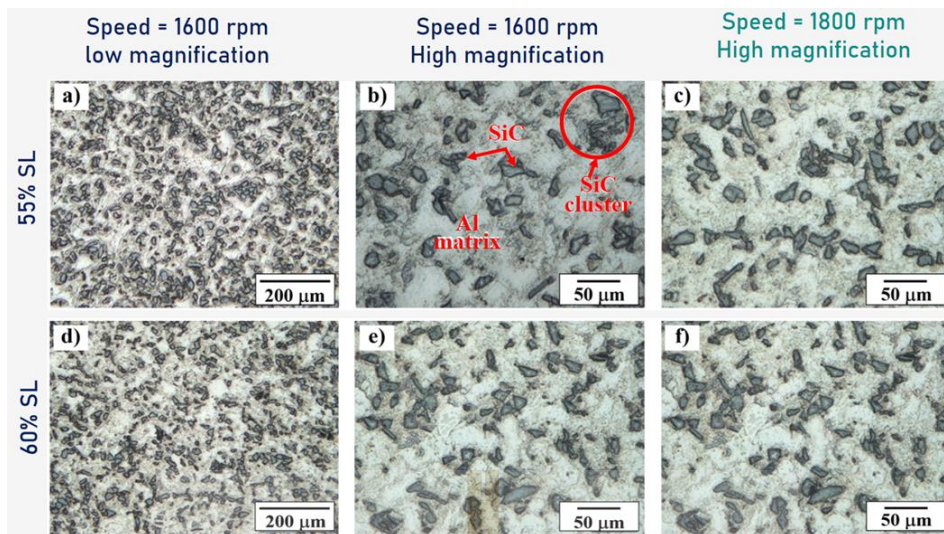


รูปที่ 5.8 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียสารยึด (% binder loss) เมื่อกำจัดสารยึดด้วยสารละลายเฮกเซน

5.3 สมบัติของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก (sintered properties)

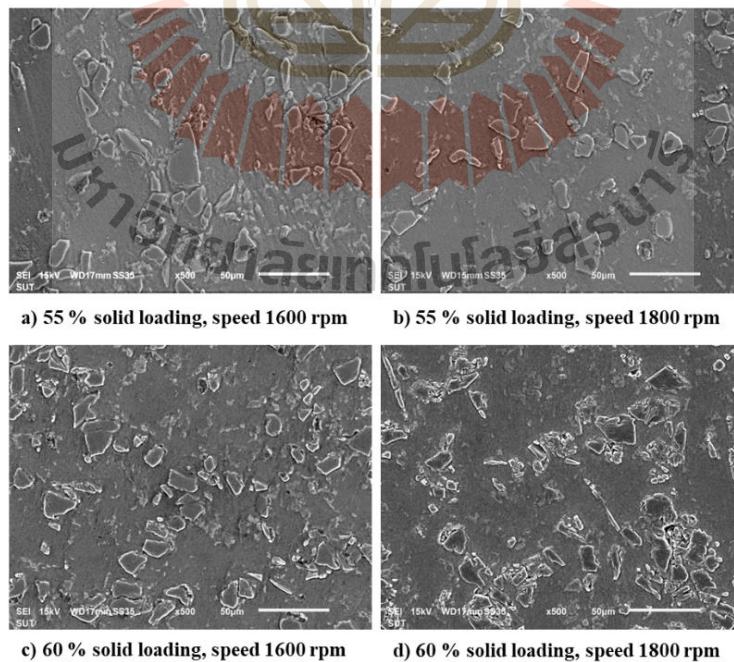
5.3.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาผนึก (microstructure of sintered samples)

ภายหลังการเผาผนึกที่ 655 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง สารยึดได้ถูกกำจัดไป จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยทั่วไปประกอบไปด้วยเนื้อพื้นอะลูมิเนียมล้อมรอบด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ทั้งในชิ้นงานเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ดังรูปที่ 5.9 เมื่อเปรียบเทียบผลของความเร็วในการขึ้นรูปที่ 1600 และ 1800 รอบต่อนาที พบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ ในบางกรณีพบการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นกลุ่มก้อน (SiC_p cluster) ซึ่งอาจมาพร้อมกับรูพรุนที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างการฉีดขึ้นรูปและไม่สามารถกำจัดได้หมดไปในขั้นตอนการเผาผนึก

