

ผลของส่วนผสมของตัวประสานต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง



นางสาวอารดา บัญชาวิมลเชษฐ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0753-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF BINDER COMPOSITION ON METAL INJECTION MOLDING



Miss Arada Bunchavimonchet

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0753-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของส่วนผสมของตัวประสานต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง
โดย นางสาวอารดา ปัญชาวิมลเชษฐ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. ไสว ค่านชัยวิจิตร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ไพศาล เสดสุวรรณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. ไสว ค่านชัยวิจิตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.ไพศาล เสดสุวรรณ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

อารดา ปัญชาวิมลเชษฐ : ผลของส่วนผสมของตัวประสานต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง
(EFFECTS OF BINDER COMPOSITION ON METAL INJECTION MOLDING)

อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. ไสว ค่านชัยวิจิตร, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. ไพศาล เสตสุวรรณ , 92
หน้า., ISBN 974-03-0753-1

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของส่วนผสมของตัวประสานต่อขั้นตอนต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และศึกษาการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายโดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นตัวทำละลาย ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับแต่ละขั้นตอนในกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเมื่อใช้ตัวประสานที่มีส่วนผสมของตัวประสานต่างกัน และทำการเลือกตัวประสานที่เหมาะสมกับการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มากที่สุด ส่วนผสมของตัวประสานที่ใช้ประกอบด้วยโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LD1630J และ LD1450J) พาราฟินแวกซ์ กรดสเตียริก และน้ำมันปาล์ม จากการทดลองพบว่า ตัวประสานที่ใช้ LD1450J 45% พาราฟินแวกซ์ 55% และเพิ่มกรดสเตียริกเข้าไป 5% โดยน้ำหนัก (B4505) เป็นตัวประสานที่เหมาะสมกับการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มากที่สุด โดยให้การกระจายของผงในตัวประสานที่ดี สามารถถูกกำจัดออกได้ง่ายและรวดเร็วโดยไม่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายเมื่อใช้ B4505 เป็นตัวประสาน สามารถทำได้โดยการแช่ชิ้นงานในอีเทอร์ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่ 50°C 45 นาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปแช่ในอีเทอร์ที่ 40°C 4 ชั่วโมง และทำการเปิดรูพรุนให้กับผิวชิ้นงานด้วยการนำชิ้นงานไปแช่ในอีเทอร์บริสุทธิ์ที่ 40°C 2 นาที การเผาผืนิกในบรรยากาศไฮโดรเจนที่ 1350°C 4 ชั่วโมง ทำให้ชิ้นงานหลังการเผาผืนิกมีความหนาแน่นสูง (96%จากทฤษฎี) และมีสมบัติทางกลที่ดี

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....
ปีการศึกษา.....2544.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170705521: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : METAL INJECTION MOLDING (MIM) / BINDER COMPOSITION / SOLVENT DEBINDING

ARADA BUNCHAVIMONCHET : THESIS TITLE. EFFECTS OF BINDER COMPOSITION ON METAL INJECTION MOLDING. THESIS ADVISOR : DR. SAWAI DANCHAIVIJIT, THESIS COADVISOR : DR. PAISAN SETASUWON, 92 pp. ISBN 974-03-0753-1

The objectives of this research were to study effects of binder composition on each process in metal injection molding of 316L stainless steel and to study solvent debinding process by using petroleum ether as solvent. An appropriate condition for each process in metal injection molding when used different binder was studied. The most appropriate binder composition for metal injection molding of 316L stainless steel was selected. Binder composition includes low-density polyethylene (LD1630J and LD1450J), paraffin wax, stearic acid and palm oil. As a result, the binder that was made from 45 wt.% LD1450J, 55 wt.% paraffin wax and added 5 wt% stearic acid (B4505) was the most appropriate binder for metal injection molding of 316L stainless steel. It gave a good powder distribution in mixture and could be eradicated easily and rapidly. Solvent debinding for B4505 could be done. Firstly, the specimens were soaked in ether at 30°C for 1 hour. They were dried at 50°C for 45 minutes. Then, they were soaked in ether again at 40°C for 4 hours. Finally, wax-covered pores at specimen's surface were opened by soaking the specimens in pure ether at 40°C for 2 minutes. After sintering in H₂ atmosphere at 1350°C for 4 hours, sintered specimens that used B4505 as binder had high sintered density (96% of theoretical density) and good mechanical properties.

Department....Metallurgical..Engineering....

Student's signature.....

Field of study..Metallurgical..Engineering....

Advisor's signature.....

Academic year.....2001.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มสำเร็จไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ไสว คำนชัยจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ไพศาล เสตสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ขอขอบคุณ บริษัท PACIFIC METALS จำกัด และบริษัท สยามเคมีคัลเทรคดิ่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณ คุณรุ่งทิพย์ กระจ่างทอง ที่ช่วยในการเผื่อนึกชิ้นงาน คุณอดิگانต์ ทองสอาด ที่ช่วยสอนผู้วิจัยให้รู้ถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ เจ้าหน้าที่ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติทุกท่านที่ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี และเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ทำให้งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาและให้กำลังใจตลอดมา จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโทมาบัณฑิตได้ตามเจตนารมณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	
2.1 การเตรียมและการผสมวัตถุดิบ.....	5
2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ใน MIM.....	5
2.1.1.1 โลหะผง.....	5
2.1.1.2 ตัวประสาน.....	7
2.1.2 การผสม.....	8
2.2 การฉีดขึ้นรูป.....	10
2.3 การกำจัดตัวประสาน.....	12
2.3.1 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนโดยใช้กลไกการแพร่.....	13
2.3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน.....	14
2.3.1.1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของตัวประสาน.....	14
2.3.1.1.2 ขนาดผง.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1.1.3 อัตราการให้ความร้อน.....	15
2.3.1.1.4 บรรยากาศ.....	16
2.3.1.1.5 อัตราการไหลของก๊าซ.....	17
2.3.2 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย.....	18
2.4 การเผาผนึก.....	20
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.1.1 วัสดุผง.....	23
3.1.2 ตัวประสาน.....	23
3.1.3 ก๊าซ.....	24
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	25
3.3.1 การทดสอบและการเตรียมตัวประสาน.....	25
3.3.1.1 การทดสอบสมบัติส่วนผสมของตัวประสาน.....	25
3.3.1.2 การเตรียมและทดสอบตัวประสาน.....	25
3.3.2 การทดสอบและเตรียมของผสม.....	27
3.3.2.1 การผสมก่อน.....	27
3.3.2.2 การผสม.....	27
3.3.3 การฉีดขึ้นรูป.....	27
3.3.4 การกำจัดตัวประสาน.....	29
3.3.4.1 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย.....	29
3.3.4.2 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน.....	30
3.3.5 การเผาผนึก.....	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	
4.1 สมบัติของส่วนผสมของตัวประสาน.....	34
4.1.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัวของ ส่วนผสมตัวประสาน.....	34
4.1.1.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัว ในบรรยากาศอากาศ.....	34
4.1.1.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัว ในบรรยากาศอาร์กอน.....	35
4.1.2 ความสามารถในการเปียกของส่วนผสมตัวประสาน.....	37
4.1.2.1 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	37
4.1.2.2 พาราฟินแวกซ์.....	38
4.2 สมบัติของตัวประสาน.....	38
4.2.1 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของตัวประสาน.....	39
4.2.2 ความหนืดของตัวประสาน.....	40
4.2.3 ความสามารถในการเปียกของตัวประสาน.....	41
4.2.4 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัวของ ตัวประสาน.....	42
4.2.4.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัว ในบรรยากาศอากาศ.....	42
4.2.4.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัว ในบรรยากาศอาร์กอน.....	43
4.3 ผลการฉีดขึ้นรูป.....	44
4.3.1 ตำแหน่งทางเข้า.....	44
4.3.2 ความกว้างทางเข้า.....	45
4.3.3 อุณหภูมิ.....	48
4.3.4 ความดัน.....	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 ความเร็วในการฉีด.....	49
4.3.6 ปริมาณสาร.....	49
4.3.7 ลักษณะการกระจายตัวของผงในตัวประสานหลังการฉีดขึ้นรูป.....	50
4.3.8 ความหนาแน่นในแต่ละบริเวณของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป.....	52
4.4 การกำจัดตัวประสาน.....	53
4.4.1 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย.....	53
4.4.1.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลังการกำจัดตัวประสานในแต่ละสภาวะ... ..	53
4.4.1.2 อัตราเร็วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย.....	54
4.4.1.3 ลักษณะของตัวประสานในบริเวณต่างๆหลังการกำจัดตัวประสานด้วย ตัวทำละลาย.....	56
4.4.1.4 การเปิดช่องที่ผิวให้กับชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย....	57
4.4.2 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน.....	59
4.4.2.1 อัตราการให้ความร้อน.....	59
4.4.2.2 อัตราการไหลของก๊าซและเวลา.....	60
4.4.2.3 ชนิดของตัวประสาน.....	62
4.5 การเผาผนึก.....	63
4.5.1 ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อความหนาแน่น ความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาค.....	63
4.5.2 ผลของเวลาการเผาผนึกต่อความหนาแน่น ความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาค.....	66
4.5.3 ผลของการเผาผนึกชิ้นงาน MIM ในบรรยากาศ H_2 ที่ $1350^{\circ}C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง... ..	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. อภิธานศัพท์.....	76
ภาคผนวก ข. ใบรับรองและสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	77
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบ TGAของส่วนผสมตัวประสาน และตัวประสาน.....	83
ภาคผนวก ง. รูปประกอบผลการทดลอง.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของผงจากวิธีการผลิตที่ต่างกัน.....	6
2.2 ผลของปัจจัยการเผาผนึกต่อการหดตัว ความหนาแน่น และสมบัติทางกลของเหล็กกล้า ไร้สนิม 316L.....	22
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 316L.....	23
3.2 สมบัติของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 316L.....	23
3.3 สมบัติของส่วนประกอบของตัวประสาน.....	24
3.4 อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวประสานที่ผลิตจาก LDPE PW SA และน้ำมันปาล์ม.....	26
3.5 การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูป.....	28
3.6 สถานะในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย.....	30
3.7 การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน.....	31
4.1 ผลต่าง ๆ ของส่วนผสมตัวประสานจากการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอากาศ.....	35
4.2 ผลต่าง ๆ ของส่วนผสมตัวประสานจากการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอาร์กอน.....	36
4.3 ผลต่าง ๆ ของตัวประสานจากการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอากาศ.....	42
4.4 ผลต่าง ๆ ตัวประสานจากการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอาร์กอน.....	43
4.5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณทางเข้าของชิ้นงานเมื่อใช้ความกว้างทางเข้าต่างกัน.....	47
4.6 ความเสียหายที่เกิดกับชิ้นงานหลังการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายในแต่ละสถานะ...53	
4.7 เปอร์เซ็นต์การหดตัว ความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์รูพรุนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึก.....	68
4.8 สมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึก.....	69

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 หน้าตัดของผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผลิตด้วยวิธี Water Atomization และ Gas Atomization.....	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแยกตัวกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทรายที่มีอัตราส่วนของขนาดแตกต่างกัน.....	9
2.3 รอยแหวนของ comb part ที่ใช้อุณหภูมิการฉีดต่าง ๆ กัน.....	11
2.4 บริเวณที่เกิดรอยเชื่อมเมื่อวางตำแหน่งทางเข้าที่ปลาย และที่ด้านข้างของชิ้นงาน.....	12
2.5 การกระจายตัวของตัวประสานเมื่อกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนขึ้นต้น ขึ้นกลาง และขึ้นสุดท้าย.....	13
2.6 กราฟ Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ของ PAN-250 และ PAN-31.....	15
2.7 การกำจัดน้ำออกจากชิ้นงานที่มีสัดส่วนความหนาแน่น 0.6 และจุดน้ำค้าง 20 °ซ.....	15
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับบรรยากาศการกำจัดตัวประสานและอัตราการไหลของก๊าซที่ต่างกัน.....	16
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับคาร์บอนตกค้างกับบรรยากาศการกำจัดตัวประสานและอัตราการไหลของก๊าซที่ต่างกัน.....	16
2.10 รูปพรุนของชิ้นงานหลังการเผาผนึกแล้วโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซขณะกำจัดตัวประสาน 300 และ 1000 มิลลิลิตร/นาที.....	17
2.11 การกระจายตัวของตัวประสานในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายตามด้วยความร้อน.....	19
2.12 ตารางการให้ความร้อนของการกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกสำหรับการกำจัดตัวประสานด้วยสารละลาย และด้วยความร้อน.....	20
2.13 การพัฒนาของพันธะระหว่างอนุภาคและการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างในขณะเผาผนึก.....	21
3.1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	28
3.2 ลักษณะ และตำแหน่งของทางเข้าในการทดลอง.....	28
3.3 การแบ่งชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามระยะห่างจากทางเข้าด้านปลายเพื่อทำการวัดความหนาแน่นในแต่ละบริเวณ.....	29
3.4 แผนภูมิการให้ความร้อนในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน.....	31
3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	33

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความสามารถในการเปียกของLD 1630 J (A) บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	37
4.2 ความสามารถในการเปียกของLD 1450 J (B) บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	38
4.3 แผนภูมิแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวจากความร้อนที่ 125 °ซ ของตัวประสานชนิดต่าง ๆ...	39
4.4 ความสามารถในการเปียกของ B4505 บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L.....	41
4.5 เปรียบเทียบรอยการไหลและรอยเชื่อมบนชิ้นงานเมื่อวางตำแหน่งทางเข้าด้านข้างและ ด้านปลาย.....	45
4.6 ลักษณะของบริเวณทางเข้าของชิ้นงานที่ใช้ความกว้างทางเข้า 2.5 5 10 และ 15 มิลลิเมตร...	45
4.7 ภาพถ่าย SEM บริเวณเส้นด้าน ทางเข้าสารของชิ้นงาน.....	46
4.8 ลักษณะการกระจายตัวของผงในตัวประสานหลังการฉีดขึ้นรูปบริเวณตรงกลางที่ผิว และทางเข้าที่ผิวชิ้นงาน.....	50
4.9 ลักษณะการกระจายตัวของผงในตัวประสานหลังการฉีดขึ้นรูปภายในชิ้นงาน.....	51
4.10 แผนภูมิเส้นแสดงความหนาแน่นของชิ้นทดสอบแรงดึงกับระยะห่างจากทางเข้า ทางด้านปลาย ของของผสมที่ใช้ตัวประสานต่างกัน.....	52
4.11 แผนภูมิเส้นแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายในสภาวะที่ 3.....	55
4.12 ลักษณะตัวประสานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายโดยตัวประสานถูกกำจัด ไปแล้ว 52% โดยน้ำหนัก ณ บริเวณต่าง ๆ.....	56
4.13 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย และแช่ในปิโตรเลียมอีเทอร์ บริสุทธิ์อุณหภูมิ 40 °ซ เป็นเวลา 1 2 5 และ 10 นาที.....	58
4.14 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของ A4505 B4505 และ B4505P ในอากาศที่ 370 °ซ เมื่อใช้ อัตราการไหลของก๊าซต่างกัน.....	60
4.15 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของตัวประสานในอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% ที่ 450 °ซ 1 ชั่วโมง เมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซต่างกัน.....	61
4.16 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของตัวประสานที่ 370 °ซ ที่อัตราการไหลของอากาศ 223 298.5 และ 374 มิลลิตร/นาที.....	62
4.17 ความหนาแน่นและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึก 1 ชั่วโมง.....	64

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน MIM เหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ 1300, 1325, 1350, 1375 และ 1400 ^o ซ.....	65
4.19 ความหนาแน่นและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึกที่ 1350 ^o ซ.....	67
4.20 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน MIM เหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึกที่ 1350 ^o ซ เป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชั่วโมง.....	68



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การฉีดขึ้นรูปโลหะผง (Metal Injection Molding, MIM) เป็นเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะที่เริ่มเข้ามามีความสำคัญในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีขนาดเล็ก 3 – 50 มม.⁽¹⁾ เช่น ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์และทันตกรรม ส่วนประกอบของปืน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น^(2,3,4) เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้มีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการอื่นๆ ที่สำคัญ คือ สามารถทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง รูปร่างซับซ้อนได้เป็นจำนวนมาก (mass product)^(1,5) มีประสิทธิภาพของต้นทุนการผลิตสูงเนื่องจากการขึ้นรูปจากโลหะผงจะได้รูปร่างของชิ้นงานใกล้เคียงกับที่ต้องการมาก (near net shape) ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการตกแต่งรูปร่างชิ้นงาน ลดการสูญเสียเนื้อวัสดุและพลังงาน การขึ้นรูปจากโลหะผงทำให้สามารถผลิตงานที่ทำได้ยากด้วยกระบวนการอื่น เหมาะกับวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ไททาเนียม ทังสเตนอัลลอย และเหล็กกล้าชนิดต่างๆ เป็นต้น^(1,4)

เนื่องจากการฉีดขึ้นรูปโลหะผงนี้เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่พัฒนามาจากการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ (Polymer Injection Molding, PIM) ร่วมกับโลหะวิทยาของโลหะผง (Powder Metallurgy) ซึ่งเป็นการผสมโลหะผงเข้ากับพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังนั้น แนวคิดทั่วไปในการฉีดขึ้นรูปจึงมาจาก การฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ แต่สมบัติของโลหะผงกับพอลิเมอร์นั้นมีความแตกต่างกันมาก การฉีดขึ้นรูปโลหะผงจึงมีความซับซ้อนมากกว่าเมื่อเทียบกับการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่มีพอลิเมอร์เป็นวัสดุเพียงอย่างเดียว

สมบัติทางรีโอโลยี (Rheology) ของของผสมเป็นสิ่งสำคัญ ความหนืดที่อุณหภูมิฉีดต้องทำให้ของผสมไหลตัวอย่างราบรื่นเข้าไปในแม่พิมพ์โดยไม่เกิดการแยกตัวของโลหะผงที่เป็นของแข็งกับตัวประสานที่เป็นของเหลว ซึ่งขึ้นกับชนิดและปริมาณส่วนประกอบของตัวประสาน และยังคงไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับโลหะผง ไม่เสื่อมคุณภาพในขณะที่อยู่ในกระบวนการผลิต และต้องสามารถกำจัดออกได้ง่าย ตัวประสานจะอยู่ในกระบวนการตั้งแต่ขั้นตอนการผสมจนถึงขั้นการกำจัดตัวประสาน สมบัติของตัวประสานจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตในทุก ๆ ขั้นตอน ดังนั้นการศึกษาชนิด

และปริมาณส่วนผสมของตัวประสานจึงมีความสำคัญต่อการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเป็นอย่างมากเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ

การฉีดขึ้นรูปโลหะผงนั้นประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ การผสม (Mixing) การฉีดขึ้นรูป (Molding) การกำจัดตัวประสาน (Debinding) และการเผาผนึก (Sintering) การกำจัดตัวประสานถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากต้องใช้เวลาในการกำจัดตัวประสานให้ออกจากชิ้นงานควบคู่ไปกับปัจจัยต่างๆ โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่างๆ ขึ้นกับชิ้นงาน เช่น การพอง (blister) รอยแตก (crack) และการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน (distortion) เป็นต้น และต้องให้มีคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของตัวประสานตกค้างอยู่ในชิ้นงานให้น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อส่วนผสมทางเคมีและสมบัติของชิ้นงานหลังการผลิต

เทคนิคการกำจัดตัวประสานสามารถแบ่งเป็น 2 เทคนิคหลัก คือ การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนและด้วยตัวทำละลาย การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนต้องใช้เวลาหลายวันในขณะที่การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายใช้เวลาเพียง 10-15 ชั่วโมง สำหรับในอุตสาหกรรม การใช้เวลาในการผลิตลดลงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพราะทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการประหยัดพลังงานและก๊าซที่ต้องใช้ ดังนั้น การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายจึงเหมาะสมกับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมมากกว่า การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตัวประสานจะทำให้ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ลดลงโดยยังได้คุณภาพที่ต้องการ

เนื่องจากยังไม่มีวิธีการฉีดขึ้นรูปโลหะผงในประเทศ ชิ้นส่วนที่ผลิตจากวิธีนี้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงทำให้มีความสนใจที่จะทำการศึกษาผลของตัวประสานและปัจจัยในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสม สามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปพัฒนาการฉีดขึ้นรูปโลหะผงสำหรับอุตสาหกรรมในประเทศได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อหาส่วนผสมของตัวประสานที่มีสมบัติเหมาะสมกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายของชิ้นส่วนงานฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การทดลองเพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของส่วนผสมของตัวประสานที่เหมาะสม และปัจจัยการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายโดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นตัวทำละลาย วัสดุที่ใช้คือผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L และตัวประสานที่มีส่วนประกอบของ พาราฟินแวกซ์ (Paraffin wax) โพลีเอททิลีน (Polyethylene) กรดสเตียริก (Stearic acid) และน้ำมันปาล์ม ทำการฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยศึกษาดังนี้

1.3.1 ศึกษาสมบัติของตัวประสาน ได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว ความสามารถในการเปียก และการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

1.3.2 ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณส่วนผสมและชนิดของตัวประสานต่อการผสม การฉีดขึ้นรูป และการกำจัดตัวประสาน

1.3.3 ศึกษาผลตัวแปรในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย ได้แก่

- เวลาที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย
- ลักษณะวิธีการให้ความร้อนในขณะเผาไล่ตัวประสานเมื่อใช้ตัวประสานและบรรยากาศภายในเตาที่ต่างกัน
- อัตราการไหลของก๊าซในขณะเผาไล่ตัวประสาน

1.3.4 ตรวจสอบการหดตัว ความหนาแน่น ความแข็ง ความเค้นคราก ความต้านแรงดึง อีลาสติคโมดูลัส และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังการเผาผนึก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ส่วนผสมของตัวประสานที่เหมาะสมกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ซึ่งทำให้สามารถผลิตเองโดยไม่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

1.4.2 ได้สภาวะในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม เพื่อนำไปสู่สมบัติของชิ้นงานที่ต้องการ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

การผลิตชิ้นรูปโลหะผง (MIM) เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนในปริมาณสูง แม้ว่าการผลิตด้วยวิธีนี้จะมีต้นทุนสูงแต่ถ้าชิ้นส่วนที่ต้องการมีความซับซ้อนมาก การผลิตด้วยวิธี MIM ก็นับว่ามีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการนำไปกัด เจาะ กลึง ใส วิธีนี้ยังให้ความหนาแน่นของชิ้นส่วนที่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับวิธีการทางโลหะวิทยาของโลหะผงแบบเดิมที่ต้องผ่านการอัดขึ้นรูปซึ่งทำให้ชิ้นส่วนมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน⁽³⁾ ความหนาแน่นหลังการขึ้นรูปที่สม่ำเสมอนี้ช่วยยับยั้งข้อบกพร่องต่างๆ ที่จะเกิดในขณะกำจัดตัวประสานได้⁽⁶⁾

ขั้นตอนของ MIM สามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมและการผสมวัตถุดิบซึ่งส่วนผสมหลัก คือ โลหะผงและตัวประสาน ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปให้ได้รูปร่างชิ้นงานที่ต้องการ ขั้นตอนการกำจัดตัวประสานเพื่อให้เหลือเฉพาะผงโลหะโดยชิ้นงานยังคงรูปร่างได้อยู่ และขั้นตอนการเผาผนึกเป็นขั้นตอนสุดท้าย

2.1 การเตรียมและการผสมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ใน MIM ได้แก่ โลหะผง และตัวประสาน โลหะผงที่ใช้อาจใช้เพียงชนิดเดียวหรือหลายชนิดผสมกันก็ได้ ขึ้นอยู่กับสมบัติของชิ้นงานที่ต้องการ ส่วนตัวประสานที่ใช้นั้นผสมขึ้นจากวัตถุดิบหลายชนิดเพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมกับกระบวนการ MIM จากนั้นจึงผสมวัตถุดิบทั้งสองชนิดในอัตราส่วนที่กำหนดให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อเตรียมไปผลิตขึ้นรูปต่อไป

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ใน MIM

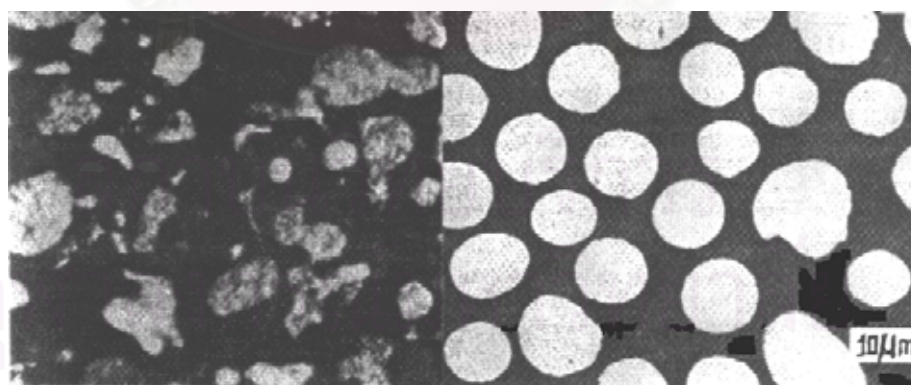
2.1.1.1 โลหะผง

โลหะผงที่ใช้ใน MIM มักผลิตจากกรรมวิธี Gas Atomization (GA) และ Water Atomization (WA) ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของผงจากวิธีการผลิตที่ต่างกัน^(7, 8, 9)

	Gas Atomization	Water Atomization
ราคา	แพง	ถูก
รูปร่าง	กลม	ไม่สม่ำเสมอ
ความหนาแน่นเกาะ	สูง	ต่ำ
ปริมาณตัวประสานที่ต้องการ	น้อย	มาก
เวลาที่ต้องการในการกำจัดตัวประสาน	น้อย	มาก
ความแข็งแรงหลังกำจัดตัวประสาน	ต่ำ	สูง
การหดตัวหลังการเผาผนึก	น้อยและเท่ากันทุกทิศทาง	มากและไม่เท่ากันทุกทิศทาง
ความหนาแน่นหลังการเผาผนึก	สูง	ต่ำ

ผงจาก WA มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค จึงทำให้ชิ้นงานสามารถคงรูปร่างหลังการกำจัดตัวประสานได้ดีกว่าผงรูปร่างกลม⁽⁷⁾ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นหลังจากการกำจัดตัวประสาน แต่ผงที่ผลิตจากวิธี WA จะมีรูพรุนอยู่ภายในผงและมีฟิล์มออกไซด์เคลือบอยู่ และจากรูปร่างไม่สม่ำเสมอนี้ ทำให้ผงไม่สามารถจัดเรียงตัวกันได้แน่นจึงทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึกน้อยกว่าชิ้นงานที่ใช้ผงรูปร่างกลมซึ่งได้จากการผลิตแบบ GA⁽⁸⁾ รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นหน้าตัดภายในของผงที่ผลิตด้วย 2 วิธีนี้โดยรูและเส้นสีเทาในรูป 2.1(a) คือรูปที่พบภายในผง



(a)

(b)

รูปที่ 2.1 หน้าตัดของผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผลิตด้วยวิธี

(a) Water Atomization และ (b) Gas Atomization⁽⁸⁾

จากรูปร่างกลมของผงที่ได้จากวิธี GA ทำให้ในขณะฉีดของผสมเข้าแบบผง จะไม่เกิดการเรียงตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจึงทำให้เกิดการหดตัวที่เท่ากันทุกด้านเมื่อทำการเผา ผนึ่ง และการมีความหนาแน่นบรรจุ (packing density) สูงกว่าทำให้ใช้ตัวประสานน้อยกว่าจึงทำให้มีการหดตัวขณะเผาผนึ่งน้อยกว่าส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานน้อยกว่า

การผสมผงจาก GA และ WA ในอัตราส่วน 3:1 ทำให้ได้ความหนาแน่นเกาะ สูงขึ้น การหดตัวลดลง และราคาถูกลง การนำผงจาก WA ไปบด (milling) จะช่วยปรับปรุงรูปร่างของ ผงทำให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น⁽⁹⁾

2.1.1.2 ตัวประสาน

ตัวประสานทำหน้าที่เป็นตัวพาผงโลหะให้ถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ใน ขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปโดยอยู่ในลักษณะของของไหล หลังจากนั้นจะแข็งตัวทำให้ผงโลหะยึดเกาะกัน ได้เป็นรูปร่างที่ต้องการ และจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน ดังนั้น ตัวประสานจึงต้องมีสมบัติที่เหมาะสมกับวิธี MIM นี้ ซึ่งสมบัติที่ต้องการ ได้แก่⁽⁴⁾

- สมบัติการเปียก (wetting) ช่วยลดความหนืด สามารถเพิ่มสัดส่วนของผงในของผสม (feedstock) และช่วยให้คงรูปอยู่ได้ด้วยแรงแคปิลลารี (capillary) หลังการกำจัดตัวประสานจากการมีตัวประสานเหลืออยู่ แต่ต้องไม่ทำให้เกิดการแยกตัวของผงโลหะกับตัวประสาน

- สายโซ่โมเลกุลสั้น (มวลโมเลกุลน้อย) ทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง ความหนืดลดลง และเวลาที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานลดลง

- การนำความร้อนสูงเพื่อช่วยในการกระจายความร้อน ลดความเค้นจากความร้อน
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนต่ำ
- มีความแข็งแรง ชิ้นงานสามารถจับเคลื่อนย้ายได้หลังการฉีดขึ้นรูป
- มีการสลายตัวหลายช่วงอุณหภูมิซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการกำจัดตัวประสาน

จากสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น ตัวประสานจึงต้องประกอบด้วยส่วนผสมที่มีสมบัติที่หลากหลาย เพื่อให้ได้สมบัติโดยรวมที่ต้องการ โดยส่วนผสมที่จะนำมาผสมกันต้องผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ตัวประสานส่วนมากจะประกอบด้วยโพลีเอทิลีน (PE) หรือโพลีโพรพิลีน (PP) พาราฟินแวกซ์ (PW) และกรดเสตียริก (SA) PE/PP ให้ความยึดตัวของของผสมและความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป PW ให้ความสามารถในการไหลตัวและการเปียก SA เป็นสารหล่อลื่น

ปรับปรุงการยึดเกาะกันของผงกับตัวประสาน และได้ความเป็นเนื้อเดียวกัน⁽⁵⁾ แต่หากมี SA มากจะทำให้ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานหลังการเผาผนึกลดลง เนื่องจากมีคาร์บอนและออกซิเจนเพิ่มขึ้น⁽¹⁰⁾

ปริมาณส่วนผสมที่ให้ ความแข็งแรงกับชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับกระบวนการต่าง ๆ ใน MIM หากมีปริมาณส่วนผสมที่ให้ ความแข็งแรงกับชิ้นงานน้อยจะทำให้ความหนาแน่นลดลง อุณหภูมิที่ต้องใช้ในการฉีดขึ้นรูปลดลงซึ่งช่วยลดการเสื่อมคุณภาพของตัวประสาน ทำให้สามารถนำของผสมที่เคยผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่หากมีปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้ต้องใช้เวลาในการจัดตัวในแม่พิมพ์นาน เกิดการงอขณะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และไม่สามารถรูดรูปร่างได้ขณะกำจัดตัวประสาน⁽¹¹⁾ ปริมาณส่วนผสมที่ให้ ความแข็งแรงมากทำให้ชิ้นงานหลังการเผาผนึกมีความหนาแน่นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากการที่ผงมีการจัดเรียงตัวได้ดีกว่า แต่ทำให้ต้องใช้เวลาในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายเพิ่มขึ้น และกำจัดส่วนผสมที่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ลดลง เนื่องจากส่วนผสมที่ให้ ความแข็งแรงไม่ละลาย และเชื่อมกับผงจึงเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของโมเลกุลส่วนผสมที่ละลายออกจากชิ้นงานสู่ตัวทำละลาย⁽¹²⁾

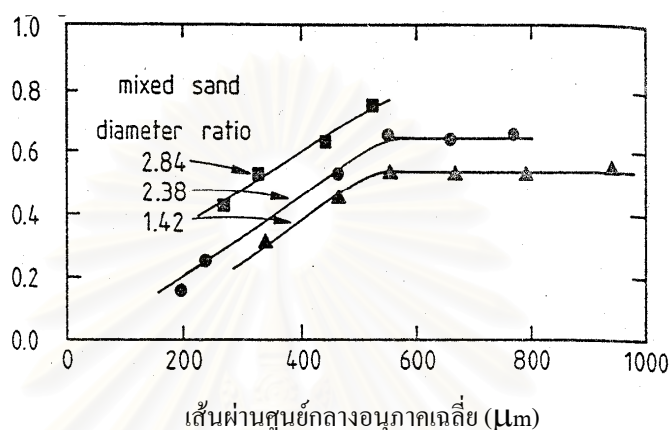
แว็กซ์ซึ่งให้ ความสามารถในการไหลตัวและการเปียกกับตัวประสานมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน การเลือกใช้จึงขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการและความเข้ากันได้กับส่วนผสมอื่น ๆ K.C. Hsu และคณะ⁽¹³⁾ ทำการศึกษาผลของชนิดของแว็กซ์ผสมกับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ต่อ MIM พบว่า ตัวประสานเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยใช้แว็กซ์ที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับ LDPE ซึ่งส่งผลให้ไม่เกิดการเกาะรวมตัวกันของผง และด้วยการใช้แว็กซ์ที่ไม่มีขั้ว แว็กซ์ที่มีขั้วให้ ความหนืดสูงกว่าเนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนกับผงจึงให้ ความแข็งแรงที่มากกว่า แต่มีคาร์บอนตกค้างในชิ้นงานหลังการเผาผนึกมากกว่า

