



การพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมเพื่อ
ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

**Development of a High Pressure Centrifugal Infiltration Process for Fabrication
of Aluminum Matrix Composites**

นริศ จุสกรณ์

Naris Jussakorn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Manufacturing Engineering
Prince of Songkla University**

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการ
 แทรกซึมเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

ผู้เขียน นายนริศ จุสกรณ์

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล)

.....กรรมการ
 (ดร.อานอบ ก้นทะชา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
 การผลิต

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
ผู้เขียน	นายนิริศ จุสกรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminum Matrix Composite, AMC) โดยใช้โลหะอะลูมิเนียม เกรด A356 เป็นเนื้อหลัก (Matrix) และซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วย การออกแบบและจัดสร้างชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง การอัดขึ้นรูปซิลิคอนคาร์ไบด์เพื่อใช้สำหรับเสริมแรงอะลูมิเนียม และการทดสอบสมบัติของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้จากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ 13.5, 25, 68 และ 100 μm ซึ่งหลังจากการอัดขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปขึ้นรูปด้วยการหล่อเหวี่ยง ที่ความเร็ว 1,800 rpm (แรงดัน 4.26 MPa) เพื่อเสริมแรงในเนื้ออะลูมิเนียม ซึ่งผลการขึ้นรูปและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคพบว่าโลหะอะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ ได้ ในทุกขนาดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบค่าความหนาแน่นรวม ค่าความแข็ง และค่าความต้านทานการสึกหรอ พบว่า ชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 100 μm มีค่าความหนาแน่นรวมและ ค่าความแข็งสูงสุด แต่มีค่าความต้านทานการสึกหรอต่ำที่สุด ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 13.5 μm มีค่าความหนาแน่นรวมและค่าความแข็งต่ำที่สุด แต่มีค่าความต้านทานการสึกหรอสูงที่สุด นอกจากนี้ในโครงการวิจัยนี้ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลของแรงดันน้ำโลหะต่อการแทรกซึมของโลหะอะลูมิเนียมในผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 100 μm ซึ่งผลการทดลองพบว่าโลหะอะลูมิเนียมจะสามารถแทรกซึมเข้าไประหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ ก็ต่อเมื่อค่าแรงดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมต้องมีค่ามากกว่าแรงดันเริ่มต้น (Threshold pressure) หรือแรงต้านภายในของช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถคำนวณได้จากทฤษฎี

Thesis Title	Development of a high pressure centrifugal infiltration process for fabrication of aluminum matrix composites.
Author	Mr. Naris Jussakorn
Major	Manufacturing Engineering
Academic Year	2009

Abstract

This thesis presents the development of a high pressure centrifugal infiltration process for fabrication of aluminum matrix composites using the aluminum grade A356 as the matrix and silicon carbide (SiC) as the reinforcing material. The research method includes the design and production of the high pressure centrifugal casting system, the production of SiC preforms for reinforcing aluminum and the property testing of the aluminum matrix composite (AMC). AMC is produced by the high pressure centrifugal casting process using four SiC particles size are 13.5, 25, 68, 100 μm at the rotation speed of 1,800 rpm (4.26 MPa) . The results of the microstructure study show that molten aluminum can infiltrate in small gap between particles of SiC preforms part. AMC of SiC 100 μm has the highest bulk density and hardness but the lowest wear resistance. On the other hand, AMC of 13.5 μm has the lowest bulk density and hardness but the highest wear resistance. This thesis also studied the effects of the molten aluminum pressures on the infiltration value using 100 μm of SiC as a reinforcement. In this infiltration study, the results show that the molten aluminum pressure values must be higher than the threshold pressure (resistance force due to capillary pressure), which can be calculated using a threshold pressure equation derived from a theory.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง สำหรับการแทรกซึมเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยคำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และการตรวจแก้ไขจุดบกพร่อง ตลอดจนการติดตามสอบถามความก้าวหน้าจาก คณาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรณสินธุ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชัช ปลูกผล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคณะอาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกท่านที่ได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และให้ความร่วมมือต่างๆเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้งบประมาณอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณทีมวิจัยโลหะกึ่งของแข็ง ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งได้ให้ข้าพเจ้าได้ใช้สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยโลหะกึ่งของแข็ง เพื่อทดลองงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และสละเวลามาดูแลช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆภายในศูนย์ฯ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลามาทำการสอบ พร้อมให้คำแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณนายอานนท์ ศรีพรหม นายนิธิเศรษฐ เพชรจุก นายรอมฎอน นูระพาและเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและสโมสรมนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยเหลือแนะนำและเป็นທີ່ปรึกษาที่ดีในทุกโอกาส

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างสูงสุด สำหรับคุณพ่ออนุรักษ์, คุณแม่สุวรรณ และน้องชายนายธนธร จุสกรณ์ ที่ได้ให้กำลังใจและส่งเสริมในเรื่องต่าง ๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์นี้

นริศ จุสกรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(12)
รายการรูป	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(24)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1.1 รายละเอียดของวัสดุผสม	3
2.1.1.1 โครงสร้างและสมบัติของวัสดุผสม	4
2.1.1.2 ชนิดของวัสดุผสม	5
2.1.1.3 ตัวอย่างประโยชน์และการนำไปใช้งานของวัสดุผสมเนื้อโลหะ	5
2.2 วิธีหลักๆ ในการผลิตโลหะผสม	7
2.2.1 การหล่อโลหะแบบเหวี่ยง (Centrifugal casting)	7
2.2.2 การกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (Squeeze casting)	8
2.2.3 การแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ (Spontaneous infiltration)	9
2.2.4 การแทรกซึมโดยความดันก๊าซ (Gas pressure infiltration)	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวกับชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อ โลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง	12
2.3.1 รูปแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อ โลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Edge V.16	12
2.3.1.1 ชั้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ	13
2.3.1.2 ชั้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ	13
2.3.1.3 ชั้นส่วนแม่พิมพ์	14
2.3.2 ค่าความดันของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ	15
2.3.3 ค่าความดันเริ่มต้น (Threshold pressure, P_{th})	15
2.3.4 ค่าความดันสูงสุด (Maximum pressure, P_{max})	16
2.3.5 ค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง ($\sigma_{centrifugal}$) ที่เกิดจากแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกแนวหนีศูนย์กลาง	16
2.3.6 ค่าความเค้นน้ำหนักรวม ($\sigma_{totalweight}$) ที่เกิดจากแรงน้ำหนัก (Weight)	17
2.3.7 ความเค้นจากการดัดโค้ง ($\sigma_{bending}$)	18
2.4 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection Heat Transfer)	19
2.5 เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification Time)	19
2.6 วิธีการทดสอบและตรวจสอบวัสดุผสมเนื้อโลหะ	21
2.6.1 การตรวจสอบวัสดุผสมเนื้อโลหะ	21
2.6.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างระดับมหภาค	21
2.6.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค	22
2.6.2 การหาความหนาแน่นวัสดุผสมเนื้อโลหะ	24
2.7 ทฤษฎีการอัดขึ้นรูป	25
2.7.1 การอัดขึ้นรูปการอัดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compaction)	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. การวิเคราะห์และผลการคำนวณค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมและการออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	49
3.1 การวิเคราะห์และออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	49
3.1.1 ค่าความดันของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะ	49
3.1.2 ผลการคำนวณค่าความดันเริ่มต้น (Threshold pressure, P_{th})	50
3.1.3 ผลการคำนวณค่าความดันสูงสุด (Maximum pressure, P_{max})	52
3.1.4 ผลการคำนวณค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง ($\sigma_{centrifugal}$) ที่เกิดจากแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง ($F_{Centrifugal}$)	53
3.1.5 ผลการคำนวณค่าความเค้นน้ำหนักรวม ($\sigma_{totalweight}$) ที่เกิดจากแรงน้ำหนัก (Weight)	55
3.1.6 ผลการคำนวณค่าความเค้นจากการดัดโค้ง ($\sigma_{bending}$)	57
3.1.7 ผลการคำนวณเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification Time, t_s)	59
3.1.8 ผลการคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับสลักเกลียวสำหรับจับยึดชิ้นส่วนประกอบของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	61
3.2 สรุปผลจากการวิเคราะห์และคำนวณค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมและการออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	66
3.2.1 สรุปผลค่าความดันของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะ	
3.2.2 สรุปผลค่าความดันเริ่มต้น	67
3.2.3 สรุปผลค่าความดันสูงสุด	68
3.2.4 สรุปผลค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางที่เกิดจากแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกแนวหนีศูนย์กลาง	69
3.2.5 สรุปผลค่าความเค้นน้ำหนักรวมที่เกิดจากแรงน้ำหนัก	70
3.2.6 สรุปผลค่าความเค้นจากการดัดโค้ง	70
3.2.7 สรุปผลเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ	71

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.8 สรุปผลค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับสลักเกลียวสำหรับจับยึดชิ้นส่วนประกอบของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	72
4. วิธีการวิจัย	74
4.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	74
4.1.1 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม เกรด A356	75
4.1.2 สมบัติทางกายภาพของซิลิคอนคาร์ไบด์	76
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	78
4.2.1 เตาหลอม โลหะชนิดขดลวดความต้านทาน (Resistance furnace)	78
4.2.2 เตาเผาอุณหภูมิต่ำ	78
4.2.3 เครื่องอัดตัวอย่างไฮดรอลิกส์ (Hydraulic press machine)	79
4.2.4 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Test)	79
4.2.5 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ	80
4.2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	80
4.2.7 เครื่องขัดแบบจานคู่ (Grinder/Polisher)	81
4.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	81
4.2.9 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 2 ตำแหน่ง	82
4.2.10 เครื่องวัดอุณหภูมิและหัววัดอุณหภูมิ (Thermometer and thermocouple probe)	82
4.2.11 ชุดอุปกรณ์การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	83
4.2.12 ชุดอุปกรณ์เผาอุณหภูมิ	83
4.2.13 กรวยประคองน้ำโลหะ	84
4.2.14 เครื่องหล่อเหวี่ยง	84
4.2.15 เครื่องควบคุมความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter)	85
4.3 วิธีการดำเนินงาน	85
4.3.1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป (SiC Preform)	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1.1 ขั้นตอนการหาค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและ ชิ้นงานเซรามิกของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป	88
4.3.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	89
4.3.2.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	91
4.3.3 การทดสอบหาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	92
4.3.3.1 การคำนวณหาความหนาแน่นรวมชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	92
4.3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	93
4.3.3.3 การทดสอบวัดความแข็งชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	93
4.3.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอชิ้นงานวัสดุผสมเนื้อ อะลูมิเนียม	94
5. ผลและการอภิปรายผล	96
5.1 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	97
5.1.1 อิทธิพลของขนาดผงซิลิคอนคาร์ไบด์	103
5.1.1.1 ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้อ อะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์	104
5.1.1.2 ค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์	107
5.1.1.3 ค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ของชิ้นงานวัสดุ ผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์	110
5.1.1.4 โครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์	115
5.1.2 อิทธิพลของค่าความดันน้ำโลหะ	122
6. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	138
6.1 สรุปผลการวิจัย	138
6.2 ข้อเสนอแนะ	140

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.1 การเผาอุณหภูมิระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	140
6.2.2 การหาปะเก็น (Gasket) ที่ใช้ในการทดลองหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูง	141
บรรณานุกรม	142
ภาคผนวก ก	146
ภาคผนวก ข	151
ภาคผนวก ค	157
ภาคผนวก ง	159
ภาคผนวก จ	163
ภาคผนวก ฉ	167
ภาคผนวก ช	173
ภาคผนวก ซ	177
ประวัติผู้เขียน	180

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	สมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้อโลหะ	31
2.2	จากทฤษฎีของทากูชิแสดงให้เห็นค่าตัวแปรที่สนใจ	34
2.3	การวัดค่าสมบัติของวัสดุผสมเนื้อโลหะ ชนิด Al/SiC	36
2.4	ค่าของตัวแปรที่มีความเหมาะสมในการที่ทำให้สมบัติโมดูลัสการยืดหยุ่นมีค่าที่ดี	36
2.5	สมบัติทางกลของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ได้แทรกซึมด้วยซิลิคอน	38
2.6	ค่าความดันเริ่มต้นสำหรับการแทรกซึมจากการทดลองและการคำนวณ	42
3.1	ผลคำนวณหาค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในชั้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ	50
3.2	ผลการคำนวณหาค่าความดันเริ่มต้น	51
3.3	ผลคำนวณหาค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ในต่อทางวงน้ำโลหะ	52
3.4	ผลคำนวณหาค่าแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง	53
3.5	ผลคำนวณหาค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางพื้นที่ 3 บริเวณของต่อทางวงน้ำโลหะ	54
3.6	ผลการคำนวณหาโมเมนต์คดของชั้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 25 mm	56
3.7	ผลการคำนวณหาความเค้นจากน้ำหนักของชั้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ	56
3.8	ผลการคำนวณหาความเค้นจากน้ำหนักรวมที่เกิดขึ้นกับชั้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ	57
3.9	ผลการคำนวณหาความเค้นจากการตัดโค้งที่เกิดขึ้นกับพื้นที่หน้าแปลนของชั้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อกับชั้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ	58
3.10	ผลคำนวณหาค่าเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว	60
3.11	ผลคำนวณหาค่าระยะเวลาที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเคลื่อนตัวเข้าไปในชั้นส่วนแม่พิมพ์	61
4.1	สมบัติของอะลูมิเนียม เกรด A356-T61	75
4.2	สมบัติของซิลิคอนคาร์ไบด์	77

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.1 ตัวอย่างผลการหาค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก (a) SiC ขนาด 13.5 μm (b) SiC ขนาด 25 μm	100
5.2 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง 5 จุดตรวจสอบ กรณีวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ที่ค่าความ ดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวขนาดต่างๆ	102
5.3 ค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ความดันของน้ำโลหะ อะลูมิเนียมเหลวจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)	104
5.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียม เหลวจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)	107
5.5 น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมและอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ 5 ช่วงเวลา ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)	111
5.6 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้อ อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ 5 ช่วงเวลา ที่ความดันน้ำโลหะ อะลูมิเนียมเหลวจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)	111
5.7 ผลการคำนวณหาค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเทียบกับร้อยละของ ระยะทางในการเข้าแทรกซึมในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเพื่อผลิตวัสดุผสม เนื้ออะลูมิเนียม	122
5.8 สรุปผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผง ซิลิคอนคาร์ไบด์	135
5.9 ผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงาน วิจัยผู้อื่น	136
ฉ1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	170
ช1 สมบัติของปะเก็น (gasket) ชนิด non-asbestos 350 - 550°C แบบ thermopak 400	174
ช2 สมบัติของปะเก็น (gasket) ชนิด non-asbestos 350 - 550°C แบบ thermopak 200	175
ช3 สมบัติของปะเก็น (gasket) ชนิด non-asbestos 350 - 550°C แบบ thermopak 400 (Chemie & Oil)	176

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ซ1	ค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมต่อ 1 ครั้ง ของการทดลองวิจัย กระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง	179

รายการรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วัสดุผสมซึ่งผลิตมาจากวัสดุหลักทั้งสามกลุ่ม	4
2.2	โครงสร้างกึ่งกลางลำตัวของกระสวยอวกาศซึ่งแสดงให้เห็นถึงท่อโลหะผสมโบรอนและอะลูมิเนียม	6
2.3	ตัวอย่างการใช้ประโยชน์วัสดุผสมเนื้อโลหะ (a) แผ่นโลหะของเส้นใยแกรไฟต์ชนิด P100 ในอะลูมิเนียมเกรด 6061 (b) แผ่นขยายสัญญาณกระสวยอวกาศ	6
2.4	การหล่อโลหะแบบเหวี่ยง	8
2.5	การหล่อโลหะวัสดุผสมเนื้อโลหะแบบการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (a) หลักการหล่อแบบการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (b) ส่วนประกอบของแม่พิมพ์	9
2.6	การหล่อวัสดุผสมเนื้อโลหะแบบการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ	10
2.7	การหล่อวัสดุผสมเนื้อโลหะแบบการแทรกซึมโดยความดันก๊าซ	11
2.8	รูปแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงออกแบบโดยโปรแกรม Solid Edge V.16	12
2.9	ชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงออกแบบโดยโปรแกรม Solid Edge V.16	13
2.10	ชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ออกแบบโดยโปรแกรม Solid Edge V.16	14
2.11	ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่สำหรับไว้ใส่ชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Edge V.16	15
2.12	ภาชนะน้ำหนักที่กระทำต่อชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ	18
2.13	กราฟรูปแบบของการเย็นตัว (a) Sand casting (b) Die casting	20
2.14	ภาพกล้องจุลทรรศน์	22
2.15	หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์	23
2.16	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกล้องส่องกราด	23

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.17	การเปรียบเทียบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกับกล้องขยายแบบธรรมดาทั่วไป	24
2.18	ตัวอย่างของภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	24
2.19	ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่นแสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น	25
2.20	ขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลดปริมาตรระหว่างอนุภาคเมื่อแรงอัดสูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาค	26
2.21	ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในวัฏจักรการอัดแน่นผง	27
2.22	แผนผังของเครื่องมือที่ใช้ในการกำเนิดแรงหมุนเหวี่ยงสำหรับการแทรกซึมของอะลูมิเนียม	28
2.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางในการเข้าแทรกซึม	29
2.24	โครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้อโลหะจากการเหวี่ยง	29
2.25	การกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรง B ₄ C ในโลหะเนื้อหลักด้วยวิธีการผลิตแบบการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว	30
2.26	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ 3 สมบัติของวัสดุผสมเนื้อโลหะที่มีโลหะชนิด ZA-27 เป็นเนื้อหลัก	31
2.27	แผนผังของ (a) หลักการของเทคนิคการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง (b) การประกอบแม่พิมพ์	32
2.28	แผนผังของ (a) หลักการของเทคนิคการหล่อโลหะแบบกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (b) การประกอบแม่พิมพ์	32
2.29	ภาพร่างแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในการเข้าแทรกซึมของกรณีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง	33
2.30	ระยะของวัสดุผสมเนื้อโลหะเปรียบเทียบกับเวลาในการเข้าแทรกซึมของทั้งสองกรณีการหล่อโลหะ	33
2.31	ค่าความดันที่น้อยที่สุดที่ใช้ในสภาวะการเข้าแทรกซึมของงานในครั้งนี้	35

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.32	แผนผังของวิธีการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ	37
2.33	ภาพถ่ายของชิ้นงานจากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง ซึ่งแสดงให้เห็นบริเวณต่างๆ ตามทิศทางแนวยาว	39
2.34	ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของ วัสดุผสม Al-B เสริมแรงด้วย 5 wt.% B ของการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง	39
2.35	การวัดความแข็งแบบร็อคเวลด์ 15 W บนระนาบแนวขวาง	40
2.36	ภาพวาดแผนผังของ (a) กระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงธรรมดา (b) กระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง	40
2.37	แผนผังของ (a) ชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูปและแม่พิมพ์ (b) ระบบท่อทางวิ่งน้ำโลหะ และแม่พิมพ์ (c) ระบบการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง	41
2.38	ค่าความแข็งแรงในการดึงสูงสุดสำหรับวัสดุผสมเนื้อโลหะชนิด RZ5DF-14 vol.% Saffil ของแต่ละค่าความดันและอุณหภูมิของเซรามิกอัดขึ้นรูป	43
2.39	ภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้า วัสดุผสมเนื้อโลหะชนิด RZ5DF-14 vol.% Saffil ที่กรณีอุณหภูมิเซรามิกอัดขึ้นรูป (i) 400 °C (ii) 600°C ตามลำดับ	43
2.40	แผนภาพการทำงานของเครื่องมือกระบวนการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว	44
2.41	ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม เกรด 6061 และเสริมแรง ด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 30% ซึ่งถูกผลิตด้วยวิธีกระบวนการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว	45
2.42	ค่ามวลที่หายไปจากการทดสอบความสึกหรอแบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของ วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม เกรด 6061 เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์และเหล็กหล่อ เทาประเภท pearlitic cast iron เทียบกับระยะทางในการสไลด์ด้วยสภาวะโหลด น้ำหนัก 10 kg อัตราการสไลด์ 17 cms ⁻¹	46
2.43	ภาพแผนผังเครื่องมือของวิธีการแทรกซึมโดยความดันต่ำ	46

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.44	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยโครงข่ายซิลิคอนคาร์ไบด์ 3 มิติ แสดงรูปแบบอะลูมิเนียมและนิกเกิล ส่วนยูเทคติกในเนื้อหลัก	47
3.1	ความเค้นที่เกิดขึ้นในพื้นที่ 3 บริเวณของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ	54
3.2	ภาชนะน้ำหนักที่กระทำต่อชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะทรงตัน	55
3.3	การกระจายตัวของภาชนะน้ำหนักของรูปแบบบรรจุทุกบนคานยื่น	56
3.4	ค่าความเค้นจากการตัด โค้งกระทำต่อพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นการหมุนเหวี่ยง	58
3.5	ภาพประกอบรัศมีภายในรัศมีภายนอกและบริเวณที่เกิดค่าความเค้นจากการตัด โค้งของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ	59
3.6	ขนาดของหน้าแปลนและขนาดของสลักเกลียวที่ใช้	62
3.7	ลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของสลักเกลียว	63
3.8	องค์ประกอบการจัดยึดของสลักเกลียวที่มีปะเก็น	65
4.1	เตาหลอมโลหะชนิดขดลวดความต้านทาน	78
4.2	เตาเผาอุณหภูมิต่ำ (Lindberg/Blue Moldatherm 1100°C Box Furnace)	79
4.3	เครื่องอัดตัวอย่างไฮโดรลิกส์	79
4.4	เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบรีอเวลด์	80
4.5	อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ	80
4.6	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	81
4.7	เครื่องขัดแบบจานคู่	81
4.8	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	82
4.9	เครื่องวัดอุณหภูมิและหัววัดอุณหภูมิ	82
4.10	ชุดอุปกรณ์สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป	83
4.11	ชุดอุปกรณ์เผาอ่อน	83
4.12	กรวยประคองน้ำโลหะ	84

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 เครื่องหล่อเหวี่ยง	84
4.14 เครื่องควบคุมความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ	85
4.15 กระบวนการผสมวัตถุดิบและขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป	86
4.16 การตัดวัตถุดิบผสม (ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมกับน้ำ) ใส่ลงในเบ้าอัดขึ้นงาน	86
4.17 การนำชุดอุปกรณ์การอัดขึ้นงานที่ภายในบรรจุวัตถุดิบผสมไปเข้าเครื่องอัดไฮดรอลิกส์	87
4.18 การนำวัตถุดิบผสมที่อัดขึ้นรูปแล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	87
4.19 ตัวอย่างชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่ได้จากการผลิต (a) SiC 25, 68, 100 μm (b) SiC 13.5 μm	87
4.20 การหลอมแท่งอะลูมิเนียมเกรด A356 ในเตาหลอมโลหะไฟฟ้าชนิดขดลวดความดันทาน	90
4.21 การใช้ไฟเผาอุณหภูมิระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	90
4.22 การปิดล้อมฝาเครื่องหล่อเหวี่ยงและวางกรวยประกอบน้ำโลหะ เพื่อป้องกันอันตรายจากการหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูง	91
4.23 การร้อยลวดโลหะเหล็กขนาดใหญ่เข้าสู่สลักเกลียวที่ฐานของชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะเพื่อเป็นหูหิ้ว	92
4.24 การนำชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะใส่เข้าไปในแก้วโลหะสแตนเลส	92
4.25 ทำการกดขึ้นงานด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบรีอคเวลด์	94
4.26 การนำชิ้นงานมาทำการหล่อเรซินกับท่อประปาพีวีซี	95
4.27 การนำชิ้นงานมาประกอบกับอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความดันทานต่อการสึกหรอและจับยึดกับเครื่องขัดแบบจานคู่ พร้อมกับการถ่วงด้วยโหลดน้ำหนัก 1.5 kg	95
4.28 เปิดเครื่องขัดแบบจานคู่ทำการขัดกับกระดาษทรายเบอร์ 150 C.C. ใช้โหลดน้ำหนักถ่วง 1.5 kg ความเร็วในการหมุนขัด 252 rpm พร้อมฉีดน้ำเพื่อการหล่อลื่น	95

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.1	ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (a) ชิ้นงานที่ได้หลังการทดลองก่อนการกลึงปอกเซรามิกเคลือบออก (b) ชิ้นงานหลังการทดลองหลังจากการกลึงปอกเซรามิกเคลือบออก กรณี SiC 100 μm ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม 4.26 MPa	96
5.2	จุดตรวจสอบ 5 จุด ที่ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและหัววัดอุณหภูมิมาทำการวัดอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	98
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างจุดตรวจสอบ 5 จุด และอุณหภูมิที่วัดค่าชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงได้โดยเครื่องวัดอุณหภูมิ กรณีวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm	99
5.4	ลักษณะของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ความดันจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm) (a) AMC 13.5 μm (b) 25 μm (c) 68 μm (d) 100 μm	103
5.5	ค่าความหนาแน่นรวมเทียบกับชนิดของชิ้นทดสอบชนิดต่างๆ	105
5.6	ค่าร้อยละความพรุนเทียบกับชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 4 ขนาด	105
5.7	ค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลังจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)	108
5.8	การเปรียบเทียบระหว่างค่าร้อยละของน้ำหนักรที่หายไปกับเวลา (นาท) ของการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอที่ความดันจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm) (a) AMC 13.5, 25, 68, 100 μm (b) AMC 13.5,25,68,100 μm , Al A356 (c) Al เกรด A356	112
5.9	ภาพผิวหน้าของชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	116
5.10	ภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 μm กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	116
5.11	ภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 25 μm กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	116

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.12	ภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 68 μm กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	117
5.13	ภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	117
5.14	ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 350X (b) 5000X ตามลำดับ	117
5.15	ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ขนาด 13.5 μm จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 500X และ (b) 5000X ตามลำดับ	118
5.16	ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 25 μm จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย(a) 300X และ (b) 3000X ตามลำดับ	118
5.17	ภาพ โครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 68 μm จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 200X (b) 3000X ตามลำดับ	119
5.18	ภาพ โครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 100X (b) 3000X ตามลำดับ	119
5.19	ร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เข้าแทรกซึมในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่มีขนาดซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ที่ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงขนาดต่างๆ	124
5.20	ร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เข้าแทรกซึมในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ที่มีขนาดซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ที่ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวขนาดต่างๆ	124

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.28	ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 4.26 MPa (a) หลังการตัดและขัดให้เรียบ (b) บริเวณเนื้ออะลูมิเนียม (c) บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (d) บริเวณวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	131
ก1	แบบงานชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง แบบประกอบเสร็จ	147
ก2	แบบงานชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	148
ก3	แบบงานชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	149
ก4	แบบงานชิ้นส่วนแม่พิมพ์ของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง	150
ข1	ชุดอุปกรณ์การอัดขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป แบบประกอบเสร็จ	152
ข2	ฐานอุปกรณ์การอัดขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป	153
ข3	เป้าอัดขึ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป	154
ข4	ตัวอัดขึ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป	155
ข5	ฐานปลดชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป	156
ค1	กรวยประคองน้ำโลหะ	158
ง1	ชุดอุปกรณ์เผาอุณหภูมิแบบประกอบเสร็จ	160
ง2	ชั้นวางหัวเผา	161
ง3	ขาตั้ง	162

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A_o	พื้นที่ผิววนอก
A	พื้นที่
Al	โลหะชนิดอะลูมิเนียม (aluminum)
AMC	วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (aluminum matrix composite)
A_g	พื้นที่รับแรงกดของปะเก็น (Gasket)
A_s	พื้นที่หน้าตัดของสลักเกลียวส่วนที่ไม่มีเกลียว
A_t	พื้นที่รับความเค้น (Stress area) ของสลักเกลียว
Bulk Density	ความหนาแน่นรวมของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
C	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
c	ค่าคงที่ (constant) ในกรณี reuseable joint
CMC	วัสดุผสมเนื้อเซรามิก (ceramic matrix composite)
CN	โคออร์ดิเนชัน (Coordination)
C_p	ค่าความจุความร้อนของโลหะ
CTE	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient Thermal Expansion)
d	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสลักเกลียว
D	ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงาน
D_{gi}	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของพื้นที่รับแรงกดของปะเก็น (Gasket)
D_{go}	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของพื้นที่รับแรงกดของปะเก็น (Gasket)
D_{i1}	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
D_{i2}	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในปลายสุดของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
D_o	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
D_p	ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคเซรามิก
E	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของสลักเกลียวเหล็ก
EDX	เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง (Energy Dispersive X-ray Analyzer)
E_g	ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Young's modulus) ของปะเก็น (Gasket)
F_b	แรงดึงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียว

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

$F_{\text{Centrifugal}}$	แรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง
FRP	วัสดุผสมที่มีใยแก้วฝังอยู่ในเนื้อพลาสติก (Fiberglass Reinforced Plastic)
F_j	แรงกดที่เกิดในหน้าแปลน (joint plates)
F_i	แรงดึงที่เกิดขึ้นภายในสลักเกลียวซึ่งมีผลมาจากการขันน็อต (nut) จนแน่น
h	ความสูงชิ้นงาน
\bar{h}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา
HB	หน่วยวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness)
H_M	ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของโลหะ
I	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยหน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ
I_1	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของทั้งชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
I_2	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยหน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะที่ต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ
k	ค่าอุปสรรคใช้น้ำหน้าหน่วย ประเภท กิโล (kilo, 10^3)
k_b	ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของสลักเกลียว
k_g	ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของข้อต่อกรณิมิปะเกิน (Gasket) รองรับ
L	ค่าระยะความยาวชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะรวมกับแม่พิมพ์ซึ่งตั้งฉากกับน้ำหนัก
l_c	ค่าระยะจากจุดหมุนถึงจุดเซนทรอยด์
L_r	ค่าระยะจากจุดหมุนถึงปลายสุดชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
L_2	ระดับของน้ำโลหะในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
LPG	ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas)
L_s	ระยะในการจับยึด (clamp) ส่วนที่ไม่เป็นเกลียวของความหนา
L_t	ระยะในการจับยึด (clamp) ส่วนที่เป็นเกลียวของความหนา
L_T	ค่าระยะความยาวชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
$L_{T/2}$	ค่าระยะความยาวเฉลี่ยชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
M	ค่าอุปสรรคใช้น้ำหน้าหน่วย ประเภท เมกะ (mega, 10^6)
M_{Cen}	ค่าโมเมนต์ที่เกิดจากการหมุนเหวี่ยง

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

M_{bending}	ค่าโมเมนต์ค้ำ
$m_{\text{IV, T}}$	ค่ามวลรวมของน้ำโลหะและชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
$m_{\text{Al, T}}$	ค่ามวลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมและชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
$m_{\text{T, m}}$	ค่ามวลของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและชิ้นส่วนแม่พิมพ์
m	ค่าอุปสรรคใช้น้ำหน้าหน่วย ประเภท มิลลิ (10^{-3})
MMC	วัสดุผสมเนื้อโลหะ (metal matrix composite)
OM	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopes)
P	น้ำหนักรวมของทั้งชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและชิ้นส่วนแม่พิมพ์
p	แรงดึงที่เกิดจากการหมุนเหวี่ยง
Pa	ปาสคาล คือหน่วยวัดของความดัน ซึ่งเป็นหน่วย SI unit
P_c	ค่าความดันของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
P_{max}	ค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ
PMC	วัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ (polymer matrix composite)
PVC	ท่อประปาพีวีซี (Poly vinyl chloride)
P_{th}	ค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิก
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน
r_{11}	ค่ารัศมีภายในของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งของน้ำโลหะ
r_{12}	ค่ารัศมีภายในปลายสุดของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะที่ประกบกับชิ้นส่วนแม่พิมพ์
RHB	หน่วยวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness)
r_o	ค่ารัศมีภายนอกของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ
ROM	กฎของการผสม (rule of mixtures)
rpm	หน่วยวัดความเร็วรอบของการหมุนเหวี่ยงประเภทรอบต่อนาที (revolutions per minute)
SAE	สมาคมวิศวกรรถยนต์ (Society of Automotive Engineer)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
SF_u	ค่าปัจจัยความปลอดภัย (Safety factor)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

SiC	เซรามิกชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide)
S _p	ค่าการหาจุดยึดด้วยกราฟ (proof strength) ของสลักเกลียวตาม SAE Standard J1199
S _y	ค่ากำลังคราก (Yield strength) ของตารางมาตรฐานความแข็งแรงของสลักเกลียวตาม SAE Class
t	ความหนาของปะเก็น (Gasket, t = 5 mm)
T _{infinity}	อุณหภูมิของไหล
T _M	อุณหภูมิของน้ำโลหะ
T _O	อุณหภูมิของเครื่องมือ
T _w	อุณหภูมิที่ผั่ง
t _r	ระยะเวลาที่น้ำโลหะเคลื่อนตัวเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์หลังจากการเทน้ำโลหะ
t _s	เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ
T _{ที่รองรับ}	ค่าอุณหภูมิที่ชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง
T _{ท่อทางวิ่ง}	ค่าอุณหภูมิที่ชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง
T _{แม่พิมพ์}	ค่าอุณหภูมิที่ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง
V	ปริมาตรชิ้นงาน
V _p	ค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูป (Preform)
$\frac{v^2}{r}$	ค่าความเร่งเชิงมุม
W	น้ำหนักของชิ้นส่วนบรรทุกแบบแผ่นมาเสมอ
W ₁	น้ำหนักของตัวอย่างที่อิมตัวด้วยน้ำซึ่งชั่งในน้ำ
W ₂	น้ำหนักของตัวอย่างแห้งซึ่งชั่งในอากาศ
W _{Dry}	น้ำหนักแห้งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
W _w	น้ำหนักของเส้นลวดในน้ำ
W _{Wet}	น้ำหนักที่ชั่งในน้ำของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
XRD	เครื่องวิเคราะห์สารประกอบในสารตัวอย่างด้วยรังสี X (X-Ray Diffraction)
10X	กำลังขยายของการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
%Infiltrated distance	ร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึม

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

%Porosity	ร้อยละความพรุนของชิ้นงาน
%weight loss	ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไป
ρ	ความหนาแน่นของน้ำโลหะ
ρ_{Al}	ความหนาแน่นของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว
$\rho_{Exp.}$	ค่าความหนาแน่นทางการทดลองของชิ้นงาน
ρ_M	ความหนาแน่นของน้ำโลหะ
ρ_m	ความหนาแน่นเฉลี่ยของตัวอย่าง
ρ_{Theory}	ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงาน
ρ_w	ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิขณะทำการวัด
$\sigma_{bending}$	ค่าความเค้นจากการดัดโค้ง
$\sigma_{Centrifugal}$	ค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง
σ_{nut}	ค่าความเค้นของสลักเกลียว
$\sigma_{totalweight}$	ค่าความเค้นจากน้ำหนักรวม
σ_u	ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ของโลหะที่นำมาใช้สร้างชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง
σ_{weight}	ค่าความเค้นที่เกิดจากน้ำหนัก (Weight, W) ที่ سقوطลงตามแรงโน้มถ่วงโลก
$\sigma_{พื้นที่ 1}$	ความเค้นบริเวณพื้นที่หน้าแปลนชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ
$\sigma_{พื้นที่ 2}$	ความเค้นที่บริเวณพื้นที่กึ่งกลางความยาวของชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะ
$\sigma_{พื้นที่ 3}$	ความเค้นบริเวณพื้นที่หน้าแปลนชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนแม่พิมพ์
ω	ค่าความเร็วรอบเชิงมุม
Ω	ความเร็วเชิงเส้นในการหมุน
$\alpha, \frac{d\omega}{dt}$	ค่าความเร่งเชิงมุม
λ	ค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลม

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

γ_{lv}	ค่าความตึงผิวหน้าของน้ำโลหะ
θ	ค่ามุมที่อนุภาคเซรามิกทำมุมในระนาบเดียวกัน
ΔT	ค่าอุณหภูมิของโลหะที่มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดปกติ
μ	ค่าอุปสรรคให้นำหน้าหน่วย ประเภท ไมโคร (10^{-6})

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

จากการที่ธุรกิจโรงงานอุตสาหกรรมมีตลาดการแข่งขันที่สูงขึ้น แต่ก็อาจเกิดข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ในการผลิตและการนำไปใช้งาน ทำให้ต้องพัฒนาและผลิตวัสดุที่สามารถใช้งานได้ตามแต่ละสถานะที่ต้องการ วัสดุผสมเนื้อโลหะนั้นมีการใช้งานในปัจจุบันที่กว้างและมีสมบัติที่เหมาะสมมากกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับโลหะธรรมดา เช่น ความแข็งแรงที่สูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่มากกว่า ในปัจจุบันนั้นได้เกิดมีวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะขึ้นอย่างมากมาย การที่จะเลือกใช้วิธีการผลิตใดก็ขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมของงาน อุตสาหกรรมที่จะนำวัสดุผสมเนื้อโลหะไปใช้งาน แต่ละวิธีก็มีผลดีและผลเสียแตกต่างกันไป เช่น การกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (Squeeze casting) เป็นวิธีการที่มีอัตราการผลิตที่สูงแต่ชิ้นงานวัสดุก็อาจเสียรูปได้ง่าย หรือการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ (Spontaneous infiltration) มีข้อจำกัดของสมบัติแต่เป็นวิธีการผลิตที่ง่าย เป็นต้น วิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง (Centrifugal casting) ซึ่งเป็นวิธีการใหม่และมีข้อเสียที่น้อยมาก การหล่อโลหะแบบเหวี่ยงเป็นวิธีที่เทน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะและใช้แรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงน้ำโลหะเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ (ภายในจะบรรจุผงเซรามิกอัดขึ้นรูปที่ใช้สำหรับเสริมแรง) ที่กำลังหมุน จนกระทั่งน้ำโลหะทำการแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคผงเซรามิกอัดขึ้นรูปและเกิดการแข็งตัวกลายเป็นวัสดุผสมเนื้อโลหะ ในการหมุนรอบแกนนั้นน้ำโลหะที่อยู่ในชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะจะถูกเหวี่ยงให้เข้าสู่ในชิ้นส่วนแม่พิมพ์หล่อโลหะด้วยความดัน โดยความดันนั้นจะถูกใช้เพื่อให้ น้ำโลหะรักษาสภาพเป็นของเหลวและมีค่าเพียงพอที่ผ่านเข้าไปแทรกซึมกับผงเซรามิกอัดขึ้นรูปที่อยู่ในชิ้นส่วนแม่พิมพ์หล่อโลหะ เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้เกิดเทคนิควิธีการแบบใหม่ของการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงคือจะใช้แรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงน้ำโลหะเข้าไปในแบบหล่อด้วยความดันสูง (High pressure centrifugal casting) โดยขณะเกิดการเหวี่ยงให้เทน้ำโลหะเข้าไปจนเต็มทั้งที่ทางเดินน้ำโลหะและแม่พิมพ์ เกิดความดันสูงซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพให้ผงเซรามิกเข้าแทรกซึมเสริมแรงโลหะดียิ่งขึ้น แต่ในขั้นต้นเทคนิควิธีนี้เคยเริ่มทดลองใช้กับโลหะดีบุก ซึ่งเป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวไม่สูงและขอบเขตการใช้งานไม่

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

จากการที่ธุรกิจโรงงานอุตสาหกรรมมีตลาดการแข่งขันที่สูงขึ้น แต่ก็อาจเกิดข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ในการผลิตและการนำไปใช้งาน ทำให้ต้องพัฒนาและผลิตวัสดุที่สามารถใช้งานได้ตามแต่ละสถานะที่ต้องการ วัสดุผสมเนื้อโลหะนั้นมีการใช้งานในปัจจุบันที่กว้างและมีสมบัติที่เหมาะสมมากกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับโลหะธรรมดา เช่น ความแข็งแรงที่สูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่มากกว่า ในปัจจุบันนั้นได้เกิดมีวิธีการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะขึ้นอย่างมากมาย การที่จะเลือกใช้วิธีการผลิตใดก็ขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมของงาน อุตสาหกรรมที่จะนำวัสดุผสมเนื้อโลหะไปใช้งาน แต่ละวิธีก็มีผลดีและผลเสียแตกต่างกันไป เช่น การกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (Squeeze casting) เป็นวิธีการที่มีอัตราการผลิตที่สูงแต่ชิ้นงานวัสดุก็อาจเสียรูปได้ง่าย หรือการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ (Spontaneous infiltration) มีข้อจำกัดของสมบัติแต่เป็นวิธีการผลิตที่ง่าย เป็นต้น วิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง (Centrifugal casting) ซึ่งเป็นวิธีการใหม่และมีข้อเสียที่น้อยมาก การหล่อโลหะแบบเหวี่ยงเป็นวิธีที่เทน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะและใช้แรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงน้ำโลหะเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ (ภายในจะบรรจุผงเซรามิกอัดขึ้นรูปที่ใช้สำหรับเสริมแรง) ที่กำลังหมุน จนกระทั่งน้ำโลหะทำการแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคผงเซรามิกอัดขึ้นรูปและเกิดการแข็งตัวกลายเป็นวัสดุผสมเนื้อโลหะ ในการหมุนรอบแกนนั้นน้ำโลหะที่อยู่ในชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะจะถูกเหวี่ยงให้เข้าสู่ในชิ้นส่วนแม่พิมพ์หล่อโลหะด้วยความดัน โดยความดันนั้นจะถูกใช้เพื่อให้ น้ำโลหะรักษาสภาพเป็นของเหลวและมีค่าเพียงพอที่ผ่านเข้าไปแทรกซึมกับผงเซรามิกอัดขึ้นรูปที่อยู่ในชิ้นส่วนแม่พิมพ์หล่อโลหะ เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้เกิดเทคนิควิธีการแบบใหม่ของการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงคือจะใช้แรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงน้ำโลหะเข้าไปในแบบหล่อด้วยความดันสูง (High pressure centrifugal casting) โดยขณะเกิดการเหวี่ยงให้เทน้ำโลหะเข้าไปจนเต็มทั้งที่ทางเดินน้ำโลหะและแม่พิมพ์ เกิดความดันสูงซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพให้ผงเซรามิกเข้าแทรกซึมเสริมแรงโลหะดียิ่งขึ้น แต่ในขั้นต้นเทคนิควิธีนี้เคยเริ่มทดลองใช้กับโลหะดีบุก ซึ่งเป็นโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวไม่สูงและขอบเขตการใช้งานไม่กว้างเท่า นั้น โลหะอะลูมิเนียมนับเป็นวัสดุทางการค้าที่มีการใช้งานที่กว้างขวางและมีอุณหภูมิ

กว้างเท่านั้น โลหะอะลูมิเนียมนับเป็นวัสดุทางการค้าที่มีการใช้งานที่กว้างขวางและมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงกว่าดีบุก การที่จะหล่อเหวี่ยงอะลูมิเนียมด้วยความดันสูงเพื่อเพิ่มสมบัติให้ดีขึ้นจึงเป็นเรื่องที่ยากมาก

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อพัฒนากระบวนการหล่อโลหะที่จะใช้กับเครื่องหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูง
- 1.2.2 เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะ (MMC) และทำการทดสอบวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความดันและขนาดของผงเซรามิก
- 1.2.3 เพื่อศึกษาถึงปัญหาต่างๆ ในการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาวิธีการผลิตต่อไป

1.3 สมมติฐานการวิจัย

สามารถพัฒนากระบวนการหล่อโลหะที่จะใช้กับเครื่องหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูงและผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษากระบวนการหล่อโลหะของเครื่องหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูง เพื่อผลิตวัสดุผสมชนิดวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถพัฒนากระบวนการหล่อแบบใหม่เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะ ที่สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมได้
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปร ปัจจัย ในการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะให้มีคุณภาพดี และเป็นตัวอย่างของการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะ เพื่อให้เกิดการพัฒนาของอุตสาหกรรมทางด้านนี้

บทที่ 2

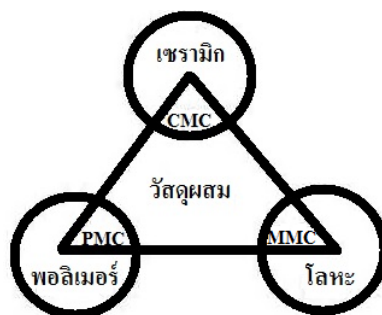
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมโดยใช้เซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) เป็นวัสดุเสริมแรงและโลหะอะลูมิเนียม (Aluminum, Al) เกรด A356 เป็นเนื้อหลัก เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminum matrix composite, AMC) ที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว, ขนาดของผงเซรามิก ซึ่งมีทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ทฤษฎีและหลักการ

2.1.1 รายละเอียดของวัสดุผสม

วัสดุผสม หรือ Composite materials เป็นของแข็งเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยวัสดุสองชนิดหรือมากกว่าในระดับมหภาค วัสดุผสมจะถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้มีสมบัติที่ดีที่สุดหรือมีคุณภาพดีที่สุด การผสมวัสดุสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิด อาจจะผสมทางกายภาพ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน วัสดุผสมที่แท้จริงจะต้องมีเนื้อหลัก (matrix) ล้อมรอบด้วยวัสดุเสริมแรง (reinforcing materials) ซึ่งเป็นที่ที่ภาค 2 ภาคกระทำต่อกันเพื่อให้มีสมบัติใหม่ที่แตกต่างกับสมบัติของ สารแต่ละสารส่วนผสมหลักในวัสดุผสมจะไม่สูญเสียสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ไป



รูปที่ 2.1 วัสดุผสมซึ่งผลิตมาจากวัสดุหลักทั้งสามกลุ่ม
ที่มา : เล็ก สีคง (2540)

จากรูปที่ 2.1 แสดงไดอะแกรมที่เป็นนิยามของวัสดุผสมชนิดต่างๆ ที่มาจากวัสดุหลักคือ เซรามิก โลหะ และพอลิเมอร์ แบ่งเป็น CMC (ceramic matrix composite) MMC (metal matrix composite) และ PMC (polymer matrix composite) ซึ่งแต่ละกลุ่มก็แบ่งเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะชนิดของการเสริมแรง เช่น ลามินาร์ (เป็นชั้น) เส้นใย และอนุภาค ตามที่กล่าว มาแล้วในขั้นต้น

2.1.1.1 โครงสร้างและสมบัติของวัสดุผสม

ตามที่กล่าวแล้วว่าสมบัติของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับโครงสร้าง สมรรถนะรวมของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับสมบัติขององค์ประกอบโดยรวม กล่าวคือ สมบัติของเส้นใย สมบัติของเมทริกซ์ สมบัติของสารเติมต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นสมบัติโดยรวมของวัสดุผสมจะเป็นไปตามกฎของการผสม (rule of mixtures, ROM) ซึ่งเป็นค่าที่รวมจากสารประกอบแต่ละตัว ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือเส้นใยและเมทริกซ์หรือเรซิน (ในกรณีของวัสดุผสมเส้นใยเสริมแรง) ตัวอย่างเช่น วัสดุผสมชนิด FRP มีเส้นใยแก้วฝังอยู่ในเนื้อพลาสติก เส้นใยแก้วจะมีความแข็งแรงในการดึงสูงมาก แต่จะเปราะไม่สามารถใช้โดยลำพังได้ในขณะที่เรซินพลาสติกจะอ่อนแอกว่าและเหนียวมาก เมื่อฝังเส้นใยแก้วในเนื้อพลาสติก ถ้ามีโหนดกระทำในทิศทางขนานกับเส้นใยที่เรียงตัวเป็นระเบียบในทิศทางเดียว องค์ประกอบทั้งสองอย่าง (เส้นใยและเมทริกซ์) จะต้านต่อโหลดพร้อมๆ กัน โดยจะเปลี่ยนรูปร่างจากการแบ่งการรับโหลด ซึ่งจะทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงมากกว่าองค์ประกอบเดี่ยวๆ

2.1.1.2 ชนิดของวัสดุผสม

การเสริมแรงในวัสดุผสมมีลักษณะต่างๆ กัน เช่น เป็นลามินาร์ (เรียงตัวเป็นชั้นๆ) เสริมแรงด้วยอนุภาคเส้นใยทออย่างต่อเนื่อง เส้นใยขนาดสั้นเป็นเกล็ด และโครงสร้างรังผึ้ง เป็นต้น การจัดแบ่งชนิดสามารถจัดเป็นกลุ่มใหญ่ๆ โดยจัดแบ่งตามชนิดของเมทริกซ์ กล่าวคือเมทริกซ์ชนิดพอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก วัสดุผสมที่มีโลหะเป็นเนื้อ (MMC) เศษส่วนปริมาตรของวัสดุเสริมแรงต่อเมทริกซ์และปฏิกิริยาระหว่างผิวหน้า (ระหว่างวัสดุเสริมแรงและเมทริกซ์) จะแสดงถึงสมบัติที่สำคัญ วัสดุผสมชนิดนี้มีเมทริกซ์เป็นโลหะและเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องหรือเส้นใยไม่ต่อเนื่องในรูปของอนุภาค วิธีสังเคราะห์วัสดุผสมที่มีโลหะเป็นเนื้อจะใช้วิธีการมาตรฐานที่ใช้กับโลหะเช่น การฉีดอัด การตี การหล่อร้อน การขึ้นรูปแบบซูปเปอร์พลาสติก โลหะวิทยาโลหะผง การปล่อยของเหลวไหลอมไหลซึม และการรีด วิธีการสมัยใหม่คือ กระบวนการ Mix alloy ซึ่งจะใช้พวยของโลหะเหลว 2 ชนิดฉีดผสมกันในห้องปิด ผลของการผสมกันของโลหะทำให้โลหะแข็งตัวอย่างรวดเร็วและได้โครงสร้างระดับจุลภาคตามต้องการ วิธีการนี้สามารถผลิตอนุภาคโบโรไซด์ขนาดนาโนสเกล (50 nm-Br) ใช้สำหรับในเมทริกซ์ทองแดง ขนาดของอนุภาคที่ขนาดใหญ่จะได้จากการควบคุมสภาวะการผสม ในกรณีนี้ทองเหลืองและบรอนซ์จะแข็งแรงขึ้นด้วยการเสริมอนุภาคโบโรไซด์ (Br)

การผสมวิสเคอร์ในวัสดุผสมที่มีโลหะเป็นเนื้อหลัก จะทำให้ได้วัสดุผสมที่มีความแข็งแรงมาก เส้นใย SiC, Al_2O_3 และ Si_3N_4 จะเสริมแรงของเนื้อโลหะต่างๆ เช่น Al, Mg, Ti และ Cu วิธีการ โลหะวิทยา โลหะผงหรือวิธีการปล่อยให้ของเหลวไหลซึม (liquid-melt infiltration methods) จะใช้สำหรับสังเคราะห์ผงโลหะละเอียดและวิสเคอร์ด้วยการผสม และทำให้แข็งตัวเพื่อผลิตองค์ประกอบ ที่มีรูปร่างใกล้เคียงกัน (เล็ก สีคง, 2540)