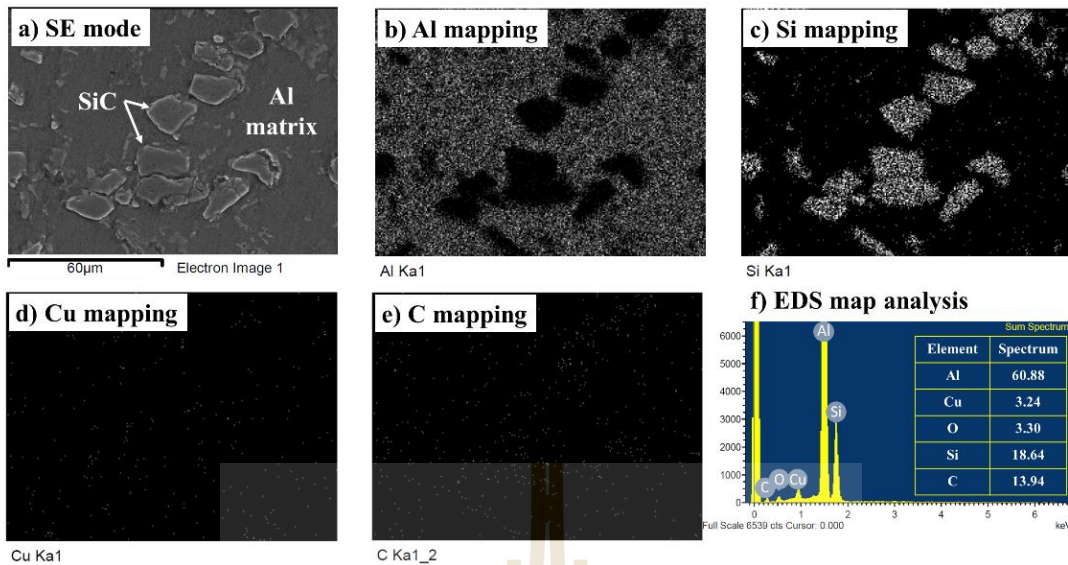


รูปที่ 5.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาพูนิก เติร์ยที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง และฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานหลังการเผาพูนิกในแต่ละสภาวะการทดลองที่กำลังขยาย 500 เท่า แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค และรอยต่อพื้นผิวที่ดี (good interface) ระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และผงอะลูมิเนียม ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าการเผาพูนิกเฟสของเหลว ณ อุณหภูมิ 655 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.10 a) – d) และเมื่อวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS แบบแผนที่ ดังรูปที่ 5.11 a) –f) พบว่า เฟสพื้นประกอบด้วยอะลูมิเนียมและทองแดงเป็นหลักซึ่งสอดคล้องกับเกรดอะลูมิเนียมผงที่เลือกใช้ และในส่วนของเฟสเสริมแรงนั้นคืออนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์แสดงบริเวณของซิลิคอนและคาร์บอนเป็นหลัก



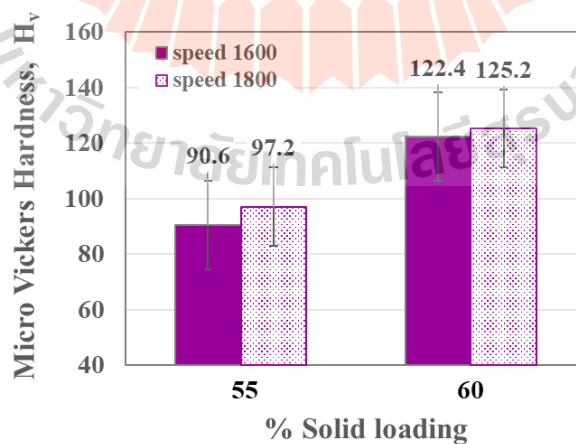
รูปที่ 5.10 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานหลังการเผาพูนิกในแต่ละสภาวะการทดลอง



รูปที่ 5.11 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมผลวิเคราะห์ EDS แบบแผนที่ของชิ้นงานหลังการเผาผนึก เตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ผิดขึ้นรูปที่ 1800 รอบต่อนาที

5.3.2 ค่าความแข็งวิคเกอร์สแบบจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาผนึก (Micro Vickers hardness of sintered samples)

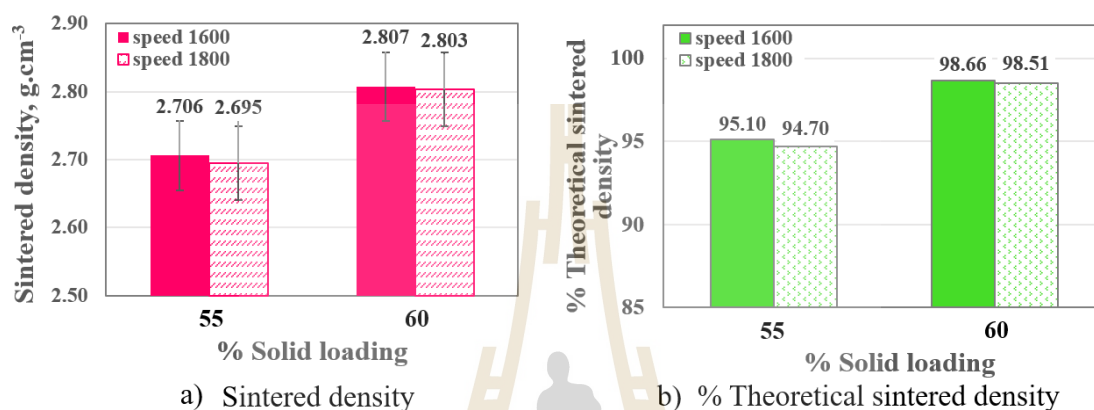
ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานหลังการเผาผนึกพบว่าชิ้นงานเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มีค่าความแข็งที่มากกว่าชิ้นงานเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ดังรูปที่ 5.12 โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 125.2 Hv และเมื่อเปรียบเทียบผลของการผิดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที พบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานหลังการเผาผนึก ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานเตรียมที่เปอร์เซ็นต์ของแข็งที่สูงกว่าจะให้สมบัติหลังการเผาผนึก นั่นคือมีค่าความหนาแน่นและความแข็งที่ดีกว่า



รูปที่ 5.12 ค่าความแข็งวิคเกอร์สแบบจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาผนึก

5.3.3 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึก (density of sintered samples)

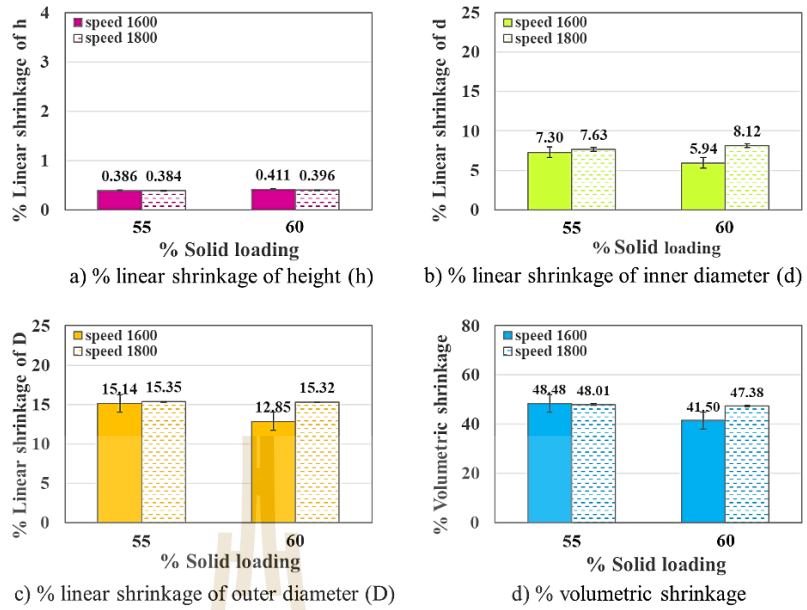
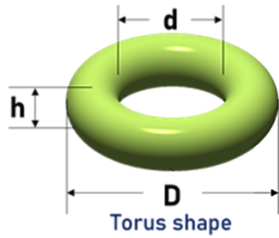
ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) ของชิ้นงานหลังการเผาผนึกเปรียบเทียบกรณีชิ้นงานเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง แสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่า ชิ้นงานเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มีค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 2.80 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที มากกว่าชิ้นงานเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ซึ่งมีค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 2.70 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือคิดเป็น 95 และ 98 เปอร์เซ็นต์ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี สำหรับชิ้นงานเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 ความหนาแน่นและความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป

5.3.3 การหดตัวของชิ้นงานหลังการเผาผนึก (density of sintered samples)

จากการวิเคราะห์ค่าการหดตัวเชิงเส้น (linear shrinkage) ของชิ้นงานหลังการเผาผนึก ในมิติต่าง ๆ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) และความสูง (h) ดังแสดงในรูปที่ 5.14 a) – c) พบว่า ค่าการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีค่ามากที่สุด คือ ในช่วง 12.85 – 15.35 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน คือ ในช่วง 5.94 – 8.12 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าค่าการหดตัวของความสูงมีค่าน้อยที่สุด คือ ในช่วง 0.384 – 0.411 เปอร์เซ็นต์ และหากพิจารณาการหดตัวโดยปริมาตร (volumetric shrinkage) จะพบว่ามีค่าค่อนข้างสูง คือ ในช่วง 41.50 – 48.48 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดเฟสของเหลวในโครงสร้างระหว่างการเผาผนึก

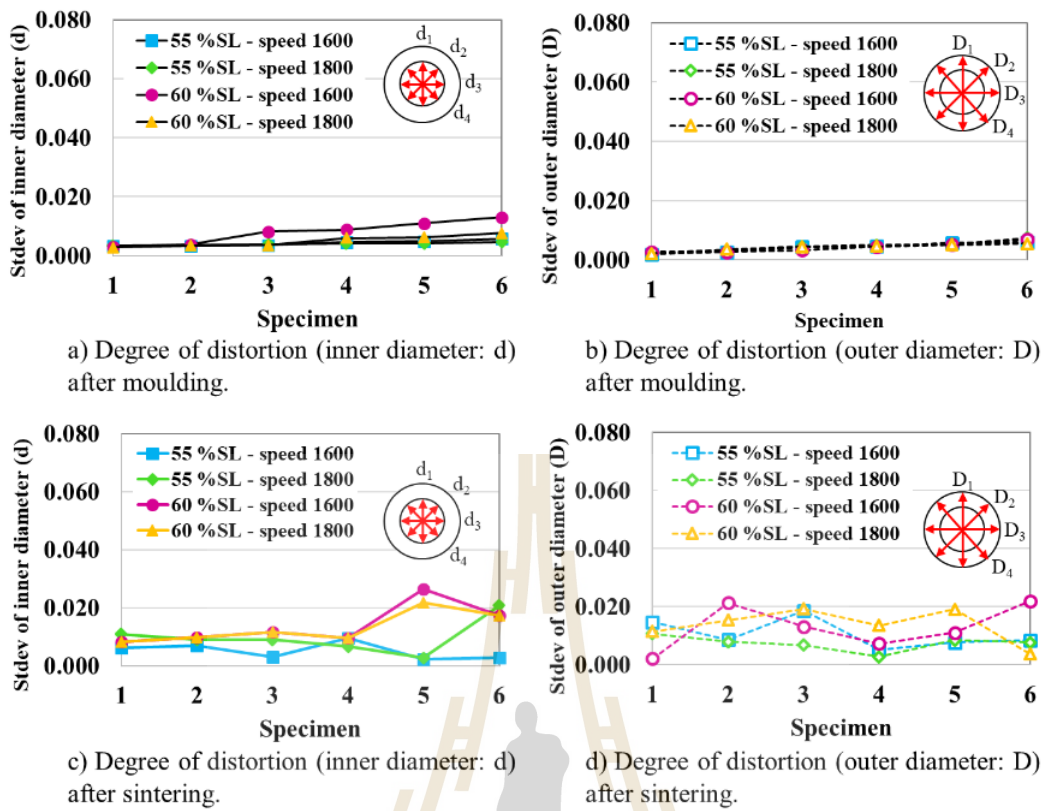


รูปที่ 5.14 ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังการเผาผนึกในมิติต่าง ๆ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) และความสูง (h)

5.3.4 ความสามารถในการคงขนาด (dimensional stability)

จากผลการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของชิ้นงานทั้งภายหลังจากฉีดขึ้นรูปและภายหลังจากเผาผนึก จะสามารถประเมินความสามารถในการคงขนาด (dimensional stability) หรือความบิดเบี้ยวของชิ้นงานจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (stdev) ของค่าการหดตัวในแต่ละมิติของชิ้นงานทดสอบ จำนวนทั้งหมด 6 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 5.15 a) – d) จะพบว่าเมื่อพิจารณาการบิดเบี้ยวของชิ้นงานภายหลังจากฉีดขึ้นรูปค่อนข้างต่ำกว่าการบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังการเผาผนึก เนื่องจากการบิดเบี้ยวของชิ้นงานในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปนั้นเกิดจากการหดตัวของสารยึดเมื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง และอาจรวมถึงลักษณะการไหลตัวของส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวเมื่อไหลตัวเข้าสู่โพรงแบบ

ส่วนการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเผาผนึกนั้นสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดเฟสของเหลวที่อุณหภูมิ 655 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงทำให้เกิดกลไกต่าง ๆ ขึ้นระหว่างการเผาผนึกและทำให้เกิดการแน่นตัว (densification) ของชิ้นงาน โดยในระหว่างการเผาผนึกเฟสของเหลว (liquid phase sintering) นั้น จะเกิดการจัดเรียงอนุภาคผงใหม่เนื่องจากเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นไหลเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของผง และทำให้เกิดแรงแคปิลลารีดึงเอาผงต่าง ๆ เคลื่อนที่เข้าหากัน ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวในปริมาณที่มากกว่าการเผาผนึกเฟสของแข็ง (solid state sintering)