2.1.2 การผสม (Mixing)

เป็นการผสมผงโลหะกับตัวประสานในอัตราส่วนที่กำหนดให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) เพื่อให้แน่ใจว่าผิวของทุกๆ อนุภาคจะถูกครอบคลุมด้วยตัวประสาน ปริมาณตัวประสานที่พอดี คือ ปริมาณตัวประสานที่มากพอที่จะครอบคลุมผงให้ทั่วถึงอย่างสม่ำเสมอ ถ้าปริมาณตัวประสานน้อยเกินไปจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เกิดช่องว่างและทำให้รอยแตกขณะกำจัดตัวประสานได้⁽⁶⁾ รูปร่างที่แตกต่างกันของผงทำให้ต้องการปริมาณตัวประสานต่างกัน ผงที่ผลิตจากวิธี WA ซึ่งมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและผิวขรุขระต้องการปริมาณตัวประสานมากกว่าผงที่ผลิตด้วยวิธี GA ซึ่งมีรูปร่างกลม และผิวเรียบเพื่อให้ตัวประสานสามารถครอบคลุมผงได้อย่างทั่วถึง⁽⁸⁾ ผงที่มีขนาด

และรูปร่างต่างกันอาจทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นได้ การใช้ผงที่มีขนาดเล็กจะช่วยลดปัญหานี้ดังรูปที่ 2.2 แต่อาจทำให้เกิดปัญหาการเกาะรวมตัวกันสูงขึ้น

สัมประสิทธิ์การแบ่งแยก



* สัมประสิทธิ์การแบ่งแยก $C_s = (X_i - X_o)/(X_i + X_o)$; X_i และ X_o คือเศษส่วนของอนุภาคขนาดใหญ่บริเวณครึ่งบนและครึ่งล่างของภาชนะบรรจุตามลำดับ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางคืออัตราส่วนของขนาดอนุภาคสองขนาด

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแยกตัวกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทรายที่มีอัตราส่วนของขนาดแตกต่างกัน⁽⁴⁾

การผสมนั้นยังต้องควบคุมอุณหภูมิ การเตรียมลำดับขั้นตอนการผสม การชั่งน้ำหนัก และการใช้เครื่องผสมที่ให้แรงเฉือนสูง เพื่อให้ได้ของผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อปริมาณการใช้พลังงาน เวลาการผสม และคุณภาพของของผสม เช่น ปริมาณการผสม อัตราการป้อนผงเข้าเครื่องผสม และประเภทของเครื่องผสม

สัดส่วนของผงที่เพิ่มขึ้นต้องการแรงบิดซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนในของผสมมากขึ้นเพื่อความเป็นเนื้อเดียวกัน การเพิ่มความเร็วรอบในการผสมช่วยให้ใช้แรงบิดลดลงและยังทำให้การผสมเสร็จเร็วขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิในการผสมเป็นอีกวิธีหนึ่งในการช่วยลดแรงบิดที่ต้องใช้ เนื่องจากตัวประสานจะขยายตัวและมีความหนืดลดลง อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิต่ำจะให้ความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่า⁽¹⁴⁾

N.H. Loh, S.B. Tor และ K.A. Khor⁽¹⁵⁾ ศึกษาปัจจัยในการผสมที่มีผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของของผสมผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L 85% โดยน้ำหนัก TiC 3% โดยน้ำหนัก และ PAN-31 12% โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการป้อนผงและความเร็วของใบพัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของของผสม โดยอัตราการป้อนผงและความเร็วของใบพัดต่ำจะให้ความเป็นเนื้อเดียวกันดีที่สุด สภาวะการผสมที่ให้ความเป็นเนื้อเดียวกันสูงสุด คือ อุณหภูมิการผสม 60 °C เวลาการผสม 70 นาที อัตราการป้อนผง 10 กรัม/นาที ความเร็วใบพัด 10 รอบ/นาที ใช้ใบพัดประเภท cam และขนาดผง PF 20 (ขนาดเฉลี่ย 10 μm)

2.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

ของผสมจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของตัวประสานจนอยู่ในลักษณะหนืดและถูกฉีดผ่านหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ อุณหภูมิกระบอกฉีดและหัวฉีดต้องควบคุมให้ดีเพราะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของของผสม⁽¹⁶⁾ และเพื่อรักษาสถานะให้คงที่ ส่วนที่แม่พิมพ์นั้นอุณหภูมิต้องต่ำพอที่จะทำให้ของผสมที่ถูกฉีดเข้าไปแข็งตัวได้⁽³⁾

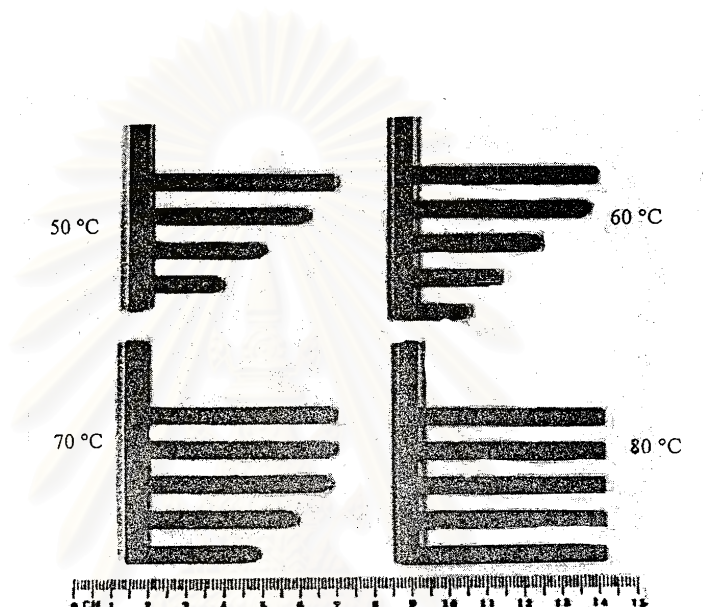
ความบกพร่องและการบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังการเผาประสานอาจมีสาเหตุมาจากขั้นตอนนี้ ดังนั้น จุดมุ่งหมายของขั้นตอนนี้จึงอยู่ที่การขึ้นรูปให้ได้ชิ้นงานที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันโดยปราศจากความบกพร่อง หากเกิดการแยกตัวของผงกับตัวประสานจะเกิดการเกาะรวมกันของผงหรือตัวประสานทำให้ความหนาแน่นหลังการขึ้นรูปไม่สม่ำเสมอ⁽⁶⁾ ปัจจัยหลักคือความหนืดซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการให้แรงเฉือนไปจนถึงลักษณะทางความร้อนของวัสดุเพื่อให้เกิดความเค้นตกค้างน้อยที่สุด

ความหนืดของของผสมจะลดลงเมื่อได้รับอัตราการเฉือนสูงเมื่ออยู่ในหัวฉีด และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเฉือนลดลงขณะอยู่ในแม่พิมพ์⁽⁶⁾ ซึ่งทำให้เกิดการไหลอัด (plug flow) และรอยเชื่อม (weld line) ในขณะที่ฉีดได้หากใช้ตัวประสานที่มีความหนืดต่ำ⁽¹⁷⁾

C.H. Ji และคณะ⁽¹⁶⁾ ได้ทำการศึกษาความบกพร่องของชิ้นงาน MIM ในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปพบว่า การนำความร้อนที่สูงและความร้อนจำเพาะที่ต่ำของผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ทำให้เย็นตัวเร็ว ความหนืดเพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดรอยแหวน (short shot) ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการเพิ่มอุณหภูมิฉีดตั้งรูปที่ 2.3 ส่วนความดันในการฉีดขึ้นรูปที่ต่ำเกินไปทำให้เกิดรอยยุบ (sink mark) และโพรง (cavities) ที่ผิว ความดันที่มากพอจะชดเชยการหดตัวจากการเย็นตัวแต่หากมากเกินไปจะทำให้เกิดรอยแตก (crack)

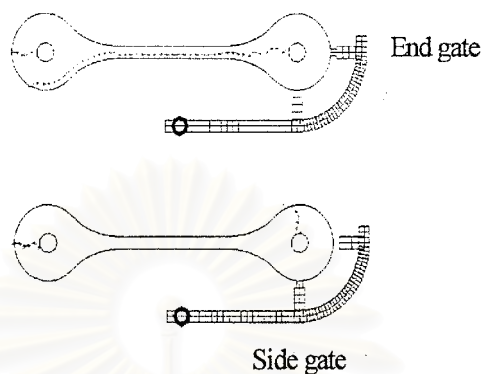
ในบริเวณที่เกิดความเค้นสูง หากไม่เกิดรอยแตกหลังการขึ้นรูปในทันทีความเค้นที่มีอยู่อาจทำให้เกิดรอยแตกในขณะที่เผาไล่ตัวประสานได้

Toru Shimizu และคณะ⁽¹⁸⁾ ได้เปรียบเทียบประเภทของตัวประสานได้แก่ PAN-31 และ PAN-250 ที่มีผลต่อการผสมและการฉีดขึ้นรูป พบว่า PAN-250 ซึ่งมี olefin-hydrocabons ให้การผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันดีกว่า และเมื่อฉีดขึ้นรูปแล้วสามารถนำออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายกว่า



รูปที่ 2.3 รอยแหวนของ comb part ที่ใช้อุณหภูมิการฉีดต่างๆ กัน⁽¹⁶⁾

นอกจากนี้ การออกแบบแม่พิมพ์ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการฉีดขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างกระทันหันเป็นสาเหตุของการแยกตัวของผงกับตัวประสานทำให้ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ การออกแบบแม่พิมพ์ที่ของผสมต้องวิ่งมาชนกัน เช่น ชิ้นงานที่มีรู หรือวงแหวนนั้น อาจทำให้เกิดรอยเชื่อม เนื่องจากอุณหภูมิของผสมลดลงทำให้เนื้อประสานไม่ดีซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 การเพิ่มขนาดทางเข้า (gate size) ช่วยหน่วงการเย็นตัวของของผสม และหากควบคู่ไปกับการลดความเร็วการฉีดจะช่วยลดการแยกตัวของของผสม⁽¹⁶⁾



รูปที่ 2.4 บริเวณที่เกิดรอยเชื่อมเมื่อวางตำแหน่งทางเข้าที่ปลาย และที่ด้านข้างของชิ้นงาน⁽¹⁹⁾

2.3 การกำจัดตัวประสาน (Debinding)

เป็นการกำจัดตัวประสานให้ออกไปจากชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปโดยที่ชิ้นงานยังสามารถคงรูปร่างและไม่เกิดความเสียหายหลังจากตัวประสานออกจากชิ้นงาน สำหรับใน MIM เทคนิคที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักโดยแต่ละประเภทมีเทคนิคย่อย ๆ ได้แก่⁽⁴⁾

การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน (Thermal Debinding)

- กลไกการแพร่ (ความดันต่ำ)
- การแทรกซึม (ความดันสูง)
- wicking (การไหลด้วยแรงแคปิลลารี)

การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย (Solvent Debinding)

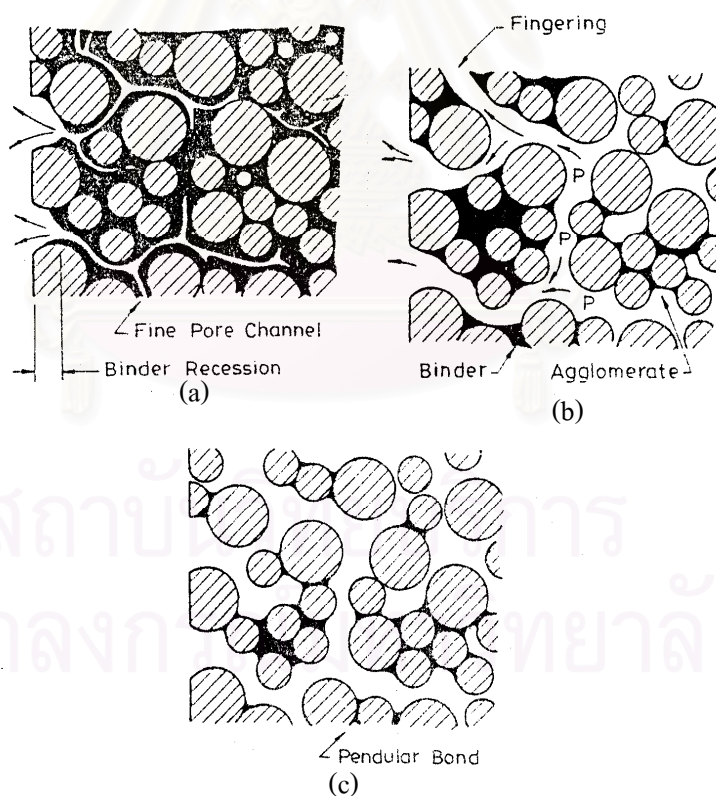
- การสกัด (การแช่ในตัวทำละลาย)
- การใช้ความดันสูง (supercritical)
- การใช้ความร้อนร่วม (ใช้ความร้อนและตัวทำละลาย)

ในงานวิจัยจะขอกว่าถึงเพียง 2 เทคนิค คือ การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนโดยใช้กลไกการแพร่ และการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายด้วยวิธีการสกัด

2.3.1 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนโดยใช้กลไกการแพร่

เป็นการใช้ความร้อนเพื่อให้ตัวประสานระเหย หรือทำปฏิกิริยากับบรรยากาศออกจากชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปแล้ว หลักพื้นฐานของการกำจัดตัวประสาน คือ การที่ของไหลไหลผ่านรูพรุนที่มีความต่อเนื่อง เมื่อเริ่มต้นกำจัดตัวประสาน ตัวประสานที่มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำจะสลายตัวและเกิดเป็นช่องเล็กๆ เมื่อรูพรุนมีขนาดเล็กและมีความดันต่ำ การแพร่ของก๊าซจะเป็นกลไกที่ควบคุมการกำจัดตัวประสานซึ่งในขั้นนี้ต้องใช้อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำเพื่อให้ก๊าซสามารถแพร่ออกจากชิ้นงานได้ทัน จนกระทั่งเกิดรูพรุนที่ใหญ่และต่อเนื่องจึงสามารถเพิ่มอัตราการให้ความร้อนได้ เมื่อขนาดรูพรุนและความดันเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการไหลของ 2 เฟส คือของเหลวและก๊าซร่วมกัน สำหรับของเหลวนั้นความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่ก๊าซจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

K.S. Hwang และ T.H. Tsou⁽⁷⁾ ศึกษากลไกการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนของผง carbonyl iron ในบรรยากาศ H_2 โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของตัวประสานเมื่อกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

(a) ชั้นต้น (b) ชั้นกลาง และ (c) ชั้นสุดท้าย⁽⁷⁾

ขั้นต้น - เกิดรูพรุนขนาดเล็ก ($< 0.8 \mu\text{m}$) ที่ต่อเนื่องกันจากการสลายตัวของตัวประสานที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการแพร่ช้ากว่าอัตราการเกิดก๊าซดังนั้นจึงต้องใช้เวลาเผาที่อุณหภูมิต่ำนาน อัตราการสลายตัวที่ผิวเร็วกว่าภายใน ตัวประสานจึงลดลงจากภายนอกเข้าสู่ภายใน

ขั้นกลาง - เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง เกิดก๊าซมากขึ้นและไม่สามารถออกมาตามช่องได้เร็วพอ ความดันภายในเพิ่มขึ้นจึงผลักตัวประสานออกมาที่ผิวทำให้ได้ตัวประสานได้ดีขึ้น อัตราการกำจัดตัวประสานเพิ่มขึ้นโดยไม่เกิดความเค้นภายในสูงเนื่องจากความดัน

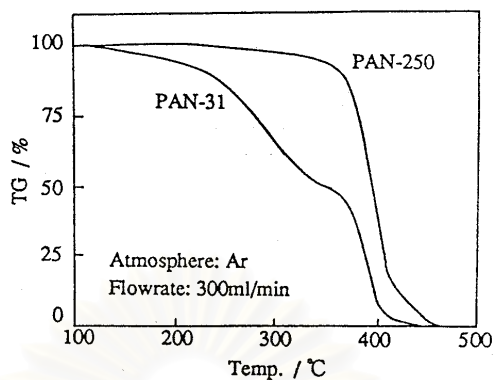
ขั้นสุดท้าย - เหลือตัวประสานอยู่ที่จุดสัมผัสของผงในลักษณะของพันธะเพนดูลาร์ (pendular bonds) ในขณะที่แรงแคปิลลารี (capillary) จะช่วยพยุงผงให้ยังคงรูปร่างของชิ้นงานไว้ได้

2.3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

กำจัดตัวประสานขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ประกอบด้วย ส่วนผสมทางเคมีของตัวประสาน ขนาดชิ้นงาน ขนาดผง ความพรุน อัตราการให้ความร้อน ส่วนประกอบของบรรยากาศ อัตราการไหล และตำแหน่งที่วางชิ้นงานในเตาเผาไล่ตัวประสาน

2.3.1.1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของตัวประสาน

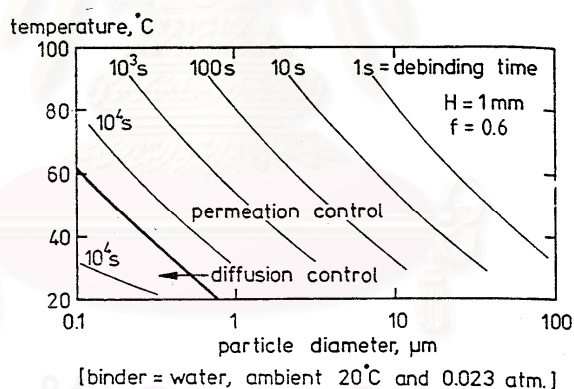
Toru Shimizu และคณะ⁽¹⁸⁾ ทำการเปรียบเทียบประเภทของตัวประสานได้แก่ PAN-31 และ PAN-250 ที่มีผลต่อการกำจัดตัวประสาน พบว่า PAN-250 ซึ่งมี olefin-hydrocarbons มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แคบกว่า PAN-31 ทำให้กำจัดตัวประสานด้วยความร้อนได้ยาก เนื่องจากทุก ๆ ส่วนผสมในตัวประสานจะเกิดการสลายตัวและออกจากชิ้นงานพร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดความดันภายในมากจึงอาจทำให้เกิดความบวมพร่องในขณะที่กำจัดตัวประสานได้



รูปที่ 2.6 กราฟ Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ของ PAN-250 และ PAN-31⁽¹⁸⁾

2.3.1.1.2 ขนาดผง

เมื่อขนาดผงเล็กลงจะหน่วงการกำจัดตัวประสานในขณะที่เผาไล่ตัวประสาน ดังรูปที่ 2.7 เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากขึ้นจึงเป็นตัวต้านการไหลของตัวประสาน



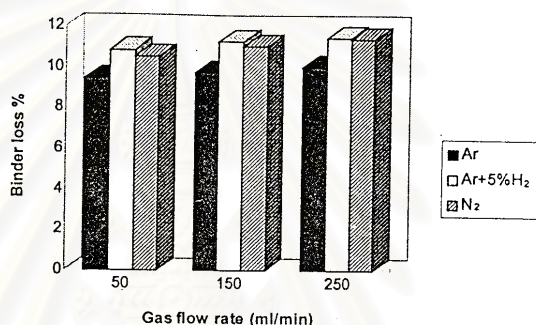
รูปที่ 2.7 การกำจัดน้ำออกจากชิ้นงานที่มีสัดส่วนความหนาแน่น 0.6 และจุดน้ำค้าง 20 °ซ⁽⁴⁾

2.3.1.1.3 อัตราการให้ความร้อน

ในช่วงแรกของการกำจัดตัวประสานจะเกิดความดันออก เนื่องจาก การขยายตัวจากความร้อนที่ไม่เท่ากันของผงกับตัวประสาน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้น ๆ ได้ ดังนั้น อัตราการให้ความร้อนในขั้นแรกต้องช้าเพื่อให้มีการสร้างรูพรุนเปิดที่ต่อเนื่อง⁽¹⁶⁾

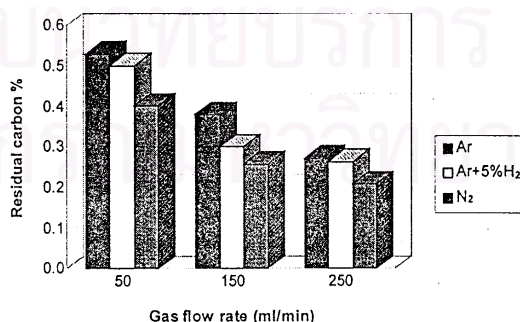
2.3.1.1.4 บรรยากาศ

Ji Chun Hai และคณะ⁽²⁰⁾ ศึกษาถึงผลของบรรยากาศที่ต่างกันในการกำจัดตัวประสาน PAN-31 ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L พบว่า บรรยากาศในการกำจัดตัวประสานได้มากที่สุดคือ Ar+5%H₂ N₂ และ Ar ตามลำดับ N₂ กำจัดตัวประสานได้มากกว่า Ar เนื่องจากเป็นก๊าซที่เบาและเล็กกว่า จึงสามารถแทรกซึมเข้าไปในชิ้นงานได้ดีกว่า เมื่อกำจัดตัวประสานได้มากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้น บรรยากาศ N₂ ทำให้เกิด Cr₂N ในขณะที่ Ar กับ Ar+5%H₂ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของผ



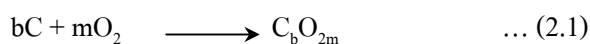
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับบรรยากาศการกำจัดตัวประสาน และอัตราการไหลของก๊าซที่ต่างกัน⁽²⁰⁾

จากรูปที่ 2.9 คาร์บอนตกค้างพบมากเมื่อใช้บรรยากาศ Ar และน้อยที่สุดใน N₂ เนื่องจากสามารถกำจัดตัวประสานได้น้อยและมากขึ้นตามลำดับ ส่วน Ar+5%H₂ นั้น H₂ จะทำปฏิกิริยากับ C เกิด CH₄ และเมื่อมาสัมผัสกับชิ้นงานจะสลายตัวให้ C ที่ชิ้นงาน



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับคาร์บอนตกค้างกับบรรยากาศการกำจัดตัวประสาน และอัตราการไหลของก๊าซที่ต่างกัน⁽²⁰⁾

การเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บูไรเซชัน (decarburation) ของชิ้นงานถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีดักชัน⁽²¹⁾ ดังสมการ



ก๊าซที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาดีคาร์บูไรเซชันสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีดักชัน คือ CO และ CH₄ ตามลำดับ

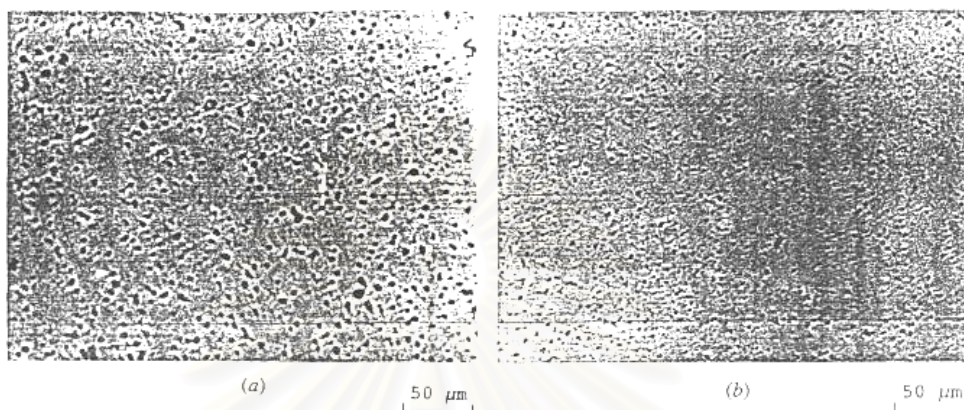
ในบรรยากาศ N₂ ปฏิกิริยาดีคาร์บูไรเซชันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง C กับ O ที่อยู่ในรูปของสิ่งสกปรกในบรรยากาศและผงเป็นหลัก ส่วนใน H₂ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง C กับ H เป็นหลัก

J.A. Moore และคณะ⁽²²⁾ ศึกษาความแตกต่างของบรรยากาศที่มีผลต่อการกำจัดตัวประสานของชิ้นงานทองแดงที่ผลิตด้วย MIM พบว่า บรรยากาศที่ให้ปริมาณรูพรุนต่อเนื้อสูงสุดคือ อาร์กอน สูญญากาศ และอากาศตามลำดับ เนื่องจากอาร์กอนช่วยพาตัวประสานที่สลายตัวออกมาให้ออกไปได้ดีกว่าสูญญากาศซึ่งไม่มีก๊าซเป็นตัวพาออกไป สำหรับอากาศนั้นทำให้เกิดออกไซด์ชั้นที่ผิวของผง ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้ไปลดขนาดของรูพรุนทำให้มีปริมาณรูพรุนต่อเนื้อน้อย อาร์กอนทำให้เกิดการทรุด (slumping) เพราะเกิดความดันย่อยของตัวประสานที่ระเหยออกไปสูง ในสูญญากาศสามารถควบคุมรูปร่างของชิ้นงานได้ดีเนื่องจากความดันไอของตัวประสานต่ำ ส่วนอากาศนั้นปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดเร็วกว่าที่ก๊าซจะออกไปทำให้เกิดความดันมากในชิ้นงาน ทำให้เกิดความเสียหายและควบคุมรูปร่างไม่ได้

2.3.1.1.5 อัตราการไหลของก๊าซ

การใช้อัตราการไหลของก๊าซต่ำจะลดอัตราการกำจัดคาร์บอนทำให้มีคาร์บอนตกค้างเพิ่มขึ้น และกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังทำให้ความดันภายในเพิ่มขึ้น การใช้เวลาการกำจัดตัวประสานเพิ่มขึ้นช่วยลดความดันและลดคาร์บอนตกค้างแต่จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวและรูขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะปลดแรงดึงของชิ้นงาน⁽⁵⁾ การใช้อัตราการไหลของก๊าซสูงทำให้กำจัดตัวประสานได้มากขึ้น และมีคาร์บอนตกค้างน้อยลงดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 เนื่องจาก

ไปลดความดันย่อยของตัวประสานที่ระเหยออกมา⁽⁸⁾ แต่หากใช้อัตราการไหลของก๊าซสูงเกินไป (550 มิลลิลิตร/นาทีก) จะทำให้เกิดการพอง (blister) เพราะจะเกิดความดันรอบ ๆ ชิ้นงาน⁽¹⁶⁾

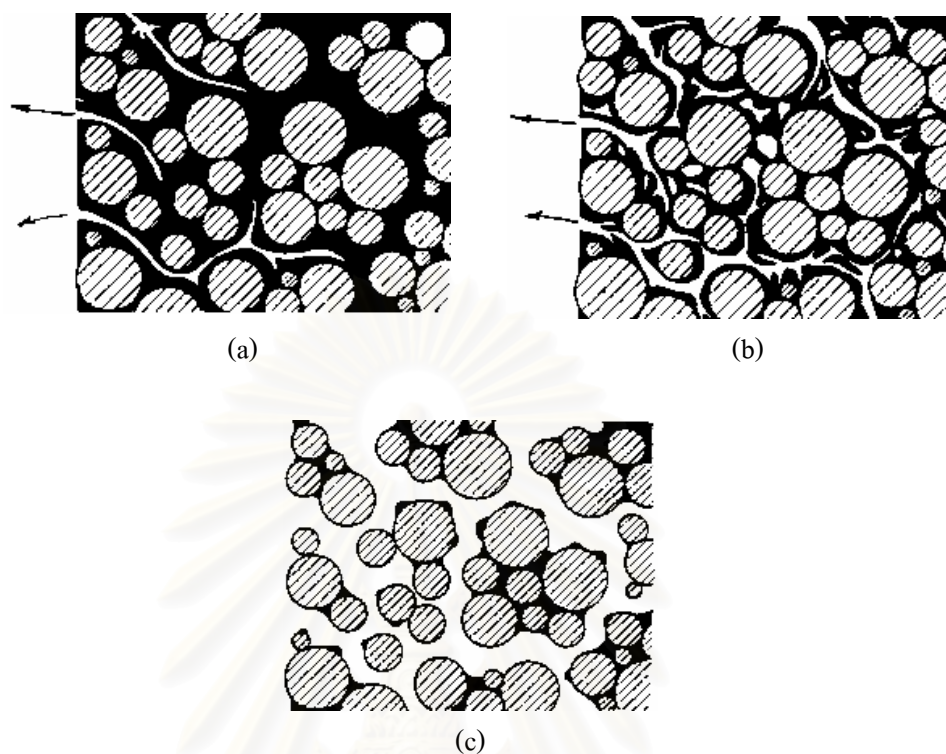


รูปที่ 2.10 รูปพรุนของชิ้นงานหลังการเผาผนึกแล้วโดยใช้อัตราการไหลของก๊าซขณะกำจัดตัวประสาน (a) 300 และ (b) 1000 มิลลิลิตร/นาทีก⁽⁵⁾

2.3.2 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

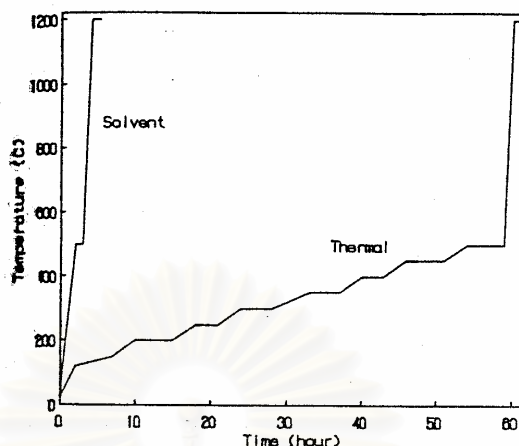
เป็นการแช่ชิ้นงานในของไหลที่สามารถละลายส่วนผสมของตัวประสานบางชนิดที่เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วหรือละลายโมเลกุลเล็ก ๆ ที่มีขั้วได้บ้างเล็กน้อย⁽⁸⁾ อัตราการกำจัดตัวประสานถูกควบคุมโดยการแพร่ของโมเลกุลส่วนผสมของตัวประสาน

เมื่อแช่ชิ้นงานในตัวทำละลาย ส่วนผสมที่สามารถละลายได้เริ่มละลายจากผิวของชิ้นงานและเกิดเป็นช่องรูปพรุนขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.11 (a) เมื่อการกำจัดตัวประสานดำเนินต่อไป รูปพรุนเดิมมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดรูขนาดเล็กขึ้นใหม่อย่างต่อเนื่องเมื่อตัวทำละลายแทรกซึมเข้าไปในชิ้นงานซึ่งทำให้มีผิวสัมผัสระหว่างตัวประสานกับตัวทำละลายมากขึ้น (รูปที่ 2.11 (b))



รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของตัวประสานในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายตามด้วยความร้อน (a) ในขั้นของการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย (b) เมื่อเริ่มต้นกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน และ(c) ช่วงกลางของการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน⁽²³⁾

หลังจากการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายแล้วยังคงต้องนำชิ้นงานไปกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนเพื่อกำจัดตัวประสานที่ไม่ละลายต่อไป เมื่อเทียบเวลาที่ต้องใช้ทั้งหมดการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายแล้วตามด้วยความร้อนซึ่งใช้เวลารวมทั้งหมดประมาณ 10-15 ชั่วโมงใช้เวลาน้อยกว่าการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 45-60 ชั่วโมงมาก (รูปที่ 2.12) เนื่องจากการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายเป็นการเปิดช่องที่ต่อเนื่องภายในชิ้นงาน ก๊าซที่เกิดขึ้นขณะเผาไล่ตัวประสานที่เหลือสามารถออกไปตามรูพรุนเปิดเหล่านี้โดยไม่เกิดความดันภายในชิ้นงาน การเผาไล่ตัวประสานต่อจึงสามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.12 ตารางการให้ความร้อนของการกำจัดตัวประสานและการเผาไหม้สำหรับการกำจัดตัวประสานด้วยสารละลาย และด้วยความร้อน⁽⁵⁾

แม้ว่าการกำจัดตัวประสานด้วยสารละลายให้อัตราการกำจัดตัวประสานได้สูงกว่าการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนมาก แต่สามารถกำจัดตัวประสานได้น้อยกว่าจึงทำให้มีคาร์บอนตกค้างสูงกว่า Y.L. Ho และ S.T. Lin⁽⁵⁾ ศึกษาผลของการใช้วิธีการกำจัดตัวประสานที่ต่างกันต่อปริมาณคาร์บอนของเหล็กกล้า Fe-2%Ni ในบรรยากาศ 100 %H₂ ด้วยอัตราการไหล 1 ลิตร/นาที พบว่าการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนมีคาร์บอนเหลืออยู่ 0.0143 % โดยน้ำหนัก ในขณะที่การกำจัดตัวประสานด้วยสารละลายมีคาร์บอนเหลืออยู่ 0.32 % โดยน้ำหนัก