2.1.1.3 ตัวอย่างประโยชน์และการนำไปใช้งานของวัสดุผสมเนื้อโลหะ

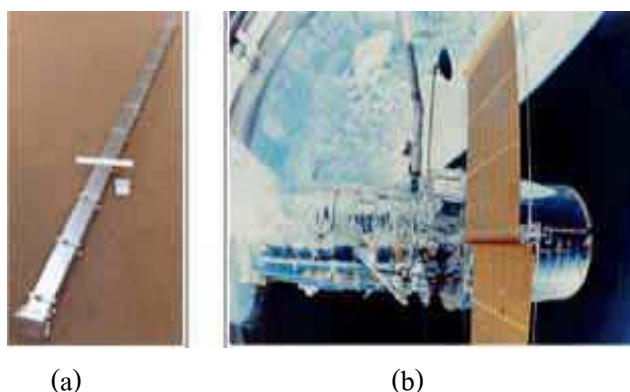
(1) โลหะผสมโบรอนและอะลูมิเนียม (B/Al) ซึ่งใช้เป็นชิ้นส่วน โครงข้อหมุนและโครงข้อยึดในส่วนกึ่งกลางลำตัวของเครื่องบินและส่วนเชื่อมระหว่างข้อเหวี่ยงเครื่องจักรกับก้านของอุปกรณ์การลงจอดของยานกระสวยอวกาศ และหลายๆส่วนของท่อ โบรอนและอะลูมิเนียมจะประกอบไปด้วยปลอกวงแหวนไทเทเนียมที่บริเวณปลายสุดซึ่งเป็นการผลิตสำหรับแต่ละกระสวยอวกาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในการใช้งานของท่อ โบรอนและอะลูมิเนียมภายใต้เงื่อนไขที่ช่วยลดปริมาณ 45% ของน้ำหนักซึ่งน้อยกว่าพื้นฐานการออกแบบด้วยโลหะอะลูมิเนียม



รูปที่ 2.2 โครงสร้างกึ่งกลางลำตัวของกระสวยอวกาศซึ่งแสดงให้เห็นถึงท่อ โลหะผสม โบรอน และอะลูมิเนียม

ที่มา : Rawal (2009)

(2) โลหะผสมแกรไฟต์และอะลูมิเนียม (Gr/Al) ซึ่งเป็นเนื้อหลักของแผ่นขยายสัญญาณสำหรับกล้องโทรทรรศน์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อที่จะใช้ในอวกาศ (Hubble Space Telescope) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งทำขึ้นด้วยการกระจายตัวเชื่อมผิวก่อนแผ่นโลหะของเส้นใยแกรไฟต์ ชนิด P100 ในอะลูมิเนียม เกรด 6061 ได้ออกแบบให้มีความเหนียวและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient thermal expansion, CTE) ที่ต่ำเพื่อรักษาตำแหน่งของแผ่นขยายสัญญาณระหว่างการเคลื่อนที่ของกระสวยอวกาศนอกจากนั้นโลหะผสมนี้ยังมีสมบัตินำไฟฟ้าได้อย่างดีเยี่ยมทำให้สามารถส่งสัญญาณไฟฟ้าระหว่างกระสวยอวกาศและงานแผ่นขยายสัญญาณได้ มีราคาถูก



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์วัสดุผสมเนื้อโลหะ (a) แผ่นโลหะของเส้นใยแกรไฟต์ ชนิด P100 ในอะลูมิเนียม เกรด 6061 (b) แผ่นขยายสัญญาณกระสวยอวกาศ

ที่มา : Rawal (2009)

(3) โลหะผสมแกรไฟต์และทองแดง (Gr/Cu) ด้วยมีค่านำความร้อนที่สูงได้มีการพัฒนาให้มีโครงสร้างนำความร้อนที่สามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิสูงๆ ได้ เพื่อใช้เป็นตัวระบายความร้อนระหว่างสองแผ่นวงจรรีเลย์ที่เป็นแผงพิมพ์ เพื่อจัดการความร้อนและป้องกันการโค้งงอและสันสะท้อนของแผงวงจร และวัสดุผสมซิลิคอนคาร์ไบด์และอะลูมิเนียม (SiC/Al) และวัสดุผสมแกรไฟต์และอะลูมิเนียม (Gr/Al) จะใช้ในการคมนาคมสื่อสารของดาวเทียมในการนำไฟฟ้า และยังเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลด้วยคลื่นวิทยุ (Remote control) ซึ่งส่วนประกอบของตัวมันนั้นจะมีน้ำหนักเบาลงได้กว่าน้ำหนักเดิมถึง 80%

(4) โลหะผสมไทเทเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์ (Ti/SiC) เป็นวัสดุที่ได้ถูกพัฒนามารองรับอุตสาหกรรมการบินนานาชาติ เหล็กเครื่องมือและอุตสาหกรรมเหล็กสแตนเลส เนื่องจากมีสมบัติที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงๆ มีส่วนประกอบในการต่อต้านการสึกกร่อน (Rawal, 2009)

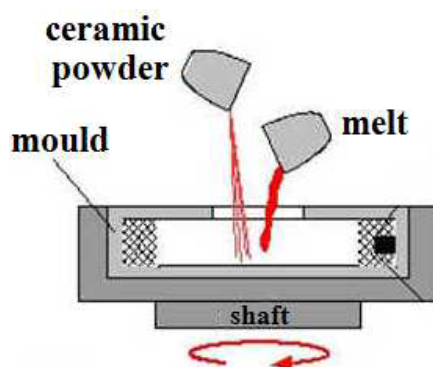
2.2 วิธีหลักๆ ในการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะ

ในส่วนนี้จะเป็นการกล่าวถึงวิธีหลักๆ ในการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะ จากที่กล่าวมาวัสดุผสมเนื้อโลหะมีวิธีอื่นๆ อีกมากที่สามารถผลิตขึ้นมาได้ แต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสีย ความยากง่ายต่างกัน วิธีอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 การหล่อโลหะแบบเหวี่ยง (Centrifugal casting)

หลักการของวิธีการหล่อแบบนี้ ก็คือเทน้ำโลหะเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์จากนั้นใช้แรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงโลหะเข้าไปในแบบหล่อที่กำลังหมุนอยู่ซึ่งอาจจะหมุนทั้งในแนวแกนนอนและแกนตั้ง จนกระทั่งน้ำโลหะมีการแข็งตัวหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ความหนาของชิ้นงานที่หล่อได้ขึ้นอยู่กับอัตราการเทโลหะเหลวใส่ภาคในแบบหล่อจนไว้ด้วยวัสดุทนไฟและแต่งให้เหมาะแก่การใช้งานได้นานและให้ชิ้นงานที่หล่อได้แยกตัวหลุดออกง่ายผิวภายในของท่อเหล็กที่หล่อได้ปกติค่อนข้างหยาบ แต่ไม่ใช่ข้อเสีย เพราะหลังจากหล่อแล้วสามารถเคลือบแต่งผิวภายในท่อเหล็กได้ ข้อดีคือไม่จำเป็นต้องใช้แกนกลาง (Core) ของกระบวนการ ด้วยความหนาของผนังนั้นจะถูกควบคุมง่ายๆ โดยการควบคุมน้ำหนักของโลหะที่เท จากแนวความคิดนี้เทคนิคหล่อโลหะแบบเหวี่ยงสามารถดัดแปลงในการแทรกซึมพรีฟอร์ม (Preforms) เพื่อสร้างการเสริมแรงโลหะผสม การเสริมแรงวัสดุเพื่อผลิตในวัสดุผสมเนื้อโลหะนั้นจะเป็นการกระจายตัวแบบเหมือนกัน ความเร็วในการหมุนยิ่ง

มากสามารถก่อให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มีค่าเพียงพอให้น้ำโลหะซึมผ่านทะลุและเกิดแรงให้น้ำโลหะยึดติดแน่นในเซรามิกอัดขึ้นรูปได้ (เสน่ห์ รัชชชาติลักษณ์, 2538)

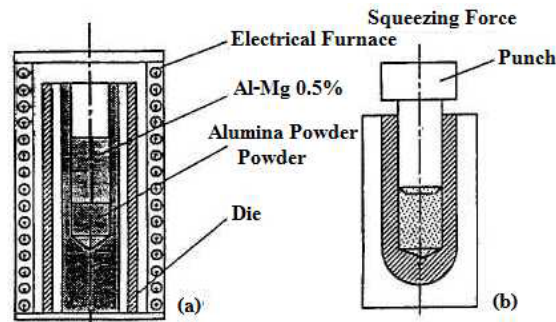


รูปที่ 2.4 การหล่อโลหะแบบเหวี่ยง

ที่มา : Schriefer (2009)

2.2.2 การกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (Squeeze casting)

การกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวจะใช้แรงบีบอัดกับน้ำโลหะ ซึ่งเหมือนกันกับการใช้เครื่องดันด้วยความร้อน โลหะผสมจะเกิดรูปร่างโดยการแทรกซึมของน้ำโลหะกับผงเซรามิก โดยน้ำโลหะจะไหลผ่านรูช่องว่างระหว่างอนุภาคของเซรามิกภายใต้แรงอัดดังกล่าว ซึ่งในระบบการหล่อแบบนี้จะมีเตาหลอมไฟฟ้าเพื่อคอยอุ่นแม่พิมพ์ให้ความร้อนแก่โลหะ ส่วนผงเซรามิกนั้นจะอยู่ที่ก้นแม่พิมพ์ จากนั้นจะใช้แรงอัดเพื่อบีบน้ำโลหะไหลอัดลงไปผสมกับผงโลหะ ปล่อยให้เย็นตัว อนุภาคเซรามิกจะเข้าไปผสมกับน้ำโลหะจนกลายเป็นโลหะผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การใช้ความดันในวิธีการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวนั้นโดยทั่วไปไม่มีค่าสูง ซึ่งค่านั้นจะอยู่ในช่วง 50 - 100 MPa ค่าความดันที่สูงสามารถช่วยเพิ่มความเร็วของกระบวนการผลิต ควบคุมปฏิกิริยาเคมีที่มีมากได้ โครงสร้างของเนื้อหลักปราศจากความสกปรกและขึ้นผลิตภัณฑ์ที่มีความลึกที่ดีโดยตลอด ทั้งกระบวนการหดตัวรวมกันเป็นของแข็ง มีอัตราการผลิตที่สูง นับว่าเป็นตัวเลือกที่ดีในการผลิตชิ้นส่วนประกอบรถ แต่ข้อเสียก็คือ ค่าเงินลงทุนและความต้องการในค่าการติดตั้งที่สูง รูปร่างความเป็นเรขาคณิตมีข้อจำกัด มีโอกาสที่รูปร่างของพรีฟอร์มจะผิดรูปร่าง โลหะวัสดุอุปกรณ์ติดตั้งมีค่าจุดหลอมเหลวที่ต่ำ (Wannasin, 2004)



รูปที่ 2.5 การหล่อวัสดุผสมเนื้อโลหะแบบการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (a) หลักการหล่อแบบการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (b) ส่วนประกอบของแม่แม่พิมพ์
ที่มา : Taha and El-Mahallawy (1998)

2.2.3 การแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ (Spontaneous infiltration)

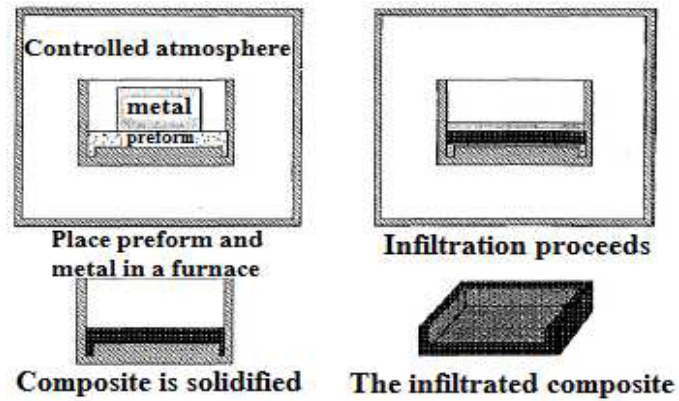
การแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติเป็นอีกหนึ่งกระบวนการแทรกซึมของน้ำโลหะ ซึ่งไม่จำเป็นต้องความดันภายนอก กระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับ น้ำโลหะ พรีฟอร์ม อุนทุมิ ก๊าซบรรยากาศ เพื่อเป็นตัวควบคุมให้อยู่ในสภาวะเปียกชื้น ชิ้นงานอัดขึ้นรูปและเนื้อหลักจะอยู่ในเตาหลอมที่ถูกควบคุมบรรยากาศ วิธีการคือน้ำโลหะจะเคลื่อนตัวไหลลงเข้าสู่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปแล้วจึงเกิดการแข็งตัวเป็นของแข็ง บางกรณีได้มีการใช้สุญญากาศและความดันเพียงเล็กน้อยเพื่อช่วยสนับสนุนการแทรกซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ที่ได้มีการพัฒนาระบบการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติมาตลอด เช่น การเพิ่มลิเทียมเข้าไปในอะลูมิเนียมสำหรับการเสริมแรงออกไซด์พรีฟอร์ม (Oxide preforms) หรือกระบวนการ Lanxide R^o Primex ซึ่งเป็นการขับเคลื่อนโดยปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมและอะลูมิเนียมในเนื้อหลักและบรรยากาศไนโตรเจน ในรูช่องเล็กๆ ของชิ้นงานอัดขึ้นรูป เทคนิคการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ มีข้อดีคือเป็นวิธีการผลิตที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างต่ำ แต่ก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและวัสดุ ส่วนข้อเสียก็จะมี

(1) การควบคุมปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้มีความเปียกชื้นที่ดี แต่บางครั้งการควบคุมจำกัด ทางเคมีจะเป็นตัวขัดขวางการให้สมบัติที่ดีที่สุดของโลหะผสม หรือจำกัดผลของสมบัติโลหะผสมที่จะสมบูรณ์ คือในระหว่างแทรกซึมการเสริมแรงอาจจะมีค่าต่ำสุด โดยผลกระทบทางเคมี

(2) อัตราการแทรกซึม หลายๆ ครั้งจะมีค่าต่ำ

(3) ในบางครั้งที่ทำการผลิต ลักษณะของรูพรุนจะยังคงเหลืออยู่ในของผสมเพราะ

ว่าแต่ละอนุภาคเซรามิกอาจจะยังมีความชื้นไม่เพียงพอ ซึ่งทำให้เกิดการแทรกซึมแค่บางจุด (Wannasin, 2004)



รูปที่ 2.6 การหล่อวัสดุผสมเนื้อโลหะแบบการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ
ที่มา : Wannasin (2004)

2.2.4 การแทรกซึมโดยความดันก๊าซ (Gas pressure infiltration)

หลักการวิธีการของการหล่อแบบนี้เป็นคือ ความดันจะเป็นตัวขับแรงให้โลหะไหลเข้าสู่พริฟอร์มของช่วงเฟสการเสริมแรง ซึ่งอาจจะใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) ที่เป็นก๊าซเฉื่อยปกคลุม ส่วนชิ้นงานอัดขึ้นรูปจะอยู่ในแม่พิมพ์ ภายในระบบมีท่อความดันและถูกให้ความร้อน บริเวณที่ตั้งเบ้าหลอมโลหะจะอยู่สูงกว่าแม่พิมพ์ เบ้าหลอมโลหะมีอุปกรณ์ เปิด-ปิดรูเพื่อคอยปล่อยน้ำโลหะให้ไหลลงสู่แม่พิมพ์คือ เมื่อเพิ่มความดันก๊าซผ่านท่อความดัน น้ำโลหะจะถูกผลักดันเข้าสู่พริฟอร์ม น้ำโลหะที่กลายเป็นโลหะผสมของแข็งจะถูกทำให้ติดกับพื้นเบ้าหลอมโลหะด้วยความเย็น ซึ่งเนื้อหลักในของผสมจะเป็นตัวชักนำให้เกิดเป็นของแข็งและช่วยลดเหตุการณ์ของแข็งหดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ความดันที่ใช้จะอยู่ที่ช่วง 1-50 MPa ผนังของเครื่องมือ จะถูกความดันกดดันเพื่อให้เป็นความร้อนสมดุล ในช่วง 1-10 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวแล้ว วิธีการแทรกซึมโดยความดันก๊าซจะมีข้อดีมากกว่า คือ

(1) อุณหภูมิหลอมเหลวของเนื้อหลักมีค่าสูงและสามารถผลิตให้มีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและความแม่นยำทางเรขาคณิตมากกว่า วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์มีความยืดหยุ่นเพราะแม่พิมพ์จะถูกล้อมรอบโดยความดันแก๊สที่เพิ่มขึ้น ทำให้มันอยู่ได้ในสภาวะความเค้นของการกดอัด ซึ่งในการหล่อแบบวิธีการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวแม่พิมพ์ไม่ยืดหยุ่นในการใช้งาน

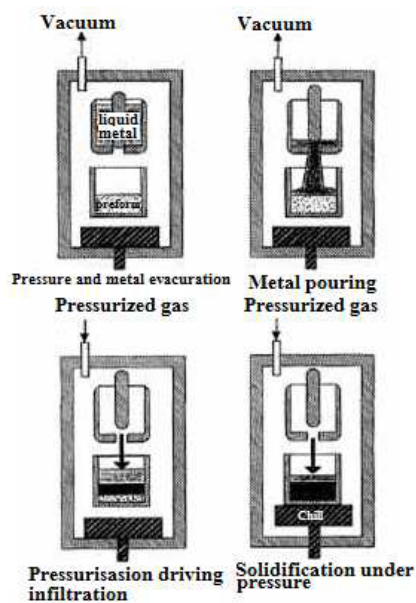
(2) การเคลื่อนย้ายน้ำโลหะก่อนเข้าสู่พรีฟอร์มจะไม่เกิดการแทรกซึมและในเวลาเดียวกันเนื้อหลักก็ยังไม่กลายเป็นของแข็ง ดังนั้นทั้งชิ้นงานอัดขึ้นรูปและแม่พิมพ์สามารถให้อุณหภูมิมีความร้อนที่มากกว่าช่วงระยะที่เนื้อหลักจะกลายเป็นของแข็งได้ ส่วนความดันต่ำที่ต้องใช้นั้นเพราะความสามารถซึมผ่านได้ เป็นตัวช่วยไม่ให้น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวก่อนเวลาอันควรคือเพื่อไม่ให้น้ำโลหะไหลลงไปแข็งตัวอุดทางลงเข้าชิ้นงานอัดขึ้นรูป ดังนั้นชิ้นงานอัดขึ้นรูปจะไม่เสียรูปทรงระหว่างแทรกซึม แต่วิธีการแทรกซึมโดยความดันก๊าซก็มีข้อเสียคือ

(2.1) อัตราการผลิตต่ำกว่าวิธีการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว

(2.2) จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น เพราะมีการใช้ก๊าซเฉื่อยสำหรับช่วยเพิ่มความดันก๊าซปกคลุม

(2.3) ต้องมีสำนึก ความระมัดระวัง เป็นอย่างสูงในเรื่องการออกแบบและการใช้งานเครื่องมือ เพราะต้องใช้กับความดันที่มากกว่า 1 MPa

(2.4) ในเรื่องการปรากฏเป็นรูปร่าง รวมตัวกันเป็นของแข็ง จะมีอัตราที่ต่ำกว่าวิธีการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (Wannasin, 2004)



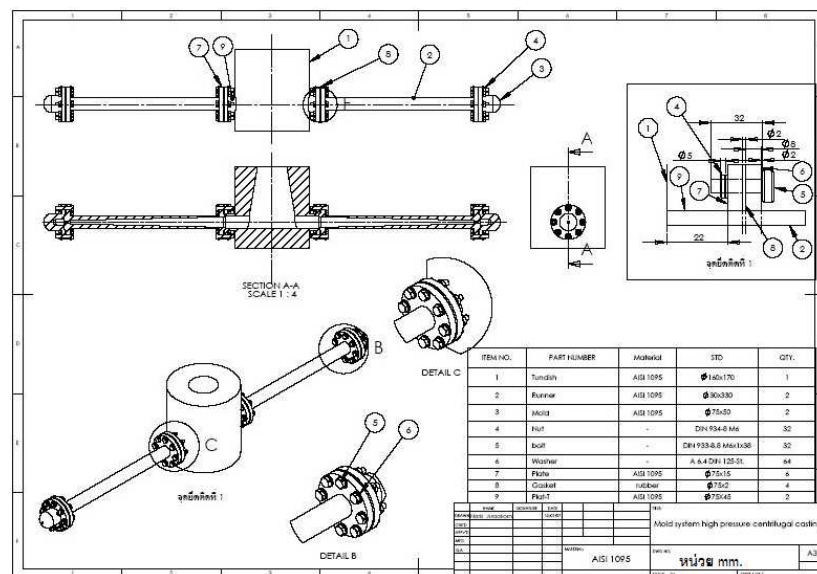
รูปที่ 2.7 การหล่อวัสดุผสมเนื้อโลหะแบบการแทรกซึมโดยความดันก๊าซ
ที่มา : Wannasin (2004)

2.3 ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง

ในส่วนนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง เช่น การออกแบบหรือเขียนแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อกำหนดรูปร่าง ลักษณะ รูปแบบ ให้มีความเป็นไปได้ในการจัดสร้างและการทดลองวิจัย โดยต้องคำนึงถึงทฤษฎีเรื่องการออกแบบเครื่องจักรและค่าที่มีผลต่อการทดลองวิจัยเป็นหลัก ซึ่งแบบงาน (Drawing plates) ที่ได้ทำการออกแบบและทฤษฎีเนื้อหาที่มีผลต่อชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง มีดังต่อไปนี้

2.3.1 รูปแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Edge V.16

ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Edge V.16 มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ ท่อทางวิ่งน้ำโลหะ แม่พิมพ์ เมื่อนำมาประกอบเพื่อเตรียมทดลองวิจัยการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงออกแบบโดยโปรแกรม Solid Edge V.16

เซรามิก ใช้สมการ (Wannasin and Flemings, 2005)

$$P_{th} = -6\lambda\gamma_{lv}\cos\theta\frac{V_p}{D_p(1-V_p)} \quad (2.2)$$

โดยที่ P_{th} คือค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกเข้าไประหว่างช่องว่างของแต่ละอนุภาคเซรามิก λ คือค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลม γ_{lv} คือค่าความตึงผิวหน้าของน้ำโลหะ θ คือค่ามุมที่อนุภาคเซรามิกทำมุมกัน V_p คือค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูป (Volume fraction) D_p คือค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคเซรามิก

2.3.4 ค่าความดันสูงสุด (Maximum pressure, P_{max})

ความดันสูงสุดคือค่าความดันสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในท่อความดัน (Pressure Vessel) หรือชิ้นส่วนท่อทางวิ่งของน้ำโลหะ โดยนำค่ารัศมีภายใน (r_i) และรัศมีภายนอก (r_o) ของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะมาคำนวณหา ใช้สมการ (Wannasin, 2004)

$$P_{max} = \frac{\sigma_u \left(\frac{r_o^2 - r_i^2}{r_o} \right)}{SF_u \left(\frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o} \right)} \quad (2.3)$$

โดยที่ P_{max} คือค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ σ_u คือค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ของโลหะที่นำมาใช้สร้างชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง SF_u คือค่าปัจจัยความปลอดภัย (Safety factor) r_o คือค่ารัศมีภายนอกของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ r_i คือค่ารัศมีภายในของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งของน้ำโลหะ

2.3.5 ค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง ($\sigma_{Centrifugal}$) ที่เกิดจากแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกแนวหนีศูนย์กลาง

ค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางเกิดเมื่อชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงเกิด

การหมุนที่คงที่ น้ำโลหะที่เติมเข้าไปในชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะจะถูกเหวี่ยงให้ผ่านทางชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะและดันน้ำโลหะผ่านเข้าไปสู่ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ซึ่งน้ำโลหะที่ถูกเหวี่ยงนั้นจะเป็นแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง ($F_{Centrifugal}$) ทำให้เกิดความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง

$$F_{Centrifugal} = m_{lv,T} \frac{v^2}{r}; r = L_r \text{ และจาก } v = \omega L_r$$

$$\therefore F_{Centrifugal} = m_{lv,T} \omega^2 L_r \quad (2.4)$$

โดยที่ $F_{Centrifugal}$ คือแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง $m_{lv,T}$ คือค่ามวลรวมของน้ำโลหะและชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ $\frac{v^2}{r}$ คือค่าความเร่งเชิงมุม ω คือค่าความเร็วรอบเชิงมุม L_r คือค่าระยะจากจุดหมุนถึงปลายสุดชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ

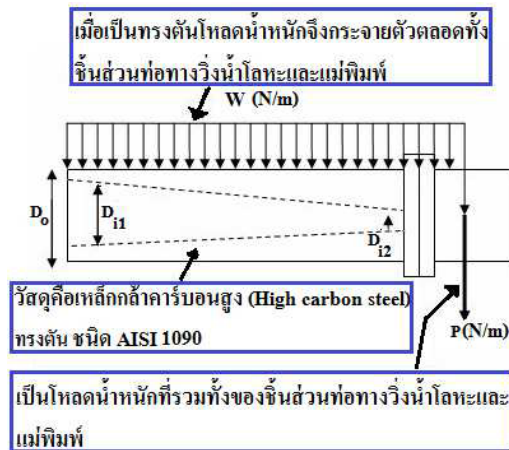
2.3.6 ค่าความเค้นน้ำหนักรวม ($\sigma_{totalweight}$) ที่เกิดจากแรงน้ำหนัก (Weight)

ค่าความเค้นจากน้ำหนักเกิดเมื่อชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงเกิดการหมุนที่คงที่แล้ว น้ำโลหะที่ถูกเติมเข้าไปในชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะและเหวี่ยงน้ำโลหะเข้าชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ, แม่พิมพ์ จะเกิดการแข็งตัวทำให้เกิดน้ำหนักที่สฟลงตามแรงโน้มถ่วงโลกกระทำต่อชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ ดังรูปที่ 2.12 ทำให้เกิดความเค้นจากน้ำหนัก (σ_{weight})

$$M_{bending} = PL + \frac{W}{2} L^2$$

$$\sigma_{weight} = \frac{M_{bending} \times C}{I}; I = \frac{\pi}{64} (D_o^4) \quad (2.5)$$

โดยที่ $M_{bending}$ คือค่าโมเมนต์คด P คือน้ำหนักรวมของชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะและแม่พิมพ์ L คือระยะความยาวชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะรวมกับแม่พิมพ์ซึ่งตั้งฉากกับน้ำหนัก W คือน้ำหนักของชิ้นส่วนบรรทุกแบบแผ่สม่ำเสมอ C คือค่ารัศมีปลายสุดของชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ I คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยหน้าแปลนของชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ D_o คือเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ σ_{weight} คือค่าความเค้นที่เกิดจากน้ำหนัก (Weight, W) ที่สฟลงตามแรงโน้มถ่วงโลก



รูปที่ 2.12 ภาระน้ำหนักที่กระทำต่อชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ

2.3.7 ความเค้นจากการตัดโค้ง ($\sigma_{bending}$)

เป็นการหาค่าโมเมนต์ความเค้นในช่วงเริ่มต้นของการหมุนเหวี่ยง คือโมเมนต์ที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ (จากที่ชิ้นงานอยู่นิ่ง) ของชิ้นงาน ตามกฎข้อที่ 1 ของนิวตัน โมเมนต์ความเค้นนี้จะทำให้เกิดค่าความเค้นจากการตัดโค้ง กระทำต่อชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับหน้าแปลนของชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ

$$M = I_1 \frac{d\omega}{dt}, I_1 = \frac{1}{12} m_{T,m} l_c^2$$

$$\sigma_{bending} = \frac{MC}{I_2}, I_2 = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_{i1}^4) \tag{2.6}$$

โดยที่ $m_{T,m}$ คือค่ามวลรวมของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและชิ้นส่วนแม่พิมพ์ $\alpha, \frac{d\omega}{dt}$ คือค่าความเร่งเชิงมุม ω คือค่าความเร็วรอบเชิงมุม $\sigma_{bending}$ คือค่าความเค้นจากการตัดโค้ง M คือค่าโมเมนต์ที่เกิดจากการหมุนเหวี่ยง C คือค่ารัศมีปลายสุดของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ I_1 คือค่าโมเมนต์ความเค้นของทั้งชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ I_2 คือค่าโมเมนต์ความเค้นหน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะที่ต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ l_c คือค่าระยะจากจุดหมุนถึงจุดเซนทรอยด์ D_o คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ D_{i1} คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ

2.4 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection Heat Transfer)

กระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา สามารถสังเกตได้จากกระบวนการถ่ายเทความร้อน ส่วนค่าของอุณหภูมินั้นก็ขึ้นอยู่กับอัตราของของไหลที่นำความร้อนออกไป หากมีความเร็วสูงก็จะทำให้มีค่าการพาความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงด้วย ดังนั้นค่าอุณหภูมิที่บริเวณผนังนั้นจะขึ้นอยู่กับสนามการไหล การแสดงผลกระทบบรวมของการแสดงการพาความร้อน ใช้กฎของนิวตันว่าด้วยการระบายความร้อน จะได้

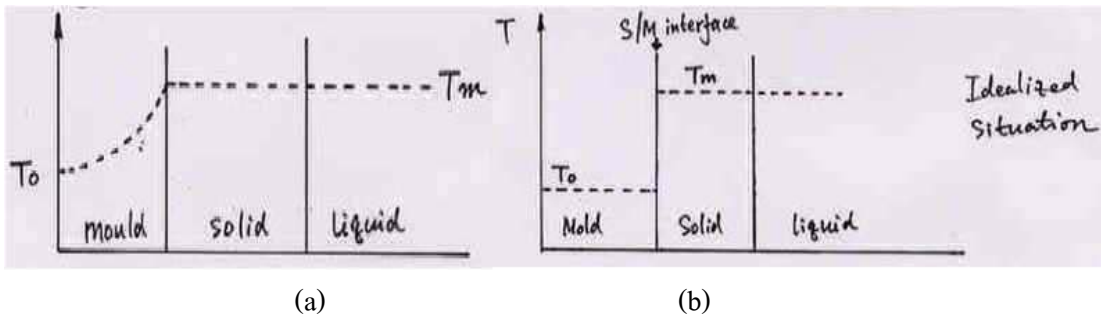
$$Q = \bar{h} A (T_w - T_{\infty}) \quad (2.7)$$

โดยที่ Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน \bar{h} คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา A คือพื้นที่ผิว $T_w - T_{\infty}$ คืออุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมดยุทธระหว่างผนังกับของไหล

การวิเคราะห์ผลค่านวณค่า h อาจนำไปใช้ได้บางระบบ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบางครั้งเรียกว่า การนำผ่านฟิล์ม เพราะว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง จากสมการด้านบน กำหนดค่าถ่ายเทความร้อนด้วยการพาขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของของไหล (ค่าสภาพการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น) เพราะอิทธิพลความหนืดที่มีต่อสภาพของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงจากผิวผนังจนถึงชั้นของขอบเขตความเร็วที่เกิดขึ้นจริง และความสอดคล้องของอัตราการถ่ายเทพลังงานในขอบเขตที่ใกล้กับผนัง (ชนาคม สุนทรชัยนาคแสง, 2547)

2.5 เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification Time)

การแข็งตัวของชิ้นงานโลหะค่อยๆ เริ่มจากผิวนอกไปถึงตรงกลาง เวลาทั้งหมดในระหว่างการแข็งตัวของชิ้นงานโลหะค่อยๆ เริ่มจากผิวนอกไปถึงตรงกลาง เวลาทั้งหมดในระหว่างการแข็งตัวจากผิวนอกถึงตรงกลางเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\frac{V}{A_o}$ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของชิ้นงาน (V) และพื้นที่ผิวนอก (A_o) ซึ่งเป็นส่วนของชิ้นงานที่ส่งความร้อนให้สิ่งแวดล้อม สำหรับการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงนั้นจะเป็นการหล่อที่มีแม่พิมพ์เป็นโลหะ (Metal mold) มิใช่การหล่อด้วยทราย (Sand mold) (หริส สุตะบุตร, 2537) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟรูปแบบของการเย็นตัว (a) Sand casting (b) Die casting

ที่มา : Melbourne school of engineering (2010)

เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะในชิ้นส่วนแม่พิมพ์นั้นมีผลต่อการหล่อโลหะเหวี่ยงเป็นอย่างมาก เพราะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าน้ำโลหะที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเข้าแทรกซึมระหว่างช่องว่างอนุภาคเซรามิกของเซรามิกอัดขึ้นรูป (Ceramic Preform) ในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ต้องใช้เวลานานเท่าใดจึงจะแข็งตัว จากสมการเวลาในการแข็งตัวของชิ้นส่วนแม่พิมพ์โลหะ

$$t_s = k \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

โดยที่ $Q = -\bar{h}A(T_M - T_O) = \rho_M H_M A \frac{ds}{dt}$

และ $k = \frac{\rho_M H_M}{\bar{h}(T_M - T_O)}$

ทำให้ได้ $t_s = \frac{\rho_M H_M V}{\bar{h}(T_M - T_O) A}$

$$\therefore t_s = \frac{\rho_M (H_M + C_p \Delta T)}{\bar{h}(T_M - T_O)} \times r_{i2} \quad (2.8)$$

โดยที่ t_s คือเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ \bar{h} คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา T_M คืออุณหภูมิของน้ำโลหะ T_O คืออุณหภูมิของเครื่องมือ ρ_M คือความหนาแน่นของน้ำโลหะ H_M คือค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของโลหะ C_p คือค่าความจุความร้อนของโลหะ ΔT คือค่าอุณหภูมิของโลหะที่มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดปกติ r_{i2} คือขนาดรัศมีภายในปลายสุดของชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะที่ต่อประกบกับชิ้นส่วนแม่พิมพ์

2.6 วิธีการทดสอบและตรวจสอบวัสดุผสมเนื้อโลหะ

ในส่วนนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวกับตรวจสอบวัสดุผสมเนื้อโลหะ วัสดุผสมเนื้อโลหะที่ผลิตขึ้นมาได้จากวิธีหล่อโลหะเหวี่ยงด้วยความดันสูงนั้นต้องทำการทดสอบและตรวจสอบสมบัติเพื่อคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปและเปรียบเทียบกับสมบัติของวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้ทดสอบคือความหนาแน่น การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลคือหาค่าความแข็งและค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบอยู่ในบทที่ 4 ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวกับตรวจสอบวัสดุผสมเนื้อโลหะมีดังต่อไปนี้

2.6.1 การตรวจสอบวัสดุผสมเนื้อโลหะ

การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ สามารถกระทำได้ 2 ลักษณะคือการตรวจสอบโครงสร้างระดับมหภาค (Macroscopic) และการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Microscopic) เพื่อต้องการทราบอิทธิพลของธาตุผสมในโลหะที่ทำการตรวจสอบนั้นๆ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการกระทำทางความร้อนสิ้นสุดลงอีกด้วย ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างสามารถนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม การตรวจสอบโครงสร้างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างระดับมหภาค

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า หรือถ้าใช้กล้องขยายก็มีการกำลังขยายไม่เกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยาก เพราะว่าเป็นการตรวจสอบรูพรุนภายในของโลหะ การแยกชิ้นของผลึก รอยร้าว รอยแตก หน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด และปริมาตรธาตุผสมในโลหะ เป็นต้น

(1) การตรวจสอบโดยวิธีการพิมพ์ภาพแบบเบามันน์ (Baumann) การตรวจสอบมหภาคโดยวิธีนี้จะสามารถทราบได้ว่ามีการแพร่กระจายของตัวเสริมแรงในโลหะมากน้อยเพียงใด ขั้นตอนคือตัดชิ้นงานแล้วทำการขัด จากนั้นล้างผิวขัดให้สะอาด นำกระดาษอัดรูปถ่ายตอนกลางวัน จุ่มลงในกรดกำมะถันเจือจาง นำกระดาษออกปล่อยให้แห้งแล้วนำไปขัด ล้างกระดาษด้วยน้ำเปล่า จากนั้นนำไปแช่น้ำยาขยาด และนำกระดาษไปแช่น้ำเปล่าอีกจากนั้นเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนก็จะ

ปรากฏภาพที่บนอากาศอัตรูป

2.6.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

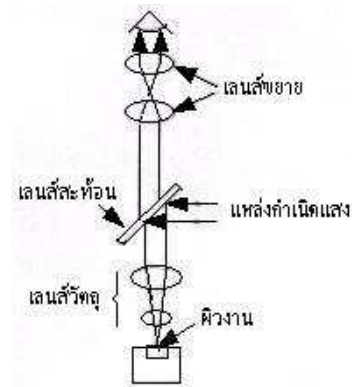
กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 5,000 เท่า หรือมากกว่า

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) ดังรูปที่ 2.14 เป็นเครื่องมือสำหรับดูสิ่งของที่มีขนาดเล็กมากๆ ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น โครงสร้างหรือเกรน การวิเคราะห์วิธีนี้จะทำได้กับวัสดุทั้งแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) รวมทั้งอาจจะเป็นเฟสเดียวหรือหลายเฟส ในการวิเคราะห์โครงสร้างสิ่งสำคัญ คือ การตรวจสอบดูถึงจำนวนของเฟสหรือเกรน และสัดส่วนของเกรนแต่ละชนิดของโลหะนั้น รวมทั้งขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของเกรนแต่ละเกรน

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์นั้นจะมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกันไม่ว่าจะเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใดก็ตาม โดยมีหลักการทำงานด้วยการปล่อยแสงจากแหล่งกำเนิดไปยังชิ้นตรวจสอบ ทำให้แสงที่ตกกระทบลงบนผิวงานที่เรียบและตั้งฉากกับลำแสงจะสะท้อนแสงได้ดีกว่า โดยแสงจะสะท้อนกลับเข้าไปยังเลนส์ขยาย (Eye Piece) และเข้าสู่สายตาของผู้ตรวจสอบ ทำให้เห็นภาพดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 2.15 แต่ถ้าลำแสงจากจุดกำเนิดแสงตกกระทบลงบนผิวงานที่ไม่เรียบและไม่ตั้งฉากกับลำแสง การสะท้อนจะไม่ดีเท่าที่ควร โดยที่จะมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายและเข้าสู่สายตาของผู้ตรวจสอบหรือในบางครั้งอาจไม่มีการสะท้อนเข้าตาผู้ตรวจสอบเลย จึงทำให้ผู้ตรวจสอบเห็นเป็นสีดำ (G.precision engineering LTD., 2010)



รูปที่ 2.14 ภาพกล้องจุลทรรศน์
ที่มา : Microscope world (2010)

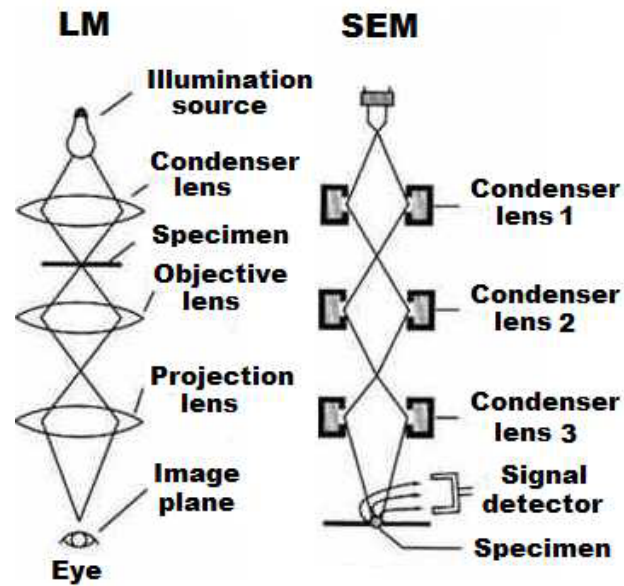


รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์
ที่มา : G.precision engineering LTD. (2010)

นอกจากกล้องจุลทรรศน์ขยายลำแสงธรรมดาดังกล่าวมาแล้ว ยังมีกล้องขยายที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนแสงจากหลอดไฟ และยังสามารถบังคับด้วยระดับแม่เหล็กไฟฟ้าให้ลำแสงอิเล็กตรอนวิ่งไปกระทบกับผิวของชิ้นงานตรวจสอบจะสะท้อนกลับไปเข้าเครื่องรับสัญญาณส่งไปขยายต่อ รวมทั้งส่งไปยังจอภาพจะปรากฏภาพโครงสร้างที่มีแรงขยายสูงถึง 5,000 เท่าหรือมากกว่ากล้องที่กล่าวมานี้เรียกว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 – 2.18

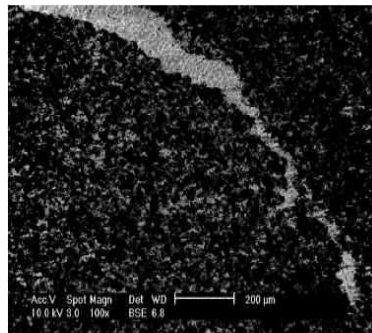


รูปที่ 2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่มา : Maryland nanocenter (2010)



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกับกล้องขยายแบบธรรมดาทั่วไป

ที่มา : Central microscopy (2010)



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างของภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา : Wannasin และ Flemings (2005)

2.6.2 การหาความหนาแน่นวัสดุผสมเนื้อโลหะ

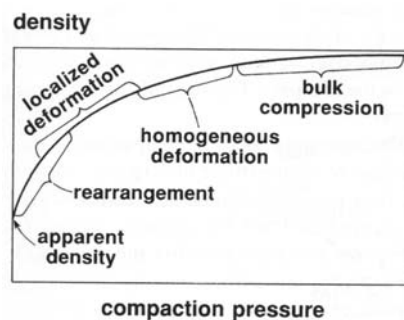
การหาความหนาแน่นของวัสดุผสมเนื้อโลหะสามารถที่จะหาได้ง่ายๆ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและมวล อีกทั้งยังมีเทคนิคพิเศษเฉพาะในการหาความหนาแน่น นั่นก็คือ หลักการเข้าแทนที่ของน้ำ (Archimedes density) “ของแข็งที่หนาแน่นกว่าของเหลว จะจมอยู่ใต้ของเหลวนั้น และปริมาตรของเหลวที่ถูกแทนที่ เท่ากับปริมาตรของของแข็งนั้น” จากหลักการเข้าแทนที่ของน้ำเพื่อหาความหนาแน่นวัสดุผสมเนื้อโลหะ (บุญเชิญ เจริญศรี, 2542) จะได้

$$\rho_m = \frac{W_2}{W_2 - (W_1 - W_w)} \times \rho_w \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ_m คือความหนาแน่นเฉลี่ยของตัวอย่าง ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิขณะทำการวัด W_1 คือน้ำหนักของตัวอย่างที่อิมมิดด้วยน้ำซึ่งชั่งในน้ำ W_2 คือน้ำหนักของตัวอย่างแห้งซึ่งชั่งในอากาศ (อบในเตาด้วยอุณหภูมิกองที่ 105 °C เป็นเวลา 5 ชม.) W_w คือน้ำหนักของเส้นลวดในน้ำ

2.7 ทฤษฎีการอัดขึ้นรูป

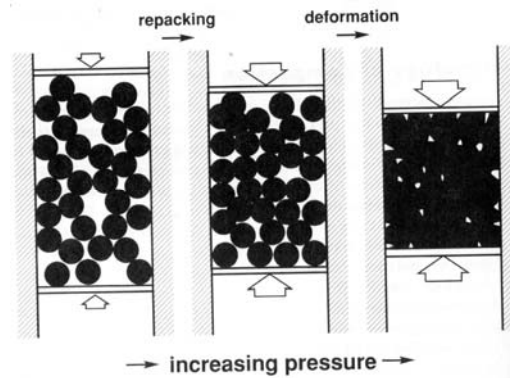
จากรูปที่ 2.19 พบว่าอัตราการแน่นตัวเริ่มต้นมีค่าสูงตามความดันที่ให้ อย่างไรก็ตามเมื่อการเปลี่ยนรูปดำเนินต่อไปอัตราการเพิ่มความหนาแน่นต่อความดันลดลงซึ่งให้เห็นว่าอนุภาคเกิดความแข็งแรงแบบเวิร์กฮาร์ดเดนิง (Work Hardening)



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่นแสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
ที่มา : ประทุมรัตน์ หนูยัง (2551)

ภาพลำดับขั้นตอนการอัดแน่นผงวัสดุในรูปที่ 2.20 แสดงหลักเกณฑ์ในการนิยามขั้นตอนการอัดแน่น การอัดแน่นเริ่มต้นที่ความหนาแน่นประมาณเท่ากับความหนาแน่นปรากฏ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคปรากฏโดยทั่วไป เมื่อมีการเขย่าความหนาแน่นสูงสุดที่ได้คือความหนาแน่นเกาะ ผงที่อยู่ในสภาวะหลวมยังคงมีช่องว่างอยู่ ไม่มีความแข็งแรง และจำนวนโคออร์ดิเนชัน (Coordination, CN) หรือจำนวนอนุภาคที่สัมผัสอยู่รอบอนุภาคหนึ่งๆ มีค่าต่ำ เมื่อเริ่มให้ความดันการตอบรับแรกสุดคือการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค โดยอนุภาคมีการเติมในรูพรุนขนาด

ใหญ่ก่อนส่งผลให้จำนวนการสัมผัสกับอนุภาครอบข้างสูงขึ้น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการเขย่าหรือ สั่นผง การจัดเรียงตัวใหม่ให้ผลดีเมื่อพื้นผิวของอนุภาคเรียบและแข็ง



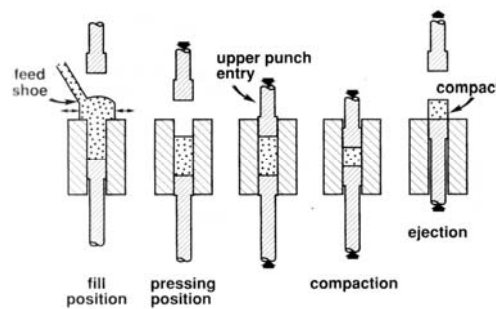
รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลดปริมาตรระหว่างอนุภาคเมื่อแรงอัด สูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสีรูปร่างของอนุภาค

ที่มา : ประทุมรัตน์ หนูยัง (2551)

2.7.1 การอัดขึ้นรูปการอัดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compaction)

ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือขณะอัดแน่นแสดงในรูปที่ 2.21 โดย เริ่มต้นจากบรรจุผงโลหะลงในแม่พิมพ์และอัดผ่านพินช์ (Punch) ซึ่งเป็นพินช์ตัวเดียว (ส่วนใหญ่ เป็นตัวบน) ทำให้เกิดแรงดันด้านข้าง ก่อนที่จะเทผงโลหะลงในแม่พิมพ์จะต้องเลื่อนพินช์ตัวบน ออกมาด้านนอกก่อน ส่วนพินช์ตัวล่างอยู่ในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งเดิมในแม่พิมพ์ ถ้ามีการ คำนวณปริมาณของผงโลหะจากความสูงของช่องว่างในแม่พิมพ์และความหนาแน่นปรากฏของผง จะทำให้ทราบปริมาณที่จะเติมลงในแม่พิมพ์ ผงโลหะถูกบรรจุลงแม่พิมพ์โดยอุปกรณ์สำหรับเติม ผง (Feed Shoe) อาจผ่านกระบวนการสั่นและเขย่าลงสู่แม่พิมพ์ ตำแหน่งสำหรับเติมผงของพินช์ตัว ล่างแตกต่างจากตำแหน่งที่ใช้ในขณะอัดเพื่อทำให้การอัดผงเข้าสู่ตรงกลางของแม่พิมพ์ ตำแหน่ง ของพินช์ตัวล่างสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของผงทั่วทั้งชิ้น หลังการเติมผง โลหะแล้ว เลื่อนพินช์ตัวล่างให้อยู่ในตำแหน่งที่จะอัดและเลื่อนพินช์ตัวบนเข้าสู่แม่พิมพ์ การเพิ่ม ความดันให้กับผงโลหะอาจเลื่อนทั้งพินช์ตัวบนและตัวล่างเข้าหากัน หรือเลื่อนเฉพาะพินช์ตัวบน เพียงตัวเดียวในขณะที่พินช์ตัวล่างอยู่กับที่ ขั้นตอนสุดท้ายของการอัดแน่นผงวัสดุมีความดันสูงสุด และเมื่ออัดเสร็จพินช์ตัวบนถูกเลื่อนออกไป ใช้พินช์ตัวล่างเป็นตัวดันเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และเริ่มวัฏจักรการอัดใหม่โดยการเติมผงโลหะลงแม่พิมพ์ ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่ของพินช์ตัวบน

และตัวล่างจะดูไม่ยุ่งยาก แต่ในการทำงานจริงขั้นตอนการออกแบบแต่ละชิ้นส่วนมีความซับซ้อนมาก โดยปกตินิยมใช้แท่งแกนกลาง (Core Rod) เป็นตัวบอกตำแหน่งของพันธ์ด้านในหรือทำรูไว้ในชิ้นงาน โดยทั่วไปปัญหาเรื่องการสึกหรอของแม่พิมพ์เกิดขึ้นเมื่อต้องใช้แรงในการอัดสูง และสามารถควบคุมได้ด้วยการเติมสารหล่อลื่นผสมลงในผงวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ หรือซีเมนต์คาร์ไบด์เพื่อให้มีอายุการใช้งานนาน (ประทุมรัตน์ หนุยัง, 2551)

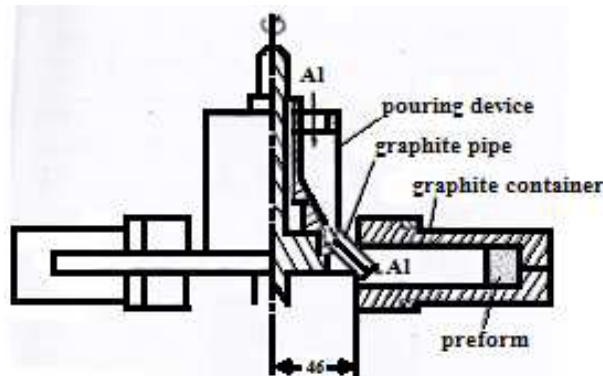


รูปที่ 2.21 ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในวัฏจักรการอัดแน่นผง
ที่มา : ประทุมรัตน์ หนุยัง (2551)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nishida และคณะ (1996) พบว่าเป็นงานวิจัยที่ศึกษาถึงการแทรกซึมเส้นใยในชิ้นงานอะลูมินาอัดขึ้นรูป (Al_2O_3 Preform) ด้วยน้ำอะลูมิเนียมโดยวิธีแรงหมุนเหวี่ยง คือเมื่อความเร็วในการหมุนเหวี่ยงถึงค่าที่ต้องการ นำน้ำอะลูมิเนียมเหลวเทเข้าไปสู่อุปกรณ์รองรับซึ่งจะมีเพลลาแกรฟต์กลาง 2 ข้างต่ออยู่โดยที่ปลายเพลลามิชิ้นงานอะลูมินาอัดขึ้นรูปบรรจุอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ทำให้เมื่อเกิดการหมุนเหวี่ยงน้ำอะลูมิเนียมเหลวจะถูกเหวี่ยงให้เข้าไปหาชิ้นงานอะลูมินาอัดขึ้นรูป ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงที่สูงย่อมก่อให้เกิดความดันน้ำอะลูมิเนียมที่สูงตามไปด้วย อุณหภูมิในการเผาอุณหภูมิดังนี้ ที่บริเวณใส่ชิ้นงานอะลูมินาอัดขึ้นรูปมีอุณหภูมิ $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ชิ้นส่วนเพลลาแกรฟต์มีอุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่อุปกรณ์รองรับน้ำโลหะมีอุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิของน้ำอะลูมิเนียมเหลวใช้ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ชิ้นงานอะลูมินาอัดขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคอะลูมินาที่ 3 mm และมีค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก (Volume Fraction, V_p) ที่ 6, 9, 13 pct ชิ้นงานอะลูมินาอัดขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 mm ความสูง 20 mm สำหรับค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 6 pct ความสูง 19 mm สำหรับค่าสัดส่วนปริมาตร

ระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 9 pct และความสูง 18 mm สำหรับค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 13 pct ระยะทางจากศูนย์กลางการหมุนถึงผิวหน้าชิ้นงานอะลูมินาอัดขึ้นรูปคือ 0.12 mm จากผลการทดลองสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการหมุนเหวี่ยงและระยะทางที่น้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าแทรกซึมได้ในกรณีของค่าสัดส่วน