รูปที่ 5.15 ความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปและชิ้นงานหลังการเผาพูน



บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

6.1 บทวิเคราะห์

จากการทดลองฉีดขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ด้วยเครื่องมือฉีดขึ้นรูปผงวัสดุแนวอนขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ ขับเคลื่อนด้วยสกรู 2 มอเตอร์ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้น ณ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่า สามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยได้ศึกษาตัวแปรการฉีดขึ้นรูป คือ i) อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปที่ 280 – 300 องศาเซลเซียส ii) ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปที่ 1600 – 1800 รอบต่อนาที และ iii) ส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง โดยควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 80 – 90 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองพบว่า การเตรียมส่วนผสมฉีดขึ้นรูปที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง โดยสามารถฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเล็กด้วยแม่พิมพ์ที่มี 4 โพรงแบบ ได้อย่างต่อเนื่อง ชิ้นงานรูปทรง torus ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร และความสูง 5 มิลลิเมตร มีขนาดปริมาตรของแต่ละโพรงแบบ (injection moulding volume) ได้ 925 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

ชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปคงขนาดได้ดีภายหลังการฉีดขึ้นรูป พบการบิดเบี้ยวเล็กน้อย และได้ชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปมีค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีที่ 92 – 99 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็ง Shore D ในช่วง 54.75 – 58.44 โดยชิ้นงานฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มีค่าความแข็งที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความแข็ง ณ ตำแหน่งทางเข้าโพรงแบบมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าบริเวณอื่น ซึ่งอาจเนื่องมาจากการไหลตัวที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างการฉีดขึ้นรูปในบริเวณดังกล่าว เชื่อมโยงกับการพบรูพรุนมากกว่าในบริเวณอื่น อย่างไรก็ตาม การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผงวัสดุขนาดเล็กนี้มีสปริงเป็นหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีทางเข้าโพรงแบบเป็นหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ดังนั้น อาจจะทำให้แรงดันในโพรงแบบไม่มากพอที่จะทำให้การเติมเต็มของโพรงแบบในช่วงบริเวณทางเข้าไม่แน่นพอ จึงเกิดเป็นรูพรุน อย่างไรก็ตาม หากปรับขนาดทางเข้าให้เล็กลงเพื่อเพิ่มแรงดัน อาจจะทำให้การฉีดเข้าโพรงแบบได้ยากขึ้นเนื่องจากส่วนผสมเม็ดนั้นใช้ผงอะลูมิเนียมที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ (72 ไมครอน) ซึ่งมากกว่าขนาดผงโลหะและวัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปซึ่งควรอยู่ที่ 20 ไมครอน ทำให้เกิดการไหลตัวที่ยากกว่า สอดคล้องกับบางบริเวณชิ้นงานพบรอยเชื่อมต่อน ซึ่งอาจเกิดจากการเย็นตัวของชิ้นงานก่อนเติมเต็มภายในโพรงแบบสมบูรณ์ ดังนั้นจึงอาจจำเป็นต้องมีการศึกษาพัฒนาแม่พิมพ์เพิ่มเติม รวมถึงการพัฒนาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการเติมเต็มโพรงแบบที่สมบูรณ์

หากพิจารณาที่ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปที่ 1600 – 1800 รอบต่อนาที (ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปสูงสุดของเครื่อง = 1800 รอบต่อนาที) พบว่าหากปรับตัวแปรความเร็วที่ต่ำกว่า 1600 รอบต่อนาที จะไม่สามารถขึ้นรูปได้เต็มทั้ง 4 โพรงแบบ และในส่วนของอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปนั้น ถูกปรับให้อยู่ในช่วง 280 – 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากผนังด้านนอกของห้องอัดที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมความแข็งแรงสูง ดังนั้นอุณหภูมิของส่วนผสมเม็ดหลอมเหลวในการฉีดขึ้นรูปนั้นจะน้อย

กว่า นอกจากนี้ การฉีดขึ้นรูปโดยใช้ส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะควบคุมการใช้ อุณหภูมิฉีดขึ้นรูปอยู่ที่ 280 – 290 องศาเซลเซียส และหากเพิ่มเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะต้องเพิ่ม อุณหภูมิฉีดขึ้นรูปเป็น 290 – 300 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการฉีดที่เต็มทุกโพรงแบบ ทั้งนี้ เนื่องจาก ส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง นั้นมีความหนืดที่มากกว่านั่นเอง และในส่วนของอุณหภูมิ ของแม่พิมพ์ในการฉีดขึ้นรูป ควบคุมอยู่ที่ประมาณ 80 – 90 องศาเซลเซียส ทำให้การฉีดขึ้นรูปได้ดีเต็ม โพรงแบบและไม่ติดแม่พิมพ์

อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับตัวแปรการฉีดขึ้นรูปโดยทั่วไป [1 - 2] คือ อุณหภูมิของ ห้องอัด (barrel temperature) ที่ 100 – 200 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ (mould temperature) ที่ 20 – 100 องศาเซลเซียส และอัตราเร็วการหมุนของสกรู (screw rotation speed) 35 – 70 รอบต่อนาที พบว่า อุณหภูมิ ณ ห้องอัดที่ใช้มีค่าค่อนข้างสูง แต่ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการ ใช้ผนังห้องอัดที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมความแข็งแรงสูงที่มีผนังหนา และทำการวัดอุณหภูมิจากผิวห้อง อัดด้านนอก ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิส่วนผสมระหว่างการไหลตัวจะต่ำกว่าอุณหภูมิที่วัดได้ และอยู่ใน ช่วงเหมาะสมทำให้สามารถฉีดขึ้นรูปได้ อย่างไรก็ตามในการพัฒนาต่อไปควรที่จะมีการปรับปรุงการวัด อุณหภูมิภายในห้องอัดเพื่อให้สามารถที่จะปรับปรุงและควบคุมตัวแปรดังกล่าวให้เหมาะสมสำหรับการ ฉีดขึ้นรูปส่วนผสมที่เตรียมด้วยระบบสสารยึดที่แตกต่างกันออกไปได้