การแตก การโค้งงอ เป็นปัญหาที่พบในขั้นตอนการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายนี้ ซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมการบวม (swelling) ของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย ดังนั้น หากตัวประสานมีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมในปริมาณมากจะทำให้ชิ้นงานมีการขยายตัวมาก เมื่อนำชิ้นงานออกจากตัวทำละลาย ตัวทำละลายที่ยังคงอยู่ภายในจะกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการขยายตัวและความดันภายในชิ้นงาน ส่งผลให้ชิ้นงานแตก แต่หากตัวประสานมีปริมาณพอลิเมอร์น้อย การควบคุมมิติของชิ้นงานในขณะที่กำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายจะทำได้ยาก

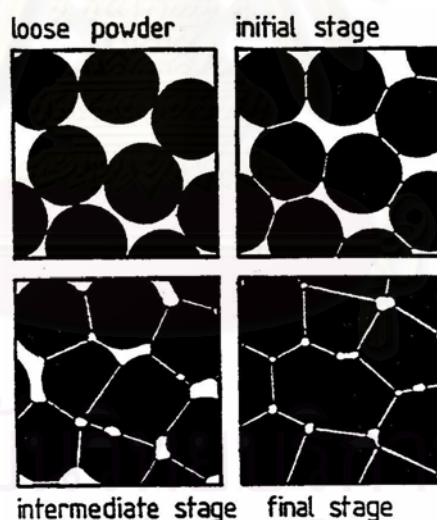
K.S. Hwang, H.K. Lin และ W. Hwang⁽²⁴⁾ ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการขยายตัวในขณะที่กำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย พบว่า การใช้ผงขนาดเล็กทำให้เกิดการขยายตัวของชิ้นงานมากและเร็วกว่าผงขนาดใหญ่ การบวมของชิ้นงานมากขึ้นเมื่อใช้เฮกเซน (hexane) และโพลีเอททิลีน มากกว่าการใช้เฮปเทน (heptane) และโพลีโพรพิลีน เป็นตัวทำละลายและเป็นส่วนผสมของตัวประสานตามลำดับ เนื่องจากเฮกเซนมีมวลโมเลกุลเล็กกว่า จึงสามารถแทรกซึมได้ดีกว่าการขยายตัวจึง

มากกว่า เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นการขยายตัวเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วขึ้น ชิ้นงานที่มีความหนามากมีการขยายตัวลดลงเนื่องจากใจกลางชิ้นงานด้านการขยายตัวของส่วนนอกซึ่งสัมผัสกับตัวทำละลายมากกว่า จากผลนี้ทำให้หากชิ้นงานมีความหนาไม่เท่ากันอาจเกิดการแตกและบิดเบี้ยวจากการขยายตัวที่ไม่เท่ากันในแต่ละส่วนได้

2.4 การเผาผนึก (Sintering)

เป็นการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุผงเพื่อให้เกิดการเชื่อมผนึกกันของผง การผนึกกันเกิดจากการเคลื่อนที่ในระดับอะตอมที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปกลไกการแพร่จะเป็นกลไกหลัก

การเผาผนึกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกผงจะเกิดพันธะขึ้นที่จุดสัมผัสระหว่างผง และผิวสัมผัสจะเพิ่มมากขึ้นทำให้มีความเรียบมากขึ้น นำไปสู่ขั้นกลาง ซึ่งโครงสร้างของรูเป็นลักษณะเปิดอย่างต่อเนื่อง และมีความหนาแน่น 70-92 % ของทฤษฎี ในขั้นสุดท้ายรูจะเป็นรูปิดกลมและหดตัวลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากการแพร่ไปตามช่องว่าง (vacancy) ไปที่ขอบเกรน (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 การพัฒนาของพันธะระหว่างอนุภาคและการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างในขณะเผาผนึก⁽⁴⁾

N.H. Loh และคณะ⁽²¹⁾ ศึกษาถึงผลของปัจจัยการเผาผนึกต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยใช้อุณหภูมิในการเผาผนึก 1050, 1200 และ 1350 °ซ อัตราการให้ความร้อน 5, 10 และ 15 °ซ/นาทึ เป็นเวลา 60 90 และ 120 นาที ได้ผลสรุปดังตารางที่ 2.2

ที่ 1050 °ซ เป็นอุณหภูมิเริ่มเกิดคอก เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นจึงได้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น ส่วนการให้อุณหภูมิให้ความร้อนสูงขึ้นจะทำให้เกิดรูพรุน จึงทำให้ความหนาแน่นลดลง และเมื่อใช้เวลาเพิ่มขึ้นแม้จะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแต่ทำให้เกรนโตสมบัติทางกลจึงค่อยลง

ตารางที่ 2.2 ผลของปัจจัยการเผาผนึกต่อการหดตัว ความหนาแน่น และสมบัติทางกล ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

ปัจจัยการเผาผนึก	การหดตัวเฉลี่ย	ความหนาแน่น	ความแข็ง	ความเค้นประลัย
อุณหภูมิ ↑	↑	↑	↑	↑
อัตราการให้ความร้อน ↑	↓	↓	↓	↓
เวลา ↑	↑	↑	↓	↓

วิธีการในการกำจัดตัวประสานส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานเช่นกัน N.H. Loh และ R.M. German⁽²⁵⁾ พบว่าการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายทำให้การหดตัวของชิ้นงานหลังการเผาผนึกสูงกว่าการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนในสุญญากาศ

การลดขนาดผงช่วยให้การเผาผนึกเร็วขึ้นแต่สิ่งสกปรกก็จะสูงขึ้นด้วย⁽²²⁾ ซึ่งถ้าอยู่ในรูปของสารประกอบจะหน่วงกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นในขณะเผาผนึก เนื่องจากการยากในการเผาผนึกระบบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งมีเฟสที่ไม่ละลายอยู่⁽⁵⁾

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุผง

วัสดุผงที่ใช้ในการทดลอง คือ ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 316L ซึ่งผลิตด้วยวิธี Water Atomization ของบริษัท PACIFIC METALS CO., LTD. มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 สมบัติของโลหะผงแสดงในตารางที่ 3.2 (การกระจายตัวของผงแสดงในภาคผนวก ข.)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 316L

ชนิดวัสดุผง	ส่วนผสมทางเคมี (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	O
SUS 316L	0.019	0.82	0.76	0.018	0.006	12.52	16.47	2.11	0.04	0.302

ตารางที่ 3.2 สมบัติของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 316L

ชนิดวัสดุผง	ขนาดเฉลี่ย (μm)	ความหนาแน่นเกาะ (กรัม/ลบ.ซม.)
SUS 316L	10.0	4.42

3.1.2 ตัวประสาน

ตัวประสานที่ใช้ในการทดลองผสมขึ้นจาก พาราฟินแวกซ์ (PW) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และกรดสเตียริก (SA) เป็นส่วนประกอบหลัก และมีการผสมน้ำมันปาล์มในบางส่วนผสมเพื่อช่วยเพิ่มความหนืดให้กับตัวประสาน สมบัติของส่วนผสมแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของส่วนประกอบของตัวประสาน

วัสดุ	จุดหลอมเหลว (°ซ)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)
PW	58-60	0.91
LDPE LD1630J ^a	105	0.916
LD1450J ^b	103	0.914
SA	54 (min)	0.85
น้ำมันปาล์ม	15	0.92

^a อัตราการไหลของของเหลว 30 กรัม/10 นาที ^b อัตราการไหลของของเหลว 50 กรัม/10 นาที

3.1.3 ก๊าซ

บรรยากาศในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนใช้ก๊าซ 2 ชนิด คือ อาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% และอากาศ

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมตัวประสาน Plastic Corder
2. ชุดอุปกรณ์ Thermal Gravimetry Analysis (TGA) NETZSCH STA 409C
3. ชุดอุปกรณ์ Premixing (ประกอบด้วย หม้อผสมที่ติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิ และใบพัด)
4. เครื่อง Kneader ; Model PBV-0.3
5. เครื่อง Injection Molding ; Model BOY 15/5 No.4568
6. เตา Debinding ; LENPON FURNACE 1500°C
7. เตา Sintering HT 1800
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก และชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่น METTLER TOLEDO AG 204
9. เครื่อง Scanning Electron Microscope ; JEOL JSM 5410 และ JEOL JSM 6301F
10. เครื่องวัดความแข็ง Instron UHM 250
11. เครื่องทดสอบแรงดึง Instron UTM 4502
12. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง OLYMPUS BM

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การทดสอบและเตรียมตัวประสาน

ทดสอบสมบัติส่วนผสมของตัวประสานก่อนการผสมตัวประสานเพื่อให้รู้ถึงสมบัติของแต่ละส่วนผสม จากนั้นจึงผสมตัวประสานโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของส่วนผสม แล้วทำการทดสอบสมบัติของตัวประสานเพื่อหาส่วนผสมที่ทำให้ได้ตัวประสานที่มีสมบัติเหมาะสมกับกระบวนการ MIM

3.3.1.1 การทดสอบสมบัติส่วนผสมของตัวประสาน

นำ LDPE, PW, SA และน้ำมันปาล์มมาทดสอบสมบัติที่ต้องการใน MIM ได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว และความสามารถในการเปียก

อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และช่วงอุณหภูมิการสลายตัว ใช้ TGA ในการทดสอบ โดยใช้บรรยากาศ 2 ชนิด คือ อากาศ และอาร์กอน เพื่อให้เป็นบรรยากาศที่เหมือนกับบรรยากาศที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนในงานวิจัยนี้ โดยใช้อัตราการให้ความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ และอัตราการไหลของก๊าซ 50 มิลลิลิตร/นาท

สำหรับการจำลองการหาความสามารถในการเปียกของส่วนผสมของตัวประสานบนผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ทำโดยวาง LDPE หรือ PW ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของตัวประสาน น้ำหนัก 0.5 กรัม ไว้บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ผ่านการขัดเงาเพื่อกำจัดตัวแปรในเรื่องของความหยาบผิว จากนั้นให้ความร้อนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งได้แก่ 105 115 และ 125°C คงไว้ 30 นาทีในแต่ละอุณหภูมิเพื่อให้สารได้รับความร้อนจนถึงภายในและมีรูปร่างคงที่ ถ่ายรูปลักษณะของสารในแต่ละอุณหภูมิ

3.3.1.2 การเตรียมและทดสอบตัวประสาน

ทำการผสมตัวประสานที่ผสมขึ้นจาก LDPE, PW, SA และน้ำมันปาล์ม ด้วยเครื่อง Plastic Corder ที่อุณหภูมิ 125 °ซ เป็นเวลา 10 นาที โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของส่วนผสมดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวประสานที่ผลิตจาก LDPE, PW, SA และน้ำมันปาล์ม

Code	LDPE (LD1630J;A , LD1450J;B)	PW	น้ำมันปาล์ม	SA
A4005 (B4005)	40	60	-	+5 wt%
A4010 (B4010)	40	60	-	+10 wt%
A4505 (B4505)	45	55	-	+5 wt%
A4510 (B4510)	45	55	-	+10 wt%
B4505P*	45	45	10	+5 wt%

* ตัวประสานที่ได้จากการเลือกตัวประสานที่เหมาะสมในขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดสอบสมบัติของตัวประสาน ได้แก่ การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ความหนืด อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว ความสามารถในการเปียก เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลง

การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของตัวประสานเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานโดยหลอมตัวประสานหล่อเป็นทรงกระบอกแล้วตัดส่วนที่หัดเป็นหลุมลึกทิ้ง จากนั้นวัดปริมาตรของชิ้นงานแล้วจึงนำชิ้นงานไปหลอมในกระบอกดวงอีกครั้งที่ 125°ซ เพื่ออ่านค่าปริมาตรของตัวประสานในสภาวะของเหลว นำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ความหนืดทดสอบโดยการหลอมตัวประสานในอ่างน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิ 100, 105, 110, 115, 120 และ 125°ซ และใช้แท่งแก้วคนตัวประสานเพื่อสังเกตความหนืดของตัวประสานทุกตัวเทียบกันในแต่ละอุณหภูมิ

สำหรับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว และความสามารถในการเปียก ทำการทดสอบเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.1.1 (ทำการทดสอบเฉพาะ A4505 B4505 และ 4505P ซึ่งเป็นตัวประสานที่ให้ผลในการผสมก่อน (premixing) ที่ดี)

3.3.2 การทดสอบและเตรียมของผสม

3.3.2.1 การผสมก่อน (Premixing)

ผสมผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L 60% โดยปริมาตร กับตัวประสาน 40% โดยปริมาตร ในชุดอุปกรณ์ Premixing โดยใช้ความเร็วใบพัด 60 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 125 °ซ เป็นเวลา 60 นาที

3.3.2.2 การผสม (Mixing)

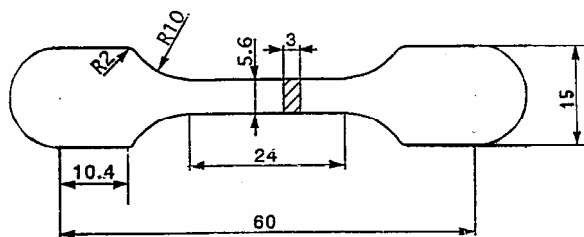
นำของผสมที่ใช้ตัวประสานที่เลือกแล้วมาผสมกันอีกครั้งใน Twin Screw Kneader เพื่อให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น โดยใช้ความเร็วรอบ 96 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 110 °ซ เป็นเวลา 20 นาที ศึกษาการกระจายตัวของผงในแต่ละตัวประสานหลังการผสมก่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง

หลังจากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของตัวประสาน และศึกษาการกระจายตัวของผงในแต่ละตัวประสานแล้ว ทำการเลือกตัวประสานที่มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนน้อย มีความหนืดมาก และมีการกระจายตัวของผงในตัวประสานที่ดี 3 ส่วนผสมเพื่อนำไปฉีดขึ้นรูปต่อไป

3.3.3 การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 3.1 โดยปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูป ได้แก่ ตำแหน่งและความกว้างของทางเข้า อุณหภูมิ (อุณหภูมิกระบอกฉีด อุณหภูมิหัวฉีด และอุณหภูมิแม่พิมพ์) ความดัน ความเร็วในการฉีด และปริมาณสารที่ต้องใช้ ดังแสดงในตารางที่ 3.5 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปเมื่อใช้ตัวประสานต่างชนิดกัน

ลักษณะและตำแหน่งของทางเข้าแสดงในรูปที่ 3.2 โดยใช้ความหนา และความยาวทางเข้า 0.3 และ 0.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ

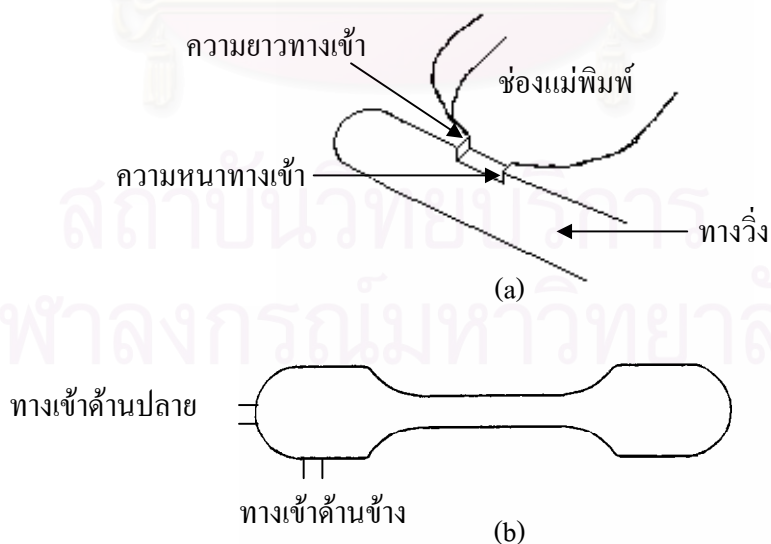


รูปที่ 3.1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วย มิลลิเมตร)

ตารางที่ 3.5 การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูป

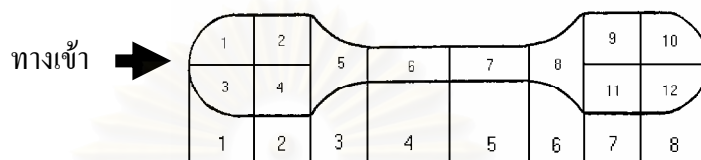
ตัวแปร	ช่วงการปรับเปลี่ยน
ตำแหน่งทางเข้า	ด้านข้าง และด้านปลาย
ความกว้างทางเข้า	2.5 5 10 และ 15 มิลลิเมตร
อุณหภูมิ - กระบอกฉีด	90 – 120 °ซ
- หัวฉีด	40 – 90 °ซ
- แม่พิมพ์	25 – 40 °ซ
ความดัน	700 – 1100 ปอนด์/ตารางนิ้ว*
ปริมาณสารที่ต้องใช้ (วัดจากระยะถอยหลังของเกลียว)	15 – 20 มิลลิเมตร

* 1 ปอนด์/ตารางนิ้ว = 6.895 กิโลปาสคาล



รูปที่ 3.2 (a) ลักษณะ และ (b) ตำแหน่งของทางเข้าในการทดลอง

หลังการฉีดขึ้นรูปด้วยสภาวะที่เหมาะสมแล้ว ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของผงในตัวประสานด้วย SEM และความหนาแน่นในแต่ละบริเวณของชิ้นงานด้วยการแทนที่น้ำโดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 12 ส่วนดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การแบ่งชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามระยะห่างจากทางเข้าด้านปลาย เพื่อทำการวัดความหนาแน่นในแต่ละบริเวณ

3.3.4 การกำจัดตัวประสาน (Debinding)

การกำจัดตัวประสานแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย และการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

3.3.4.1 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

ตัวทำละลายที่ใช้ คือ ปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether) ซึ่งมีสมบัติในการละลาย PW, SA และน้ำมันปาล์ม แซ่ชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ได้จากขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปลงในอ่างอีเทอร์ซึ่งมีการกวนสารตลอดเวลา เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ความสามารถในการละลายและอัตราการละลายของสารจะสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น ในงานวิจัยจึงเลือกอุณหภูมิ 40°C เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย ปรับเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สภาวะในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

สภาวะที่	ลักษณะการทดลอง
1	แช่ในอีเทอร์ 40 ^o ซ จนกระทั่งสามารถกำจัดตัวประสานได้มากกว่า 45% โดยน้ำหนัก แล้วนำไปอบแห้งที่ 50 ^o ซ 45 นาที
2	แช่ในอีเทอร์ 30 ^o ซ 1 ชั่วโมงแล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 40 ^o ซ โดยแช่ไว้จนกระทั่งสามารถกำจัดตัวประสานได้มากกว่า 45% โดยน้ำหนัก แล้วนำไปอบแห้งที่ 50 ^o ซ 45 นาที
3	แช่ในอีเทอร์ 30 ^o ซ 1 ชั่วโมง นำขึ้นมาอบแห้งที่ 50 ^o ซ 45 นาที แล้วนำกลับไปแช่ในอีเทอร์ 40 ^o ซ จนกระทั่งสามารถกำจัดตัวประสานได้มากกว่า 45% โดยน้ำหนัก แล้วนำไปอบแห้งที่ 50 ^o ซ 45 นาที

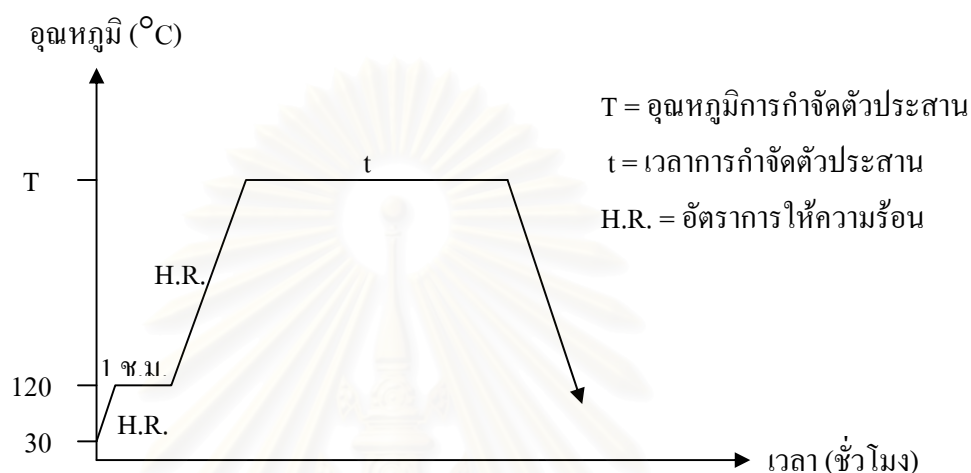
หาเปอร์เซ็นต์การกำจัดตัวประสานทำโดยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการกำจัดตัวประสานเพื่อหาน้ำหนักที่หายไป และสังเกตความเสียหายต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงาน จากนั้นจึงเลือกสภาวะที่สามารถกำจัดตัวประสานได้ดีที่สุด

เนื่องจากเมื่อทำการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายแล้ว ลักษณะตัวประสานที่ผิวยังคงเต็มไปด้วย PW ซึ่งไปปิดรูพรุนที่ต้องการ ทำให้ในขั้นตอนการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน ก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของตัวประสานที่เหลืออยู่สามารถออกมาสู่บรรยากาศได้ยาก เกิดความดันขึ้นภายในชิ้นงาน และอาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับชิ้นงานได้ ดังนั้นจึงทำการเปิดช่องให้กับผิวชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายด้วยสภาวะที่ดีที่สุด โดยแช่ชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายแล้วในอีเทอร์บริสุทธิ์อุณหภูมิ 40^oซ ทิ้งไว้ 1, 2, 5 และ 10 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งที่ 50^oซ 45 นาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM เพื่อหาเวลาที่สามารถเปิดช่องให้กับผิวชิ้นงานได้มากที่สุด

3.3.4.2 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

นำชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายแล้วมากำจัดตัวประสานด้วยความร้อน โดยตัวแปรในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนที่ทำศึกษา ประกอบด้วย บรรยากาศ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน อัตราการไหลของก๊าซ เวลา และชนิดของตัวประสาน

เนื่องจากชิ้นงานผ่านการกำจัดตัวประสานบางส่วนด้วยตัวทำละลายแล้ว ดังนั้นแผนภูมิการให้ความร้อนในขั้นตอนนี้จึงเป็นการให้ความร้อนเพียง 2 ชั้น คือ ที่ 120°C เพื่อไล่ความชื้น และที่ T เพื่อกำจัดตัวประสานที่เหลือ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภูมิการให้ความร้อนในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

ในการทดลองเลือกใช้บรรยากาศในการกำจัดตัวประสาน 2 ชนิด คือ อากาศ และ อาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% จากหัวข้อ 4.2.4.1 และ 4.2.4.2 ได้ทำการเลือกอุณหภูมิการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนจากผลการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิ 370°C และในบรรยากาศอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% ที่อุณหภูมิ 450°C ตามลำดับ

ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อน อัตราการไหลของก๊าซ และเวลาในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนตามตารางที่ 3.7 เพื่อหาสภาวะที่สามารถกำจัดตัวประสานได้รวดเร็วที่สุดโดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย

ตารางที่ 3.7 การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

ตัวแปร	ช่วงการปรับเปลี่ยน
อัตราการให้ความร้อน	100, 200 และ $300^{\circ}\text{C/ชั่วโมง}$
อัตราการไหลของก๊าซ	223, 298.5 และ 374 มิลลิลิตร/นาที
เวลา	4, 5, 6 และ 7 ชั่วโมงสำหรับบรรยากาศอากาศ 1 ชั่วโมงสำหรับบรรยากาศอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5%

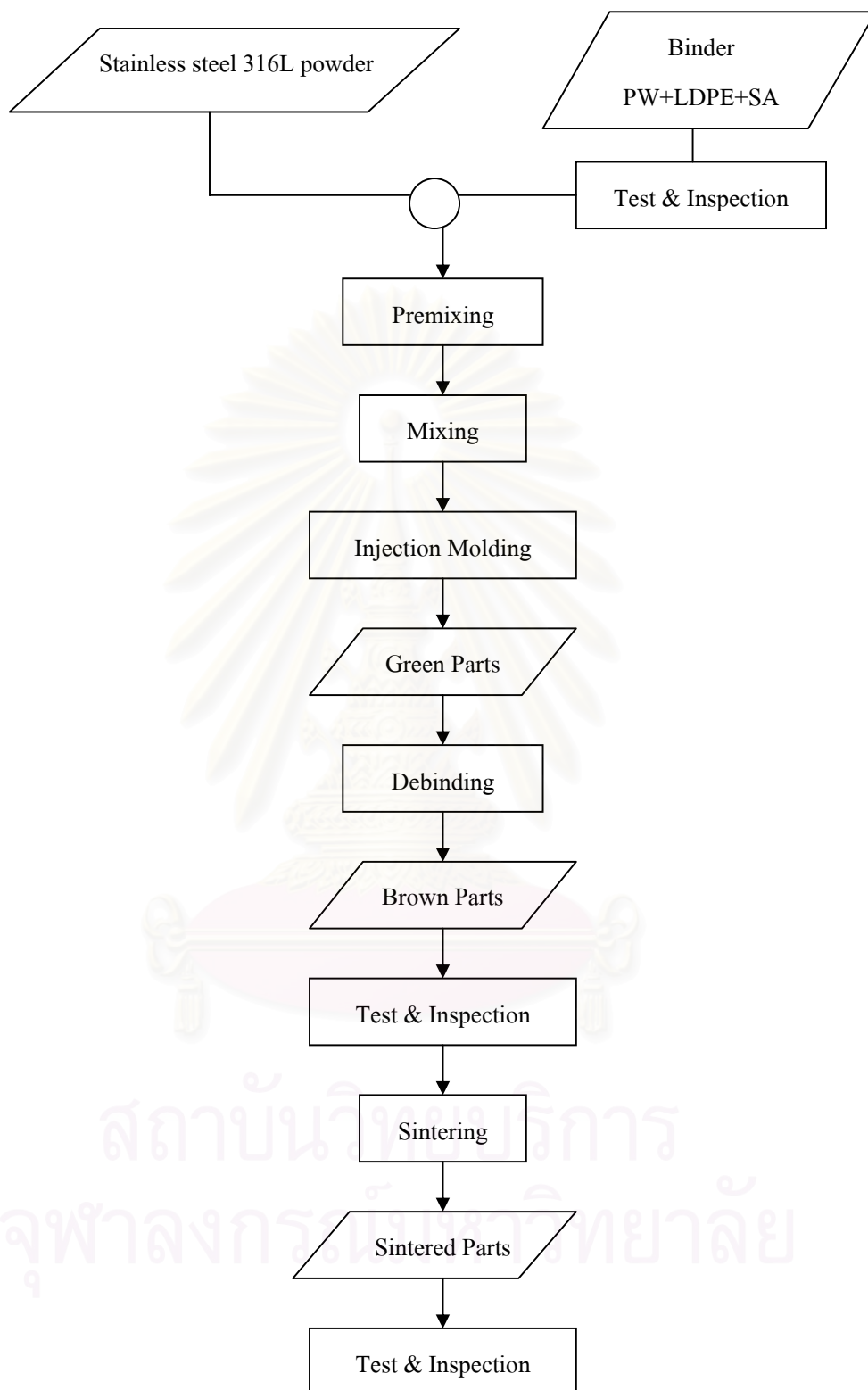
หาเปอร์เซ็นต์การกำจัดตัวประสานโดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานเปรียบเทียบ ก่อนและหลังกำจัดตัวประสาน ตรวจสอบความเสียหายภายนอกที่เกิดจากขั้นตอนนี้

3.3.5 การเผาผนึก (Sintering)

เผาชิ้นงานที่กำจัดตัวประสานแล้วในบรรยากาศไฮโดรเจน โดยใช้อัตราการไหลของ ก๊าซ 150 ลิตร/ชั่วโมง ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาผนึก 1300, 1325, 1350, 1375 และ 1400 °C โดยคงเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเลือกอุณหภูมิที่ให้ความหนาแน่นและความแข็งของชิ้นงานหลังเผาผนึกดีที่สุด และใช้อุณหภูมินั้นในการเผาผนึก จากนั้นจึงปรับเปลี่ยนเวลาในการเผาผนึก 1, 2 และ 4 ชั่วโมง เพื่อหาเวลาที่ให้ความหนาแน่นและความแข็งของชิ้นงานหลังเผาผนึกดีที่สุดและใช้เวลานั้นเป็นเวลาในการเผาผนึก

ทำการทดสอบชิ้นงานหลังการเผาผนึกที่ 1350°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังนี้

- ความหนาแน่นของชิ้นงานโดยการแทนที่น้ำ
- การหดตัวเฉลี่ยโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์เป็นอุปกรณ์ในการวัด
- วัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งในสเกล HRB
- ทดสอบแรงดึงโดยใช้ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที เพื่อหา ความเค้น ณ จุดคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน สำหรับเปอร์เซ็นต์การยึดตัวโดยประมาณ กำหนดจากระยะการเคลื่อนที่ของแท่นทดสอบเทียบกับความยาวแท่งของชิ้นงาน ส่วนอิลาสติกมอดูลัส กำหนดโดยใช้ความเครียดซึ่งได้จากการเคลื่อนที่ของแท่นทดสอบเช่นกัน
- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 600 800 1200 และ 2500 ตามลำดับ จากนั้นทำการขัดบนผ้าสักหลาดโดยใช้ผงเพชรขนาด 6 3 และ 1 ไมโครเมตรตามลำดับ และกัดชิ้นงานด้วยสารละลายกรด ($10 \text{ cc.HNO}_3 + 3 \text{ cc.HF} + 87 \text{ cc.H}_2\text{O}$) เป็นเวลา 22 นาที จากนั้นทำการถ่ายภาพรูปโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 สมบัติของส่วนผสมของตัวประสาน

สมบัติที่ทำการทดสอบ ได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว และความสามารถในการเปียก ของ LDPE, PW, SA และน้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นส่วนผสมทั้งหมดของตัวประสาน

4.1.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัวของส่วนผสมตัวประสาน

การทดสอบ TGA เพื่อหา T_g อุณหภูมิหลอมเหลว และช่วงอุณหภูมิการสลายตัว ทำใน 2 บรรยากาศ คือ อากาศ และอาร์กอน ซึ่งเป็นบรรยากาศออกซิเดชันและบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยตามลำดับ (ผล TGA แสดงในภาคผนวก ก.)