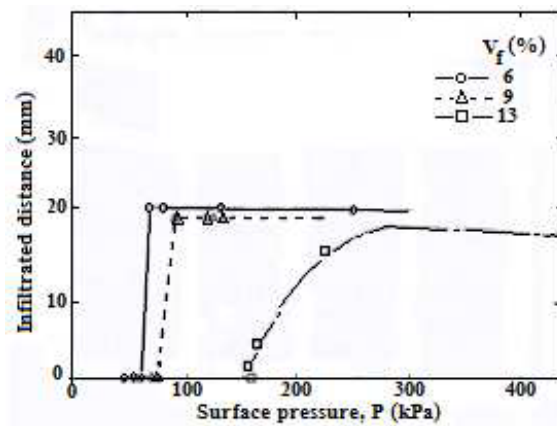


รูปที่ 2.22 แผนผังของเครื่องมือที่ใช้ในการกำเนิดแรงหมุนเหวี่ยงสำหรับการแทรกซึมของอะลูมิเนียม

ที่มา : Nishida และคณะ (1996)

ปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 6 pct คือตั้งแต่ความเร็ว (N) $0-10 \text{ rev.s}^{-1}$ จะไม่เกิดการแทรกซึมแต่เกิดการแทรกซึมเต็มที่ที่ความเร็ว 11 rev.s^{-1} กรณีค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 9 pct ตั้งแต่ที่ความเร็ว $0-16 \text{ rev.s}^{-1}$ แต่เข้าแทรกซึมเต็มที่ที่ความเร็ว 17 rev.s^{-1} กรณีค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 13 pct ตั้งแต่ที่ความเร็ว $0-22 \text{ rev.s}^{-1}$ แต่ที่ความเร็ว 26 rev.s^{-1} น้ำอะลูมิเนียมเหลวจะเริ่มเข้าแทรกซึม แต่ที่ความเร็ว 32 rev.s^{-1} ถึงจะเข้าแทรกซึมชิ้นงานอะลูมินาอัดขึ้นรูปได้เต็มที่ จากข้อมูลการทดลองของความเร็วในการหมุนเหวี่ยงสามารถเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการหมุนเหวี่ยงและระยะทางที่น้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถแทรกซึมได้ดังนี้ แสดงในรูปที่ 2.23 ความดันของการหมุนเหวี่ยงที่ทำให้ น้ำอะลูมิเนียมเหลวเริ่มเข้าแทรกซึมที่ความดัน 66 kPa สำหรับค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 6 pct ความดัน 81 kPa สำหรับค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 9 pct และความดัน 156 kPa สำหรับค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 13 pct ในกรณีค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 13 pct นั้นความดันของการหมุนเหวี่ยงที่ทำให้ น้ำอะลูมิเนียมเหลวเริ่มเข้าไปแทรกซึม (156 kPa) แต่ก็เป็นระยะการแทรกซึมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ต้องใช้ความดันการหมุนเหวี่ยงถึง 300 kPa ถึงน้ำอะลูมิเนียมเหลวจะเข้าไปแทรกซึมในชิ้นงาน

อะลูมิเนียมอัดขึ้นรูปได้อย่างเต็มที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 จากผลการทดลองพบว่าหากความดันของการหมุนเหวี่ยงมีค่ามากกว่าค่าความดันเริ่มต้น การแทรกซึมของน้ำอะลูมิเนียมเหลวจะเริ่มขึ้น (Nishida *et al.*, 1996)



V_f (%)	rotational speed (rev.s ⁻¹)	pressure (kPa)	aluminum	composite
6	13.0	83		
9	16.3	95		
13	16.3	169		
13	33.3	445		

รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางในการเข้าแทรกซึม

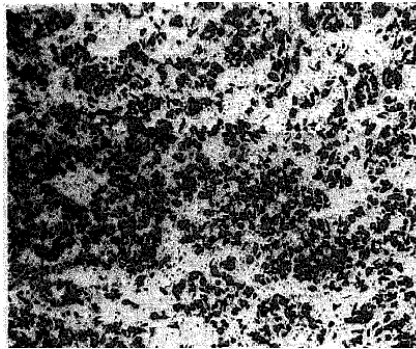
ที่มา : Nishida และคณะ (1996)

รูปที่ 2.24 โครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้อโลหะจากการเหวี่ยง

ที่มา : Nishida และคณะ (1996)

Xiandong และคณะ (1997) พบว่าได้ทำการผลิตและศึกษาสมบัติของอนุภาคเสริมแรงของวัสดุผสมเนื้อโลหะ ซึ่งโลหะที่ใช้เป็นเนื้อหลักในการศึกษาการหล่อมี 2 ชนิดคือ aluminium - silicon alloy (ZL-109) และ zinc - aluminium alloy (ZA-27) ส่วนอนุภาคที่ใช้สำหรับเสริมแรงคือ SiC, Si₃N₄, B₄C, Al₂O₃, graphic flakes โดยที่อะลูมิเนียมอัลลอยด์ก่อนหลอมเหลวจะถูกทำให้อุณหภูมิเกินกว่าจุดเดือดของน้ำ (superheat) 100 °C และอนุภาคเสริมแรงก็จะถูกทำความสะอาดด้วยลำแสงอัลตราโซนิก (ultrasonic) ในสารละลายอะซิโตน (acetone) ด้วยอุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สำหรับ SiC, Si₃N₄, B₄C, Al₂O₃ และ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สำหรับ graphic flakes ก่อนการทดลองหล่อโลหะ กระบวนการหล่อโลหะได้เลือกใช้ 2 วิธีคือการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง สำหรับโลหะ ZL-109 และการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวสำหรับโลหะ ZA-27 การหล่อโลหะอะลูมิเนียมแบบเหวี่ยงจะเป็นแบบการหล่อเหวี่ยงในแนวแกนนอน ด้วยแม่พิมพ์ทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 100 mm และความยาว 150 mm อุณหภูมิโลหะในการเท 700 °C ใช้เวลาในการเท 4 วินาที ในส่วนของการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว ใช้สภาวะอุณหภูมิเผาอุ่นแม่พิมพ์ 150 - 250 °C ความดันในการกดอัด 70 - 100 MPa ระยะเวลาในการคงตัวของความดันกดอัด 1 นาที นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบสมบัติของวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ผลิตขึ้นได้ เช่น การทดสอบแรงต้าน

การเสียดสีและการทดสอบความสึกหรอ โดยเครื่อง Model MM-200 ด้วยจานเหล็กหมุนขัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 46.8 mm โหลดน้ำหนัก 147 N ความเร็วในการหมุน 400 rpm ระยะทางในการสไลด์ 1.78 km สำหรับกรณีมีการหล่อลื่นและ 597 m สำหรับกรณีไม่มีการหล่อลื่น การทดสอบความแข็งแรงแบบบรินเนลโหลดน้ำหนัก 62.5 kg ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด 2.5 mm ทดสอบด้วยเครื่อง HRC 60. การทดสอบตรวจโครงสร้างได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิด S-550 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอนุภาคที่เข้าไปเสริมแรงนั้นจะกระจายอยู่ทั่วๆ ไปตามผิวเนื้อชั้นนอกของวัสดุผสมเนื้อโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 และสมบัติต่างๆ ของวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ผ่านการเสริมแรงแล้วนั้นให้ผลที่ดีกว่าโลหะเนื้อหลักที่ไม่ได้รับการเสริมแรง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวออกของโลหะผสมจะมีค่าน้อยกว่าโลหะเนื้อหลักแบบธรรมดา



รูปที่ 2.25 การกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรง B_4C ในโลหะเนื้อหลักด้วยวิธีการผลิตแบบการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว

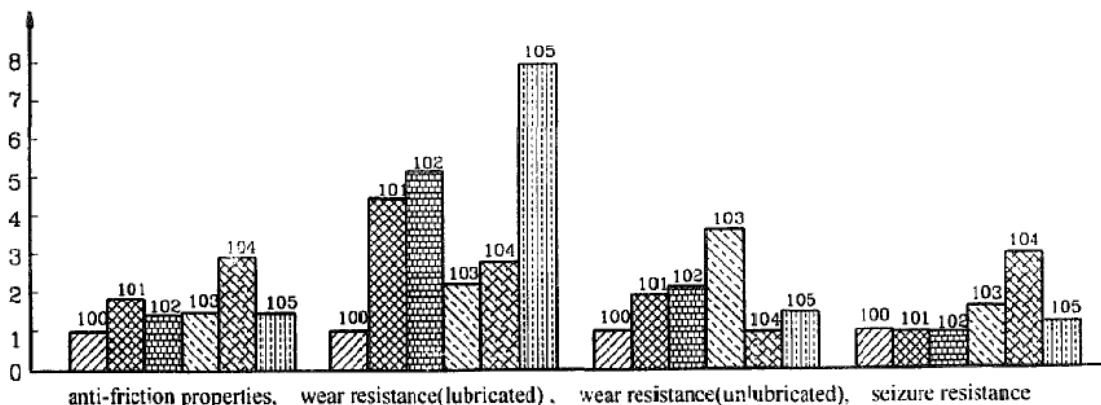
ที่มา : Xiandong และคณะ (1997)

ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นตัวในการดึงของวัสดุผสมเนื้อโลหะจะมีค่ามากกว่าโลหะเนื้อหลักแบบธรรมดา เป็นต้น โดยเฉพาะโลหะ ZA-27 ที่ได้รับการเสริมแรงด้วยอนุภาค B_4C จะเป็นวัสดุผสมเนื้อโลหะที่มีสมบัติที่ได้จากการทดสอบดีที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ได้รับการเสริมแรงด้วยอนุภาคอีก 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.26 เช่น มีความแข็งแรงมากที่สุดและมีความต้านทานความสึกหรอในสภาวะการหล่อลื่นได้อย่างดีเยี่ยม ซึ่งความต้องการสมบัติต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับการเติมสารอนุภาคและสมบัติพื้นฐานของโลหะ (Xiandong *et al.*, 1997)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้อโลหะ

No.	Material	Hardness (HB)	Tensile strength (MPa)	Elongation %	Density (g/cm ³)
100	ZA-27 unreinforced	116	410	8.5	5.01
101	ZA-27 10% (vol.) SiC (28 - 40 μm)	120	350	4.2	4.89
102	ZA-27 10% (vol.) Si ₃ N ₄ (20 μm)	123	361	2.0	4.84
103	ZA-27 10% (vol.) Al ₂ O ₃ (40 μm)	116	347	3.5	4.68
104	ZA-27 10% (vol.) graphite (30 μm)	88	245	0.5	4.44
105	ZA-27 10% (vol.) B ₄ C (20 μm)	135			4.62
200	ZL-109 10% unreinforced	92			
201	ZL-109 30% (vol.) SiC (28 - 40 μm)	116			

ที่มา : Xiandong และคณะ (1997)

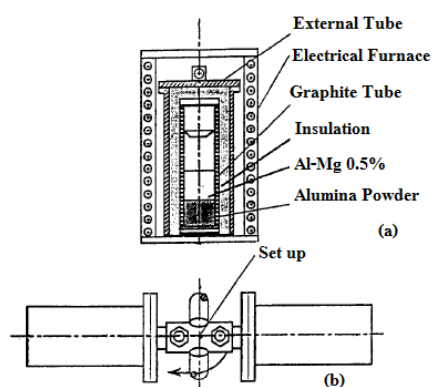


รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ 3 สมบัติของวัสดุผสมเนื้อโลหะที่มีโลหะชนิด ZA-27 เป็นเนื้อหลัก

ที่มา : Xiandong และคณะ (1997)

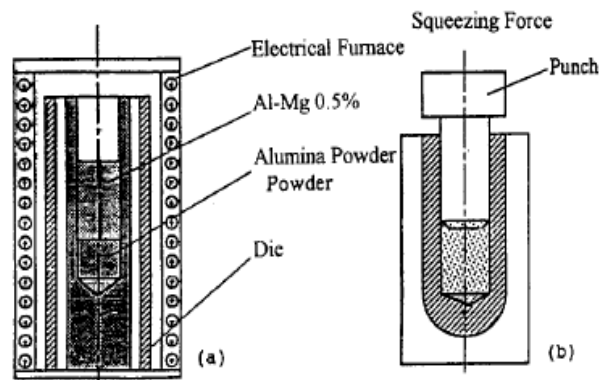
Taha และ El-Mahallawy (1998) พบว่าได้ทำการศึกษาวิธีการสร้างวัสดุผสมเนื้อโลหะด้วยการพัฒนาและประยุกต์ในการใช้ความดันของน้ำโลหะกับผงเซรามิก การประยุกต์ใช้ความดันเกิดขึ้นโดย 2 เทคนิคคือการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงและการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.27 และ 2.28 ตามลำดับ ทั้งสองวิธีถูกค้นพบในการทำให้อะลูมิเนียมและอะลูมินา (Al-Al₂O₃) เป็นวัสดุผสมเนื้อโลหะ ในที่นี้ได้ใช้ผงอะลูมินา (Al₂O₃) ใส่เข้าไปในท่อและตามด้วยชั้นอะลูมิเนียมให้เต็มท่อ โดยที่อะลูมิเนียมจะต้องถูกทำให้มีอุณหภูมิร้อนถึงจุดหลอมเหลวของอัลลอยด์ ในวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงท่อจะถูกทำให้หมุนรอบๆ แกนซึ่งตั้งฉากกับท่อ และทำให้เกิดแรงเหวี่ยง

เหนียวนำน้ำโลหะ ส่วนของวิธีการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวจะใช้แรงบีบกับน้ำโลหะ ซึ่งเหมือนกันกับการใช้เครื่องดันด้วยความร้อน ของผสมจะเกิดรูปร่างโดยการแทรกซึมของน้ำโลหะ น้ำโลหะจะไหลผ่านรูพรุนของเซรามิกภายใต้แรงดังกล่าว การแทรกซึมของทั้ง 2 วิธี ถูกพบว่าต่างกันแบบตรงกันข้าม



รูปที่ 2.27 แผนผังของ (a) หลักการของเทคนิคการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง (b) การประกอบแม่พิมพ์

ที่มา : Taha และ El-Mahallawy (1998)

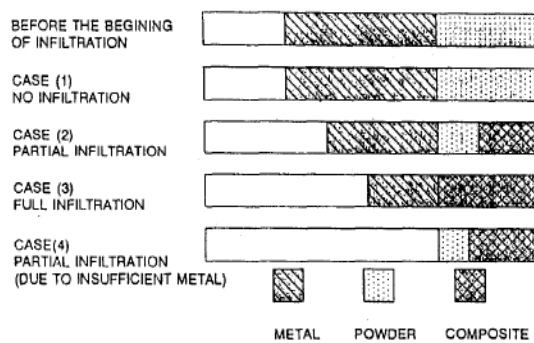


รูปที่ 2.28 แผนผังของ (a) หลักการของเทคนิคการหล่อโลหะแบบกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว (b) การประกอบแม่พิมพ์

ที่มา : Taha และ El-Mahallawy (1998)

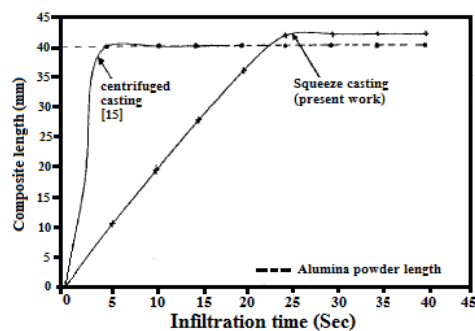
แต่อย่างไรก็ตาม 4 กรณีของการแทรกซึมที่หามาได้ทั้ง 2 วิธี นั้นแสดงในรูปที่ 2.29 มี 1.ไม่เกิดการแทรกซึมเลย เพราะว่าความดันที่ใช้้นต่ำกว่าความดันที่ทำให้ถอยกลับของผิวหน้า 2.เกิดการแทรกซึมไม่สมบูรณ์โดยยังเหลือทั้งโลหะและผงเซรามิก เพราะการใช้เวลาที่เร็วเกินไป 3.เกิดการแทรกซึมสมบูรณ์คือพอเหมาะทั้งการใช้น้ำโลหะและพอเหมาะในเวลา 4.แทรกซึมไม่สมบูรณ์คือใช้น้ำโลหะไม่พอเหมาะในการแทรกซึม ทั้ง 2 วิธี แนะนำให้ไปดูในการประยุกต์และสภาพของกระบวนการ ความแตกต่างของขนาดผงอะลูมินาในการใช้ประโยชน์กับอะลูมิเนียม และ Al - Si alloy ลักษณะโครงสร้างของวัสดุ กล่าวคือการกระจายตัวของอนุภาคทั้งของโลหะและเซรามิกจะต้องเข้ากันอย่างมั่นคง ให้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่ได้มาของทั้ง 2 วิธี โดยค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคของผงอะลูมินาควรอยู่ในช่วงระหว่าง 50 - 65% ผลการทดลองที่ได้คือขนาดผงอะลูมินาจะมีผลต่อระยะในการเข้าแทรกซึมของวัสดุผสมเนื้อโลหะคือหากขนาดผงอะลูมินายังมีขนาดเล็ก ความดันที่ใช้ในการเข้าแทรกซึมของวัสดุผสมเนื้อโลหะก็จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตาม สำหรับวิธีหล่อโลหะแบบเหวี่ยง ความยาวและขนาดผงคือ 40 mm และ 47 μm

ตามลำดับ การเพิ่มความเร็วในการหมุนเหวี่ยงก็จะเป็นการเพิ่มความดันของการหมุนเหวี่ยง ซึ่งก็จะทำให้ระยะในการเข้าแทรกซึมของวัสดุผสมเนื้อโลหะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงในรูปที่ 2.30 โดยความดันที่ทำให้ระยะในการเข้าแทรกซึมของวัสดุผสมเนื้อโลหะเต็มที่สุดคือ 130 kPa สำหรับวิธีการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว ความยาวคือ 40 mm ของทุกขนาดผงอะลูมินา ความดันที่ทำให้ระยะในการเข้าแทรกซึมของวัสดุผสมเนื้อโลหะเต็มที่สุดเริ่มคือ 65, 90, 130 และ 180 kPa ของทุกขนาดผงอะลูมินา ได้แก่ 80, 95, 115 μm (Taha and El-Mahallawy, 1998)



รูปที่ 2.29 ภาพร่างแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในการเข้าแทรกซึมของกรณีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง

ที่มา : Taha และ El-Mahallawy (1998)



รูปที่ 2.30 ระยะของวัสดุผสมเนื้อโลหะเปรียบเทียบกับเวลาในการเข้าแทรกซึมของทั้งสองกรณีการหล่อโลหะ

ที่มา : Taha และ El-Mahallawy (1998)

Pech-Canul และคณะ (2000) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการแทรกซึมซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปด้วยอะลูมิเนียมอัลลอยด์โดยกระบวนการแทรกซึมด้วยความดันต่ำ ซึ่งตัวแปรที่ต้องทำการตรวจสอบคือขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ระยะเวลาการเข้าแทรกซึม ความสูงของซิลิคอน

คาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ร้อยละของซิลิกอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานอัดขึ้นรูป การเคลือบสารซิลิกอนบนอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป จากสมการการหาค่าความดันที่น้อยที่สุดหรือค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้สำหรับการแทรกซึมไปในระหว่างช่องว่างของอนุภาคเซรามิกของเซรามิกอัดขึ้นรูปที่มีแรงต้านทานภายในระหว่างอนุภาคเซรามิก ที่สถานะค่าความตึงผิวหน้าของน้ำโลหะ 375 mN/m ค่าสัดส่วนช่องว่างของอนุภาคเซรามิก 0.5 พบว่าค่ามุมที่อนุภาคเซรามิกทำมุมกัน (θ) หาก $\theta > 90^\circ$ จะทำให้ผลของค่าความดันที่น้อยที่สุดได้ผลเป็นลบ ซึ่งหมายความว่าความดันภายนอกมีความจำเป็นในการช่วยเข้าแทรกซึม ในอีกด้านหนึ่งหาก $\theta > 90^\circ$ จะทำให้ผลของค่าความดันที่น้อยที่สุดได้ผลเป็นบวก ซึ่งหมายความว่าค่าความดันที่น้อยที่สุดมีความเป็นไปได้ในการแทรกซึมด้วยความดันต่ำนี้ จากผลการคำนวณทางทฤษฎีของทาคุชิ (Taguchi methods) สำหรับการออกแบบและคำนึงถึงตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลและ โครงสร้างระดับจุภาคดังที่กล่าวมาแล้ว ให้ผลดังตารางที่ 2.2

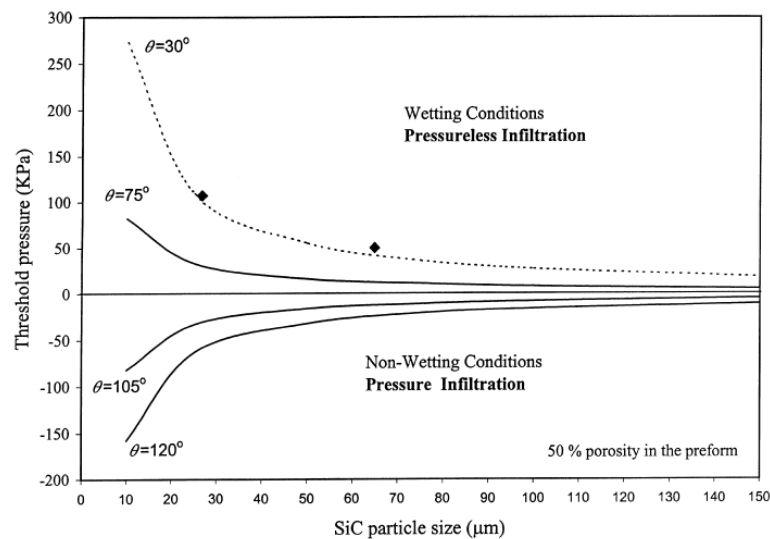
ตารางที่ 2.2 จากทฤษฎีของทาคุชิแสดงให้เห็นค่าตัวแปรที่สนใจ

No.	Infiltration time (min)	Particle size (mm)	1x2 ^a	Preform height (mm)	1x4 ^a	Preform Porosity (%)	SiC surface condition
1	45	65		32		50	Uncoated
2	45	65		44		60	Coated
3	45	25		32		60	Coated
4	45	25		44		50	Uncoated
5	60	65		32		50	Coated
6	60	65		44		60	Uncoated
7	60	25		32		60	Uncoated
8	60	25		44		50	Coated

ที่มา : Pech-Canul และคณะ (2000)

กรรมวิธีการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปนั้นคือ ใช้ส่วนผสมผงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาค 25 μm และ 65 μm ด้วยอัตรา 10% ผสมกับแป้งและสารแว็กซ์อิมัลชัน (wax emulsion) ด้วยอัตรา 5% ตักใส่แม่พิมพ์และอัดขึ้นรูปให้ได้ลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm นำชิ้นงานอัดขึ้นรูปไปอบไล่แป้งและสารแว็กซ์อิมัลชันให้หายไปที่อุณหภูมิ 225 $^\circ\text{C}$ เป็นเวลามากกว่า 2

ชั่วโมง ในส่วนของกรรมวิธีการหล่อโลหะคือนำชิ้นงานอัดขึ้นรูปใส่เข้าไปในท่อละอุมินาแนวนอน ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 cm จากนั้นนำไปเข้าสู่ระบบกระบวนการแทรกซึมด้วยความดันต่ำ สถานะความดันสูญญากาศ 3.5×10^{-2} atm และให้ความร้อนชิ้นงานอัดขึ้นรูปซึ่งอยู่ในท่อละอุมินาให้บริสุทธิ์ด้วยก๊าซอาร์กอนอัตรา $15 \text{ }^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ จนถึงอุณหภูมิ 1,050 $^{\circ}\text{C}$ จากนั้นให้ความร้อนให้บริสุทธิ์มากยิ่งขึ้นด้วยก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราเดิมจนถึงอุณหภูมิ 1,235 $^{\circ}\text{C}$ คงสถานะไว้ 45 -60 นาที โดยอุณหภูมิได้ทำมุกกัน 31 $^{\circ}$ และมีแรงดึงผิวหน้าระหว่างอนุภาค 375 mN/m ให้ผลค่าความดันที่น้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.31 จากนั้นนำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ผลิตได้มาตรวจและทดสอบสมบัติ เช่น การหาค่าความหนาแน่น การถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.31 ค่าความดันที่น้อยที่สุดที่ใช้ในสภาวะการเข้าแทรกซึมของงานในครั้งนี้
ที่มา : Pech-Canul และคณะ (2000)

แบบส่องกราด การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX) และการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของของแข็งด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) การหาโมดูลัสการยืดหยุ่น การหาโมดูลัสการแตกหัก ซึ่งให้ผลดังตัวอย่างตารางที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าที่มีความเหมาะสมของตัวแปรที่ได้ทำการสนใจและส่งผลทำให้ค่าสมบัติที่ทำการทดสอบมีค่าที่ดี (Pech-Canul *et al.*, 2000)

ตารางที่ 2.3 การวัดค่าสมบัติของวัสดุผสมเนื้อโลหะ ชนิด Al/SiC

Composite No.	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	E (GPa) ^a	MOR (MPa) ^a
1	2.79	5.4	226	183
2	2.75	3.9	162	184
3	2.75	3.9	164	157
4	2.73	7.5	165	251
5	2.85	2.1	235	193
6	2.67	7.9	185	190
7	2.82	2.8	206	298
8	2.83	2.8	232	219

* E คือ โมดูลัสการยืดหยุ่นและ MOR คือ โมดูลัสการแตกหัก
ที่มา : Pech-Canul และคณะ (2000)

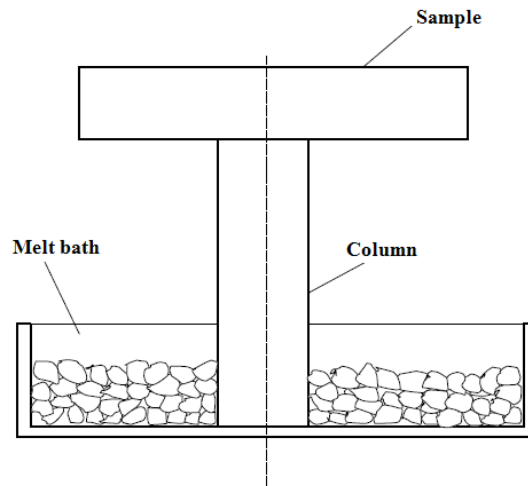
ตารางที่ 2.4 ค่าของตัวแปรที่มีความเหมาะสมในการที่ทำให้สมบัติโมดูลัสการยืดหยุ่นมีค่าที่ดี

Infiltration time (min)	60
SiC particle size (mm)	65
Preform height (mm)	32
Preform porosity (%)	50
SiC surface condition	Coated with a thin layer of Si metal

ที่มา : Pech-Canul และคณะ (2000)

Pan และคณะ (2003) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาถึงโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructures) และสมบัติการแทรกซึมซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปด้วยวิธีการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ ของสารประกอบเหล็กซิลิคอน โดยที่สารประกอบเหล็กซิลิคอนที่ใช้ทดลองมี 3 ชนิดคือ Fe₃Si, Fe₅Si₃ และ FeSi สารซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้มาผลิตซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป คือ α -silicon carbide powder แบบ NF0/860 และ UF-15 ขึ้นตัวอย่างซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ถูกอัดจากเป็นผงให้เป็นรูปร่างเป็นจานวงกลม (เส้นผ่าศูนย์กลาง 45 mm ความหนา 5-6 mm) ด้วยแรงอัด 120 MPa การแทรกซึม

ซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปด้วยสารประกอบเหล็กซิลิคอนทั้ง 3 ชนิดทำในเตาเผา Astro furnace ด้วยอัตราความร้อนที่ $50\text{ }^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ จนถึง $1,600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และคงอุณหภูมิไว้ 60 นาที แล้วปิดเครื่องปล่อยให้เย็นตัวในเตา โดยจัดให้เสาคอลัมน์ตั้งอยู่ในอ่างที่มีก้อนเศษสารประกอบเหล็กซิลิคอนกระจายล้อมรอบและที่ปลายด้านบนของเสาคอลัมน์วางซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แผนผังของวิธีการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ
ที่มา : Pan และคณะ (2003)

ผลการวิจัยที่ได้จากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ โครงสร้างระดับจุลภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ แบบ NF0/860 ที่ถูกแทรกซึมด้วย Fe_3Si พบว่าอนุภาคคาร์บอนซึ่งมีสีดำไม่ยึดเกาะต่อเนื่องกัน ส่วนของ Fe_3Si และ FeSi คาร์บอนยึดเกาะต่อเนื่องกันและอนุภาคซิลิคอน (Silicon, Si) ก็กระจายตัวเป็นอย่างดี และสำหรับสมบัติทางกลแสดงในตารางที่ 2.5 ของทั้งความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) ความแข็งแรงในการทนต่อการดัดโค้ง และค่าไวบูลมอดูลี (Weibull moduli) ของผสม $\text{SiC}/\text{Fe}_3\text{Si}$, $\text{SiC}/\text{Fe}_3\text{Si}_3$, SiC/FeSi ที่ได้จากวิธีการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ มีดังนี้ SiC (NF0/860)/ Fe_3Si มีค่ากำลังในการรับแรงดัด (Flexure strength) และค่าไวบูลมอดูลีต่ำที่สุด ส่วน SiC (NF0/860)/ Fe_3Si_3 และ SiC (NF0/860)/ FeSi มีค่าความแข็งระดับจุลภาคและค่าความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง (Bending strength) สูงกว่า และค่าไวบูลมอดูลีต่ำกว่าก่อนสารประกอบเหล็กซิลิคอนเพียงเล็กน้อยเป็นสิ่งที่ชี้แนะได้ว่าอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์แข็งแรงขึ้นโดยได้รับผลกระทบจาก Fe_3Si_3 และ FeSi และสำหรับ SiC (UF-15)/ Fe_3Si_3 เป็นวัสดุที่แข็งที่สุดแต่มีค่าไวบูลมอดูลีต่ำ ค่าความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) ของ SiC (NF0/860)/ Fe_3Si_3 และ SiC (NF0/860)/ FeSi และ SiC (UF-15)/ Fe_3Si_3 มีค่ามากกว่าค่าความแข็ง

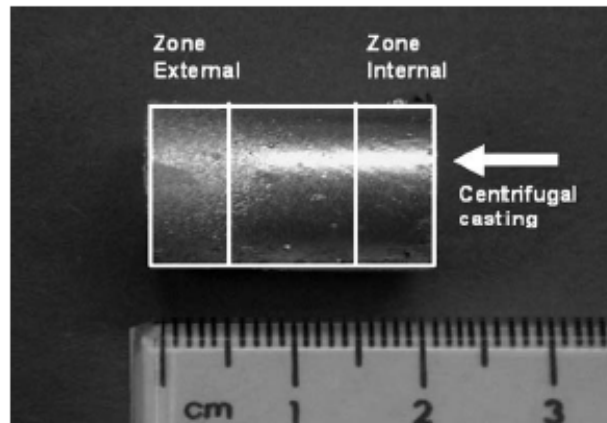
ระดับจุลภาคของแต่ละสารประกอบซิลิกอน แต่ในส่วนของ SiC (NFO/860)/Fe₃Si กลับไม่มีผลต่อความแข็งแรงระดับจุลภาคเพราะการไม่รวมยึดติดกันของอนุภาคคาร์บอนที่เกิดขึ้นในวัสดุผสม (Pan *et al.*, 2003)

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้แทรกซึมด้วยซิลิกอน

Infiltrate	SiC	Vickers microhardness	Flexure strength (MPa)	Weibull modules
Fe ₃ Si	NFO/860	-	375	10
Fe ₅ Si ₃	NFO/860	1380	635	27
FeSi	NFO/860	1400	420	28
Fe ₅ Si ₃	UF-15	1550	610	14
Fe ₃ Si	Monolithic	700	410	25
Fe ₅ Si ₃	Monolithic	750	485	28
FeSi	Monolithic	850	280	20

ที่มา : Pan และคณะ (2003)

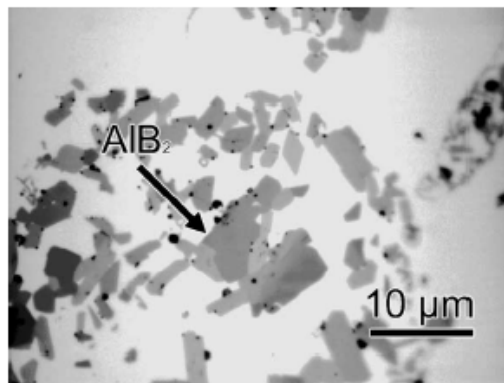
Duque และคณะ (2005) ได้ศึกษาการแบ่งชนิดตามหน้าที่ของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ได้ผลิตโดยวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง การผลิตซึ่งมีอะลูมิเนียมอัลลอยด์เป็นเนื้อหลัก และแบ่งชนิดวัสดุตามหน้าที่ด้วยกรรมวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงและเสริมแรงด้วยอนุภาค AIB₂ โดยสนใจใน 3 กรณีของผสมการหล่อเหวี่ยงคือ Al-5 wt.% B, Al-7.2 wt.% B, Al-4 wt.% B-2 wt.% Mg การหล่อโลหะอะลูมิเนียมแบบเหวี่ยงจะมีสปริงขึ้นสำหรับเป็นตัวควบคุมการหมุนให้ไปข้างหน้ายังบริเวณที่รองรับ ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 89.9 mm และความยาว 27 mm ในกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงนี้ใช้ความเร็วในการหมุน 400 rpm อุณหภูมิโลหะเหลวในการเท 750 °C สุดท้ายจะได้ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้อโลหะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 cm ความยาว 2 cm การวัดความแข็งแรงบรีคเวลด์ 15 W การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคและค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกจะเป็นตัวกำหนดการแทรกซึมของอนุภาคสังเกตได้จากการตัดขวาง โดยแบ่งเป็นบริเวณภายนอกซึ่งเกิดการแทรกซึมกลายเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม และบริเวณภายในที่ไม่เกิดการแทรกซึม (การแข็งตัวจะค่อยๆ เริ่มจากบริเวณผิวนอกของชิ้นงานไปถึงภายในบริเวณตรงกลาง) ดังแสดงในรูปที่ 2.33 การวิเคราะห์โครงสร้าง



รูปที่ 2.33 ภาพถ่ายของชิ้นงานจากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง ซึ่งแสดงให้เห็นบริเวณต่างๆ ตามทิศทางแนวยาว

ที่มา : Duque และคณะ (2005)

ระดับจุลภาคได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของการเสริมแรงในค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก ถ่ายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น Nikon Epiphot2 ดังแสดงในรูปที่ 2.34

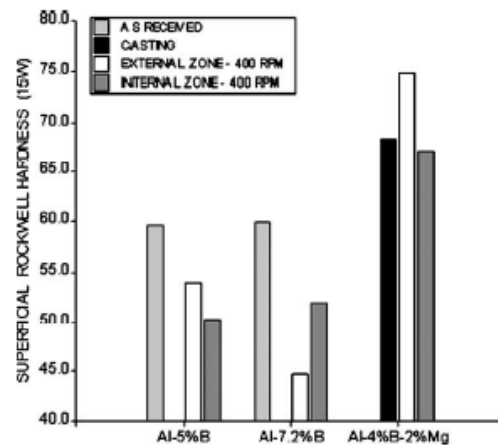


รูปที่ 2.34 ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของวัสดุผสม Al-B เสริมแรงด้วย 5 wt.% B ของการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง

ที่มา : Duque และคณะ (2005)

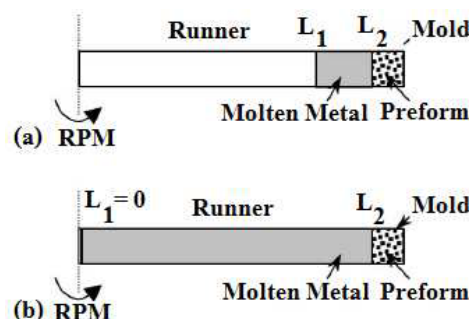
การศึกษาอัตราการกัดกร่อนของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.5% จากผลการทดสอบทั้งหมดพบว่าผลการทดลองหล่อโลหะแบบเหวี่ยงแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณภายนอกจะมีค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกดีกว่า (ค่าร้อยละ

ละความพรุนของชิ้นงานน้อย) และมีค่าความแข็งแบบร็อกเวลล์มากกว่าที่บริเวณภายในของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.35 อะลูมิเนียมที่เป็นเนื้อหลักจะมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่าของวัสดุผสมเนื้อ อะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง (Duque *et al.*, 2005)



รูปที่ 2.35 การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ 15 W บนระนาบแนวขวาง
ที่มา : Duque และคณะ (2005)

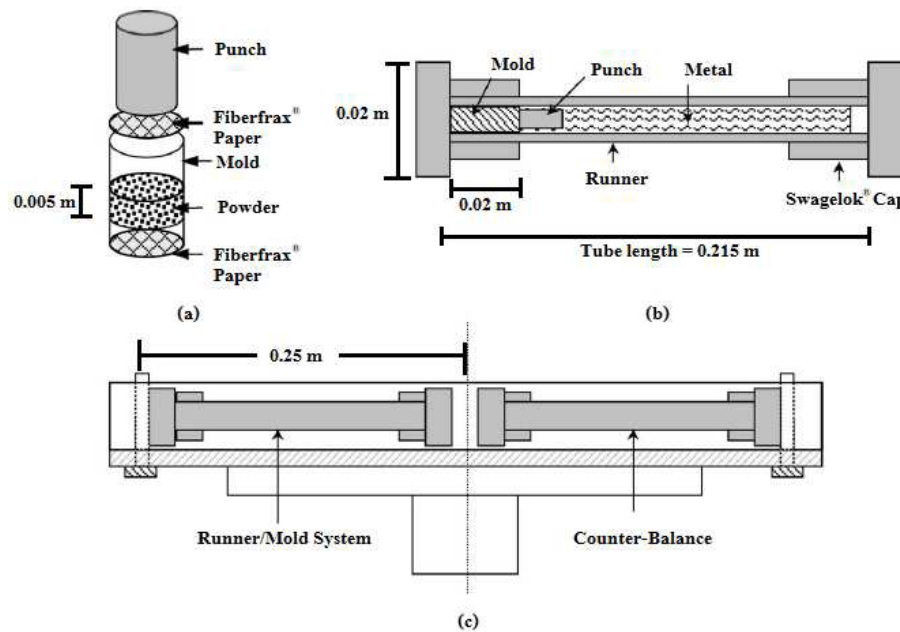
Wannasin และ Flemings (2005) ได้เสนอสิ่งประดิษฐ์ที่มีวิธีการทำให้เกิดวัสดุผสมเนื้อโลหะ โดยใช้วิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงซึ่งมีความแตกต่างจากวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงธรรมดาคือวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงปริมาณน้ำโลหะที่เดิมในการหล่อจะเต็มทั้งที่ชิ้นส่วนแม่พิมพ์และชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งปริมาณน้ำโลหะนี้จะมากกว่าวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงธรรมดา แสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ภาพวาดแผนผังของ (a) กระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงธรรมดา (b) กระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง

ที่มา : Wannasin และ Flemings (2005)

และวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ว่านี้ก็จะเป็นการใช้โลหะเป็นวัสดุหลักแต่มีวัสดุอื่นมาช่วยเสริม สิ่งประดิษฐ์ชิ้นนี้ประกอบไปด้วยส่วนของแม่พิมพ์หล่อโลหะและส่วนของท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ซึ่งปลายด้านหนึ่งของท่อทางเดินน้ำโลหะจะติดกับที่รองรับน้ำโลหะส่วนอีกปลายติดกับแม่พิมพ์ ภายในแม่พิมพ์จะมีเส้นใยเซรามิกพูน เมื่อแม่พิมพ์หล่อโลหะเริ่มเกิดการหมุนรอบแกนหมุน น้ำโลหะที่อยู่ในที่ขึ้นส่วนรองรับน้ำโลหะก็จะถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้เข้าสู่ในส่วนของแม่พิมพ์ด้วยความดันระดับหนึ่ง แสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 แผนผังของ (a) ชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูปและแม่พิมพ์ (b) ระบบท่อทางวิ่งน้ำโลหะและแม่พิมพ์ (c) ระบบการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง

ที่มา : Wannasin และ Flemings (2005)

ความดันนั้นจะต้องคงที่ตลอดไม่ว่าในขณะที่เซรามิกเกิดการแทรกซึมกับน้ำโลหะหรือหลังจากที่เกิดการแทรกซึมแล้ว แม่พิมพ์หล่อโลหะจะอยู่ภายในแกนของการหมุนและพร้อมรับโลหะที่ใส่เพิ่มเข้าไปเพื่อรักษาความดันให้คงที่ ระบบการทำงานนี้จะต้องมีประตูกอยกันไม่ให้น้ำโลหะไหลเข้าไปสู่แม่พิมพ์ก่อนที่จะได้เวลาและความดันที่เหมาะสม ประตุนี้จะต้องมีกลไกที่คอยเปิด-ปิดสามารถที่จะทำปฏิกิริยาได้ตอบกับน้ำโลหะได้ โดยควบคุมการเปิดและปิดด้วยการหมุนรอบของแม่พิมพ์ที่ความดันที่พอเหมาะ ประตูจะประกอบไปด้วยสลักกรูพูนที่มีลักษณะเฉพาะในการรับความดันที่แทรกซึม คือเมื่อได้รับความดันที่เหมาะสมน้ำโลหะก็จะไหลผ่านสลักกรูพูนเพื่อเคลื่อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์ และเมื่อน้ำโลหะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ก็จะเกิดการแทรกซึมกับเซรามิก ทำให้ได้โลหะที่มี

เซรามิกเป็นตัวช่วยเสริมสมบัติให้ดีขึ้น ในการทดลองจะมีวิธีการและผลการคำนวณความดันของน้ำโลหะที่เกิดในชั้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะและค่าความดันเริ่มต้น (Threshold pressure, P_{th}) ที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไปในระหว่างช่องว่างของอนุภาคผงเซรามิก ผงเซรามิกที่ใช้ในการทดลองคือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด $24 \mu\text{m}$ และอะลูมินาขนาด 300 nm โลหะที่ใช้ในการทดลองคือดีบุก (Tin) การเพิ่มความเร็วในการหมุนเหวี่ยงก็จะเป็นการเพิ่มความดันของของน้ำโลหะที่เกิดในชั้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะเช่นเดียวกัน โดยความเร็วในการหมุนเหวี่ยงสูงสุดและต่ำสุดคือ $2,700 \text{ rpm}$ และ 603 rpm ซึ่งทำให้เกิดความดันของน้ำโลหะที่เกิดในชั้นส่วนต่อทางวงน้ำโลหะที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดคือ 0.73 MPa และ 15 MPa ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 2.6 ในส่วนของค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไปในระหว่างช่องว่างของอนุภาคผงเซรามิก ที่ได้จากการคำนวณและที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองก็มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานและความเป็นจริง (Wannasin and Flemings, 2005)

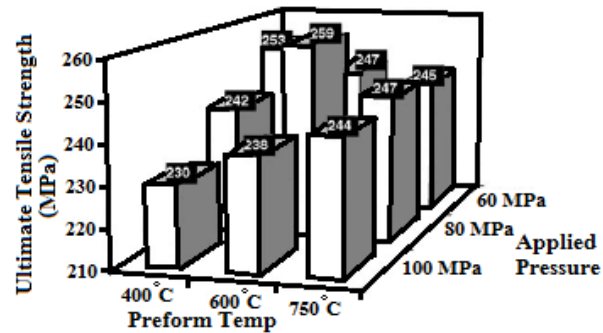
ตารางที่ 2.6 ค่าความดันเริ่มต้นสำหรับการแทรกซึมจากการทดลองและการคำนวณ

Sample	D (μm)	V_p	Calculated P_{th} (MPa)	Experimental P_{th} (MPa)
S24	19.49	0.56	0.59	1.05
T2	1.7	0.59	7.69	6.50
A1d	0.9	0.48	9.32	9.65
A03d	0.58	0.41	10.89	9.58

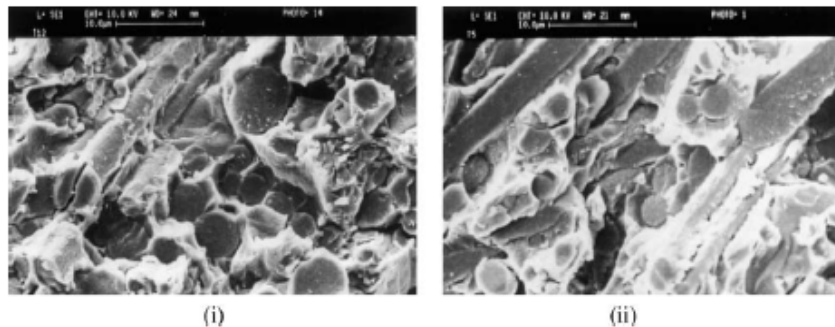
ที่มา : Wannasin และ Flemings (2005)

Yong และ Clegg (2005) ได้ค้นคว้าหากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับเทคนิควิธีการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว เพื่อสร้างแมกนีเซียมอัลลอยด์ให้เป็นวัสดุผสมเนื้อโลหะ โดยใช้เส้นใยซาไฟด์ (Safill) เป็นตัวเสริม ความดันที่เริ่มใช้จะเริ่มจาก 0.1 MPa ไปจนถึง 120 MPa และอุณหภูมิก็เริ่มจาก $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ไปจนถึง $750 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งจากการทดลองทำให้พบว่า ความดันที่เหมาะสมต่อการใช้งานประมาณ 80 MPa และอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการแทรกซึมมีค่าประมาณ $600 \text{ }^\circ\text{C}$ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอ การทดสอบสมบัติที่ได้จากชิ้นงาน โดยใช้วิธีทดสอบต่างๆ เช่น การทดสอบความแข็ง การทดสอบด้วยแรงดึง แสดงในรูปที่ 2.32 การตรวจสอบคุณภาพของโลหะที่ทำ

การผสมแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูการเข้าไปแทรกซึมของเส้นใยในเนื้อโลหะผสม แสดงในรูปที่ 2.38 (Yong and Clegg, 2005)



รูปที่ 2.38 ค่าความแข็งแรงในการดึงสูงสุดสำหรับวัสดุผสมเนื้อโลหะชนิด RZ5DF-14 vol.% Saffil ของแต่ละค่าความดันและอุณหภูมิของเซรามิกอัดขึ้นรูป
ที่มา : Yong และ Clegg (2005)

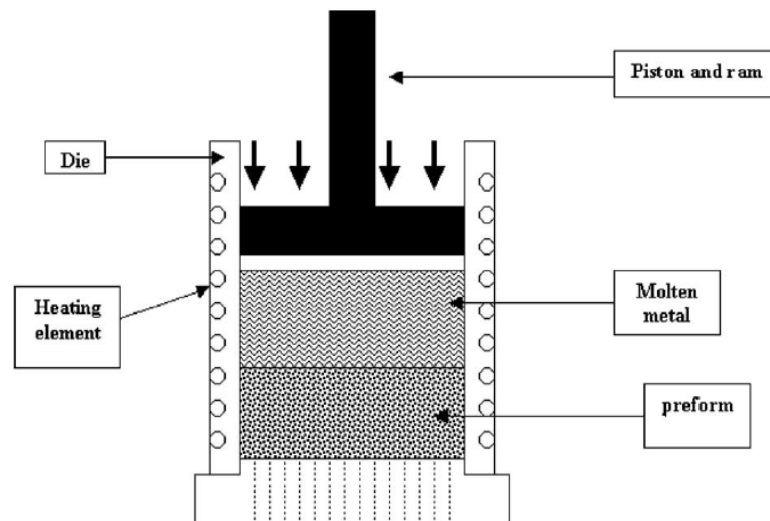


รูปที่ 2.39 ภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวหน้าวัสดุผสมเนื้อโลหะชนิด RZ5DF-14 vol.% Saffil ที่กรณีอุณหภูมิเซรามิกอัดขึ้นรูป
(i) 400 °C (ii) 600°C ตามลำดับ

ที่มา : Yong และ Clegg (2005)

Seyed Reihani (2006) ได้ศึกษากระบวนการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวและลักษณะเฉพาะของวัสดุผสมเนื้อโลหะ ชนิดโลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่ใช้เป็นเนื้อหลัก และอนุภาคที่ใช้สำหรับเสริมแรงคือซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค 16 μm และ 22 μm ค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 30% โดยที่ซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ถูกผลิตโดยการผสมสารอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และโคโรดอลซิลิกา (colloidal silica) กระบวนการหล่อโลหะจะเริ่มจากการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเข้าไปแม่พิมพ์ ซึ่งมีความสูง 20 mm และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

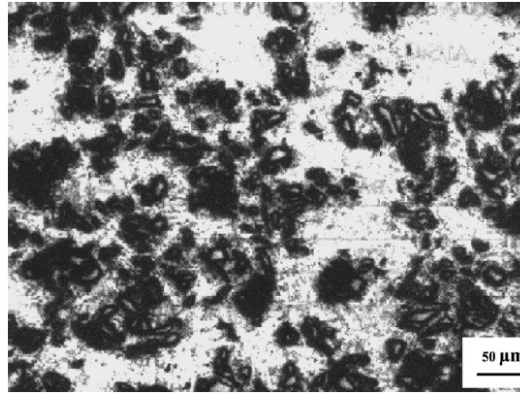
100 mm ซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปจะถูกอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อมาจะถูกอบผนีกที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำให้ชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป มีค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 30% และความพรุน 70% ของปริมาตร จากนั้นทั้งแม่พิมพ์และซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปจะถูกเผาอุ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C โลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่หลอมเหลวแล้วถูกเทเข้าแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 800 °C จากนั้นจะถูกกดอัดขึ้นรูปด้วยความดัน 100 MPa โดยเครื่องอัดตัวอย่างไฮดรอลิกส์ โลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061 เหลว จะเข้าทำการแทรกซึมและแข็งตัวในซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ต่อมาจะถูกอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 530 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้กลายเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงในรูปที่ 2.40 หลังจากนั้นจะนำวัสดุผสมเนื้อโลหะมาทำการทดสอบสมบัติของวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ผลิตขึ้นได้ เช่น การทดสอบความ



รูปที่ 2.40 แผนภาพการทำงานของเครื่องมือกระบวนการกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว
ที่มา : Seyed Reihani (2006)

แข็งแบบบรินล โหลดน้ำหนัก 15 kg และ 30 kg ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด 2.5 mm การทดสอบความสึกหรอ ซึ่งจะมี 2 แบบ คือการขัดสีความสึกหรอ (abrasive wear) ด้วยผงทราย โดยเครื่อง ASTM G65 สภาวะโหลดน้ำหนัก 150 N ความเร็วในการหมุน 2000 rpm อัตราไหลของผงทราย 350 gmin⁻¹ และการทดสอบความสึกหรอแบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมา (reciprocating wear) ด้วยสภาวะโหลดน้ำหนัก 10 kg อัตราการสไลด์ 17 cms⁻¹ การทดสอบตรวจดูโครงสร้างได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าโลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่หลอมเหลวสามารถแทรกซึมเข้าระหว่างช่องว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์

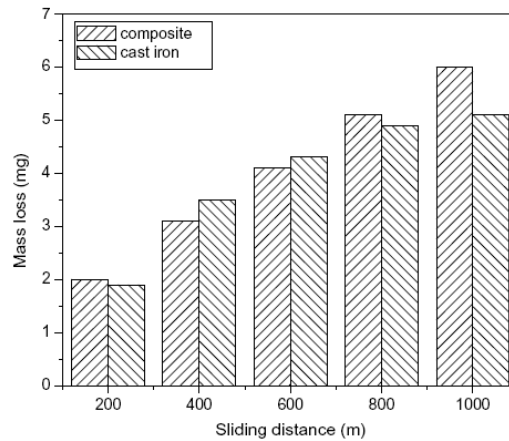
ไบต์ได้ดีและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ดีจะมีส่วนช่วยการเพิ่มปริมาตร ลดรูพรุน และการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม เกรด 6061 และเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ ค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 30% ซึ่งถูกผลิตด้วยวิธีการบวกรกอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว

ที่มา : Seyed Reihani (2006)