เมื่อพิจารณาชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกพบว่ามีโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอ ซึ่งประกอบด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์การกระจายตัวล้อมรอบอะลูมิเนียมที่เป็นเฟสพื้น มีรอยต่อระหว่างพื้นผิวที่ดี แสดงถึงการเกิดเฟสของเหลวระหว่างการเผาผนึกและการแน่นตัว ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่น 2.695 – 2.807 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็น 95 -98 เปอร์เซ็นต์ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี มีค่า ความแข็งวิกเกอร์สแบบจุลภาคอยู่ในช่วง 90 – 125 Hv

ชิ้นงานมีการหดตัวและเกิดการบิดเบี้ยวในขั้นตอนการเผาผนึกสูงกว่าในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดเฟสของเหลวที่ 655 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจน ดังนั้น จึงทำให้เกิดกลไกต่าง ๆ ระหว่างการเผาผนึก และเกิดการแน่นตัว (densification) ด้วยเฟสของเหลวจะทำให้เกิดแรงแคปิลลารีดึงเอาผงวัสดุเข้ามา ด้วยกันเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (particle rearrangement) [1] โดยหากต้องการลดการบิดเบี้ยวอาจ จำเป็นต้องลดอุณหภูมิหรือเวลาในการเผาผนึก

อย่างไรก็ดี หากพิจารณาค่าการหดตัวเชิงเส้นทางทฤษฎี (theoretical linear shrinkage, Y_s) ดังสมการ 6.1 [2-3] พบว่า เมื่อพิจารณาชิ้นงานฉีดขึ้นรูปเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง หรือ คิดเป็นค่า ϕ ที่ 0.55 และ 0.60 ตามลำดับ จะสามารถคำนวณค่าการหดตัวเชิงเส้นทางทฤษฎี ได้เท่ากับ 16.57 และ 15.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการหดตัวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

$$Y_s = 1 - \left\{ \frac{\phi}{\rho/\rho_{th}} \right\}^{1/3} \quad \text{สมการ 6.1}$$

นอกจากนี้ จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำค่าการหดตัวของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (moulding shrinkage, δ_m) และค่าการหดตัวของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก (sintering shrinkage,

δ_s) จากสมการ 2.4 – 2.7 มาคำนวณค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงาน (oversize design factor, Z) เพื่อใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผงวัสดุ ดังสมการ 6.2 – 6.3 [2-3]

$$Z = \frac{1}{1-\delta} \quad \text{สมการ 6.2}$$

$$Z_{\text{total}} = Z_{\text{ms}} = Z_m \times Z_s \quad \text{สมการ 6.3}$$

โดยที่

Z_{ms} คือ ค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงานทั้งหมด (total oversize design factor)

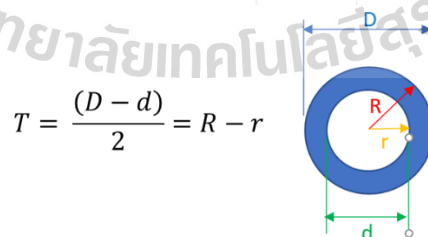
Z_m คือ ค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงานฉีดขึ้นรูป (moulding oversize design factor)

Z_s คือ ค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงานเผาผนึก (sintering oversize design factor)

ดังนั้น จะสามารถหาขนาดหรือมิติของชิ้นงานเริ่มต้นสำหรับสร้างแม่พิมพ์ (L_i) จากขนาดชิ้นงานจริง (L) ที่ต้องการได้จากสมการ 6.4

$$L_i = Z_{\text{ms}} L \quad \text{สมการ 6.4}$$

สำหรับกรณีการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เตรียมที่ส่วนผสมเม็ดที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง เผาผนึกที่อุณหภูมิ 655 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง จะสามารถคำนวณหาตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดเพื่อนำมาออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปได้ โดยหากพิจารณาจากค่าการหดตัวของชิ้นงานในมิติความหนา (t) ของชิ้นงาน หรือนั่นคือ $(D-d)/2$ หรือ $R-r$ ดังรูปที่ 6.1 โดยค่าการหดตัวของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปคำนวณได้จากการวัดขนาดความหนาของชิ้นงาน (t) เปรียบเทียบกับขนาดความหนา (T) วัดจากโพรงแบบรูปทรง torus ของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปด้วยกล้องสเตอริโอ รุ่น Leica EZ4D และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ LAS EZ เพื่อนำมาคำนวณค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงานทั้งหมดจากสมการ 6.3 ดังแสดงสรุปในตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ขนาดความหนา (T) ของรูปทรง torus ในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผงวัสดุ

ตารางที่ 6.1 ค่าการหดตัวและค่าตัวประกอบการออกแบบเพื่อขนาดชิ้นงาน

% solid loading	δ_m	δ_s	Z_m	Z_s	Z_{ms}
55	0.0145	0.2262	1.0147	1.2923	1.3113
60	0.0067	0.2221	1.0067	1.2855	1.2942

จากข้อมูลสรุปในตารางที่ 6.1 พบว่า ค่าการหดตัวเนื่องจากการฉีดขึ้นรูปนั้น มีค่าน้อยกว่าค่าการหดตัวจากการเผาพริก และค่าการหดตัวของชิ้นงานเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะมากกว่าชิ้นงานเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ซึ่งเนื่องมาจากปริมาณของสารยึดที่มากกว่านั่นเอง และเมื่อพิจารณาการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง จะมีค่าการหดตัวเนื่องจากการฉีดขึ้นรูป (δ_m) และจากการเผาพริก (δ_s) ที่ 0.0145 และ 0.2262 ตามลำดับ และเมื่อนำมาคำนวณค่าตัวประกอบการเผื่อขนาดจากการฉีดขึ้นรูป (Z_m) และจากการเผาพริก (Z_s) ได้ 1.0147 และ 1.2923 ตามลำดับ ซึ่งได้ค่าตัวประกอบการออกแบบเผื่อขนาดชิ้นงานทั้งหมด (Z_{ms}) เท่ากับ 1.3113 เป็นต้น