4.1.1.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัวในบรรยากาศอากาศ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การทดสอบ TGA ในอากาศของส่วนผสมตัวประสานแสดงในตารางที่ 4.1 LDPE ทั้งสองชนิดไม่พบยอดของ T_g ลักษณะการสลายตัวของ LDPE คล้ายกัน โดยมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวและสิ้นสุดเท่ากัน PW มีจุดหลอมเหลวและช่วงการสลายตัวอย่างรวดเร็วต่ำกว่า LDPE สำหรับ SA และน้ำมันปาล์มมีช่วงการสลายตัวกว้างที่สุดโดยน้ำมันปาล์มมีอุณหภูมิต่ำสุดสูงสุด

LDPE ทั้ง LD 1630 J (A) และ LD 1450 J (B) ไม่พบยอดของ T_g ในกราฟ DSC (ภาคผนวก ก. รูปที่ 1 และ 2) เนื่องจากสำหรับพอลิเมอร์ T_g เป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์ในส่วนที่เป็นอสัณฐานเปลี่ยนสถานะที่แข็งคล้ายแก้วไปเป็นสถานะยางโดยที่พอลิเมอร์ยังคงเป็นของแข็งอยู่⁽²⁷⁾

การที่ทั้ง A และ B ไม่พบยอดของ T_g ในกราฟ DSC เนื่องจาก LDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกอยู่ด้วยจึงทำให้ T_g ลังเกตได้ยาก นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ ถือเป็นอัตราการให้ความร้อนที่เร็วทำให้สารไม่อยู่ในสถานะสมดุล จึงทำให้ไม่พบยอดของ T_g

ตารางที่ 4.1 ผลต่าง ๆ ของส่วนผสมตัวประสานจากการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอากาศ

สาร	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ($^{\circ}\text{C}$)	จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)	ช่วงการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิสิ้นสุด ($^{\circ}\text{C}$)
LD1630J;A	-	102	210	360 - 455	520
LD1450J;B	-	102.7	210	380 - 450	520
PW	42.1	57.9	200	245 - 325	510
SA	-	53	180	210 - 260	530
น้ำมันปาล์ม	-	-	200	270 - 380	550

เส้นกราฟการสลายตัวของ PW, SA และน้ำมันปาล์ม สามารถแบ่งการสลายตัวเป็น 4 ช่วง (ภาคผนวก ก. รูปที่ 3, 4 และ 5) โดยช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มสลายตัวอย่างช้าๆ จากนั้นจึงเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ช่วงต่อมาเป็นช่วงที่ไม่เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิแคบ ๆ และช่วงสุดท้ายเกิดการสลายตัวของสารอย่างช้า ๆ จนถึงที่สุดที่อุณหภูมิต่าง ๆ น้ำมันปาล์มมีช่วงการสลายตัวที่ยาวและมีอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวสูงสุด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่หลังจากการกำจัดตัวประสานแล้ว จะมีน้ำมันปาล์มเหลือค้างและเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนได้

4.1.1.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัวในบรรยากาศอาร์กอน

ผลการทดสอบ TGA ของส่วนผสมตัวประสานในบรรยากาศของอาร์กอนแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อเทียบกับผล TGA ในอากาศ บรรยากาศอาร์กอนให้อุณหภูมิหลอมเหลวของสารทุกตัวสูงขึ้น ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แคบและสูงกว่า และมีอุณหภูมิสิ้นสุดต่ำกว่า ลักษณะกราฟการสลายตัวของ LDPE (ภาคผนวก ก. รูปที่ 6 และ 7) ให้รูปร่างที่คล้ายกันแต่ บรรยากาศอาร์กอนให้

รูปร่างของกราฟที่ต่อเนื่องมากกว่า ในขณะที่ลักษณะกราฟการสลายตัวของ PW, SA และน้ำมันปาล์ม ในบรรยากาศอาร์กอน (ภาคผนวก ค. รูปที่ 8, 9 และ 10) ให้รูปร่างสลายตัวอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งสิ้นสุดซึ่งต่างจากในอากาศที่แบ่งช่วงการสลายตัวออกเป็น 4 ส่วน

ตารางที่ 4.2 ผลต่าง ๆ ของส่วนผสมตัวประสานจากการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอาร์กอน

สาร	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (°ซ)	จุดหลอมเหลว (°ซ)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°ซ)	ช่วงการสลายตัวอย่างรวดเร็ว (°ซ)	อุณหภูมิสิ้นสุด (°ซ)
LD1630J;A	-	103.8	260	420 - 460	480
LD1450J;B	-	104.2	260	440 - 470	500
PW	47	60	220	300 - 380	405
SA	-	55	180	260 - 305	380
น้ำมันปาล์ม	-	-	320	390 - 440	500

การเกิดการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แคบและสูงกว่าเมื่อใช้บรรยากาศอาร์กอน เนื่องจากเป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยจึงไม่ทำปฏิกิริยากับสาร การหลอมเหลวและการสลายตัวเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ในอากาศนั้นสารจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดการสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ จึงเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่อุณหภูมิต่ำ⁽²⁸⁾ แต่ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นทำให้เกิดออกไซด์ซึ่งจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าสารตั้งต้น ดังนั้น ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของสารในอากาศจึงกว้างและมีลักษณะที่แบ่งการสลายตัวออกเป็นหลายช่วง โดยผลของอากาศต่อลักษณะการสลายตัวส่งผลต่อน้ำมันปาล์มมากที่สุด ตามด้วย SA, PW และส่งผลกับ LDPE น้อยที่สุด

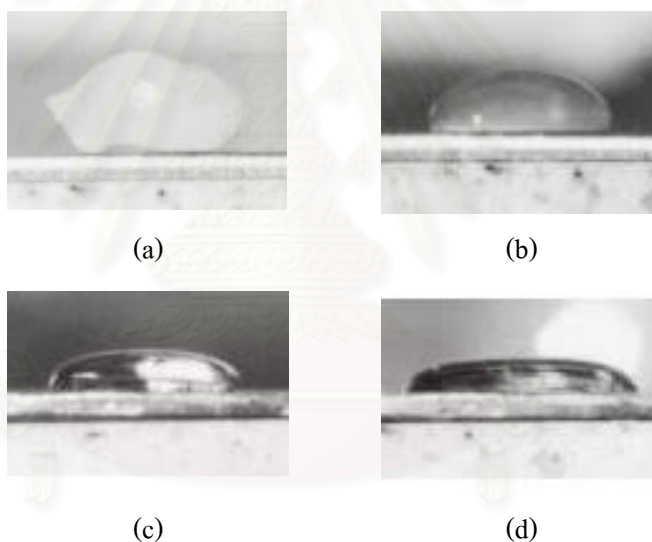
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 ความสามารถในการเปียกของส่วนผสมตัวประสาน

4.1.2.1 โพลีเอทที่ลื่นความหนาแน่นต่ำ

LD 1630 J (A)

ความสามารถในการเปียกของ A บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.1 A มีมุมสัมผัส (contact angle) ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย (105°C) หยดสารยังคงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิห้อง มีความโค้งงอของผิวมาก ที่มุมติดกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นมุมป้าน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นขึ้นงานมีลักษณะแบนลงมาตามแรงโน้มถ่วง ที่ 125°C มุมสัมผัสลดลง เป็นมุมแหลม



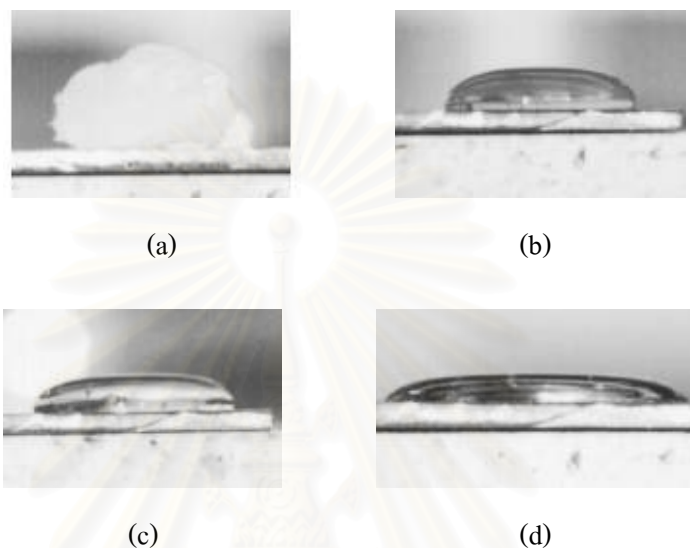
รูปที่ 4.1 ความสามารถในการเปียกของ LD 1630 J (A) บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

ที่ (a) อุณหภูมิห้อง (b) 105°C (c) 115°C และ (d) 125°C

LD 1450 J (B)

ความสามารถในการเปียกของ B บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.2 มุมสัมผัสของหยดสารมีลักษณะเช่นเดียวกับของ A คือ มุมสัมผัสลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ B มีมุมขนาดเล็กกว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจาก B มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่มีกิ่ง

ก้านน้อยกว่าจึงมีอัตราการไหลตัวของของเหลว (melt flow rate) ที่มากกว่า ความหนืดน้อยกว่า จึงรักษารูปร่างได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบกัน B มีความสามารถในการเปียกบนเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดีกว่า A



รูปที่ 4.2 ความสามารถในการเปียกของ LD 1450 J (B) บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ (a) อุณหภูมิห้อง (b) 105°C (c) 115°C และ (d) 125°C

4.1.2.2 พาราฟินแว็กซ์

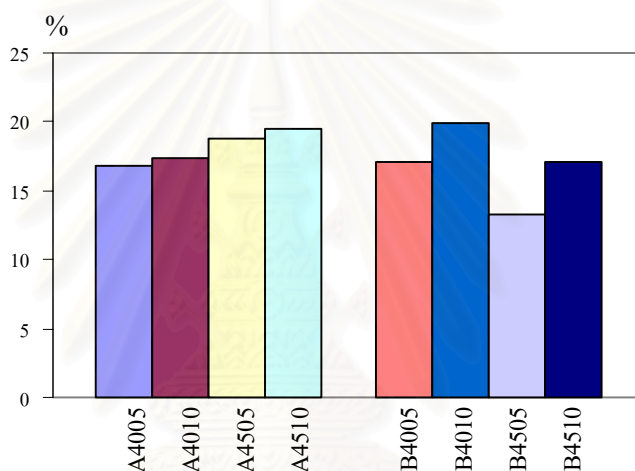
ที่อุณหภูมิ 90°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการทดลอง PW หลอมเหลว และกระจายไปทั่วแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L จนกระทั่งถือได้ว่ามุมสัมผัสเป็นศูนย์ กล่าวคือ PW มีความสามารถในการเปียกบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ดีมาก ซึ่งตรงกับความต้องการสมบัติทางด้านการเปียกของตัวประสาน

4.2 สมบัติของตัวประสาน

ผลของสมบัติของตัวประสานที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ความสามารถในการเปียก อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว ช่วงอุณหภูมิการสลายตัว และการกระจายตัวของผงในแต่ละตัวประสาน แสดงดังนี้

4.2.1 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของตัวประสาน

จากแผนภูมิในรูปที่ 4.3 เมื่อเทียบการขยายตัวโดยรวม LD 1630 J (A) มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเฉลี่ยสูงกว่า LD 1450 J (B) ทั้ง A และ B การเพิ่มปริมาณ SA จาก 5% เป็น 10% ทำให้การขยายตัวของตัวประสานเพิ่มขึ้นโดยส่งผลกับ B มากกว่า สำหรับ A การเพิ่มปริมาณ LDPE ต่อปริมาณ PW จาก 40:60 เป็น 45:55 ส่งผลให้การขยายตัวเพิ่ม ในขณะที่ B การเพิ่มปริมาณ LDPE ต่อปริมาณ PW จาก 40:60 เป็น 45:55 ส่งผลให้การขยายตัวลดลง



รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวจากความร้อนที่ 125 °ซ ของตัวประสานชนิดต่าง ๆ

การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของตัวประสานส่งผลต่อ MIM ในหลายขั้นตอน หากของผสมมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนมาก ในขั้นตอนของการฉีดขึ้นรูปของผสมจะหดตัวอย่างมาก ขณะแข็งตัวในแม่พิมพ์ทำให้ไม่ได้ขนาดชิ้นงานตามที่ออกแบบและหากชิ้นงานมีความหนาไม่เท่ากัน ทั้งชิ้นจะเกิดการหดตัวที่ไม่เท่ากัน ทำให้ยากต่อการควบคุม ในขั้นตอนการกำจัดตัวประสานการขยายตัวเนื่องจากความร้อนอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการพองและแตกได้

LD 1630 J (A) มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเฉลี่ยสูงกว่า LD 1450 J (B) เนื่องจาก A มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นกิ่งสาขาแยกออกมาจากสายโซ่โมเลกุลมากกว่า (ซึ่งทำให้มีความหนืดสูงกว่า) เมื่อได้รับความร้อนสายโซ่ที่ไม่เป็นระเบียบมากกว่าจะเกิดการขยายตัวมาก การเพิ่มปริมาณ A ต่อปริมาณ PW ส่งผลให้การขยายตัวเพิ่มขึ้น แสดงถึงอิทธิพลของ A ต่อการขยายตัว

เนื่องจากความร้อนที่มากกว่า PW ในขณะที่ การเพิ่มปริมาณ B ต่อปริมาณ PW ส่งผลให้การขยายตัวลดลง แสดงถึงอิทธิพลของ PW ต่อการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่มากกว่า B ซึ่งตรงข้ามกับ A

4.2.2 ความหนืดของตัวประสาน

เมื่อใช้ตัวประสานที่มีส่วนผสมต่างกันจะส่งผลต่อความหนืดและการกระจายตัวของผงในตัวประสานของของผสม การเพิ่มปริมาณ LDPE และการเปลี่ยนชนิดของ LDPE จาก B เป็น A ทำให้ความหนืดของตัวประสานและของผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ SA ให้ความหนืดของของผสมลดลงอย่างมากเช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณ PW จากการสังเกตการกระจายตัวของผงในตัวประสาน พบว่า ของผสมที่มีความหนืดมากกว่ามีการเกาะกลุ่มกันของผงน้อยกว่า การกระจายตัวของผงดีกว่า

การเพิ่มปริมาณ LDPE เมื่อใช้ LDPE ชนิดเดียวกัน และการเปลี่ยนชนิดของ LDPE จาก B เป็น A ทำให้ความหนืดของตัวประสานและของผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก LDPE มีความหนืดมากกว่า PW และ A มีอัตราการใช้ผงต่ำกว่าจึงมีความหนืดมากกว่า B ตามลำดับ SA ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและช่วยลดความหนืด ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ SA จึงทำให้ความหนืดของตัวประสานและของผสมลดลง

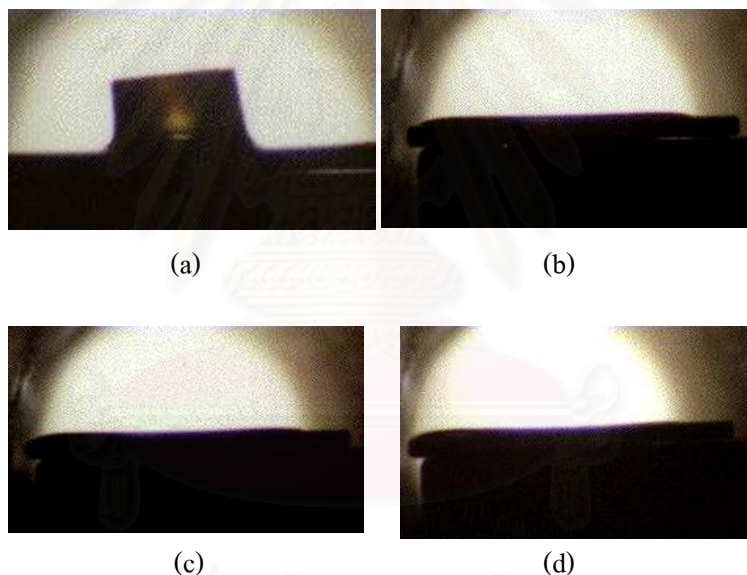
ความหนาแน่นที่ต่างกันของผงโลหะกับตัวประสานทำให้เกิดการแยกตัวของผงโลหะกับตัวประสานได้ง่าย ดังนั้นการกระจายตัวของผงในตัวประสานจะกระจายตัวได้ดีก็ต่อเมื่อตัวประสานมีความหนืดที่มากพอที่จะประคองผงโลหะไว้ได้⁽⁴⁾ ตัวประสานที่มีปริมาณ LDPE น้อย PW และ SA มาก มีความหนืดต่ำ ทำให้สามารถประคองผงเหล็กกล้าไร้สนิมได้ไม่ดี ภายในมีการเกาะกลุ่มของผงและมีการแยกตัวอย่างมากที่บริเวณผิวของของผสม

จากผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและการกระจายตัวของผงในตัวประสานได้เลือก B4505 และ A4505 เป็นตัวประสานที่จะใช้ในการทดลองต่อไป เนื่องจาก B4505 มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำที่สุดและมีการกระจายตัวของผงดี สำหรับ A4505 แม้จะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนค่อนข้างสูง แต่ความหนืดที่สูงทำให้มีการกระจายตัวของผงดีและความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่น้อยซึ่งจะเป็นผลดีต่อขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป เนื่องจาก B4505 มีความหนืดน้อยกว่า A4505 ดังนั้นเพื่อให้ตัวประสานทั้งสองมีความหนืดที่ใกล้เคียงกันเพื่อดูผลของความหนืดต่อ

การฉีดขึ้นรูป จึงทำการผสมน้ำมันปาล์มซึ่งมีความหนืดที่อุณหภูมิสูงมากกว่า PW มาทดแทน PW ใน B4505 10% โดยน้ำหนัก โดยใช้สัญลักษณ์เป็น B4505P

4.2.3 ความสามารถในการเปียกของตัวประสาน

ที่ 95°C ตัวประสานทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ A4505 B4505 และ B4505P ยังสามารถรักษาสภาพโครงสร้างเริ่มต้นซึ่งเป็นทรงกระบอกได้อยู่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 105°C ตัวประสานหลอมหมดกระจายไปทั่วและค่อนข้างเรียบไปกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ตัวประสานมีมุมสัมผัสลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 115 และ 125°C โดยที่มุมสัมผัสของตัวประสานทั้ง 3 ชนิดใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.4 ความสามารถในการเปียกของ B4505 บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

ที่ (a) 95°C (b) 105°C (c) 115°C และ (d) 125°C

การที่ตัวประสานทั้ง 3 ชนิด ยังสามารถรักษาสภาพโครงสร้างเริ่มได้ที่ 95°C เนื่องจากอุณหภูมิที่วัดนี้เป็นอุณหภูมิของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม อากาศรอบ ๆ ชิ้นงานมีอุณหภูมิไม่ถึง 95°C จึงทำให้ด้านบนของชิ้นงานยังคงรักษารูปทรงได้

ความสามารถในการเป็ยกของตัวประสานได้จาก PW ที่ทำหน้าที่เป็น plasticizer ในการช่วยลดความหนืดของ LDPE จึงทำให้ตัวประสานกระจายตัวไปทั่วแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของ LDPE เพียงเล็กน้อย ส่วน SA นอกจากจุดประสงค์หลักที่ผสมลงไปเพื่อลดการเกาะติดที่ผนังแม่พิมพ์แล้ว ยังช่วยให้ความหนืดของตัวประสานลดลงด้วยเช่นกัน⁽⁵⁾

4.2.4 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัวของตัวประสาน

เนื่องจากผล TGA ของ A และ B มีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการทดสอบ TGA ของตัวประสานจึงเลือกเฉพาะตัวประสานที่มีส่วนผสมของ B เท่านั้น

4.2.4.1 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัวในบรรยากาศอากาศ

ตารางที่ 4.3 ผลต่าง ๆ ของตัวประสานจากการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอากาศ

ตัวประสาน	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (°ซ)	จุดหลอมเหลว (°ซ)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°ซ)	ช่วงการสลายตัวอย่างรวดเร็ว (°ซ)	อุณหภูมิสิ้นสุด (°ซ)
B4505	-	-	220	370 - 450	570
B4505P	-	-	220	370 - 450	580

การสลายตัวของ B4505 และ B4505P มีลักษณะกราฟเหมือนกัน (ภาคผนวก ก. รูปที่ 11 และ 12) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงแรก คือ 220-370°ซ เป็นช่วงการสลายตัวเริ่มต้นที่เกิดการสลายตัวของ PW SA และน้ำมันปาล์ม ช่วงถัดมา คือ 370-450°ซ เป็นช่วงสลายตัวอย่างรวดเร็ว โดยสลายตัว 64.4 % โดยน้ำหนัก ช่วงสุดท้าย 450-570°ซ เกิดการสลายตัวอย่างช้า ๆ จนตัวประสานสลายตัวหมด

ลักษณะกราฟการสลายตัวที่เหมือนกันของ B4505 และ B4505P แสดงให้เห็นว่าการผสมน้ำมันปาล์มแทนที่ PW 10 % โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของตัวประสาน หากเทียบกับผล TGA ของสารตั้งต้น ช่วงการสลายตัวแรกของตัวประสานเป็นช่วงอุณหภูมิที่ SA สลายตัว

ไปแล้ว 93.2% และ PW สลายตัวไปแล้ว 82.5% เมื่อนำมาคำนวณให้อยู่ในรูปของ B4505 ช่วงอุณหภูมินี้สารควรสลายไปแล้ว 47.8% แต่จากกราฟพบว่าสลายตัวไปเพียง 31.8% ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการผสมตัวประสานเพื่อให้ได้ส่วนผสมของตัวประสานผสมเข้ากันได้ดีต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 °ซ จึงทำให้มีการระเหยของ SA และ PW ได้ เพราะสารทั้งสองสามารถระเหยได้ง่าย ช่วงอุณหภูมิ 370-450 °ซ เป็นการสลายตัวของ LDPE ซึ่งมีการสลายตัวสูงสุดประมาณ 90% และเป็นช่วงที่ SA และ PW ที่เหลือสลายตัว

จากช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอย่างรวดเร็วของตัวประสาน 370–450 °ซ ซึ่งตรงกับสลายตัวของ LDPE และจากการที่อากาศเป็นบรรยากาศออกซิเดชันซึ่งทำปฏิกิริยากับผงโลหะ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้อุณหภูมิ 370 °ซ ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำสุดของช่วงนี้เป็นอุณหภูมิในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนในบรรยากาศของอากาศ

4.2.4.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว และการสลายตัวในบรรยากาศอาร์กอน

ตารางที่ 4.4 ผลต่าง ๆ ของตัวประสานจากการทดสอบ TGA ในบรรยากาศของอาร์กอน

ตัวประสาน	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (°ซ)	จุดหลอมเหลว (°ซ)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°ซ)	ช่วงการสลายตัวอย่างรวดเร็ว (°ซ)	อุณหภูมิสิ้นสุด (°ซ)
B4505	-	-	230	420 - 470	480
B4505P	-	-	230	445 - 485	490

การสลายตัวของ B4505 และ B4505P ในอาร์กอนมีลักษณะกราฟเหมือนกัน (ภาคผนวก ก. รูปที่ 13 และ 14) ลักษณะกราฟการสลายตัวแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ 230-420 °ซ และ 420-485 °ซ การมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูง ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวแคบและสูงกว่า และอุณหภูมิสิ้นสุดต่ำกว่าในบรรยากาศของอากาศยังคงพบในผล TGA ของตัวประสานทั้งสอง

การสลายตัว 2 ช่วงอุณหภูมิเป็นผลมาจากส่วนผสมของตัวประสานที่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวต่างกัน โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของ PW, SA และ น้ำมันปาล์ม ช่วงที่สอง

เป็นการสลายตัวอย่างรวดเร็วของ LDPE และเป็นการสลายตัวของ PW, SA และน้ำมันปาล์มที่สลายไม่หมดในช่วงแรก

ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอย่างรวดเร็วของตัวประสานในอาร์กอนตรงกับ การสลายตัวของ LDPE อยู่ที่ 420-485 °C โดยที่ 450 °C เป็นอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวสูงสุด

เนื่องจากไฮโดรเจนทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับตัวประสานจึงสามารถช่วยกำจัดตัวประสานได้ดีขึ้นในขณะที่กำจัดตัวประสานด้วยความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้อาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% เป็นบรรยากาศของการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน และเลือกอุณหภูมิ 450 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวสูงสุดจากผล TGA ในบรรยากาศอาร์กอนเป็นอุณหภูมิในการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนในบรรยากาศอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5%

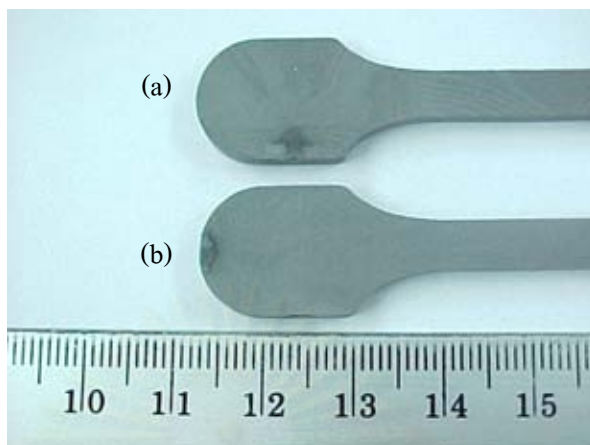
4.3 ผลการฉีดขึ้นรูป

4.3.1 ตำแหน่งทางเข้า

ผลของตำแหน่งของทางเข้าด้านข้างของส่วนที่เป็นที่จับของชิ้นทดสอบแรงดึง และตำแหน่งทางด้านปลายสุดของส่วนที่จับของชิ้นทดสอบแรงดึง แสดงในรูปที่ 4.5

การวางตำแหน่งทางเข้าไว้ที่ด้านข้างทำให้เกิดร่องรอยการไหลเป็นชั้น ๆ อย่างเห็นได้ชัด และเกิดรอยเชื่อมที่บริเวณปลายฝั่งนี้เป็นจำนวนมาก ดังรูปที่ 4.5(a) ในขณะที่การวางทางเข้าไว้ที่ด้านปลายสุดพบปัญหาเหล่านี้น้อยกว่ามากซึ่งสังเกตได้จากสีของชิ้นงานที่สม่ำเสมอกว่าในรูปที่ 4.5(b) จากการศึกษาตำแหน่งทางเข้าจึงได้เลือกตำแหน่งด้านปลายของชิ้นงานซึ่งทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานน้อยกว่า

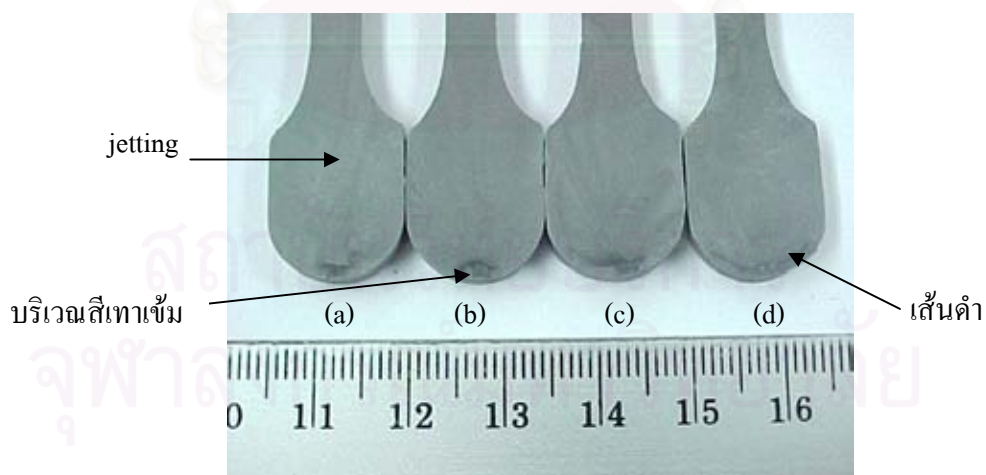
ตำแหน่งทางเข้าด้านข้างทำให้ของผสมที่เข้าไปในแม่พิมพ์มีการเปลี่ยนทิศทางการไหลแปรปรวน เนื่องจากสารที่เข้าไปจะไปกระทบผนังแม่พิมพ์ที่ด้านบนแล้วจึงถูกดันออกไปทางด้านข้างซึ่งทำให้เกิดร่องรอยการไหลเป็นชั้น ๆ อย่างเห็นได้ชัด และเกิดรอยเชื่อมที่บริเวณปลายฝั่งนี้เป็นจำนวนมาก การวางทางเข้าไว้ที่ด้านปลายสุดสามารถช่วยลดปัญหานี้ได้เพราะของผสมสามารถไหลเข้าไปโดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนทิศทางการไหล การเปลี่ยนทิศทางการไหลนี้ยังส่งผลถึงความหนาแน่นที่ไม่เท่ากันภายในชิ้นงานด้วย



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบรอยการไหลและรอยเชื่อมบนชิ้นงานเมื่อวางตำแหน่งทางเข้า
(a) ด้านข้าง และ (b) ด้านปลาย

4.3.2 ความกว้างทางเข้า

ผลของการใช้ขนาดความกว้างของทางเข้าเป็น 4 ระยะ คือ 2.5, 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร โดยความกว้าง 15 มิลลิเมตรมีขนาดเท่ากับความกว้างของชิ้นงานพอดี แสดงในรูปที่ 4.6



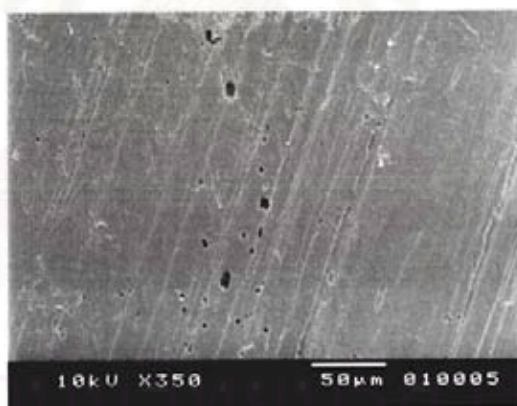
รูปที่ 4.6 ลักษณะของบริเวณทางเข้าของชิ้นงานที่ใช้ความกว้างทางเข้า
(a) 2.5 (b) 5 (c) 10 และ (d) 15 มิลลิเมตร

ลักษณะของบริเวณทางเข้าของชิ้นงานจากรูปที่ 4.6 สามารถแบ่งความเสียหายที่พบบริเวณทางเข้าได้ 4 แบบ คือ jetting บริเวณสีเทาเข้ม เส้นดำ และรอยหัก

jetting คือ ร่องรอยฟุ้งกระจายของของผสมจากปากทางเข้าสู่ชิ้นงาน เนื่องจากของผสมถูกฉีดเข้าแบบอย่างรวดเร็วเกินไป ทางเข้าที่เล็กมากและอยู่ในตำแหน่งที่สารที่เข้าไปไม่สัมผัสผนังแม่พิมพ์ทำให้เกิด jetting⁽⁴⁾

บริเวณสีเทาเข้มเป็นบริเวณที่เกิดการแยกตัวของผงกับตัวประสานโดยบริเวณนี้เป็นส่วนที่มีผงอยู่น้อยมากเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดอย่างรวดเร็ว⁽¹⁶⁾ โทนสีของบริเวณนี้สามารถบอกถึงปริมาณผงที่กระจายตัวอยู่ในตัวประสานได้โดยสีเทาที่เข้มมากขึ้นแสดงถึงปริมาณผงที่กระจายตัวอยู่ในตัวประสานน้อยลง

เส้นดำที่อยู่ถัดจากบริเวณสีเทาเข้มเกิดขึ้นเนื่องจากหลังจากของผสมถูกเติมจนเต็มแบบแล้วจะเกิดความดันย้อนกลับในทิศทางตรงกันข้ามกับความดันฉีด ทำให้เกิดการปะทะกันระหว่างเนื้อของผสม 2 ด้าน และเนื่องจากผงในของผสมถูกรอบคลุมด้วยตัวประสานทั้งหมด ดังนั้นส่วนที่มาปะทะกันจึงมีเฉพาะตัวประสานเท่านั้น จึงทำให้เส้นดำนี้มีเนื้อสารสองด้านไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีเฉพาะตัวประสานบางส่วนเท่านั้นที่เชื่อมถึงกัน ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM บริเวณเส้นดำ ณ ทางเข้าสารของชิ้นงาน

รอยหักเกิดจากการหักชิ้นงานออกจากทางวิ่ง (runner) โดยจะเกิดการหักที่ตำแหน่งทางเข้า การออกแบบทางเข้าให้เล็กมีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถหักส่วนทางวิ่งออกได้โดยง่ายและไม่ทำให้เกิดร่องรอยมากนัก⁽²⁹⁾ ขนาดทางเข้าที่ใหญ่ขึ้นจึงทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานในขณะที่ปลดชิ้นงานได้โดยจะมีรอยหักที่ยาวขึ้น

ตารางที่ 4.5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณทางเข้าของชิ้นงานเมื่อใช้ความกว้างทางเข้าต่างกัน

ความกว้างทางเข้า (มิลลิเมตร)	Jetting	บริเวณสีเทาเข้ม	เส้นดำ	รอยหัก
2.5	รุนแรงที่สุด	สีเข้มที่สุด ขนาดเล็ก	สั้น โคง์ออก	เล็ก
5	เกิด jetting เล็กน้อย	สีจางลง ขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย	ยาวขึ้นเล็กน้อย โคง์ออก	ยาวขึ้น
10	เกิด jetting เล็กน้อย	สีจางลง ขนาดใกล้เคียง กับทางเข้า 5 มิลลิเมตร	ยาวขึ้น เริ่มโคง์ ตามแนวชิ้นงาน	ยาวขึ้น
15	เกิด jetting เล็กน้อย	สีใกล้เคียงกับ สีของชิ้นงาน	ยาวที่สุด โคง์ตาม แนวชิ้นงาน	ยาวที่สุด

ทุก ๆ ความกว้างทางเข้าทำให้ชิ้นงานเกิดบริเวณสีเทาเข้มที่หน้าทางเข้า และเส้นสีดำเป็นแนวโคง์ถัดจากบริเวณสีเทาเข้มนี้ เมื่อเพิ่มขนาดความกว้างทางเข้าบริเวณสีเทาเข้มนี้จะเล็กลงในขณะที่เส้นดำจะขยายออกตามความกว้างทางเข้าที่เพิ่มขึ้น

ที่ความกว้างทางเข้า 2.5 มิลลิเมตร เกิด jetting อย่างเห็นได้ชัด บริเวณหน้าทางเข้าเป็นสีเทาเข้มโคง์ออก ความกว้าง 5 มิลลิเมตร ลักษณะของบริเวณสีเทาเข้มยังคงอยู่แต่มีลักษณะที่แบนลงและขยายออกทางด้านข้างมากขึ้น สามารถเห็นรอยการไหลได้ที่บริเวณใกล้เคียง ๆ ทางเข้า แต่ไม่เกิด jetting รุนแรงเท่ากับความกว้าง 2.5 มิลลิเมตร ที่ความกว้าง 10 มิลลิเมตร ยังคงพบบริเวณสีเทาเข้ม และเส้นดำที่อยู่ถัดเข้ามาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยมีลักษณะโคง์ตามแนวชิ้นงานซึ่งต่างจากความกว้าง 2.5 และ 5 มิลลิเมตร ที่ความกว้าง 15 มิลลิเมตร บริเวณสีเทาเข้มหายไป แต่เมื่อดูด้วย SEM บริเวณหน้าทางเข้านี้ยังคงเป็นบริเวณที่เกิดการแยกตัวระหว่างผงกับตัวประสาน เส้นดำยาวขึ้นจนเกือบถึงปลายของทางเข้าทั้งสองด้าน