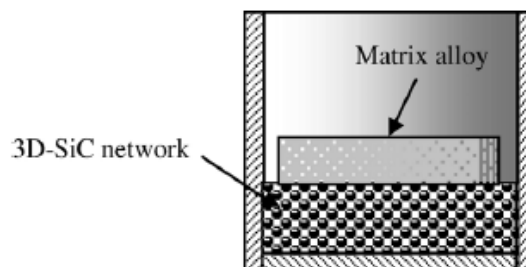
(บริเวณที่เป็นสีดำคืออนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์) ในส่วนของสมบัติทางกลให้ผลดังต่อไปนี้ วัสดุผสมเนื้อโลหะมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะอะลูมิเนียม เกรด 6061 ที่เป็นเนื้อหลัก วัสดุผสมเนื้อโลหะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจาก 70 MPa เป็น 83 MPa ด้วยการเพิ่มซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีค่าสัดส่วนปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 30% ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค 22 μm ค่ากำลังครากเพิ่มขึ้นจาก 110 MPa เป็น 144 MPa ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 172 MPa เป็น 194 MPa ตามลำดับ ค่ามวลที่หายไปจากการทดสอบความสึกหรอของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม เกรด 6061 และเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กหล่อเทาประเภท pearlitic cast iron แสดงในรูปที่ 2.42 (Seyed Reihani, 2006)



รูปที่ 2.42 ค่ามวลที่หายไปจากการทดสอบความสึกหรอบนแบบเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 6061 เสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์และเหล็กหล่อเทาประเภท pearlitic cast iron เทียบกับระยะทางในการสไลด์ด้วยสภาวะโหลดน้ำหนัก 10 kg อัตราการสไลด์ 17 cms^{-1}

ที่มา : Seyed Reihani (2006)

Chen และคณะ (2006) คิดค้นวัสดุผสมเนื้อโลหะที่เสริมแรงด้วยโครงข่ายซิลิคอนคาร์ไบด์สามมิติโดยวิธีการแทรกซึมด้วยความดันต่ำ กระบวนการคือจัดโครงข่ายซิลิคอนคาร์ไบด์สามมิติวางไว้ที่ก้นภาชนะและนำก้อนอะลูมิเนียมอัลลอยด์ให้เป็นเนื้อหลัก (Al matrix alloy) วางไว้ด้านบนเข้าเตาเผาสุญญากาศที่อุณหภูมิ $1,360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ความดันมากกว่า $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ก่อนอัลลอยด์ที่เป็นเนื้อหลักจะถูกหลอมที่อุณหภูมิ $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้ค้างที่อุณหภูมิไว้ 30 นาที ปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง แสดงในรูปที่ 2.43 สำหรับโครงข่ายซิลิคอนคาร์ไบด์สามมิตินี้มีขนาด $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$

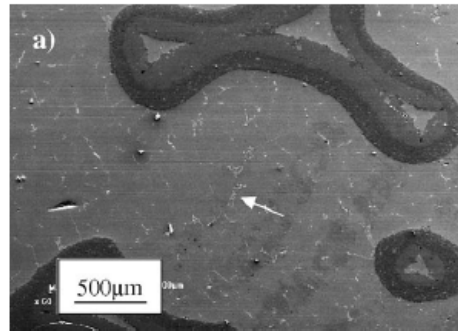


รูปที่ 2.43 ภาพแผนผังเครื่องมือของวิธีการแทรกซึมด้วยความดันต่ำ

ที่มา : Chen และคณะ (2006)

และหุบเคลือบด้วยนิกเกิล ผลการทดลองได้เปรียบเทียบกับโครงข่ายซิลิคอนคาร์ไบด์สามมิติที่ไม่

ได้ชุบเคลือบนิเกิล (Nickel, Ni) ผลคือโครงข่ายซัลฟิดคอนคาร์ไบด์ที่ชุบเคลือบนิเกิลเกิดเป็นวัสดุผสมเนื้อโลหะ ส่วนที่ไม่ชุบนิเกิลไม่เกิดเป็นวัสดุผสมเนื้อโลหะ ที่ขึ้นในปฏิกิริยายังคงเหลือเศษซัลฟิดคอนและเกิดมีรอยแตก (ในระหว่างปฏิกิริยาโครงข่ายซัลฟิดคอนคาร์ไบด์สามมิติ เกิดหดตัว ความเค้นมีค่ามากกว่าความแข็งแรงทำให้โครงข่ายซัลฟิดคอนคาร์ไบด์เกิดรอยแตกขึ้น) คาดว่าน่าจะเกิดในช่วงการผสม ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างก้อนอัลลอยด์ที่เป็นเนื้อหลักและซัลฟิดคอนคาร์ไบด์สามมิติส่วนใหญ่ประกอบด้วยซัลฟิดคอนและอะลูมิเนียม โดยที่ไม่พบชั้นนิเกิลเคลือบอยู่เพราะชั้นนิเกิลเคลือบที่เป็นตัวช่วยในกระบวนการแทรกซึมจะสลายตัวในน้ำอะลูมิเนียมระหว่างการเกิดปฏิกิริยาซัลฟิดคอนคาร์ไบด์และอะลูมิเนียม จากการส่องดูกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบบริเวณอะลูมิเนียมและนิเกิลส่วนยูเทคติก (Al-Ni eutectic) ในอะลูมิเนียมเนื้อหลัก แสดงในรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยโครงข่ายซัลฟิดคอนคาร์ไบด์ 3 มิติ แสดงรูปแบบอะลูมิเนียมและนิเกิลส่วนยูเทคติกในเนื้อหลัก

ที่มา : Chen และคณะ (2006)

จากการผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การที่จะทำการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะนั้นมีหลายวิธี ซึ่งก็ตรงกับเนื้อหาในหัวข้อ 2.2 วิธีหลักๆ ในการผลิตวัสดุผสมเนื้อโลหะ เช่น การหล่อโลหะแบบเหวี่ยง การกดอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลว การแทรกซึมด้วยความดันต่ำ การแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ และวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ผลิตได้ก็มีหลายชนิด เช่น Al/Al₂O₃, Mg/Safill, Al/AlB₂, Al/SiC โดยเฉพาะวัสดุผสมเนื้อโลหะชนิด Al/SiC นั้นเป็นวัสดุผสมเนื้อโลหะชนิดเดียวกันกับงานวิจัยครั้งนี้ แต่อาจจะต่างกันที่วิธีการผลิต ผลการทดลอง สมบัติของวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ผลิตได้อีกทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ทำการศึกษานั้นยังแสดงถึงวิธีการทดสอบและผลของการทดสอบสมบัติของวัสดุผสมเนื้อโลหะที่ผลิตได้อีกด้วย เช่น การทดสอบแรงด้านการเสียดสี การทดสอบความสึกหรอ การทดสอบความแข็งทั้งแบบบริเนล แบบร็อคเวลด์ และแบบวิกเกอร์ ความแข็งแรงในการทน

ต่อการตัดโค้ง ค่าไวบูลมอดูลี ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ความหนาแน่น การตรวจโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ทั้งแบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราดและจุลทรรศน์แบบแสง จากผลการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทางผู้วิจัยมีข้อมูลเนื้อหาและทราบถึงผลกระทบ ตัวแปรที่มากเพียงพอที่อาจส่งผลกระทบต่อแนวทางในการพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมโดยใช้เซรามิกซิลิโคนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเสริมแรงและโลหะอะลูมิเนียม เกรด A356 เป็นเนื้อหลัก เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ได้จริง สมบัติที่ทำการทดสอบมีผลที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะเนื้อหลัก (Chen *et al.*, 2006)

บทที่ 3

การวิเคราะห์และผลการคำนวณค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมและ ออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

ในการวิจัยครั้งนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึม โดยการใช้โดยการใช้เซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเสริมแรงและโลหะอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลัก เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปร ซึ่งจะต้องมีการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยครั้งนี้ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ค่าความดันน้ำโลหะ ซึ่งมีตัวอย่างผลการคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์และออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

จากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 เรื่องทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวกับชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของเครื่องหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง โดยคำนึงถึงทฤษฎีเรื่องการออกแบบเครื่องจักรและค่าที่มีผลต่อการทดลองวิจัยเป็นหลัก ซึ่งผลการคำนวณค่าที่มีผลต่อการออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงและการทดลองวิจัยหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม มีดังต่อไปนี้

3.1.1 ค่าความดันของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ

ค่าความดันของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะคือความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ได้จากการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง ซึ่งเกิดในชั้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวนี้อาจมีผลอย่างมากต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม หากมีค่ามากเพียงพอ น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวก็จะสามารถเข้าแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูปก่อนให้เกิดชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ 2.1 ของบทที่ 2

ตัวอย่างผลการคำนวณหาค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ โดยที่ $\rho_{Al} = 2,670 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $L_2 = L_r = 300 \text{ mm}$ และ $\Omega = 343, 800, 1000, 1200, 1800 \text{ rpm}$ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลคำนวณหาค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ

ผลคำนวณหาค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในส่วนต่อทางวงน้ำโลหะ			
$\rho_{Al}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Ω, rpm	L_2, mm	P_c, MPa
2,670	343	300	0.15
2,670	800	300	0.84
2,670	1,000	300	1.32
2,670	1,200	300	1.90
2,670	1,800	300	4.26

จากผลการคำนวณหาค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในส่วนต่อทางวงน้ำโลหะซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว (P_c) กรณีระดับน้ำโลหะเต็มทั้งในระยะจากจุดหมุนถึงปลายสุดชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง จะขึ้นกับความเร็วเชิงเส้น (Ω) ในการหมุนเหวี่ยง หากความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงมีค่ามากย่อมทำให้ค่าความเร็วรอบเชิงมุม (ω) และค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในส่วนต่อทางวงน้ำโลหะมีแนวโน้มค่ามากขึ้นตาม ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้ในการทดลองวิจัยครั้งนี้คือ 1,800 rpm และ 343 rpm เกิดความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในส่วนต่อทางวงน้ำโลหะที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดคือ 4.26 MPa และ 0.15 MPa ตามลำดับ

3.1.2 ผลการคำนวณหาความดันเริ่มต้น (Threshold pressure, P_{th})

ค่าความดันเริ่มต้นคือค่าความดันที่น้อยที่สุดที่น้ำโลหะใช้แทรกซึมเข้าไปในระหว่างช่องว่างของอนุภาคผงเซรามิก ถ้าความดันนี้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงต้านทานภายในระหว่างอนุภาคเซรามิกในซิลิโคนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้การไหลของน้ำโลหะหยุด และน้ำโลหะเกิดการแข็งตัวก่อนเข้าแทรกซึมระหว่างช่องว่างอนุภาคเซรามิกได้เพียงพอ ซึ่งคำนวณหา

ได้จากสมการที่ 2.2 ของบทที่ 2

ตัวอย่างผลการคำนวณหาค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยที่ $\lambda = 3.00$, $\gamma_{lv} = 0.86 \text{ N/m}$, $\theta = 180^\circ$, $D_p = 13.5, 25, 68, 100 \text{ }\mu\text{m}$, $V_p = 0.5, 0.6$ ทำให้สามารถหาค่าความดันเริ่มต้นได้ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณหาค่าความดันเริ่มต้น

$D_p, \mu\text{m}$	V_p	Threshold pressure, MPa
13.5	0.5	1.15
13.5	0.6	1.72
25	0.5	0.62
25	0.6	0.93
68	0.5	0.23
68	0.6	0.34
100	0.5	0.15
100	0.6	0.23

จากผลการคำนวณหาค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.2 นั้น แสดงให้เห็นว่าหากค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่าน้อยและค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกมีค่ามาก ยิ่งทำให้ค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่ามากขึ้น เช่น ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ $13.5 \text{ }\mu\text{m}$ และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 0.6 ทำให้เกิดค่าความดันเริ่มต้น 1.72 MPa เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ในข้อ 3.1.1 นั้น พบว่าที่กรณีความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยง $1,800 \text{ rpm}$ ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะมีค่ามากกว่าค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ทุกค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก แสดงให้เห็นว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวมีค่าความดันเพียงพอที่จะเข้าไปแทรกซึมในระหว่างช่องว่างของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้

3.1.3 ผลการคำนวณค่าความดันสูงสุด (Maximum pressure, P_{max})

ค่าความดันสูงสุดคือค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ในท่อทางวิ่งน้ำโลหะ โดยค่าความดันสูงสุดนี้มีค่าขึ้นอยู่กับรัศมีภายในและรัศมีภายนอกของชิ้นท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ซึ่งคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.3 ของบทที่ 2

ตัวอย่างผลคำนวณหาค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยที่ $r_o = 12.5$ mm, $r_{ii} = 7.5$ mm, $\sigma_u^{T=450^\circ\text{C}} = 593$ MPa และ $SF_u = 5, 10, 15, 20$ แสดงค่าในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลคำนวณหาค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ในท่อทางวิ่งน้ำโลหะ

ผลคำนวณค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว				
r_o , mm	r_{ii} , mm	$\sigma_u^{T=450^\circ\text{C}}$, MPa	SF_u	P_{max} , MPa
12.5	7.5	593	5	55.80
12.5	7.5	593	10	27.90
12.5	7.5	593	15	18.60
12.5	7.5	593	20	13.95

จากผลการคำนวณหาค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.3 นั้น พบว่าค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ในข้อ 3.1.1 แม้ที่ความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงสูงสุด 1,800 rpm ก่อให้เกิดความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 4.26 MPa จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งมีค่าความดันสูงสุด 13.97 MPa ในกรณีค่าปัจจัยความปลอดภัย (Safety factor, SF_u) เท่ากับ 20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ออกแบบมานั้นจะไม่เกิดการเสียหายและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้งานได้จริง

3.1.4 ผลการคำนวณค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง ($\sigma_{Centrifugal}$) ที่เกิดจากแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง ($F_{Centrifugal}$)

เมื่อชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงเกิดการหมุนเหวี่ยงคองที่ น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เดิมเข้าในชิ้นส่วนที่รองรับจะถูกเหวี่ยงให้ผ่านทางชิ้นส่วนต่อทางวิ่งและดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวให้ผ่านเข้าสู่ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ซึ่งน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงจะเป็นแรงดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลางทำให้เกิดความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง ซึ่งคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ 2.4 ของบทที่ 2

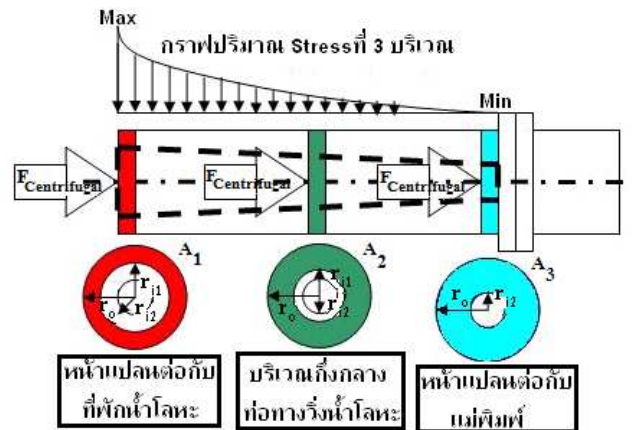
ตัวอย่างผลคำนวณหาค่าแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง โดยที่

$r_o = 12.5$ mm, $r_{i1} = 7.5$ mm, $r_{i2} = 1$ mm, $m_{Al, T} = m_{Al, T} = 1.71$ kg, $L_r = 300$ mm และ $\Omega = 300, 500, 1000, 1500, 1800$ rpm ได้ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลคำนวณหาค่าแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง

Ω , rpm	$m_{Al, T}$, kg	r_o , mm	r_{i1} , mm	r_{i2} , mm	L_r , mm	$F_{Centrifugal}$, kN
300	1.71	12.5	7.5	1	300	0.51
500	1.71	12.5	7.5	1	300	1.40
1,000	1.71	12.5	7.5	1	300	5.61
1,500	1.71	12.5	7.5	1	300	12.62
1,800	1.71	12.5	7.5	1	300	18.18

นำค่าแรงดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง ที่หาได้ไปหาค่าความเค้น (Stress) ที่บริเวณ 3 พื้นที่ของชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะ ตัวอย่างผลคำนวณค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง แสดงในรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.5 ซึ่งแสดงให้เห็นปริมาณค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางและบริเวณพื้นที่ชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะ 3 บริเวณ



รูปที่ 3.1 ความเค้นที่เกิดขึ้นในพื้นที่ 3 บริเวณของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ

ทำให้ทราบว่าชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะที่ขนาดรัศมี $r_o = 12.5$ mm, $r_{i1} = 7.5$ mm, $r_{i2} = 1$ mm ของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะที่ประกบกับชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เกิดแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลางและจะก่อให้เกิดค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางสูงที่สุด ที่บริเวณพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ ซึ่งจะช่วยในการพิจารณาการออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

ตารางที่ 3.5 ผลคำนวณหาค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางพื้นที่ 3 บริเวณของท่อทางวิ่งน้ำโลหะ

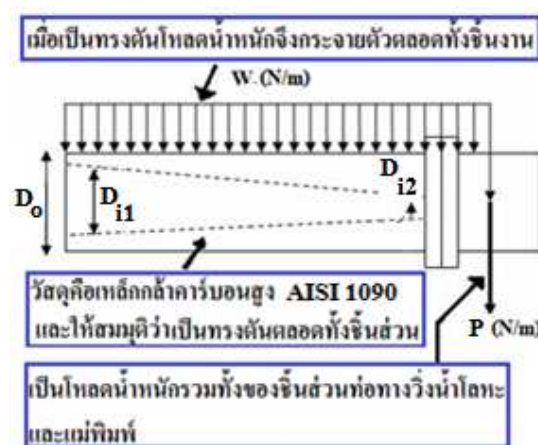
Ω , rpm	$F_{\text{Centrifugal}}$, N	$\sigma_{\text{พื้นที่ 1}}$, MPa	$\sigma_{\text{พื้นที่ 2}}$, MPa	$\sigma_{\text{พื้นที่ 3}}$, MPa
300	510	1.61	1.26	1.04
500	1,403	4.47	3.50	2.88
1,000	5,610	18.87	14.00	11.51
1,500	12,620	40.20	31.50	25.89
1,800	18,180	57.89	45.36	37.29

จากผลการคำนวณหาค่าแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.4 และ 3.5 นั้น พบว่าแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลางสูงสุดทำให้เกิดแรงดันให้น้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง 18.18 kN กรณีความเร็วเชิงเส้น 1,800 rpm และจะก่อให้เกิดค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง 57.89 MPa สูงที่สุด ที่บริเวณพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมบัติ

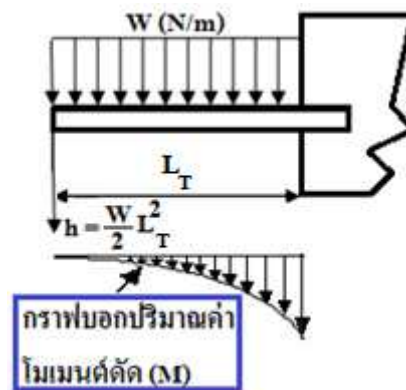
ของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ที่อุณหภูมิ 450°C ซึ่งเป็นโลหะที่ได้ทำการเลือกใช้ในสร้างชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 593 MPa ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยรองรับถึงระดับ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลางและค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางแทบจะไม่มีผลต่อการทำงานของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

3.1.5 ผลการคำนวณค่าความเค้นน้ำหนักรวม ($\sigma_{\text{totalweight}}$) ที่เกิดจากแรงน้ำหนัก (Weight)

เมื่อชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงเกิดการหมุนที่คงที่แล้ว น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเติมเข้าไปในชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ, ท่อทางวิ่งน้ำโลหะ, แม่พิมพ์ จะเกิดการแข็งตัวทำให้เกิดน้ำหนัก (Weight, W) ที่สฟุ้งลงตามแรงโน้มถ่วงโลกและเกิดการกระจายตัวของภาระน้ำหนักในรูปแบบบรรทุกบนคานยื่น แสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ซึ่งในที่นี้ทำการสมมุติให้ชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและชิ้นส่วนแม่พิมพ์เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ทรงตันตลอดเพื่อศึกษาว่า หากชิ้นส่วนทั้ง 2 ชิ้นนี้ สามารถทนต่อน้ำหนักทรงตันได้ก็ย่อมที่จะทนต่อชิ้นส่วนวัสดุโลหะทรงกลวงและอะลูมิเนียมที่แข็งตัวอยู่ภายในได้เช่นกัน (ความหนาแน่นของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีค่ามากกว่าอะลูมิเนียม) ซึ่งคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ 2.5 ของบทที่ 2



รูปที่ 3.2 ภาระน้ำหนักที่กระทำต่อชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะทรงตัน



รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของภาระน้ำหนักของรูปแบบบรรทุกบนคานยื่น

ผลการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (D_o) 25 mm โดยที่ $P = 4.27$ N, $L = 235$ mm, $W = 17.27$ N แสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณหาโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 25 mm

D_o , m	P, N	L, mm	W, N	M_{bending} , N·m
0.025	4.27	235	17.27	1.48

จากผลการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัด ให้นำไปใส่สมการหาค่าความเค้นที่เกิดจากน้ำหนัก (σ_{weight}) ซึ่งคำนวณค่าได้จากสมการที่ 2.5 ของบทที่ 2

ผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากน้ำหนักที่ชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะขนาด $D_o = 25$ mm โดยที่ $M = 1.48$ N·m, $C = 12.5$ mm, $I_1 = 1.92 \times 10^{-8}$ m⁴ แสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณค่าความเค้นจากน้ำหนักของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ

D_o , mm	M_{bending} , N·m	C, mm	I_1 , m ⁴	σ_{weight} , MPa
25	1.48	12.5	1.92×10^{-8}	0.96

จากนั้นให้นำค่าความเค้น (Stress, σ) ทั้งของความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง (ใช้ค่าความเค้นของบริเวณพื้นที่ส่วนที่ 1 เพราะเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ

อีก 2 พื้นที่) และความเค้นจากน้ำหนักรวมกันเพราะความเค้นทั้งสองมีความสัมพันธ์ร่วมกัน ในกรณี $r_0 = 12.5$ mm, $r_{i1} = 7.5$ mm, $r_{i2} = 1$ mm และ $\Omega = 300, 500, 1000, 1500, 1800$ rpm แสดงในตารางที่ 3.8

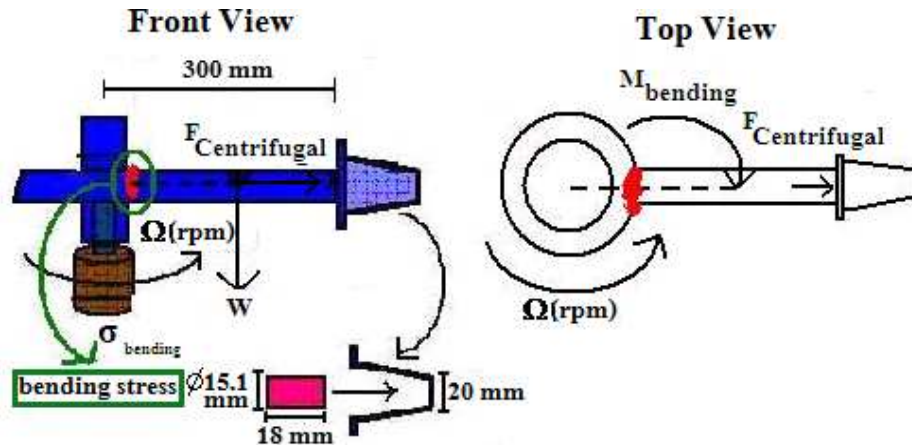
ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากน้ำหนักรวมที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะ

Ω , rpm	$\sigma_{\text{Centrifugal}}$, MPa	σ_{weight} , MPa	$\sigma_{\text{totalweight}}$, MPa
300	1.04	0.96	2.00
500	2.88	0.96	3.84
1,000	11.51	0.96	12.47
1,500	25.89	0.96	26.85
1,800	37.29	0.96	38.25

จากผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากน้ำหนักรวมที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.8 นั้น พบว่าที่เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะ 25 mm และความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงสูงสุด 1,800 rpm เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง 18.18 kN และจะก่อให้เกิดค่าความเค้นจากน้ำหนักรวม 38.25 MPa สูงที่สุดที่บริเวณพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ที่อุณหภูมิ 450 °C ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 593 MPa ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยรองรับถึงระดับ 15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นจากน้ำหนักรวมแทบจะไม่มีผลต่อการทำงานของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

3.1.6 ผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากการตัดโค้ง (σ_{bending})

ความเค้นจากการตัดโค้ง คือโมเมนต์ที่เกิดช่วงเริ่มต้นของการหมุนหรือโมเมนต์ความเฉื่อย ซึ่งเป็นโมเมนต์ที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ (จากที่ชิ้นงานอยู่นิ่ง) ของชิ้นงาน ตามกฎข้อที่ 1 ของนิวตัน โมเมนต์ความเฉื่อยนี้จะทำให้เกิดค่าความเค้นจากการตัดโค้งกระทำต่อหน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.6 ของบทที่ 2



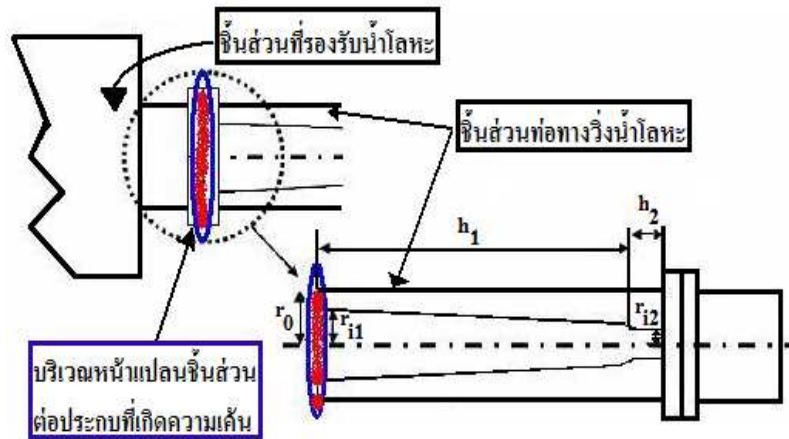
รูปที่ 3.4 ค่าความเค้นจากการตัดโค้งกระทำต่อพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นการหมุนเหวี่ยง

แรงในแนวตั้งฉากกับการหมุน (F_c) ที่บริเวณพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ ทำให้เกิดค่าความเค้นจากการตัดโค้งกระทำต่อชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับหน้าแปลนของชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ

ตัวอย่างผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากการตัดโค้งที่เกิดขึ้นกับพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ โดยที่ $r_o = 12.5$ mm, $r_{i1} = 7.5$ mm, $r_{i2} = 1$ mm, $m_{T,m} = 1.45$ kg, $l_c = 313$ mm, $C = 12.5$ mm, $I_1 = 0.012$ kg·m² และ $\Omega = 300, 500, 1000, 1500, 2000$ rpm แสดงค่าในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากการตัดโค้งที่เกิดขึ้นกับพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวงน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ

$m_{T,m}$, kg	I_1 , kg·m ²	Ω , rpm	$\frac{d\Omega}{dt}$, s ⁻¹	M_{Cen} , N·m	I_2 , m ⁴	$\sigma_{bending}$, MPa
1.45	0.012	300	1.05	0.012	1.67×10^{-8}	0.00093
1.45	0.012	500	1.74	0.021	1.67×10^{-8}	0.0015
1.45	0.012	1,000	3.49	0.041	1.67×10^{-8}	0.0031
1.45	0.012	1,500	5.23	0.062	1.67×10^{-8}	0.0046
1.45	0.012	1,800	6.98	0.074	1.67×10^{-8}	0.0056



รูปที่ 3.5 ภาพประกอบรัศมีภายใน รัศมีภายนอก และบริเวณที่เกิดค่าความเค้นจากการตัด โค้งของ ชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะ

จากผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากการตัด โค้ง ที่กระทำต่อพื้นที่หน้าแปลนของ ชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ แสดงค่าในตารางที่ 3.9 พบว่าที่รัศมี ภายนอก 12.5 mm รัศมีภายใน (r_{i1}) ขนาด 7.5 mm รัศมีภายในปลายสุด (r_{i2}) ขนาด 1 mm ของ ชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะและแม่พิมพ์ ซึ่งมีมวลของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 มีค่า เท่ากับ 1.45 kg และความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงสูงสุด 1,800 rpm ก่อให้เกิดค่าความเค้นจาก การตัด โค้ง 0.0056 MPa สูงที่สุดที่บริเวณพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อกับ ชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ที่อุณหภูมิ 450 °C ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 593 MPa แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นจาก การตัด โค้งแทบจะไม่มีผลต่อการทำงานของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

3.1.7 ผลการคำนวณเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification Time, t_s)

เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะในชิ้นส่วนแม่พิมพ์นั้น จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าน้ำ โลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเข้าแทรกซึมช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของ เซรามิกอัดขึ้นรูป (Ceramic Preform) ในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ต้องใช้เวลานานเท่าใดจึงจะแข็งตัว ซึ่ง คำนวณค่าได้จากสมการที่ 2.8 ของบทที่ 2

ตัวอย่างผลคำนวณหาเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว โดยที่

$$T_M = 750 \text{ } ^\circ\text{C}, \bar{h} = 500 \frac{\text{cal}}{\text{m}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}}, \rho_{\text{Al}} = 2,670 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, H_M = 92,000 \frac{\text{cal}}{\text{kg}}, \Delta T = 100 \text{ } ^\circ\text{C}, r_{i2} = 1 \text{ mm},$$

$$C_p = 230 \frac{\text{cal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}, T_o = 25, 150, 250, 350, 450, 750 \text{ }^\circ\text{C} \text{ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.10}$$

ตารางที่ 3.10 ผลคำนวณหาค่าเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว

ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว						
$T_M, ^\circ\text{C}$	$T_o, ^\circ\text{C}$	$\bar{h}, \frac{\text{cal}}{\text{m}^2 \text{ s}^\circ\text{C}}$	$\rho_{Al}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$H_M, \frac{\text{cal}}{\text{kg}}$	$C_p, \frac{\text{cal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$	t, s
750	25	500	2,670	92,000	230	0.85
750	150	500	2,670	92,000	230	1.02
750	250	500	2,670	92,000	230	1.23
750	350	500	2,670	92,000	230	1.54
750	450	500	2,670	92,000	230	2.05
750	550	500	2,670	92,000	230	3.07

ระยะเวลาที่นำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเคลื่อนตัวเข้าไปในชั้นส่วนแม่พิมพ์ใช้สมการ

$$v = \frac{(2\pi\Omega)}{60} \times L_{T/2} \text{ และจาก } v = \frac{L_r}{t} \rightarrow t = \frac{L_r}{v}$$

$$\therefore t = \frac{L_r \times 60}{2\pi\Omega \times L_{T/2}} \quad (3.2)$$

ตัวอย่างผลคำนวณหาค่าระยะเวลาที่นำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเคลื่อนตัวเข้าไปในชั้นส่วนแม่พิมพ์ โดยที่ $L_{T/2} = 150 \text{ m}$, $L_r = 300 \text{ m}$, $\Omega = 300, 500, 1000, 1500, 2000 \text{ rpm}$ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.11

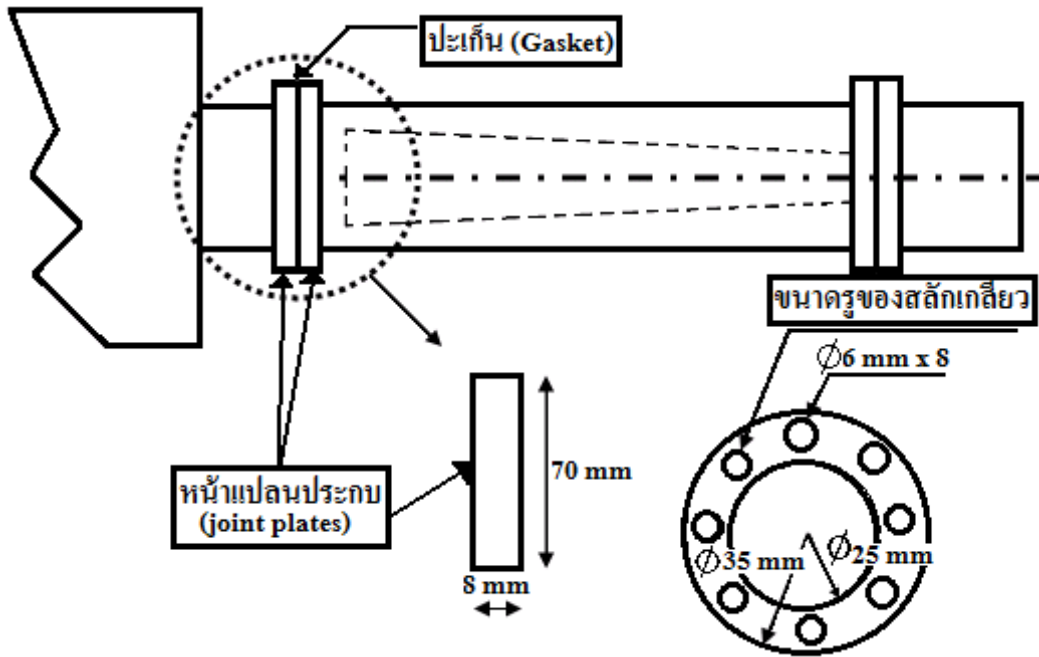
ตารางที่ 3.11 ผลคำนวณหาค่าระยะเวลาที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเคลื่อนตัวเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์

Ω , rpm	$L_{T/2}$, mm	v, m/s	L_r , mm	t_r , s
300	150	4.71	300	0.064
500	150	7.85	300	0.038
1,000	150	15.70	300	0.019
1,500	150	23.60	300	0.013
1,800	150	28.70	300	0.011

จากผลการคำนวณหาค่าเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในชิ้นส่วนแม่พิมพ์และค่าระยะเวลาที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเคลื่อนตัวเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.10 และ 3.11 นั้น พบว่าที่อุณหภูมิของเครื่องมือ 25 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิของเครื่องมือที่มีค่าต่ำมาก เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ได้ค่าเวลาในการแข็งตัวที่ 0.85 s แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใช้ในการเคลื่อนตัวเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ในกรณีความเร็วเชิงเส้น ในการหมุนเหวี่ยง 1,800 rpm จะใช้เวลาเพียง 0.011 s ซึ่งแสดงว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเทเข้าในชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงจะไม่แข็งตัวก่อนเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์

3.1.8 ผลการคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับสลักเกลียวสำหรับจับยึดชิ้นส่วนประกอบของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

เมื่อสามารถคำนวณและออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงได้แล้ว จำเป็นต้องคำนวณหาค่าความเค้นที่สลักเกลียวต้องรับภาระ เพื่อที่จะนำไปพิจารณาความสามารถในการจับยึดชิ้นส่วนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของสลักเกลียว ในที่นี้จะขอทำการวิเคราะห์เฉพาะสลักเกลียวที่ไว้สำหรับจับยึดหน้าแปลนประกบระหว่างชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะกับชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ดังรูปที่ 3.6 เพราะว่าที่บริเวณนี้จะเกิดค่าความเค้นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ สังเกตจากหัวข้อ 3.1.4 และ 3.1.6



รูปที่ 3.6 ขนาดของหน้าแปลนและขนาดของสลักเกลียวที่ใช้

สมการหาแรงดึงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียว (F_b)

$$F_b = F_i + \left[\frac{k_b}{k_b + k_g} \right] p \tag{3.3}$$

สมการหาแรงกดที่เกิดในหน้าแปลน (F_j)

$$F_j = F_i - \left[\frac{k_g}{k_b + k_g} \right] p \tag{3.4}$$

โดยที่ F_b คือแรงดึงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียว F_j คือแรงกดที่เกิดในหน้าแปลน F_i คือแรงดึงที่เกิดขึ้นภายในสลักเกลียวซึ่งมีผลมาจากการขันน็อต (nut) จนแน่น k_b คือค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness) ของสลักเกลียว k_g คือค่าความแข็งแรงแรงของข้อต่อกรณีมีปะเก็น (Gasket) รองรับ p คือแรงดึงที่เกิดจากการหมุนเหวี่ยง

แรงดึงภายในสลักเกลียวซึ่งมีผลมาจากการขันน็อตจนแน่น (initial tension, F_i)

$$F_i = cA_t S_p \tag{3.5}$$

โดยที่ F_i คือแรงดึงที่เกิดขึ้นภายในสลักเกลียวซึ่งมีผลมาจากการขันน็อต (nut) จนแน่น c คือค่าคงที่ (constant) ในกรณี reuseable joint ($c = 0.75$) A_t คือพื้นที่รับความเค้น (stress area) ของสลักเกลียว ($A_t = 20.1 \text{ mm}^2$) S_p คือค่าการหาจุดยึดด้วยกราฟ (proof strength) ของสลักเกลียวตามตารางมาตรฐานความแข็งแรงของสลักเกลียว (SAE Standard J1199) 830 MPa

ค่าแรงดึงภายในสลักเกลียวซึ่งมีผลมาจากการขันน็อตจนแน่น คำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$F_i = cA_tS_p$$

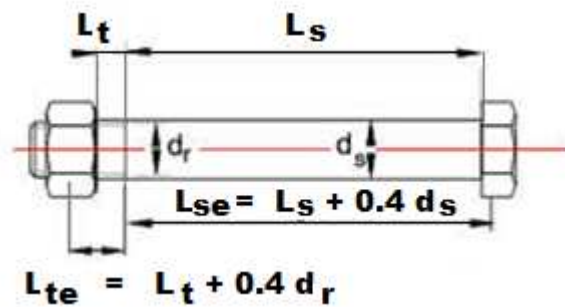
$$F_i = (0.75) \times (20.1) \times (830)$$

แทนค่า

$$= 12,510 \text{ N}$$

จึงได้ว่า

$$F_i = 12.51 \text{ kN}$$



รูปที่ 3.7 ลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของสลักเกลียว
ที่มา : Beardmore (2010)

ค่าความแข็งแรงของสลักเกลียว (k_b)

$$k_b = \frac{A_t A_s E}{(L_s A_s + L_t A_t)} \quad (3.6)$$

โดยที่ k_b คือค่าความแข็งแรงของสลักเกลียว A_t คือพื้นที่รับความเค้น (Stress area) ของสลักเกลียว ($A_t = 20.1 \text{ mm}^2$) A_s คือพื้นที่หน้าตัดของสลักเกลียวส่วนที่ไม่มีเกลียว E คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสลักเกลียวเหล็ก ($E = 210 \text{ GPa}$) L_t คือระยะในการจับยึด (Clamp) ส่วนที่เป็นเกลียวของความหนา ($L_t = 40 \text{ mm}$) L_s คือระยะในการจับยึดส่วนที่ไม่เป็นเกลียวของความหนา ($L_s = 0$)

ค่าความแข็งแรงของสลักเกลียว คำนวณได้โดย (จากสมการที่ 3.6 และรูปที่ 3.7)
 เนื่องจากเลือกใช้สลักเกลียวที่เป็นเกลียวตลอดทั้งลำ ($L_s = 0$) จะได้ $A_s = A_t$ และ $L_s + L_t = L$

สมการหาค่าความแข็งแรงของสลักเกลียวจึงกลายเป็น

$$k_b = \frac{A_t E}{L}$$

โดยที่ $A_s = \frac{\pi d^2}{4}$

เพราะฉะนั้น $A_s = \frac{\pi(6)^2}{4} = 28.3 \text{ mm}^2$ เลือกใช้สลักเกลียวที่เป็นเกลียวตลอดทั้งลำ ($L_s = 0$)

แทนค่า

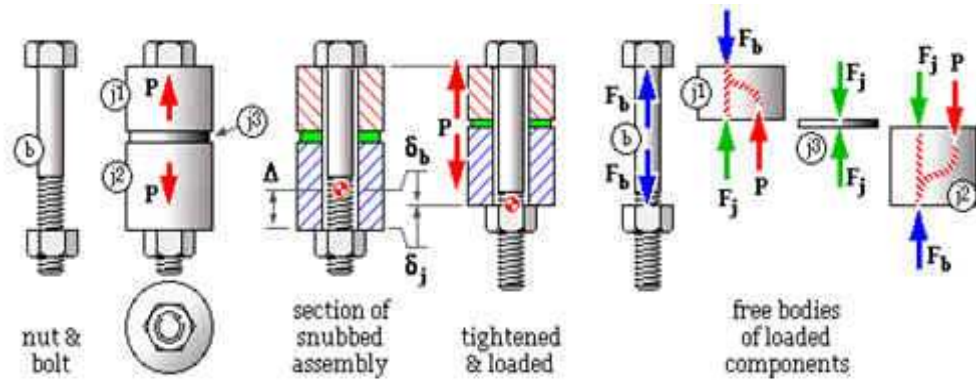
$$k_b = \frac{(20.1 \times 10^{-6})(210 \times 10^9)}{(0.04)}$$

จึงได้ว่า $k_b = 105.5 \frac{\text{MN}}{\text{m}}$

ค่าความแข็งแรงของข้อต่อ (k_g)

$$k_g = \frac{A_g E_g}{t} \quad (3.7)$$

โดยที่ k_g คือค่าความแข็งแรงของข้อต่อกรณีมีปะเก็นรองรับ A_g คือพื้นที่รับแรงกดของปะเก็น E_g คือค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของปะเก็น t คือความหนาของปะเก็น (5 mm) D_{g0} คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของพื้นที่รับแรงกดของปะเก็น D_{g1} คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของพื้นที่รับแรงกดของปะเก็น ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 องค์ประกอบและการจับยึดของสลักเกลียวที่มีปะเก็น

ที่มา : Wright (2005)

โดยที่
$$A_g = \frac{\pi}{4} (D_{go}^2 - D_{gi}^2) \quad (3.8)$$

และ
$$D_{go} = 1.5d + \left[\frac{L_s + L_t}{t} \right] \quad (3.9)$$

และ
$$D_{gi} = 1.5d \quad (3.10)$$

แทนค่าหา D_{go} และ D_{gi} ได้

$$D_{go} = 1.5(0.006) + \frac{0 + 0.04}{(5 \times 10^{-3})} = 8.009\text{m}$$

$$D_{gi} = 1.5(0.006) = 0.009\text{m}$$

แทนค่าหา A_g คือ $A_g = \frac{\pi}{4} ((8.009^2) - (0.009^2)) = 50.4\text{m}^2$

แทนค่าความแข็งแรงแรงของข้อต่อได้ (จากสมการที่ 3.7)

$$k_g = \frac{(50.38) \times (4 \times 10^6)}{(5 \times 10^{-3})} = 40,300 \frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

แรงที่ทำให้เกิดความเค้นมากที่สุดคือแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง 18.18 kN ในกรณีความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยง 1,800 rpm เนื่องจากมีจำนวนสลักเกลียว (n) 8 ตัว เพราะฉะนั้นสลักเกลียว 1 ตัว รับแรง (F) 2.27 kN นำมาบวกกับค่าแรงดึงภายในสลักเกลียวซึ่งมีผลมาจากการขันน็อตจนแน่น จากสมการที่ 3.5 ซึ่งทำให้ได้ค่า $F_i = 2.27 + 12.51 = 14.78$ kN

แรงดึงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียว 1 ตัว (จากสมการที่ 3.3)

$$F_b = F_i + \left[\frac{k_b}{k_b + k_g} \right] p$$

แทนค่า

$$F_b = (14.78 \text{ kN}) + \left[\frac{105.5}{105.5 + 40,304} \right] (18.18 \text{ kN}) = 14.82 \text{ kN}$$

$$\therefore \text{Stress}(\sigma_{\text{nut}}) = \frac{F_b}{A} = \frac{(14.82 \times 10^3)}{(2.01 \times 10^{-5})} = 737 \text{ MPa}$$

จากผลการคำนวณหาค่าความเค้นของสลักเกลียว 1 ตัว เปรียบเทียบกับตารางมาตรฐานความแข็งแรงของสลักเกลียวตาม SAE Class พบว่าสลักเกลียวขนาด 6 mm จำนวน 1 ตัว ต้องรับค่าความเค้นของสลักเกลียว 737 MPa ซึ่งยังไม่เกินค่ากำลังคราก (Yield strength, S_y) ของตารางมาตรฐานความแข็งแรงของสลักเกลียวตาม SAE Class ขนาด 6 mm ที่มีขนาดเท่ากับ 940 MPa ทำให้ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยรองรับอยู่ถึงในระดับ 1.28 จึงนับได้ว่าสลักเกลียวขนาด 6 mm ที่เลือกใช้สามารถรับแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลางได้ทำให้ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงสามารถทำงานและผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้จริง

3.2 สรุปผลจากการวิเคราะห์และคำนวณค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมและการออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

จากผลการวิเคราะห์และคำนวณค่าต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมและออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงทั้งหมด ทำให้สามารถสรุปผลการวิเคราะห์และคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

3.2.1 สรุปผลค่าความดันของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ

ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะของกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงจะขึ้นค้ำนึ่งถึงความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสมการที่ 2.1 หากความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงมีค่ามากย่อมทำให้ค่าความเร็วรอบเชิงมุมและค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะมีแนวโน้มที่มีค่ามากขึ้นตามสังเกตได้จากตารางที่ 3.1 โดยที่ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะเป็นค่าที่มีผลอย่างมากต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมและการออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงคือหากค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะมีค่ามากกว่าค่าความดันเริ่มต้น ซึ่งเป็นค่าแรงต้านทานภายในระหว่างอนุภาคเซรามิกในซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป เช่น ที่ความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยง 1,800 rpm ก่อให้เกิดความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ 4.26 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความดันเริ่มต้น 1.72 MPa ของกรณีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 μm และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 0.6 อยู่มากทำให้สามารถผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้จริงและหากค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะมีค่าน้อยกว่าค่าความดันสูงสุด ซึ่งเป็นค่าที่ความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ เช่น ที่ค่าความเร็วรอบเชิงมุมในการหมุนเหวี่ยงและความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะในกรณีเดียวกัน พบว่าค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ 4.26 MPa มีค่าน้อยกว่าค่าความดันสูงสุด 13.97 อยู่มาก ที่กรณีคาร์ซีมีภายนอกของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ 12.5 mm คาร์ซีมีภายในของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ 7.5 mm และค่าปัจจัยความปลอดภัยเท่ากับ 20 ทำให้ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงสามารถทำงานได้อย่างดี ไม่เกิดความเสียหาย

3.2.2 สรุปผลค่าความดันเริ่มต้น

ค่าความดันเริ่มต้นเป็นค่าความดันที่น้อยที่สุดที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวใช้แทรกซึมเข้าไปในระหว่างช่องว่างของอนุภาคผงเซรามิก ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.2 นั้น แสดงให้เห็นว่าหากค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่าน้อยและค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกมีค่ามาก ยิ่งทำให้ค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไป

ระหว่างช่องว่างของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่ามากขึ้น เช่น กรณีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ $13.5 \mu\text{m}$ และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก 0.6 ก่อให้เกิดค่าความดันเริ่มต้น 1.72 MPa นับเป็นค่าความดันที่สูงมาก โดยหากความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะนี้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความดันเริ่มต้น ซึ่งเป็นแรงต้านทานภายในระหว่างอนุภาคเซรามิกในซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปทำให้การไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวหยุดและเกิดการแข็งตัวก่อนเข้าแทรกซึมระหว่างช่องว่างอนุภาคเซรามิกได้เพียงพอ และเมื่อนำค่าความดันเริ่มต้นข้างต้นมาเปรียบเทียบกับค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะของหัวข้อ 3.1.1 นั้น พบว่าถึงแม้ว่าค่าความดันเริ่มต้นที่กล่าวมาข้างต้นจะมีค่าที่สูงมากถึง 1.72 MPa แต่ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ในกรณีความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยง $1,800 \text{ rpm}$ ก่อให้เกิดความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ 4.26 MPa ก็ยังมีค่ามากกว่าค่าความดันเริ่มต้นแสดงให้เห็นว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวมีค่าความดันที่มากเพียงพอที่จะเข้าไปแทรกซึมในระหว่างช่องว่างของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถผลิตเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้จริงและที่กรณีความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยง $1,800 \text{ rpm}$ ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี ไม่เกิดความเสียหาย

3.2.3 สรุปผลค่าความดันสูงสุด

ค่าความดันสูงสุดคือค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ซึ่งหมายความว่า เป็นค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ หากค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงมีค่ามากกว่าค่าความดันสูงสุด ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงอาจไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่หรืออาจเกิดความเสียหายได้ โดยค่าความดันสูงสุดนี้มีค่าขึ้นอยู่กับรัศมีภายในและรัศมีภายนอกของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ จากผลการคำนวณหาค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.3 นั้น พบว่าค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ในข้อ 3.1.1 แม้ที่ความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยง $1,800 \text{ rpm}$ ที่ก่อให้เกิดความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ 4.26 MPa จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความดันสูงสุดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเกิดขึ้นได้ในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ ซึ่งมีค่า 13.95 MPa ในกรณีค่า

ปัจจัยความปลอดภัยเท่ากับ 20 แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ที่ความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงสูงสุดซึ่งก่อให้เกิดค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่สูงสุดที่เกิดในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะแต่ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ออกแบบมานั้นจะไม่เกิดการเสียหายและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้งานในการผลิตเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ได้จริง โดยมีค่าปัจจัยความปลอดภัยรองรับอยู่ถึงในระดับ 20

3.2.4 สรุปผลค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางที่เกิดจากแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกแนวหนีศูนย์กลาง

ความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางเกิดเมื่อน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เติมเข้าไปในชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงในขณะที่เกิดการหมุนเหวี่ยงคงที่จะถูกเหวี่ยงให้เข้าชิ้นส่วนที่รองรับผ่านทางชิ้นส่วนท่อทางวิ่งและดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวให้ผ่านเข้าสู่ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ซึ่งน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงจะเป็นแรงดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลางทำให้เกิดความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 3.4 และ 3.5 นั้น พบว่าแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลางสูงสุดทำให้เกิดแรงดันให้น้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลาง 18.18 kN กรณีความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงสูงสุด 1,800 rpm และก่อให้เกิดค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลาง 57.89 MPa สูงที่สุดที่บริเวณพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางที่คำนวณได้นั้นถึงจะมีค่ามากแต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ที่เป็นวัสดุโลหะที่ใช้ในการออกแบบและสร้างชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ที่อุณหภูมิ 450 °C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิสำหรับการทดลองกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง พบว่ามีค่าสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุด 593 MPa เมื่อพิจารณาของทั้งค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางและค่าสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุดของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ข้างต้น พบว่าชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ได้ทำการออกแบบและสร้างมีค่าปัจจัยความปลอดภัยรองรับอยู่ถึงในระดับ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันน้ำโลหะพุ่งออกในแนวหนีศูนย์กลางและค่าความเค้นในแนวหนีศูนย์กลางแทบจะไม่มีผลต่อการทำงานของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ไม่เกิดการเสียหายและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้งานในการผลิตเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้จริง