ดังนั้น สำหรับชิ้นงานอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เผาพริกที่อุณหภูมิ 655 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ที่ทดลองศึกษาการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุนี้สามารถหาขนาดของชิ้นงานเริ่มต้น (L_i) สำหรับการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเตรียมจากส่วนผสมเม็ดที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง เพื่อให้มีขนาดสุดท้ายที่ต้องการเท่ากับ L ดังสมการที่ 6.5 และ 6.6 ตามลำดับ

$$L_i (55 \% SL) = 1.3113L \quad \text{สมการ 6.5}$$

$$L_i (60 \% SL) = 1.2942L \quad \text{สมการ 6.6}$$

ดังนั้น จากการพัฒนาและสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปแนวอนขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการขับเคลื่อนด้วยสกรูนี้ สามารถใช้ในการผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กที่ทำจากโลหะและผงวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับ การฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบชนิดเดียวกันด้วยเครื่องมือฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง ระบบนิวมาติก ที่พัฒนา ก่อนหน้านั้น พบว่า การฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องมือฉีดขึ้นรูปผงวัสดุแนวอนขับเคลื่อนด้วยสกรูและมอเตอร์ จะให้ชิ้นงานมีโครงสร้างจุลภาคสม่ำเสมอ รวมถึงมีค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน แต่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนและฉีดขึ้นรูปได้รวดเร็วและต่อเนื่องกว่า [4]

และจากผลการวิจัยนี้ สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาการผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กที่มีรูปทรงซับซ้อน โดยพัฒนาปรับปรุงสูตรส่วนผสมเม็ดให้เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และทางการแพทย์ เป็นต้น

6.2 บทสรุป

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการออกแบบพัฒนาและสร้างเครื่องมือฉีดขึ้นรูปผงวัสดุแนวอนขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการขับเคลื่อนด้วยสกรู พบว่าสามารถฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ได้ดีและต่อเนื่อง โดยสามารถสรุปผลกระทบของตัวแปรในการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุ ซึ่งประกอบไปด้วย i) อุณหภูมิการฉีดขึ้นรูป ii) ความเร็วการฉีดขึ้นรูป iii) อุณหภูมิแม่พิมพ์ และ iv) เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ต่อความสามารถในการฉีดขึ้นรูปและสมบัติของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปและเผาพริก และการออกแบบแม่พิมพ์ได้ดังต่อไปนี้

สภาวะการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดคือ การฉีดขึ้นรูปโดยใช้ส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ควบคุมอุณหภูมิการฉีดขึ้นรูป (วัดที่ผนังห้องอัด) ที่ 290 – 300 องศาเซลเซียส ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป 1800 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 80 - 90 องศาเซลเซียส

การฉีดขึ้นรูปที่ความเร็ว 1600 และ 1800 รอบต่อนาที ให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก แต่หากฉีดขึ้นรูปที่ความเร็วต่ำกว่า 1600 รอบต่อนาที จะทำให้ไม่สามารถฉีดขึ้นรูปแม่พิมพ์ torus จำนวน 4 โพรงแบบ ได้เต็มแบบ

การควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ที่ 80 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุ และการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายและไม่ติดแม่พิมพ์ การใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำกว่า 75 องศาเซลเซียส จะไม่สามารถฉีดขึ้นรูปได้เต็มแบบ

การฉีดขึ้นรูปโดยใช้ส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ให้โครงสร้างจุลภาค ภายหลังจากเผาพูนที่สม่ำเสมอ โดยส่วนผสมเม็ดเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มีสมบัติที่ดีว่า คือ ค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 2.80 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี และมีค่าความแข็งวิกเกอร์สแบบจุลภาคสูงสุด 125.2 Hv เมื่อพิจารณาที่การฉีดขึ้นรูปด้วยความเร็ว 1800 รอบต่อนาที

นอกจากนี้ พบว่าชิ้นงานเตรียมที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง มีค่าการหดตัวที่น้อยกว่าชิ้นงานเตรียมที่ 55 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง เนื่องจากมีปริมาณของผงที่มากกว่า แต่มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่ค่อนข้างสูงคือ 48.5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากผ่านการเผาพูนที่เฟสของเหลว

และจากค่าการหดตัวของชิ้นงานพิจารณาที่ค่าความหนา (t) สามารถคำนวณค่าการออกแบบการเผื่อขนาด (oversize design factor, Z) ที่ 1.3113 และ 1.2942 สำหรับส่วนผสมเตรียมที่ 55 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ตามลำดับ

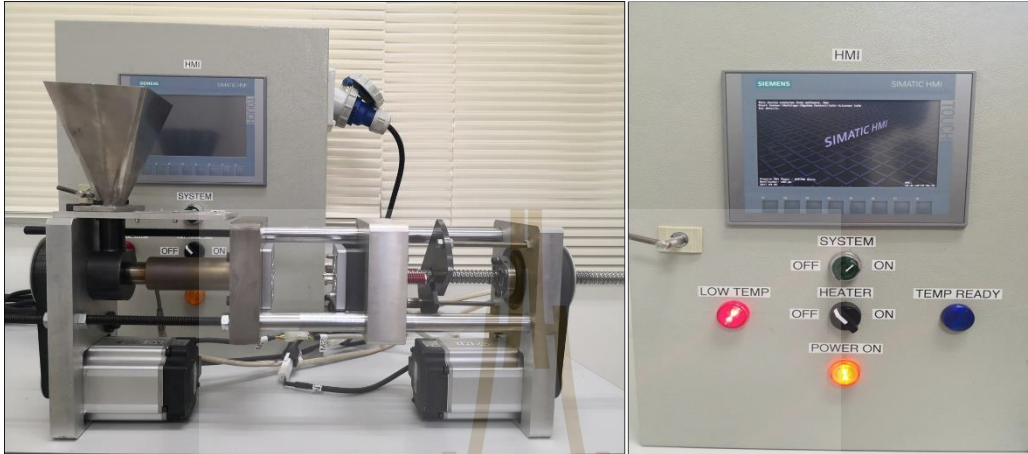
เอกสารอ้างอิง

- [1] German, R.M (2014) Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles, 1st ed. Butterworth-Heinemann, ISBN: 9780124016828, p. 544.
- [1] German, R.M. and A. Bose (1997) Injection molding of metals and ceramics. 1st ed. Vol. 1. Metal Powder Industries Federation. ISBN: 9781878954619, p. 413.
- [2] Heaney, D.F. (2012) Handbook of metal injection molding, Woodland Publishing Limited, USA, ISBN: 978-0-85709-066-9, p.636.
- [4] Patcharawit, T., et al., Powder Injection Molding of 20-40 Vol. % Silicon Carbide Particulate-Reinforced Aluminum Composites. Applied Mechanics and Materials, 2013. 376: p. 17-22.

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องมือฉีดขึ้นรูปวัสดุผงแนวนอนขนาดเล็กสำหรับห้องปฏิบัติการ
(small-scaled horizontal powder injection moulding machine)



เครื่องชั่งน้ำหนัก 3 ตำแหน่ง (3 digit scale)



หม้อบด (ball mill)



เตาอบไฟฟ้า (electric furnace)

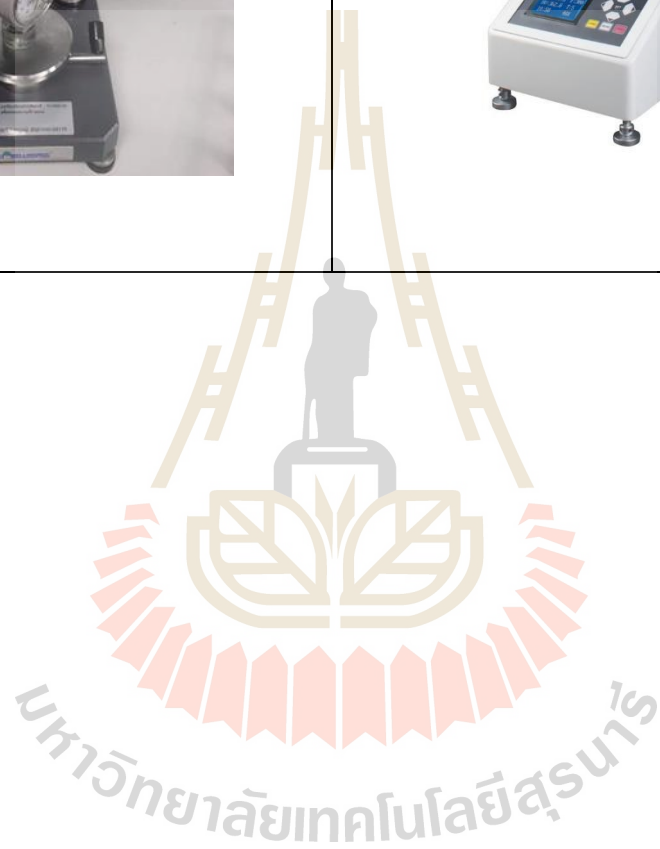


เตาเผาท่อ (tube furnace)



<p>เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (laser particle size analyzer)</p>	<p>เครื่องขัดหยาบ-ละเอียด สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค</p>
	
<p>กล้องสเตอริโอ (Stereoscope: Leica Microsystems EZ4)</p>	<p>กล้องจุลทรรศน์แบบแสง + ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (Optical Microscope + Image analyzer)</p>
	
<p>เครื่องมือวิเคราะห์ XRF</p>	<p>กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด+ อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (model: JEOL-JSM 6061LV)</p>
	

<p>เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบสเกลชอร์ (Shore scale hardness tester)</p>	<p>เครื่องมือทดสอบความแข็งวิกเกอร์สแบบจุลภาค (micro Vickers hardness tester)</p>
 <p>A Shore scale hardness tester, which is a mechanical device used to measure the hardness of materials. It features a cylindrical indenter at the top, a spring mechanism, and a dial gauge at the bottom to measure the depth of the indentation.</p>	 <p>A micro Vickers hardness tester, which is a precision instrument used for measuring the hardness of small, thin, and brittle materials. It consists of a microscope, a diamond indenter, and a base with a digital display for reading the hardness values.</p>



ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ(ภาษาไทย) นางสาวฐาปณีย์ พัชรวิชญ์

(ภาษาอังกฤษ) Miss Tapany Patcharawit

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงาน สำนักวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ (044)-224483 โทรสาร (044)-224482 E-mail tapany@sut.ac.th

ประวัติการศึกษา

2001-2005 Ph.D. (Metallurgy and Materials) The University of Birmingham, UK

2000-2001 M.Phil. (The Science and Engineering in Materials)

The University of Birmingham, UK

1993-1996 B.Sc. (Materials Science) Chulalongkorn University, Thailand

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การทดสอบเชิงกลในวัสดุ กลศาสตร์การแตกหัก กลไกการแตกหัก การศึกษาพื้นผิวการแตกหัก

การทดสอบการสึกหรอ การวิเคราะห์กลไกการสึกหรอ

การวิเคราะห์ทางกายภาพ การวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างจุลภาค

การฉีดขึ้นรูปโลหะและวัสดุผง วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม

โลหะผงวิทยาของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

การรีไซเคิลโลหะจากของเสียภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ น้ำยาชุบเงิน

ผลงานการวิจัย

1. **T. Patcharawit**, P. Thongbo, N. Sengna, P. Auttachon, N. Chuankrekkul, Powder Injection Moulding and Liquid Phase Sintering of Aluminium - SiC Particulate Composite' in 2021 10th International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials (ICAMEM2021), 29-30 May 2021, Bangkok, Thailand
2. **T. Patcharawit**, A. Ngeekoh, and N. Chuankrekkul, Phase Evolution - Property Relationships of PIMed 5 - 40 Vol.% SiC_p - Reinforced Aluminium Composite, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 600 (2019) 012014 IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/600/1/012014.
3. **T. Patcharawit**, A. Ngeekoh, U. Kitkhamthorn, and N. Chuankrekkul, (2018). Liquid-Phase Sintering and Properties of PIMed 10-20 vol.% SiC_p-Reinforced Aluminium Composites. In the 2018 3rd International Conference on Design, Mechanical and Material Engineering (D2ME 2018). RMIT University, AUT University, Swinburne University of Technology, The Australian National University and Hong Kong Society of Mechanical Engineers. September, 27-29, 2018, Deevana Plaza Phuket, Thailand.