จากการทดลอง พบว่า ที่ขนาดความกว้างทางเข้า 5 มิลลิเมตร เป็นความกว้างที่ทำให้เกิด jetting เพียงเล็กน้อย ความยาวของเส้นดำสั้น และมีรอยหักขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความกว้างทางเข้าขนาดอื่น ๆ ขนาดความกว้างทางเข้า 5 มิลลิเมตรทำให้ความเสียหายแก่ชิ้นงานน้อยที่สุด ในการทดลองจึงเลือกขนาดความกว้างทางเข้า 5 มิลลิเมตร ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงเพื่อทำการทดสอบต่อไป

4.3.3 อุณหภูมิ

จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิกระบอกฉีดที่เหมาะสมสำหรับของผสมที่ใช้ A4505 B4505 และ B4505P เป็นตัวประสานอยู่ในช่วง 100-105, 95-100 และ 105-110^oซ ตามลำดับ หากใช้ อุณหภูมิกระบอกฉีดต่ำกว่าช่วงนี้จะได้ชิ้นงานไม่เต็มแบบ และหากใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิด jetting รอยยุบที่ผิวของชิ้นงาน และอาจเกิดรูอยู่ภายในชิ้นงาน

อุณหภูมิกระบอกฉีดต้องสูงพอที่จะสามารถเก็บความร้อนไว้ในของผสมเพื่อให้สามารถฉีดขึ้นรูปได้เต็มแม่พิมพ์โดยไม่เกิดการแข็งตัวก่อน A4505 มีความหนืดมากกว่า B4505 จึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า สำหรับ B4505P มีการแข็งตัวหลังการฉีดสารเข้าแม่พิมพ์เร็วกว่าจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้ความหนืดของของผสมน้อยซึ่งทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างผงกับตัวประสาน และเกิด jetting ได้ง่าย นอกจากนี้ยังทำให้ตัวประสานขยายตัวมาก เมื่อเย็นตัวลงจึงเกิดการหดตัวอย่างมากทำให้เกิดรอยยุบที่ผิวของชิ้นงานหรือเกิดรูอยู่ภายในชิ้นงาน

อุณหภูมิหัวฉีดที่เหมาะสมสำหรับทุกตัวประสานคือ 50-60^oซ การใช้อุณหภูมิหัวฉีดเกิน 80^oC ทำให้ตัวประสานในของผสมระเหยออกมาจากหัวฉีด

การระเหยของตัวประสานเมื่อใช้อุณหภูมิหัวฉีดเกิน 80^oซ เป็นการระเหยของ PW ซึ่งเป็นส่วนประกอบของตัวประสานที่สามารถระเหยได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว การระเหยของ PW นี้ ทำให้ส่วนผสมของของผสมเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ความหนืดเปลี่ยน ดังนั้นอุณหภูมิหัวฉีดจึงควรใช้อุณหภูมิต่ำโดยที่ยังสามารถป้องกันการแข็งตัวของตัวประสานเมื่อของผสมถูกเก็บสะสมที่บริเวณหัวฉีดเพื่อเตรียมพร้อมฉีดต่อไปได้

จากการทดลอง อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับของผสมอยู่ที่ประมาณ 30-35^oซ การใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ 25^oซ ทำให้เกิดรอยเชื่อม และร่องรอยการไหลที่แยกเป็นชั้น ๆ ของตัวประสานกับผงอย่างชัดเจน อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40^oซ ทำให้มีผิวบางส่วนของชิ้นงานติดกับแม่พิมพ์ เกิดการแตกหักเสียหายในขณะปลดชิ้นงาน และยังก่อให้เกิดรอยยุบที่ผิวชิ้นงานอีกด้วย

อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำเกินไปทำให้ของผสมที่ถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์แข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ ทำให้เกิดรอยเชื่อม ชิ้นงานไม่เต็มแบบ และยังส่งผลให้เกิดความเค้นจากความร้อนที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการร่อนหรือการแยกตัวของผิวออกจากชิ้นงานในขณะกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนได้⁽⁴⁾ อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงเกินไปทำให้เสียเวลาในการรอให้ชิ้นงานเย็นตัวพอที่จะนำออกได้ หรืออาจมีผิวบางส่วนของชิ้นงานติดกับแม่พิมพ์ทำให้ผิวไม่สวย เสียเวลาในการทำ ความสะอาดแม่พิมพ์ และชิ้นงานที่ติดแม่พิมพ์อยู่อาจเกิดการแตกหักเสียหายได้ในขณะปลดชิ้นงาน

4.3.4 ความดัน

จากการทดลอง พบว่า ความดันที่สูงเกินไป (ตั้งแต่ 1000 ปอนด์/ตารางนิ้ว ขึ้นไป) เป็นสาเหตุสนับสนุนให้เกิดการแยกตัวของผงกับตัวประสานที่บริเวณทางเข้าดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.3.2 ความดันที่น้อยเกินไป (ต่ำกว่า 800 ปอนด์/ตารางนิ้ว) ทำให้ของผสมเข้าแบบได้ยากขึ้น ค่าของความดันที่เหมาะสมสำหรับทุกๆ ตัวประสานที่ใช้ คือ 900 ปอนด์/ตารางนิ้ว

ความดันใช้ในการฉีดเพื่อดันของผสมให้เข้าสู่แม่พิมพ์ และชัดเจนของผสมที่หลุดจากการเย็นตัวได้โดยไม่เกิดความเสียหายใด ๆ กับชิ้นงานทั้งหลังการฉีดขึ้นรูป⁽²⁹⁾ และหลังกระบวนการอื่น ๆ ความดันมีผลต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงาน แต่มีผลต่อความเหนียวของผสมน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ ความดันที่น้อยเกินไปทำให้ของผสมสูญเสียความร้อนและแข็งตัวก่อนที่จะเข้าเต็มแบบทำให้ฉีดได้ไม่เต็ม หรือเกิดรอยเชื่อมชิ้นได้

4.3.5 ความเร็วในการฉีด

จากการทดลอง ความเร็วในการฉีดให้ผลไปในทางเดียวกับความดัน การใช้ความเร็วในการฉีดต่ำเกินไปทำให้ได้ชิ้นงานไม่เต็มแบบ หรือเกิดรอยเชื่อมชิ้น ความเร็วสูงทำให้เกิด jetting การแยกตัวของผงกับตัวประสาน และเกิดร่องรอยการไหลสีขาวบนชิ้นงานได้ หากเกิดรอยยุบขึ้น การเพิ่มความเร็วในการฉีดสามารถช่วยลดปัญหานี้ได้โดยใช้ควบคู่ไปกับการลดอุณหภูมิในการฉีดลงด้วย

เวลาการทำงานทั้งวงจร (cycle time) ของการฉีดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับความเร็วในการฉีดด้วย นอกจากนี้ความเร็วในการฉีดยังส่งผลต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงาน ความเร็วต่ำนอกจากจะเพิ่มเวลาในการฉีดแล้ว ยังทำให้ของผสมสูญเสียความร้อนและแข็งตัวก่อนเต็มแม่พิมพ์ หรือเกิดรอยเชื่อมชิ้น การเพิ่มความเร็วในการฉีดควบคู่ไปกับการลดอุณหภูมิในการฉีดช่วยลดปัญหาการยุบตัวที่ผิวชิ้นงานได้เนื่องจากของผสมสามารถเข้าไปทดแทนส่วนที่เกิดการหดตัวได้ทัน

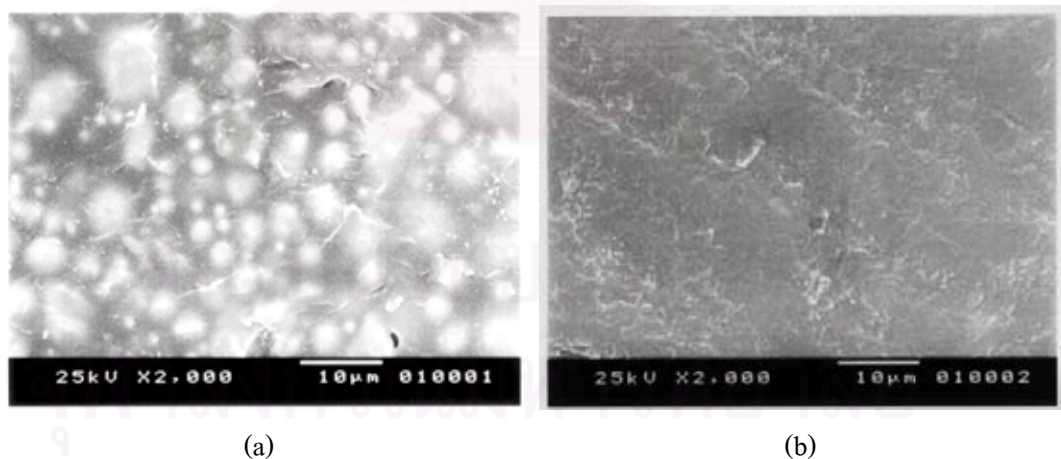
4.3.6 ปริมาณสาร

สำหรับเครื่องฉีดพลาสติก BOY 15/5 นี้ สามารถตั้งปริมาณสารโดยวิธีการกำหนดระยะที่เกลียวหนอน (injection screw) ถอยหลังเพื่อให้สารมาสะสมอยู่ที่หัวฉีดและเตรียมฉีดต่อไป การประมาณปริมาณสารที่ใช้ต้องมีการเผื่อปริมาณสารที่คงสูญเสียไปกับปริมาตรของช่องนำฉีด

(sprue) และทางวิ่ง (runner) ด้วย⁽²⁹⁾ ในการทดลองนี้ปริมาณของผสมที่เหมาะสม คือ การตั้งระยะเกลียว หนอนถอยหลัง 17 มิลลิเมตร หากใช้ปริมาณสารน้อยกว่านี้จะได้ชิ้นงานไม่เต็มแบบ แต่หากปริมาณสารมากเกินไปจะทำให้เกิดความดันในตอนท้ายขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุสนับสนุนให้เกิดการแยกตัวของผงกับตัวประสานที่บริเวณทางเข้าได้

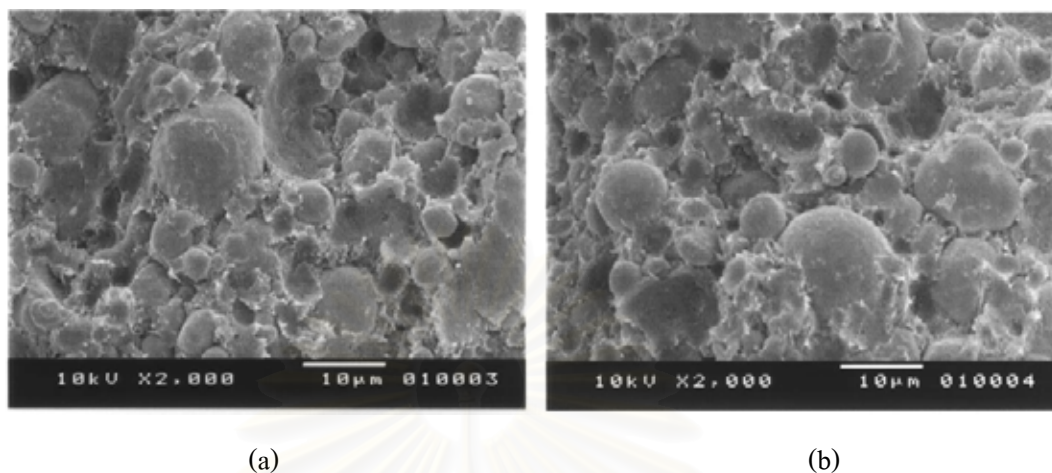
4.3.7 ลักษณะการกระจายตัวของผงในตัวประสานหลังการฉีดขึ้นรูป

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงลักษณะการกระจายตัวของผงในตัวประสานหลังการฉีดขึ้นรูปที่ผิว และภายในของชิ้นงานตามลำดับ บริเวณสีขาวลักษณะกลมที่กระจายตัวอยู่ในรูปที่ 4.8(a) คือ ผงที่อยู่ในตัวประสาน ส่วนบริเวณสีเข้มคือตัวประสาน รูปที่ 4.8(b) ซึ่งเป็นบริเวณทางเข้าชิ้นงานพบเฉพาะบริเวณสีเข้มที่เป็นตัวประสานโดยไม่พบผงอยู่ในบริเวณนี้เลย สำหรับรูปที่ 4.9(a) และ (b) ซึ่งแสดงลักษณะการกระจายตัวของผงภายในชิ้นงานในแนวนานและขวางกับการไหลของของผสมตามลำดับมีลักษณะการกระจายตัวของผงเหมือนกัน สามารถเห็นผงกลมทั้งขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวอยู่ด้วยกัน บริเวณอื่นๆ ในภาพเป็นตัวประสาน ผิวบางส่วนที่เป็นหลุมโด้งเว้าลงไปเป็นบริเวณที่เคยมีผงอยู่และได้หลุดออกมาในขณะที่หักชิ้นงาน พบรอยแยกระหว่างผงกับตัวประสานในบางบริเวณ



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการกระจายตัวของผงในตัวประสานหลังการฉีดขึ้นรูปบริเวณ

(a) ตรงกลางที่ผิว และ (b) ทางเข้าที่ผิวชิ้นงาน

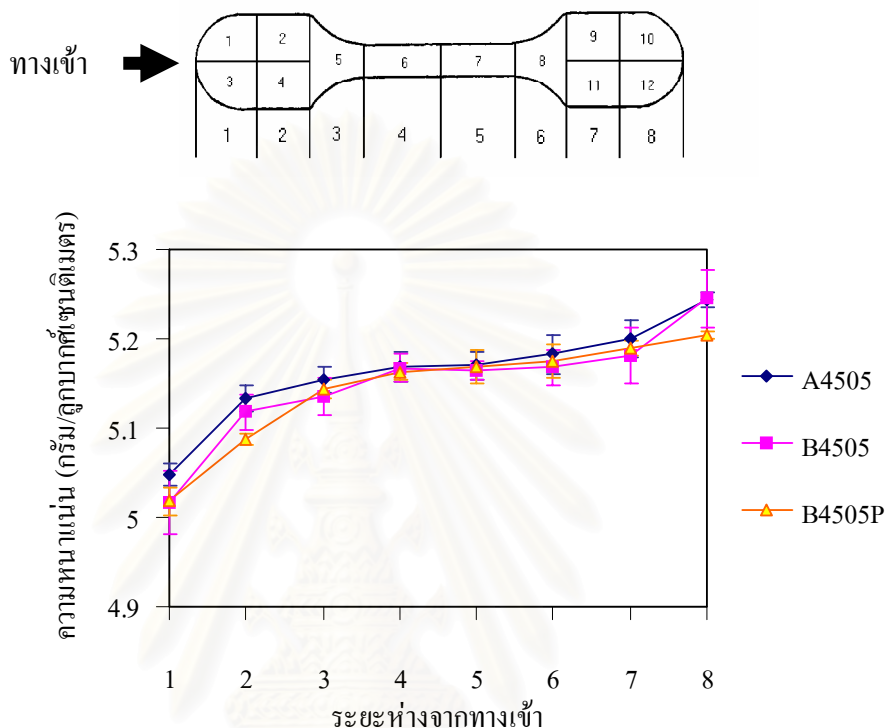


รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการกระจายตัวของผงในตัวประสานหลังการอัดขึ้นรูป
ภายในชิ้นงานในแนว (a) ขนาน และ (b) ขวางกับการไหลของสาร

รูปที่ 4.8(a) แสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวตรงกลางชิ้นงาน ผงมีการกระจายตัวดี และถูกครอบคลุมอยู่ด้วยตัวประสานทั้งหมด ในขณะที่บริเวณทางเข้าในรูปที่ 4.8(b) เห็นเฉพาะบริเวณที่เป็นสีเข้มเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีเฉพาะตัวประสานอยู่ การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดอย่างรวดเร็วเมื่อสารถูกฉีดผ่านทางเข้าสู่ช่องว่างของแม่พิมพ์เป็นสาเหตุของการเกิดการแยกตัวของผงกับตัวประสาน^(4,16) ที่บริเวณนี้

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าภายในชิ้นงานผงมีการกระจายตัวดี และตัวประสานครอบคลุมผงได้อย่างทั่วถึง รอยแยกเล็ก ๆ ระหว่างผงกับตัวประสานในบางตำแหน่งเกิดจากการหดตัวของตัวประสานที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวในขณะที่อัดขึ้นรูปเป็นของแข็งเมื่ออุณหภูมิลดลง การกระจายตัวของผงทั้งแนวขนานและแนวขวางกับการไหลของของผสมที่มีลักษณะเช่นเดียวกันแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการเรียงตัวของผงในแนวใดแนวหนึ่งขึ้น

4.3.8 ความหนาแน่นในแต่ละบริเวณของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป



รูปที่ 4.10 แผนภูมิเส้นแสดงความหนาแน่นของชิ้นทดสอบแรงดึงกับระยะห่างจากทางเข้าทางด้านปลาย ของของผสมที่ใช้ตัวประสานต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 แสดงความหนาแน่นในแต่ละบริเวณของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ทุก ๆ ตัวประสานมีลักษณะกราฟเหมือนกัน คือ ความหนาแน่นต่ำอยู่ที่ตำแหน่ง 1 และความหนาแน่นสูงอยู่ที่ตำแหน่ง 8 โดยมีลักษณะกราฟที่ต่อเนื่องคือ ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากทางเข้ามากขึ้น โดยบริเวณส่วนกลางมีความหนาแน่นคงที่ ชิ้นงานที่ใช้ A4505 เป็นตัวประสานให้ลักษณะของกราฟเหมือน B4505 ในขณะที่ B4505P ให้ความหนาแน่นที่ค่อนข้างต่อเนื่องและสม่ำเสมอว่า ในส่วนปลาย B4505P มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวประสานอีก 2 ชนิด ความหนาแน่นของชิ้นงานที่สม่ำเสมอจำเป็นต่อกระบวนการ MIM เนื่องจากจะส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานหลังการเผาผนึกแล้ว ดังนั้น B4505P จึงเหมาะสมต่อขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปมากที่สุด

ตำแหน่งที่มีความหนาแน่นต่ำคือบริเวณหน้าทางเข้าเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีผงอยู่น้อย ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างรวดเร็ว^(4,16) ความหนาแน่นสูงที่ปลายของชิ้นงานมีสาเหตุมาจากในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป ของผสมที่เตรียมฉีดเข้าแบบต้องมาพักอยู่ที่บริเวณปลายหัวฉีด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงของหัวฉีดทำให้ในขณะที่รอการฉีดของผสมเกิดการระเหยของตัวประสานเป็น ก้อนออกมา ทำให้สัดส่วนของของผสมเปลี่ยนส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเนื่องจากส่วน ปลายของชิ้นงานเป็นส่วนที่ของผสมที่อยู่ที่ปากกระบอกฉีดในตอนแรกจะเข้าไปอยู่ในบริเวณนี้ ดังนั้น ของผสมที่มีความหนาแน่นสูงจึงไปอยู่ที่บริเวณนี้ทำให้ที่ปลายชิ้นงานมีความหนาแน่นสูง การที่ B4505P มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการแทนที่ PW ซึ่งระเหยง่ายด้วยน้ำมันปาล์ม จึงลดการระเหยของตัวประสานลง

4.4 การกำจัดตัวประสาน

4.4.1 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

4.4.1.1 ความเสียหายที่เกิดกับชิ้นงานหลังการกำจัดตัวประสานในแต่ละสภาวะ

ตารางที่ 4.6 ความเสียหายที่เกิดกับชิ้นงานหลังการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายในแต่ละสภาวะ

สภาวะที่	ความเสียหายที่เกิดกับชิ้นงาน
1	ชิ้นงานแตกร่อนในขณะที่แช่ในอีเทอร์ รอยแตกโค้งกลมกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน โดยพบมากที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของชิ้นงาน
2	ชิ้นงานแตกร่อนหลังจากเพิ่มอุณหภูมิเป็น 40°C รอยแตกโค้งกลมกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน โดยพบมากที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของชิ้นงาน แต่มีปริมาณน้อยกว่าและขนาดรอยแตกเล็กกว่าสภาวะที่ 1
3	ไม่พบความเสียหายใด ๆ

จากการทดลอง สภาวะที่ 3 ที่ทำการแช่ชิ้นงานในอีเทอร์ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้ง จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปแช่ในอีเทอร์ที่ 40°C จนจบการทดลอง เป็นสภาวะที่ ดีที่สุดที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานในขณะกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

การแช่ชิ้นงานในปิโตรเลียมอีเทอร์ที่ 40°C ตลอดเวลาการทดลอง (สภาวะที่

1) ทำให้ชิ้นงานแตกร่อนโดยพบมากที่สุดบริเวณปลายทั้งสองข้างของชิ้นงาน เนื่องจาก PW ในตัวประสานอยู่ในสภาพของแข็งซึ่งมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่ที่เป็นระเบียบ แต่เมื่อถูกตัวทำละลายละลายออกมา PW จะมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ปริมาตรของสารละลายเพิ่มขึ้น⁽³⁰⁾ การแพร่ของ PW ในสารละลายจะแพร่จากภายในชิ้นงานซึ่งเป็นบริเวณที่สารละลายมีความเข้มข้นมากออกสู่ภายนอกชิ้นงานซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่า จากอัตราการละลายที่เร็วกว่าการแพร่จึงทำให้ภายในชิ้นงานมีความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ปริมาตรของสารละลายเพิ่มขึ้น เกิดความดันขึ้นภายในชิ้นงาน เมื่อปริมาตรของสารละลายเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จึงดันให้ผิวชิ้นงานแตกผแยกออกมา

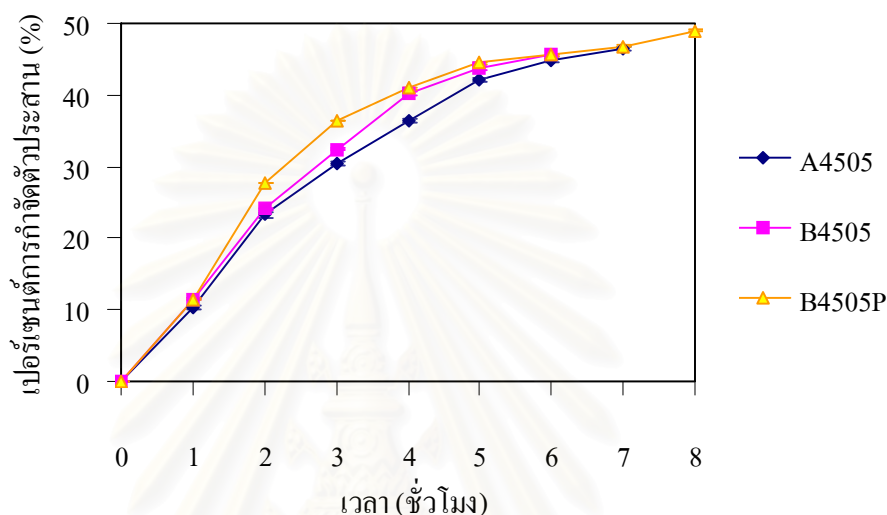
ในสภาวะที่ 2 การเริ่มแช่ชิ้นงานในอีเทอร์ที่ 30°C ทำให้อัตราการละลายของ PW ลดลง อัตราการแพร่ออกใกล้เคียงกับอัตราการละลาย ความดันที่เกิดขึ้นภายในลดลง จึงไม่เกิดการแตกร่อนที่ผิวชิ้นงานในช่วงนี้ และการแช่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 30°C 1 ชั่วโมงยังเป็นการเปิดช่องให้สามารถเกิดการแพร่ได้สะดวกขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอีเทอร์เป็น 40°C ยังคงทำให้เกิดการแตกร่อนเนื่องจากในช่องมีสารละลายที่มีความเข้มข้นอยู่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 40°C ทำให้การละลายเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายภายในชิ้นงานเพิ่มขึ้น แม้จะมีการเปิดช่องไว้แล้วก็ตาม แต่ระยะทางที่ PW ต้องแพร่ออกจากชิ้นงานยาวขึ้นและเป็นช่องที่แคบทำให้แพร่ได้ลำบาก จึงเกิดความดันขึ้นภายในชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการแตกร่อน

สำหรับสภาวะที่ 3 การแช่ชิ้นงานในอีเทอร์ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่ 50°C เป็นเวลา 45 นาที ทำให้อีเทอร์ระเหยออกจากชิ้นงานและดึงเอา PW ซึ่งละลายอยู่ในอีเทอร์นั้นออกมาเกาะอยู่ที่ผิวชิ้นงาน ทำให้เมื่อนำชิ้นงานไปแช่ในอีเทอร์อีกครั้งจึงสามารถกำจัด PW ส่วนนี้ได้ง่ายและไม่ทำให้เกิดความดันภายในชิ้นงาน และยังเป็นเปิดช่องให้ PW ภายในแพร่ออกมาได้สะดวกขึ้น ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานไปแช่ในตัวทำละลายที่ 40°C เพื่อกำจัดตัวประสานด้วยอัตราการละลายที่สูงขึ้นจึงไม่เกิดการแตกร่อนขึ้นกับชิ้นงาน

4.4.1.2 อัตราเร็วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

จากรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายในสภาวะที่ 3 พบว่า อัตราการกำจัดตัวประสานมีความใกล้เคียงกันในทุก ๆ ชิ้นงานที่ใช้ตัวประสานต่างกัน โดย B4505P ถูกกำจัดได้รวดเร็วที่สุดตามด้วย B4505 และ A4505 ตามลำดับ เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น การละลายเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง สำหรับ B4505 และ B4505P การละลายเพิ่มขึ้น

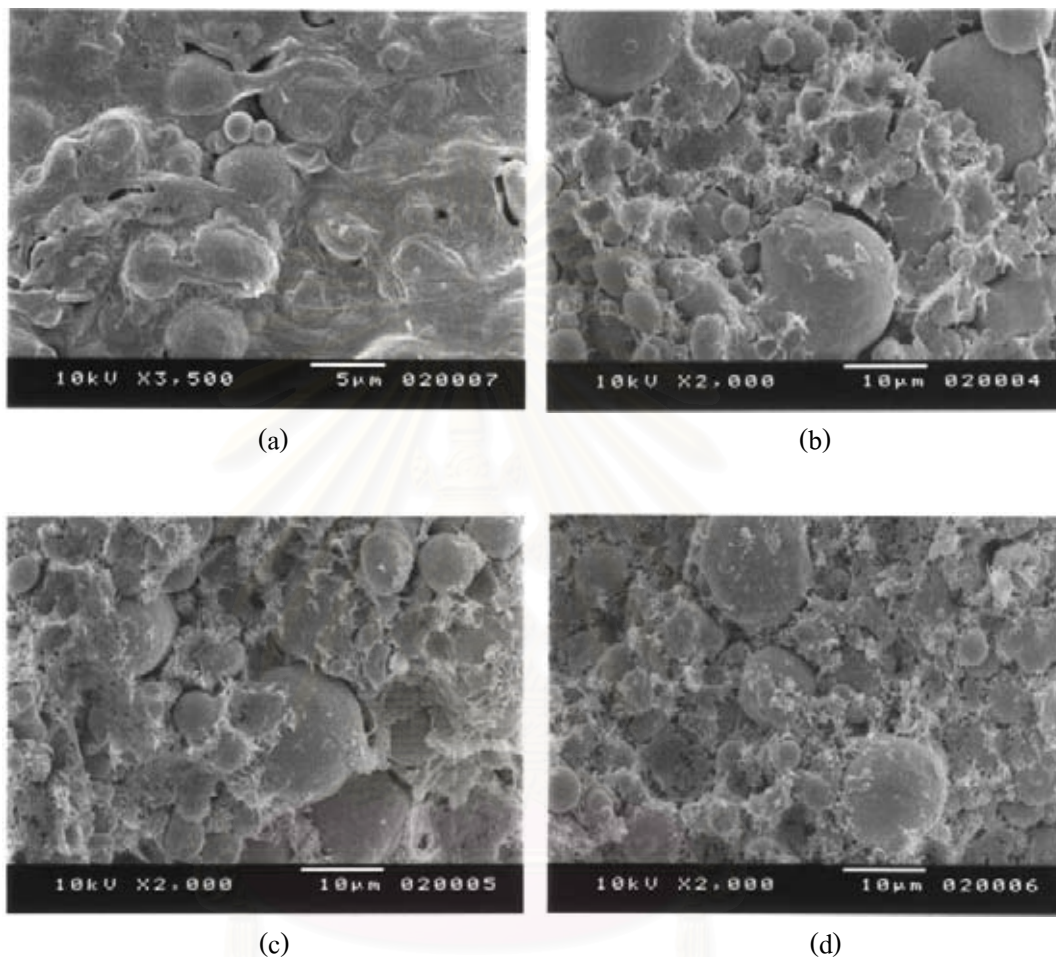
น้อยมากเมื่อผ่านไป 5 ชั่วโมง และ สำหรับ A4505 การละลายเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อผ่านไป 6 ชั่วโมง ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายในสภาวะที่ 3 สำหรับ B4505 และ B4505P คือ 5 ชั่วโมง สำหรับ A4505 คือ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 แผนภูมิเส้นแสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายในสภาวะที่ 3 (อุณหภูมิเอเทอร์ชั่วโมงแรก 30°ซ ชั่วโมงต่อไป 40°ซ)

สำหรับทุก ๆ ตัวประสาน ชั่วโมงแรกของการกำจัดตัวประสานมีอัตราการกำจัดตัวประสานต่ำกว่าชั่วโมงที่สองเนื่องจากการใช้อุณหภูมิต่ำกว่า B4505P ถูกกำจัดได้รวดเร็วที่สุดตามด้วย B4505 และ A4505 ตามลำดับ เนื่องจาก B4505P มีส่วนประกอบของน้ำมันปาล์มซึ่งเป็นของเหลวจึงสามารถละลายในเอเทอร์ได้อย่างรวดเร็ว B4505 ถูกกำจัดได้เร็วกว่า A4505 เพราะ B4505 ใช้พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นและมีกิ่งก้านน้อยกว่าจึงขวางกั้นทางแพร่ของ PW น้อยกว่า⁽²⁴⁾ เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น การละลายเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง เนื่องจากในขั้นตอนเอเทอร์สามารถละลาย PW ที่ผิวชิ้นงานได้โดยไม่ต้องแทรกซึมเข้าไปด้านใน และ PW ที่อยู่ในสารละลายสามารถแพร่ออกจากชิ้นงานเพื่อลดความเข้มข้นลงได้ง่าย เมื่อ PW ที่ผิวถูกละลายออกไปจึงเกิดโพรงที่จะให้เอเทอร์แทรกซึมเข้าไปภายในชิ้นงานและละลาย PW ภายใน แต่เนื่องจากช่องทางที่แคบ PW สามารถละลายออกมาได้ยากขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ภายในชิ้นงานมากขึ้น ทำให้อัตราการละลายลดลงเมื่อแช่ชิ้นงานนานขึ้น PW ที่เหลืออยู่จะอยู่ลึกมากขึ้น การละลายเป็นไปได้ยากขึ้น

4.4.1.3 ลักษณะของตัวประสานในบริเวณต่างๆหลังการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย



รูปที่ 4.12 ลักษณะตัวประสานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายโดยตัวประสานถูกกำจัดไปแล้ว 52% โดยน้ำหนัก ณ (a) บริเวณผิว (b) บริเวณภายในใกล้ผิวชั้นงาน (c) ถัดเข้ามาภายใน และ (d) ใจกลางชั้นงาน

จากภาพถ่าย SEM รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นลักษณะตัวประสานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายโดยตัวประสานถูกกำจัดไปแล้ว 52 % โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.12(a) เป็นบริเวณที่ผิวของชิ้นงานซึ่งเห็น ผงฝุ่นขึ้นมาจากตัวประสานและมีช่องทั้งขนาดเล็กและใหญ่กระจายอยู่ที่ผิวชั้นงาน บริเวณภายในใกล้ผิวชั้นงาน (รูปที่ 4.12(b)) มีตัวประสานเหลืออยู่น้อยกว่ามาก และมีลักษณะเป็นเส้นใยเชื่อมโยงกันอยู่ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปมา หลังกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำ

ละลายแล้วรอยแยกระหว่างผนังกับตัวประสานกว้างมากขึ้น บริเวณถัดเข้ามาภายใน (รูปที่ 4.12(c)) ลักษณะของตัวประสานคล้ายบริเวณใกล้ผิวชั้นงาน แต่รอยแยกระหว่างผนังกับตัวประสานลดลง บริเวณใจกลางชั้นงาน (รูปที่ 4.12(d)) เกิดรอยแยกระหว่างผนังกับตัวประสานน้อยที่สุด