3.2.5 สรุปผลค่าความเค้นน้ำหนักรวมที่เกิดจากแรงน้ำหนัก

ทำการสมมุติให้ชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและชิ้นส่วนแม่พิมพ์เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ทรงตันตลอดเพื่อศึกษาว่าหากชิ้นส่วนทั้ง 2 ชิ้นนี้ สามารถทนต่อน้ำหนักทรงตันได้ก็ย่อมที่จะทนต่อชิ้นส่วนวัสดุโลหะทรงกลวงและอะลูมิเนียมที่แข็งตัวอยู่ภายในได้เช่นกัน (ความหนาแน่นของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีค่ามากกว่าอะลูมิเนียม) เมื่อชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงเกิดการหมุนที่คงที่แล้ว น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเติมเข้าไปในชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ, ท่อทางวิ่งน้ำโลหะ, แม่พิมพ์ จะเกิดการแข็งตัวทำให้เกิดน้ำหนักที่พุ่งลงตามแรงโน้มถ่วงโลก จากผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากน้ำหนักรวมที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและชิ้นส่วนแม่พิมพ์ของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ได้ทำการออกแบบและจัดสร้าง แสดงค่าในตารางที่ 3.8 นั้น พบว่าที่เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะ 25 mm ความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงสูงสุด 1,800 rpm เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง 18.18 kN และจะก่อให้เกิดค่าความเค้นจากน้ำหนักรวม 38.25 MPa สูงที่สุดที่บริเวณพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ที่เป็นวัสดุโลหะที่ใช้ในการออกแบบและสร้างชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ที่อุณหภูมิ 450 °C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิสำหรับการทดลองกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง พบว่ามีค่าสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุด 593 MPa เมื่อพิจารณาของทั้งค่าความเค้นจากน้ำหนักรวมและค่าสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุดของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ข้างต้น พบว่าชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงในส่วนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและชิ้นส่วนแม่พิมพ์ทรงตันมีค่าปัจจัยความปลอดภัยรองรับอยู่ถึงในระดับ 15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นจากน้ำหนักรวมแทบจะไม่มีผลต่อการทำงานของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ได้ทำการออกแบบและจัดสร้าง ไม่เกิดการเสียหายและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้งานในการผลิตเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้จริง

3.2.6 สรุปผลค่าความเค้นจากการตัดโค้ง

ความเค้นจากการตัดโค้งเกิดจากโมเมนต์ที่เกิดช่วงเริ่มต้นของการหมุนหรือโมเมนต์ความเฉื่อย ซึ่งเป็นโมเมนต์ที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ (จากที่ชิ้นงานอยู่นิ่ง) ของชิ้นงานตามกฎข้อที่ 1 ของนิวตัน ที่กระทำต่อหน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ได้ทำการออกแบบและจัดสร้าง

ผลการคำนวณหาค่าความเค้นจากการตัดโค้ง แสดงค่าในตารางที่ 3.9 พบว่าที่รัศมีภายนอก ขนาด 12.5 mm รัศมีภายในขนาด 7.5 mm รัศมีภายในปลายสุดขนาด 1 mm ของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำ โลหะและมวลของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 มีค่าเท่ากับ 1.45 kg ก่อให้เกิดค่าความเค้นจากการตัดโค้ง 0.0056 MPa สูงที่สุดที่บริเวณพื้นที่หน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำ โลหะซึ่งต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 ที่เป็นวัสดุโลหะที่ใช้ในการออกแบบและสร้างชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่อุณหภูมิ 450 °C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิสำหรับการทดลองกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง (เนื่องจากก่อนการเปิดเครื่องเพื่อหมุนเหวี่ยงหรือก็คือการทดลองกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงทางผู้วิจัยจำเป็นต้องทำการเผาอ่อนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงให้ได้อุณหภูมิตั้งค่าไว้) พบว่ามีค่าสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุด 593 MPa จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเค้นจากการตัดโค้งที่กระทำต่อหน้าแปลนของชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะซึ่งต่อประกบกับชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะและค่าสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุดของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1090 พบว่าค่าความเค้นจากการตัดโค้งมีค่าน้อยมากจนแทบจะไม่มีผลต่อการทำงานของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ได้ทำการออกแบบและจัดสร้าง ไม่เกิดการเสียหายและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้งานในการผลิตเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้จริง

3.2.7 สรุปผลเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ

เมื่อทำการทดลองกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเทเข้าสู่ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง โดยเข้าทางชิ้นส่วนที่รองรับผ่านทางชิ้นส่วนท่อทางวิ่งและดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวให้ผ่านเข้าสู่ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ซึ่งภายในบรรจุซิลิโคนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวจะถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้เข้าไปแทรกซึมช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิโคนคาร์ไบด์ของซิลิโคนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ซึ่งเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะเป็นการหาว่าจะต้องใช้เวลานานเท่าใดน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวจึงจะแข็งตัว จากการคำนวณหาเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวและค่าระยะเวลาที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้เคลื่อนตัวเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ แสดงค่าในตารางที่ 3.10 และ 3.11 พบว่าที่อุณหภูมิของเครื่องมือ 25 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิของเครื่องมือที่มีค่าต่ำมากจนแทบเรียกได้เป็นอุณหภูมิห้อง (ในความเป็นจริงอุณหภูมิของเครื่องมือจะเป็น 450 °C เพราะเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอ่อนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงสำหรับการทดลองกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง) เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ได้

ค่าเวลาในการแข็งตัวที่ 0.85 s ซึ่งหากทำการสังเกต ตารางที่ 3.10 จะพบว่าหากอุณหภูมิของเครื่องมือยังมีค่าที่มากขึ้นเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ก็จะมีแนวโน้มที่มากขึ้นเช่นกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเคลื่อนตัวเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ในกรณีความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยง 1,800 rpm จะใช้เวลาเพียง 0.011 s พบว่าระยะเวลาที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ใช้ในการเคลื่อนตัวเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์มีค่าน้อยกว่าเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวอยู่มาก ซึ่งหมายความว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวจะถูกเหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้เข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ก่อนที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวจะเกิดการแข็งตัว ถึงแม้ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงจะไม่ได้ถูกเผาؤونจนอุณหภูมิของเครื่องมือมีค่าที่ต่ำมากจนแทบเป็นอุณหภูมิห้อง ซึ่งหากเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาؤونชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงจริงสำหรับใช้ในการทดลองกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงยิ่งเป็นสิ่งที่ชี้ได้ว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ถูกเทเข้าในชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงจะไม่แข็งตัวก่อนเข้าไปในชิ้นส่วนแม่พิมพ์

3.2.8 สรุปผลค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับสลักเกลียวสำหรับจับยึดชิ้นส่วนประกอบของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

หลังจากคำนวณและออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงได้แล้ว จำเป็นต้องคำนวณหาค่าความเค้นที่สลักเกลียว เพื่อที่นำไปพิจารณาความสามารถในการจับยึดชิ้นส่วนของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของสลักเกลียว ซึ่งที่หน้าแปลนประกบระหว่างชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะกับชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง เป็นบริเวณที่จะเกิดค่าความเค้นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ พิจารณาจากหัวข้อ 3.1.4 และ 3.1.6 ผลการคำนวณค่าความเค้นของสลักเกลียว 1 ตัว ที่บริเวณหน้าแปลนประกบระหว่างชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะกับชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง พบว่าสลักเกลียวขนาด 6 mm จำนวน 1 ตัว (ตามที่ได้ออกแบบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงนั้น ที่บริเวณหน้าแปลนประกบระหว่างชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะกับชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะต้องใช้สลักเกลียว 8 ตัว แต่พิจารณาสลักเกลียวเพียง 1 ตัว เนื่องจากค่าความเค้นที่สลักเกลียวต้องรับภาระเป็นแบบการกระจาย) ต้องรับค่าความเค้นของสลักเกลียว 737 MPa เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตารางมาตรฐานความแข็งแรงของสลักเกลียวตาม SAE Class พบว่ายังไม่เกินค่ากำลังครากของสลักเกลียวตาม SAE Class ขนาด 6 mm ที่มีขนาดเท่ากับ 940 MPa ทำให้ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยรองรับอยู่ถึงในระดับ 1.28 ซึ่งหมายความว่าค่าความเค้นของสลักเกลียวขนาด 6 mm ที่ต้องรับภาระ

ที่บริเวณหน้าแปลนประกาะระหว่างชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะกับชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะมีค่าที่
น้อยมากจนแทบจะไม่มีผลต่อการทำงานของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ได้ทำการ
ออกแบบและจัดสร้าง ไม่เกิดการเสียหายและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้งานในการผลิตเป็นวัสดุผสม
เนื้ออะลูมิเนียมได้จริง

บทที่ 4

วิธีการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมโดยการใช้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลัก เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ได้จากการเปลี่ยนค่าตัวแปร โดยใช้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเกรด A356 เหลวเหวี่ยงให้เข้าไปแทรกซึมในผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ได้ทำการอัดขึ้นรูปแล้ว จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางกลและโครงสร้างระดับจุลภาคโดยในการวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมในกระบวนการมีดังนี้

1. ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (100 μ , 68 μ , 25 μ และ 13.5 μ)
2. ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว (4264.67, 1895.41, 1316.26, 842.40, 339.68, 288.29, 193.08, 154.85 kPa)
3. ค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูปของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป 54 \pm 6
4. อุณหภูมิเผาอุณหภูมิระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง
($T_{\text{ที่รองรับ}} \geq 472^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ที่ทางวิ่ง}} \geq 615^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{แม่พิมพ์}} \geq 320^{\circ}\text{C}$)

ผู้วิจัยได้กำหนดระเบียบวิธีวิจัยโดยมีขั้นตอนดำเนินงานดังนี้

4.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุสำคัญที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ อะลูมิเนียม เกรด A356 และผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งอะลูมิเนียม เกรด A356 และผงซิลิคอนคาร์ไบด์ มีสมบัติดังตารางที่ 4.1-4.2 ตามลำดับ

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม เกรด A356-T61

ในการทดลองวิจัยการหล่อ โลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึม เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ได้ทำการเลือกใช้โลหะอะลูมิเนียม เกรด A356 เป็นเนื้อหลัก ทางผู้วิจัยจึงต้องทำการศึกษาและหาข้อมูลสมบัติของอะลูมิเนียม เกรด A356 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของอะลูมิเนียม เกรด A356-T61

สมบัติ	หน่วย Metric	หน่วย English
Physical Properties		
- Density	2.67 g/cm ³	0.0965 lb/in ³
Mechanical Properties		
- Hardness, Brinell	70.0 – 100	70.0 – 100
- Hardness, Knoop	109	109
- Hardness, Rockwell A	36	36
- Hardness, Rockwell B	53	53
- Hardness, Vickers	96	96
- Ultimate Tensile Strength	255 MPa	37.0 ksi
- Tensile Yield Strength	179 MPa	26.0 ksi
- Elongation at Break	5.00%	5.00%
- Modulus of Elasticity	72.4 GPa	10,500 ksi
- Compressive Yield Strength	195 MPa	28,300 ksi
- Poissons Ratio	0.33	0.33
- Machinability	50%	50%
- Shear Modulus	27.2 GPa	3,950 ksi
- Shear Strength	155 MPa	22,500 ksi
Electrical Properties		
- Electrical Resistivity	0.00000440 ohm-cm	0.00000440 ohm-cm

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) สมบัติของอะลูมิเนียมเกรด A356-T61

สมบัติ	หน่วย Metric	หน่วย English
Thermal Properties		
- Heat of Fusion	389 J/g	167 BTU/lb
- CTE, linear	21.4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	11.9 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$
- Specific Heat Capacity	0.963 J/g $\cdot^{\circ}\text{C}$	0.230 BTU/lb $\cdot^{\circ}\text{F}$
- Thermal Conductivity	151 W/m-K	1040 BTU-in/hr-ft $^2\cdot^{\circ}\text{F}$
- Melting Point	557.2 - 612.8 $^{\circ}\text{C}$	1035 - 1135 $^{\circ}\text{F}$
- Solidus	557.2 $^{\circ}\text{C}$	1035 $^{\circ}\text{F}$
- Liquidus	612.8 $^{\circ}\text{C}$	1135 $^{\circ}\text{F}$
Processing Properties		
- Melt Temperature	677 - 816 $^{\circ}\text{C}$	1250 - 1500 $^{\circ}\text{F}$
- Solution Temperature	535 - 540.6 $^{\circ}\text{C}$	995 - 1005 $^{\circ}\text{F}$
- Casting Temperature	677 - 788 $^{\circ}\text{C}$	1250 - 1450 $^{\circ}\text{F}$

ที่มา : Automation Creations, Inc. (2010)

4.1.2 สมบัติทางกายภาพของซิลิคอนคาร์ไบด์

ในการทดลองวิจัยการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึม เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ได้ทำการเลือกใช้เซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเสริมแรงทาง ผู้วิจัยจึงต้องทำการศึกษาและหาข้อมูลสมบัติของซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติของซิลิคอนคาร์ไบด์

สมบัติ	แอลฟา-ซิลิคอนคาร์ไบด์	บีตา-ซิลิคอนคาร์ไบด์
	$\alpha - SiC$	$\beta - SiC$
สมบัติทางระบบผลึก - น้ำหนักโมเลกุล (M. W.) - ความหนาแน่นทางทฤษฎี (TD, g/cm ³) - โครงสร้างผลึก (crystal structure)	40.10 3.21 เฮกซะโกนอล	40.10 3.21 คิวบิก
สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกและความร้อน - ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ ($C_p, J/mol.K$) ¹ - เอนทัลปี ($\Delta_f H^\circ_{298}, kJ/mol$) - พลังงานเสรีของกิบส์ ($\Delta_f G^\circ_{298}, kJ/mol$) - เอนโทรปี ($S^\circ_{298}, J/mol.K$) - จุดหลอมเหลว (T _{mp} , K) - สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($\alpha, 10^{-6} /K$) - การนำความร้อน (K, W/m.K)	298-662 (เคลวิน) ^a 662-3200 (เคลวิน) ^b -71.6 -69.1 16.5 3103 5.12 (298-1273 เคลวิน) 5.48 (298-1773 เคลวิน) 5.77 (298-2273 เคลวิน) 41.0 (293 เคลวิน) 33.5 (873 เคลวิน) 25.5 (1073 เคลวิน)	298-678 (เคลวิน) ^c 678-3200 (เคลวิน) ^d -73.2 -70.9 16.6 - 3.8 (473 เคลวิน) 4.3 (673 เคลวิน) 4.8 (873 เคลวิน) 42.0 (300 เคลวิน) 19.0 (1000 เคลวิน) 13.0 (1500 เคลวิน)
สมบัติทางกล (ที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน) - ย้ำมอดูลัส (E, GPa) - ความทนแรงดัดโค้ง (σ_{bend}, MPa)	408 350 ± 40	432 560
สมบัติทางไฟฟ้า (ที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน) ความต้านทานไฟฟ้า ($\rho \times 10^8, \Omega.m$)	4x10 ⁵	(0.17-1)x10 ⁶

ที่มา : สิริพร ลากเกียรติถาวร (2547)

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

ในการทดลองวิจัยการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึม เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทำการเลือกใช้โลหะอะลูมิเนียม เกรด A356 เป็นเนื้อหลักและ เซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเสริมแรง นอกจากนี้วัสดุทั้งสองชนิดนี้แล้วในการทดลองวิจัยยังคง มีเครื่องมือและอุปกรณ์ซึ่งมีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทางผู้วิจัยจึงต้องทำการศึกษา และเลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้การหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมประสบความสำเร็จได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ ทำการเลือกมีดังต่อไปนี้

4.2.1 เตาหลอมโลหะชนิดขดลวดความต้านทาน (Resistance furnace)

เตาหลอมโลหะชนิดขดลวดความต้านทานใช้เพื่อในการหลอมอะลูมิเนียม เกรด A356 ให้เหลวเพื่อเตรียมสำหรับทดลองการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงและทำความเข้าใจระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เตาหลอมโลหะชนิดขดลวดความต้านทาน

4.2.2 เตาเผาอุณหภูมิต่ำ

เตาเผาอุณหภูมิต่ำที่เลือกใช้เป็นเตาเผาชนิด Lindberg/Blue Moldatherm 1100 °C Box Furnace ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิในการทำงานอยู่ในช่วง 100 °C - 1,100 °C มีขนาดพื้นที่ภายใน

9" (228 mm) x 14" (356 mm) x 9" (228 mm) ใช้ในการอบพูนชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ให้มีความแข็งตัวและคงรูปอยู่ได้ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เตาเผาอุณหภูมิเต้า (Lindberg/Blue Moldatherm 1100 °C Box Furnace)

4.2.3 เครื่องอัดตัวอย่างไฮดรอลิกส์ (Hydraulic press machine)

เครื่องอัดขึ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่เลือกใช้เป็นเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ชนิด HERZOG, Cap.200kN ใช้เพื่อการอัดขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เครื่องอัดตัวอย่างไฮดรอลิกส์

4.2.4 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ทั้งหมดจากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยง ด้วยความดันสูงจะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติความแข็ง โดยการทดสอบความแข็งจะเป็นการ

ทดสอบแบบรีคเวลด์ (Rockwell hardness test) ชนิด FUTURE-TECN รุ่น FR-LeA ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรีคเวลด์

4.2.5 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ

ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ทั้งหมดจากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงจะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาสมบัติค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ โดยทำการทดสอบด้วยอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ

4.2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของผิวหน้าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ผลิตได้จากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

4.2.7 เครื่องขัดแบบจานคู่ (Grinder/Polisher)

เครื่องขัดแบบจานคู่ ขนาด 8" ชนิด METKON รุ่น GRIPO 2V ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ เพื่อหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ทั้งหมดจากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เครื่องขัดแบบจานคู่

4.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงโดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนแสงปกติและใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์แก้ว มีแรงขยายสูงถึง 5,000 เท่า หรือมากกว่า ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ผลิตได้ทั้งหมดจากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.2.9 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 2 ตำแหน่ง

เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 2 ตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ทั้งหมดจากการหล่อ โลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงาน

4.2.10 เครื่องวัดอุณหภูมิและหัววัดอุณหภูมิ (Thermometer and thermocouple probe)

เครื่องวัดอุณหภูมิใช้ในการวัดอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง หลังจากการเผาอ่อนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง โดยทำการใช้งานร่วมกับหัววัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เครื่องวัดอุณหภูมิและหัววัดอุณหภูมิ

4.2.11 ชุดอุปกรณ์การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

ชุดอุปกรณ์การอัดขึ้นรูปชิ้นงานเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับอัดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ให้เป็นซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.1 mm ความสูง 18 -20 mm ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ชุดอุปกรณ์สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป

4.2.12 ชุดอุปกรณ์เผาอุณหภูมิ

ชุดอุปกรณ์เผาอุณหภูมิ ประกอบด้วยหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Heavy duty LPG torch) ต่อกับถังแก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas, LPG) ขนาด 16.8 kg และขาตั้งซึ่งมีไว้สำหรับจับหัวเผา ใช้ทั้งหมด 3 ชุด ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ชุดอุปกรณ์เผาอุณหภูมิ

4.2.13 กรวยประคองน้ำโลหะ

กรวยประคองน้ำโลหะเป็นอุปกรณ์ช่วยเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวและจะถูกเชื่อมต่อไปถึงทางเข้าของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กรวยประคองน้ำโลหะ

4.2.14 เครื่องหล่อเหวี่ยง

เครื่องหล่อเหวี่ยง ดังรูปที่ 4.13 เป็นเครื่องที่มีไว้ใช้สำหรับการทดลองวิจัยหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง และป้องกันอันตรายจากการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง ซึ่งภายในมีแท่นจานหมุนซึ่งจะต่อกับชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวขับและเครื่องควบคุมความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวควบคุมความเร็วในการหมุน



รูปที่ 4.13 เครื่องหล่อเหวี่ยง

4.2.15 เครื่องควบคุมความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter)

เป็นอุปกรณ์ไว้สำหรับปรับและควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มีความเร็วในการหมุนเหวี่ยงตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เครื่องควบคุมความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ

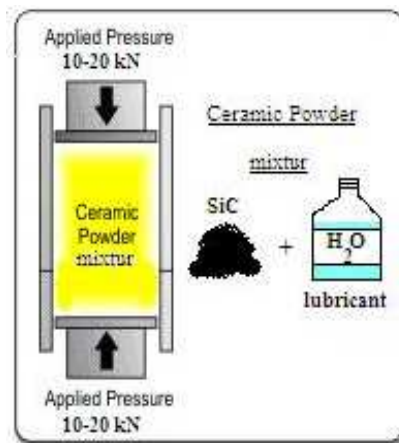
4.3 วิธีการดำเนินงาน

ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมนั้น ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ขนาดของความเร็วที่ใช้ในการหมุนเหวี่ยง ค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป อุณหภูมิเผาอุณหภูมิต่อระบบการหล่อเหวี่ยง ความดันสูง ความแข็งแรงเชิงกลและการสึกหรอ ซึ่งมีรายละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

4.3.1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป (SiC Preform)

นำผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 6.5 g ผสมกับน้ำ 1.25 ml ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน (binder) ตกลงในชิ้นส่วนเบ้าอัดชิ้นงาน (ซึ่งได้ประกอบกับชิ้นส่วนฐานแล้ว) ของอุปกรณ์การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน จากนั้นประกอบอุปกรณ์การอัดชิ้นงานให้เรียบร้อยแล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดตัวอย่างไฮดรอลิกส์ที่ความดัน 20 kPa นำชิ้นงานออกจากชิ้นส่วนเบ้าอัดชิ้นงาน โดยการเปลี่ยนจากชิ้นส่วนฐานมาเป็นชิ้นส่วนฐานปลดชิ้นงาน ประกอบอุปกรณ์การอัดชิ้นงานให้เรียบร้อยอีกครั้งแล้วจึงนำไปอัดด้วยเครื่องอัดตัวอย่างไฮดรอลิกส์ อัดจนชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปหลุดออกจากชิ้นส่วนเบ้าอัดชิ้นงานและตกลงสู่ชิ้นส่วนฐานปลดชิ้นงานของอุปกรณ์การอัดชิ้นงาน ก่อนนำ

ชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่ได้หลังจากทำการอัดไปอบผนึกในเตาเผาอุณหภูมิต่ำด้วยอัตรา $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ อุณหภูมิจะถูกให้คงตัวไว้ที่ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.15-4.19 เมื่อเสร็จสิ้นการอบผนึกจะต้องรอนอุณหภูมิชิ้นงานลดลงสู่อุณหภูมิห้องจึงนำชิ้นงานออกมาเพื่อให้ได้โครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติที่ต้องการ ในระหว่างอบผนึกนั้น ไอออนจะแพร่ไปตามขอบเขตของเกรน และพื้นผิวไปสู่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค และเกิดการเชื่อมต่อระหว่างเกรน เมื่อเวลาผ่านไปการคืบคลานแบบกระจายตามขอบเม็ด (grain boundary) จะทำให้ช่องว่างมีขนาดเล็กลงและกลมขึ้น ความหนาแน่นของวัสดุมาก



รูปที่ 4.15 กระบวนการผสมวัตถุดิบและขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป



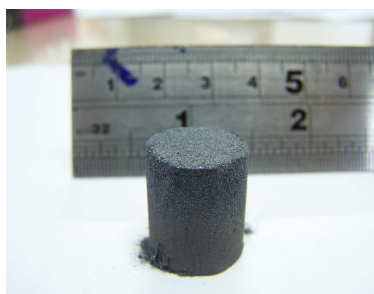
รูปที่ 4.16 การตัดวัตถุดิบผสม (ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมกับน้ำ) ใส่ลงในชิ้นส่วนเข้าอัดขึ้นงาน



รูปที่ 4.17 การนำชุดอุปกรณ์การอัดชิ้นงานที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์สุญญากาศไปเข้าเครื่องอัดไฮดรอลิกส์



รูปที่ 4.18 การนำวัตถุดิบผสมที่อัดขึ้นรูปแล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



(a)



(b)

รูปที่ 4.19 ตัวอย่างชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่ได้จากการผลิต (a) SiC 25, 68, 100 μm (b) SiC 13.5 μm

4.3.1.1 ขั้นตอนการหาค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป

เมื่อได้ชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่ได้จากการผลิตแล้วให้นำมาวัดค่าหา มวล ความสูง และความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง จากนั้นนำไปคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

สมการปริมาตรชิ้นงานคือ

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h \quad (4.1)$$

โดยที่ V คือปริมาตรชิ้นงาน D คือความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงาน h คือความสูง ชิ้นงาน

ค่าร้อยละความพรุนของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป (% Porosity) (Pech-Canul et al., 2000) คือ

$$\%Porosity = \frac{\rho_{Theory} - \rho_{Exp.}}{\rho_{Theory}} \times 100 \quad (4.2)$$

โดยที่ %Porosity คือร้อยละความพรุนของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ρ_{Theory} คือค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของซิลิคอนคาร์ไบด์ $\rho_{Exp.}$ คือค่าความหนาแน่นทางการทดลองของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป

สมการหาค่าความหนาแน่นทางการทดลองของชิ้นงาน ($\rho_{Exp.}$) คือ

$$\rho_{Exp.} = \frac{m}{V} \quad (4.3)$$

โดยที่ $\rho_{Exp.}$ คือค่าความหนาแน่นทางการทดลองของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัด

ขึ้นรูป m คือมวลของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปหลังผ่านกระบวนการผลิต V คือปริมาตรของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปหลังผ่านกระบวนการผลิต

ค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก (Volume Fraction, V_p) คือ

$$V_p = 100 - \%Porosity \quad (4.4)$$

โดยที่ V_p คือค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก
 $\%Porosity$ คือค่าร้อยละความพรุนของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป

4.3.2 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

เริ่มจากใช้ผงปูนทนไฟ (Refractory Mortar) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) เช่น Al_2O_3 หรือ SiO_2 ซึ่งสามารถใช้เป็นสารเซรามิกเคลือบ (Ceramic coating) ได้ ผสมน้ำพอประมาณทำให้ทั่วบริเวณที่น้ำโลหะจะไหลผ่าน เพื่อไม่ให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเกิดแข็งตัวติดแน่นกับชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงและช่วยในการนำชิ้นงานและอะลูมิเนียมที่แข็งตัวออกได้โดยง่าย จากนั้นนำชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปใส่เข้าไปในช่องว่างในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงโดยใช้ผงปูนทนไฟอัดระหว่างช่องว่างชิ้นส่วนแม่พิมพ์และชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป เพื่อไม่ให้ชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเกิดการเคลื่อนตัว จากนั้นทำการประกอบชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงด้วยสลักเกลียวและปะเก็น (Gasket) ให้เสถียรจนบูรณ์ นำชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ทำการประกอบเสร็จแล้วไปต่อกับจานหมุนของเครื่องหล่อ ต่อมานำแท่งอะลูมิเนียมปริมาณ 1 kg ไปหลอมในเตาหลอมโลหะชนิดควบคุมความดันทานให้เหลวที่อุณหภูมิประมาณ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขณะที่กำลังหลอมอยู่นั้นก็ให้ทำการเผาอุ่นชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงด้วยชุดอุปกรณ์เผาอุ่น เพื่อไม่ให้ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงมีอุณหภูมิเย็นตัว ซึ่งทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่เกิดการพาความร้อนและแข็งตัวเร็วเกินจนยังไม่แทรกซึมเข้าไปยังในช่องว่างระหว่างอนุภาคของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้เต็มที่ เมื่ออุณหภูมิของทั้งชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงและน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวได้ตามที่ต้องการจากการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและหัววัดอุณหภูมิทำการปิดและล็อกฝาเครื่องหล่อเหวี่ยงแล้วจึงเริ่มเปิดเดินเครื่องควบคุมความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ให้ได้ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงตามที่ต้องการ ทำการเท

น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเข้าไปในกรวยประคองน้ำโลหะ (ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประคองช่วยเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวและจะเชื่อมต่อไปถึงทางเข้าของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง) ดังรูปที่ 4.20-4.22 ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงจะหมุนเหวี่ยงให้เกิดความดันสูงจนเหวี่ยงน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเข้าแทรกซึมในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ที่อยู่ในแม่พิมพ์ จากนั้นปล่อยให้ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงหล่อเย็นตัวลงและทำการแกะนำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมออกเพื่อดูผลการหล่อเหวี่ยงความดันสูง



รูปที่ 4.20 การหลอมแท่งอะลูมิเนียมเกรด A356 ในเตาหลอมโลหะชนิดขดลวดความต้านทาน



รูปที่ 4.21 การใช้ไฟเผาอุ่นชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง



รูปที่ 4.22 การปิดล็อกฝาเครื่องหล่อเหวี่ยงและวางกรวยประคองน้ำโลหะ เพื่อป้องกันอันตรายจากการหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูง

4.3.2.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

หลังจากที่ได้ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อเหวี่ยงความดันสูงแล้ว จะปรากฏมีเศษน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่เกิดการแข็งตัวค้างอยู่ในชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงเป็นปริมาณมาก จึงต้องทำความสะอาดชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงเพื่อล้างและนำเศษน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่ค้างตัวอยู่ออกให้หมด มีขั้นตอนดังนี้เริ่มจากการไขสลักเกลียว ซึ่งเป็นอุปกรณ์ยึดจับชิ้นส่วนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงเข้าไว้ด้วยกันให้ออกให้หมด จากนั้นนำชุดอุปกรณ์เผาอุ่นมาทำการเผาที่จุดต่อระหว่างชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและที่รองรับน้ำโลหะ เพื่อให้เปลวไฟความร้อนทำการละลายอะลูมิเนียมที่แข็งและค้างตัวอยู่บริเวณจุดต่อต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะและชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะแยกออกจากกันแล้ว ให้นำลวดโลหะเหล็กขนาดใหญ่มาร้อยเข้ารูสลักเกลียวที่ฐานของชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะให้กลายเป็นหูหิ้ว ดังรูปที่ 4.23 ทำการจับยกหูหิ้วยกชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะเข้าไปในเตาหลอมโลหะชนิดควบคุมความดันตามตั้งอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ 750 °C จนเศษน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่แข็งตัวเกิดการหลอมเหลวยกที่รองรับน้ำโลหะออกจากเตาหลอมโลหะชนิดควบคุมความดันตามตั้ง ใช้น้ำโลหะแข็งขนาดเล็กทำการแกะและคว้านเศษน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ติดตามผนังภายในของชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะออกให้หมด จากนั้นนำชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะใส่เข้าไปในแก้วโลหะสเตนเลสที่มีขนาดความกว้างของปากกระบอกใหญ่กว่าชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะเล็กน้อยในแนวตั้ง ดังรูปที่ 4.24 เพื่อให้เศษน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่แข็งตัวค้างอยู่ในชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะเมื่อได้รับความร้อนจากเตาหลอมโลหะชนิดควบคุมความดันตามตั้ง น้ำโลหะอะลูมิเนียมที่แข็งตัวจะเกิดการหลอมเหลวและไหลลงสู่แก้วโลหะสเตนเลสที่เป็นภาชนะรองรับ จากนั้นก็ทำเหมือนขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ



รูปที่ 4.23 การรื้อยลวดโลหะเหล็กขนาดใหญ่เข้าสู่รูสลักเกลียวที่ฐานของชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะเพื่อเป็นหูหิ้ว



รูปที่ 4.24 การนำชิ้นส่วนท่อทางวิ่งน้ำโลหะใส่เข้าไปในแก้วโลหะสแตนเลส

4.3.3 การทดสอบหาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

การทดสอบหาสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ได้แก่ ความหนาแน่น การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลคือหาค่าความแข็งและค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.3.1 การคำนวณหาความหนาแน่นรวมชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

นำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมไปแช่น้ำและชั่งน้ำหนักในน้ำ แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่น จากสมการที่ 4.5 (ศิริพร ลาภเกียรติถาวร, 2547)

$$\text{BulkDensity} = \frac{W_{Dry}}{W_{Dry} - W_{Wet}} \quad (4.5)$$

- เมื่อ Bulk Density คือ ความหนาแน่นรวมของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (g/cc)
 W_{Dry} คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (g)
 W_{Wet} คือ น้ำหนักที่ชั่งในน้ำของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (g)

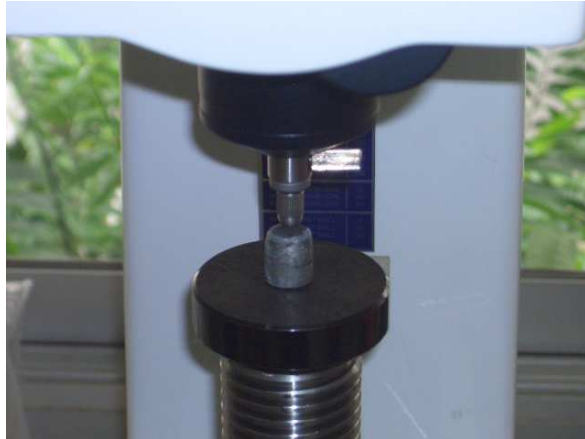
4.3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคซึ่งหาได้จากการส่องและถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ

4.3.3.3 การทดสอบวัดความแข็งชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

วิธีการนี้เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุที่ไม่ทำให้วัสดุเสียรูป โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบรีอคเวลด์ ชนิด FUTURE-TECN รุ่น FR-LeA ด้วยสถานะรีอคเวลด์ สเตล B ขนาดหัว 1/16" Ball load 100 kg แสดงในรูปที่ 4.4 ทดสอบความแข็งชิ้นงานละ 5 จุด แล้วจึงหาค่าเฉลี่ยความแข็ง จากนั้นทำการแปลงค่าความแข็งจากรีอคเวลด์ สเตล B ให้เป็นความแข็งแบบบริเนลสถานะ ขนาดหัว 10mm Ball steel load 500 kg ทำการทดสอบตามขั้นตอนดังนี้

- ก. นำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมาขัดให้ชิ้นงานมีผิวเรียบ
- ข. วางชิ้นงานที่เครื่องทดสอบ
- ค. ทำการกดชิ้นงานเลือกจุดตามแนวยาวของชิ้นงาน 5 จุด ดังรูปที่ 4.25
- ง. บันทึกค่าความแข็งที่ได้เป็นแบบรีอคเวลด์ หน่วย RHB
- จ. แปลงค่าความแข็งให้เป็นแบบบริเนล (Brinell hardness) หน่วย HB



รูปที่ 4.25 ทำการกดชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบรีอเคเวลด์

4.3.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

วิธีการนี้เป็นการวัดค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอและเครื่องขัดแบบจานคู่ ขนาด 8" ชนิด METKON รุ่น GRIPO 2V แสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.7 ตามลำดับ ขัดกับกระดาษทราย เบอร์ 150 C.C. ใช้โหลดน้ำหนักถ่วง 1.5 kg ความเร็วในการหมุนขัด 252 rpm แล้วทำการทดสอบตามขั้นตอน ดังนี้

ก. นำชิ้นงานมาทำการหล่อเรซิน (Mounting) กับท่อประปาพีวีซี (Poly Vinyl Chloride, PVC) เพื่อให้มีเนื้อที่ในการจับและสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอได้ ดังรูปที่ 4.26

ข. นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซินมาประกอบกับอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอและทำการจับยึดกับเครื่องขัดแบบจานคู่ พร้อมกับการถ่วงด้วยโหลดน้ำหนัก 1.5 kg ดังรูปที่ 4.27

ค. เริ่มเปิดเครื่องขัดแบบจานคู่ โดยทำการขัดกับกระดาษทราย เบอร์ 150 C.C. ใช้โหลดน้ำหนักถ่วง 1.5 kg ความเร็วในการหมุนขัด 252 rpm พร้อมด้วยการฉีดน้ำเพื่อการหล่อลื่น และทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.28

ง. บันทึกค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน ตามแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 4.26 การนำชิ้นงานมาทำการหล่อเรซินกับท่อประปาพีวีซี



รูปที่ 4.27 การนำชิ้นงานมาประกอบกับอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอและ
จับยึดกับเครื่องขัดแบบจานคู่ พร้อมกับการถ่วงด้วยโหลدن้าหนัก 1.5 kg



รูปที่ 4.28 เปิดเครื่องขัดแบบจานคู่ทำการขัดกับกระดาษทราย เบอร์ 150 C.C. ใช้โหลدن้าหนัก
ถ่วง 1.5 kg ความเร็วในการหมุนขัด 252 rpm พร้อมฉีดน้ำเพื่อการหล่อลื่น

บทที่ 5

ผลและการอภิปรายผล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยได้ลำดับอิทธิพลของตัวแปร (ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ค่าความดันของน้ำโลหะ) ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยา สมบัติทางกลของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้ ดังรายละเอียดที่สามารถศึกษาได้ต่อไปในบทนี้

จากการทดลองหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูงเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminum matrix composite, AMC) ทำให้ได้ซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป (SiC Preform) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.1 mm และความสูงประมาณ 18-20 mm ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5.1



(a)



(b)

รูปที่ 5.1 ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminum matrix composite, AMC) รูป (a) ชิ้นงานหลังการทดลองก่อนการกลึงปอกเซรามิกเคลือบออก (b) ชิ้นงานหลังการทดลองหลังจากการกลึงปอกเซรามิกเคลือบออก (กรณี SiC 100 μm ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม 4.26 MPa)

5.1 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยการใช้แรงเหวี่ยงด้วยความดันสูงเหวี่ยงน้ำโลหะอะลูมิเนียม เกรด A356 เหลวเหวี่ยงให้เข้าไปแทรกซึมในผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ได้ทำการอัดขึ้นรูป (SiC Preform) มีตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ดังนี้

1. ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (13.5, 25, 68, 100 μm)
2. ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว (0.15, 0.19, 0.29, 0.34, 0.84, 1.31, 1.90, 4.26 MPa)
3. ค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูปของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป 54 ± 6
4. อุณหภูมิเผาอ่อนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ($T_{\text{หล่อรับ}}$ มากกว่าหรือเท่ากับ $472\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{หล่อวาง}}$ มากกว่าหรือเท่ากับ $615\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{แม่พิมพ์}}$ มากกว่าหรือเท่ากับ $320\text{ }^{\circ}\text{C}$)

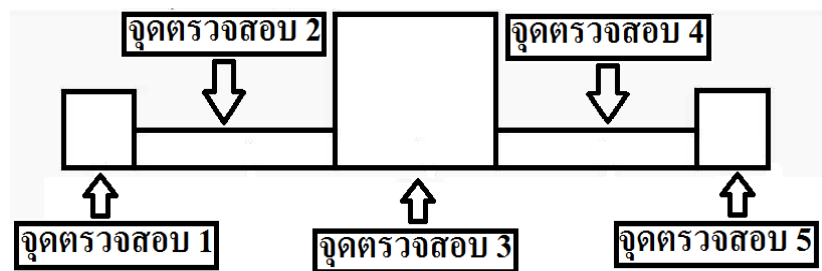
จากการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในเบื้องต้นนั้นทำให้ทราบว่าค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก (Volume Fraction, V_p) ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่ผลิตได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 54 ± 6 ตลอดทุกชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปทุกขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่นำมาทดลอง โดยอิงข้อมูลและเนื้อหาจากหัวข้อ 4.3.1 ในบทที่ 4 แสดงผลดังตารางที่ 5.1 จากการสุ่มทดลองหาความผิดพลาดในการทดลองหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม พบว่าข้อจำกัดในการผลิตซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปและข้อจำกัดการทดลองก็มีผลต่อตัวแปรค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกด้วยซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

(1) ข้อจำกัดในการผลิตซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป เช่น น้ำซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานในซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป อาจเป็นสาเหตุให้การคงสภาพอยู่ตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเป็นไปได้ยากหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปและขนาดช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปมีขนาดเล็กจนทำให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกจึงอยู่ที่ประมาณ 54 ± 6

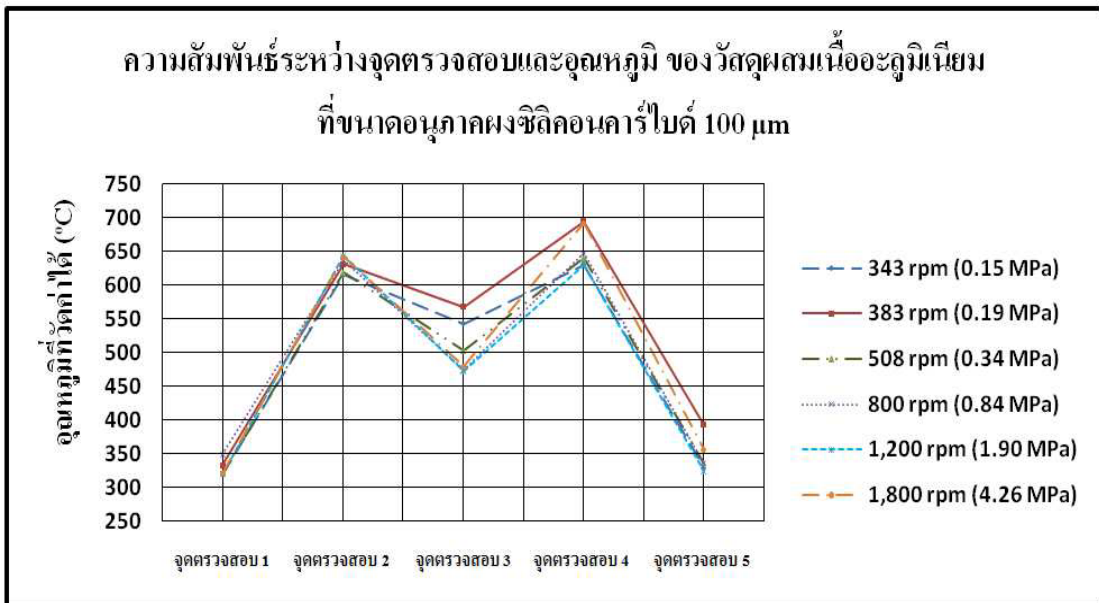
(2) ข้อจำกัดในการทดลองหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง เช่น การทนความร้อนจากการเผาอ่อนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงของปะเก็น ซึ่งเป็นวัสดุที่อยู่ระหว่างรอยต่อประกบของแต่ละชิ้นส่วนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงจึงทำการเลือกใช้ปะเก็นชนิด non-asbestos 350 – 550 $^{\circ}\text{C}$ แบบ thermopak 200 และการให้ความร้อนจากการเผาอ่อนของแต่ละชิ้นส่วนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงก็เป็นอีกสาเหตุที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่าง

อนุภาคและชิ้นงานเซรามิก ซึ่งพบว่าค่าอุณหภูมิในการเผาอุณหภูมิต่อระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงควรมีค่าอุณหภูมิที่ขึ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะ ท่อทางวิ่งน้ำโลหะ แม่พิมพ์ ไม่น้อยกว่า 472 °C, 615 °C และ 320 °C ตามลำดับ โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและหัววัดอุณหภูมิวัดอุณหภูมิของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง 5 จุดตรวจสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง 5 จุดตรวจสอบ กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ที่ค่าความดันของน้ำโลหะ (0.15, 0.19, 0.34, 0.84, 1.90, 4.26 MPa) แสดงในตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 โดยการเผาอุณหภูมิต่อระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงมีผลเพื่อให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่เกิดการพาความร้อนไปให้ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงและน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเกิดการแข็งตัวเร็วเกินจนยังไม่แทรกตัวเข้าไปยังในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้เต็มที่

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งข้อจำกัดในการผลิตซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปและข้อจำกัดในการทดลองการหล่อเหวี่ยงความดันสูงก็ส่งผลต่อตัวแปรค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก และค่าอุณหภูมิในการเผาอุณหภูมิต่อระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงให้เป็นตัวแปรที่ต้องทำการควบคุมเพื่อให้การทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้อ ประสบความสำเร็จ ดังนั้นความสนใจในผลของตัวแปรค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปและอุณหภูมิเผาอุณหภูมิต่อระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงซึ่งมีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจึงตัดออกไป



รูปที่ 5.2 จุดตรวจสอบ 5 จุด ที่ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและหัววัดอุณหภูมิมาทำการวัดอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดตรวจสอบ 5 จุด และอุณหภูมิที่วัดค่าชุดระบบการหล่อเหวี่ยง ความดันสูงได้โดยเครื่องวัดอุณหภูมิ กรณีวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างผลการหาค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก รูป (a) SiC ขนาด 13.5 μm (b) SiC ขนาด 25 μm

SiC ขนาด 13.5 μm								
ลำดับที่	ปริมาณผง SiC (g)	ขนาดชิ้นงานหลังการผลิต (mm)		ปริมาตร ชิ้นงาน (mm^3)	ความหนาแน่น การทดลอง $\rho_{Exp.}$ ($\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$)	ความหนาแน่น ทฤษฎี ρ_{Theory} ($\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$)	% Porosity	Volume Fraction
		D	h					
1	6.57	15.10	20.50	3,670	1.79×10^{-3}	3.21×10^{-3}	44.30	55.70
2	6.52	15.10	20.50	3,670	1.78×10^{-3}	3.21×10^{-3}	44.70	55.30
3	6.46	15.10	20.30	3,640	1.78×10^{-3}	3.21×10^{-3}	44.70	55.30

(a)

SiC ขนาด 25 μm								
ลำดับที่	ปริมาณผง SiC (g)	ขนาดชิ้นงานหลังการผลิต (mm)		ปริมาตร ชิ้นงาน (mm^3)	ความหนาแน่น การทดลอง $\rho_{Exp.}$ ($\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$)	ความหนาแน่น ทฤษฎี ρ_{Theory} ($\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$)	% Porosity	Volume Fraction
		D	h					
1	6.48	15.10	20.80	3,730	1.74×10^{-3}	3.21×10^{-3}	45.90	54.10
2	6.53	15.10	20.70	3,710	1.76×10^{-3}	3.21×10^{-3}	45.10	54.90
3	6.52	15.10	20.90	3,740	1.74×10^{-3}	3.21×10^{-3}	45.80	54.30

(b)

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างผลการหาค่าเฉลี่ยสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก (c) SiC ขนาด 68 μm (d) SiC ขนาด 100 μm

SiC ขนาด 68 μm								
ลำดับที่	ปริมาณผง SiC (g)	ขนาดชิ้นงานหลังการผลิต (mm)		ปริมาตรชิ้นงาน (mm^3)	ความหนาแน่นการทดลอง $\rho_{Exp.}$ ($\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$)	ความหนาแน่นทฤษฎี ρ_{Theory} ($\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$)	% Porosity	Volume fraction
		D	h					
1	6.39	15.10	20.30	3,640	1.76×10^{-3}	3.21×10^{-3}	45.30	54.70
2	6.58	15.10	20.50	3,670	1.79×10^{-3}	3.21×10^{-3}	44.20	55.80
3	6.55	15.10	20.60	3,690	1.77×10^{-3}	3.21×10^{-3}	44.70	55.30

(c)

SiC ขนาด 100 μm								
ลำดับที่	ปริมาณผง SiC (g)	ขนาดชิ้นงานหลังการผลิต (mm)		ปริมาตรชิ้นงาน (mm^3)	ความหนาแน่นการทดลอง $\rho_{Exp.}$ ($\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$)	ความหนาแน่นทฤษฎี ρ_{Theory} ($\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$)	% Porosity	Volume fraction
		D	h					
1	6.47	15.10	20.00	3,580	1.81×10^{-3}	3.21×10^{-3}	43.80	56.30
2	6.45	15.10	19.80	3,550	1.82×10^{-3}	3.21×10^{-3}	43.40	56.70
3	6.40	15.10	19.20	3,440	1.86×10^{-3}	3.21×10^{-3}	42.00	58.00

(d)

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง 5 จุดตรวจสอบ กรณีวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ที่ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวขนาดต่างๆ

	อุณหภูมิของแต่ละจุดตรวจสอบ ($^{\circ}\text{C}$)				
	จุดตรวจสอบ 1	จุดตรวจสอบ 2	จุดตรวจสอบ 3	จุดตรวจสอบ 4	จุดตรวจสอบ 5
343 rpm (0.15 MPa)	320 $^{\circ}\text{C}$	615 $^{\circ}\text{C}$	543 $^{\circ}\text{C}$	630 $^{\circ}\text{C}$	330 $^{\circ}\text{C}$
383 rpm (0.19 MPa)	333 $^{\circ}\text{C}$	631 $^{\circ}\text{C}$	568 $^{\circ}\text{C}$	695 $^{\circ}\text{C}$	393 $^{\circ}\text{C}$
508 rpm (0.34 MPa)	320 $^{\circ}\text{C}$	619 $^{\circ}\text{C}$	503 $^{\circ}\text{C}$	640 $^{\circ}\text{C}$	336 $^{\circ}\text{C}$
800 rpm (0.84 MPa)	349 $^{\circ}\text{C}$	637 $^{\circ}\text{C}$	474 $^{\circ}\text{C}$	647 $^{\circ}\text{C}$	336 $^{\circ}\text{C}$
1,200 rpm (1.90 MPa)	320 $^{\circ}\text{C}$	644 $^{\circ}\text{C}$	472 $^{\circ}\text{C}$	630 $^{\circ}\text{C}$	324 $^{\circ}\text{C}$
1,800 rpm (4.26 MPa)	322 $^{\circ}\text{C}$	642 $^{\circ}\text{C}$	480 $^{\circ}\text{C}$	692 $^{\circ}\text{C}$	356 $^{\circ}\text{C}$

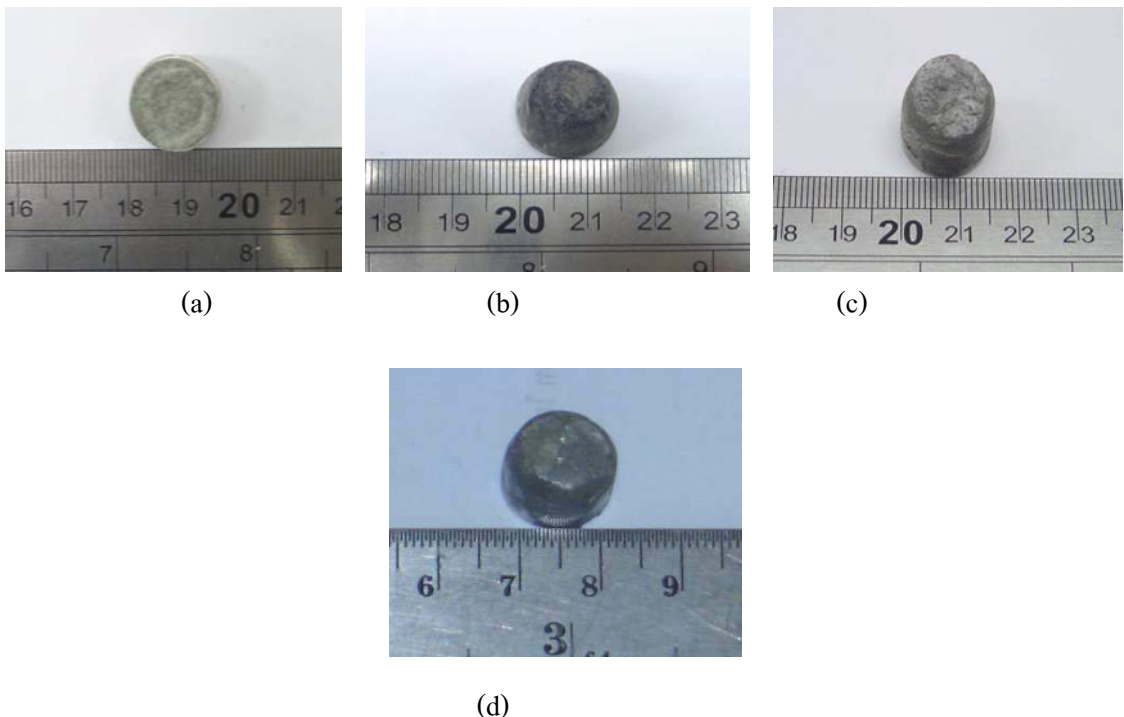
เนื่องจากเกิดข้อจำกัดในอุปกรณ์และเครื่องมือที่จะใช้ทดลองวิจัยการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม คือมอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวขับให้จานหมุน ซึ่งจะต่อกับชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงมีประสิทธิภาพความเร็วแรงแรงการหมุนเหวี่ยง 2,000 rpm หรือก็คือที่ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 5.27 MPa (ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงจะมีความสัมพันธ์กับความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว) อีกทั้งเพื่อเป็นการป้องกันและความปลอดภัยในการวิจัยจึงกำหนดให้ใช้ความเร็วระดับการหมุนเหวี่ยง 1,800 rpm (4.26 MPa) เป็นความเร็วสูงสุดสำหรับการทดลองวิจัยครั้งนี้ เพื่อเป็นการหาประสิทธิภาพของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงและศึกษาอิทธิพลของขนาดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจึงได้ทำการทดลองที่ระดับความเร็วในการหมุนเหวี่ยงสูงสุด 1,800 rpm (4.26 MPa) กับชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่มีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์เท่ากับ 13.5, 25, 68, 100 μm