4. **T. Patcharawit**, A. Ngeekoh and N. Chuankrekul, Wear Properties of 10 vol.% Silicon Carbide Particulate-Reinforced Aluminum Composite Fabricated by Powder Injection Molding, The International Conference on Materials and Intelligent Manufacturing (ICMIM 2017), National University of Singapore, Singapore, 21-23 August 2017.
5. **T. Patcharawit**, A. Ngeekoa, W. Tongkerd, S. Takhampom, S. Lapkeaw and N. Chuankrerkkul, Mechanical Properties of As-Exposed Al-SiC_p Composite Fabricated by Powder Injection Moulding, Key Engineering Materials, Vol. 751, 2017, p. 60-69.
6. A. Ngeekoh, V. Thongnoppakoon, A. Changlor, T. Jindangam, N. Phongreed, **T. Patcharawit**, N. Chuankrerkkul, Microstructure and phase analysis of precipitated hardened silicon carbide particulate-reinforced aluminium composite fabricated by PIM, Proceedings of the 41st Congress on Science and Technology of Thailand (STT41), 6-8 November, 2015, Suranaree University of Technology, Thailand. P.293-299.
7. **T. Patcharawit**, V. Thongnoppakoon, A. Changlor, T. Jindangam, N. Phongreed and N. Chuankrerkkul, Effects of Aluminium Alloy Powder Sizes on Aluminium Composites Fabricated by Powder Injection Moulding, Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS2014), 29th -31st December 2014, Hong Kong.
8. **T. Patcharawit**, S. Klahan, P. Rupkrathok, N. Chuankrerkkul, Effects of Mechanical Alloying on Microstructure and Properties of Powder Injection Moulded SiC_p-Reinforced Aluminium Composite, Applied Mechanics and Materials: Advance Materials Development and Applied Mechanics, Vol. 597, 2014, p. 103-108.
9. **T. Patcharawit**, B. Inpanya and N. Chuankrerkkul, Effects of Sintering on Microstructure and Hardness of Powder Injection Moulded Aluminium Composites, Int. J. Materials Engineering Innovation, Vol. 5, No.2, 2014, p. 151-158.
10. **T. Patcharawit**, P. Tongkhon, A. Wiangsamut, P. Auisungnoen, N. Chuankrerkkul, Powder Injection Molding of 20-40 Vol.% Silicon Carbide Particulate-Reinforced Aluminum Composites, Applied Mechanics and Materials, Vol. 376, 2013, p. 17-22.
11. B. Inpanya, **T. Patcharawit**, N. Chuankrerkkul, Silicon Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composite Fabricated by Powder Injection Molding, The 2nd International Conference on Process Engineering and Advanced Materials (ICPEAM2012), 12th -14th June 2012, Kuala Lumpur, Malaysia.
12. **T. Udomphol**, M. Bunma, R. Buntan, The Fabrication of Aluminium Composites via Stir-Mixed and Particulate-Injection Casting, Advanced Science Letters, Vol. 12, No. 1, June 2012 , p. 223-229(7).
13. **T. Udomphol**, B. Inpanya, N. Chuankrerkkul, Characterization of Feedstocks for Injection Molded SiC_p-Reinforced Al-4.5%Cu Composite, Advanced Materials

- Research, Vols. 383-390, 2012, p. 3234-3240.
14. M. Bunma, P. Subarporn, R. Bobuangern, T. Patthannkitdamrong, T.Thuanwong, **T. Patcharawit**, Process Parameter-Microstructure-Mechanical Property Relations of SiC_p-Reinforced Aluminum Composites Produced by Powder-Injection Casting, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol.21, No.2, 2011. p. 85-93.
 15. R. Buntan, D. Phuenchomphu, P. Sukmoung, K. Doomao, O. Anunapiwat, **T. Patcharawit**, Mechanical Properties of Stir-Mixed SiC_p-Reinforced Aluminium Composites, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol.21, No.2, 2011. p. 73-83.
 16. **T. Udomphol**, R. Borisutthekul, U. Kitkamthorn, P. Buahombura, T. Witchanantakul, N. Akkarapattanagoon, Effects of %CE on microstructure and hardness of cast irons, The 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET- 2011), May 2011, Phuket, Thailand.
 17. M. Kaewnopparat, and **T. Udomphol**, Investigation of Leak Problems in Automotive Aluminium Alloy Die Casting Via Metallurgical Analysis, 6th MSAT, Miracle Hotel, Bangkok, August 2010.
 18. K. Thongbai, P. Wichai, P. Mujalin, T. Somsan, P. Buahombura, R. Borrisutthekul, and **T. Udomphol**, Microstructure-mechanical property relations of compacted graphite cast iron The 3rd TMETC, Century Park Hotel, Bangkok, October 2009.
 19. **T. Udomphol**, and P. Bowen, Microstructure and mechanical properties of electron beam and tungsten inert gas welded burn resistant (BuRTi) Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C alloy, PMPIII, TMS, August 2009, Thailand.
 20. T. Kumma, K. Teeratpong, A. Sritong, N. Liamdee, **T. Udomphol**, On the relationship between specimen thickness and graphite morphology of compacted graphite cast iron (CGI), 2nd TMETC, Century Park Hotel, October 2008.
 21. **T. Udomphol**, and P. Bowen, Micromechanisms of fracture in burn resistant Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C alloy, *Ti-2003 Science and Technology: 10th World Conference on Titanium*, 2003, Hamburg, Germany, Lutjering, G., Abrecht, J., WILEY-VCH, Vol.5, p. 2829-2836.
 22. **T. Udomphol**, M. Wenman, W. Voice, and P. Bowen, Mechanical properties and fracture mechanisms of burn resistant Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C alloys, digital edition, *ICF:11th International Conference on Fracture*, Carpinteri, A., Mai, Y.W., Ritchie, R.O., Ferro, G. Turino, Italy, 2005.