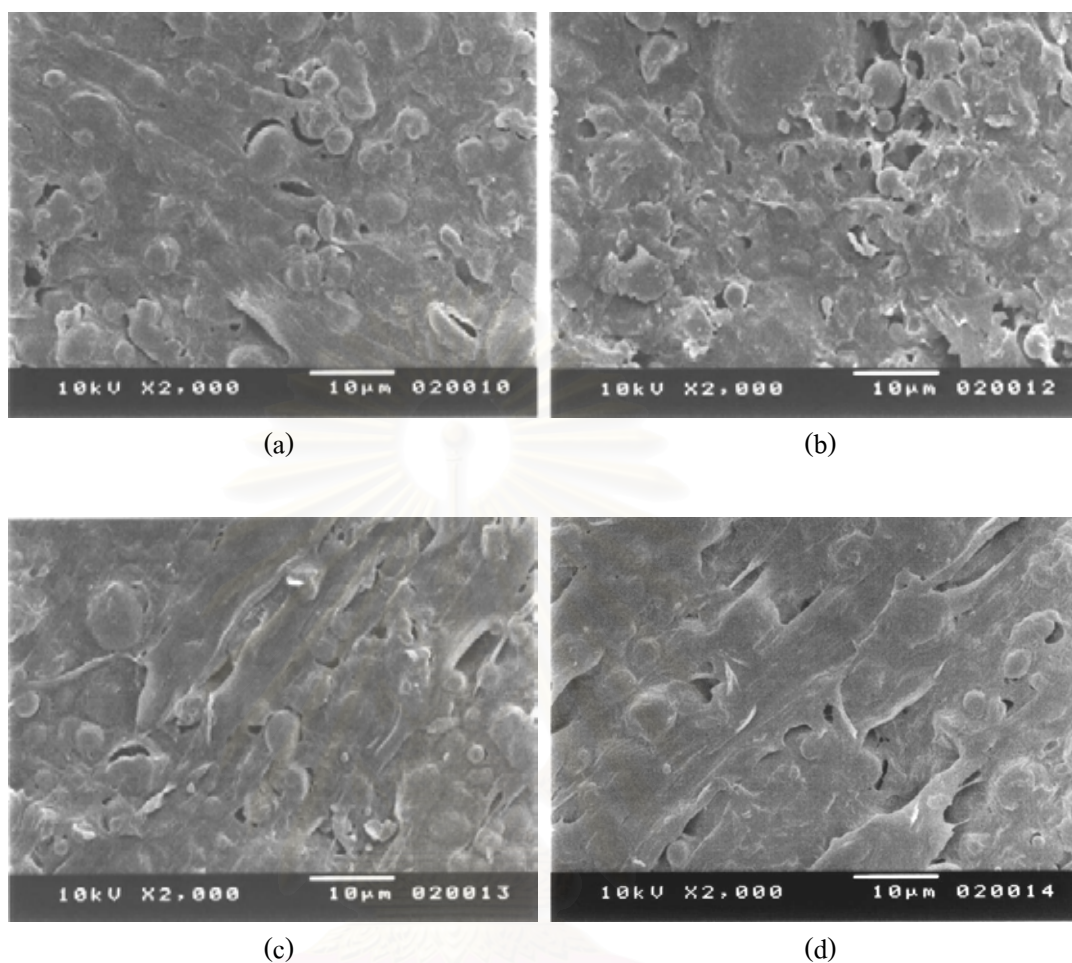
จากผิวเรียบของชั้นงานที่ทำการฉีดยื่นรูป (รูปที่ 4.8(a)) เมื่อชั้นงานผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย PW ที่เคยละลายอยู่ร่วมกับ LDPE ถูกดึงออกไป ทำให้ตัวประสานเกิดการหดตัวจึงเห็นผนังงอขึ้นมาจากตัวประสาน

ตัวประสานภายในชั้นงานมีลักษณะเป็นเส้นใยเชื่อมโยกันอยู่ เนื่องจากการที่ตัวประสานสูญเสีย PW ไป รอยแยกระหว่างผนังกับตัวประสานเกิดจากการหดตัวของตัวประสาน บริเวณถัดเข้ามาภายในมีรอยแยกระหว่างผนังกับตัวประสานแคบลง เนื่องจากภายในชั้นงานนั้นตัวทำละลายสามารถละลาย PW ได้น้อยกว่าภายนอก การหดตัวของตัวประสานจึงลดลงด้วย ณ บริเวณใจกลางชั้นงานมีการสูญเสีย PW น้อยที่สุด จึงเกิดการหดตัวน้อยที่สุด

ลักษณะตัวประสานที่ผิวกับภายในชั้นงานมีความต่างกัน ซึ่งจากทฤษฎีตัวทำละลายต้องละลาย PW ที่ผิวก่อนจึงจะแทรกซึมเข้าไปภายในชั้นงานได้ ดังนั้นผิวชั้นงานควรจะมีปริมาณ PW น้อยที่สุดและเกิดรอยแยกกว้างที่สุด แต่จากรูปที่ 4.12(a) ลักษณะตัวประสานที่ผิวยังคงเต็มไปด้วย PW ซึ่งมีสาเหตุจากเมื่อนำชั้นงานขึ้นจากอิเทอร์ ภายในช่องยังคงเต็มไปด้วยอิเทอร์ที่มี PW ละลายอยู่ เมื่อนำชั้นงานไปอบแห้ง อิเทอร์ระเหยออกจากผิวชั้นงานและดึงสารละลายที่อยู่ภายในขึ้นมาที่ผิวชั้นงานเพื่อให้อิเทอร์ระเหยออกทำให้เหลือ PW ตกค้างและแข็งตัวอยู่ที่ผิวชั้นงาน เป็นการปิดโพรงที่ต้องการ ทำให้ในขั้นตอนการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน ก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของตัวประสานที่เหลืออยู่สามารถออกมาสู่บรรยากาศได้ยาก เกิดความดันขึ้นภายในชั้นงาน และอาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับชั้นงานได้

4.4.1.4 การเปิดช่องที่ผิวให้กับชั้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

ลักษณะของตัวประสานที่ผิวชั้นงานหลังทำการเปิดช่องที่ผิวให้กับชั้นงาน โดยแช่ชั้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายและอบแห้งแล้วในอิเทอร์บริสุทธิ์อุณหภูมิ 40 °C ทั้งไว้ 1, 2, 5 และ 10 นาที แสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย และแช่ในปิโตรเลียมอีเทอร์บริสุทธิ์ อุณหภูมิ 40 °ซ เป็นเวลา (a) 1 (b) 2 (c) 5 และ (d) 10 นาที

รูปที่ 4.13(a) แสดงลักษณะตัวประสานบริเวณผิวชิ้นงานหลังจากแช่ในอีเทอร์บริสุทธิ์ที่ 40 °ซ เป็นเวลา 1 นาที พบช่องเปิดทั้งขนาดใหญ่และเล็กที่เกิดจากการกำจัดตัวประสานก่อนหน้านี้ และพบรูขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป การแช่ในอีเทอร์บริสุทธิ์เป็นเวลา 2 นาที ทำให้ช่องเปิดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการแช่ 1 นาที (รูปที่ 4.13(b)) และเป็นรูที่ค่อนข้างใหญ่ เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 5 นาที ตัวประสานมีลักษณะคล้ายกับการแช่ 1 นาที แต่มีช่องขนาดใหญ่จำนวนมากกว่าเล็กน้อย และมีรูเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่วไป ดังรูปที่ 4.13(c) การแช่เป็นเวลา 10 นาที เมื่อเทียบกับการแช่ 1 นาที ช่องเปิดมีขนาดใหญ่กว่าแต่ปริมาณน้อยกว่าเล็กน้อย โดยมีรูเล็ก ๆ น้อยมาก

จากเวลาในการแช่ชิ้นงาน 1, 2, 5 และ 10 นาที สามารถสรุปได้ว่าการแช่ชิ้นงานที่ผ่านการทำการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายมาในอีเทอร์บริสุทธิ์ที่ 40°C เป็นเวลา 2 นาที ช่วยในการกำจัด PW ที่อยู่ที่ผิวชิ้นงานออกไป และเป็นการเปิดช่องทางไหลของก๊าซให้กับชิ้นงานในขั้นตอนการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

บริเวณผิวชิ้นงานหลังจากแช่ในอีเทอร์บริสุทธิ์ที่ 40°C เป็นเวลา 1 นาที พบรูขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป เนื่องจากการแช่ 1 นาที สามารถช่วยละลาย PW ที่ผิวชิ้นงานให้เปิดเป็นรูเล็ก ๆ ขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาการแช่เป็น 2 นาที อีเทอร์สามารถละลาย PW ที่ปิดช่องอยู่ออกไปได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 5 นาที อีเทอร์เริ่มแทรกซึมเข้าไปในชิ้นงานมากขึ้น เมื่อนำชิ้นงานไปอบแห้งสารละลายที่มี PW ละลายอยู่ภายในจึงระเหยออกมาและทิ้ง PW ไว้ที่ผิวเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในขณะทำการกำจัดตัวประสานในตอนต้น การแช่ 10 นาทีให้ลักษณะเช่นเดียวกับการแช่ 5 นาที แต่มีรูน้อยกว่า เนื่องจากสารละลายเข้าไปภายในชิ้นงานมากกว่า

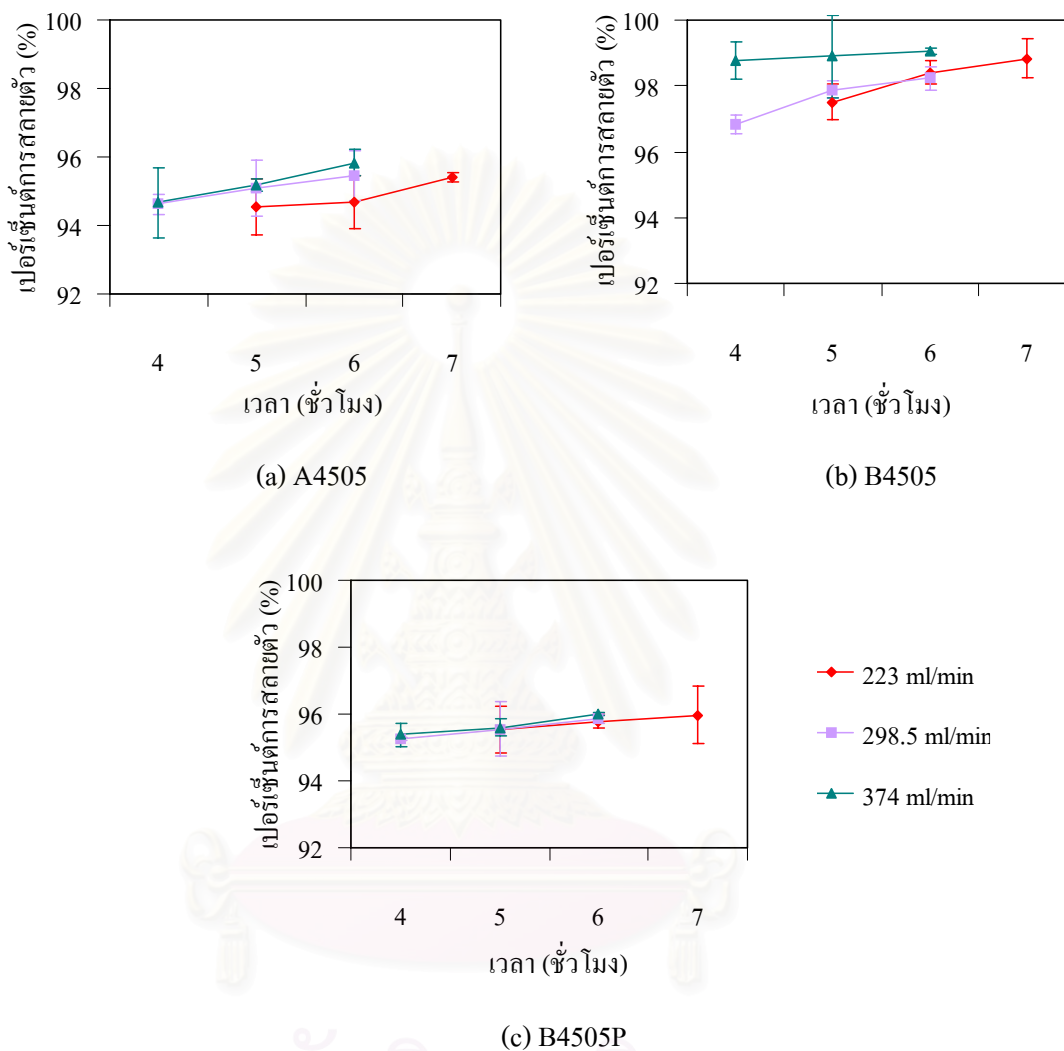
4.4.2 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

4.4.2.1 อัตราการให้ความร้อน

จากการทดลอง อัตราการให้ความร้อน 100 200 และ $300^{\circ}\text{C}/\text{ชั่วโมง}$ ไม่ทำให้เกิดความเสียหายใด ๆ กับชิ้นงาน อัตราการให้ความร้อน $300^{\circ}\text{C}/\text{ชั่วโมง}$ เป็นอัตราการให้ความร้อนสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้แช่ในอีเทอร์บริสุทธิ์เพื่อเปิดช่องซึ่งสามารถใช้อัตราการให้ความร้อนสูงสุดได้เพียง $50^{\circ}\text{C}/\text{ชั่วโมง}$

อัตราการให้ความร้อนมีผลต่ออัตราการสลายตัวของตัวประสานอย่างมาก อัตราการให้ความร้อนสูงทำให้ตัวประสานสลายตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความดันภายในชิ้นงานส่งผลให้เกิดการพองและแตกของชิ้นงาน^(4,7,16) ในขณะที่อัตราการให้ความร้อนต่ำทำให้เสียเวลาและพลังงาน รวมถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น การแช่ชิ้นงานในอีเทอร์บริสุทธิ์ 2 นาทีหลังจากการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายแล้วเป็นการเปิดรูพรุนที่ผิวหน้าชิ้นงาน ก๊าซที่เกิดจากสลายตัวของตัวประสานในขณะทำการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนสามารถออกจากชิ้นงานได้ง่ายขึ้น ไม่ทำให้เกิดความดันภายในชิ้นงาน ทำให้สามารถเพิ่มอัตราการให้ความร้อนได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน

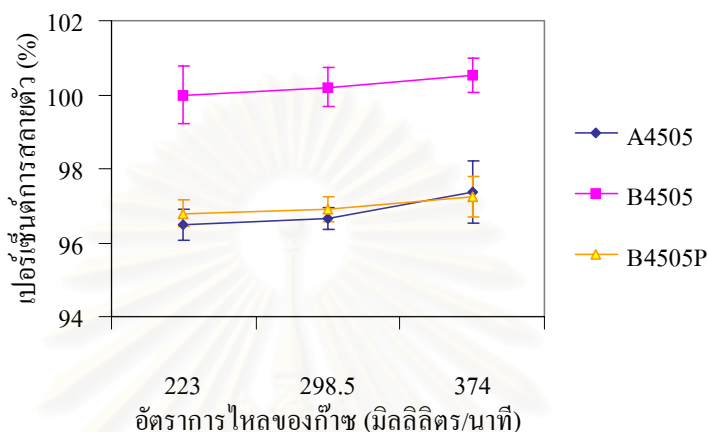
4.4.2.2 อัตราการไหลของก๊าซและเวลา



รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของ (a) A4505 (b) B4505 และ (c) B4505P ในอากาศที่ 370°C เมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซต่างกัน

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของชิ้นงานที่ใช้ตัวประสานต่างกัน ในบรรยากาศอากาศและอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% ตามลำดับ พบว่า อัตราการไหลของก๊าซและเวลาในการกำจัดตัวประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของทุกๆ ตัวประสานเพิ่มขึ้นทั้งในบรรยากาศของอากาศและอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% ในบรรยากาศของอากาศ

อัตราการไหลส่งผลต่อ B4505 มากที่สุด ตามด้วย A4505 และ B4505P ตามลำดับ สำหรับบรรยากาศ อาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% อัตราการไหลส่งผลต่อ A4505 มากที่สุด



รูปที่ 4.15 เปอร์เซนต์การสลายตัวของตัวประสานในอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% ที่ 450°C 1 ชั่วโมง เมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซต่างกัน

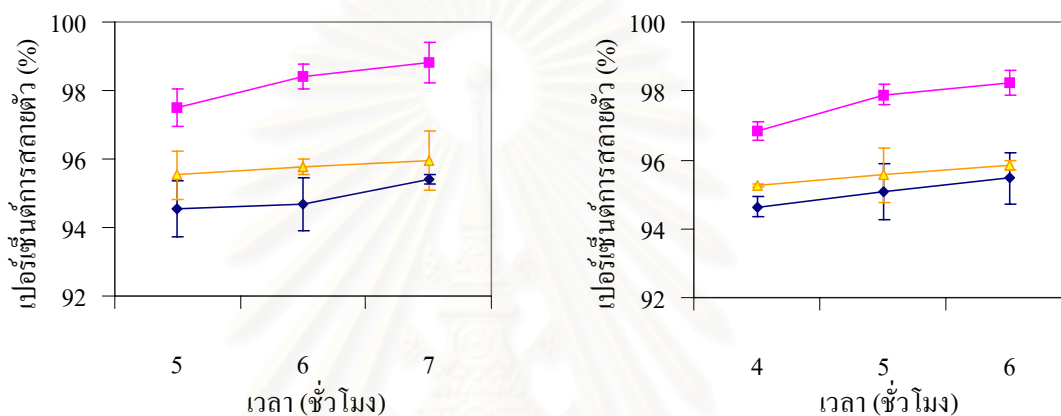
ในบรรยากาศอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% การใช้เวลากำจัดตัวประสาน 1 ชั่วโมง ก็เพียงพอที่จะกำจัดตัวประสานออกได้เกือบทั้งหมด เนื่องจากใช้บรรยากาศรีดักชันและการที่สามารถใช้อุณหภูมิในการกำจัดตัวประสานได้สูง

อัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซนต์การสลายตัวของทุกๆตัวประสานเพิ่มขึ้น เนื่องจากไปลดความดันย่อยของตัวประสานที่สลายตัวออกมาจากชิ้นงาน^(5,7,20) และชิ้นงานได้สัมผัสกับบรรยากาศเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศหรือปฏิกิริยารีดักชันในอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% จึงช่วยเพิ่มการสลายตัวของตัวประสานได้มากขึ้น⁽¹⁰⁾ แต่ อัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซนต์การสลายตัวของตัวประสานเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ๆ เนื่องจากอัตราการไหลที่ใช้เป็นอัตราที่ค่อนข้างช้า การใช้อัตราการไหลต่ำทำให้ต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อให้สามารถกำจัดตัวประสานออกไปได้มากขึ้นเท่ากับการใช้อัตราการไหลสูง ดังเช่นในอากาศสำหรับทุกๆ ตัวประสาน การใช้อัตราการไหล 223 มิลลิลิตร/นาท ต้องใช้เวลากำจัดตัวประสาน 7 ชั่วโมง จึงจะเกิดการสลายตัวเท่ากับการใช้อัตราการไหล 298.5 และ 374 มิลลิลิตร/นาท

บรรยากาศของอากาศให้ความแข็งแรงกับชิ้นงานหลังการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนมากกว่าในอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% แม้ว่าจะมีเปอร์เซนต์การสลายตัวเท่ากัน

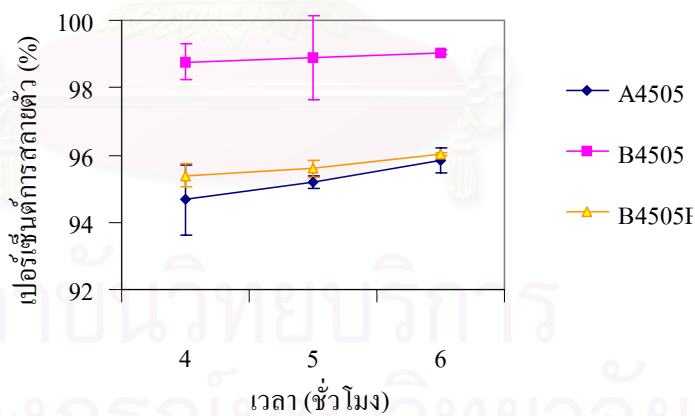
เนื่องจากบรรยากาศออกซิเดชันในอากาศทำให้ตัวประสานบางส่วนเกิดออกไซด์ที่มีความแข็งแรง⁽²⁸⁾ ช่วยยึดผงไว้ด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตาม อากาศทำให้ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดออกซิเดชันที่ผิว ทำให้ชิ้นงานเป็นสีน้ำตาล แต่สามารถกำจัดออกได้ด้วยการเผาในไฮโดรเจน ที่ 700°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.4.2.3 ชนิดของตัวประสาน



(a) 223 มิลลิตร/นาที

(b) 298.5 มิลลิตร/นาที



(c) 374 มิลลิตร/นาที

รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของตัวประสานที่ 370°C ที่อัตราการไหลของอากาศ

(a) 223 (b) 298.5 และ (c) 374 มิลลิตร/นาที

ในทุก ๆ สภาวะ (รูปที่ 4.15 และ 4.17) B4505 มีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวสูงสุด ในขณะที่ A4505 สลายตัวน้อยที่สุด เนื่องจาก B4505 ใช้พอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ง่ายกว่า A4505 แต่ B4505P ซึ่งใช้พอลิเมอร์ตัวเดียวกับ B4505 มีการใช้น้ำมันปาล์มซึ่งสลายตัวยากกว่า PW จึงทำให้เกิดการสลายตัวที่ยากขึ้นเปอร์เซ็นต์การสลายตัวจึงลดลง

การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนไม่ส่งผลให้เกิดความเสียหายใด ๆ กับชิ้นงาน แต่ทำให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นก่อนขึ้นตอนนี้เห็นชัดเจนมากขึ้น เช่น การพองจากการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

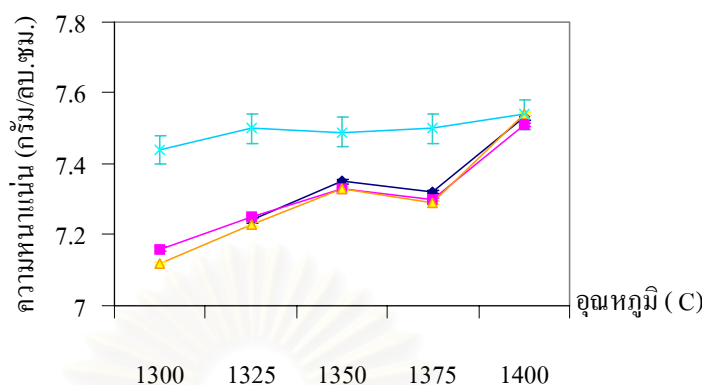
4.5 การเผาผนึก

4.5.1 ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อความหนาแน่น ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค

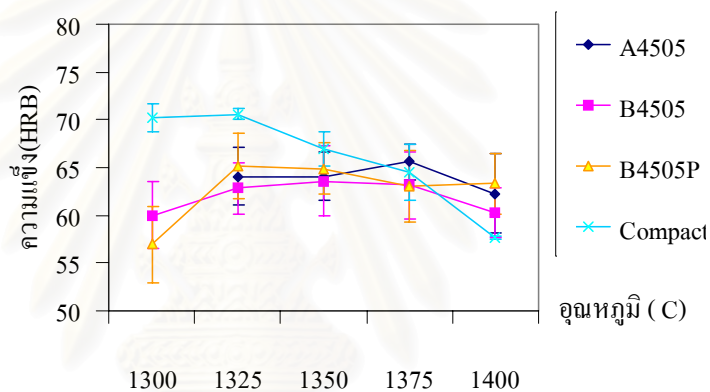
ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อความหนาแน่นและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L แสดงในรูปที่ 4.17

จากรูปที่ 4.17(a) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงาน MIM เพิ่มขึ้น ยกเว้น 1375°C ที่มีความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย สำหรับชิ้นงานอัดขึ้นรูปซึ่งมีความหนาแน่นเริ่มต้นสูงกว่า ที่ 1300°C มีความหนาแน่นต่ำสุด ช่วงอุณหภูมิ $1325\text{-}1375^{\circ}\text{C}$ มีความหนาแน่นคงที่ และเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิเผาผนึก 1400°C แสดงให้เห็นว่า 1300°C เป็นอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปสำหรับการเผาผนึกผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงอยู่ที่ $1325\text{-}1375^{\circ}\text{C}$

สำหรับชิ้นงาน MIM ค่าความแข็งของชิ้นงานต่ำเมื่อใช้อุณหภูมิการเผาผนึก 1300 และ 1400°C ช่วง $1325\text{-}1375^{\circ}\text{C}$ ให้ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปมีความแข็งตกลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.17(b)



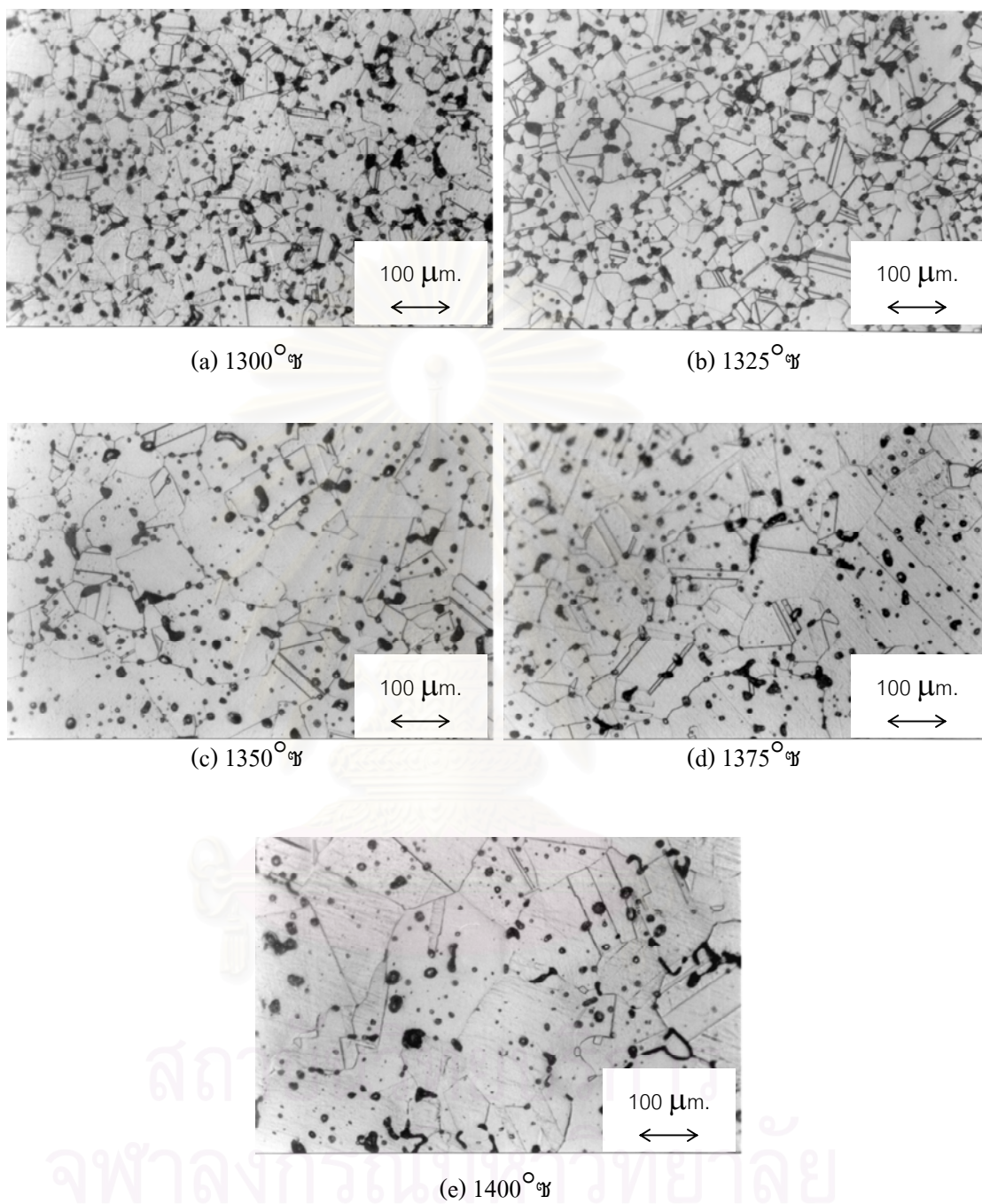
(a)



(b)

รูปที่ 4.17 (a) ความหนาแน่นและ (b) ความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึก 1 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน MIM ในรูปที่ 4.18 อุณหภูมิการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเกรนใหญ่ขึ้นและปริมาณรูพรุนลดลง อุณหภูมิการเผาผนึก 1300 และ 1325^oซ ทำให้เกรนมีขนาดเล็ก รูพรุนส่วนมากอยู่ตามขอบเกรน โดยที่ 1300^oซ มีปริมาณรูพรุนที่มากและขนาดใหญ่กว่าที่ 1325^oซ ที่อุณหภูมิ 1350 และ 1375^oซ เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณรูพรุนลดลง อยู่บริเวณภายในและขอบเกรน อุณหภูมิ 1400^oซ เกรนมีขนาดใหญ่ รูพรุนเหลือเฉพาะรูพรุนขนาดใหญ่โดยส่วนมากอยู่ภายในเกรน



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน MIM เหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ (a) 1300 (b) 1325 (c) 1350 (d) 1375 และ (e) 1400^oซ

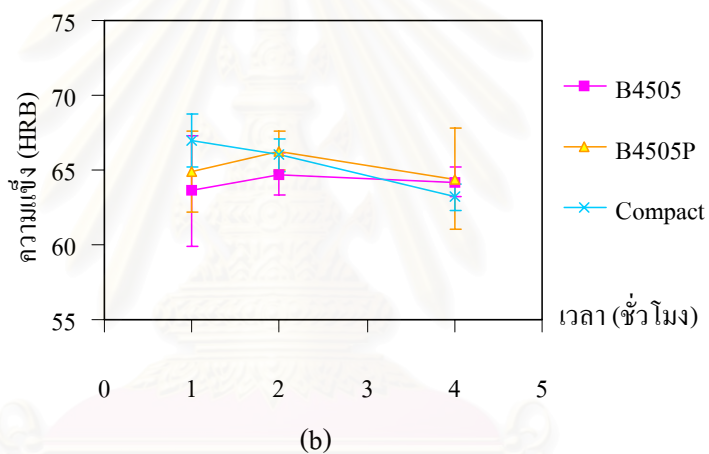
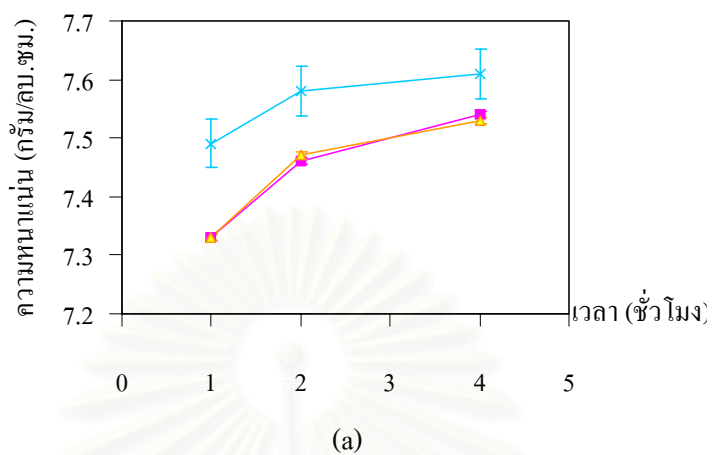
อุณหภูมิการเผาผลาญที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเกรนใหญ่ขึ้นและปริมาณรูพรุนลดลง จึงทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงาน MIM เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นต่ำและรูพรุนปริมาณเมื่อเผาผลาญที่ 1300°C ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งต่ำ อุณหภูมิการเผาผลาญ 1325°C และ 1350°C มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งคงที่เนื่องจากที่ 1325°C มีเกรนขนาดเล็กซึ่งให้ความแข็งที่มากกว่า แต่การมีปริมาณรูพรุนมากกว่าจึงลดผลของขนาดเกรนต่อความแข็งลง ที่ 1375°C ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้เกิดการผุและการโตของเกรนอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดรูปิดที่มีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้การกำจัดรูพรุนในเผาผลาญยากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1400°C ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากผุเกิดการหลอมเหลวขึ้นบางส่วนทำให้ส่วนที่เหลวไหลเข้าไปในช่องว่างเป็นการปิดรูพรุนอย่างรวดเร็ว แต่การที่บางส่วนหลอมนี้ทำให้ความแข็งลดลงแม้จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นก็ตาม

ในขณะที่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปมีความแข็งตกลงอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลมาจากขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น แต่สำหรับชิ้นงาน MIM ช่วง $1325-1375^{\circ}\text{C}$ ให้ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิ 1350°C ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นและความแข็งที่สูงเป็นอุณหภูมิในการเผาผลาญ

4.5.2 ผลของเวลาการเผาผลาญต่อความหนาแน่น ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค

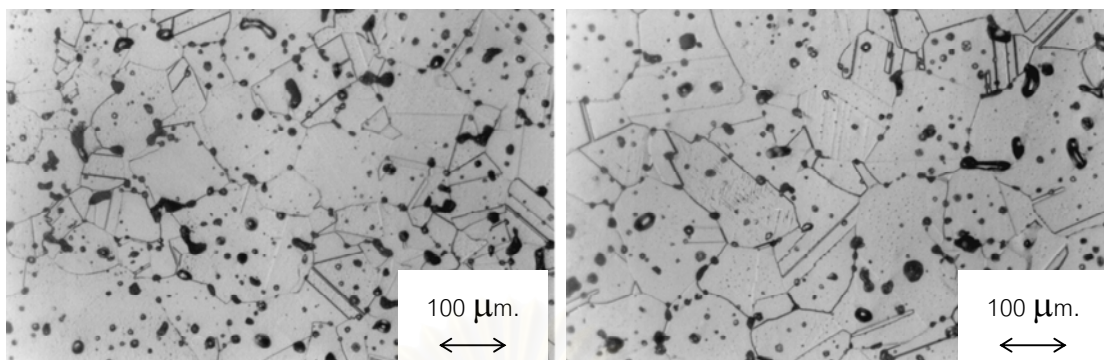
จากรูปที่ 4.19 ซึ่งแสดงความหนาแน่นและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผลาญที่ 1350°C ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเผาผลาญเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาจาก 2 เป็น 4 ชั่วโมง ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย ในช่วงการเผาผลาญ 1 และ 2 ชั่วโมง ความแข็งของชิ้นงาน MIM เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 4 ชั่วโมงความแข็งค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปมีความแข็งลดลง เมื่อเวลาการเผาผลาญเพิ่มขึ้น

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน MIM หลังการเผาผลาญที่ 1350°C เมื่อใช้เวลาการเผาผลาญต่างกันแสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อเวลาการเผาผลาญเพิ่มขึ้นขนาดเกรนใหญ่ขึ้นและมีปริมาณรูพรุนลดลง เวลาการเผาผลาญ 1 ชั่วโมงรูพรุนยังคงพบที่บริเวณขอบเกรนเป็นจำนวนมาก เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 2 ชั่วโมง รูพรุนขนาดเล็กลดลงและอยู่ภายในเกรนมากขึ้น เวลาการเผาผลาญ 4 ชั่วโมง พบเกรนขนาดใหญ่และมีเฉพาะรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไปภายในเกรน



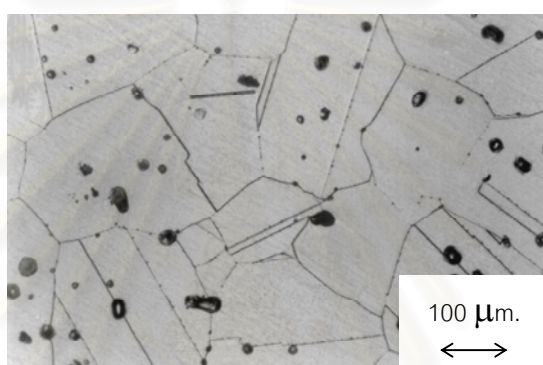
รูปที่ 4.19 ความหนาแน่นและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึกที่ 1350°C

เมื่อเวลาการเผาผนึกเพิ่มขึ้นขนาดเกรนใหญ่ขึ้นและมีปริมาณรูพรุนลดลงจึงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงาน MIM มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นสูงกว่าชิ้นอัดขึ้นรูปเนื่องจากมีความหนาแน่นเริ่มต้นที่ต่ำกว่าทำให้มีแรงผลักดันที่มากกว่า ในช่วงการเผาผนึก 1-2 ชั่วโมง ความแข็งของชิ้นงาน MIM เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปมีความแข็งลดลงเนื่องจากเกรนที่ใหญ่ขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 4 ชั่วโมง ความแข็งค่อนข้างคงที่แม้ว่าจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น จากผลการทดลองนี้จึงเลือกเวลา 4 ชั่วโมงเป็นเวลาในการเผาผนึก



(a) 1 ชั่วโมง

(b) 2 ชั่วโมง



(c) 4 ชั่วโมง

รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน MIM เหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึกที่ 1350°C เป็นเวลา (a) 1 (b) 2 และ (c) 4 ชั่วโมง

4.5.3 ผลการเผาผนึกชิ้นงาน MIM ในบรรยากาศ H_2 ที่ 1350°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การหดตัว ความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์รูพรุนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึก

ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์การหดตัว	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่น	เปอร์เซ็นต์รูพรุน
A4505	13.0 ± 0.4	7.57 ± 0.01	95.8 ± 0.1	4.2 ± 0.1
B4505	13.2 ± 0.3	7.58 ± 0.01	96.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1
B4505P	13.0 ± 0.7	7.60 ± 0.01	96.3 ± 0.1	3.7 ± 0.1

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หลังการเผาผนึก

ชนิดตัวประสาน	ความแข็ง (HRB)	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความเค้นคราก (MPa)	ยังโมดูลัส (GPa)	เปอร์เซ็นต์การ ยืดตัว
A4505	66±0	489±30	146±9	18±2	37±8
B4505	64±0	482±30	143±7	19±2	36±6
B4505P	65±2	504±10	148±7	19±1	47±7

ผลการเผาผนึกชิ้นงาน MIM ที่เตรียมจากตัวประสานต่างชนิดกันในบรรยากาศไฮโดรเจน ที่ 1350°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8

จากตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การหดตัวและความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึกเมื่อใช้ตัวประสานต่างชนิดกันให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าตัวประสานต่างชนิดกันไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นหลังการเผาผนึก การหดตัวและความหนาแน่นนี้แสดงถึงการกระจายตัวของผงในชิ้นงานก่อนการเผาผนึกที่ดีจึงทำให้ทุก ๆ ชิ้นงานมีการหดตัวและความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน

จากผลการทดสอบแรงดึง และความแข็ง ทุก ๆ ตัวประสานทำให้ชิ้นงาน MIM มีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกัน ชิ้นงาน MIM ที่ใช้ A4505 และ B4505P เป็นตัวประสานให้ค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้ B4505 เป็นตัวประสานเล็กน้อยแม้ว่าจะมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เนื่องจากในขั้นตอนของการกำจัดตัวประสาน B4505 สามารถถูกกำจัดออกไปได้มากกว่า A4505 และ B4505P ทำให้ชิ้นงานที่ใช้ A4505 และ B4505P เป็นตัวประสานมีตัวประสานเหลือค้างอยู่มากกว่า ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนให้กับชิ้นงานได้ จึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากการมีคาร์บอนเพิ่มขึ้น ดังนั้น B4505 จึงเหมาะสมกับขั้นตอนการเผาผนึกมากที่สุดเนื่องจากให้ความหนาแน่นสูง และให้สมบัติทางกลที่ดีโดยไม่ทำให้ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เปลี่ยนหลังการเผาผนึก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติของส่วนผสมของตัวประสานเพื่อหาตัวประสานที่มีสมบัติเหมาะสมกับขั้นตอนในการฉีดขึ้นรูป การกำจัดตัวประสาน และการเผาผลาญ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง ผลการทดลองในขั้นตอนต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ทุก ๆ ตัวประสานมีความสามารถในการเปียกบนเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ได้ดี การเพิ่มปริมาณ SA และการใช้ LD 1630 J (A) เป็นส่วนผสมตัวประสานทำให้ตัวประสานมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูง ความหนืดของตัวประสานมีผลต่อกระจายตัวของผงในตัวประสาน การเพิ่มปริมาณ LDPE หรือการใช้ LD 1630 J (A) ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นการกระจายตัวของผงดีขึ้น

5.1.2 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L คือ การใช้ตำแหน่งทางเข้าด้านปลายโดยมีความกว้างทางเข้า 5 มิลลิเมตร อุณหภูมิกระบอกฉีดที่เหมาะสมสำหรับของผสมที่ใช้ A4505 B4505 และ B4505P เป็นตัวประสานอยู่ในช่วง 100-105, 95-100 และ 105-110^oC ตามลำดับ อุณหภูมิหัวฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับทุกตัวประสานคือ 50-60 และ 30-35^oC ตามลำดับ ความดันที่ใช้คือ 900 ปอนด์/ตารางนิ้ว ของผสมที่ใช้ B4505P เป็นตัวประสานให้ความหนาแน่นของชิ้นงานในแต่ละบริเวณที่ต่อเนื่องที่สุด

5.1.3 สภาพในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายที่ดีที่สุดที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน คือ การแช่ชิ้นงานในอีเทอร์ที่ 30^oC เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่ 50^oC 45 นาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปแช่ในอีเทอร์ที่ 40^oC จนสามารถกำจัดตัวประสานได้มากกว่า 45% โดยน้ำหนัก เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายสำหรับ A4505 คือ 6 ชั่วโมง สำหรับ B4505 และ B4505P คือ 5 ชั่วโมง การนำชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายแล้วไปแช่ในอีเทอร์บริสุทธิ์ที่ 40^oC 2 นาที เป็นการเปิดรูพรุนให้กับผิวชิ้นงานได้มากที่สุด

5.1.4 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนในบรรยากาศของอากาศและอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% คือ 370 และ 450^oซ ตามลำดับ อัตราการให้ความร้อน 300^oซ/ชั่วโมง เป็นอัตราการให้ความร้อนสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน อัตราการไหลของก๊าซและเวลาในการกำจัดตัวประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของทุก ๆ ตัวประสานเพิ่มขึ้นทั้งในบรรยากาศของอากาศและอาร์กอนผสมไฮโดรเจน 5% ของผสมที่ใช้ B4505 เป็นตัวประสานมีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวสูงสุดในขณะที่ A4505 สลายตัวน้อยที่สุด

5.1.5 สภาวะในการเผาผลาญที่เหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L คือ การเผาผลาญที่ 1350^oซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศไฮโดรเจน ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่เตรียมจากตัวประสานทั้ง 3 ชนิดมีความหนาแน่น 96%จากทฤษฎี และได้สมบัติทางกลที่ดี

5.1.6 จากการที่ B4505 สามารถถูกกำจัดได้อย่างรวดเร็วทั้งในการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายและด้วยความร้อนโดยทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานน้อยที่สุด แม้ว่า B4505P จะเป็นตัวประสานที่ให้ความหนาแน่นในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปที่ดีที่สุดก็ตาม แต่ความหนาแน่นหลังการเผาผลาญของชิ้นงานที่เตรียมจากตัวประสานทั้ง 3 ชนิดไม่แตกต่างกัน ดังนั้น ตัวประสานที่เหมาะสมกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ในงานวิจัยนี้ คือ B4505

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรใช้เครื่องฉีดพลาสติกที่สามารถปรับสภาวะในการฉีดได้ละเอียด เพื่อให้ได้ชิ้นงานเริ่มต้นที่ดีซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหลังการเผาผลาญ

5.2.2 เนื่องจากปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นสารเคมีที่เป็นพิษต่อร่างกายและระเหยได้ง่าย หากใช้ในอุตสาหกรรมจะต้องมีการควบคุมอย่างเข้มงวดซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงควรใช้ตัวทำละลายอื่นที่สามารถทดแทนกันได้

รายการอ้างอิง

1. A. Hayward. Metal Injection Moulding : A Design Overview. Powder Metallurgy 1997. Vol. 40. No. 3: 170-171.
2. E.R. Klar. Powder Metallurgy: ASM Handbooks, 9th edition: Vol.7.
3. Metal Injection Moulding[Online]. Available from: <http://www.EPMA.com> [2000, July 19]
4. Randall M. German. Powder Injection Molding. Metal Powder Industries Federation. New Jersey: Princeton, 1990.
5. Y.L. Ho and S.T. Lin. Debinding Variables Affecting the Residual Carbon Content of Injection-Molded Fe-2 Pct Ni Steels. Metallurgical and Materials Transactions A 1995. Vol. 26A: 133-142.
6. L. Nyborg, E. Carlström, A. Warren and H. Bertilsson. Guide to Injection Moulding of Ceramics and Hard Metals: Special Consideration of fine powder. Powder Metallurgy 1998. Vol. 41. No. 1: 41-45.
7. K.S. Hwang and T.H. Tsou. Thermal Debinding of Powder Injection Molded Parts: Observations and Mechanisms. Metallurgical and Materials Transactions A 1992. Vol. 23A: 2775-2782.
8. Sedat Özbilen and Murat Dalkiliç. Powder Injection Molded Gas and Water Atomised 316L Stainless Steel Powder Mixtures. Powder Materials: Current Research and Industrial Practices 1999: 257-267.
9. T. Hartwig, G. Veltl, F. Petzoldt, H. Kunze, R. Scholl and B. Kieback. Powders for Metal Injection Molding. Journal of the European Ceramic Society 1998. Vol. 18: 1211-1216.
10. Toru shimizu, Youichi Murakasi and Toshio Sano. Evaluations of Binder Systems for Supercritical Carbon-Dioxide Debinding Process. APEC/ITIT Symposium on High Performance Metal Matrix Composites 1999: 187-192.
11. Z.Y. Liu, N.H. Loh, S.B. Tor, K.A. Khor, Y. Murakoshi, and R. Maeda. Binder System for Micropowder Injection Molding. Materials Letters 2001: 31-38.

12. M.A. Omar, H.A. Davies, P.F. Messer and B. Ellis. The Influence of PMMA Content on the Properties of 316L Stainless Steel MIM Compact. Journal of Materials Processing Technology 2001: 477-481.
13. K.C. Hsu, C.C. Lin and G.M. Lo. The Effect of Wax Composition on the Injection Molding of Carbonyl Iron Powder with LDPE. Canadian Metallurgical Quarterly 1996. Vol.35. No. 2: 181-187.
14. R. Supati, N.H. Loh, K.A. Khor and S.B. Tor. Mixing and Characterization of Feedstock for Powder Injection Molding. Materials Letters 2000: 109-114.
15. N.H. Loh, S.B. Tor and K.A. Khor. Powder Injection Molding – Mixing Study Using Tagachi Method. APEC/ITIT Symposium on High Performance Metal Matrix Composites 1999: 216-227.
16. C.H. Ji, N.H. Loh, S.B. Tor and K.A. Khor. Investigation of Metal Injection Molding (MIM) Defects. APEC/ITIT Symposium on High Performance Metal Matrix Composites 1999: 228-239.
17. K.C. Tam and X. Hu. The Effect of Binder Characteristics on the Flow and Mechanical Properties of Injection Molded Green Parts. Processing and Fabrication of Advanced Materials VI 1998: 1477-1488.
18. T. Shimizu, Y. Murakoshi, K. Wechwitakhlung, T. Sano and H. Negishi. Characterization of the Molding Methods and the Binder System in the MIM process. 2nd International Symposium on High Performance Metal Matrix Composites 1997: 223-228.
19. Tor S.B., Loh N.H. and Khor K.A. Flow Analysis of Metal Injection Moulding Process Using Flow Simulation Software. APEC/ITIT Symposium on High Performance Metal Matrix Composites 1999: 171-186.
20. Ji Chun Hai, Loh Ngiap Hiang, Khor Khiam Aik and Tor Shu Beng. Effects of Debinding Parameters on Metal Injection Molding Parts. APEC/ITIT Symposium on High Performance Metal Matrix Composites 1999: 205-215.
21. N.H. Loh, K.A. Khor and S.B. Tor. Metal Injection Molding of Stainless Steel 316L. 2nd International Symposium on High Performance Metal Matrix Composites 1997: 262-272.

22. J.A. Moore, B.P. Jarding, B.K. Lograsso, and I.E. Anderson. Atmosphere Control during Debinding of Powder Injection Molded Parts. Journal of Materials Engineering and Performance 1995. Vol. 4. No. 3: 275-282.
23. K.S. Hwang and Y.M. Hsieh. Comparative Study of Pore Structure Evolution during Solvent and Thermal Debinding of Powder Injection Molded Parts. Metallurgical and Materials Transactions A 1996. Vol. 27A: 245-253.
24. Kuen-Shyang Hwang, Heng-Kuang Lin and Wey Hwang. Effect of Processing Parameters and Material Characteristics on the Solvent Debinding Behavior of PIM Compacts. Processing and Fabrication of Advanced Materials VI 1998: 1421-1431.
25. N.H. Loh and R.M. German. Statistical Analysis of Shrinkage Variation for Powder Injection Molding. Journal of Materials Processing Technology 1996. Vol. 56: 278-284.
26. S.T. Lin. Interface Controlled Decarburisation Model for Injection Moulded Parts during Debinding. Powder Metallurgy 1997. Vol. 40. No. 1: 66-68.
27. ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2540.
28. T. Hatakeyama and F.X. Quinn, Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science. England: John Willey & Sons, 1994.
29. วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. งานฉีดพลาสติก. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2540.
30. S.T. Lin and K.S. Hwang. In situ Dimensional Changes of Powder Injection-Molded Compacts during Solvent Debinding. Acta Materialia 1998. Vol. 46. No. 2: 4303-4309.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

อภิธานศัพท์

ศัพท์	ความหมาย
การทรุด	ลักษณะผิวชิ้นงานที่ยุบตัวลงไป
การบวม	การขยายตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากของเหลวแทรกซึมเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์
การพอง	การโป่งพองที่บริเวณผิวชิ้นงานทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างผิวกับเนื้อสารภายใน
ความหนาแน่นเคาะ	ความหนาแน่นของผงในภาชนะบรรจุเมื่อถูกเคาะหรือเขย่าภายใต้สภาวะที่กำหนด
รอยเชื่อม	ลักษณะความเสียหายบนชิ้นงานที่เกิดจากเนื้อสารไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกันทำให้เกิดรอยต่อเป็นแนวบนชิ้นงาน
รีโอโลยี	สมบัติทางความหนืดและความยืดหยุ่นของวัสดุซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน ความเค้น และความเครียดของวัสดุ
อัตราการไหลของของไหล	อัตราการไหลของพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะที่กำหนด มีหน่วยเป็นกรัม/10นาที โดยเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงความหนืดของพอลิเมอร์

ภาคผนวก ข.

株式会社アトミック

本社
青森県八戸市大字河原本字海岸4-44
〒039-1161
Tel.0178-73-2801
Fax.0178-73-2810

ATMIX CORPORATION

HEAD OFFICE HACHINOHE PLANT
4-44 Kawan, Kawanagi-cho, O-aza,
Hachinohe-shi, Aomori-ken, 039-1161 JAPAN
Tel.+81-178-73-2801
Fax.+81-178-73-2810



MILL CERTIFICATE

DATE OF ISSUE 2000/03/06 (No.F13031059A)

CUSTOMER : PACIFIC SOWA CORPORATION
KIND OF MATERIALS : STAINLESS STEEL POWDER
CONTRACT QUANTITY : 10 kg
LOT NO : 02V3138
DESIGNATION OF GRADE : SUS316L
NOMINAL SIZE : PF-20F HIGH T/D
NO. OF PACKAGES : 1
NET WEIGHTS : 10 KG(22.046 LBS)

CHEMICAL COMPOSITIONS(MASS %)

C	: MAX 0.030	: 0.021
Si	: MAX 1.00	: 0.75
Mn	: MAX 2.00	: 0.74
P	: MAX 0.045	: 0.016
S	: MAX 0.030	: 0.006
Ni	: 12.00~15.00	: 12.58
Cr	: 16.00~18.00	: 16.54
Mo	: 2.00~3.00	: 2.10
Cu	: REPORT	: 0.03
O	: REPORT	: 2,890

SCREEN ANALYSIS(MASS %)

+30	μm	: MAX	7.0	: 3.7
30 ~ 20	μm	: MAX	15.0	: 11.3
20 ~ 10	μm	: MAX	45.0	: 31.6
-10	μm	: MIN	40.0	: 53.4

MEAN SIZE (μm)	9.00~11.00	: 9.58
TAP DENSITY (g/cm^3)	REPORT	: 4.51

IT IS HEREWITH CERTIFIED THAT THE ABOVE MATERIALS ARE SATISFACTORY IN COMPLIANCE
WITH THE REQUIREMENTS SPECIFIED IN THE CONTRACTS.

MANAGER OF Q.A.SECTION

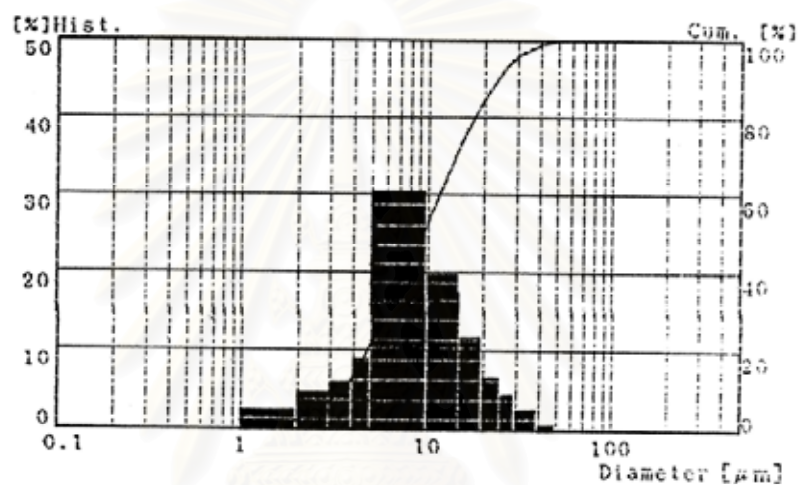


รูปที่ 1 ใบรับรองเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 316L

※ ※ PARTICLE SIZE ANALYSIS ※ ※

CHUETSU GRAPHITE WORKS CO.,LTD.

RUN No.	100	Measuring Time	60
Sample name	316L:PF-20F	Range	0.9 - 176
Lot No.	02V3138	Data address	764
Sampling Date	02/26/00	Comment	
Sampling time	16:43	Remark	RANDOM PARTICLE



(CH)	Dia. (μm)	Cum. (%)	Hist. (%)	Summary Data *
1	1.00	0.04	0.04	DV = 0.2693
2	2.00	2.44	2.40	10% = 3.48
3	3.00	7.18	4.74	50% = 9.58
4	4.00	10.42	6.24	90% = 20.06
5	5.00	22.56	9.13	CV = 11.53
6	10.00	53.08	30.82	CS = 0.858
7	15.00	73.27	19.89	
8	20.00	85.02	11.75	
9	25.00	91.79	6.77	
10	30.00	96.30	4.51	
11	40.00	99.14	2.84	
12	50.00	100.00	0.86	
13	60.00	100.00	0.00	
14	70.00	100.00	0.00	
15	80.00	100.00	0.00	
16	100.00	100.00	0.00	

รูปที่ 2 การวิเคราะห์ขนาดผงเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

INJECTION MOLDING

1 Siam Cement Road, Bangsue, Bangkok. 10800 Thailand. | **SIAM CHEMICAL TRADING CO.,LTD.**
 Tel. (662) 586-4025-7, 5446-7 Fax. (662) 587-2129 , 587-2138 | The Siam Cement Petrochemicals Group



PHYSICAL PROPERTIES	UNIT	TESTING METHOD	LD1630J
MELT FLOW RATE	g/10 min.	ASTM D 1238	30
DENSITY	g/cm ³	ASTM D 1505	0.916
TENSILE STRENGTH AT YIELD	kg./cm ²	ASTM D 638	100
TENSILE STRENGTH AT BREAK	kg./cm ²	ASTM D 638	100
ELONGATION AT BREAK	%	ASTM D 638	150
FLEXURAL MODULUS	kg./cm ²	ASTM D 790	1,300
HARDNESS, SHORE D	-	ASTM D 2240	47
VICAT SOFTENING POINT	°C	ASTM D 1525	85
MELTING POINT	°C	ASTM D 2117	105

**LOW
DENSITY
POLYETHYLENE**

รูปที่ 3 สมบัติของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ LD1630J (A)

APPLICATION

Housewares, small to large cksue base resis for powder coating application, toy parts, masterbatch carrier.

CHARACTERISTIC

Good flowability for multicavities, good toughness and flexibility, excellent gloss and transparency, oilresis and food contact.

Rev. No. 01 08/96

NOTE

The physical property data contained in this catalog are those obtained under controlled conditions in laboratories of each technology owner. These properties are not to be used as sales specifications. Neither will they be identical to properties measured from finished products manufactured with our resins since conditions used in manufacturing cannot be controlled.

EL-Lene

INJECTION MOLDING

1 Siam Cement Road, Bangsue, Bangkok. 10800 Thailand.
Tel. (662) 586-4825-7, 5446-7 Fax. (662) 587-2129, 587-2138

SIAM CHEMICAL TRADING CO.,LTD.
The Siam Cement Petrochemicals Group



รูปที่ 4 สมบัติของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ LD1450J (B)

LOW DENSITY POLYETHYLENE

PHYSICAL PROPERTIES	UNIT	TESTING METHOD	LD1450J
MELT FLOW RATE	g/10 min.	ASTM D 1238	50
DENSITY	g/cm ³	ASTM D 1505	0.914
TENSILE STRENGTH AT YIELD	kg./cm ²	ASTM D 638	95
TENSILE STRENGTH AT BREAK	kg./cm ²	ASTM D 638	100
ELONGATION AT BREAK	%	ASTM D 638	100
FLEXURAL MODULUS	kg./cm ²	ASTM D 790	1,200
HARDNESS, SHORE D	-	ASTM D 2240	45
VICAT SOFTENING POINT	°C	ASTM D 1525	85
MELTING POINT	°C	ASTM D 2117	103

APPLICATION

Small to large closure, base resin for powder coating application, toy parts, masterbatch carrier, artificial flower.

CHARACTERISTIC

Good flowability for multicavities, good toughness and flexibility, high gloss and transparency, odorless and food contact.

Rev. No 01 08/94

NOTE

The physical property data contained in this catalog are those obtained under controlled conditions in laboratories of each technology center. These properties are not to be used as sales specifications. Neither will they be identical to properties measured from finished products manufactured with our resins since conditions used in manufacturing cannot be controlled.

EL-Lene

Asia Pacific Specialty Chemicals Limited
ACH 000 316 138



25 July, 2000

CERTIFICATE OF ANALYSIS

PRODUCT: Stearic Acid, powder **BATCH NO:** F0D227
GRADE: UNILAB
CATALOGUE NO: 1255

<u>TEST DESCRIPTION</u>	<u>SPECIFICATION</u>	<u>ACTUAL</u>
Iodine Value	1 maximum	<1%
Acid value	202 – 208	204
Titre (°C)	54 - 57.5	57°C
Colour (5 ¼" Lov)	6.0/1.0	0.7Y / 0.2R

This batch conformed to the above specification.

Yours faithfully,

G. VERGES
Laboratory Manager

รูปที่ 5 ใบรับรองผลการทดสอบ

Description

is a special boiling point spirit which consists of a mixture of paraffins and cyclo-paraffins in the C5 to C10 range. It is a water-white, chemically stable, non-corrosive and fast constant-evaporating solvent.

Sales specification

Property	Unit	Test Method	Value
Appearance	-	Visual	Clear & Bright
Colour, Saybolt	-	ASTM D 156	+25 Min
Density @ 15 deg C.	kg/l	ASTM D 4052	0.665-0.755
Distillation range		ASTM D 1078	
IBP	Deg C		65 Min
Recovered @ 100 Deg C	% V.		65 min
BP	Deg C		120 Max
Benzene content	% Wt.	G.C.	0.2 Max
Sulphur	% Wt.	BMS 1897	0.05 Max
Aromatic content	% Wt.	G.C.	8 Max

Typical Properties

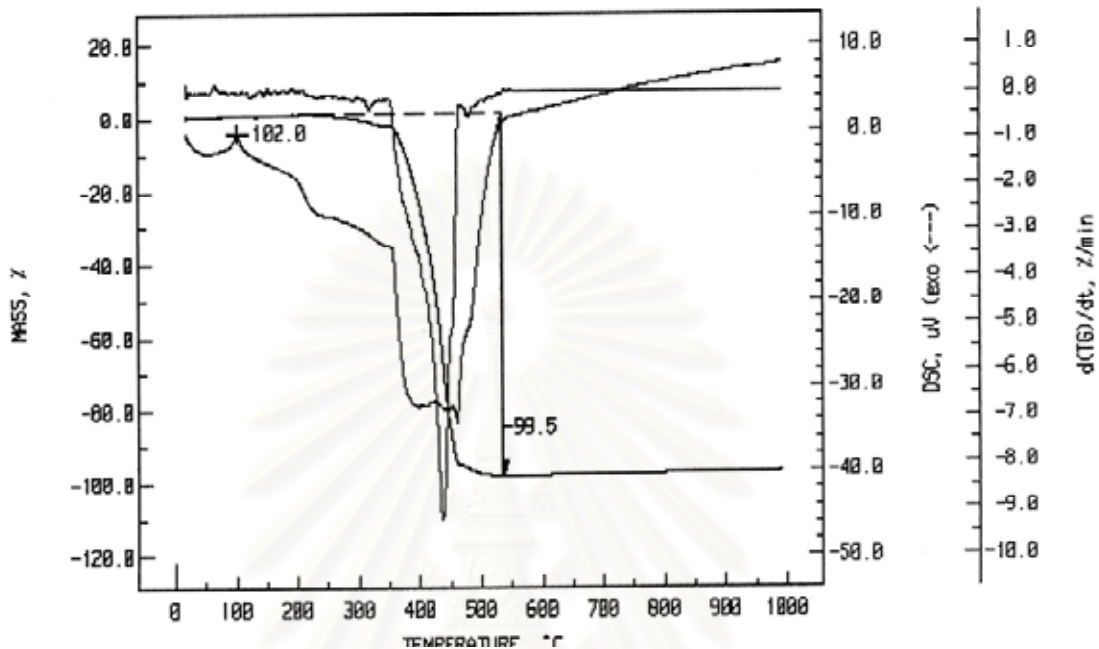
Property	Unit	Test Method	Value
Non Volatile Matter	g/100ml	ASTM D 1352	0.005
Doctor test	-	ASTM D 235	Negative
Aniline point	Deg C	ASTM D 811	52.4
Copper strip	-	ASTM D 130	1a
Naphthalene content	% Wt.	G.C.	53.2
Flash point, Abel	Deg C	IP 170	<0

Applications

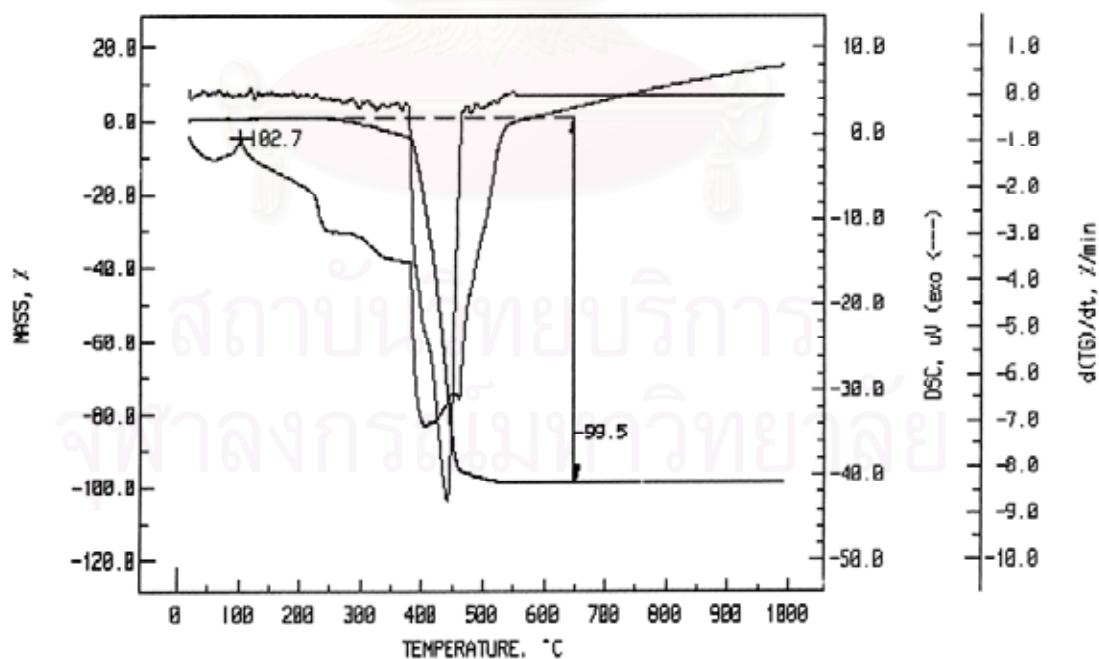
As a component in the preparation of tyres, rubber solutions, general purpose rubber cements, adhesives for medicinal plaster, pressure sensitive tapes. As a diluent in paints, lacquers and varnishes. As solvent and diluent in printing inks. For rubber-proofing and cleaning purposes in the textile industry. For industrial cleaning and degreasing purposes.