โดยเฉพาะที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 μm ซึ่งนับว่าเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

5.1.1 อิทธิพลของขนาดผงซิลิคอนคาร์ไบด์

ในที่นี้ได้ทดลองวิจัยการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงกับขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่ 4 ขนาดด้วยกันคือ 13.5, 25, 68, 100 μm เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ได้จากการทดลองหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงของทั้งขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 4 ขนาด พบว่ามีความแตกต่างกันไม่มากนัก ดังรูปที่ 5.4 แต่เมื่อสังเกตจากค่าสมบัติทั้ง 4 อย่างคือการหาค่าความหนาแน่นรวม ความแข็ง ความต้านทานต่อการสึกหรอ โครงสร้างภายในระดับจุลภาคเรียงกับชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ คือ 13.5, 25, 68, 100 μm ที่ความดันจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm) จะเห็นถึงความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงผลดังต่อไปนี้



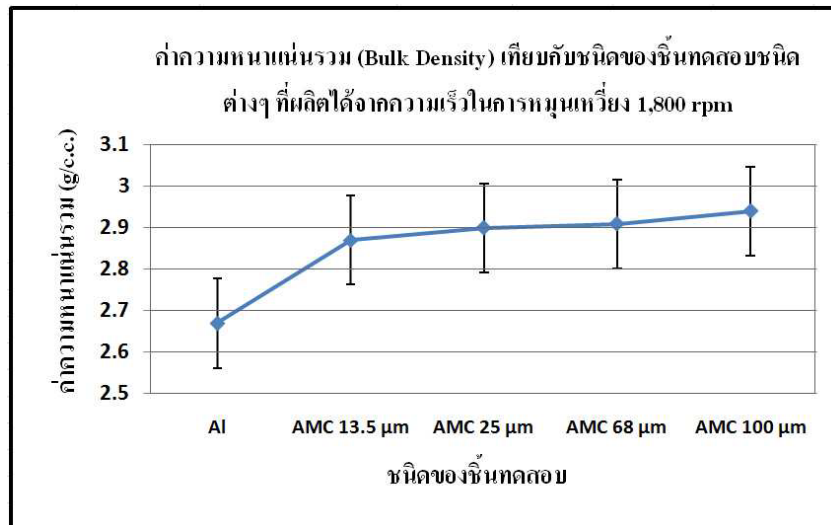
รูปที่ 5.4 ลักษณะของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ความดันจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm) ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (a) AMC 13.5 μm (b) 25 μm (c) 68 μm (d) 100 μm

5.1.1.1 ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์

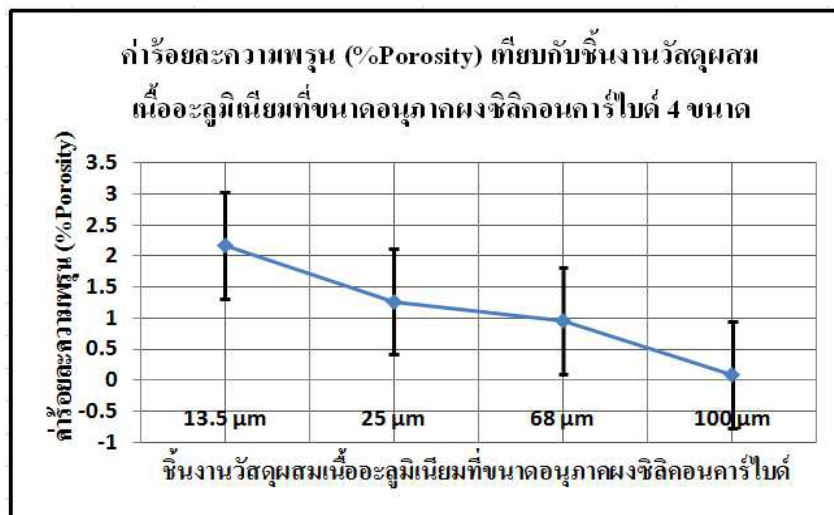
การหาค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้จากการหมุนเหวี่ยงที่ความดันสูง 4.26 MPa (1,800 rpm) เพื่อศึกษาหาค่าความหนาแน่นรวมหลังน้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป จนแข็งตัวกลายเป็นชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม มีขั้นตอนการทดสอบคือนำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมไปชั่งน้ำหนักและทำการจดค่า จากนั้นนำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมไปแช่น้ำและชั่งน้ำหนักในน้ำ ต่อมานำไปเข้าสู่ตรรกการคำนวณดังสมการที่ 4.5 และค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.5 - 5.6

ตารางที่ 5.3 ค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)

AMC (μm)	Ω (rpm)	W_{Dry} (g)	W_{Wet} (g)	W_{Wet2} (g)	Bulk Density (g/c.c.)	% Porosity
Al	-	-	-	-	2.67	-
13.5	1,800	3.66	2.38	3.68	2.87	2.17
25	1,800	4.00	2.62	4.11	2.90	1.27
68	1,800	7.19	4.72	7.20	2.91	0.96
100	1,800	8.94	5.90	8.99	2.94	0.093



รูปที่ 5.5 ค่าความหนาแน่นรวมเทียบกับชนิดของชั้นทดสอบชนิดต่างๆ



รูปที่ 5.6 ค่าร้อยละความพรุนเทียบกับชั้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 4 ขนาด

จากผลการหาค่าความหนาแน่นรวมของชั้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ผลิตได้จากการหมุนเหวี่ยงที่ความดันสูง 4.26 MPa (1,800 rpm) ตามตารางที่ 5.3 พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของชั้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm มีค่าความหนาแน่นรวมคือ 2.87, 2.90, 2.91, 2.94 g/c.c. ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นรวมที่มีค่าสูงสุดคือ 2.94 g/c.c. ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นรวมของชั้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ขนาด 100 μm และค่าความหนาแน่นรวมที่มีค่าต่ำสุดคือ 2.87 g/c.c. ซึ่งเป็นค่าของของชั้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ขนาด 13.5 μm

ในขณะที่ค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียมเกรด A356 มีค่าความหนาแน่นเพียงแค่ 2.67 g/c.c. ซึ่งจากรูปที่ 5.5 แถบข้อความผิดพลาดผิดพลาดแกน Y แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตาม ± 0.11 และค่าร้อยละความพรุน ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm มีค่าร้อยละความพรุนคือ 2.17%, 1.27%, 0.96%, 0.093% ตามลำดับ ค่าร้อยละความพรุนที่มีค่าสูงสุดคือ 2.17% ซึ่งเป็นค่าของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 μm และค่าร้อยละความพรุนที่มีค่าต่ำสุดคือ 0.093% ซึ่งเป็นค่าของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ขนาด 100 μm ซึ่งจากรูปที่ 5.6 แถบข้อความผิดพลาดผิดพลาดแกน Y แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตาม ± 0.86

เมื่อนำผลการหาค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm มาเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียมเกรด A356 พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียมหมดทุกขนาด เพราะในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีมวลของผงซิลิคอนคาร์ไบด์และมวลอะลูมิเนียมประกอบอยู่ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียม ในขณะที่เนื้อชิ้นงานอะลูมิเนียมมีแค่เนื้ออะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียวค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียมจึงต่ำกว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม และพบว่ายิ่งขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่ขึ้นค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะมิแนวโน้มส่วนใหญ่ให้มีความมากขึ้นตาม ในส่วนของค่าร้อยละความพรุน (% Porosity) ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่ายิ่งขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่ขึ้นค่าร้อยละความพรุนของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะมิแนวโน้มมีค่าน้อยลง เพราะที่ขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่เมื่อนำมาผลิตเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป อนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกอัดให้ติดชิดกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่จำนวนมาก น้ำอะลูมิเนียมเหลวจึงสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ง่ายกว่ากรณีขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก (ขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กเมื่อนำมาผลิตเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป อนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกอัดให้ติดชิดกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กมาก เมื่อทำการทดลองการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงน้ำอะลูมิเนียมเหลวจึงสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ยาก เกิดรูพรุนภายในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเป็นจำนวนมาก) ทำให้ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขนาดใหญ่มีค่าร้อยละความพรุนที่น้อย

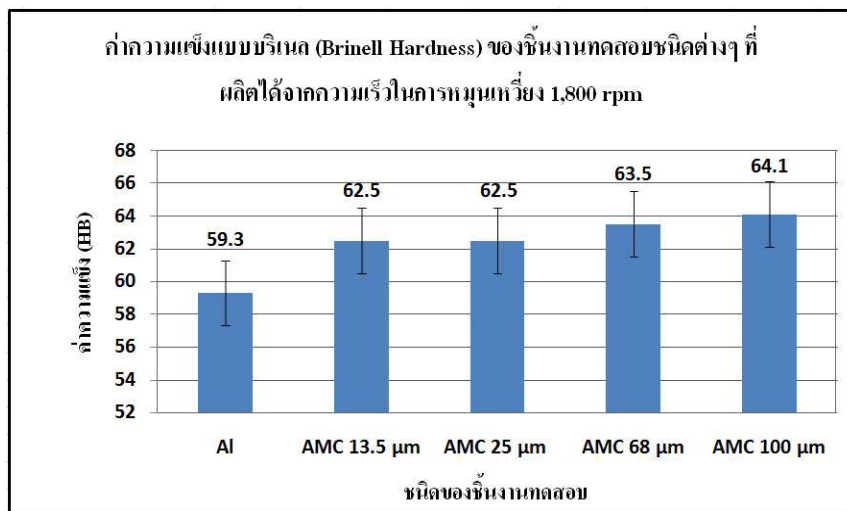
การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงถือได้ว่าประสบความสำเร็จ เพราะที่ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีค่าความหนาแน่นรวม มากกว่าของอะลูมิเนียม เกรด A356 โดยเฉพาะที่ขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีมวลของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ และมวลอะลูมิเนียมประกอบอยู่เป็นจำนวนมากกว่าที่กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก และชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ จะมีค่าร้อยละความพรุนที่น้อยกว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กและอะลูมิเนียม เกรด A356 เนื่องจากมีน้ำอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ง่ายกว่าที่กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก จนเกิดกลายเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

5.1.1.2 ค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์

การทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ผลิตได้จากการหมุนเหวี่ยงที่ความดันสูง 4.26 MPa (1,800 rpm) เพื่อศึกษาหาค่าสมบัติความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับค่าสมบัติความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 ว่าเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ไปเสริมแรงในเนื้ออะลูมิเนียมจะมีส่วนช่วยในการทำให้ค่าสมบัติความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมให้มีความมากกว่าค่าสมบัติความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียม ผลการทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแสดงผลดังตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว จากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)

	ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ (HB)				
	Al (A356)	AMC 13.5 μm	AMC 25 μm	AMC 68 μm	AMC 100 μm
ลำดับการวัด					
1	60.00	62.00	63.00	64.00	64.50
2	59.00	63.00	63.00	63.50	64.00
3	59.00	62.50	62.50	63.00	63.00
4	60.00	62.50	62.00	64.00	64.00
5	58.50	62.50	62.00	63.00	65.00
ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HB)	59.30	62.50	62.50	63.50	64.10



รูปที่ 5.7 ค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)

จากผลการทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ผลิตได้จากการหมุนเหวี่ยงที่ความดันสูง 4.26 MPa (1,800 rpm) ตามตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.7 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm มีค่าความแข็งคือ 59.3, 62.5, 62.5, 63.5, 64.1 HB ตามลำดับ ค่าความแข็งที่มีค่าสูงสุดคือ 64.1

HB ซึ่งเป็นค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm และค่าความแข็งที่มีค่าต่ำสุดคือ 62.5 HB ซึ่งเป็นค่าของของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 และ 25 μm ในขณะที่ค่าความแข็งของอะลูมิเนียม เกรด A356 มีค่าความแข็งเพียงแค่ 59.3 HB จากรูปที่ 5.7 แถบข้อความผิดพลาดผิดพลาดแกน Y แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตาม ± 1.85

เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทั้ง 4 ขนาดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm มาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของอะลูมิเนียม เกรด A356 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ มีค่ามากกว่าค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหมดทุกขนาด เพราะในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม มีเนื้อของผงซิลิคอนคาร์ไบด์และเนื้ออะลูมิเนียมประกอบอยู่ซึ่งอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีส่วนช่วยในการเสริมความต้านทานต่อการกดทดสอบความแข็ง ในขณะที่เนื้อชิ้นงานอะลูมิเนียมมีแค่เนื้ออะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียวที่ต้านทานต่อการกดทดสอบความแข็ง และพบว่ายิ่งขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่ขึ้นค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะมีแนวโน้มส่วนใหญ่ให้มีความมากขึ้นตาม เพราะที่ขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่เมื่อนำมาผลิตเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป อนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกอัดให้ติดชิดกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่จำนวนมาก เมื่อทำการทดลองหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงน้ำอะลูมิเนียมเหลวจึงสามารถเข้าแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ง่ายกว่ากรณีขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก (ขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กเมื่อนำมาผลิตเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป อนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกอัดให้ติดชิดกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก น้ำอะลูมิเนียมเหลวจึงสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ยากมาก เกิดรูพรุนภายในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเป็นจำนวนมาก) ซึ่งการเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ง่ายจะช่วยเสริมเพิ่มค่าสมบัติความแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้ดีกว่าของอะลูมิเนียมธรรมดา ทำให้ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่มีค่าสมบัติความแข็งที่มาก

การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงถือได้ว่าประสบความสำเร็จ เพราะชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีค่าสมบัติความแข็งที่มากกว่าของอะลูมิเนียม เกรด A356 เนื่องจากในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจะมีเนื้อของผงซิลิคอนคาร์ไบด์และเนื้ออะลูมิเนียมประกอบอยู่ซึ่งอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีส่วนช่วย

ในการเสริมค่าสมบัติความแข็งแรงให้มีความมากกว่าอะลูมิเนียมแบบธรรมดา และที่กรณีขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่ น้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าที่จะไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ง่ายกว่าที่กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กจนเกิดกลายเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทำให้ที่ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่มีค่าสมบัติความแข็งแรงที่มากกว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กและชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 แบบธรรมดา

5.1.1.3 ค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์

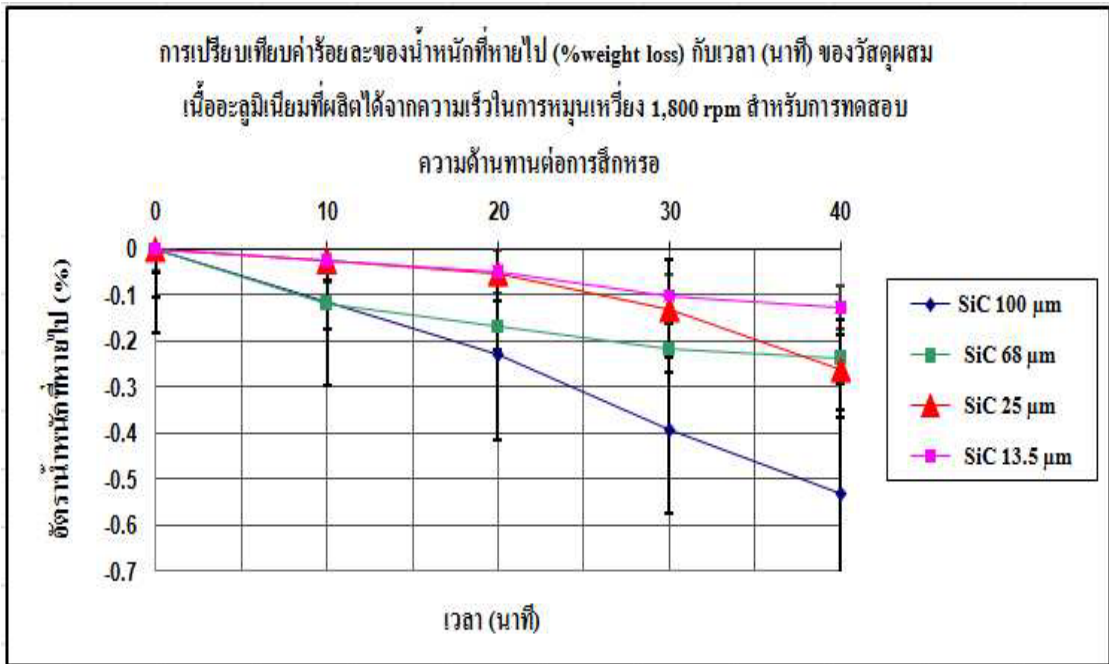
การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงาน วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้จากการหมุนเหวี่ยงที่ความดันสูง 4.26 MPa (1,800 rpm) เพื่อศึกษาหาค่าสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 ว่าเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ไปเสริมแรงในเนื้ออะลูมิเนียมจะมีส่วนช่วยในการทำให้ค่าสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีค่ามากกว่าความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานอะลูมิเนียม โดยค่าความต้านทานต่อการสึกหรอนั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไป คือหากชิ้นงานใดมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปมากก็หมายความว่าชิ้นงานนั้นมีสมบัติค่าความต้านทานต่อการสึกหรอที่ต่ำมากหรือทนต่อการขัดสีของการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอได้น้อย ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแสดงในตารางที่ 5.5-5.6 และรูปที่ 5.8

ตารางที่ 5.5 น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมและอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ 5
ช่วงเวลา ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)

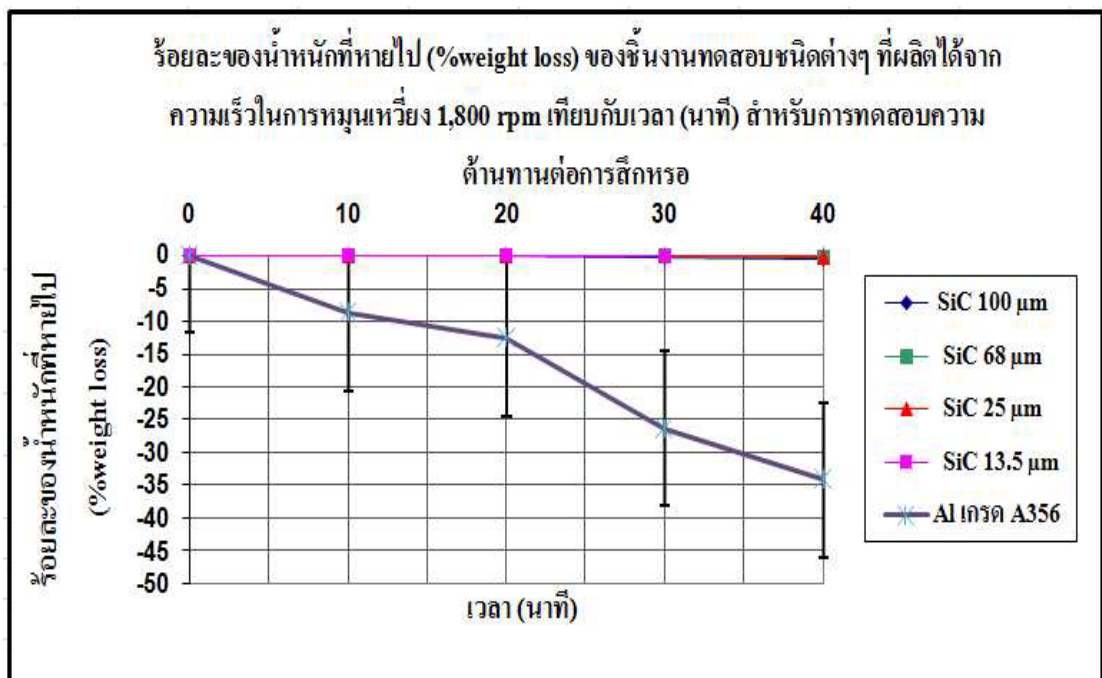
	น้ำหนักหลังทดสอบ (g)				
	Al (A356)	AMC 13.5 μm	AMC 25 μm	AMC 68 μm	AMC 100 μm
เวลา (minute)					
0	47.96	39.55	38.40	41.79	43.25
10	43.74	39.54	38.39	41.74	43.20
20	41.90	39.53	38.38	41.72	43.15
30	35.35	39.51	38.35	41.70	43.08
40	31.58	39.50	38.30	41.69	43.02

ตารางที่ 5.6 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
และอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่ 5 ช่วงเวลา ที่ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลังจากการ
หมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)

	ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss)				
	Al (A356)	AMC 13.5 μm	AMC 25 μm	AMC 68 μm	AMC 100 μm
เวลา (นาที)					
0	0	0	0	0	0
10	-8.79	-0.0253	-0.026	-0.1196	-0.1156
20	-12.64	-0.0506	-0.0521	-0.1675	-0.231
30	-26.30	-0.1011	-0.1302	-0.215	-0.393
40	-34.20	-0.1264	-0.26	-0.239	-0.532
อัตรา (g/min)	-0.41	-0.0013	-0.0025	-0.0025	-0.0058



(a)



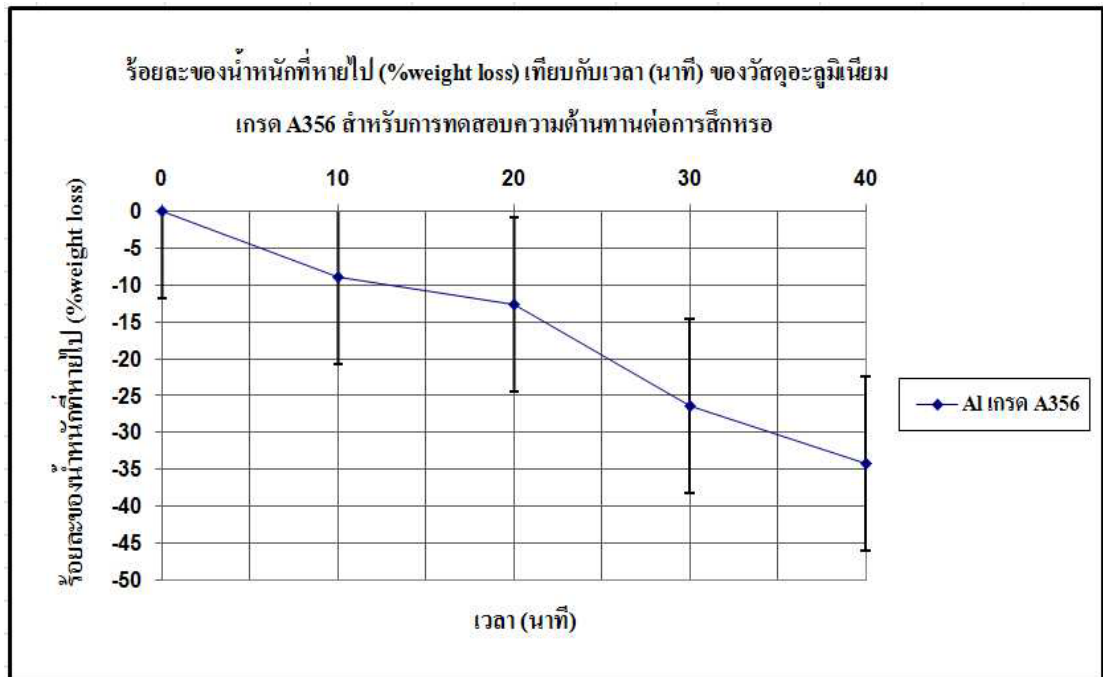
(b)

รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปกับเวลา (นาที) ของการทดสอบ

ความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ความดันจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm)

(a) AMC 13.5, 25, 68, 100 μm (b) AMC 13.5, 25, 68, 100 μm, Al A356

(c) Al เกรด A356



(c)

รูปที่ 5.8 (ต่อ) การเปรียบเทียบระหว่างค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปกับเวลา (นาที) ของการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอที่ความดันจากการหมุนเหวี่ยง 4.26 MPa (1,800 rpm) (a) AMC 13.5, 25, 68, 100 μm และ Al A356 (b) AMC 13.5, 25, 68, 100 μm , Al A356 (c) Al เกรด A35656

จากผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ผลิตได้จากการหมุนเหวี่ยงที่ความดันสูง 4.26 MPa (1,800 rpm) ตามตารางที่ 5.5 - 5.6 และรูปที่ 5.8 พบว่าค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm ที่ 5 ช่วงเวลาคือนาทีที่ 0, 10, 20, 30, 40 มีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปคือ (1) AMC 13.5 μm (0%, -0.0253%, -0.0506%, -0.1011%, -0.1264%) ด้วยอัตรา -0.0013 g/min จากรูปที่ 5.8 แถบข้อความผิดพลาดผิดพลาดแกน Y แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตาม ± 0.046 (2) AMC 25 μm (0%, -0.0260%, -0.0521%, -0.1302%, -0.26%) ด้วยอัตรา -0.0025 g/min จากรูปที่ 5.8 แถบข้อความผิดพลาดผิดพลาดแกน Y แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตาม ± 0.11 (3) AMC 68 μm (0%, -0.1196%, -0.1675%, -0.215%, -0.239%) ด้วยอัตรา -0.0025 g/min จากรูปที่ 5.8 แถบข้อความผิดพลาดผิดพลาดแกน Y แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตาม ± 0.053 (4) AMC 100 μm (0%, -0.1156%, -0.231%, -0.393%, -0.532%) ด้วยอัตรา -0.0058 g/min จากรูปที่ 5.8 แถบข้อความผิดพลาดผิดพลาดแกน Y แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐานตาม ± 0.18 ตามลำดับ ค่าร้อยละของน้ำหนักที่มีแนวโน้มที่หายไปสูงสุดเป็นของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm และค่าร้อยละของน้ำหนักที่มีแนวโน้มที่หายไปต่ำสุดเป็นของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 μm ในขณะที่ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของอะลูมิเนียม เกรด A356 มีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปที่ 5 ช่วงเวลาคือเวลาที่ 0, 10, 20, 30, 40 คือ A1 A356 (0%, -8.79%, -12.64%, -26.30%, -34.20%) ด้วยอัตรา -0.41 g/min จากรูปที่ 5.8 แถบข้อความผิดพลาดผิดพลาดแกน Y แสดงถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตาม ± 11.81 โดยค่าความต้านทานต่อการสึกหรอนั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไป คือหากชิ้นงานใดมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปมากก็หมายความว่าชิ้นงานนั้นมีสมบัติค่าความต้านทานต่อการสึกหรอที่ต่ำมากหรือทนต่อการขัดสีของการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอได้น้อย

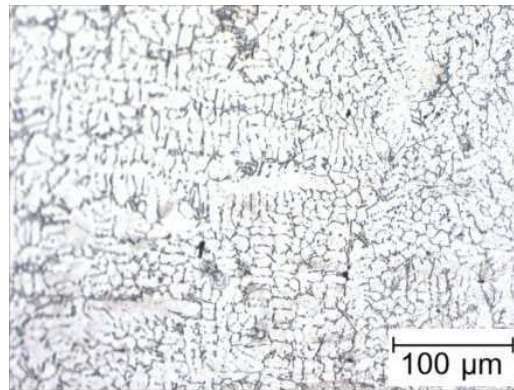
เมื่อนำผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทั้ง 4 ขนาดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm มาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของอะลูมิเนียม เกรด A356 พบว่าค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ มีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าของอะลูมิเนียมหมดทุกขนาด เพราะในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีเนื้อของผงซิลิคอนคาร์ไบด์และเนื้ออะลูมิเนียมประกอบอยู่ซึ่งอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีส่วนช่วยในการเสริมความต้านทานต่อการสึกหรอจากการขัด ในขณะที่เนื้อชิ้นงานอะลูมิเนียมมีเนื้ออะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียวที่ต้านทานต่อการสึกหรอจากการขัด และพบว่ายิ่งขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่ขึ้นค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะมีแนวโน้มส่วนใหญ่ให้มีค่าน้อยลงหรือก็คือยิ่งขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่ขึ้นค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปก็จะมีแนวโน้มส่วนใหญ่ให้มีค่ามากขึ้นตาม เพราะที่ขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่เมื่อนำมาผลิตเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่จะถูกอัดให้ติดชิดกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่จำนวนมากนำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้มากก็จริง แต่เมื่อทำการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอซึ่งเป็นการทดสอบแบบการขัดสีที่กระทำทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 150 C.C. โดยที่กระดาษทรายน้ำ เบอร์ 150 C.C. นั้นมีขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เป็นสารช่วยในการขัดสีอยู่ที่ 100 μm จากการสังเกตพบว่าขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ทั้งของกระดาษทรายน้ำและชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm มีขนาดใกล้เคียงกันเมื่อทำการขัดสีอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ชิ้นงาน

วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจึงเกิดการสึกกร่อนได้ง่ายกว่าของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กทำให้อนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่มีขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการต้านทานต่อการสึกหรอน้อยกว่าของขนาดอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่มีขนาดเล็ก

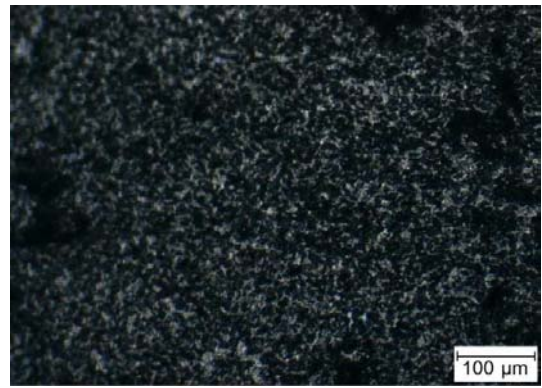
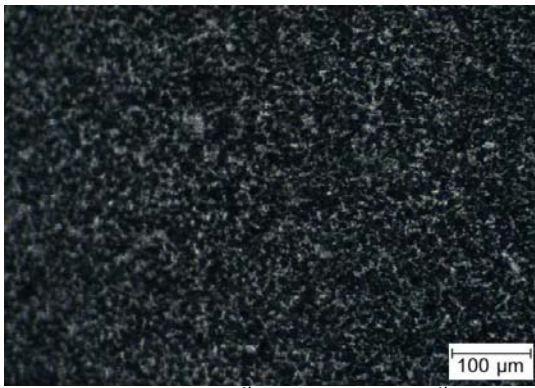
การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงถือได้ว่าประสบความสำเร็จ เพราะที่ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีค่าสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอที่มากกว่าของอะลูมิเนียม เกรด A356 แบบธรรมดา หรือก็คือชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าของอะลูมิเนียม เกรด A356 เนื่องจากในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจะมีเนื้อของผงซิลิคอนคาร์ไบด์และเนื้ออะลูมิเนียมประกอบอยู่ซึ่งอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีส่วนช่วยในการเสริมค่าสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอให้มีค่ามากกว่าอะลูมิเนียมแบบธรรมดา และชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่กรณีขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก อนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกอัดให้ติดชิดกันมากกว่าทำให้สามารถช่วยในการต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่ากรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ที่วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กมีค่าสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอที่มากกว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่และชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 แบบธรรมดา

5.1.1.4 โครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์

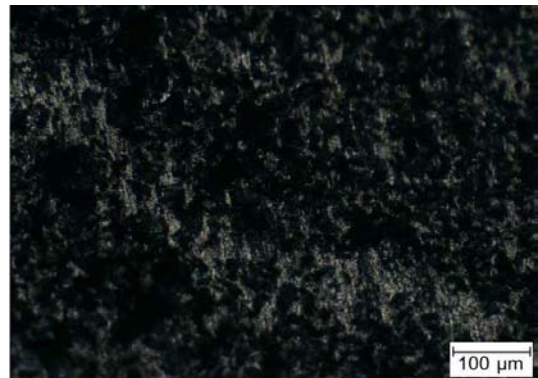
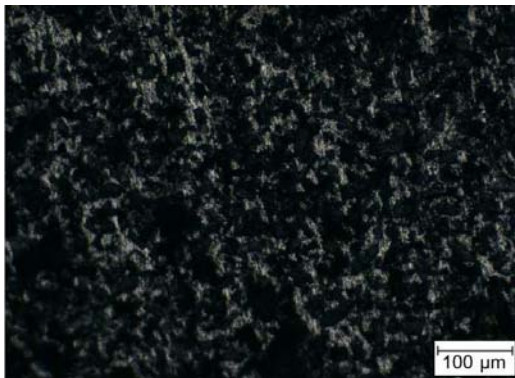
การศึกษาโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ผลิตได้จากการหมุนเหวี่ยงที่ความดันสูง 4.26 MPa (1,800 rpm) เพื่อศึกษาและพิจารณาลักษณะโครงสร้างภายในระดับจุลภาค ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (13.5, 25, 68, 100 μm) และชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 ที่บริเวณโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมของแต่ละขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีลักษณะอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ลักษณะการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ มีรูพรุนช่องว่างซึ่งเกิดจากการที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาค การศึกษาโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแสดงในรูปที่ 5.9-5.18



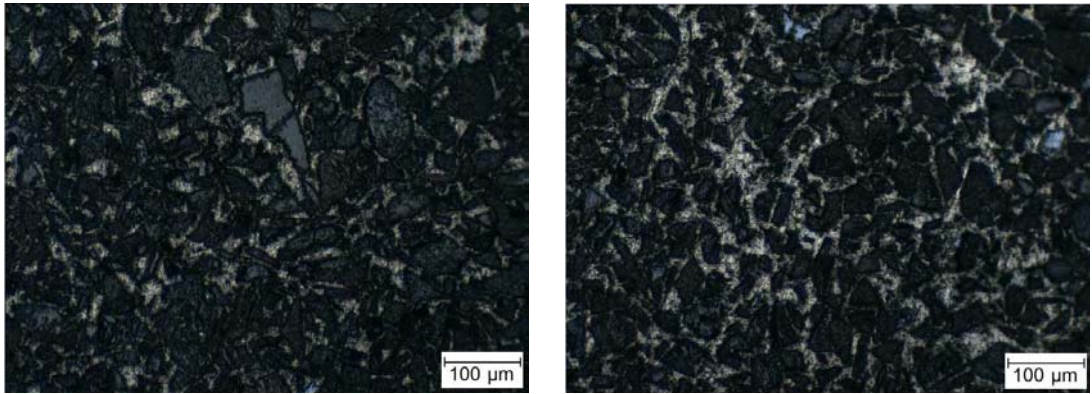
รูปที่ 5.9 ภาพผิวหน้าของชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



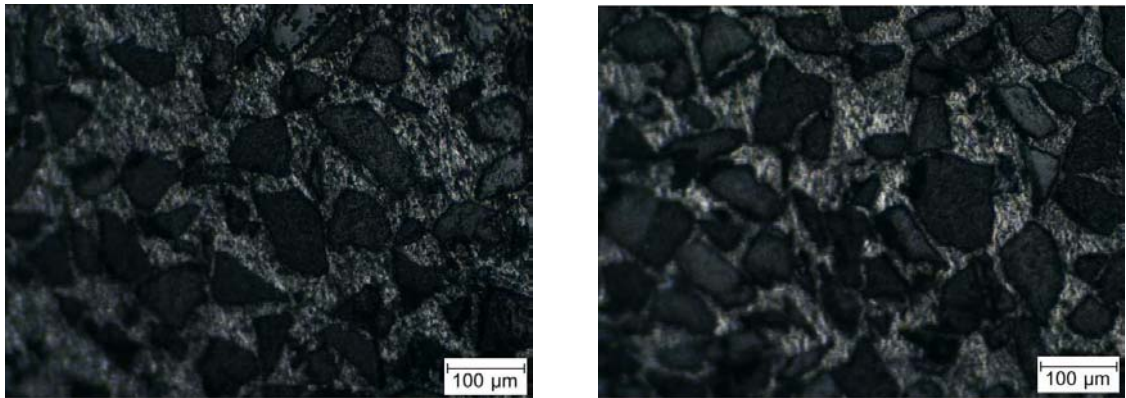
รูปที่ 5.10 ภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 μm กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



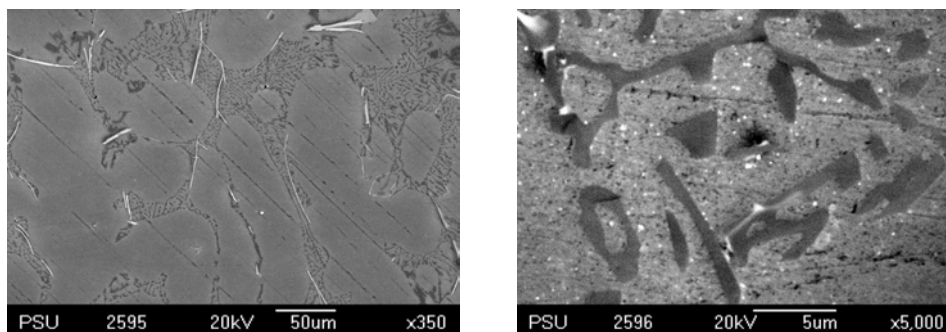
รูปที่ 5.11 ภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 25 μm กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 5.12 ภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 68 µm กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



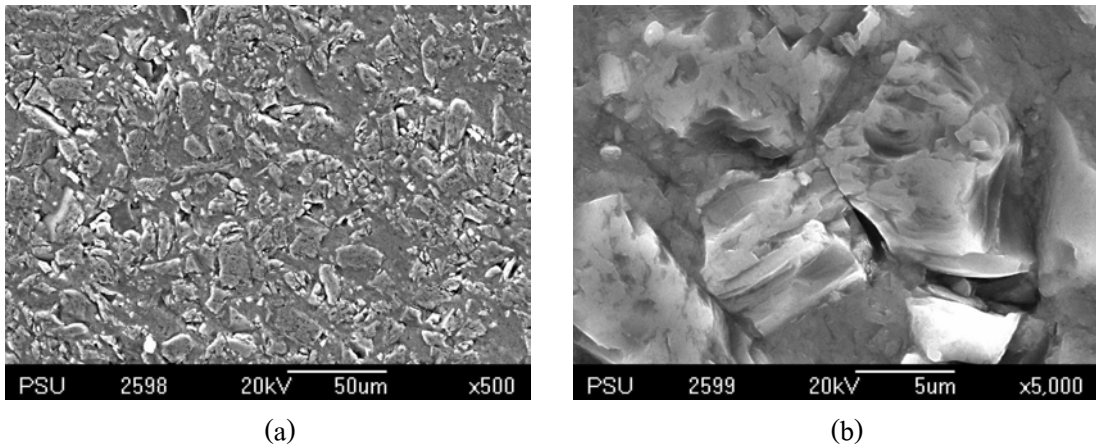
รูปที่ 5.13 ภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 µm กำลังขยาย 10X ที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



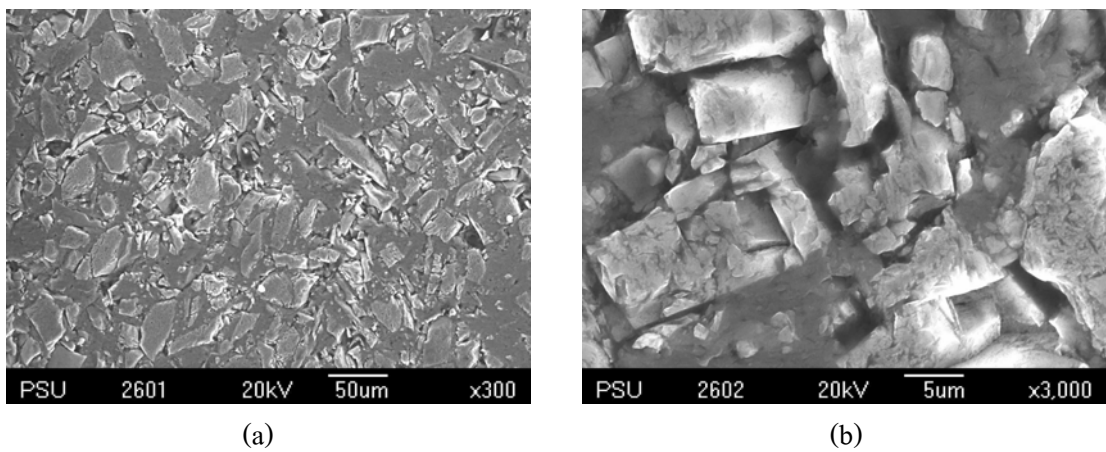
(a)

(b)

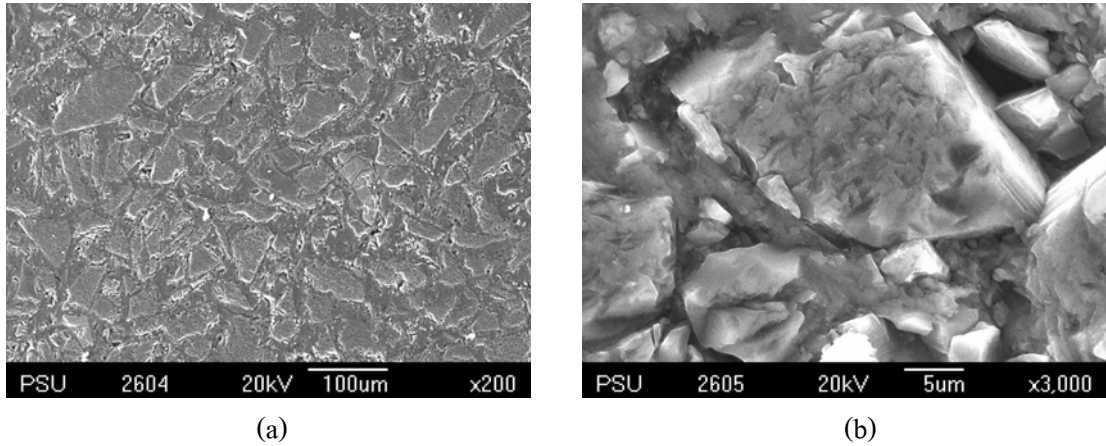
รูปที่ 5.14 ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 350X และ (b) 5000X ตามลำดับ



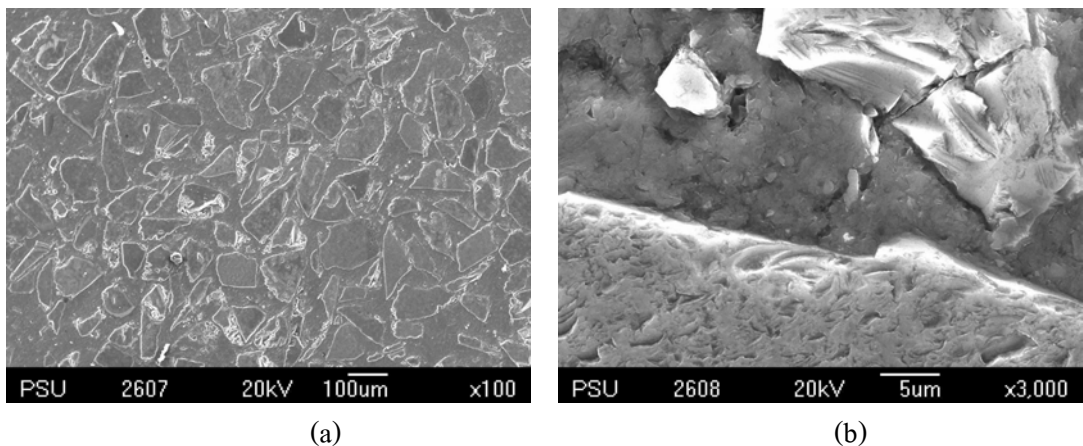
รูปที่ 5.15 ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม หนาขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 μm จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 500X และ (b) 5000X ตามลำดับ



รูปที่ 5.16 ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม หนาขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 25 μm จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 300X และ (b) 3000X ตามลำดับ



รูปที่ 5.17 ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 68 μm จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 200X และ (b) 3000X ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย (a) 100X และ (b) 3000X ตามลำดับ

จากผลการส่องดูและถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาและพิจารณาลักษณะ โครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ผลิตได้จากการหมุนเหวี่ยงที่ความดันสูง 4.26 MPa (1,800 rpm) ทั้ง 4 ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (13.5, 25, 68, 100 μm) และชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 ดังแสดงในรูป 5.9-5.18 พบว่าภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 10X เช่น ดังรูปที่

5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 เป็นภาพโครงสร้างระดับจุลภาคผิวหน้าของอะลูมิเนียมและชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาด คือขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่แสดงให้เห็นอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์และบริเวณที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเข้าแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจนมากที่สุดคือ รูปที่ 5.13 ซึ่งเป็นของผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm และภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่แสดงให้เห็นอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์และบริเวณที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเข้าแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจนต่ำที่สุดคือ รูปที่ 5.10 ซึ่งเป็นของผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 13.5 μm ในส่วนของภาพโครงสร้างภายในในระดับจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเช่น ดังรูปที่ 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 เป็นภาพโครงสร้างภายในในระดับจุลภาคของอะลูมิเนียมและชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาด คือขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ คือเห็นอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ รูปทรงที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าแทรกซึมได้และบริเวณที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเข้าแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ ในขณะที่รูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ไม่มีอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ช่วยในการเสริมแรง

เมื่อนำผลการส่องดูและถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทั้ง 4 ขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5, 25, 68, 100 μm และอะลูมิเนียม เกรด A356 มาพิจารณาจะพบว่าภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะแสดงให้เห็นถึงผิวหน้าและบริเวณการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ ยิ่งขนาดอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีแนวโน้มที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดถึงขนาดอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์และบริเวณที่อะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น (บริเวณที่เป็นสีขาวคือน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่แข็งตัวและสามารถที่จะเข้าไปแทรกซึมอยู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ เช่น

รูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 จะแสดงให้เห็นถึงส่วนที่เป็นบริเวณน้ำอะลูมิเนียมที่แข็งตัวและสามารถที่จะเข้าไปแทรกซึมอยู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจน ในส่วนของบริเวณที่เป็นสีดำอาจจะเป็นอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หรือรูพรุนช่องว่างที่เกิดจากการที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ ซึ่งจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการจำแนก) เหตุที่ยังขนาดอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีแนวโน้มที่สามารถสังเกตขนาดอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์และบริเวณที่อะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจนกว่าที่ขนาดอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมขนาดเล็กก็เพราะว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ขนาดอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าและมีขนาดของช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า จึงเป็นการง่ายที่น้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปจนเกิดกลายเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ในส่วนของภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่แสดงให้เห็นขนาดอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์บริเวณที่อะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์และรูพรุนช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่น้ำอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมได้ชัดเจนกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง จากรูป 5.9-5.18 สังเกตได้ว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดผงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด $100\ \mu\text{m}$ น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้อย่างเต็มที่ เกิดรูพรุนช่องว่างที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าแทรกซึมช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้น้อยมากเป็นจำนวนที่น้อยมาก เห็นอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจน ในส่วนของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ $13.5\ \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นขนาดซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เล็กมากจะทำให้ผลตรงข้ามกันคืออะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้น้อย เกิดรูพรุนช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ก็ยังเห็นอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจน (บริเวณที่เป็นสีดำที่อาจจะ

รูปทรงช่องว่างที่เกิดจากการที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้) ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพผิวหน้าและโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด A356 แบบธรรมดาจะพบว่าจะมีแต่เนื้ออะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว เนื่องจากไม่มีอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ช่วยในการเสริมแรง

การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงถือได้ว่าประสบความสำเร็จ เพราะว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียม เกรด A356 เหลวสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้จนเกิดกลายเป็นชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม และที่ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกรณีขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก อนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกอัดให้ติดชิดกันมากกว่าและเกิดกลายเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เล็กมากกว่าที่กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่ ทำให้เป็นการยากที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวจะสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้อย่างเต็มที่จึงยังปรากฏรูปทรงช่องว่างที่บริเวณโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เกิดจากการที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ภายในเป็นจำนวนมาก

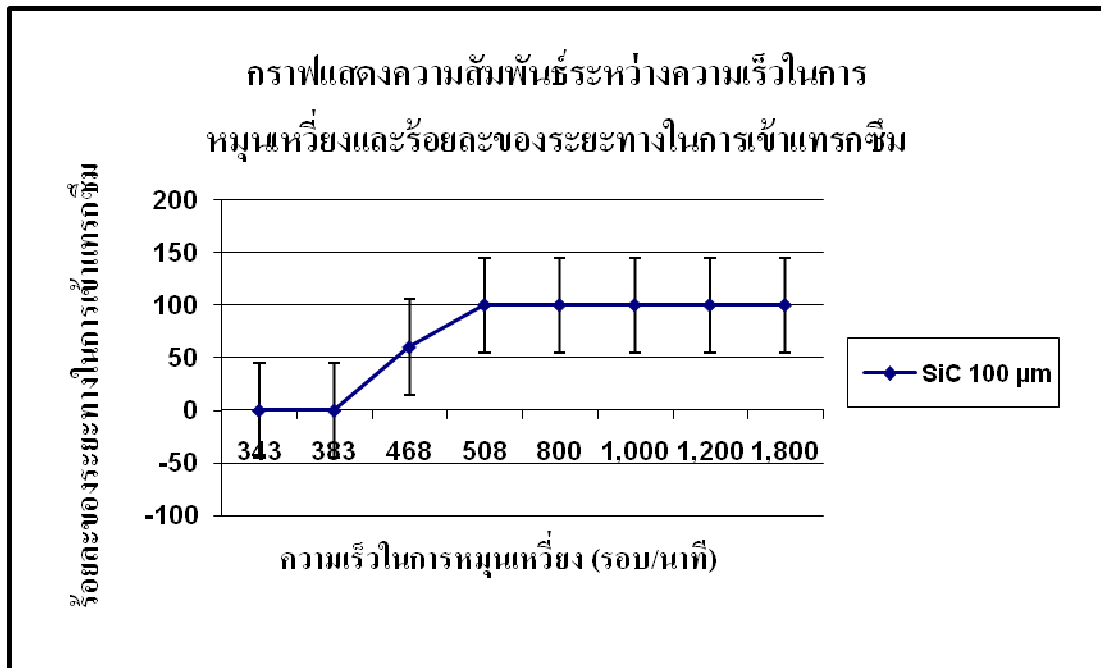
5.1.2 อิทธิพลของค่าความดันน้ำโลหะ

จากที่ได้ทำการกำหนดให้ใช้ความเร็วระดับการหมุนเหวี่ยง 1,800 rpm หรือก็คือที่ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 4.26 MPa เป็นความเร็วสูงสุดสำหรับการทดลองวิจัยการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงครั้งนี้ เพื่อเป็นการหาประสิทธิภาพของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงและศึกษาอิทธิพลของค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว เกรด A356 ที่มีผลต่อการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจึงได้ทำการทดลองกับชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ที่มีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ เท่ากับ 100 μm ที่ระดับความเร็วในการหมุนเหวี่ยงขนาดต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนเหวี่ยง (Rotational speed) และความสัมพันธ์ระหว่างความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเทียบกับร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึม (%Infiltrated

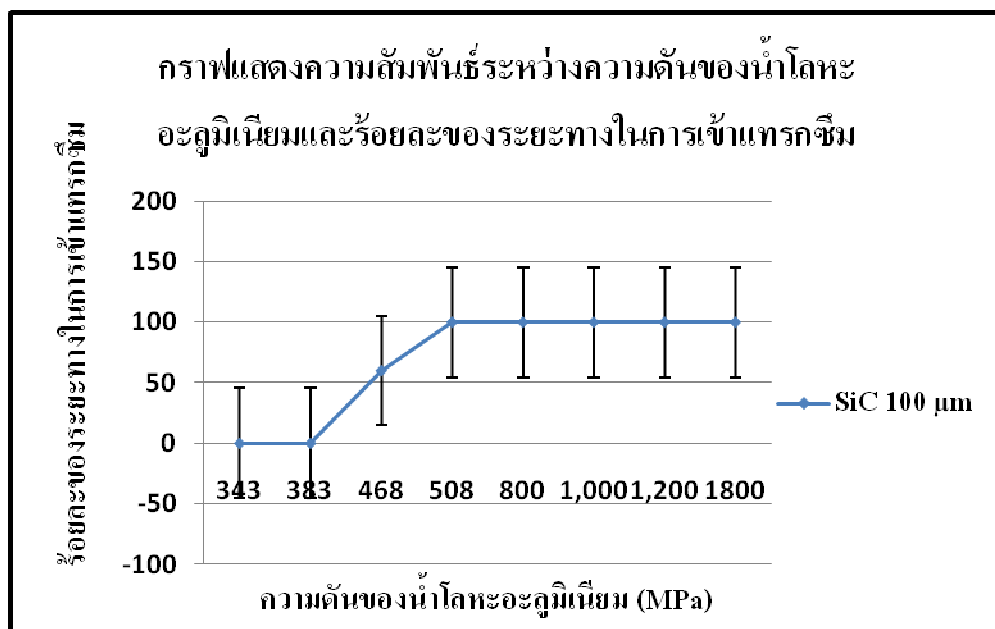
distance) แสดงในรูปที่ 5.19 และ 5.20 ตามลำดับ จากหัวข้อ 2.3.2 ในบทที่ 2 และหัวข้อ 3.1.1 ในบทที่ 3 สามารถคำนวณหาค่าได้ดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณหาค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเทียบกับร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

ผลคำนวณค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวและผลของร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึม (%Infiltrated distance)				
$\rho_{Al}, \frac{kg}{m^3}$	Ω, rpm	L_2, m	P_c, MPa	%Infiltrated distance
2,670	343	0.3	0.15	0
2,670	383	0.3	0.19	0
2,670	468	0.3	0.29	60
2,670	508	0.3	0.34	100
2,670	800	0.3	0.84	100
2,670	1,000	0.3	1.31	100
2,670	1,200	0.3	1.90	100
2,670	1,800	0.3	4.26	100



รูปที่ 5.19 ร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เข้าแทรกซึมในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ที่มีขนาดซิลิคอนคาร์ไบด์ $100\ \mu\text{m}$ ที่ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงขนาดต่างๆ



รูปที่ 5.20 ร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เข้าแทรกซึมในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ที่มีขนาดซิลิคอนคาร์ไบด์ $100\ \mu\text{m}$ ที่ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวขนาดต่างๆ

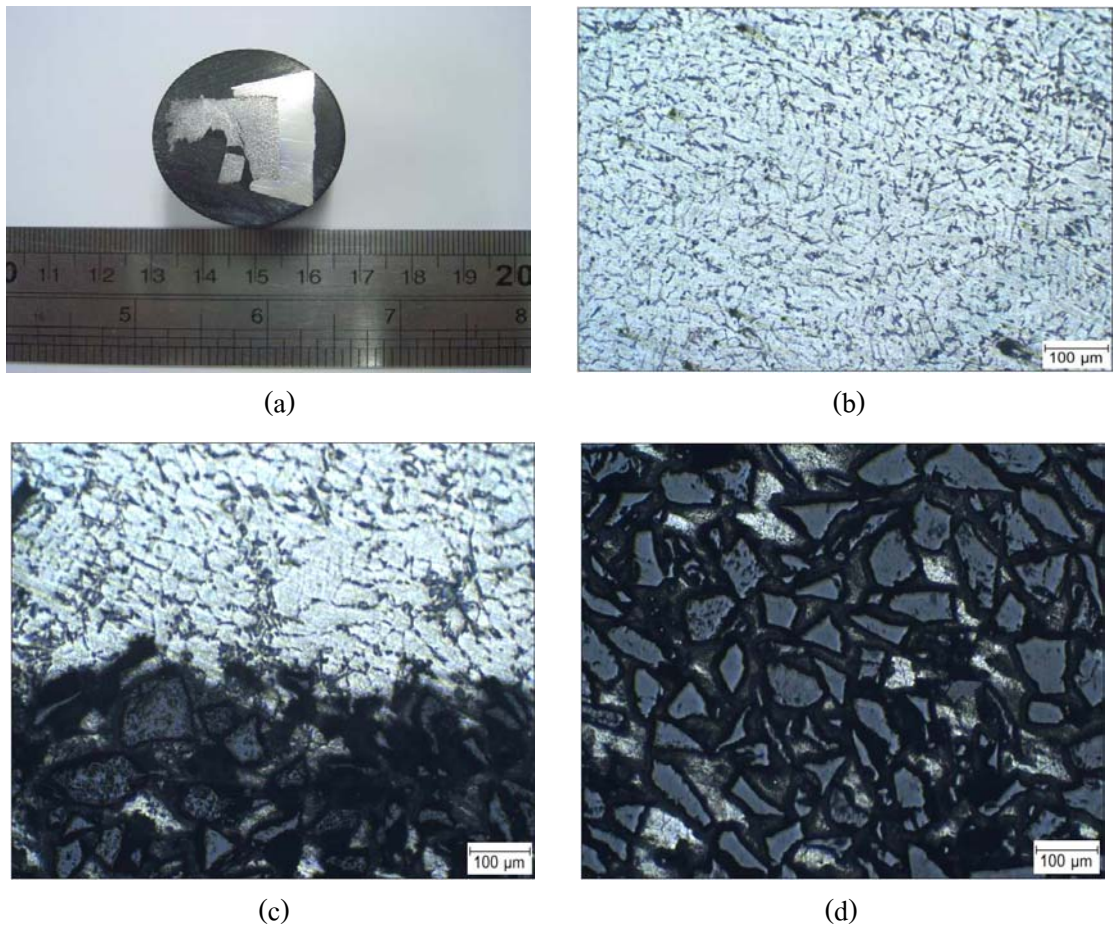
จากหัวข้อ 2.3.2 ในบทที่ 2 และหัวข้อ 3.1.1 ในบทที่ 3 พบว่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยงมีความสัมพันธ์กับความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว หากความเร็วเชิงเส้นในการหมุนเหวี่ยงมีค่ามากย่อมทำให้ค่าความเร็วรอบเชิงมุม (ω) และค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มมากขึ้นตาม ในหัวข้อนี้ทางผู้วิจัยแสดงให้เห็นว่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยงทางปฏิบัติเมื่อเทียบเป็นความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวทางปฏิบัติ สามารถส่งผลต่อการเข้าแทรกซึมในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวขนาด 0.15, 0.19, 0.29, 0.34, 0.84, 1.32, 1.90, 4.26 MPa จะมีลักษณะหลังผ่านการตัด ชัดให้เรียบ และการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 10X ต่างกัน แสดงในรูปที่ 5.21-5.28



รูปที่ 5.21 ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ได้จากการทดลองวิจัยหลังผ่านการตัดและขัดให้เรียบ ธรรมชาติขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 0.15 MPa



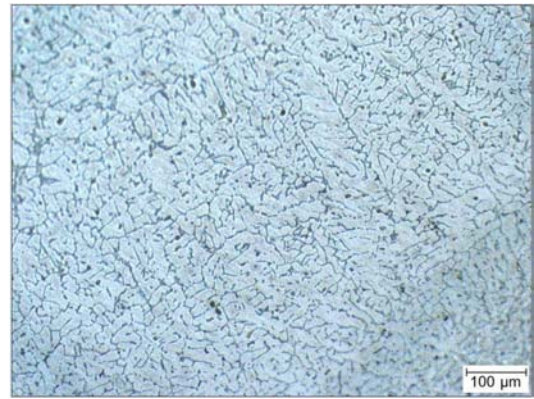
รูปที่ 5.22 ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ได้จากการทดลองวิจัยหลังผ่านการตัดและขัดให้เรียบ ธรรมชาติขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 0.19 MPa



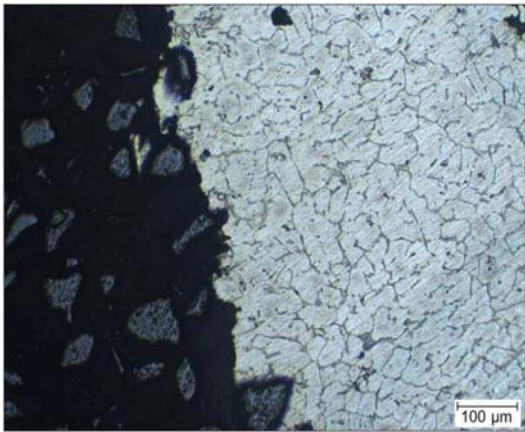
รูปที่ 5.23 ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ $100\ \mu\text{m}$ ความดันน้ำไลหะอะลูมิเนียมเหลว $0.29\ \text{MPa}$ (a) หลังการตัดและขัดให้เรียบ (b) บริเวณเนื้ออะลูมิเนียม (c) บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (d) บริเวณวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม



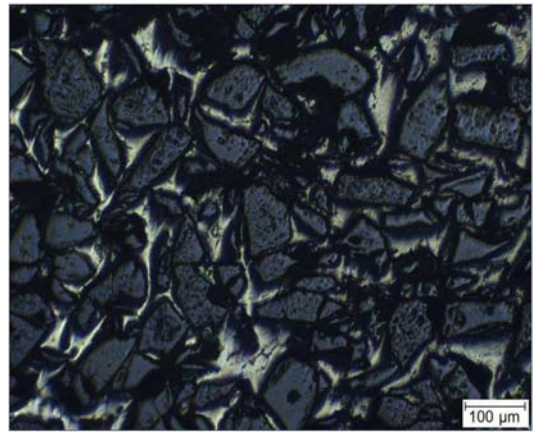
(a)



(b)

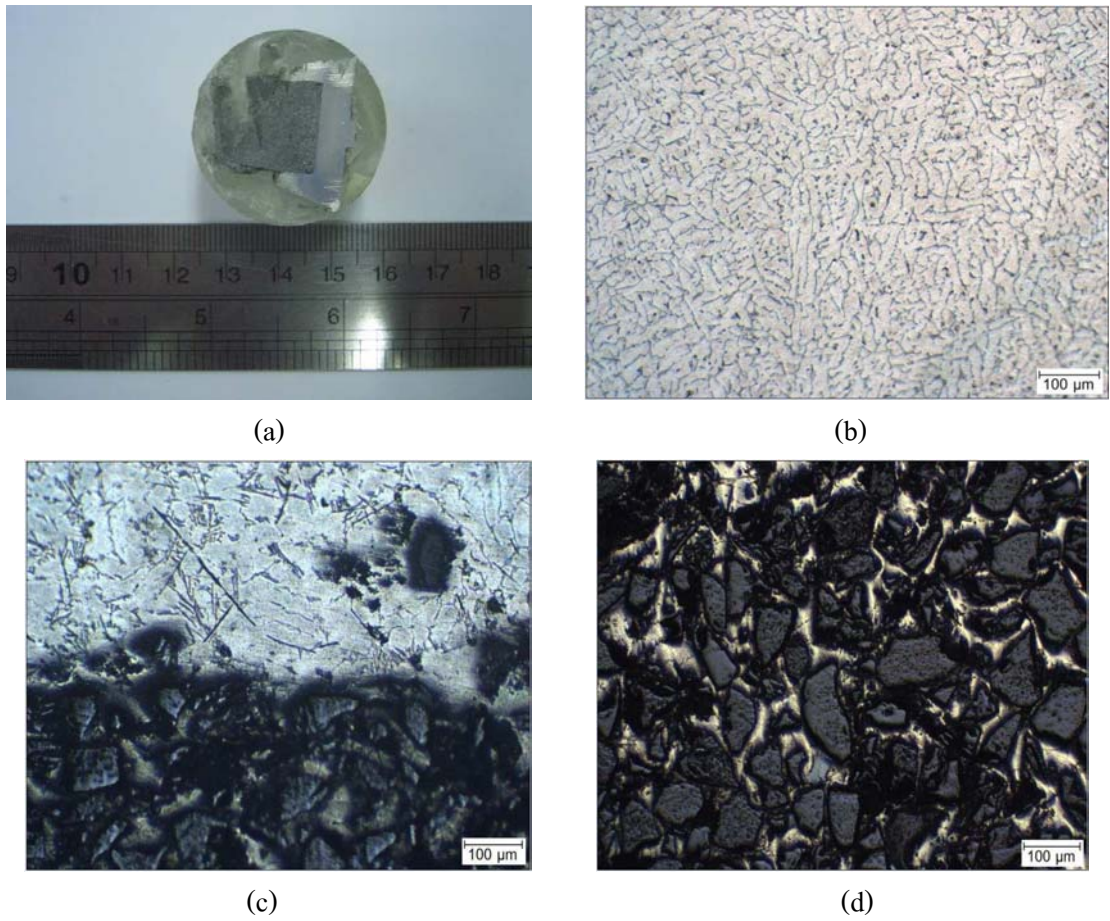


(c)

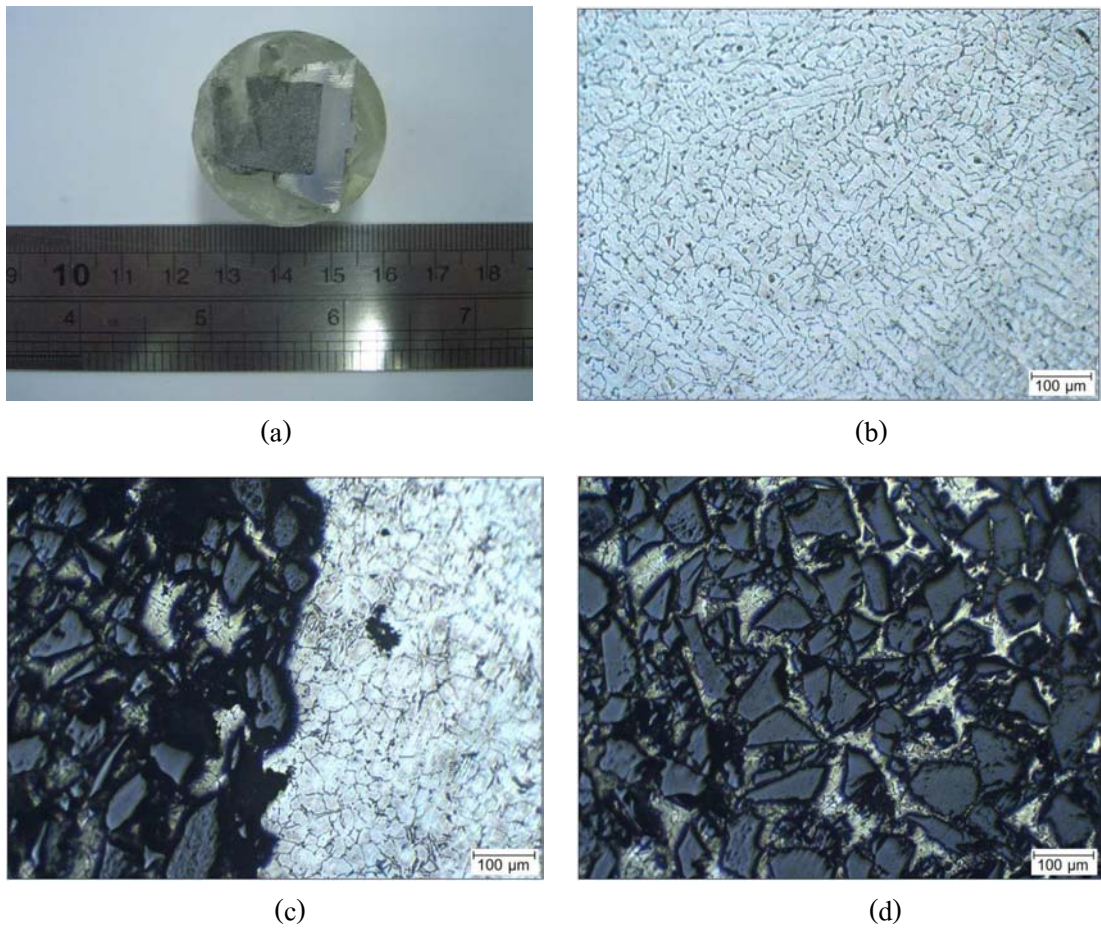


(d)

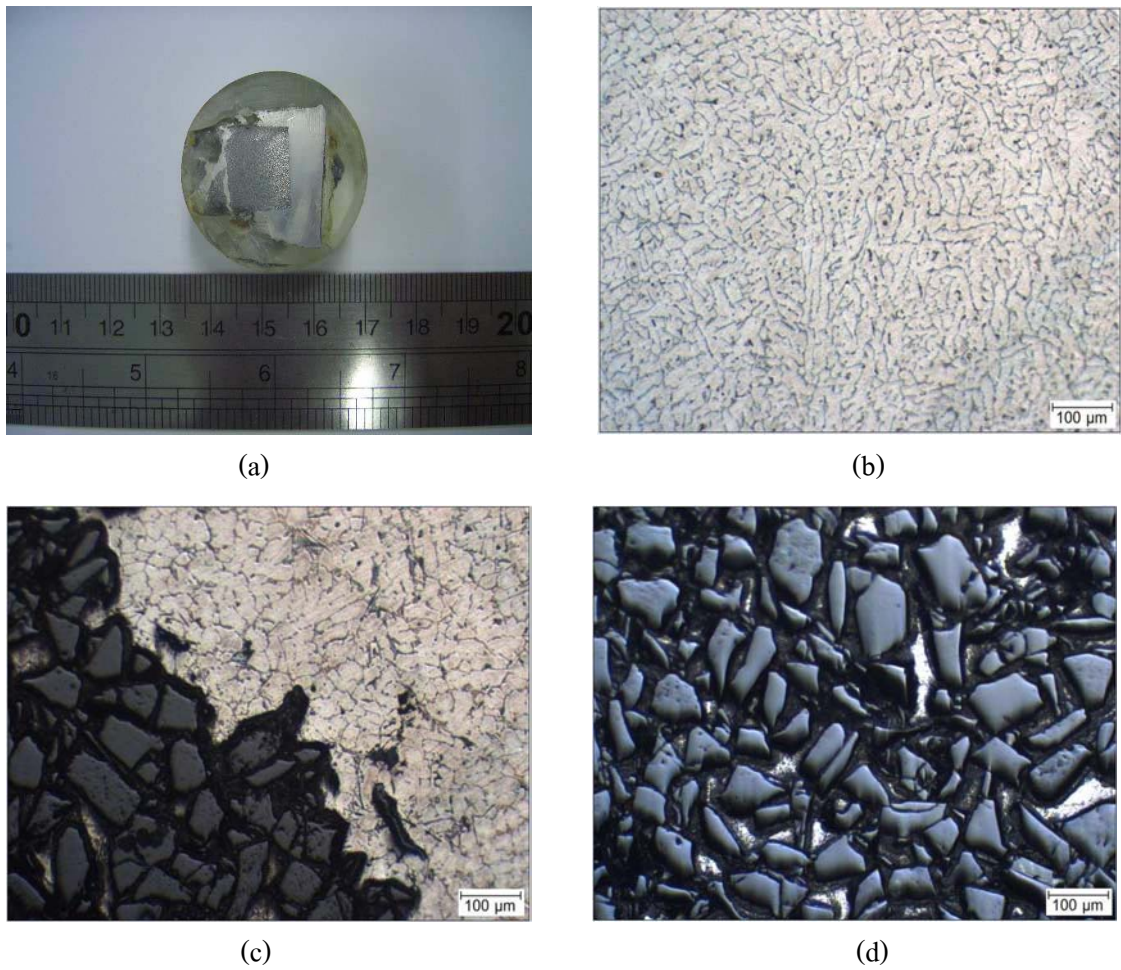
รูปที่ 5.24 ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 0.34 MPa (a) หลังการตัดและขัดให้เรียบ (b) บริเวณเนื้ออะลูมิเนียม (c) บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (d) บริเวณวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม



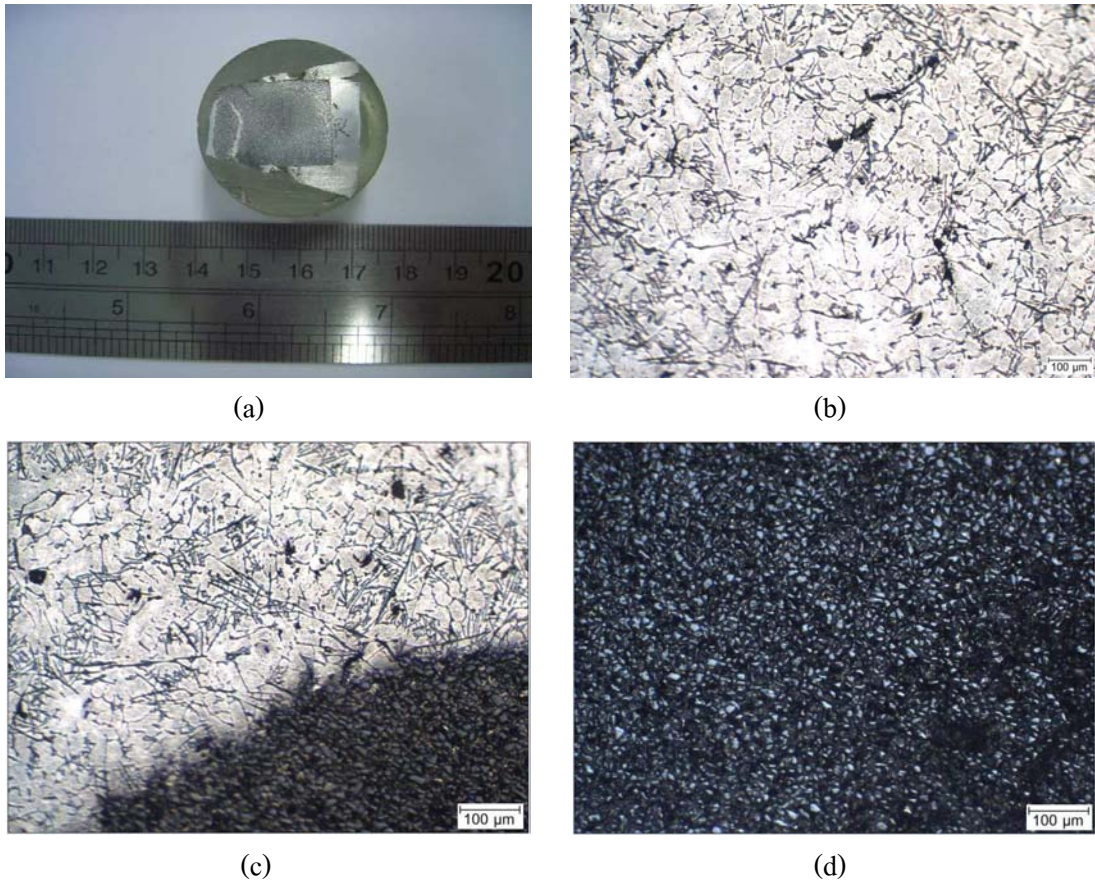
รูปที่ 5.25 ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ $100\ \mu\text{m}$ ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว $0.84\ \text{MPa}$ (a) หลังการตัดและจัดให้เรียบ (b) บริเวณเนื้ออะลูมิเนียม (c) บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (d) บริเวณวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม



รูปที่ 5.26 ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 1.32 MPa (a) หลังการตัดและขัดให้เรียบ (b) บริเวณเนื้ออะลูมิเนียม (c) บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (d) บริเวณวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม



รูปที่ 5.27 ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิกอนคาร์ไบด์ 100 μm ความดันน้ำไหลอะลูมิเนียมเหลว 1.90 MPa (a) หลังการตัดและขัดให้เรียบ (b) บริเวณเนื้ออะลูมิเนียม (c) บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (d) บริเวณวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม



รูปที่ 5.28 ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 4.26 MPa (a) หลังการตัดและขัดให้เรียบ (b) บริเวณเนื้ออะลูมิเนียม (c) บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (d) บริเวณวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

จากผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนเหวี่ยงและความสัมพันธ์ระหว่างความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเทียบกับร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึม (% Infiltrated distance) ดังแสดงในตารางที่ 5.7 และภาพผิวหน้าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 10X ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ซึ่งผลิตได้จากวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง ที่ความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวขนาดต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.19-5.28 โดยภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียม บริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม และบริเวณที่เป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ซึ่งเกิดการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าจากรูปที่ 5.19 และ 5.20 ที่ความเร็วจากการหมุนเหวี่ยง 343, 383 rpm (ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียม

เหลว 0.15, 0.19 MPa ตามลำดับ) ร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมของน้ำอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป เป็น 0% ซึ่งก็คือน้ำอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้ ทำได้เพียงแค่ออกไปเคลือบชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปอยู่เพียงภายนอกและไม่สามารถถ่ายภาพบริเวณที่เป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังรูปที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ ที่ความเร็วจากการหมุนเหวี่ยง 468 rpm (0.29 MPa) ร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมเป็น 60% ซึ่งก็คือน้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้เล็กน้อย ดังรูปที่ 5.23 ที่ความเร็วจากการหมุนเหวี่ยง 508, 800, 1000, 1200, 1800 rpm (ความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 0.34, 0.84, 1.32, 1.90, 4.26 MPa ตามลำดับ) ร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมของน้ำอะลูมิเนียมเหลวที่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเป็น 100% ซึ่งก็คือน้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้เต็มที่ ดังรูปที่ 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28 ตามลำดับ

เมื่อนำผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ผลการคำนวณหาค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว 100 μm ที่ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงขนาดต่างๆ เทียบกับร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมที่เกิดขึ้นจริงในชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม มาพิจารณาจะพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะมีความสอดคล้องกับผลการทดลองทางปฏิบัติ จากหัวข้อ 2.3.2 ในบทที่ 2 และหัวข้อ 3.1.1 ในบทที่ 3 ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงและความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งทั้ง 2 ตัวแปรนั้นจะมีผลกระทบและความสัมพันธ์ต่อร้อยละของระยะทางในการเข้าแทรกซึมเช่นเดียวกัน คือหากค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว (ค่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยง) มีค่าน้อยกว่าค่าความดันเริ่มต้น จะทำให้ร้อยละของระยะทางน้ำอะลูมิเนียมเหลวในการเข้าแทรกซึมช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปมีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อยลงหรืออาจจะไม่เกิดการแทรกซึมเลย กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิก ประมาณ 60% มีค่าความดันเริ่มต้นทางทฤษฎีเท่ากับ 0.23 MPa (จากตารางที่ 3.1 หัวข้อ 3.1.1 ในบทที่ 3) โดยที่ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวทางปฏิบัติที่ทำให้น้ำอะลูมิเนียมเหลวเริ่มเข้าแทรกซึมช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปคือ 0.29 MPa (468 rpm) และค่าความ

ดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่ทำให้น้ำอะลูมิเนียมเหลวเข้าแทรกซึมช่องว่างระหว่างอนุภาค เซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้เต็มก็คือ 0.34 MPa (508 rpm) ซึ่งการถ่ายเทวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จะทำให้เห็นถึงส่วนที่เป็นบริเวณน้ำอะลูมิเนียมที่แข็งตัวและสามารถที่เข้าไปแทรกซึมอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจน (บริเวณที่เป็นสีขาวคือน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่แข็งตัวและสามารถที่จะเข้าไปแทรกซึมอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้) ในส่วนของบริเวณที่เป็นสีดำอาจจะเป็นอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หรือรูพรุนช่องว่างที่เกิดจากการที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไม่สามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้) จากเรื่องนี้ทางผู้วิจัยสามารถหาค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลม (λ) ของค่าความดันเริ่มต้น (ความดันที่น้อยที่สุดที่น้ำโลหะใช้แทรกซึมเข้าไปในระหว่างช่องว่างของอนุภาคผงเซรามิก) ที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองวิจัย เพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับหาค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่มีค่ามากกว่าค่าความดันเริ่มต้นของขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดอื่นๆ ในภายหลังได้ เช่น กรณีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 μm และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูปของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป 0.57 จากหัวข้อ 2.3.3 ในบทที่ 2 ทำให้ได้

$$P_{th} = -6\lambda\gamma_{lv}\cos\theta\frac{V_p}{D_p(I-V_p)} \text{ แปลงเพื่อหาค่า } \lambda \text{ ได้เป็น } \lambda = P_{th(508rpm)} \times \frac{D_p(I-V_p)}{-6V_p\gamma_{lv}\cos\theta}$$

แทนค่า

$$\lambda = \left(0.3396 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \times \frac{(100 \times 10^{-6} \text{m})(1-0.57)}{-6(0.57)\left(0.86 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right)\cos 180^\circ} = 4.96$$

ค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลมที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองวิจัยหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm คือ 4.96 จากสิ่งที่ต้องการขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 μm และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูปของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป 0.57 ทำการแทนค่าในสมการค่าความดันเริ่มต้นได้

$$\therefore P_{th} = -6\lambda\gamma_{lv}\cos\theta\frac{V_p}{D_p(I-V_p)} \text{ ได้เป็น}$$

$$P_{th} = -6(4.96) \times 0.86 \frac{N}{m} \times \cos 180^\circ \times \frac{0.57}{(5 \times 10^{-6} m)(1-0.57)}$$

$$P_{th} = 6.79 \text{ MPa} \approx 2,272 \text{ rpm}$$

ซึ่งหมายความว่าหากต้องการให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมอยู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูป ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 5 μm และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูปของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป 0.57 ได้ จำเป็นต้องใช้ค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่มีค่า 6.79 MPa หรือที่ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงขนาด 2,272 rpm จึงจะเกิดการแทรกซึมและกลายเป็นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง ถือได้ว่าประสบความสำเร็จ เพราะว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมเกรด A356 เหลวสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้จนเกิดกลายเป็นชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม และค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะมีความสอดคล้องกับผลการทดลองทางปฏิบัติซึ่งหมายถึงว่าชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงและวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสามารถผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้จริง ค่าความดันน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว (ความเร็วจากการหมุนเหวี่ยง) ต้องมีค่ามากกว่าค่าความดันเริ่มต้นมากในระดับหนึ่ง จึงจะทำให้เนื้ออะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้เต็มที่ทั้งชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป (น้ำอะลูมิเนียมเหลวเกิดการแข็งตัวและค้างตัวติดในช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์จนเกิดกลายเป็นชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้งชิ้นงาน)

5.2 สรุปผลการทดสอบสมบัติชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตด้วยวิธีการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง

หลังจากที่ได้ทดลองวิจัยการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึม โดยการใช้เซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่ขนาดอนุภาคผง 4 ขนาดด้วยกันคือ 13.5, 25, 68, 100 μm เป็นวัสดุเสริมแรงและ โลหะอะลูมิเนียม เกรด A356 เป็นเนื้อหลัก เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ทางผู้วิจัยจึงได้นำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มาทำการทดสอบสมบัติทั้งทางกลคือค่าความหนาแน่นรวม ความแข็ง ความ

ด้านทานต่อการสึกหรอ และศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในระดับจุลภาค ดังที่ได้กล่าวมาตามหัวข้อที่ 5.1.1 ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบสมบัติได้ตามตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 สรุปผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์

	Density (g/c.c.)	% Porosity	Hardness (HB)	Weight loss rate (g/min)	Microstructure
Material					
Al	2.67	-	59.3	-0.41	-
AMC 13.5 µm	2.87	2.17	62.5	-0.00125	จำนวนรูพรุนมากที่สุด เห็นอนุภาคไม่ชัดที่สุด
AMC 25 µm	2.90	1.27	62.5	-0.0025	จำนวนรูพรุนมาก เห็นอนุภาคไม่ชัด
AMC 68 µm	2.91	0.96	63.5	-0.0025	จำนวนรูพรุนน้อย เห็นอนุภาคชัด
AMC 100 µm	2.94	0.0933	64.1	-0.00575	จำนวนรูพรุนน้อยที่สุด เห็นอนุภาคชัดที่สุด

จากตารางที่ 5.8 พบว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีสมบัติค่าความหนาแน่นรวม ความแข็ง อัตราน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานสูงที่สุดและสามารถศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในระดับจุลภาคได้ชัดเจนมากที่สุด คือวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 µm ในขณะที่วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีสมบัติค่าร้อยละความพรุน และสามารถศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในระดับจุลภาคได้ชัดเจนต่ำที่สุดคือวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 µm นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 µm (ซึ่งมีค่าสมบัติที่ดีที่สุดจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้ทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์) มาเปรียบเทียบกับสมบัติวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมของงานวิจัยผู้อื่น ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยผู้อื่น

	Density	% Porosity	Hardness	Wear	Condition
Material					
Z. F. Zhang (1995)	-	-	155 ± 5 (kgfmm ⁻²)	565 ± 12 (10 ⁻⁶ mm ²)	<p>matrix: Aluminium 6061</p> <p>reinforced: SiC 1.8, 4.5 μm</p> <p>Hardness test: Vickers microhardness, load 5N</p> <p>Wear test: pyramidal diamond indenter, apex angle of 136°, velocity 6 mms⁻¹, wear track 6 mm, load 10 N</p>
Sui Xiandong (199 [1])	4.89 (g/cm ³)	-	120 (HB)	-	<p>matrix: ZA-2 [1]</p> <p>reinforced: SiC 28, 40 μm</p> <p>Hardness test: Brinell hardness tests, load 62.5kg, 2.5mm diameter ball</p>
M.I. Pech-Canul (2000)	2.85 (g/cm ³)	2.1	-	-	-

ตารางที่ 5.9 (ต่อ) ผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยผู้อื่น

	Density	% Porosity	Hardness	Wear	Condition
Material					
S.M. Seyed Reihani (2006)	-	-	105 (HB)	-1.2	matrix: Aluminum 6061 reinforced: SiC 16, 22 μm Hardness test: Brinell hardness tests, load 15 and 30 kg, 2.5mm diameter ball. Wear test: load 150 N, revolution 2000 rpm, sand flow rate 350 gmin^{-1}
This thesis	2.94 (g/cm^3)	0.0933	64.1 (HB)	0.005 \square (g/min)	matrix: Aluminum A356 reinforced: SiC 13.5, 25, 68, 100 μm Hardness test: Brinell hardness tests, load 500 kg, 10 mm diameter ball. Wear test: load 1.5 kg, revolution 252 rpm, abrasive water proof paper No. 150 c.c.

บทที่ 6

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

หลังจากที่ได้ทำการสร้างชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงและพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง สำหรับการแทรกซึมโดยใช้โลหะอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลัก เพื่อผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ปัจจัยตัวแปรต่างๆ จากการทดลองและวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1.1 ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ได้ทำการจัดสร้าง สามารถที่จะผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้จริง ใช้งานได้หลายครั้งและชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงสามารถก่อกำเนิดค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวได้สูงสุดที่ค่า 4.26 MPa (ความเร็วจากการหมุนเหวี่ยง 1,800 rpm)

6.1.2 ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ได้ทำการจัดสร้าง สามารถผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้ทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ คือ 13.5, 25, 68, 100 μm โดยที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 13.5 μm ซึ่งนับได้ว่าเป็นขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กมาก แต่ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงก็สามารถที่จะผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้

6.1.3 ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผลิตได้จากชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงโดยวิธีกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง มีผลจากการทดสอบสมบัติทางกล จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังนี้

(1) ค่าความหนาแน่นรวม ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียม เกรด A356 ทุกขนาด เพราะในเนื้อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีมวลของผงซิลิคอนคาร์ไบด์และมวลอะลูมิเนียมประกอบอยู่ ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียมและพบว่ายิ่งขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่ขึ้นค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะมีแนวโน้มส่วนใหญ่ให้มีค่ามากขึ้นตามและมีค่าร้อยละความพรุนที่น้อยลง เพราะที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่จะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก เมื่อทำการทดลองหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูงน้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมภายในช่องว่าง

ระหว่างอนุภาคได้ง่ายกว่าซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่มีขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดเล็ก

(2) ค่าความแข็ง ชีงงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ มีค่าสมบัติความแข็งมากกว่าอะลูมิเนียม เกรด A356 เพราะวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ช่วยในการต้านทานต่อการกดทดสอบความแข็ง และพบว่ายิ่งขนาดของอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ขึ้นค่าความแข็งของชีงงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะยังมีแนวโน้มที่มีค่ามากขึ้นตาม เพราะที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่จะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก เมื่อทำการทดลองหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูงน้ำอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ง่ายกว่าที่ขนาดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดเล็ก จึงทำให้ค่าความแข็งของชีงงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะยังมีค่ามากขึ้นตาม เมื่อทำการกดทดสอบความแข็งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจึงมีทั้งเนื้ออะลูมิเนียมและอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ช่วยในการต้านทานต่อการกดทดสอบความแข็ง

(3) ค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ ชีงงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ มีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอมากกว่าของชีงงานเนื้ออะลูมิเนียม (ชีงงานเนื้ออะลูมิเนียมมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปมากกว่าของชีงงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม) เพราะชีงงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีอนุภาคของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ช่วยในการต้านทานต่อการสึกหรอจากการขัด และพบว่ายิ่งขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กลง ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของชีงงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะยังมีแนวโน้มที่มีค่าน้อยลงตาม เพราะที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กและอยู่ใกล้ชิดแน่นติดกันจะเป็นตัวแปรที่ช่วยในการต้านทานต่อการสึกหรอจากการขัดได้ดีกว่าที่ขนาดของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ (การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอซึ่งเป็นการทดสอบแบบการขัดสีที่กระทำทั่วทั้งผิวหน้าของชีงงาน)

(4) โครงสร้างภายในระดับจุลภาค ชีงงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 4 ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ จากการส่องดูและถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ายิ่งขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจะมีแนวโน้มที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดถึงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และบริเวณที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเกรด A356 สามารถแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจน เพราะที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่จะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวสามารถเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ง่ายกว่าที่ขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดเล็ก ทำให้ผลการส่องดูและถ่ายภาพด้วยกล้องทั้งสองแบบสังเกตเห็นถึงจำนวนและขนาดของรูพรุนช่องว่างระหว่างอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ชัดเจนต่างกัน

6.1.4 อิทธิพลของค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวขนาดต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม กรณีชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปที่มีขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 μm ซึ่งผลิตด้วยชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงโดยวิธีกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง พบว่าหากค่าความเร็วในการหมุนเหวี่ยงและความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวมีค่าน้อยกว่าค่าความดันเริ่มต้น ความสามารถในการเข้าแทรกซึมของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปหรือก็คือร้อยละของระยะทางน้ำอะลูมิเนียมเหลวในการเข้าแทรกซึมช่องว่างระหว่างอนุภาคเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์มีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อย โอกาสในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมน้อยลงตามไปด้วยและภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก็จะเห็นโครงสร้างระดับจุลภาคมีความละเอียดและชัดเจนน้อยลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้จากเรื่องนี้ทางผู้วิจัยสามารถหาค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลม (λ) ของค่าความดันเริ่มต้นที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองวิจัย เพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับหาค่าความดันของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวที่มีค่ามากกว่าค่าความดันเริ่มต้นของขนาดอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดอื่นๆ

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองวิจัยการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยเลือกใช้โลหะอะลูมิเนียม เกรด A356 เป็นเนื้อหลักและเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นวัสดุเสริมแรง ทางผู้วิจัยได้พบปัญหาและอุปสรรคที่ส่งผลกระทบต่อกรทดลองวิจัย ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอข้อเสนอดังนี้

6.2.1 การเผาอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

เนื่องจากการเผาอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงที่ใช้อยู่ในขณะนี้ มีวิธีการคือใช้หัวเผาก๊าซปิโตรเลียมเหลว (heavy duty LPG torch) ต่อกับถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas, LPG) ขนาด 16.8 kg และมีขาตั้งไว้สำหรับจับหัวเผาลอยเปลวไฟความร้อนเพื่อเผาอุณหภูมิชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ ข้อดีคือค่าใช้จ่ายไม่สูง อุปกรณ์หาได้ง่าย ข้อเสียคือเกิดความยุ่งยากในการทดลอง อุณหภูมิจากการเผาไม่คงที่ทั้งชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง หากสามารถสร้างเครื่องหล่อเหวี่ยงที่มีสภาวะบรรยากาศแบบระบบปิด สามารถ

ควบคุมอุณหภูมิได้เหมือนเตาหลอมโลหะชนิดขดลวดความต้านทาน เพื่อให้การเผาอ่อนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงมีอุณหภูมิที่เท่ากันและทั่วถึงทั้งชิ้นส่วนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง ก็อาจทำให้การหล่อเหวี่ยงความดันสูงประสบความสำเร็จมากขึ้น เพราะจะทำให้ไม่เกิดการพาความร้อนของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวไปสู่ชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงได้ง่าย

6.2.2 การหาปะเก็น (Gasket) ที่ใช้ในการทดลองหล่อเหวี่ยงด้วยความดันสูง

เนื่องจากปะเก็นที่ใช้อยู่ในขณะนี้บางครั้งจะประสบปัญหาโดนเปลวไฟความร้อนจากการเผาอ่อนชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงโดยตรง ทำให้ปะเก็นเกิดการแห้ง แตก และเปราะ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวเกิดการรั่วไหลก่อนเข้าแทรกซึมไปยังในช่องว่างระหว่างอนุภาคของชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปได้เต็มที่ ซึ่งหากทางผู้ผลิตสามารถค้นหาปะเก็นที่สามารถใช้งานและทนเปลวไฟหรือปริมาณความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากๆ ได้ ก็อาจทำให้การหล่อเหวี่ยงความดันสูงประสบความสำเร็จมากขึ้น เพราะจะทำให้ลดการรั่วไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลว เกิดหมุนเหวี่ยงและน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลววิ่งไหลได้อย่างเต็มที่

บรรณานุกรม

- ชนาคม สุนทรชัยนาคแสง. 2539. การพาความร้อน. ใน การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1 (สุพจน์ รัตนาพันธุ์, บรรณาธิการ). หน้า 7. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. กรุงเทพฯ
- บุญเชิญ เจริญศรี. 2542. ทฤษฎีพื้นฐาน. ใน รายงานวิจัยการพัฒนาและสร้างชุดวัดความหนาแน่น และความพรุนของตัวอย่างหิน. หน้า 1-3. ภาควิชาฟิสิกส์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- ประทุมรัตน์ หนูยัง. 2551. การสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของไทเทเนียมพรุน. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศิริพร ลากเกียรติถาวร. 2547. สมบัติทั่วไปของซิลิกอนคาร์ไบด์. รายงานวิจัยโครงการศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการลดอุณหภูมิ การสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC). สถาบันวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. หน้า 7-30.
- หริส ตูตะบุตร. 2537. การแข็งตัวของโลหะ. ใน หล่อโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 2. หน้า 14-16. บริษัท สำนักพิมพ์ดวงกมล จำกัด. กรุงเทพฯ
- เล็ก สีคง. 2540. วัสดุผสม. ใน วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. หน้า 393-426. หน่วย โสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- เสน่ห์ รัชชชาติลักษณ์. 2538. การหล่อเหวี่ยง. ใน วิศวกรรมการหล่อโลหะ. หน้า 69-71. ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี. 2552. กรรมวิธีผลิตเหล็กกล้า (ออนไลน์).
สืบค้นจาก: <http://dit.dru.ac.th/home/023/matrialNew/method.html> (10 January 2010)
- Chen, J., Hao, C., and Zhang, J. 2006. Fabrication of 3D-SiC network reinforced aluminum–matrix composites by pressureless infiltration. *Materials Letters* Vol. 60. Issues 20 (September): 2489-2492
- Duque, N. B., Melgarejo, Z. H., and Suárez, O. M. 2005. Functionally graded aluminum matrix composites produced by centrifugal casting. *Materials Characterization* Vol. 55. Issues 2 (August): 167-171
- Gu, J., Zhang, X., Qiu Y., and Gu, M. 2005. Damping behaviors of magnesium matrix composites reinforced with Cu-coated and uncoated SiC particulates. *Composites Science and Technology* Vol. 65. Issues 11-12 (September): 1736-1742

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Higgins, A. R. 1973. engineering metallurgy part I applied physical metallurgy. 4th Ed. The English language book society. London.
- Kenesei, P., Biermann, H., and Borbély, A. 2005. Structure–property relationship in particle reinforced metal–matrix composites based on holotomography. *Scripta Materialia* Vol. 53. Issues 7 (October): 787-791
- Nishida, Y., Shirayanagi, I., and Sakai, Y. 1996. Infiltration of fibrous preform by molten aluminum in a centrifugal force field. *Metallurgical and Materials Transaction* Vol. 27A. Issues 12 (December): 4163-4169
- Pan, Y., Gao, M. X., Oliveira, F. J., Vieira, J. M., and Baptista, J. L. 2003. Infiltration of SiC preforms with iron silicide melts: microstructures and properties. *Materials Science and Engineering A* Vol. 359. Issues 1-2 (October): 343-349
- Pech-Canul, M. I., Katz, R. N., and Makhlof, M. M. 2000. Optimum conditions for pressureless infiltration of SiC_p preforms by aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 108. Issues 1 (December): 68-77
- Seyed Reihani, S. M. 2006. Processing of squeeze cast Al6061–30vol% SiC composites and their characterization. *Materials and Design* Vol. 27. Issues 3: 216-222
- Taha, M. A., and El-Mahallawy, N. A. 1998. Metal-matrix composites fabricated by pressure-assisted infiltration of loose ceramic powder. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 73. Issues 1-3 (January): 139-146
- Wannasin, J. 2004. Centrifugal infiltration of particulate metal matrix composites: process development and fundamental studies. Ph.D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. MA. USA.
- Wannasin, J., and Flemings, M. C. 2005. Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 169. Issues 2 (November): 143-149
- Xiandong, S., Chengping, L., Zhuoxuan, L., and Liuzhang, O. 1997. The fabrication and properties of particle reinforced cast metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 63, Issues 1-3 (January): 426-431

บรรณานุกรม (ต่อ)

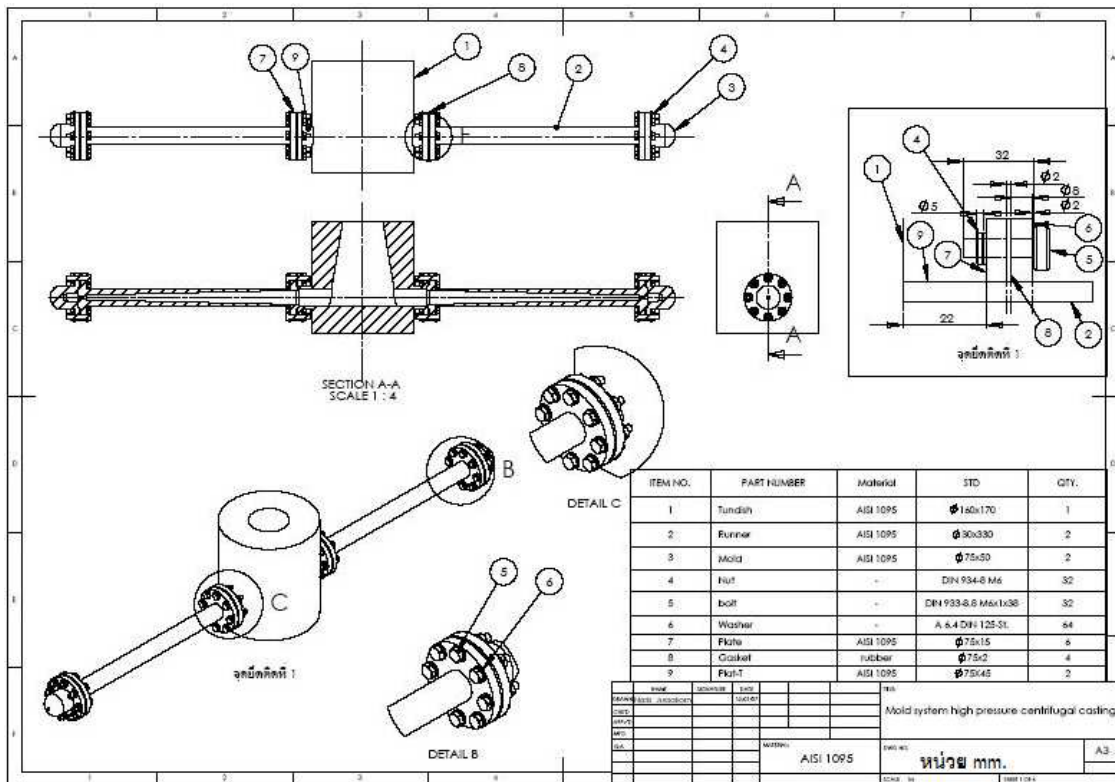
- Yong, M. S., and Clegg, A. J. 2005. Process optimization for a squeeze cast magnesium alloy metal matrix composite. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 168, Issues 2 (September): 262-269
- Zhang, Z. F., Zhang, L. C., and Mai, Y.W. 1995. Particle effects on friction and wear of aluminium matrix composites. *Journal of Materials Science* Vol. 30, Issues 23 (December): 5999-6004
- US Provisional Patent. "High pressure centrifugal casting of composites." by Wannasin J, Flemings MC, and Phong H. Filed in 2005.
- G.precision engineering LTD. 2010. การทดสอบและตรวจสอบทางโลหะวิทยา (ออนไลน์).
สืบค้นจาก: <http://www.gprecision.net/metallurgy-Test-Macroscopy.html>
(10 January 2010)
- Beardmore, R. 2009. Bolt preloading (Online). Available:
http://www.roytech.co.uk/Useful_Tables/Screws/Preloading.html (10 January 2010)
- Eitschberger, M. 2009. Metal foams and metal matrix composites (Online). Available:
<http://www.wtm.uni-erlangen.de/Forschung/Leichtbauwerkstoffe/leichtbauwerkstoffe.htm>
(9 June 2009)
- eFunda, Inc. 2009. Centrifugal casting (Online). Available:
http://www.efunda.com/processes/metal_processing/centri_casting.cfm
(9 June 2009)
- Gohmann, E. 1999. Pressures within a centrifugal (Online). Available:
<http://et.nmsu.edu/~etti/winter99/manufacturing/gohmann/gohmann.html>
(9 June 2009)
- Maryland nanocenter. 2010. Scanning electron microscopy (SEM) (Online). Available:
http://www.nanocenter.umd.edu/new_facilities/NispLab.php (10 January 2010)
- Automation Creations, Inc. 2010. Material property data (Online). Available:
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8f56dbfa35554690a2c3aaf7f89e7d69> (10 January 2010)

บรรณานุกรม (ต่อ)

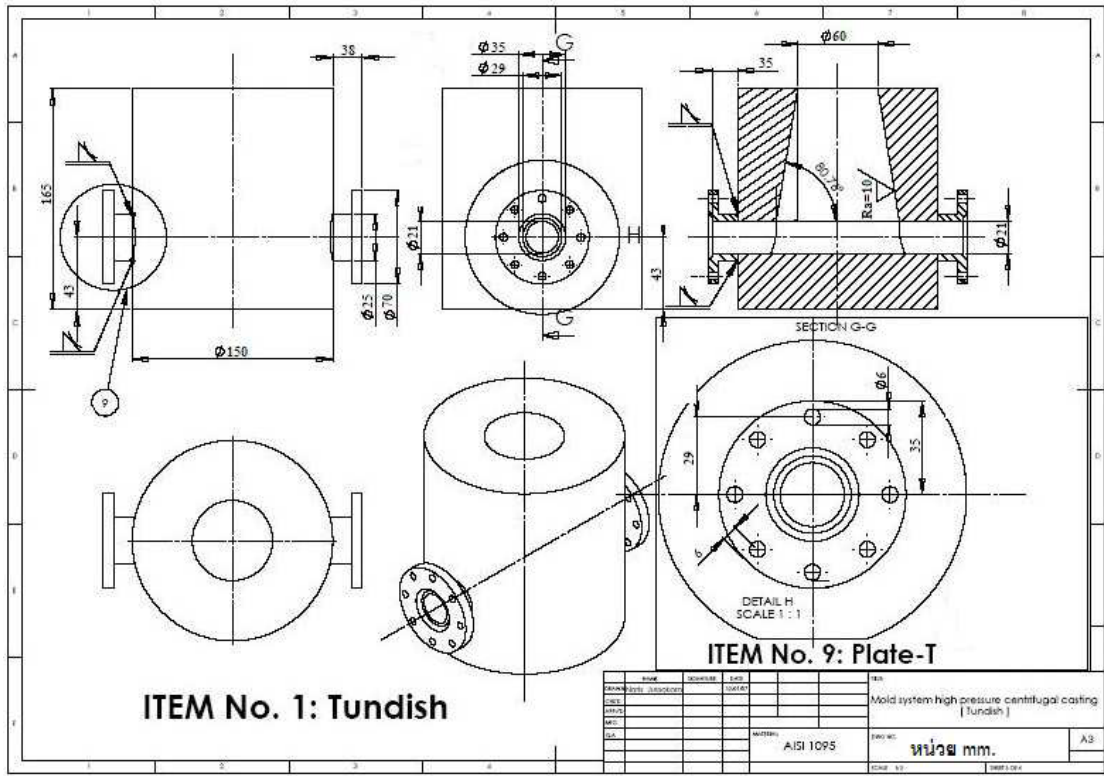
- Melbourne school of engineering. 2010. Heat transfer in casting (Online). Available:
<http://www.mame.mu.oz.au/materials/TeachingSubjects/436203/Lectures/HeatTransfer/HeatTransfer.html> (10 January 2010)
- MicroscopeWorld. 2010. Microscope parts & specifications (Online).
Available: <http://www.microscopeworld.com/MSWorld/parts.aspx> (10 January 2010)
- Milauskas, M. K. 2009. Metal matrix composites (Online). Available:
<http://www.composites-by-design.com/metal-matrix.htm> (9 June 2009)
- Rawal, S. P. 2001. Metal-matrix composites for space applications (Online). Available:
<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0104/Rawal-0104.html> (9 June 2009)
- Westbound engineering Co, Ltd. 2009. Private Communication
- Wright, D. 2005. Loads in an elastic bolted assembly (Online). Available:
<http://school.mech.uwa.edu.au/~dwright/DANotes/threads/assemblies/assemblies.html>
(10 January 2010)

ภาคผนวก ก

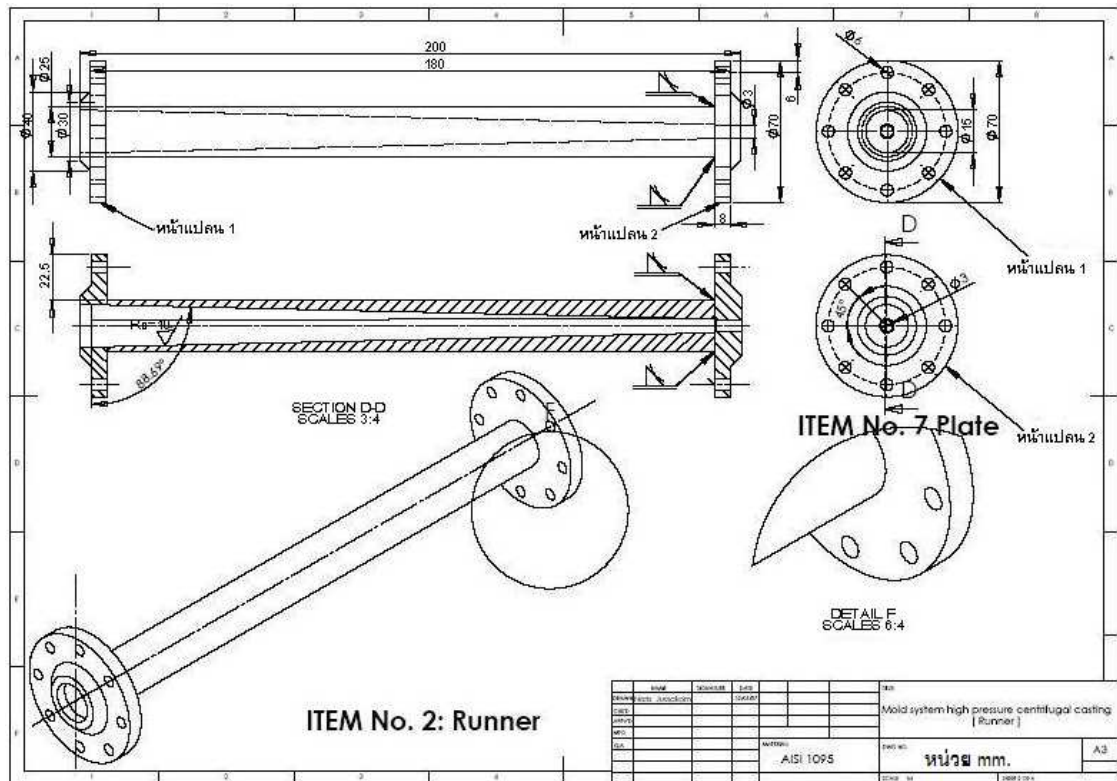
แบบงานชุดระบบการหล่อเหียงความดันสูง



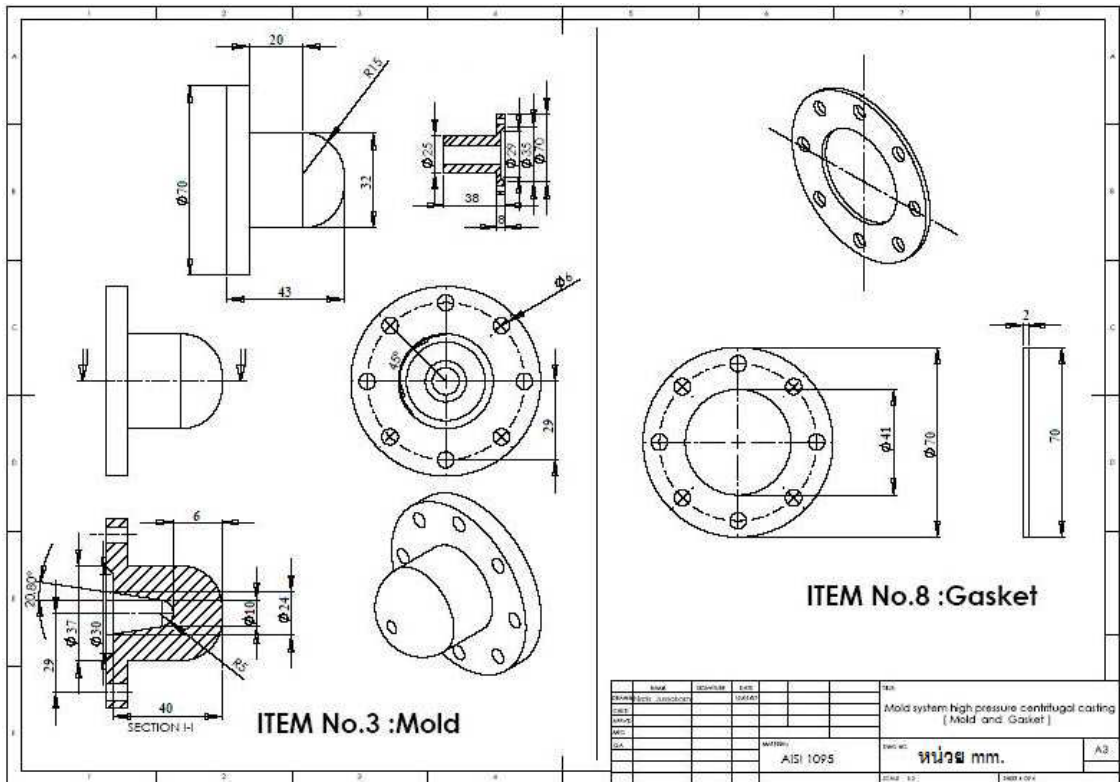
รูปที่ ก1 แบบงานชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง แบบประกอบเสร็จ



รูปที่ ก2 แบบงานชิ้นส่วนที่รองรับน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง



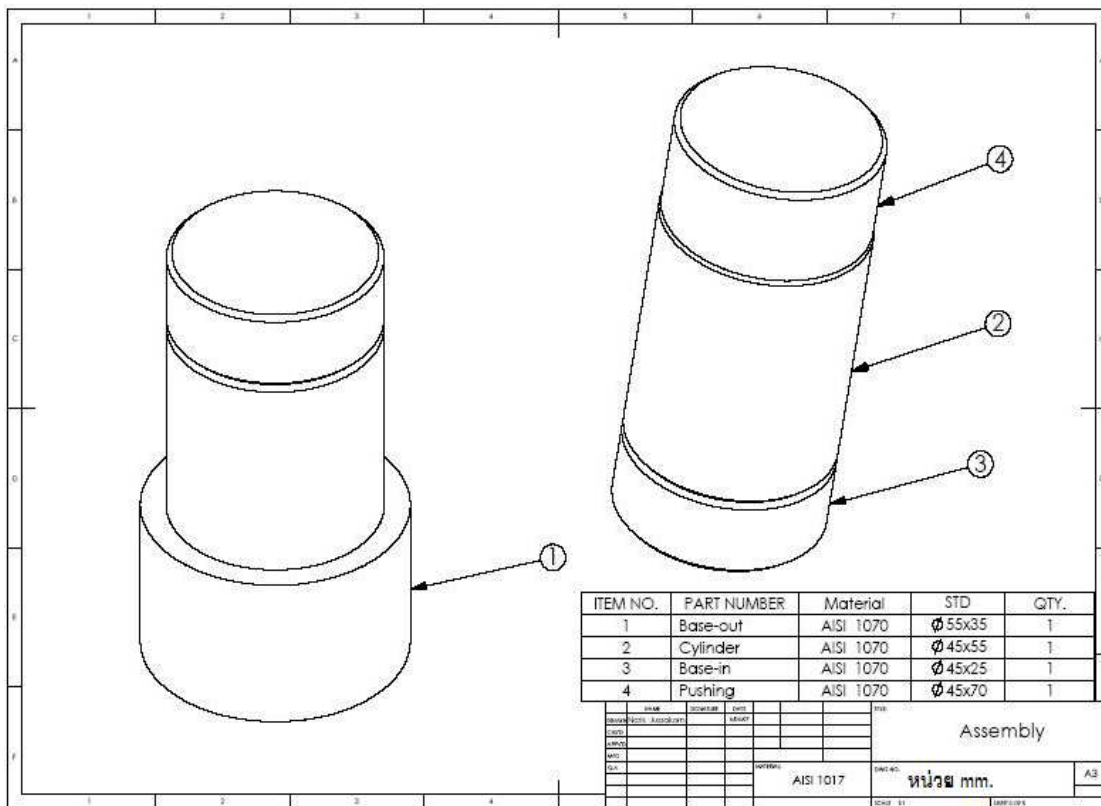
รูปที่ ก3 แบบงานชิ้นส่วนต่อทางวิ่งน้ำโลหะของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง



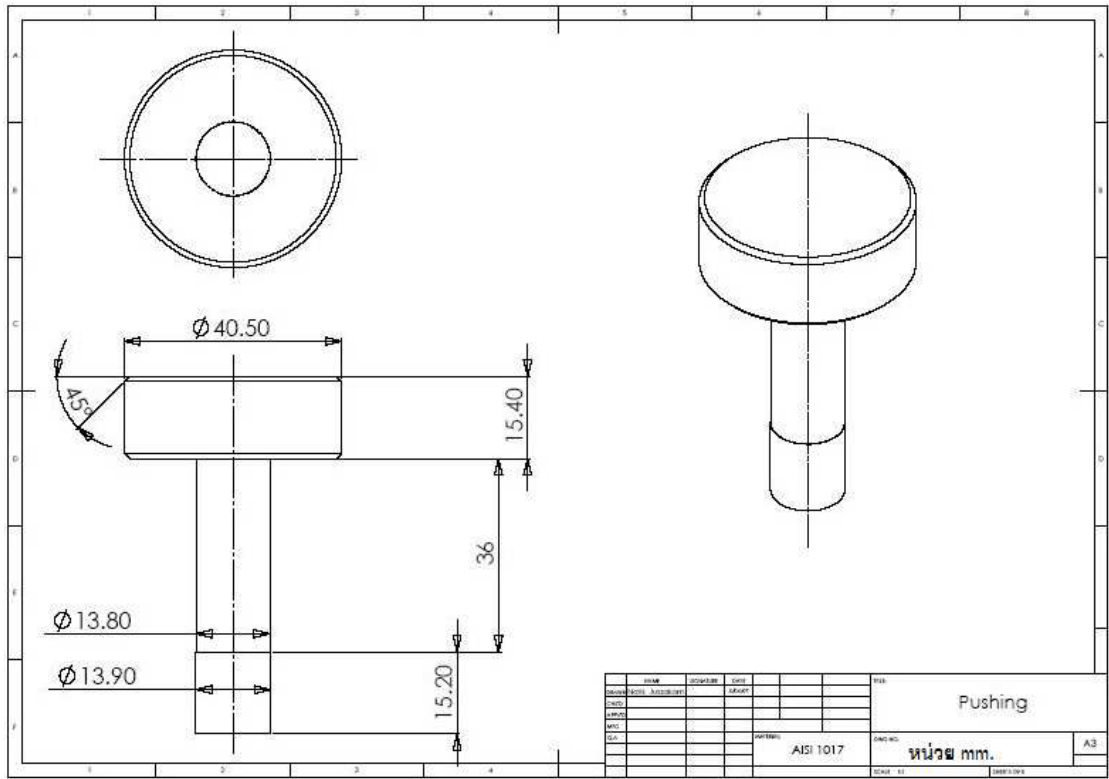
รูปที่ 4 แบบงานขึ้นส่วนแม่พิมพ์ของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง

ภาคผนวก ข

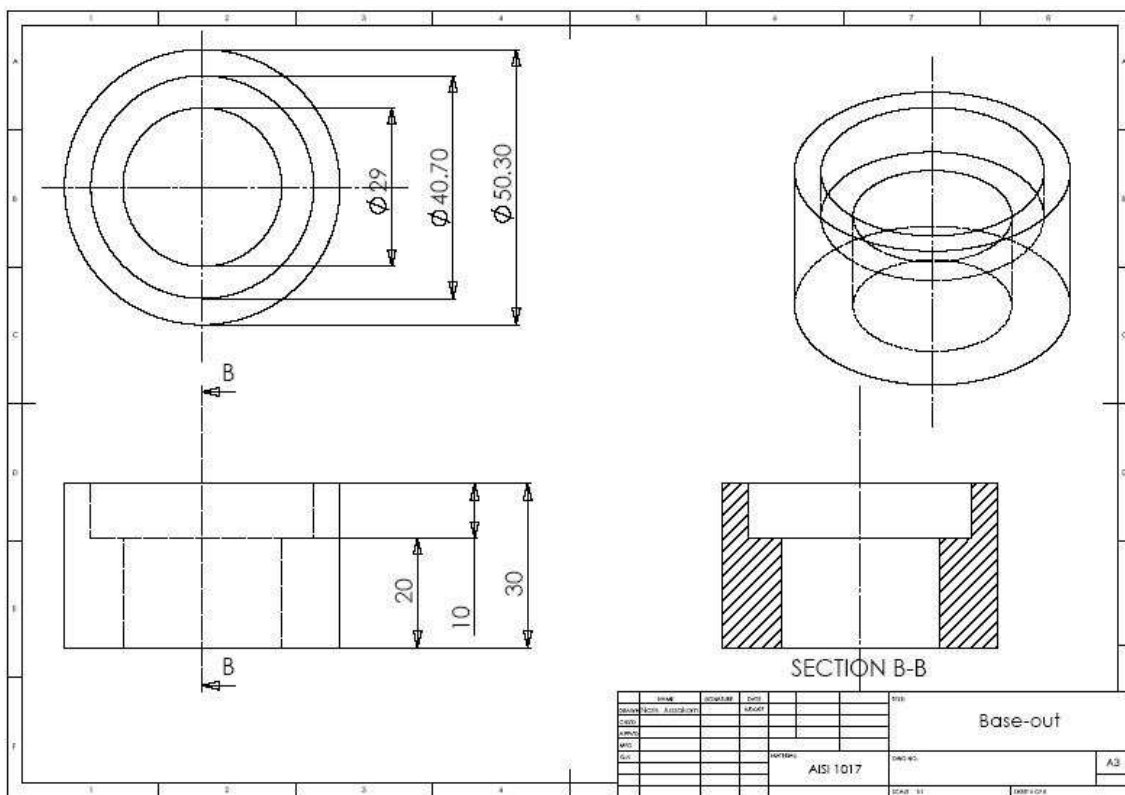
แบบงานอุปกรณ์การอัดขึ้นรูปชิ้นงานซิลิโคนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป



รูปที่ ข1 ชุดอุปกรณ์การอัดขึ้นรูปชิ้นงานซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป แบบประกอบเสร็จ



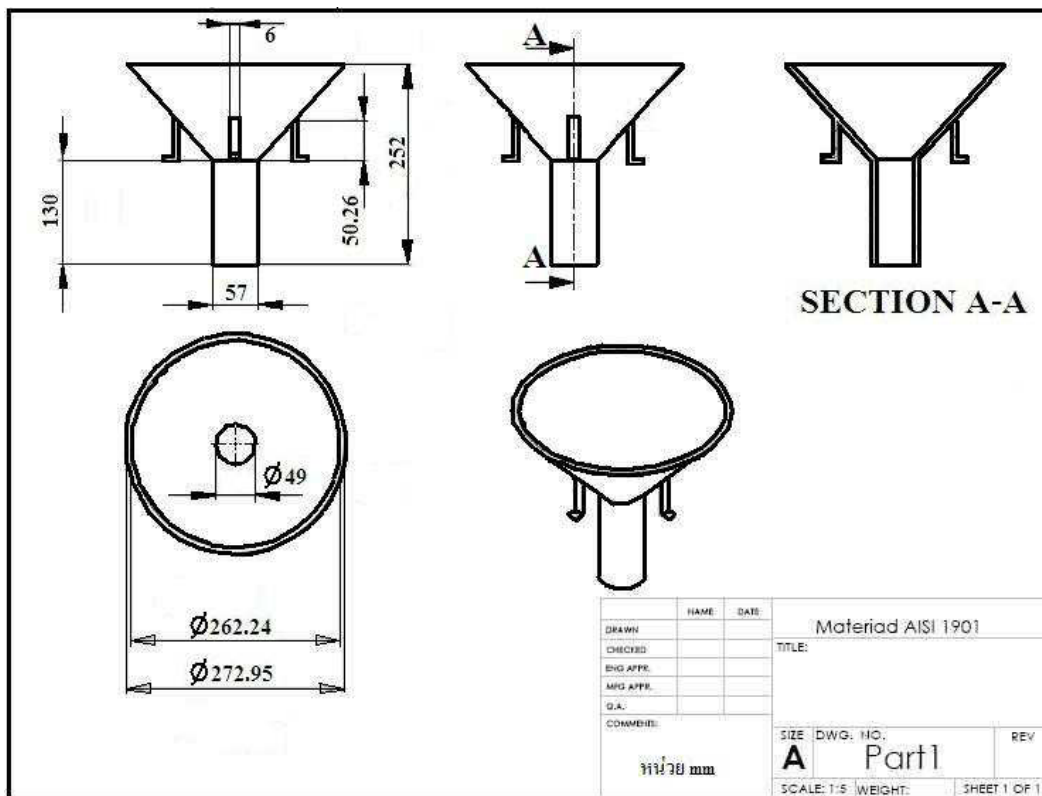
รูปที่ ข4 ตัวอัดชิ้นงานซิลิโคนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูป



รูปที่ ข5 ฐานปลดชิ้นงานชนิดคอนกรีตไปค์อัดขึ้นรูป

ภาคผนวก ค

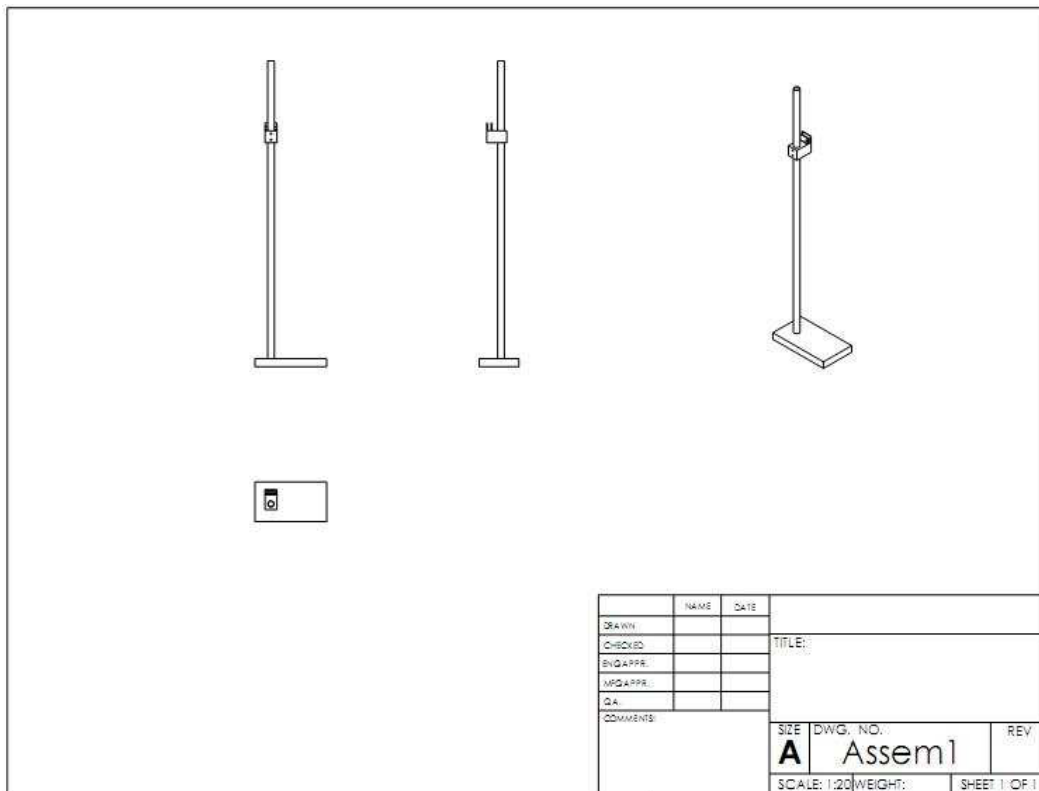
กรวยประคองน้ำโลหะ



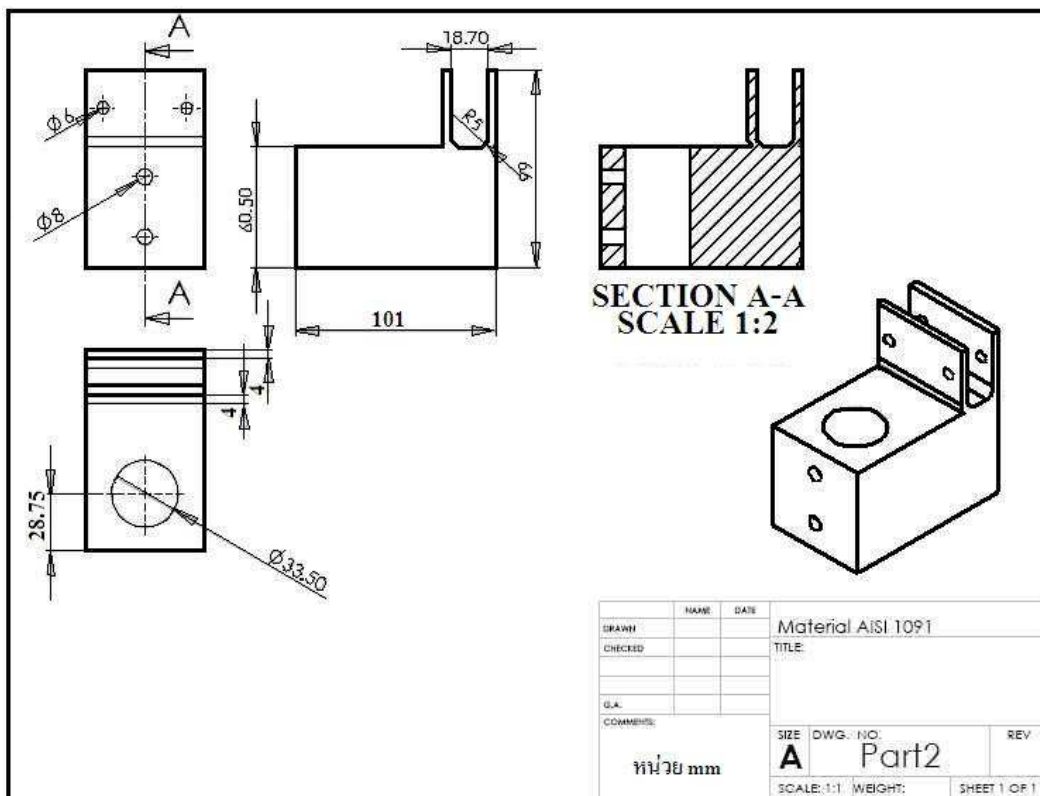
รูปที่ ค1 กรวยประคองน้ำโลหะ

ภาคผนวก ง

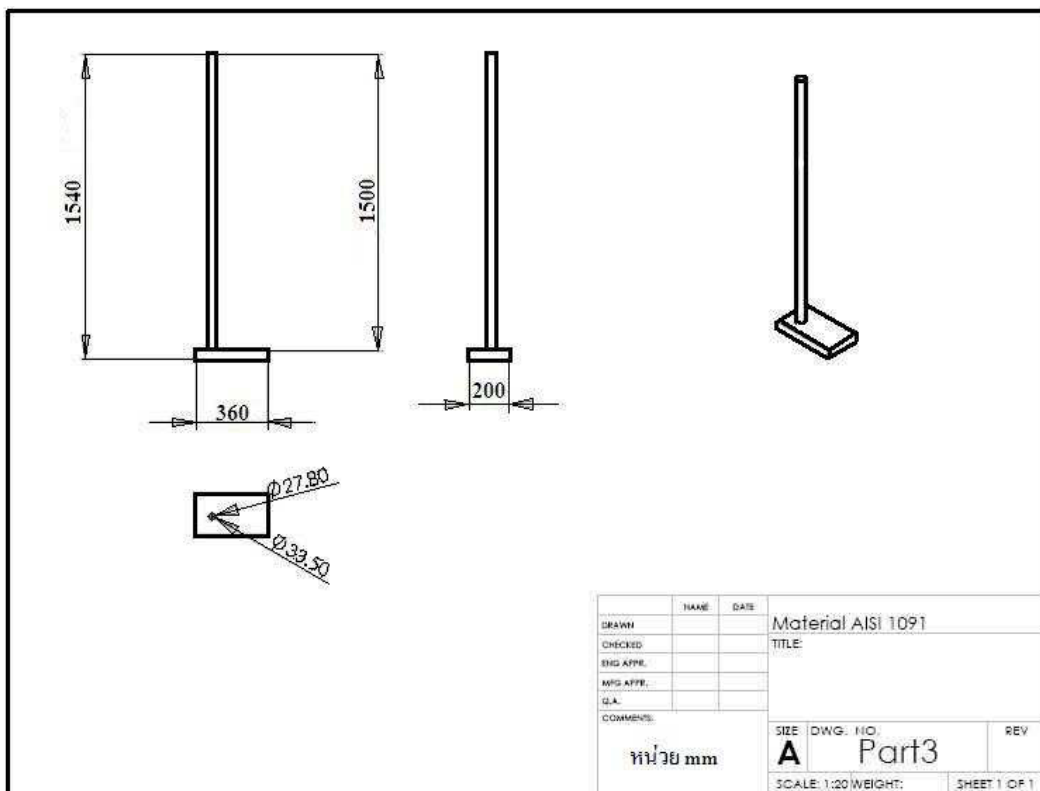
ชุดอุปกรณ์เผาอุ้น



รูปที่ ง1 ชุดอุปกรณ์เสาอู่แบบประกอบเสร็จ



รูปที่ ๖๒ ชั้นวางหัวเผา



รูปที่ 3 ขาดัง

ภาคผนวก จ

กลุ่มของวัสดุและข้อเปรียบเทียบระหว่างโลหะผสมและวัสดุชนิดอื่นๆ

จ1. กลุ่มของวัสดุ

จ1.1 โลหะ (Metal)

โลหะผสม รวมอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย เป็นวัสดุที่มีค่านำความร้อนสูง เพราะสามารถนำความร้อนได้เร็วมาก และโลหะก็มีสภาพนำความร้อนสูงด้วย มีความแข็งแรงมีความเหนียว วาว ทนต่อโหลดเป็นเวลานาน โลหะมีพันธะเมตอลลิก อะตอมของโลหะจะมีขนาดโตกว่าพวกอโลหะ โลหะผสม ประกอบด้วยธาตุโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่น เหล็กกล้า เป็นโลหะผสมระหว่างเหล็ก คาร์บอน และธาตุอื่นๆ และโลหะผสมอะลูมิเนียม-ลิเทียม เป็นต้น

โลหะอาจแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มเหล็ก และเหล็กกล้า และโลหะอื่นๆ ที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม ดีบุก สังกะสี และตะกั่ว เป็นต้น แบ่งเป็นโลหะเบาและโลหะหนัก นอกจากนั้นยังอาจแยกเป็นโลหะหายาก (rare earth metals) ได้แก่ ธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์ และแอกทิไนด์ เช่น La, Ce, \square d, \square r, Ho, Tm, Y และ \square d เป็นต้น นอกจากโลหะ 2 กลุ่มดังกล่าวแล้ว โลหะอาจถูกแบ่งเป็น โลหะผง (powdered metal) หรือโลหะซินเทอร์ (sinter metal) ซึ่งเป็นการผลิตโลหะผสมด้วยการหลอมผงโลหะที่ผสมด้วยกันแล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ หรือวิธีการขึ้นรูปอื่นๆ เช่น การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การหลอมจะให้จุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะผสมหลักด้วย กระบวนการอัดความดันภายใต้ความร้อนทำให้ผงโลหะมีความหนาแน่นและเชื่อมติดกัน (บางครั้งอาจมีรูพรุน) มีความแข็งแรงและเชื่อมติดกัน (บางครั้งอาจมีรูพรุน) มีความแข็งแรง

จ1.2 เซรามิก (Ceramic)

เซรามิกเป็นสารประกอบของโลหะและอโลหะ เช่น ฉนวนหั่วเทียน (Al_2O_3) อิฐทนไฟ (MgO) หรือแก้ว (SiO_2) เซ็อเพลิงนิวเคลียร์ (UO_2) หรือแม้กระทั่งพวกหิน เครื่องปั้นดินเผา กระเบื้อง ผงขัด กระจกทราย อิเล็กโทรเซรามิก สารแม่เหล็ก สารไดอิเล็กทริก และสารตัวนำยิ่งยวดอุณหภูมิสูง

วัสดุแต่ละอย่างเหล่านี้จะแข็งแต่เปราะ ซึ่งเป็นสมบัติที่เด่นชัดของเซรามิก และดูเหมือนว่าจะทนต่อความร้อนสูงๆ และทนต่อสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรดหรือด่างอย่างแรงได้ดีกว่าโลหะและพอลิเมอร์ เพราะอะตอมของโลหะจะสละอิเล็กตรอนในวงนอกสุดไปให้อะตอมของอโลหะ ผลลัพธ์คือ ไม่มีโมเลกุลที่เคลื่อนที่ ดังนั้นเซรามิกจึงเป็นฉนวนความร้อนและฉนวนไฟฟ้าที่ดี และที่

สำคัญอะตอมที่มีประจุบวก (หลังจากสละอิเล็กตรอนแล้ว) และอะตอมที่มีประจุลบ (ซึ่งรับอิเล็กตรอนมา) จะมีแรงยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรง ประจุบวกแต่ละตัวจะล้อมรอบตัวมันเอง โดยประจุลบหลายตัว จะต้องใช้แรงและพลังงานมากที่จะแยกมันออกจากกัน

จ1.3 วัสดุผสม (Composite Material)

วัสดุผสม คือ วัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุสองชนิดหรือมากกว่านั้น และวัสดุแต่ละชนิดยังรักษาสสมบัติเฉพาะตัว โดยทั่วไปจะมีการเสริมแรงวัสดุที่อ่อนแอ นอกจากนี้เพื่อวัตถุประสงค์ให้วัสดุแข็งแรงขึ้นแล้ว ยังมีวัตถุประสงค์อื่นๆ เช่น เพื่อทำให้สมบัติต่างๆ ตามต้องการ ด้วยการออกแบบที่เหมาะสม เช่น ความแข็งแรง เบา เหนียว และทนทานวัสดุถูกนำมาใช้มากขึ้นในปัจจุบัน และจะมากขึ้นในอนาคตในวัสดุโครงสร้าง อิเล็กทรอนิกส์ งานอวกาศและอุตสาหกรรมยานยนต์

วัสดุผสมอาจแบ่งตามเนื้อหลักของวัสดุต่างๆ เช่น พอลิเมอร์ โลหะ เซรามิก เซอร์เมต หรืออาจแบ่งวัสดุผสมตามโครงสร้าง ซึ่งประกอบด้วย เป็นชั้น เส้นใย อนุภาค วัสดุผสมเป็นชั้น มีลักษณะเป็นแผ่นๆ ซ้อนกันเป็นแซนวิชเชื่อมติดกันด้วยกาวหรือการเชื่อม ส่วนเส้นใยหรืออนุภาคจะฝังประอยู่ในเนื้อ (matrix) ชนิด พลาสติก อีพ็อกซี ยาง โลหะ ตัวอย่างวัสดุผสมเป็นชั้น ได้แก่ กระฉกนิรภัย (safety glass) ซึ่งเป็นแผ่นแก้วที่แซนวิชด้วยพลาสติก คาร์บอนบอร์ด และอัลเคลด (cardboard and Alclad) ที่มีแกนเป็นทองแดงผสมที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมป้องกันการผุกร่อน วัสดุผสมเสริมอนุภาคประกอบด้วย คอนกรีต (หิน กรวด ทรายและซีเมนต์) วัสดุผสมเสริมเส้นใย ได้แก่ ไฟเบอร์กลาส (เส้นใยแก้วฝังในเนื้อพลาสติกชนิดพอลิเอสเตอร์) แก้วเสริมแรง (ลาวตะแกรงฝังในเนื้อแก้ว) ปัจจุบันวัสดุผสมถูกนำมาใช้สำหรับงานอวกาศ และอวกาศ ซึ่งต้องการความแข็งแรงจำเพาะสูง (ความแข็งแรงเทียบกับน้ำหนัก) ทนต่อการเสียดสีและทนต่ออุณหภูมิสูง นอกจากนั้นยังถูกประยุกต์ใช้สำหรับวัสดุทำอุปกรณ์กีฬา เช่น ไม้เทนนิส ไม้กอล์ฟ (เล็ก ลีคิง, 2540)

จ2. ข้อเปรียบเทียบระหว่างโลหะผสมและวัสดุชนิดอื่นๆ

จ2.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างโลหะผสมและโลหะบริสุทธิ์

จ2.1.1 โลหะผสมมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและความหนาแน่นที่สูงกว่าโลหะบริสุทธิ์

จ2.1.2 โลหะผสมมีอัตราส่วนระหว่างความเหนียวและความหนาแน่นที่สูงกว่าโลหะบริสุทธิ์

จ2.1. โลหะผสมต้านทานต่อความล้าได้ดีกว่าโลหะบริสุทธิ์

จ2.1.4 โลหะผสมมีสมบัติที่ใช้งานได้ในอุณหภูมิที่สูงได้ดีกว่าโลหะบริสุทธิ์

จ2.1.5 โลหะผสมมีความแข็งแรงที่สูงกว่าโลหะบริสุทธิ์

จ2.1.6 โลหะผสมมีอัตราการคืบที่ต่ำกว่าโลหะบริสุทธิ์

จ2.1.7 โลหะผสมมีประสิทธิภาพการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำกว่าโลหะบริสุทธิ์

จ2.1.8 โลหะผสมต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่าโลหะบริสุทธิ์

จ2.2 ข้อเปรียบเทียบระหว่างโลหะผสมและพอลิเมอร์

จ2.2.1 โลหะผสมมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพอลิเมอร์

จ2.2.2 โลหะผสมมีการต้านทานการเผาไหม้ได้ดีกว่าพอลิเมอร์

จ2.2. โลหะผสมมีความเหนียวและความแข็งแรงในพื้นที่ภาคตัดขวางดีกว่าพอลิเมอร์

จ2.2.4 โลหะผสมไม่มีการดูดซึมรับความชื้น

จ2.2.5 โลหะผสมมีการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีกว่าพอลิเมอร์

จ2.2.6 โลหะผสมมีการต่อต้านการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กได้ดีกว่าพอลิเมอร์

จ2.3 ข้อเสียโลหะผสมซึ่งเปรียบเทียบกับโลหะบริสุทธิ์และพอลิเมอร์

จ2. 1 มีราคาสูงกว่า

จ2. 2 มีวิธีการผลิตที่ซับซ้อน (ยกเว้นการหล่อ)

จ2. 3 ข้อจำกัดในการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิต่างๆ

เหล็กกล้า คือเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอน (C) ประมาณ 0.10 - 1.50% สืบเนื่องมาจากเหล็กดิบไม่สามารถนำมาผลิตเป็นชิ้นงานได้ทันที เพราะมีคาร์บอน ประมาณ 4% ซึ่งสูงเกินไป ทำให้มีความต้านทานแรงดึงต่ำ ความยืดหยุ่นและความเหนียวไม่เพียงพอ ไม่สามารถนำไปเชื่อม ทูบ รีด อัดขึ้นรูปได้ จึงจำเป็นต้องหลอมเหล็กดิบเพื่อไล่คาร์บอนและสารมลทินอื่นออกไป และอาจเติมสารอื่นเข้าไปปรับปรุงสมบัติ เพื่อสนองตอบต่อความต้องการด้านสมรรถนะ

เหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)
- เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel)

ฉ1. เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนหมายถึงเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลัก และอาจมีธาตุอื่นๆ เช่น Si, S, Mn ที่มาจากสินแร่เหล็ก ในขั้นของการนำมาผลิตเป็นเหล็กดิบผสมอยู่ เหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหล็กชนิดเดียวที่มีทั้ง ความแข็งแรง และความคงตัวสูง

เหล็กกล้าคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

ฉ1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือเหล็กเหนียว (Mild Steel) คือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอน (C) เป็นธาตุผสมหลักอยู่ไม่เกิน 0.25% ($\text{Low carbon steel} \leq 0.25\% \text{C}$) มีความเหนียว แต่ไม่แข็งแรงมากนัก ไม่สามารถนำไปชุบแข็งได้ สามารถนำไปกลึงกัด ตัด ไส เจียรระไน เจาะ กัด ได้ง่าย นิยมใช้ในการทำเหล็กโครงสร้าง น็อต สกรู เหล็กแผ่นบาง ตัวถังรถยนต์ โซ่ เหล็กรูปพรรณต่างๆ

ฉ1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางคือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมอยู่มากกว่า 0.25% แต่ไม่เกิน 0.60% ($0.25\% \text{C} < \text{Medium carbon steel} \leq 0.60\% \text{C}$) มีความเหนียวน้อยลง แต่แข็งแรงมากขึ้น ทนแรงดึงได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สามารถนำไปชุบแข็งได้ถ้ามีคาร์บอน (C) $> 0.50\%$ แต่ถ้ามีคาร์บอนน้อยกว่านี้สามารถชุบแข็งได้เฉพาะผิว สามารถนำไปกลึงกัด ตัด ไส เจียรระไน เจาะ กัด หรือทำการแปรรูปได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ นิยมใช้ทำ เพลาต่างๆ เพื่อ

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ค้อน ก้านสูบ

ฉ1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนสูงคือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมอยู่มากกว่า 0.60% แต่ไม่เกิน 1.50% ($0.60\%C < \text{High carbon steel} \leq 1.50\%C$) มีความเหนียวน้อย แต่แข็งแรงมาก ทนแรงดึงได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนชนิดอื่น สามารถนำไปชุบแข็งได้ แต่อาจเปราะหักได้ง่าย สามารถนำไปกลึงกัด ตัด ไส เจียรระไน เจาะ กัด หรือทำการแปรรูปได้ก่อนทำการชุบแข็ง นิยมใช้ทำ ดอกสว่าน สกัด กรรไกร ใบเลื่อย มีดกลึง ใบมีดโกน เม็ดลูกปืน (Bearing) (คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี, 2552)

ซึ่งสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิต่างๆ มีดังนี้

ตารางที่ ๑1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

Material	Composition (%)					Condition	Temperature(°C)	Properties			
	C	Mn	Ni	Cr	Other elements			U.T.S. (MPa)	Yield stress 0.2 or 0.5% proof stress (MPa)	Elong. (%)	Reduction in area (%)
Armco iron	0.02	0.03	-	-	-	Normalized	R.T.	334.52	182.47	45	69
							200	440.96	182.47	27	54
							400	304.11	-	15	67
							600	106.44	-	34	49
							700	60.82	-	53	55
0.14% C steel	0.14	0.6	-	-	-	Normalized	R.T.	410.55	243.29	38	-
							200	456.17	228.08	27	-
							400	380.14	190.07	38	-
							500	304.11	-	38	-
0.17% C steel	0.17	0.7	-	-	-	Normalized	R.T.	433.36	258.49	43	68
							200	570.21	258.49	24	51
							400	410.55	-	40	69
							600	152.06	-	65	93
							700	76.03	-	83	96

ตารางที่ ๑1 (ต่อ) สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

Material	Composition (%)					Condition	Temperature(°C)	Properties			
	C	Mn	Ni	Cr	Other elements			U.T.S. (MPa)	Yield stress 0.2 or 0.5% proof stress (MPa)	Elong. (%)	Reduction in area (%)
0.21% C steel	0.18/0.24	0.4/0.6	-	-	-	Normalized	R.T.	440.96	258.49	34	62
							200	456.17	220.48	28	54
							400	364.93	182.47	36	67
							600	182.47	98.84	48	76
0.25% C steel	0.25	0.6	-	-	-	Normalized	R.T.	471.37	243.29	34	-
							200	501.78	228.08	22	-
							400	440.96	197.67	31	-
							500	334.52	182.47	32	-
0.35% C steel	0.35	0.8	-	-	-	Normalized	R.T.	593.02	304.11	30	-
							200	623.43	304.11	17	-
							400	577.81	212.88	29	-
							500	425.75	-	32	-

ตารางที่ ๑1 (ต่อ) สมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

Material	Composition (%)					Condition	Temperature (°C)	Properties			
	C	Mn	Ni	Cr	Other elements			U.T.S. (MPa)	Yield stress 0.2 or 0.5% proof stress (MPa)	Elong. (%)	Reduction in area (%)
<i>CARBON STEELS</i>											
0.40% C steel	0.40	0.6	-	-	-	Normalized	R.T.	593.02	334.52	33	53
							250	623.43	288.91	19	41
							450	471.37	-	36	59
							650	167.26	-	57	95
							850	60.82	-	119	99
0.90% C steel	0.90	0.7	-	-	-	Normalized	R.T.	980.76	486.58	14	20
							250	965.55	-	10	18
							450	593.02	-	38	77
							650	281.30	-	60	82
							850	60.82	-	84	99
<i>LOW ALLOY STEELS</i>											
0.50% Mo steel	0.17	0.6	-	-	Mo 0.6	Normalized	R.T.	501.78	311.71	38	69
							400	501.78	228.08	34	73
							500	410.55	220.48	33	77

ที่มา : Higgins (1973)

ภาคผนวก ข

สมบัติของปะเก็น (Gasket) ชนิด Non-Asbestos 350 - 550°C

แอสเบสตอส (asbestos) เป็นชื่อเรียกทั่วไป ที่ใช้เรียกกลุ่มแร่ ซิลิเกต 6 ชนิด ที่มีลักษณะเป็นเส้นใย และมีโครงสร้างเป็นผลึก ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีซิลิเกต น้ำและธาตุแมกนีเซียม เป็นองค์ประกอบหลัก และอาจพบว่ามีอะตอมของโลหะอื่นเช่น เหล็ก, แคลเซียม, หรือโซเดียม แทรกอยู่ภายใน โครงสร้างผลึกของแอสเบสตอส (asbestos) ด้วย เนื่องจากแอสเบสตอส (Asbestos) มีลักษณะเป็นเส้นใย ดังนั้น บางครั้งอาจเรียกว่า ใยหิน

คุณสมบัติของแอสเบสตอส ที่สำคัญ คือมีลักษณะเป็นเส้นใยทนความร้อนได้สูงกว่า 600 °C ทนแรงดันได้สูงกว่า $5,000 \frac{kg}{cm^3}$ ไม่ลุกไหม้ ทนต่อสารเคมี กรด ด่าง (Westbound engineering Co, Ltd., 2009)

ตารางที่ ข1 สมบัติของปะเก็น (gasket) ชนิด non-asbestos 50 - 550°C แบบ thermopak 400

Thermopak 400 Oil Resistant Non-Asbestos Gasket sheet	
Thermopak 400 is an oil-resistant non-asbestos gasket material made from specialized thermally resistant fiber and oil-resistant synthetic rubber by vulcanization and compression.	
Application: Suitable for sealing gaskets for connection of oil pipeline, connection part in diesel engine and flange connection of refining equipment, distill pipeline, aero engine and air conditioning system. Stable in medium of fuel, lubrication oil with petroleum base, animal and vegetable oil, hot oil, etc.	
Colour	blue
Density	1.6 – 2.0 g/cm ³
Tensile strength	14.0 MPa
Compressibility	12% (±7)
Recovery	≥50%
Maximum temperature	400°C
Working pressure	4 MPa (40 bars)
Size available	Thickness: 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0 mm, 5.0mm Width x Length: 1500mm x 2000mm

ที่มา : Westbound engineering Co, Ltd. (2009)

ตารางที่ ข2 สมบัติของปะเก็น (gasket) ชนิด non-asbestos 50 - 550°C แบบ thermopak 200

Thermopak 200 Non-Asbestos Gasket sheet	
Thermopak 200 is a non-asbestos gasket material made from specialized thermally resistant fiber and synthetic rubber by vulcanization and compression.	
Application: Suitable for water, steam and gases, as a sealing gasket for middle load requirements machine, vehicle, ship, pipeline construction, chemical and power engineering, pumps and others.	
Colour	Green
Density	1.6 – 2.0 g/cm ³
Tensile strength	14.0 MPa
Compressibility	12% (±7)
Recovery	≥50%
Maximum temperature	200°C
Working pressure	2 MPa (20 bars)
Size available	Thickness: 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0 mm, 5.0mm Width x Length: 1500mm x 2000mm

ที่มา : Westbound engineering Co, Ltd. (2009)

ตารางที่ ๓3 สมบัติของปะเก็น (gasket) ชนิด non-asbestos 50 - 550°C แบบ thermopak 400
(Chemie & Oil)

Thermopak 400 (Chemie & Oil) Chemical & Oil Resistant Non-Asbestos Gasket sheet	
Thermopak 400 (Chemie & Oil) is a chemical & oil resistant non-asbestos gasket material made from specialized thermally resistant fiber and oil resistant synthetic rubber by vulcanization and compression.	
Application: Multi-purpose suitable for sealing gaskets for connection of oil pipeline, connection part in diesel engine and flange connection of refining equipment, distill pipeline, aero engine and air conditioning system. Stable in medium of fuel, lubrication oil with petroleum base, animal and vegetable oil, hot oil, acid, alkali, solvent, chlorine solution, etc.	
Colour	Grey
Density	1.6 – 2.0 g/cm ³
Tensile strength	8.0 MPa
Compressibility	12% (±5)
Recovery	≥45%
Maximum temperature	400°C
Working pressure	4 MPa (40 bars)
Size available	Thickness: 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0 mm, 5.0mm Width x Length: 1500mm x 2000mm

ที่มา : Westbound engineering Co, Ltd. (2009)

ภาคผนวก ข

ค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

ค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

ในการทดลองวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมโดยการใช้เซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเสริมแรงและโลหะอะลูมิเนียมเกรด A56 เป็นเนื้อหลัก เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในแต่ละครั้งจะเกิดค่าใช้จ่ายจากการทดลองวิจัยหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง (พิจารณาหัวข้อ 4.2 ของบทที่ 4 ประกอบ) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าวัตถุดิบโลหะอะลูมิเนียม เกรด A56 ซึ่งเป็นเนื้อหลัก ปริมาณ 1 kg
2. ค่าไฟฟ้าในการหลอมเหลวอะลูมิเนียม เกรด A56 ด้วยเตาหลอมโลหะชนิดขดลวดความดันทาน ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง
 - ค่าเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลวในการเผาอุณหภูมิระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูงด้วยหัวเผา ซึ่งต่อกับถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว ขนาด 15 kg (น้ำหนักก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ไม่รวมกับน้ำหนักถัง) จำนวน □ ถัง
4. ค่าสลักเกลียว (น็อต โบลท์ และแหวนรอง) ที่ใช้สำหรับการจับยึดชิ้นส่วนของชุดระบบการหล่อเหวี่ยงความดันสูง จำนวน □ ชุด

เนื่องจากปะเก็นแกรไฟต์ทนไฟ non-asbestos 50 – 550 °C แบบ thermopak 200 ที่ใช้ในทดลองวิจัยหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัท Thai leakless Corporation Co, LTD. และเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้สั่งซื้อมาเป็นปริมาณมาก อีกทั้งเมื่อนำมาผลิตเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปก็ผลิตเป็นจำนวนที่มากในครั้งเดียว (ใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปเพียงแค่ 2 ชิ้นต่อ 1 ครั้งการทดลองวิจัยหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง เพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 2 ชิ้น) จึงไม่นำมาคิดค่าใช้จ่าย ซึ่งรายละเอียดและค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานอะลูมิเนียมวัสดุผสม 1 ครั้งการทดลองวิจัยหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง แสดงดังตารางที่ ซ1

ตารางที่ ข1 ค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมต่อ 1 ครั้ง ของการทดลองวิจัยกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูง

No.	ค่าใช้จ่าย	จำนวน/ปริมาณ	หน่วยละ	จำนวนเงิน (รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม)	รายละเอียด
1	ค่าโลหะอะลูมิเนียม เกรด A356	1 กิโลกรัม	110 บาท	117.7 บาท	ชื่อทางการค้า AC4C อะลูมิเนียมแท่ง
2	ค่าไฟฟ้าในการหลอมเหลวอะลูมิเนียม*	0.75 หน่วย	4.3093 (TOU) 0.8544 (Ft)	18.63 บาท	เตาหลอมโลหะชนิดขดลวดความต้านทาน ด้วยกำลัง 3,000 w เวลา 4 ชั่วโมง
3	ค่าเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว	15 กิโลกรัม	-	340 บาท	ใช้ 3 ถึง ถึงละ 5 กิโลกรัม (1 ถึง : 340 บาท)
4	ค่าสลักเกลียว	32 ชุด	2.20 บาท	70.40 บาท	1 สลักเกลียว: 1 น็อต/โบลท์ /แหวนรอง ขนาด M6 x 40 mm
	รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด			546.73 บาท	ค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานอะลูมิเนียม วัสดุผสม 1 ครั้งการทดลองวิจัย

*คิดค่าไฟฟ้าในการหลอมเหลวอะลูมิเนียมด้วยอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of use tariff, TOU) ในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูง (On Peak) ระหว่างเวลา 09.00-22.00 น. ของวันทำงาน (จันทร์-ศุกร์) อัตราค่าไฟฟ้า 4.3093 บาท ต่อหน่วย และมีค่าการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Energy adjustment charge, Ft) 0.8544 บาท ต่อหน่วย ค่าบริการรายเดือน 14.49 บาท (ใน 1 เดือนสามารถทดลองวิจัยกระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงได้เฉลี่ย 4 ครั้ง ตามหลักการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยคิดค่าบริการรายเดือนเฉลี่ย 57.95 บาท)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายนริศ จุสกรณ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4812098	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนศิษย์ก้นกุฎิ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนผู้ช่วยสอน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนวิจัยแบบทั่วไป จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

นริศ จุสกรณ์ นภิสพร มีมงคล ธวัชชัย ปลูกผล สุชาติ จันทรมณีย์ เจษฎา วรรณสินธุ์. 2551. การพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบเหวี่ยงด้วยความดันสูงสำหรับการแทรกซึมเพื่อผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6. วันที่ 8-9 พฤษภาคม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.