รูปที่ 6 สมบัติของปิโตรเลียมอีเทอร์

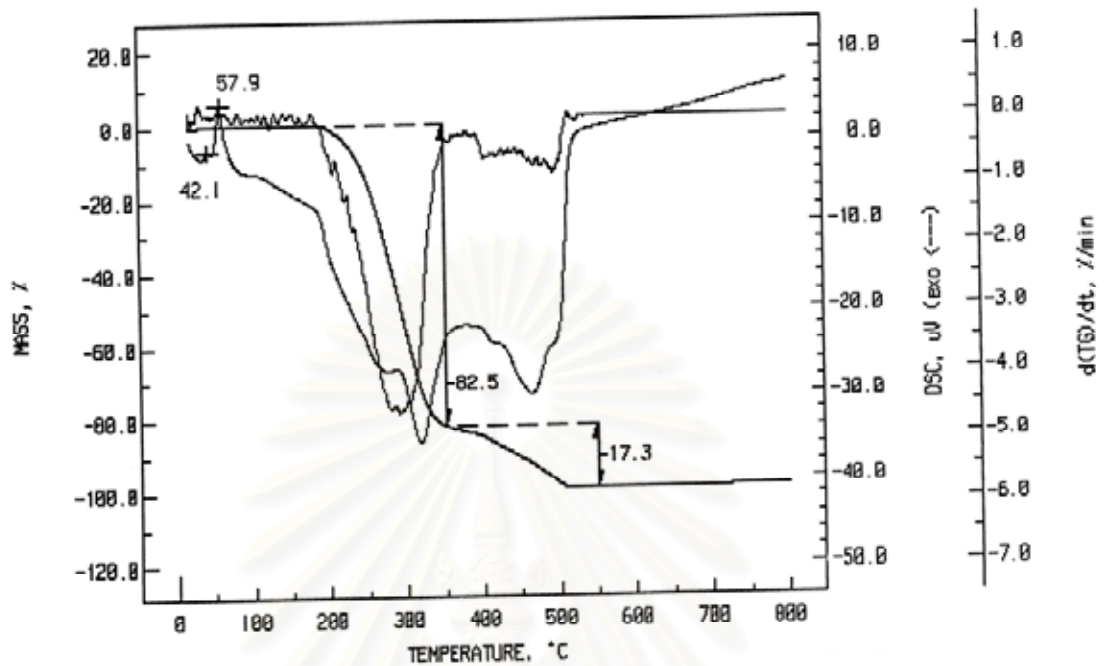
ภาคผนวก ก.



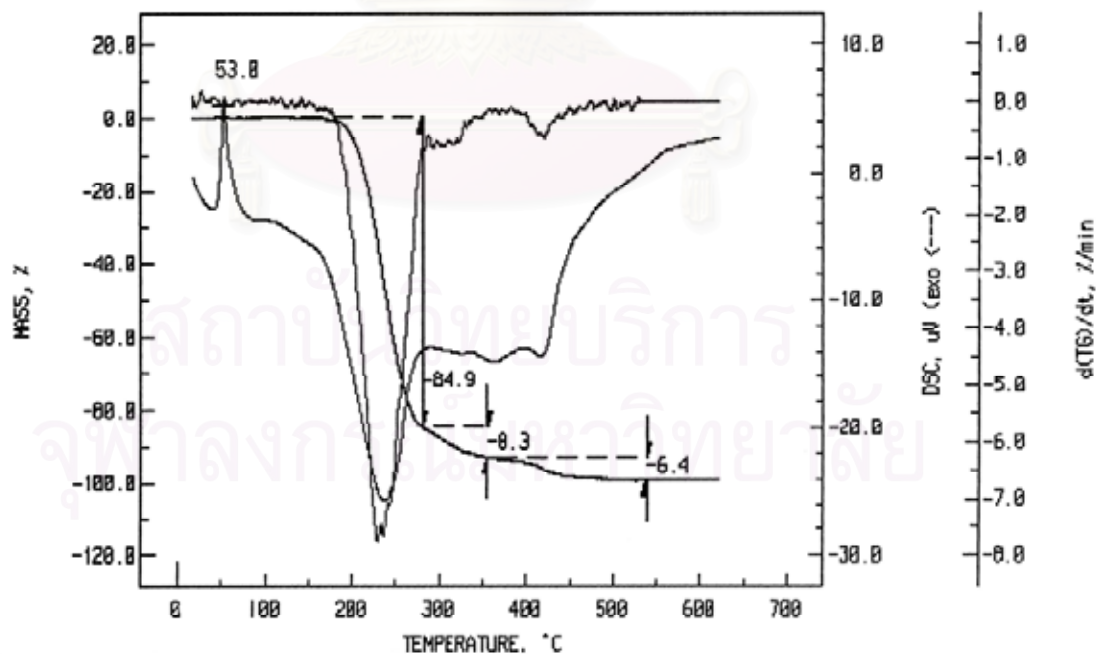
รูปที่ 1 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของ LD1630J (A) ในบรรยากาศอากาศ



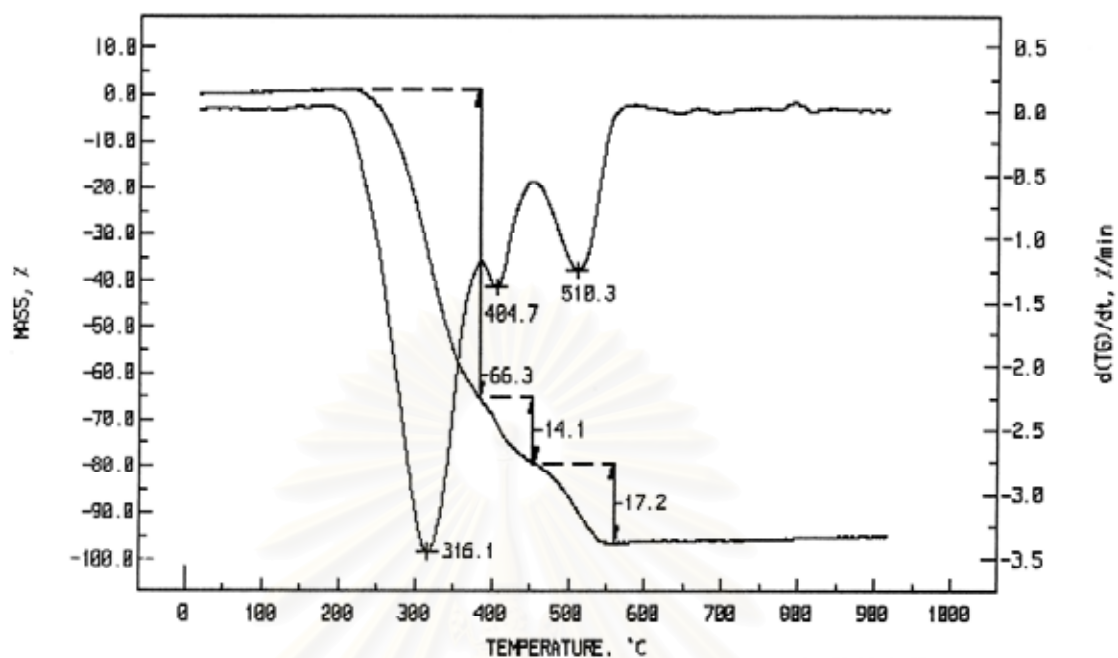
รูปที่ 2 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของ LD1450J (B) ในบรรยากาศอากาศ



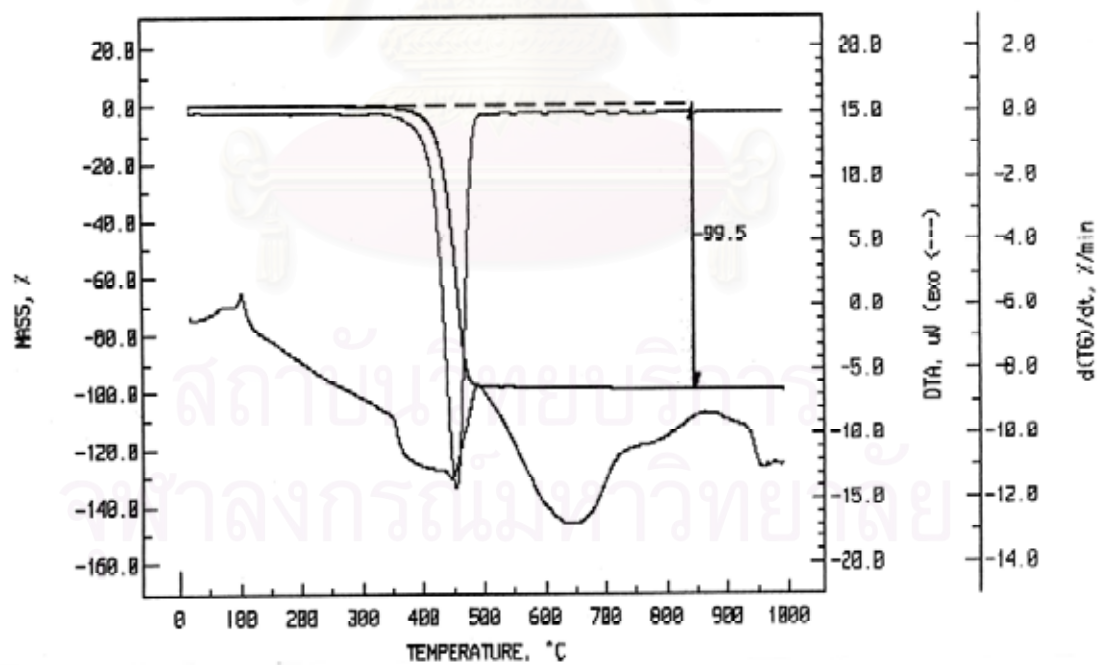
รูปที่ 3 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของพาราฟินแวกซ์ในบรรยากาศอากาศ



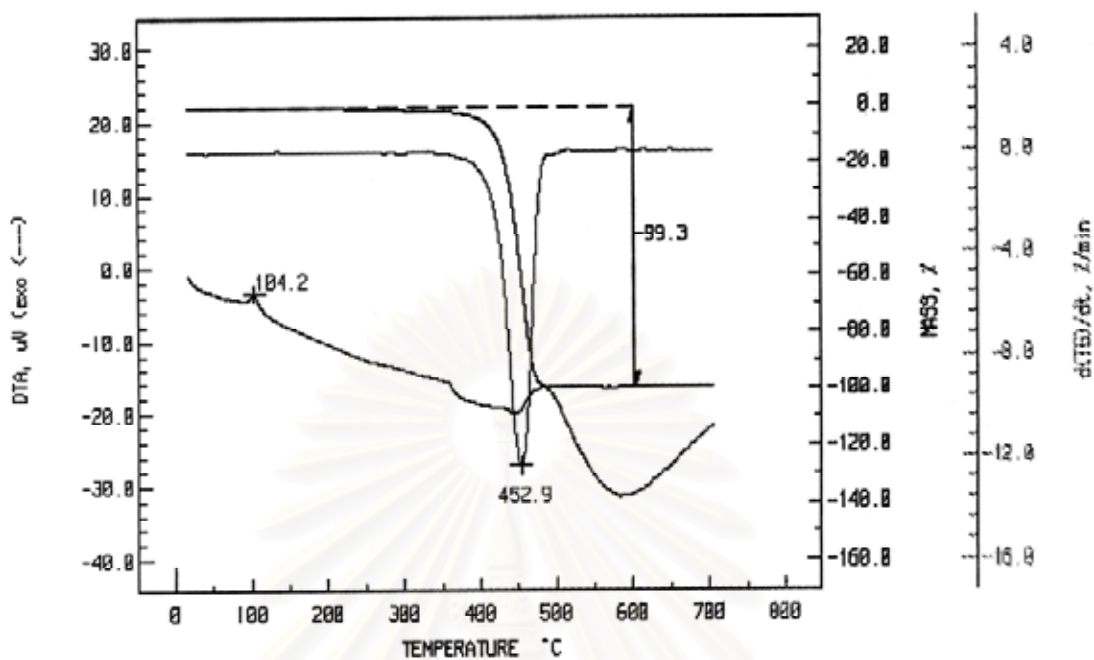
รูปที่ 4 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของกรดเสตีริกในบรรยากาศอากาศ



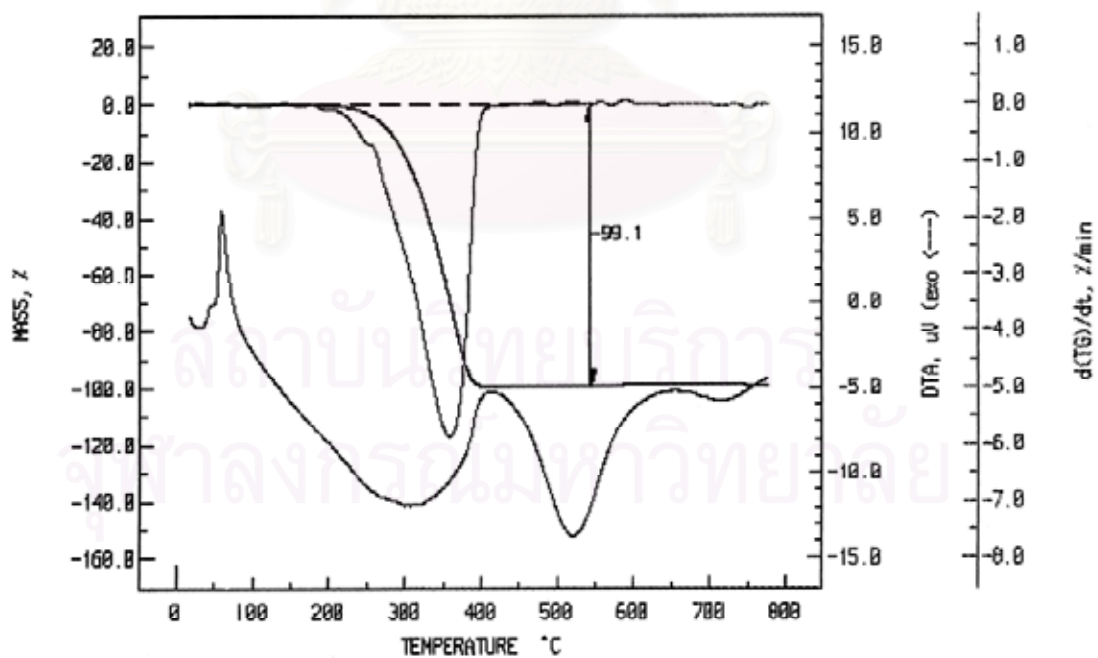
รูปที่ 5 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของน้ำมันปาล์มในบรรยากาศอากาศ



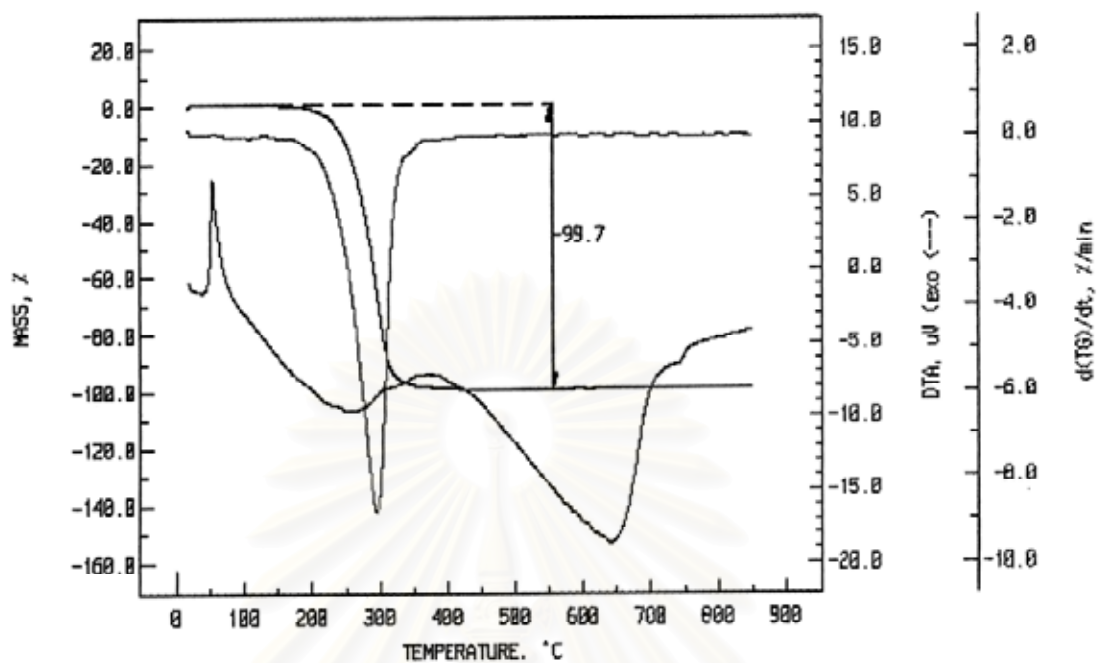
รูปที่ 6 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของ LD1630J (A) ในบรรยากาศอาร์กอน



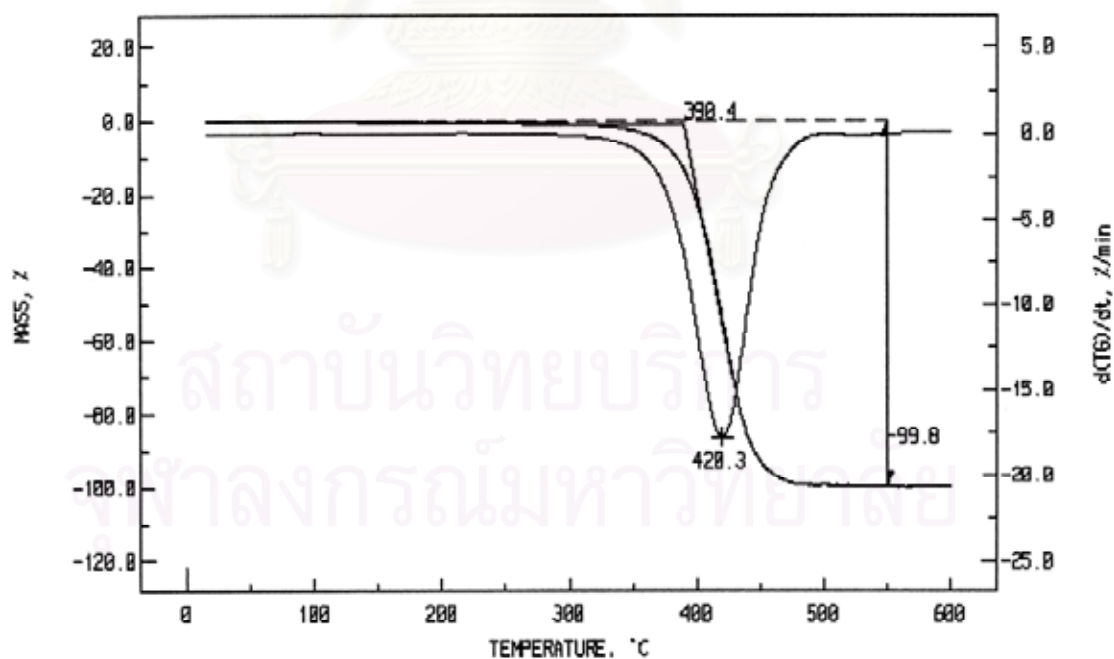
รูปที่ 7 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของ LD1450J (B) ในบรรยากาศอาร์กอน



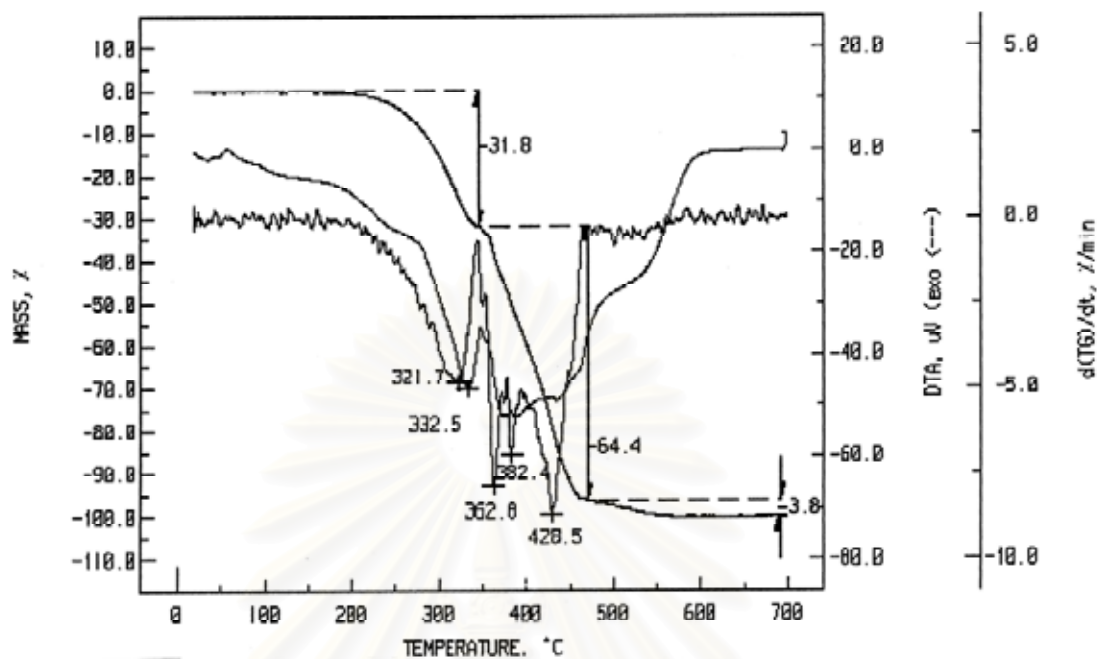
รูปที่ 8 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของพาราฟินแวกซ์ในบรรยากาศอาร์กอน



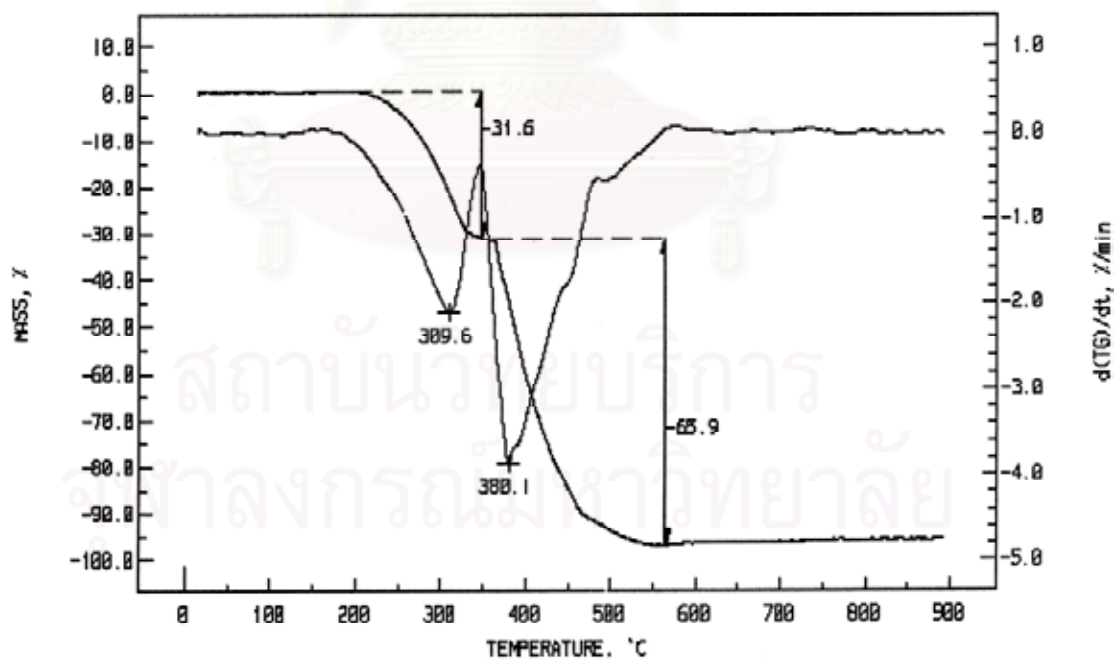
รูปที่ 9 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของกรดเสติริกในบรรยากาศอาร์กอน



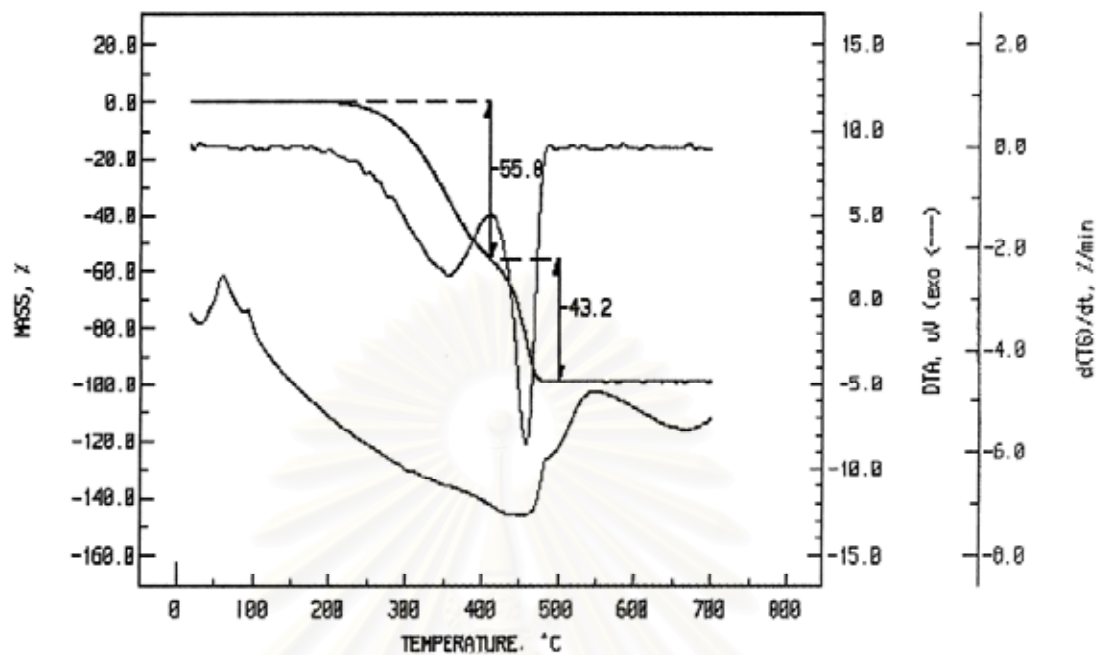
รูปที่ 10 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของน้ำมันปาล์มในบรรยากาศอาร์กอน



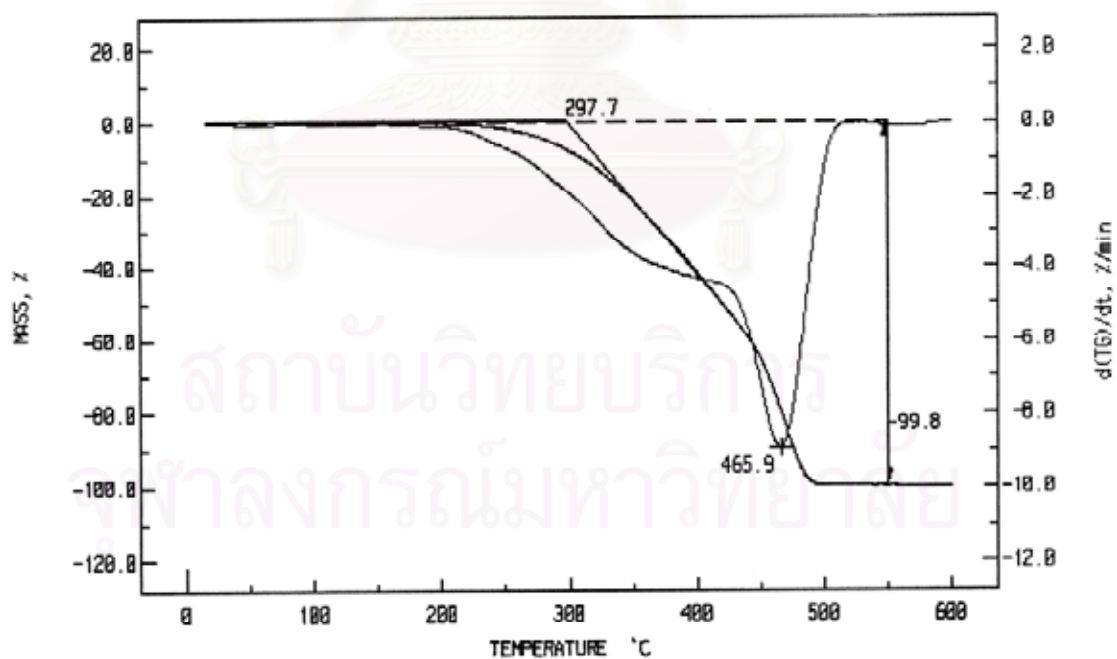
รูปที่ 11 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของ B4505 ในบรรยากาศอากาศ



รูปที่ 12 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของ B4505P ในบรรยากาศอากาศ



รูปที่ 13 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของ B4505 ในบรรยากาศอาร์กอน

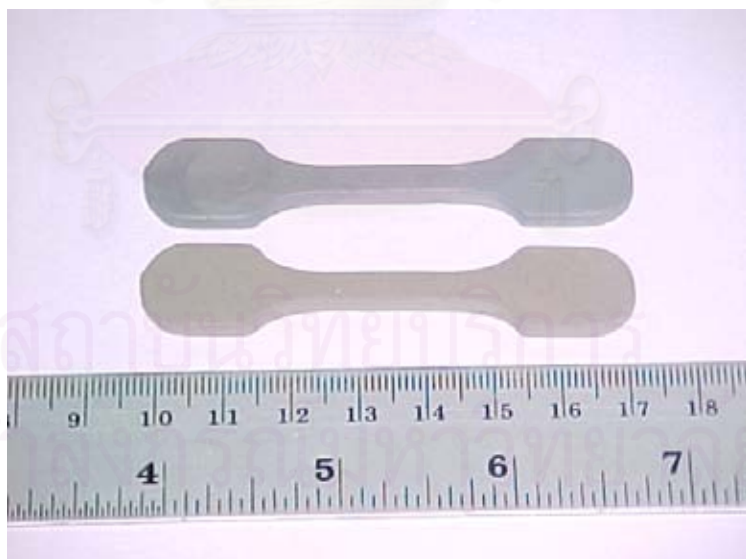


รูปที่ 14 แผนภูมิเส้นแสดงผลการทดสอบ TGA ของ B4505P ในบรรยากาศอาร์กอน

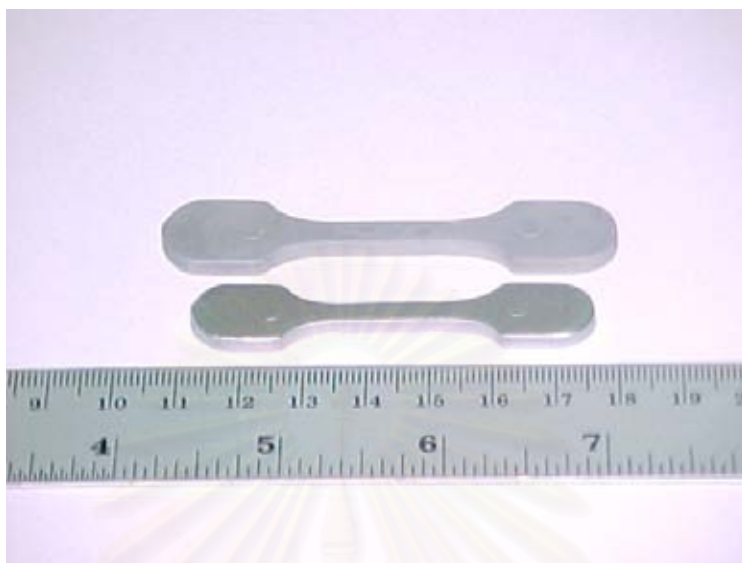
ภาคผนวก ง.



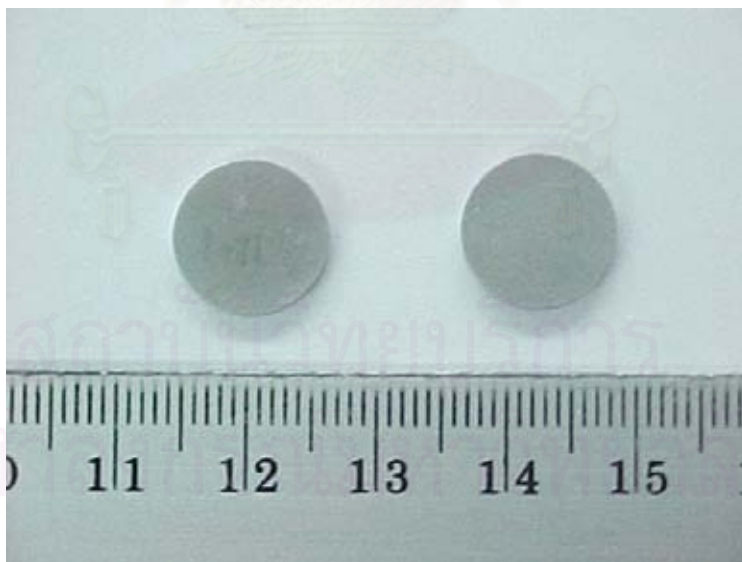
รูปที่ 1 ชิ้นงาน MIM หลังการฉีดขึ้นรูป



รูปที่ 2 ชิ้นงาน MIM หลังการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน (ชิ้นล่าง)
เทียบกับชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป (ชิ้นบน)



รูปที่ 3 ชิ้นงาน MIM หลังการเผาพูนิก(ชิ้นล่าง) เทียบกับชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป (ชิ้นบน)



รูปที่ 4 ชิ้นงานฉีดขึ้นรูปก่อน(ขวา) และหลังการเผาพูนิก(ซ้าย)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอารดา บัญชาวิมลเชษฐ เกิดเมื่อวันที่ 19 เมษายน 2520 เริ่มเข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปี พ.ศ. 2537 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม (เกียรตินิยมอันดับ 1) ในปี พ.ศ. 2540 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมโทहरกรรมมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย