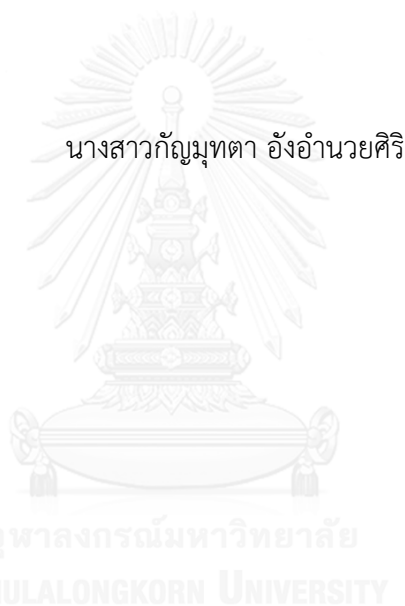


การผลิต โครงสร้าง และสมบัติทางกลของวัสดุผสมที่มีเฟสชนิดเชื่อมต่อกัน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Production, structure and mechanical properties of interpenetrating phase
composites

Miss Kunmutta Angamnuaysiri



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิต โครงสร้าง และสมบัติทางกลของวัสดุผสมที่มีเฟส ชนิดเชื่อมต่อกัน
โดย	นางสาวกัญมุกดา อังอำนาจศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปัญญ์วัชร ว่างยาว)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรดา หล่อเย็นยง)

กัญมูทตา อังอำนาจยศิริ : การผลิต โครงสร้าง และสมบัติทางกลของวัสดุผสมที่มีเฟสชนิดเชื่อมต่อกัน (Production, structure and mechanical properties of interpenetrating phase composites) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 130 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตวัสดุผสม IPCs โดยใช้โพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอ และโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอผสมเกรด ADC 12 ที่ผลิตด้วยกรรมวิธีหล่อแบบพอกหุ่น กระบวนการผลิตจะใช้โพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดขนาด 12 ppi และ 8 ppi เพื่อผลิตโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอ และผลิตวัสดุผสม IPCs ระหว่างโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอ และโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอผสมเกรด ADC 12 กับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ ยางพารา ซิลิโคน Epoxy resin และพอลิเอทิลีน โดยทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs โดยใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min

ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการนี้สามารถผลิตโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอ และโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอผสมเกรด ADC 12 ได้ทุกขนาดโพรงอากาศ และสามารถผลิตวัสดุผสม IPCs ระหว่างโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอ และโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอผสมเกรด ADC 12 กับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ยางพาราพบรอยแยกบริเวณผิวสัมผัส เช่นเดียวกับซิลิโคน โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ Epoxy resin ไม่พบรอยแยกบริเวณผิวสัมผัสเช่นเดียวกับวัสดุผสม IPCs ที่ใช้พอลิเอทิลีน

สมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตวัสดุ IPCs แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอที่ใช้ผลิตวัสดุ IPCs โครงสร้าง และขนาดของโพรงอากาศ วัสดุผสม IPCs ที่ใช้ยางพารา และ Epoxy resin จะมีค่าความเค้นจุดคราก และการดูดซับพลังงานที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ใช้ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันของโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอกับพอลิเมอร์ที่ใช้ และจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน สมบัติเชิงกลของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ซิลิโคน และวัสดุผสม IPCs ที่ใช้พอลิเอทิลีนส่วนใหญ่จะมีค่าความเค้นจุดคราก และค่าการดูดซับพลังงานที่มากขึ้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงกันของโพลีเอไมด์บิสฟีนอลเอกับพอลิเมอร์ที่ใช้ วัสดุผสม IPCs ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min จะมีความเค้นน้อย และมีค่าการดูดซับพลังงานมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ความเร็วในการอัด 50 mm/min

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570120021 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS: INTERPENETRATING PHASE COMPOSITE / ALUMINIUM FOAM / MICROSTRUCTURE / MECHANICAL PROPERTIES / INVESTMENT CASTING

KUNMUTTA ANGAMNUAYSIRI: Production, structure and mechanical properties of interpenetrating phase composites. ADVISOR: ASSOC. PROF. SEKSAK ASAVAVISITHCHAI, Ph.D., 130 pp.

The present research aims to study the production of interpenetrating phase composites (IPCs) made using pure Al foams and ADC 12 Al foams which were fabricated by investment casting process. Open-cell polyurethane foams pore with the sizes 12 and 8 ppi were used as pattern for Al foam production. The IPCs were made from either pure Al foams or ADC 12 Al foams, mixed with different types of polymer, such as natural rubber (NR), silicone, epoxy resin and polyethylene (PE). The microstructure and compressive mechanical properties of IPCs, at the cross-head speed of 2 mm/min and 50 mm/min, were examined.

The results exhibit that this method can produce pure Al foams and ADC 12 Al foams, in all pore sizes, and can fabricate IPCs from pure Al foams and ADC 12 Al foams with different types of polymer. Microstructures of IPCs, with either NR or silicone, show observed interfacial gap. However, the interfacial gap is not observed in the case of IPCs, with either epoxy resin or PE.

Mechanical properties of IPCs significantly increase when are compared with Al foams, depending on type of polymers in IPCs, but are independent to type, structure and pore size of Al foams. Yield strength and energy absorption of IPCs, with either NR or epoxy resin, decrease, due to the mismatch in thermal expansion coefficient between Al and polymers, and the interfacial gap in the IPC microstructure. Yield strength and energy absorption of IPCs, with either silicone or PE, increase, as a result of similar thermal expansion coefficient between Al and polymers. The IPCs samples, compressed at the cross-head speed of 2 mm/min, have lower stress, but higher energy absorption, when compared with that at the cross-head speed of 50 mm/min.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical and Materials Advisor's Signature
Engineering

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์ของหลายๆฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย สำหรับการสละเวลาให้คำปรึกษาทั้งด้านการเรียน และการทำงานตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรดา หล่อยืนยง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน รวมทั้งพี่สิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย ที่ให้การสนับสนุนให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำแก่ผู้จัดทำในทุกด้านด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณเพื่อนๆหาบัณฑิตในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงการสร้างบรรยากาศที่ดีในการทำงาน

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุน 90 ปี ที่ช่วยเหลือในเรื่องค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับวัสดุ อุปกรณ์ และค่าสนับสนุนอื่น ช่วยให้งานวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัทโอล์ดมูน จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการเตรียมชิ้นงานโม่อะลูมิเนียม และขอบพระคุณศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัวอังกษานวยศิริทุกคน โดยเฉพาะบิดาและมารดาของข้าพเจ้าผู้ซึ่งทำงานหนักมาทั้งชีวิตเพื่อให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้ ทั้งยังเป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ	ฑ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ	20
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	20
1.2 วัตถุประสงค์.....	21
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	21
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2	22
วรรณกรรมปริทัศน์.....	22
2.1 โฟมโลหะ.....	22
2.1.1 การนำโฟมโลหะไปประยุกต์ใช้.....	22
2.1.2 ประเภทและลักษณะของโฟมโลหะ	23
2.1.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ.....	23
2.1.4 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ	24
2.1.5 ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศ	24
2.2 โฟมอะลูมิเนียม.....	24
2.3 วิธีการผลิตโฟมโลหะ	25
2.3.1 การผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะ (Liquid metallurgy)	25

2.3.1.1	วิธีปล่อยแก๊สโดยตรง (Direct foaming by gas injection).....	25
2.3.1.2	วิธีเติมสารสร้างโฟมในน้ำโลหะ (Foaming with foaming agent) และ ปล่อยให้เย็นตัว.....	25
2.3.1.3	วิธี GASARs โดยอาศัยปฏิกิริยายูเทกติก (Eutectic)	25
2.3.1.4	วิธีถอดแบบ (Casting)	26
2.3.2	การผลิตโฟมโลหะโดยใช้โลหะผง (Powdered metallurgy).....	27
2.3.2.1	วิธีใช้สารสร้างโฟมในชิ้นงานอัดขึ้นรูป.....	27
2.3.2.2	วิธีทรงกลมกลวง (Hollow sphere).....	27
2.3.3	การผลิตโฟมโลหะโดยใช้ไอโลหะ (Metal vapour)	28
2.3.4	การผลิตโฟมโลหะโดยใช้ออนของโลหะ (Metal ions / electrochemical deposition).....	28
2.4	การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อแบบพอกหุ่นจากโฟมพอลิเมอร์	29
2.5	ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อแบบพอกหุ่น	29
2.5.1	อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	29
2.5.2	ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม.....	30
2.5.3	เวลาที่ใช้ในการให้ความดัน.....	31
2.5.4	วัสดุที่ใช้ในการผลิตต้นแบบ	31
2.5.5	วัสดุที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม	31
2.5.6	ความหนืดของน้ำโลหะหลอมเหลว	32
2.6	สมบัติทางกลของโฟมโลหะ	33
2.6.1	โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด.....	34
2.6.2	โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด	36
2.7	ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ	37
2.7.1	วัสดุที่ใช้ในการผลิต.....	37

2.7.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	37
2.7.3 ชนิดโครงสร้างของโพลีโพลี.....	39
2.7.4 ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของโพร่งอากาศ.....	40
2.7.5 ตำหนิของโพลีโพลี.....	41
2.8 วัสดุผสม	41
2.8.1 ส่วนประกอบของวัสดุผสม	41
2.8.1.1 ส่วนเมตริกซ์หรือเนื้อพื้น (Matrix phase).....	41
2.8.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase).....	41
2.8.2 การจำแนกวัสดุผสมตามชนิดของวัสดุที่เป็นเนื้อพื้น.....	42
2.8.2.1 วัสดุผสมพอลิเมอร์.....	42
2.8.2.2 วัสดุผสมโลหะ.....	42
2.8.2.3 วัสดุผสมเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)	42
2.8.3 วัสดุผสม IPCs.....	42
2.8.3.1 ลักษณะเด่นของวัสดุผสม IPC.....	43
2.8.3.2 การผลิตวัสดุผสม IPCs	43
2.9 ยางธรรมชาติ.....	48
2.9.1 โครงสร้างยางธรรมชาติ	49
2.9.2 การทำให้ยางแข็ง (Vulcanization).....	50
2.9.3 สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ.....	51
2.10 พอลิเอทิลีน.....	52
2.10.1 ประเภทของพอลิเอทิลีน.....	52
2.10.1.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	52
2.10.1.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE)	52

2.10.1.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง.....	52
2.10.2 สมบัติทั่วไป	53
2.11 Epoxy Resin	54
2.11.1 การสังเคราะห์ Epoxy resin.....	54
2.11.2 การใช้งาน	55
2.12 ซิลิโคน.....	57
2.12.1 สมบัติโดยทั่วไปของซิลิโคน.....	58
2.12.2 การใช้งาน	58
บทที่ 3	59
ระเบียบวิธีวิจัย	59
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	59
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	59
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	60
3.3.1 การเตรียมแบบเทียบสำหรับการหล่อ.....	60
3.3.2 การเตรียมอะลูมิเนียมก่อนการทำการหล่อ.....	60
3.3.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม	61
3.3.4 การผลิตวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมและพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	63
3.4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียม.....	63
3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน	63
3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	64
3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM).....	64
3.5 การทดสอบสมบัติการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียม	64
3.5.1 ความแข็งแรงจุดคราก	64

3.5.2 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน	64
3.6 วิเคราะห์ข้อมูล	65
บทที่ 4	66
ผลการทดลอง	66
4.1 คุณลักษณะของอะลูมิเนียม	66
4.4.1 คุณลักษณะของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์	66
4.4.2 คุณลักษณะของอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12.....	66
4.2 โครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียมและ วัสดุผสม IPCs	67
4.2.1 โครงสร้างมหภาคของโพลีอะลูมิเนียม	67
4.2.2 โครงสร้างมหภาคของวัสดุผสม IPCs	68
4.3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม IPCs	70
4.4 สมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียม.....	71
4.4.1 การทดสอบการรับแรงอัดของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโพลีอะลูมิเนียมผสม เกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi ใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min.....	71
4.5 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์.....	73
4.5.1 การทดสอบการรับแรงอัดของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min.....	73
4.6 สมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs.....	74
4.6.1 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ระหว่างโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ กับ ยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนโดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min.....	74

4.6.2 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสม เกรด ADC12 กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน ขนาด โพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min.....	77
4.6.3 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสม และโพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสมเกรด ADC12 ขนาด 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ โดยใช้ อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min	79
4.6.4 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสม และโพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคน โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min	81
4.6.5 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสม และโพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสมเกรด ADC12 ขนาด 12 ppi และ 8 ppi กับ Epoxy resin โดยใช้ อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min	83
4.6.6 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสม และโพลีเอทิลีนออลิเอทิลีนผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับพอลิเอ ทิลีน โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min.....	84
4.7 ความเค้นจุดคราก, การดูดซับพลังงาน และความเค้นพลาโตของวัสดุผสม IPCs	85
4.7.1 ความเค้นจุดคราก (Yield strength).....	85
4.7.2 การดูดซับพลังงาน	91
บทที่ 5	98
วิเคราะห์ผลการทดลอง	98
5.1 ผลของชนิดอะลูมิเนียม	98
5.1.1 ผลของชนิดอะลูมิเนียมต่อกระบวนการผลิต	98
5.1.2 ผลของชนิดอะลูมิเนียมต่อโครงสร้างมหภาค.....	98
5.1.3 ผลของชนิดอะลูมิเนียมต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	98
5.1.4 ผลของชนิดอะลูมิเนียมต่อสมบัติทางกล	99

5.2 ผลของชนิดโพลิอิมิเนียมต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs	99
5.3 ผลของชนิดพอลิเมอร์ในการผลิตวัสดุผสม IPCs	99
5.3.1 ผลของชนิดพอลิเมอร์ต่อกระบวนการผลิตวัสดุผสม IPCs	100
5.3.2 ผลของชนิดพอลิเมอร์ต่อโครงสร้างมหภาคของวัสดุผสม IPCs	100
5.3.3 ผลของชนิดพอลิเมอร์ต่อโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของวัสดุผสม IPCs	101
5.3.4 ผลของชนิดพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs	102
5.3.4.1 ผลของยางธรรมชาติต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs	106
5.3.4.2 ผลของซิลิโคนต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs	107
5.3.4.3 ผลของ Epoxy resin ต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs	108
5.3.4.4 ผลของพอลิเอทิลีนต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs	108
5.2.5 ผลของโครงสร้าง และขนาดโพรงอากาศของโพลิอิมิเนียมต่อสมบัติทางกลของ วัสดุผสม IPCs	109
5.2.6 ผลของความเร็วในการอัดต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs	110
บทที่ 6	112
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	112
6.1 สรุปผลการทดลอง	112
6.2 ข้อเสนอแนะ	113
รายการอ้างอิง	114
ภาคผนวก	118
ลักษณะของโพลิอิมิเนียมขณะรับแรงอัด	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	130

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1 โฟมโลหะรูปร่างต่างๆ	22
รูปที่ 2. 2 โครงสร้างโพรงอากาศ a). โพรงอากาศแบบปิด และ b). โพรงอากาศแบบเปิด	23
รูปที่ 2. 3 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะแบบปล่อยแก๊สโดยตรง	25
รูปที่ 2. 4 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะแบบเติมสารสร้างโฟมในน้ำโลหะ	25
รูปที่ 2. 5 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะด้วยวิธี GASARs	26
รูปที่ 2. 6 แสดงลักษณะโครงสร้างโฟมโลหะที่ผลิตด้วยวิธี GAS	26
รูปที่ 2. 7 แสดงลักษณะโครงสร้างโฟมโลหะที่ผลิตด้วยวิธีถอดแบบ	26
รูปที่ 2. 8 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้โลหะผงแบบใช้สารสร้างโฟม	27
รูปที่ 2. 9 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้โลหะผงวิธีทรงกลมกลวง	27
รูปที่ 2. 10 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้ไอออนของโลหะ	28
รูปที่ 2. 11 แสดงลักษณะโครงสร้างโฟมโลหะโดยใช้ไอออนของโลหะ	28
รูปที่ 2. 12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโฟม ต่อความดันที่ใช้ในการแทรกซึม	30
รูปที่ 2. 13 แผนภูมิเฟสของอะลูมิเนียมที่ซิลิคอน wt.% ต่างๆกัน (Al-Si phase diagram)	32
รูปที่ 2. 14 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม	32
รูปที่ 2. 15 กราฟความเค้น - ความเครียด ของโฟมโลหะในอุดมคติ.....	33
รูปที่ 2. 16 กราฟความเค้น - ความเครียด สำหรับการหาค่าความสามารถในการดูดซับแรง กระแทก.....	34
รูปที่ 2. 17 กราฟความเค้น-ความเครียด ของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดที่ความหนาแน่น 0.16 g/cm ³	34
รูปที่ 2. 18 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิดของโฟมอะลูมิเนียม บริสุทธิ์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และ โฟม Al-12Si ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.27	36
รูปที่ 2. 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับมอดูลัสของยังหรือมอดูลัสยืดหยุ่น ของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas	38

รูปที่ 2. 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความเค้นสูงสุด ของโพลีโพลีเอทิลีนแบบ Alcan และ Alporas	38
รูปที่ 2. 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความแข็งแรงจุดครากของโพลีโพลีเอทิลีน ..	38
รูปที่ 2. 22 เปรียบเทียบแรงอัดอัดระหว่าง โพลีโพลีเอทิลีนที่มีโครงสร้างแบบปิดและแบบเปิด	39
รูปที่ 2. 23 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสสัมพัทธ์กับ L/d	40
รูปที่ 2. 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจุดครากสัมพัทธ์กับ L/d.....	41
รูปที่ 2. 25 แสดงการดูดซับพลังงาน (ที่ 50% global compressive strain) ของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมวัสดุผสม IPCsพอลิเมอร์	43
รูปที่ 2. 26 แสดงผลระหว่าง Hydrostatic stress และ volumetric strain curves ของโพลีเอทิลีน และโพลีเอทิลีนผสมวัสดุผสม IPCsพอลิเมอร์.....	44
รูปที่ 2. 27 แสดง Flexural modulus ของโพลีเอทิลีนผสมพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างโพรงอากาศต่างกัน	44
รูปที่ 2. 28 แสดง Flexural strength ของโพลีเอทิลีนผสมพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างโพรงอากาศต่างกัน	45
รูปที่ 2. 29 แสดง Compressive modulus ของ AI-Ep, A1-PE และโพลีโพลีเอทิลีน	46
รูปที่ 2. 30 แสดง Comparison of energy absorption ของ AI-Ep, A1-PE และโพลีโพลีเอทิลีน ที่มีอัตราส่วนโพลีเอทิลีน Al 0.3 และ strain 40%	46
รูปที่ 2. 31 แสดงการแตกหักของวัสดุผสมจากโพลีเอทิลีน และพอลิเมอร์	47
รูปที่ 2. 32 แสดงตัวอย่างวัสดุผสมโพลีเอทิลีนและEpoxy resin [24].....	47
รูปที่ 2. 33 แสดง Stress–strain curves ของวัสดุผสมที่มีอัตราส่วนEpoxy resinที่แตกต่างกันโดยปริมาตร (20, 30, และ 40).....	48
รูปที่ 2. 34 แสดงโครงสร้าง cis-1,4 Polyisoprene	49
รูปที่ 2. 35 แสดงการจัดเรียงตัวของยางธรรมชาติ	49
รูปที่ 2. 36 แสดงโครงสร้าง trans-1,4 Polyisoprene.....	50
รูปที่ 2. 37 แสดงกระบวนการเกิด Vulcanization ของยางกับอะตอมของกำมะถัน	50
รูปที่ 2. 38 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแบบต่าง ๆ.....	53

รูปที่ 2. 39 Bisphenol A	54
รูปที่ 2. 40 Epichlorohydrin	55
รูปที่ 2. 41 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Epoxy resin.....	56
รูปที่ 2. 42 โครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของ ซิลิโคน.....	57
รูปที่ 3. 1 ต้นเทียนที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิต.....	60
รูปที่ 3. 2 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียม.....	62
รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCs	63
รูปที่ 4. 1 กราฟความเค้น ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi ใช้อัตราเร็วในการอัด a.) 2 mm/min และ b.) 50 mm/min.....	72
รูปที่ 4. 2 กราฟความเค้นความเครียดของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้อัตราเร็วในการอัด a.) และ c.) 2 mm/min และ b.) และ d.) 50 mm/min	73
รูปที่ 4. 3 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน a.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min, b.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min, c.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ d.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	75
รูปที่ 4. 4 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนโดยขยายมาจากรูป 4.3 a.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min, b.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min, c.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ d.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	76
รูปที่ 4. 5 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน a.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min, b.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min, c.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ d.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	77

รูปที่ 4. 6 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนโดยขยายมาจากรูป 4.5 a.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min, b.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min, c.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ d.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	78
รูปที่ 4. 7 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	80
รูปที่ 4. 8 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติโดยขยายมาจากรูป 4.7 a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	80
รูปที่ 4. 9 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคน a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	81
รูปที่ 4. 10 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคนโดยขยายจากรูป 4.9 a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	82
รูปที่ 4. 11 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับ Epoxy resin a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min.....	84
รูปที่ 4. 12 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับพอลิเอทิลีน a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min	85
รูปที่ 5. 1 ลักษณะกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์กลุ่มต่างๆ.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1	ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตโฟมแบบหล่อแบบพอกหุ่น	29
ตารางที่ 2. 2	แสดง Young' modulus, Poisson's ratio และ compressive strength.....	45
ตารางที่ 2. 3	แสดงสมบัติของวัสดุผสม IPC	48
ตารางที่ 2. 4	แสดงการเปรียบเทียบ สมบัติที่ได้จากการคำนวณ และการทดลอง.....	48
ตารางที่ 2. 5	แสดงสมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ	51
ตารางที่ 2. 6	แสดงสมบัติของพอลิเอทิลีน.....	54
ตารางที่ 2. 7	แสดงสมบัติของEpoxy resin	56
ตารางที่ 2. 8	แสดงสมบัติของซิลิโคน.....	57
ตารางที่ 4. 1	แสดงส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12.....	66
ตารางที่ 4. 2	แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม	67
ตารางที่ 4. 3	แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานผสม IPCs	68
ตารางที่ 4. 4	แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของชิ้นงานผสม IPCs.....	70
ตารางที่ 4. 5	แสดงความเค้นจุดคราก, การดูดซับพลังงานที่ 25%, 50%, 75% และความเค้นพลาโตของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์, โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	86
ตารางที่ 4. 6	แสดงความเค้นจุดคราก, การดูดซับพลังงานที่ 25%, 50%, 75% และความเค้นพลาโตของชิ้นงานผสม IPCs	87
ตารางที่ 4. 7	แสดงกราฟความเค้นจุดครากของชิ้นงานผสม IPCs เทียบกับโฟมอะลูมิเนียมชนิดต่างๆ และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	89
ตารางที่ 4. 8	แสดงกราฟการดูดซับพลังงานของชิ้นงานผสม IPCs เทียบกับโฟมอะลูมิเนียมชนิดต่างๆและพอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่ 25%, 50% และ 75% ของความเครียดตามลำดับ	92
ตาราง 5. 1	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุต่างๆ.....	101
ตาราง 5. 2	แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs แต่ละชนิดเทียบกับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์.....	102

ตาราง 5. 3 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs แต่ละชนิดเทียบกับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิต 104

ตารางที่ ก. 1 แสดงข้อมูลของชิ้นงานทดสอบ 118

ตารางที่ ก. 2 ลักษณะการพังตัวของชิ้นงานทดสอบที่ความเครียด 0% 25% 50% และ 75%..... 120



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันความต้องการในการใช้วัสดุที่มีสมบัติหลายอย่างรวมกันมีมากขึ้น ซึ่งไม่สามารถพบได้ในวัสดุทั่วไปทั้งในโลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ ส่งผลให้มีการพัฒนาวัสดุผสมเกิดขึ้น เป็นการรวมสมบัติของวัสดุเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดความหลากหลายในการใช้งาน โดยวัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีหลายเฟส แต่ละเฟสที่มาประกอบกันจะแสดงสมบัติที่สำคัญของตัวเอง เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีกว่าเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้มีความต้องการวัสดุที่มีสมบัติทางกลที่ดี และมีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงมีการศึกษาวัสดุผสมจากโพลีโลหะ และพอลิเมอร์

โพลีโลหะ เป็นโลหะที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ประกอบด้วยโพรงอากาศจำนวนมาก มีเนื้อโลหะอยู่ประมาณ 5-25 vol.% ทำให้มีน้ำหนักเบา อีกทั้งโพลีโลหะยังมีความสามารถในการดูดซับพลังงานในระหว่างการอัดได้สูง โพลีโลหะบางชนิด เช่น โพลีอะลูมิเนียมสามารถผลิตให้มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ ทำให้สามารถลอยน้ำได้ นอกจากนี้โพลีโลหะยังมีสมบัติเด่นในเรื่องความแข็งแรงและความแกร่ง ซึ่งต่างจากโพลีเมอร์และโพลีเซรามิก

โพลีโลหะสามารถผลิตได้หลายวิธีเช่นกรรมวิธีผลิตแบบโลหะผง การหล่อโดยการเป่าแก๊สโดยตรง เป็นต้น ซึ่งวิธีการผลิตดังกล่าวจะผลิตโพลีโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิดซึ่งการควบคุมความสม่ำเสมอของขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศทำได้ยาก แต่ในการผลิตโพลีโลหะที่มีโครงสร้างแบบเปิดนิยมผลิตด้วยกรรมวิธีการถอดแบบซึ่งจะได้โพลีโลหะที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกันทุกประการกับต้นแบบที่ใช้ หนึ่งในวิธีการผลิตโพลีโลหะจากต้นแบบที่นิยมคือการผลิตแบบพอกหุ่น (Lost-wax casting หรือ Investment casting) ในกระบวนการนี้จะใช้โพลีเมอร์เป็นต้นแบบในกระบวนการผลิต

สำหรับโพลีโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดมักนิยมนำไปใช้งานเฉพาะด้าน เช่น ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและตัวเก็บประจุ ใช้ในการคัดกรองอนุภาค เป็นต้น เนื่องจากสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรในการแลกเปลี่ยนความร้อนและในการเก็บประจุที่สูง และของไหลสามารถไหลผ่านได้

การผลิตวัสดุผสม IPCs (Interpenetrating phase composites) จากโพลีอะลูมิเนียม และพอลิเมอร์ สามารถผลิตได้โดยใช้โพลีโลหะที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดมาเป็นโครงสร้างหลัก และเติมวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เช่น ยางธรรมชาติ (Natural rubber) พอลิเอทิลีน (Polyethylene,

PE) ซิลิโคน และอีพ็อกซี เรซิน (Epoxy resin) เข้าไปภายในโพรงอากาศ ซึ่งจะมีสมบัติทางกลของ โฟมอะลูมิเนียมจะเปลี่ยนไป

งานวิจัยนี้ได้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด โดยใช้วิธีการหล่อแบบพอกหุ่น และศึกษากระบวนการผลิตวัสดุผสม IPCs จากโฟมอะลูมิเนียม กับและพอลิเมอร์ รวมถึงศึกษาสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้องอันเป็นผลมาจากการใช้อะลูมิเนียมต่างชนิดกัน และการใช้พอลิเมอร์ต่างชนิดกันในการผลิตวัสดุผสมที่มีเฟสแทรกซึมระหว่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตวัสดุผสม IPCs จากโฟมอะลูมิเนียม และพอลิเมอร์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้องอันเป็นผลมาจากการใช้อะลูมิเนียมต่างชนิดกัน และการใช้พอลิเมอร์ต่างชนิดกันในการผลิตวัสดุผสมที่มีเฟสแทรกซึมระหว่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 การศึกษาการผลิตโฟมอะลูมิเนียมโดยใช้โฟมพอลิยูรีเทนที่มีขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi เป็นตัวต้นแบบในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม
- 1.3.2 อะลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม คือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC 12
- 1.3.3 พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสม IPCs คือ ยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin, และพอลิเอทิลีน
- 1.3.4 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการรับแรงอัดคือ 2 mm/min และ 50 mm/min

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด โดยใช้วิธีการหล่อแบบพอกหุ่น
- 1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตวัสดุผสม IPCs
- 1.4.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับชนิดอะลูมิเนียม และชนิดของพอลิเมอร์ ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 โฟมโลหะ

โฟมโลหะ (Metal foam) คือโลหะที่มีโครงสร้างลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีโพรงอากาศจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันในปริมาตรเท่ากันจะมีความหนาแน่นต่ำ โดยส่วนใหญ่โฟมโลหะจะมีความหนาแน่นต่ำกว่า 1 g/cm^3 ซึ่งต่ำกว่าความหนาแน่นของน้ำ จึงมีน้ำหนักเบา นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้ดี อีกทั้งยังมีสมบัติเด่นในเรื่องความแกร่ง (Toughness) ที่ต่างจากโฟมพอลิเมอร์ และโฟมเซรามิก [1]

2.1.1 การนำโฟมโลหะไปประยุกต์ใช้

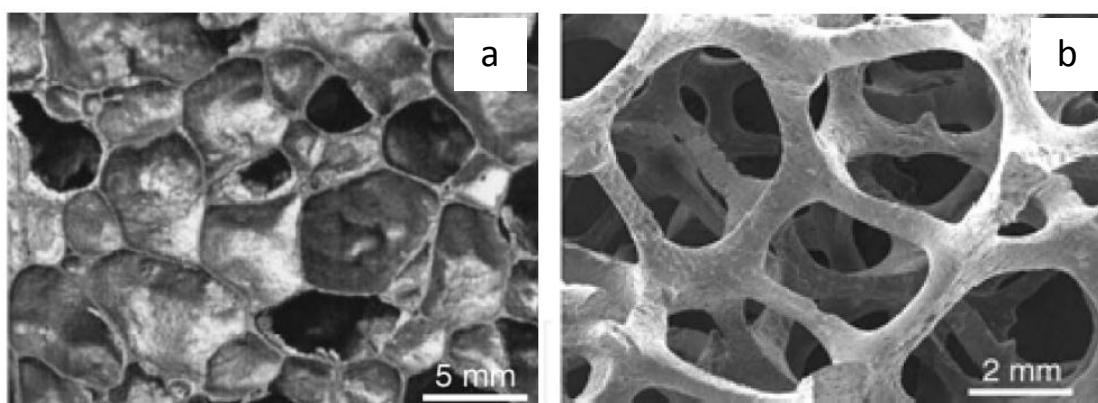
ความต้องการในการนำโฟมโลหะมาประยุกต์ใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากโฟมโลหะมีจุดเด่นในเรื่องความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทก ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตเป็นวัสดุรับแรงกระแทก โฟมโลหะมีความหนาแน่นต่ำ แต่มีสมบัติเด่นในเรื่องความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) และความแข็งแรงแตกหัก (Fracture strength) สูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นชิ้นส่วนตรงกลางในโครงสร้างแบบแซนด์วิช ที่ต้องการวัสดุน้ำหนักเบา และสามารถดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้ดี โครงสร้างประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากทำให้สามารถป้องกันเสียงได้ดี จึงมีการประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุดูดซับเสียง อีกทั้งโครงสร้างที่เป็นรูพรุนทำให้มันมีพื้นที่ผิวมาก จึงสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี สามารถที่จะประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [2]



รูปที่ 2. 1 โฟมโลหะรูปร่างต่างๆ [3]

2.1.2 ประเภทและลักษณะของโฟมโลหะ

โฟมโลหะแบ่งได้เป็นสองประเภท แยกตามโครงสร้างของโครงอากาศ (Cell) ประเภทแรกเป็นโฟมโลหะที่มีโครงอากาศแบบปิด (Closed-cell) ลักษณะโครงข่ายจะมีเนื้อโลหะปิดรอบโครงอากาศ ซึ่งแต่ละโครงอากาศจะไม่เชื่อมต่อกัน ของไหลไม่สามารถไหลผ่านได้ ความแข็งแรงของแต่ละโครงอากาศมีค่าสูง ประเภทที่สอง โฟมโลหะที่มีโครงอากาศ แบบเปิด (Open-cell) มีลักษณะโครงข่ายคล้ายกับร่างแหต่อกันในด้านข้างของโครงอากาศ ของไหลสามารถไหลผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2 โครงสร้างโครงอากาศ a). โครงอากาศแบบปิด และ b). โครงอากาศแบบเปิด [4]

2.1.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ของโฟมโลหะ (ρ^*) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นของโฟมโลหะต่อความหนาแน่นของเนื้อโลหะที่ใช้ทำโฟม มีหน่วยเป็น % แสดงได้ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของโลหะชนิดนั้นๆ ซึ่งค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์จะส่งผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์แสดงในสมการ 2.1

$$\% \rho^* = \frac{\rho_f}{\rho_s} \times 100\% \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะ

ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ

ซึ่งความหนาแน่นของโฟมโลหะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตโฟมโลหะ โดยทั่วไป โฟมโลหะจะมีค่า ρ^* ต่ำกว่า 30%

2.1.4 ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ

ปริมาณของโพรงอากาศในโฟมโลหะ (P) ซึ่งมีหน่วยเป็น % คือปริมาณความหนาแน่นสมบูรณ์ลบด้วยความหนาแน่นสัมพัทธ์โดยปริมาณของโพรงอากาศแสดงใน สมการ 2.2

$$\%P = 100\% - \% \rho^* \quad (2.2)$$

2.1.5 ขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศ

ขนาดและรูปร่างรวมถึงการกระจายตัวของโพรงอากาศส่งผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ โดยที่วิธีการผลิตที่แตกต่างกันนั้นส่งผลให้เกิดขนาดและรูปร่างโพรงอากาศที่แตกต่างกัน รวมถึงมีค่าความหนาแน่นของโฟมโลหะที่มีความแตกต่างกันด้วย จึงส่งผลให้ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) และความแข็งแรง (Strength) แตกต่างกันไป ซึ่งมีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงาน (Size effect) จึงผลอย่างมากต่อการออกแบบและทดสอบวัสดุ โดยรูปร่างของโพรงอากาศจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะมากกว่าขนาดของโพรงอากาศ แต่ขนาดของโพรงอากาศก็ยังคงเป็นตัวแปรสำคัญและมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโฟมโลหะ [5]

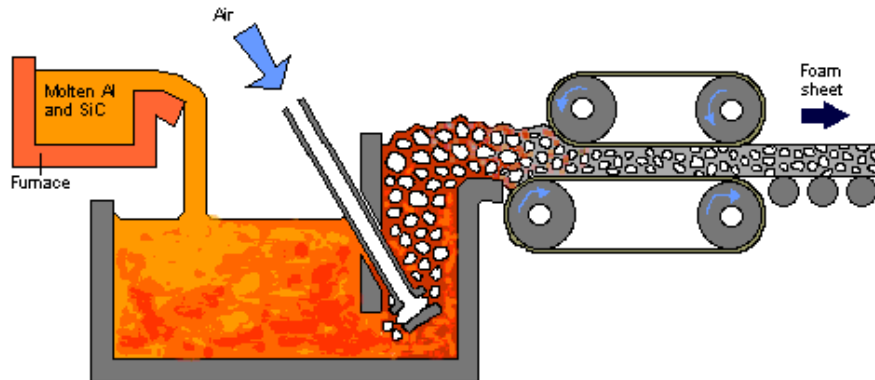
2.2 โฟมอะลูมิเนียม

โฟมอะลูมิเนียม (Aluminum foam) คือ โฟมโลหะที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุพื้นในการผลิตโฟม โดยโฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ประกอบด้วยโพรงอากาศที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม โฟมอะลูมิเนียมมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูงในขณะที่ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทกที่ดี ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิเมอร์ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง จึงมีการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับตกแต่ง ใช้ในงานด้านสถาปัตยกรรม และประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ โดยการควบคุมขนาดและรูปร่างของโพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียมทำให้ได้สมบัติทางกลที่ต้องการ

2.3 วิธีการผลิตโฟมโลหะ

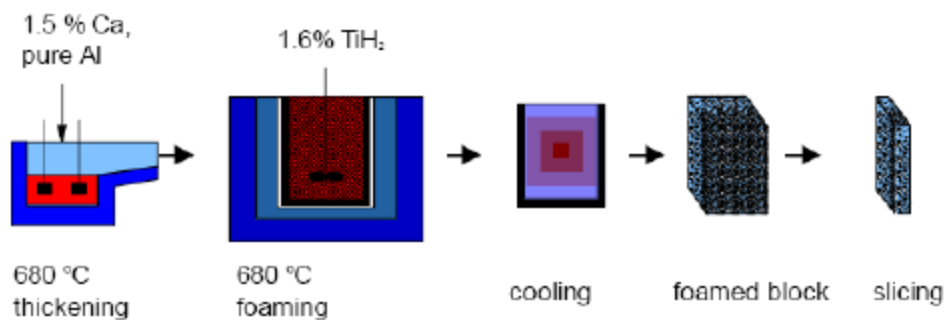
2.3.1 การผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะ (Liquid metallurgy) แบ่งออกเป็น 4 วิธีคือ

2.3.1.1 วิธีปล่อยแก๊สโดยตรง (Direct foaming by gas injection) ลงในโลหะที่หลอมเหลวฟองแก๊สจะลอยตัวอยู่ด้านบนของน้ำโลหะ โฟมโลหะจึงเริ่มแข็งตัวดังรูป 2.3



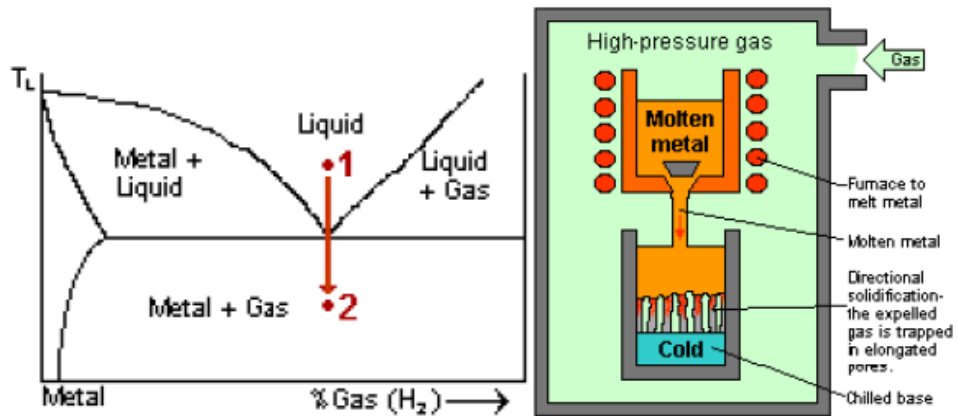
รูปที่ 2. 3 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะแบบปล่อยแก๊สโดยตรง [5]

2.3.1.2 วิธีเติมสารสร้างโฟมในน้ำโลหะ (Foaming with foaming agent) และปล่อยให้เย็นตัวดังรูป 2.4

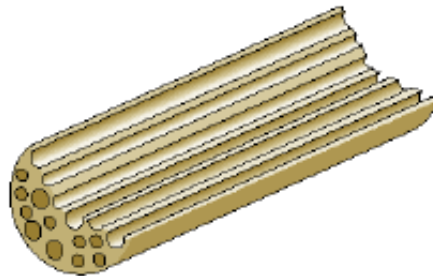


รูปที่ 2. 4 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะแบบเติมสารสร้างโฟมในน้ำโลหะ[6]

2.3.1.3 วิธี GASARs โดยอาศัยปฏิกิริยายูเทกติก (Eutectic) ของโลหะอัลลอยและไฮโดรเจน เมื่อโลหะถูกหลอมเหลวและอิมมัลชันกับไฮโดรเจนภายใต้ความดันแล้วถูกทำให้แข็งตัวอย่างช้าๆในทิศทางเดียวพร้อมกับลดความดันจะทำให้เกิดปฏิกิริยายูเทกติก ดังรูป 2.5 โฟมโลหะที่ได้จะมีโพรงอากาศในแนวยาวทิศทางเดียวดังรูป 2.6

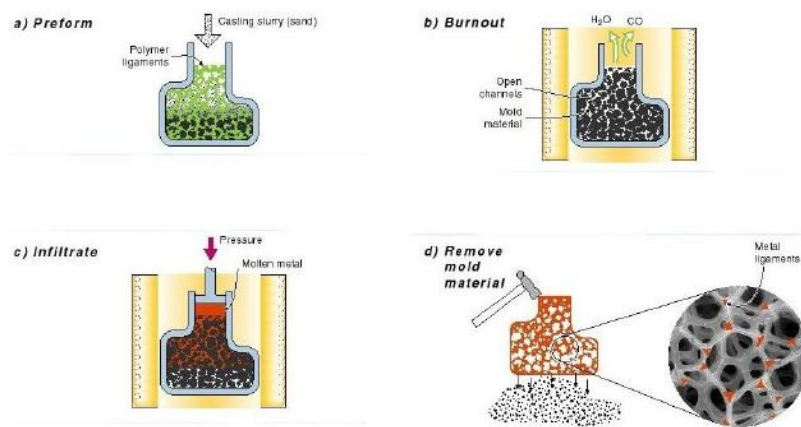


รูปที่ 2. 5 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้น้ำโลหะด้วยวิธี GASARs [6]



รูปที่ 2. 6 แสดงลักษณะโครงสร้างโฟมโลหะที่ผลิตด้วยวิธี GASARs [6]

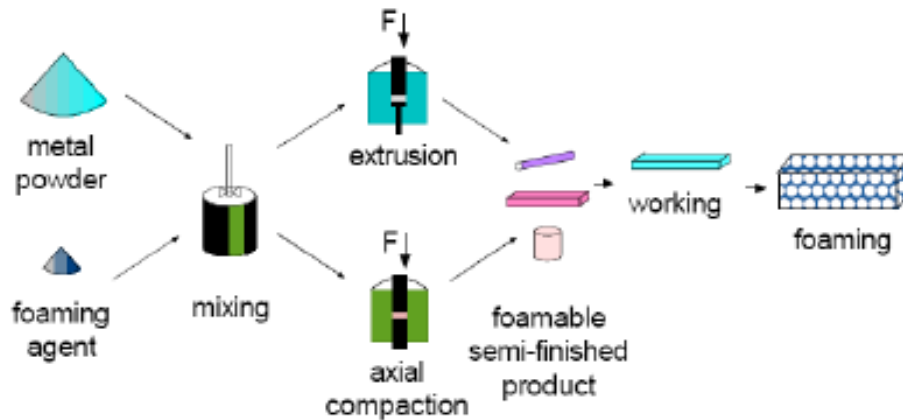
2.3.1.4 วิธีถอดแบบ (Casting) เป็นวิธีที่ใช้ต้นแบบหรือแม่พิมพ์ที่มีโครงสร้างแบบเปิด สามารถให้น้ำโลหะแทรกซึมเข้าไปได้ เมื่อน้ำโลหะแข็งตัวจะทำลายหรือเปิดแม่พิมพ์ออก โฟมโลหะที่ได้จะมีลักษณะเหมือนแม่พิมพ์ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. 7 แสดงลักษณะโครงสร้างโฟมโลหะที่ผลิตด้วยวิธีถอดแบบ [6]

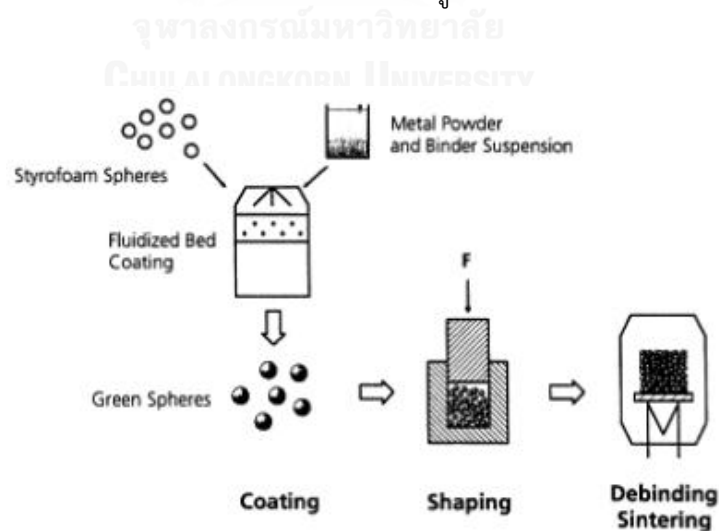
2.3.2 การผลิตโฟมโลหะโดยใช้โลหะผง (Powdered metallurgy) แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

2.3.2.1 วิธีใช้สารสร้างโฟมในขั้นตอนอัดขึ้นรูป โดยการผสมผงโลหะและสารสร้างโฟมให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปและให้ความร้อนเพื่อให้สารสร้างโฟมสลายตัวเป็นโพรงอากาศภายในชิ้นงานดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2. 8 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้โลหะผงแบบใช้สารสร้างโฟม [6]

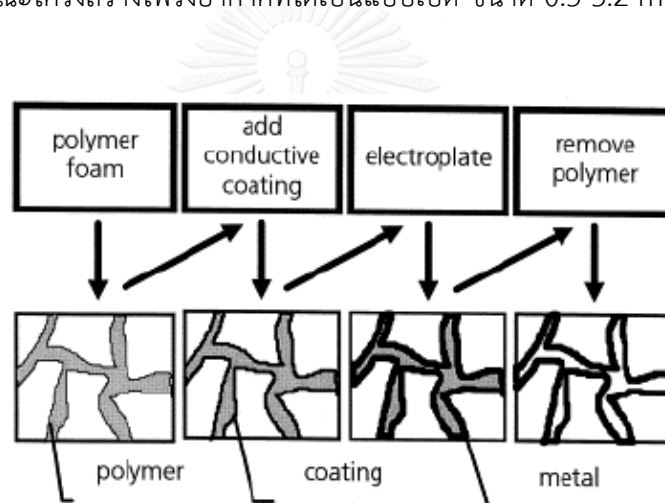
2.3.2.2 วิธีทรงกลมกลวง (Hollow sphere) โดยสร้างผงโลหะทรงกลมกลวงจาก Slurry ที่มีสารสร้างโฟมผสมอยู่กับตัวยึดอินทรีย์ (Organic binder) และตัวทำละลาย (Solvent) โดยโลหะทรงกลมจะแข็งตัวด้วยการระเหยระหว่างตกลงไปที่ฐาน หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนเพื่อกำจัดตัวทำละลายและตัวยึด หรือใช้ทรงกลมพอลิเมอร์แทนสารสร้างโฟมดังรูปที่ 2.9



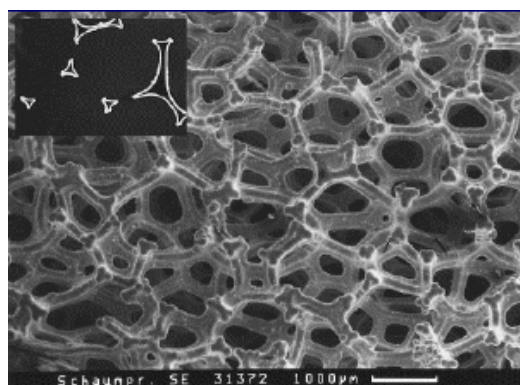
รูปที่ 2. 9 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้โลหะผงวิธีทรงกลมกลวง [6]

2.3.3 การผลิตโฟมโลหะโดยใช้ไอโลหะ (Metal vapour) โดยใช้ไอโลหะที่ระเหยไปทับถมบนต้นแบบพอลิเมอร์ภายในเตาปฏิกรณ์จนได้ความหนา $10\mu\text{m}$ ขึ้นไป หลังจากนั้นนำโฟมโลหะที่ได้ไปกำจัดพอลิเมอร์ออกด้วยการเผาในบรรยากาศปกติจะได้โฟมโลหะที่มีโครงสร้างภายนอกเหมือนกับพอลิเมอร์แต่มีโครงสร้างภายในที่กลวง

2.3.4 การผลิตโฟมโลหะโดยใช้ไอออนของโลหะ (Metal ions / electrochemical deposition) โดยเริ่มจากการทำให้โลหะอยู่ในสภาพเป็นไอออน หลังจากนั้นทำให้เกิดการสะสมของไอออนโลหะบนพื้นผิวโฟมพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างพรองอากาศแบบเปิดโดยโฟมพอลิเมอร์จะต้องนำไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการตกสะสมของไอออนโลหะจนได้ความหนาที่เหมาะสมจึงกำจัดพอลิเมอร์ออกด้วยวิธีทางความร้อน ดังรูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างพรองอากาศที่ได้เป็นแบบเปิด ขนาด $0.5\text{-}3.2\text{ mm}$ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2. 10 แสดงการผลิตโฟมโลหะโดยใช้ไอออนของโลหะ [6]



รูปที่ 2. 11 แสดงลักษณะโครงสร้างโฟมโลหะโดยใช้ไอออนของโลหะ [6]

2.4 การผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อแบบพอกหุ่นจากโฟมพอลิเมอร์

โฟมอะลูมิเนียมสามารถผลิตได้ด้วยวิธีการหล่อจากการถอดแบบ (Investment casting with polymer foams) โดยมีกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.7 ขั้นแรกจะใช้โฟมพอลิเมอร์ เช่น โฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้นแบบ ซึ่งโฟมพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด เพื่อให้ของเหลวไหลผ่านได้ หลังจากนั้นจึงเติมน้ำสลัดลงไปเพื่อทำหน้าที่เหมือนแม่พิมพ์ น้ำสลัดที่ใช้โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเซรามิก เรียกว่า “Casting slurry” และควรมีสมบัติทนความร้อนสูงได้ เมื่อน้ำสลัดแข็งตัวจึงทำการให้ความร้อนเพื่อที่จะละลายโฟมพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นต้นแบบ จะได้แม่พิมพ์ที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดลักษณะเดียวกับโฟมพอลิเมอร์ ต่อมาจึงทำการหล่อโดยการเทน้ำอะลูมิเนียมลงไปแม่พิมพ์โดยใช้ใช้แรงดันช่วยในการหล่อเมื่อรูพรุนมีขนาดเล็ก และมีการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ไปด้วยเพื่อให้ น้ำอะลูมิเนียมสามารถเติมได้เต็มแบบ หลังจากปล่อยให้เย็นตัวแล้วจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยการทุบทำลายแม่พิมพ์และล้าแม่พิมพ์ออก ปัญหาของกระบวนการผลิตนี้คือความยากในการเติมเต็มแบบของน้ำอะลูมิเนียม การผลิตโฟมอะลูมิเนียมด้วยวิธีนี้มีข้อดีและข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2. 1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตโฟมแบบหล่อแบบพอกหุ่น

ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบไม่ยุ่งยาก	โพรงอากาศขนาดเล็กทำได้ยาก
ได้โครงสร้างตามแบบที่ต้องการ	ทำชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ยาก
โครงสร้างที่ได้สม่ำเสมอเช่นเดียวกับต้นแบบ	ผลิตได้เฉพาะโฟมโครงสร้างแบบเปิด เท่านั้น
สามารถใช้กับวัสดุได้หลากหลาย	อัตราการผลิตต่ำ

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโฟมอะลูมิเนียมจากกรรมวิธีการหล่อแบบพอกหุ่น

2.5.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมส่งผลต่อการเติมเต็มช่องว่างของน้ำโลหะอะลูมิเนียม ถ้าให้ความร้อนอะลูมิเนียมให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย เมื่อทำการหล่อน้ำโลหะจะแข็งตัวเร็ว ทำให้หล่อไม่เต็มแบบ แต่ถ้าให้ความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม ความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะลดลง ดังนั้นอุณหภูมิลหล่อเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความหนืด จากสมการของ Arrhenius

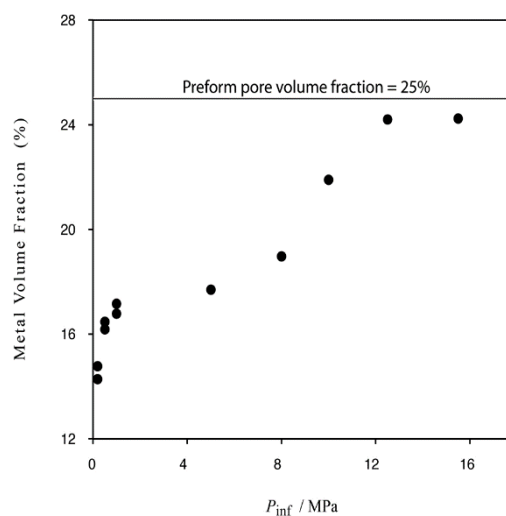
$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.3)$$

- เมื่อ η คือความหนืดมีหน่วยเป็น MPa/s
 η_0 คือค่าคงที่ pre - exponential ของความหนืด
 E_a คือค่า activation energy
 R คือค่าคงที่ของแก๊ส
 T คืออุณหภูมิ

ซึ่งการใช้อุณหภูมิที่ใช้ผลิตโฟมอะลูมิเนียมสูงกว่าจุดหลอมเหลวในระดับที่เหมาะสม การเติมเต็มแบบก็จะเป็นไปด้วยดี ถ้าให้ความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมสูงเกินไป การเติมเต็มแบบก็จะเป็นไปด้วยดีเช่นกัน แต่จะสิ้นเปลืองพลังงาน และอาจจะมีผลกระทบต่อผิววัสดุหลังจากการหล่อเนื่องจากอาจเกิดออกซิเดชัน

2.5.2 ความดันที่ใช้ในการแทรกซึม

ความดันที่ใช้จะสัมพันธ์กับขนาดของโพรงอากาศของต้นแบบ ความเรียบของผิวข้างในแม่พิมพ์ จากการศึกษาการผลิตโฟมอะลูมิเนียมแบบหล่อโดยใช้แม่พิมพ์เกลือจะเห็นแนวโน้มความสัมพันธ์ของการใช้ความดันที่เพิ่มขึ้นต่ออัตราส่วนปริมาตรของอะลูมิเนียมของโฟมที่ผลิตได้ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.12 จะเห็นว่าโฟมที่มีความหนาแน่นสูงความดันที่ใช้ในการผลิตจะสูงขึ้นด้วย ดังนั้นการให้ความดันควรให้ในระดับที่เหมาะสม ถ้าต่ำเกินไปน้ำอะลูมิเนียมจะเติมไม่เต็มแบบ แต่ถ้าให้ความดันมากเกินไป อาจเกิดความเสียหายต่อแม่พิมพ์และเครื่องมือได้



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโฟม ต่อความดันที่ใช้ในการแทรกซึม [7]

2.5.3 เวลาที่ใช้ในการให้ความดัน

การให้ความดัน ถ้าให้ความดันในเวลาที่ยาวเกินไป น้ำโลหะอะลูมิเนียมก็จะเต็มไม่เต็มแบบในทางตรงกันข้าม ถ้าให้ความดันในเวลาที่ยาวเกินไปอาจทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมดันแม่พิมพ์จนเกิดการเสียหาย และอาจรั่วซึมได้ ซึ่งเป็นอันตรายต่อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

2.5.4 วัสดุที่ใช้ในการผลิตต้นแบบ

วัสดุที่ใช้ผลิตต้นแบบนั้น ส่วนใหญ่นิยมใช้โฟมพอลิเมอร์ เช่น พอลิยูรีเทน ซึ่งโฟมอะลูมิเนียมที่ได้มีจะลักษณะเหมือนกับโฟมต้นแบบทุกประการ ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิตต้นแบบจะต้องสลายได้ง่ายเมื่อถูกกำจัดด้วยความร้อน และไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะที่ใช้ในการหล่อ

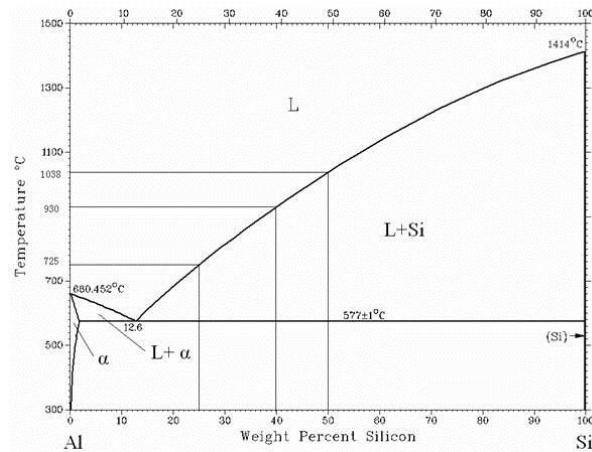
ขนาดโพรงอากาศและความหนาของกึ่งก้านของโฟมพอลิยูรีเทนจะมีผลต่อการให้ความดันในการแทรกซึม ความดันที่ใช้จะต้องมากกว่าความดันขีดเริ่ม (Threshold pressure) ซึ่งเป็นความดันที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้ น้ำโลหะอะลูมิเนียมไหลเข้าไปในแบบได้ ค่าความดันขีดเริ่มจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแบบหล่อและความสามารถในการเปื่อยผิวดินระหว่างวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อกับน้ำโลหะอะลูมิเนียม ถ้ามีค่าความสามารถในการเปื่อยผิวดินอาจไม่ต้องใช้ความดันช่วยในการให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมเข้าแบบหล่อ ซึ่งก็คือค่าความดันขีดเริ่มมีค่าติดลบ แต่ถ้าทั้งวัสดุที่ใช้ผลิตแบบหล่อกับน้ำโลหะอะลูมิเนียมมีค่าความสามารถในการเปื่อยผิวดินไม่ดีนักจะต้องใช้ความดันในการช่วยให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมไหลเข้าแบบได้ โดยความดันที่ใช้ถ้ามากกว่าความดันขีดเริ่มมากเท่าไร น้ำโลหะอะลูมิเนียมก็จะเต็มเต็มแบบได้มากขึ้น จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้กับอัตราส่วนเนื้ออะลูมิเนียมในโฟมรูปที่ 2.7 [7]

2.5.5 วัสดุที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตโฟมโลหะคืออะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมอัลลอย ในกระบวนการผลิต อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงจะใช้พลังงานในการหลอมเหลวสูง การเติมธาตุผสมบางตัวเช่น ซิลิคอน จะช่วยในการลดจุดหลอมเหลวลง ดังกราฟในรูปที่ 2.13 โดยการผสมซิลิคอนในปริมาณ 12.6 wt.% จะลดจุดหลอมเหลวให้ต่ำที่สุดที่ 577°C ส่งผลให้ใช้พลังงานในการหลอมเหลวน้อยลง และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของน้ำอะลูมิเนียม

สำหรับวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียม มีการผสมอนุภาคเซรามิกลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติทางกล ซึ่งปริมาณอนุภาคเซรามิกที่ผสมลงไปส่งผลต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม โดยที่ความหนืดจะแปรผันตามปริมาณอนุภาคเซรามิกที่เติมลงไป อนุภาคเซรามิกที่ผสมลงไปจะไปขัดขวางการไหลของ

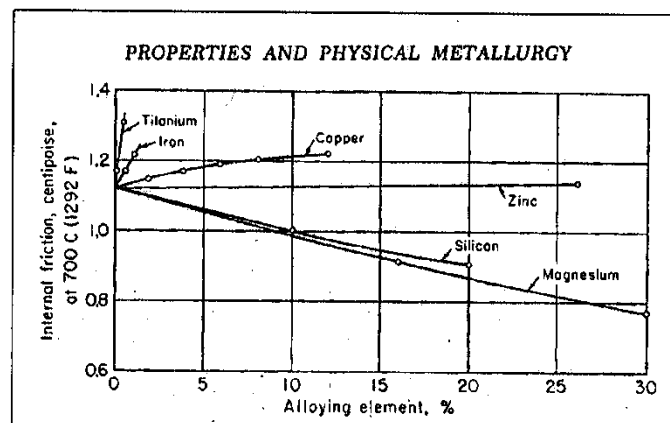
น้ำโลหะอะลูมิเนียมส่งผลให้การไหลตัวไม่ดี [8] นั่นคือเมื่อมีปริมาณอนุภาคเซรามิกสูงจะทำให้ น้ำโลหะอะลูมิเนียมมีความหนืดสูงขึ้น



รูปที่ 2. 13 แผนภูมิเฟสของอะลูมิเนียมที่ซิลิคอน wt.% ต่างๆกัน (Al-Si phase diagram) [9]

2.5.6 ความหนืดของน้ำโลหะหลอมเหลว

ความหนืดจะส่งผลต่อการไหลของน้ำโลหะอะลูมิเนียม ถ้าความหนืดสูงทำให้น้ำโลหะอะลูมิเนียมจะไหลผ่านช่องว่างที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กได้ยาก เป็นผลให้เกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะก่อนจะเต็มเต็มแบบ ดังนั้นน้ำโลหะควรจะมีค่าความหนืดต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่อาจจะเป็นปัญหาสำหรับการผลิตวัสดุผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบางชนิด เนื่องจากขณะหลอมเหลวจะมีความหนืดสูงมาก จึงมีการลดความหนืดของน้ำโลหะอาจทำได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะหรือการเติมธาตุผสมบางชนิด เช่น Si หรือ Mg เป็นต้น รูปที่ 2.14 แสดงผลของการเติมธาตุผสมที่มีผลต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม

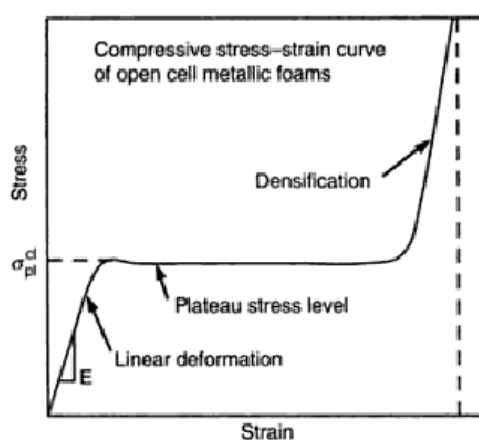


รูปที่ 2. 14 ผลของการเติมธาตุผสมที่มีต่อความหนืดของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [10]

2.6 สมบัติทางกลของโฟมโลหะ [11]

การนำไปใช้งานของโฟมอะลูมิเนียมโดยส่วนใหญ่มักนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในงานประเภทรับแรง ในการศึกษาจึงเน้นไปที่สมบัติการรับแรงอัด และความสามารถในการดูดซับแรงอัด

การรับแรงอัดของโฟมโลหะโดยทั่วไปเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัด 3 ขั้นตอนคือการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear elastic deformation) บริเวณที่ราบ (Plateau stress) และช่วงการอัดแน่น (Densification) แสดงไว้ดังกราฟในภาพที่ 2.15 ซึ่งจะเป็นพฤติกรรมการรับแรงอัดแบบอุดมคติ



รูปที่ 2. 15 กราฟความเค้น - ความเครียด ของโฟมโลหะในอุดมคติ [12]

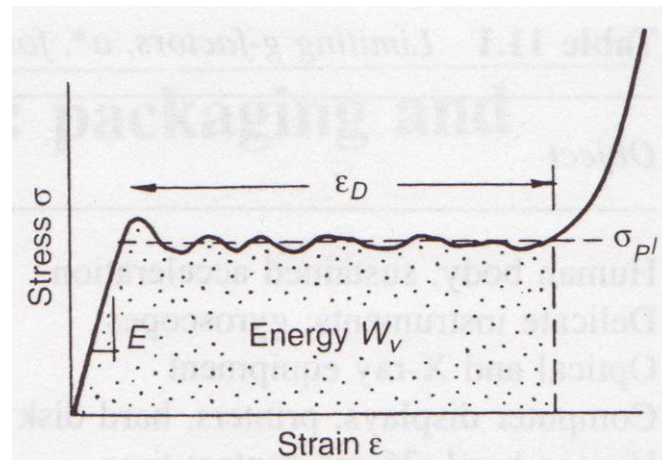
เมื่อโฟมโลหะได้รับแรง ในช่วงแรกเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง เมื่อให้แรงเกินจุดคราก โฟมโลหะจะเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงในช่วงบริเวณที่ราบ คือช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดภายใต้ความเค้นคงที่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้เป็นลักษณะพิเศษของโฟมโลหะ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานประเภทการดูดซับพลังงาน เมื่อให้แรงอัดกับโฟมโลหะจนโครงอากาศพังตัวจนหมด ก็จะเข้าสู่ช่วงอัดแน่น เป็นช่วงความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เปรียบเสมือนกับการอัดโฟมโลหะจนกลายเป็นโลหะตัน

ในส่วนความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกคือพื้นที่ใต้กราฟในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างบริเวณที่ราบ (Plateau) ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งค่า ϵ_D (Densification Strain) หาได้ดังสมการที่ 2.4

$$\epsilon_D = 0.8 - 1.75(\rho_f / \rho_s) \quad (2.4)$$

โดยที่ ρ_f คือ ความหนาแน่นของโฟมโลหะ

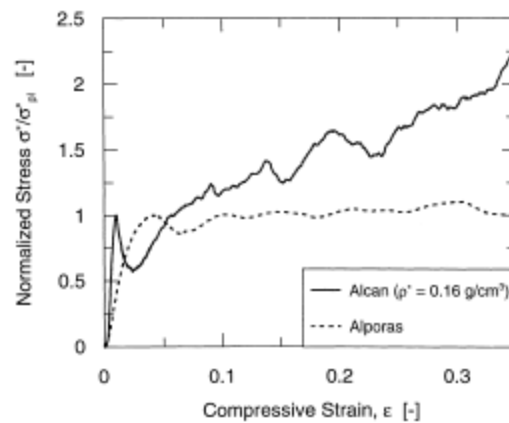
ρ_s คือ ความหนาแน่นของโลหะชนิดนั้นๆ [1]



รูปที่ 2.16 กราฟความเค้น - ความเครียด สำหรับการหาค่าความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก [1]

2.6.1 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิด

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มี 3 ขั้นตอนเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ลักษณะกราฟความเค้น-ความเครียด เป็นดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟความเค้น-ความเครียด ของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดที่ความหนาแน่น 0.16 g/cm³ [13]

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก และแบบพลาสติกเช่นเดียวกับโลหะทั่วไป จากการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้ ได้มีการสร้างสมการเพื่อที่จะอธิบายปรากฏการณ์ดังแสดงในสมการที่ 2.5

สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงอีลาสติก ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสสัมพัทธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังนี้

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C'_1 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.5)$$

โดยที่	E^*	คือ	ค่ามอดูลัสของโฟม
	E_s	คือ	ค่ามอดูลัสของของแข็ง
	ρ^*	คือ	ค่าความหนาแน่นของโฟม
	ρ_s	คือ	ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
	C_1, C'_1	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศ
	Φ	คือ	อัตราส่วนของเนื้อโลหะในก้านโพรงอากาศ [14]

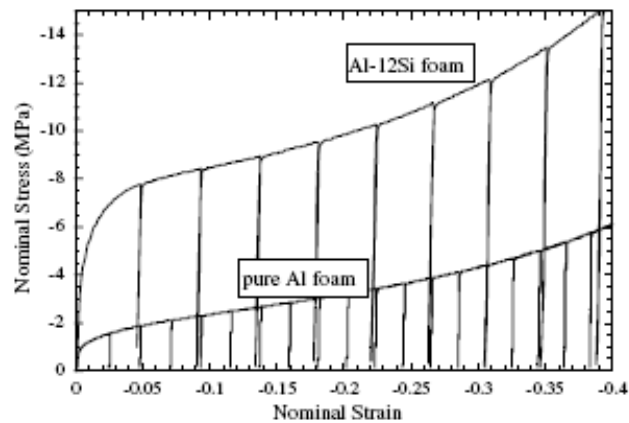
สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงพลาสติกได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกบริเวณที่ราบ (Plateau stress) ของโฟมกับของแข็งความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังสมการที่ 2.6

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_2 \left(\phi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} + C'_2 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.6)$$

โดยที่	σ_{pl}^*	คือ	ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟม
	σ_{ys}	คือ	ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของของแข็ง
	ρ^*	คือ	ค่าความหนาแน่นของโฟม
	ρ_s	คือ	ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
	C_2, C'_2	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศ
	Φ	คือ	อัตราส่วนของเนื้อโลหะในก้านโพรงอากาศ [14]

2.6.2 โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบเปิด

พฤติกรรมการรับแรงอัดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิด มีลักษณะที่คล้ายกันกับโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด เป็นไปตามกราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2. 18 กราฟความเค้น-ความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบเปิดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และ โฟม Al-12Si ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.27 [15]

พฤติกรรมการรับแรงอัดมีการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก และ แบบพลาสติกเช่นเดียวกับโครงสร้างแบบปิด สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงอิลาสติก ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสสัมพัทธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังสมการที่ 2.7

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad \frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.7)$$

โดยที่	E^*	คือ	ค่ามอดูลัสของโฟม
	E_s	คือ	ค่ามอดูลัสของของแข็ง
	ρ^*	คือ	ค่าความหนาแน่นของโฟม
	ρ_s	คือ	ค่าความหนาแน่นของของแข็ง
	C_1	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปทรงของโพรงอากาศซึ่งมีค่าประมาณ 1

สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วงพลาสติกได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกบริเวณที่ราบ (Plateau stress) ของโฟมกับของแข็งและความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.8 [14]

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.8)$$

โดยที่	σ_{pl}	คือ	ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของโฟม
	σ_{ys}	คือ	ค่าความเค้นของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของของแข็ง
	C_2	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปร่างของโพรงอากาศ
	ρ^*	คือ	ค่าความหนาแน่นของโฟม
	ρ_s	คือ	ค่าความหนาแน่นของของแข็ง

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

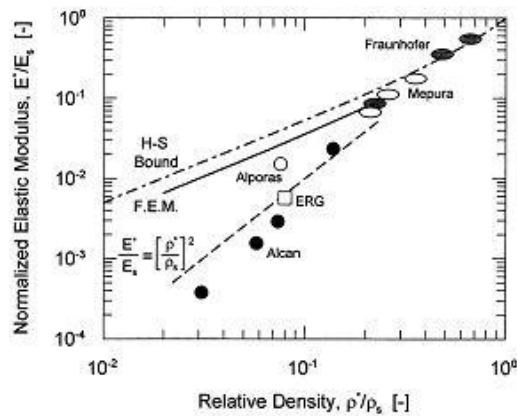
ปัจจัยที่จะกล่าวต่อไปนี้จะเรียงตามลำดับความสำคัญในการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

2.7.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิต

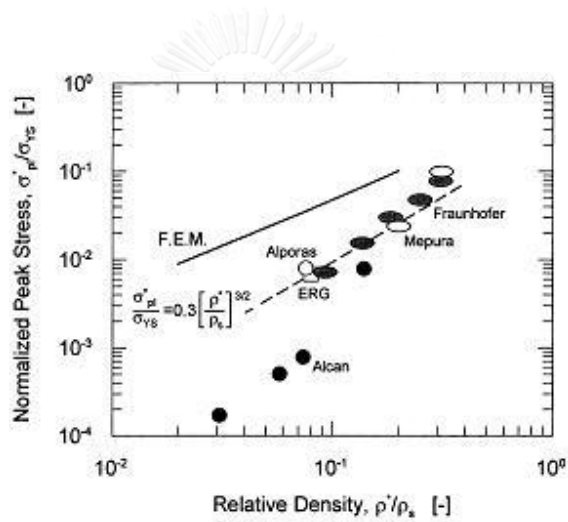
สมบัติของโฟมโลหะนั้น จะขึ้นกับสมบัติของวัสดุที่นำมาผลิต ซึ่งถ้าสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด (Intrinsic properties) แตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น, ความแข็งแรง, อนุจุดคราก, ความต้านทานต่อแรงดึง, ความต้านทานต่อแรงอัด เป็นต้น สมบัติของโฟมโลหะก็จะต่างกัน

2.7.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์

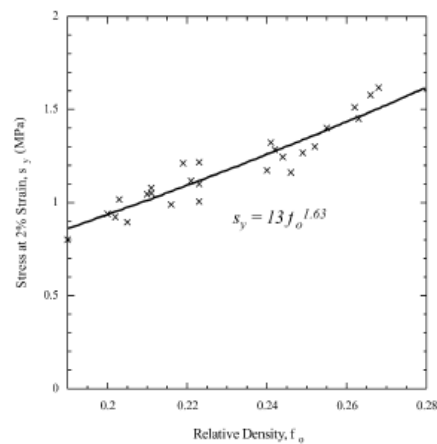
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมโลหะ มีผลต่อสมบัติทางกลโดยตรง โดยที่สมบัติทางกล เช่น โมดูลัสของยัง, ความต้านทานต่อแรงดึง, ความต้านทานต่อแรงอัด, ความแข็งแรง, อนุจุดคราก สูงขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้น ซึ่งแสดงดังรูป 2.19-2.21 จะเห็นว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น สมบัติทางกลก็จะดีขึ้นตามไปด้วยแต่มีผลเสียคือน้ำหนักของโฟมโลหะก็จะมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2. 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับมอดูลัสของยังหรือมอดูลัสยืดหยุ่น ของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas [4]



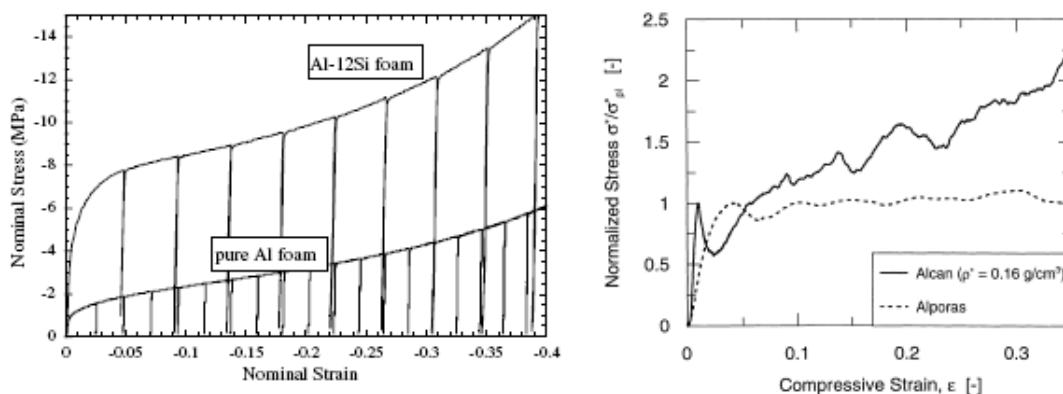
รูปที่ 2. 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความเค้นสูงสุด ของโฟมโลหะแบบ Alcan และ Alporas [4]



รูปที่ 2. 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับความแข็งแรงจุดครากของโฟมโลหะ [16]

2.7.3 ชนิดโครงสร้างของโฟมโลหะ

โครงสร้างของโฟมโลหะมี 2 แบบคือ โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบปิดและ โครงสร้างแบบเปิด ความแข็งแรงของโครงสร้างทั้งสองแบบนี้ต่างโดยที่แบบปิดแข็งแรงกว่า เพราะความแข็งแรงต่อหนึ่งโพรงอากาศสูงกว่า เนื่องจากลักษณะของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีลักษณะคล้ายกับมีลูกโป่งอัดอยู่ด้านใน เมื่อให้แรงการที่จะพังได้ก็ต้องอัดลูกโป่งให้แตกก่อน นอกจากนี้ การมีผนังโพรงอากาศในโฟมอะลูมิเนียมยังช่วยรับแรงอัดเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2. 22 เปรียบเทียบแรงอัดอัตรระหว่าง โฟมโลหะที่มีโครงสร้างแบบปิดและแบบเปิด [13, 15]

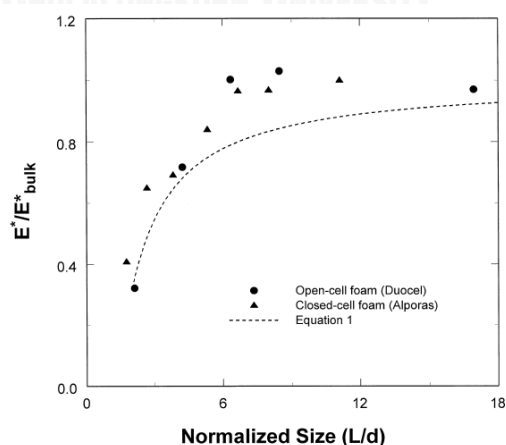
จากรูป 2.22 จะเห็นได้ว่ากราฟทางซ้ายมือเป็นโฟมอะลูมิเนียมโครงสร้างแบบเปิด ที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.26 และ โครงสร้างแบบปิดที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 0.06 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างแบบปิด มีค่าแรงอัด ต่ำกว่าโครงสร้างแบบเปิด เล็กน้อยแต่ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์นั้นต่ำกว่ามาก จึงสรุปได้ว่าโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิด มีความแข็งแรงสูงกว่า และสิ่งที่แตกต่างกันระหว่างทั้งสองกราฟคือ กราฟความเค้นความเครียดของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของความเค้นอย่างรุนแรงอันเนื่องมาจากการที่โพรงอากาศของโฟมโลหะโครงสร้างแบบปิดไม่ได้ติดต่อกับโพรงอากาศอื่นๆ จึงเสมือนกับใช้แรงอัดลูกโป่งให้แตก ดังนั้นความเค้นก็จะสูงขึ้นจนถึงจุดที่โพรงอากาศจะพังตัว เมื่อโพรงอากาศพังตัวความเค้นก็จะตกลงอย่างรวดเร็ว เหตุการณ์นี้ก็จะเกิดเป็นวงจรต่อไปจนกระทั่งโพรงอากาศพังตัวหมดทุกโพรง

2.7.4 ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของโพรงอากาศ

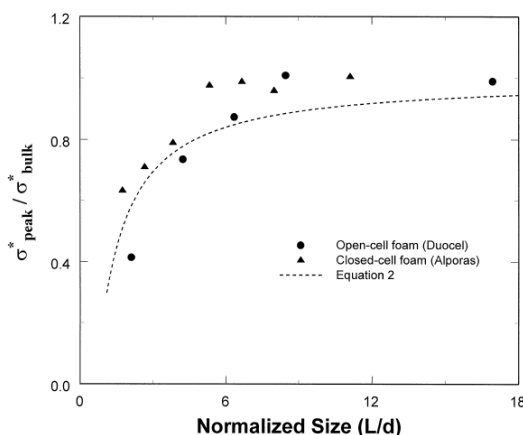
รูปร่างโพรงอากาศที่กลม ขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โฟมโลหะจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุด แต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงความหนาแน่นที่เราต้องการผลิต น้ำหนัก และการนำไปใช้งานด้วย เพราะขนาด รูปร่างและการกระจายของโพรงอากาศนั้นสัมพันธ์กันหมด

ขนาดและรูปร่างโพรงอากาศนั้น ส่งผลให้สมบัติทางกลของโฟมโลหะ เช่น ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และ ความแข็งแรง แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า ถ้าความหนาแน่นของโฟมโลหะมีค่าเท่ากัน รูปร่างของโพรงอากาศจะส่งผลต่อความแข็งแรงมากกว่าขนาดของโพรงอากาศ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของโพรงอากาศก็ยังเป็นตัวแปรสำคัญอยู่ [17] ส่วนการกระจายตัวของโพรงอากาศนั้นจะส่งผลต่อความสม่ำเสมอของความแข็งแรงในชิ้นงานโฟมโลหะ

ขนาดของโพรงอากาศและปริมาณโพรงอากาศต่อหนึ่งหน่วยความยาวของชิ้นงานทดสอบนั้นมีอิทธิพลเช่นกันซึ่งเรียกว่า Size Effects ซึ่งการที่ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องนั้นและคงที่นั้น ขนาดชิ้นงานทดสอบต้องมีสัดส่วนของความยาวหน้าตัดของโฟมและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศ (L/d) มากพอ ถ้าต้องการทดสอบโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด การที่จะทดสอบให้ได้ค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงของโฟมคงที่ ค่า L/d เท่ากับ 6 และ 5 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.23 เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า L/d ของโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6 ส่วนโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดการที่จะทดสอบให้ได้ค่ามอดูลัสของยังและค่าความแข็งแรงของโฟมคงที่ ค่า L/d เท่ากับ 6 และ 8 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.24 เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า L/d ของโฟมโลหะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 8 [18]



รูปที่ 2. 23 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสสัมพันธ์กับ L/d [18]



รูปที่ 2. 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจุดครากสัมพันธ์กับ L/d [18]

2.7.5 ตำแหน่งของโฟมโลหะ

ตำแหน่งของโฟมโลหะ (Defects) มีหลายแบบ เช่น รอยร้าวและรอยโก่งบนผนังโพรงอากาศ รูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟมโลหะ หรือจะเป็นวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ปลอมปนเข้ามา เมื่อโฟมโลหะได้รับแรง จุดที่อ่อนแอที่สุดคือตำแหน่ง เป็นจุดที่เกิดการพังตัวได้ง่ายกว่าที่ควรจะเป็น ถ้าตำแหน่งมีมากและมีขนาดใหญ่ ความแข็งแรงของโฟมโลหะก็จะต่ำลง

2.8 วัสดุผสม

วัสดุผสม (Composite materials) คือวัสดุที่เกิดจากการผสมของสาร 2 ชนิด หรือ 2 เฟส เข้าด้วยกันโดยสารทั้ง 2 จะต้องมีความอยู่มากพอ (>5%) นอกจากนั้นสารหรือเฟสต้องมีสมบัติแตกต่างกัน และเมื่อผสมแล้วสมบัติต้องต่างจากสารเริ่มแรกอย่างเห็นได้ชัด โดยวัสดุผสมต้องเกิดจากการผสมและการรวมกันด้วยฝีมือมนุษย์ ยกเว้นบางชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ กระดูก เป็นต้น

2.8.1 ส่วนประกอบของวัสดุผสม

2.8.1.1 ส่วนเมตริกซ์หรือเนื้อพื้น (Matrix phase) ซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลัก เป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) เมตริกซ์ที่นิยมใช้ คือ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก

2.8.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) เป็นส่วนที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลให้กับเนื้อพื้น โดยสมบัติทางกลจะขึ้นกับรูปร่างขอตัวเสริมแรงซึ่งรูปร่างของตัวเสริมแรงมีหลายแบบ เช่น เส้นใย (Fiber), อนุภาค (Particle) วิสเกอร์ (Whisker) และไฮบริด (Hybrid) ซึ่งเป็นวัสดุผสมที่ประกอบขึ้น

จากชั้นหลายชั้น โดยแต่ละชั้นอาจเป็นเส้นใยสั้นหรือยาวก็ได้ หรือแบ่งชั้นเป็นตัวเสริมแรงแบบอนุภาคกับเส้นใยก็ได้ เพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ

2.8.2 การจำแนกวัสดุผสมตามชนิดของวัสดุที่เป็นเนื้อพื้น สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

2.8.2.1 วัสดุผสมพอลิเมอร์

วัสดุผสมพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) มีเนื้อพื้นเป็นพอลิเมอร์และเฟสที่กระจายหรือเฟสเสริมแรงที่เป็นได้ทั้งพอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกโดยที่เส้นใยเสริมแรงได้ถูกเลือกให้เพิ่มสมบัติบางประการให้กับเนื้อพื้นเช่นเพิ่มมอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) เพิ่มความแข็งแรง (Tensile strength) เพิ่มความเค้นจุดคราก (Yield strength, σ_y) และความต้านทานความคืบ (Creep resistance) เป็นต้น

2.8.2.2 วัสดุผสมโลหะ

วัสดุผสมโลหะ (Metal matrix composite, MMC) ส่วนมากมีเฟสกระจายตัวที่เป็นโลหะหรือเซรามิกเพื่อเพิ่มความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Tensile strength) และความต้านทานความคืบ (Creep resistance) ให้กับเนื้อพื้นที่เป็นโลหะ เป็นต้น

2.8.2.3 วัสดุผสมเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

วัสดุผสมเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) เนื่องจากเนื้อพื้น เซรามิกมีความเพราะสูงเพราะฉะนั้นเฟสกระจายตัวที่เลือกมาผสมกับเนื้อพื้นต้องเพิ่มความแกร่ง (Fracture toughness, K_{Ic}) ให้กับเนื้อพื้น

2.8.3 วัสดุผสม IPCs

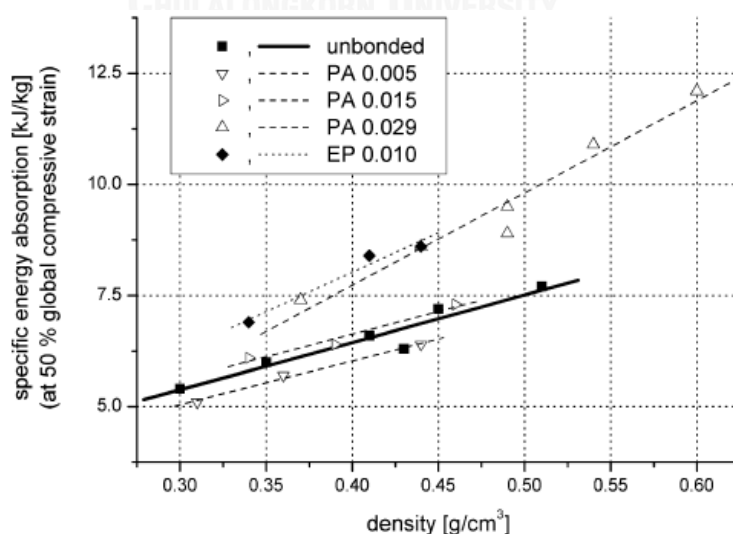
ในอุตสาหกรรมยานยนต์มีความต้องการวัสดุที่มีสมบัติทางกลที่ดี น้ำหนักเบาวัสดุผสมโพลีเมอร์ โลหะ และพอลิเมอร์จึงได้รับการศึกษา เพื่อใช้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในอนาคต โดยวัสดุผสมชนิดนี้เรียกว่า Interpenetrating phase composites (IPCs) ซึ่งการเชื่อมต่อของเฟสแบบต่อเนื่องนี้ส่งผลให้มีความโดดเด่นแตกต่างจากวัสดุผสมแบบเดิม คือเส้นใยทิศทางเดียว, ลามิเนต และอนุภาค เป็นต้น [19]

2.8.3.1 ลักษณะเด่นของวัสดุผสม IPCs คือการยึดติดกันของวัสดุ สมบัติจะขึ้นกับเนื้อพื้นที่มีเฟสต่อเนื่องกัน โดยเกิดจากวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปด้วยเกิดการยึดเหนี่ยวทางกล (Mechanically bonding) ทำให้วัสดุผสม IPCs มีสมบัติที่ดีกว่าหรือสามารถตอบสนองความต้องการได้ดีกว่าโครงสร้างที่ใช้วัสดุนั้นๆ เพียงชนิดเดียว [20]

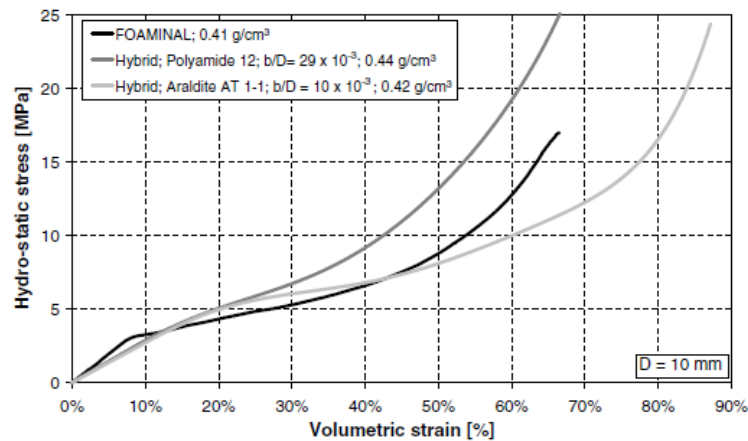
2.8.3.2 การผลิตวัสดุผสม IPCs สามารถทำได้ด้วยวิธีการหล่อโดยใช้ความดันช่วย, spontaneous infiltration, squeeze casting, gas pressure assisted infiltration และ self-propagating high-temperature synthesis เป็นต้น

Kaesten S. และคณะ [17] ได้ศึกษากระบวนการผลิตแบบ APM (Advanced Pore Morphology) ของโฟมอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCs พอลิเมอร์ โดยศึกษาการยึดเกาะกันอะลูมิเนียมและพอลิเมอร์ อีกทั้งศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุใหม่นี้ โดยมีการทดสอบการบีบอัดในแนวแกนเดียว ซึ่งจะแสดงถึงสมบัติเฉพาะของวัสดุนี้ออกมา เช่น ขนาดพื้นที่ของการกระจายตัว และความหนาแน่นของโฟมอะลูมิเนียมโครงสร้างพอลิเมอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามชนิด และความหนาของพอลิเมอร์ โดยเปรียบเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมโดยทั่วไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โฟมอะลูมิเนียมเกรด AlSi7

ผลของการดูดซับพลังงานแสดงในรูปที่ 2.25 จะพบว่าโฟมอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCs พอลิเมอร์จะสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้นกว่าโฟมอะลูมิเนียมโดยทั่วไป อีกทั้งค่า Hydrostatic stress และ Volumetric strain curves ของโฟมอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCs พอลิเมอร์ จะมีค่าแตกต่างจากโฟมอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCs พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.26 [17]

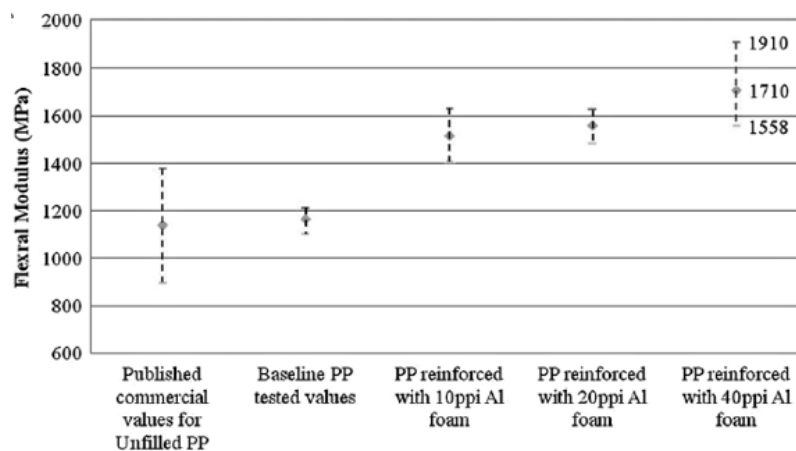


รูปที่ 2. 25 แสดงการดูดซับพลังงาน (ที่ 50% global compressive strain) ของโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCsพอลิเมอร์ [17]

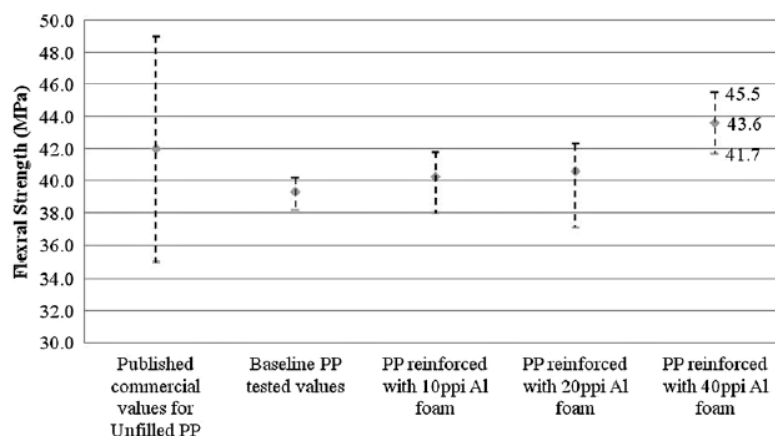


รูปที่ 2. 26 แสดงผลระหว่าง Hydrostatic stress และ volumetric strain curves ของโฟมอะลูมิเนียม และโฟมอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCsพอลิเมอร์ [17]

Nihad D. และคณะ [19] ได้ศึกษาวัสดุผสมที่สร้างขึ้นจากโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และใช้โพรลีนในการฉีดขึ้นรูป โดยลูมิเนียมโฟมที่ใช้มีขนาดโพรงอากาศต่างกัน คือ 10 , 20 และ 40 (ppi) วัสดุผสมนี้ได้มีการทดสอบ Strength และ Stiffness โดยใช้มาตรฐาน ASTM D790 ค่า Flexural modulus ของอะลูมิเนียมโฟมผสมพอลิเมอร์จะมีค่าสูงกว่าโพรลีน โดยความหนาแน่นของโครงสร้างโพรงอากาศถ้ายิ่งมากจะส่งผลให้ค่า Flexural modulus สูง ดังรูปที่ 2.27 ส่วนค่า Strength ของวัสดุผสมเมื่อเทียบกับโพรลีนจะมีค่าสูงขึ้น โดยค่าความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างโพรงอากาศ ถ้าโพรงอากาศมีขนาดเล็กจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณโฟมอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2. 27 แสดง Flexural modulus ของอะลูมิเนียมโฟมผสมพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างโพรงอากาศต่างกัน [19]



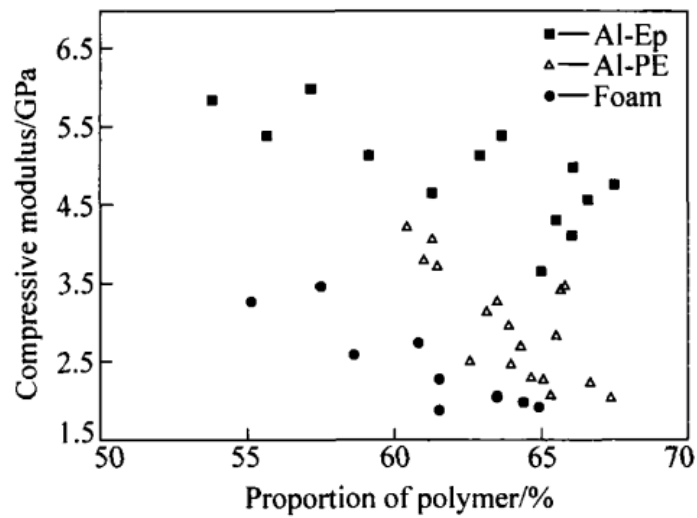
รูปที่ 2. 28 แสดง Flexural strength ของอะลูมิเนียมโฟมผสมพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างโพรงอากาศต่างกัน [19]

Satoshi K. และคณะ [21] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิดผสมพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้ คือ Epoxy resin และพอลิยูรีเทน โดยศึกษาลักษณะการกระจายตัวของวัสดุผสมจากภาพดิจิทัลด้วยวิธี DIC และทำการวัดความแข็งแรงจากการทดสอบแรงกด พบว่าค่า Young's modulus, compress strength ของโฟมอะลูมิเนียมผสมพอลิยูรีเทนมีค่าต่ำกว่าโฟมอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCs กับ Epoxy resin ดังแสดงในตารางที่ 2.2

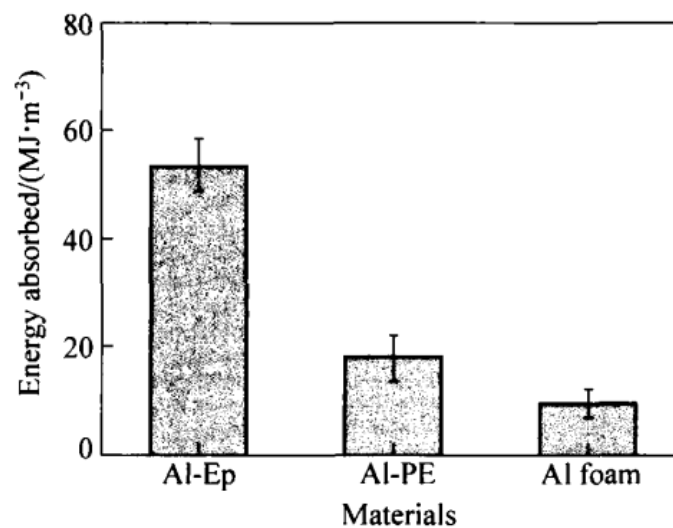
ตารางที่ 2. 2 แสดง Young' modulus, Poisson's ratio และ compressive strength [21]

Specimen	Young's modulus (MPa)		Poisson's ratio	Compressive strength (MPa)
	From machine	From DIC		
#1P with epoxy	863	927	0.44	51.3
#10 without polymer	64	87	0.25	1.7
#2P with polyurethane	57	80	0.20	2.4
#20 without polymer	72	90	0.25	2.2

Liu Y. [22] ได้ศึกษาการผลิตวัสดุผสม IPCs เพื่อพัฒนาสมบัติทางกล และทางกายภาพ โดยได้มีการใช้โฟมโลหะอะลูมิเนียมเป็นโครงสร้างเครือข่าย ใช้พอลิเอทิลีน (PE) และ Epoxy resin (EP) พบว่าวัสดุผสมมีสมบัติในการรับแรงในการอัด และการดูดซับพลังงานที่ดีกว่าโฟมโลหะ ดังรูป 2.29-2.30



รูปที่ 2. 29 แสดง Compressive modulus ของ Al-Ep, Al-PE และโฟมโลหะ [22]



รูปที่ 2. 30 แสดง Comparison of energy absorption ของ Al-Ep, Al-PE และโฟมโลหะ ที่มีอัตราส่วนอลูมิเนียม Al 0.3 และ strain 40% [22]

Ziyang Y. [23] ได้ศึกษาวัสดุผสมจากโฟมอลูมิเนียม และพอลิเมอร์ โดยการฉีดพอลิโพรพิลีน และอะซีตัล ลงในโฟมอะลูมิเนียม พบว่าวัสดุผสมมีความแข็งแรง และการต้านทานแรงดึงที่มากขึ้น ตามทิศทางของโฟมอะลูมิเนียม ถ้ายังมีปริมาณพอลิเมอร์มาก ค่าความเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงจะลดลง

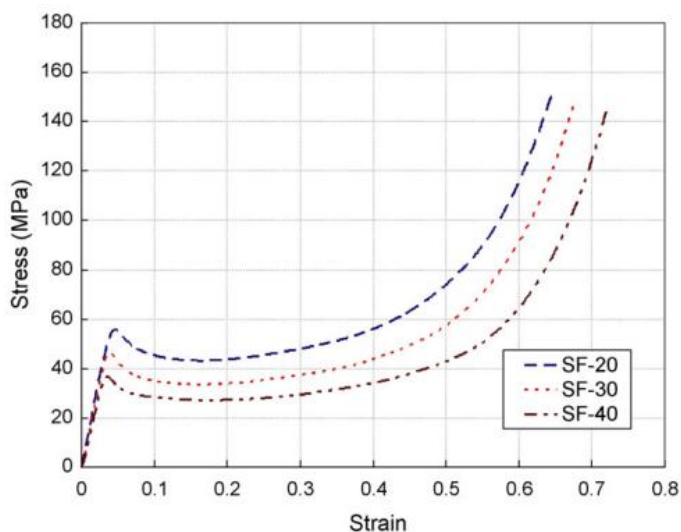


รูปที่ 2. 31 แสดงการแตกหักของวัสดุผสมจากโฟมอะลูมิเนียม และพอลิเมอร์ [23]

Rahul J. [24] ได้ศึกษาวัสดุผสม IPCs โดยใช้โฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และใช้ Epoxy resin แทรกซึมเข้าไปภายในรูพรุน ซึ่งมีปริมาณ Epoxy resin 20%, 30% และ 40% ปรากฏว่าวัสดุผสมมี Elastic modulus, Yield stress และ Plateau stress ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีการดูดซับพลังงานที่เพิ่มขึ้นอีกด้วยดังรูป 2.32-2.33 และ ตารางที่ 2.3-2.4



รูปที่ 2. 32 แสดงตัวอย่างวัสดุผสมโฟมอะลูมิเนียมและEpoxy resin [24]



รูปที่ 2. 33 แสดง Stress–strain curves ของวัสดุผสมที่มีอัตราส่วนEpoxy resinที่แตกต่างกันโดย ปริมาตร (20, 30, และ 40) [24]

ตารางที่ 2. 3 แสดงสมบัติของวัสดุผสม IPC [24]

IPC designation	Density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)
IPC-20	1008 ± 12	59.9 ± 2.5	1821 ± 17
IPC-30	937 ± 8	50.5 ± 1.8	1573 ± 12
IPC-40	861 ± 12	41.5 ± 2.6	1442 ± 28

ตารางที่ 2. 4 แสดงการเปรียบเทียบ สมบัติที่ได้จากการคำนวณ และการทดลอง [24]

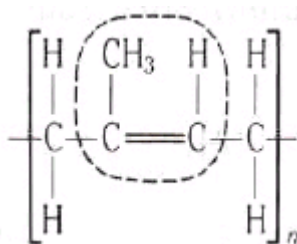
IPC designation	Finite element results			Experimental results		
	Elastic modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)	Plateau stress (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)	Plateau stress (MPa)
IPC-S20	2204	67.8	52.0	2109	64.2	50.8
IPC-S30	1938	55.8	41.9	1843	53.2	40.2
IPC-S40	1792	47.9	33.7	1689	45.0	31.7

2.9 ยางธรรมชาติ [25]

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากลาเทก (Latex) หรือน้ำยาง จากต้นยางธรรมชาติ ซึ่งปลุกมากในแถบร้อนแควเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ประเทศไทย มาเลเซียและอินโดนีเซีย โดยน้ำยางธรรมชาติเป็นของเหลวสีขาวคล้ายนมสด มีอนุภาคเล็กๆของยาง แขนวนลอยอยู่ในน้ำ น้ำยางที่เก็บจากต้นยางธรรมชาติจะถูกทำให้เจือจางลงเหลือ 15% และทำให้ ตกตะกอนด้วยกรดฟอร์มิก หลังจากนั้นจึงนำมาอัดด้วยลูกกลิ้งเพื่อไล่น้ำออก ได้เป็นยางแผ่น ยางแผ่น

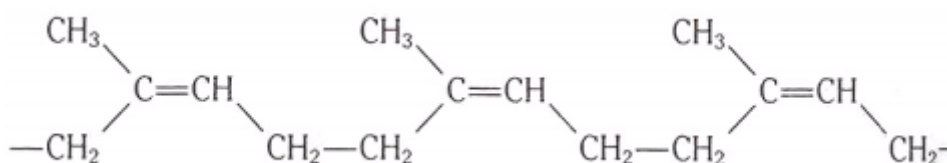
นี้จะนำไปทำให้แห้งด้วยการอบด้วยอากาศร้อนหรืออบด้วยควันไฟ ยางแผ่นจะนำไปบดด้วยลูกกลิ้งที่หนัก แรงเฉือนจะทำให้ห่วงโซ่ยาวของพอลิเมอร์แตกออกทำให้มวลโมเลกุลโดยเฉลี่ยลดลง

2.9.1 โครงสร้างยางธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็น cis-1,4 polyisoprene ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม long chain พอลิเมอร์ มวลโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 5×10^5 กรัม/โมล ดังรูปที่ 2.34 [26]



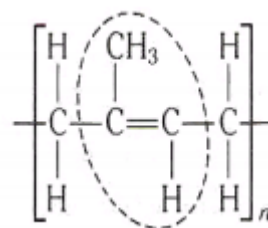
รูปที่ 2. 34 แสดงโครงสร้าง cis-1,4 Polyisoprene [27]

คำว่า cis- ที่อยู่ข้างหน้า แสดงว่าหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) และไฮโดรเจนอะตอมอยู่ข้างเดียวกันของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนซึ่งแสดงอยู่ในวงของโครงสร้าง 1,4 บอกถึงตำแหน่งของคาร์บอนว่าอยู่ตำแหน่งที่ 1 และที่ 4 ที่เป็นหน่วยย่อยของพอลิเมอร์ที่เกิดพันธะโคเวเลนต์ต่อเป็นโซ่ยาว โซพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติจะยาวสลับซับซ้อนและเป็นมันวาว ที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ที่สถานะอ่อนนุ่มทำให้โมเลกุลเกิดโค้งงอ เนื่องจากหมู่เมทิลกับไฮโดรเจนอะตอมที่อยู่ข้างเดียวกันของพันธะคู่ การจัดตัวของยางธรรมชาติในโซพอลิเมอร์จึงเป็นดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2. 35 แสดงการจัดเรียงตัวของยางธรรมชาติ [26]

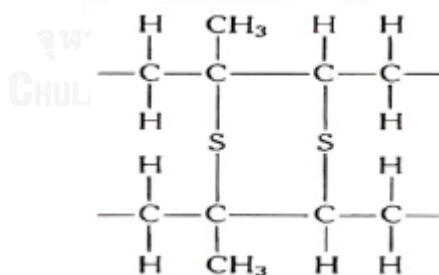
พอลิไอโซพรีน ยังมีไอโซเมอร์อย่างอื่นอีก คือ ทรานซ์-1,4 พอลิไอโซพรีน (trans*-1,4 polyisoprene) เรียกว่า กุดตาเปอร์ชา (gutta percha) ซึ่งไม่เป็นอีลาสโตเมอร์และมีโครงสร้างที่มีหมู่เมทิลและไฮโดรเจนอะตอมอยู่คนละด้านของพันธะคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2. 36 แสดงโครงสร้าง trans-1,4 Polyisoprene [26]

ในสูตรโครงสร้างนี้หมู่เมทิลและไฮโดรเจนอะตอมที่เกิดพันธะที่พันธะคู่จะไม่รบกวนซึ่งกันและกัน ดังนั้น ทรานซ์-1,4 พอลิไอโซพรีนจึงมีโมเลกุลที่สมมาตรมากกว่า ซึ่งสามารถตกผลึกเป็นสารแข็งได้ดีกว่า

2.9.2 การทำให้ยางแข็ง (Vulcanization) เป็นกระบวนการทางเคมีซึ่งเป็นการทำให้เกิด cross-link ระหว่างโมเลกุลกลายเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นและเคลื่อนไหวยาก ในปี 1893 ชาร์ล กูดเยียร์ (Charles Goodyear) ได้ค้นพบกระบวนการทำให้ยางแข็งโดยใช้กำมะถันและตะกั่วคาร์บอนेट แล้วให้ความร้อน ยางจะเปลี่ยนจากเทอร์โมพลาสติกไปเป็นอีลาสโตเมอร์ ปฏิกริยาระหว่างกำมะถันกับยางจะทำให้เกิดพันธะคู่ในพอลิไอโซพรีนโมเลกุลจะเปิดออกแล้วเกิด cross-link กับอะตอมของกำมะถันดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2. 37 แสดงกระบวนการเกิด Vulcanization ของยางกับอะตอมของกำมะถัน [27]

โดยทั่วไปถ้ายางที่ผสมกับกำมะถันประมาณ 3% โดยน้ำหนักและให้ความร้อน 100-200°C จะได้ vulcanized rubber ที่อ่อน แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของกำมะถันขึ้น การเกิด cross-link ก็เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ยางแข็งขึ้น และโค้งงอได้ต่ำลง แต่ถ้าจะให้ยางแข็งเต็มที่จะต้องผสมกำมะถันประมาณ 45% โดยน้ำหนักมี

2.9.3 สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ

2.9.3.1 ไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายไม่มีขี้ แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน

2.9.3.2 สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนได้ง่าย ทำให้ยางสามารถเสื่อมสภาพได้เนื่องมาจากการมีพันธะคู่ในโครงสร้าง

2.9.3.3 มีความยืดหยุ่นสูง สามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว

2.9.3.4 มีความเหนียวติดกัน ในสภาพไม่คงรูป ซึ่งสำคัญในการผลิตที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เช่นยางรถยนต์

2.9.3.5 มีความทนทานต่อแรงดึงสูงประมาณ 20 MPa เนื่องจากโมเลกุลที่เป็นระเบียบ สามารถตกผลึกได้เมื่อเกิดการดึงยืด ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง ใช้ทำถุงมือยาง, ถุงยางอนามัย ฯลฯ

2.9.3.6 มีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงที่อุณหภูมิต่ำและสูง ใช้ทำกระเปาะน้ำร้อน

2.9.3.7 ความต้านทานต่อการขีดถูสูง

2.9.3.8 เป็นฉนวนไฟฟ้า โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้า 10^{15-16} ohm.cm

2.9.3.9 ใช้งานได้ที่อุณหภูมิ 55-70°

ตารางที่ 2. 5 แสดงสมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ [25]

ชื่อ	cis-1,4 polyisoprene
สูตรโมเลกุล	C ₅ H ₈
ความหนาแน่น	0.93 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	ประมาณ 100°C
Hardness	30 -100
Elongation	750-850%
TS strength	25-35 MPa
Young's modulus	2 MPa
Tg	ประมาณ -75 °C
อุณหภูมิใช้งาน	-55 °C ถึง 100 °C

2.10 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) มีลักษณะโดยทั่วไปแล้วเป็นสีขาวขุ่นโปร่งแสง มีความลื่นมันในตัวเอง เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น ยืดหยุ่นได้ดี และที่สำคัญ ไม่มีกลิ่น และรส แอมยังไม่ติดแม่พิมพ์อีกด้วย มีความเหนียว แต่ทนความร้อนได้ไม่มากนัก (<100 C) แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี (Chemical) เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีมาก ใสสีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ดี เมื่อมีความหนาแน่นสูงขึ้น จะทำให้มีความแข็งแรง และความเหนียวเพิ่มขึ้น ดังนั้นคุณสมบัติในการหลอมตัวจึงสูงขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้อัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือผิวจะแตกกรันได้ง่ายขึ้น [27-29]

2.10.1 ประเภทของพอลิเอทิลีน

2.10.1.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โมเลกุลของ LDPE มีแบ็กโบนคาร์บอนที่มีไฮโดรเจนของคาร์บอนสี่ถึงหกอะตอมติดกับแบ็กโบนหลักอย่างสุ่มๆ LDPE มีการใช้อย่างกว้างขวางเพราะว่าไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อสารเคมี

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผลิตโดยใช้ถังปฏิกรณ์ (autoclave reactors) ความดันมากกว่า 14500 psi (100 MPa) ที่อุณหภูมิประมาณ 300°C พอลิเอทิลีนที่ผลิตได้จะเป็น linear-low density (LLDPE) ซึ่งโครงสร้างเป็นเส้นตรงโดยมีกิ่งก้านสั้น ๆ โดย LDPE ถูกขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่น

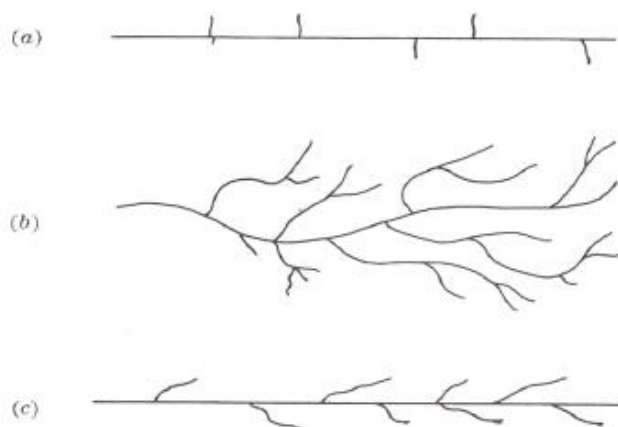
2.10.1.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.93–0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร MDPE สามารถผลิต โดยโครเมียมในส่วน catalysts, Ziegler-Natta catalysts หรือ metallocene catalysts MDPE มีดีซ็อกและปล่อยความต้านทานสมบัติ นอกจากนี้ เป็นรอยเว้า่น้อย มีความสำคัญกว่า HDPE มีความต้านทานการถอดความเครียดดีกว่า HDPE

2.10.1.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.95 ถึง 0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โมเลกุลของ HDPE จะมีแบ็กโบนคาร์บอนที่ยาวมากแต่ไม่มีไฮโดรเจน ผลก็คือ

โมเลกุลเหล่านี้เชื่อมกันอย่างแน่นหนามากขึ้น HDPE แข็งแรงกว่า แข็งกว่า และโปร่งแสงน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผลิตด้วยกระบวนการ Phillips และ Ziegler โดยมีตัวเร่งที่ทำให้ใช้ความดันและอุณหภูมิต่ำลง คือใช้อุณหภูมิ 100-150°C และความดัน 290-580 psi (2-4 MPa) HDPE ใช้ทำถุง ถังน้ำมันรถ หนีบท่อและท่อน้ำ



รูปที่ 2. 38 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแบบต่าง ๆ

(a) แบบความหนาแน่นสูง (high-density)

(b) แบบความหนาแน่นต่ำ (low-density)

(c) แบบโครงสร้างเป็นเส้นตรงความหนาแน่นต่ำ (linear-low-density)

2.10.2 สมบัติทั่วไป

2.10.1.1 ยืดหยุ่นได้ดี เหนียวมากที่อุณหภูมิต่ำ

2.10.1.2 มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีมาก

2.10.1.3 ทนต่อสภาวะอากาศได้ดีพอสมควรอากาศสามารถซึมผ่านได้ดี

2.10.1.4 หดตัวแม่พิมพ์ได้ดีมาก ทำให้ถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย

2.10.1.5 เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก

2.10.1.6 ผสมสีได้ง่าย ทำให้ผลิตเป็นฟิล์มใส ฟิล์มสี ฟิล์มโปร่งแสงหรือทึบแสงได้

2.10.1.7 ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส

ตารางที่ 2. 6 แสดงสมบัติของพอลิเอทิลีน [25]

ชื่อ	พอลิเอทิลีน
สูตรโมเลกุล	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$
ความหนาแน่น	$0.910\text{-}0.925 \text{ g/cm}^3$
Tensile Strength	62-173 MPa
Elongation	550-600%
จุดหลอมเหลว	ประมาณ 180-230

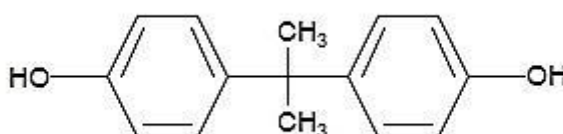
2.11 Epoxy Resin

Epoxy resin จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติง เมื่อผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรกแล้ว จะมีความแข็งแรงทนทานเป็นอย่างมาก ไม่คืนรูป และไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ Epoxy resin เป็นโคพอลิเมอร์ หมายความว่า เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป

2.11.1 การสังเคราะห์ Epoxy resin

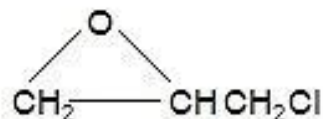
Epoxy resin สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาของ Bisphenol A กับ Epichlorohydrin Monomer และสารเพิ่มความแข็ง (Hardener) ซึ่งเป็นสารประเภท Polyamine โดยในปฏิกิริยาอาจมีการเติม NaOH เข้าไปเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา

2.11.1.1 Bisphenol A มีสูตรโมเลกุล $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{C}_6\text{H}_4\text{OH})_2$ เป็นสารเคมีประเภทโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate Plastic) เป็นของแข็งใส ไม่มีสี ไม่แตกหักง่าย สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ไม่ละลายน้ำ ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตขวดพลาสติก เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดนมเด็ก แต่สารนี้มีความเป็นพิษต่อร่างกายสูง เนื่องจากการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน เช่น การนึ่งหรือต้ม ปัจจุบันจึงได้มีการสั่งห้ามใช้ Bisphenol A ในการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร โครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของ Bisphenol A ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.39



รูปที่ 2. 39 Bisphenol A [26]

2.11.1.2 Epichlorohydrin มีสูตรโมเลกุล C_3H_5ClO เป็นของเหลวไม่มีสี มีกลิ่นฉุนคล้ายกระเทียม ติดไฟได้ง่าย สามารถละลายน้ำได้พอประมาณ โครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของ Epichlorohydrin ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.40



รูปที่ 2. 40 Epichlorohydrin [26]

2.11.1.3 ปฏิบัติการสังเคราะห์ Epoxy resin สามารถทำได้โดยการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Bisphenol A กับ Epichlorohydrin ดังแสดงในรูปที่ 2.41 เมื่อ n มีค่าประมาณ 20 – 30 พอลิเมอร์ที่ได้จะเป็นของแข็ง

2.11.2 การใช้งาน

2.11.2.1 นำไปหล่อทับอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพราะมีสมบัติการความต้านทานไฟฟ้าสูง และระบายความร้อนได้ดี

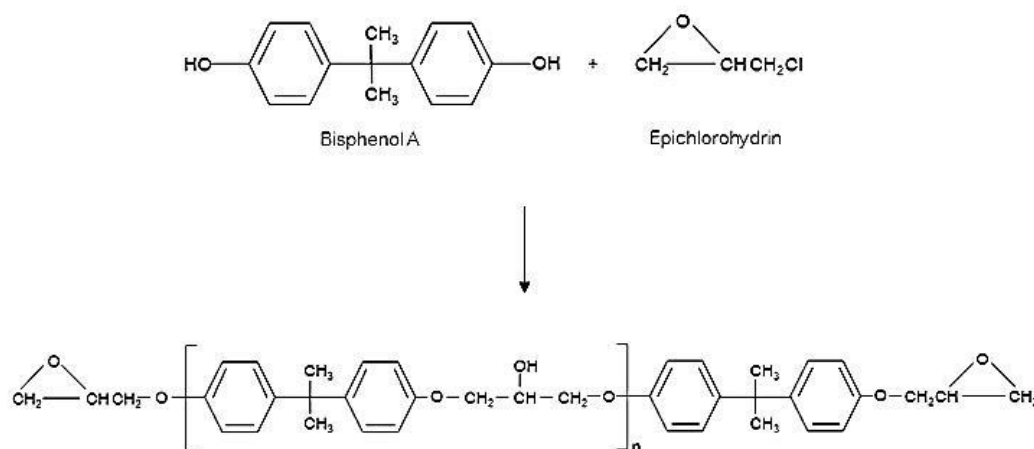
2.11.2.2 งานเคลือบผิวต่าง ๆ เช่น เคลือบพวงกุญแจ เคลือบโลโก้ เคลือบป้าย จากสมบัติการยึดเกาะพื้นผิว และแรงดึงผิวหน้าสูง จึงทำให้ผิวหน้าเรียบสวยงาม

2.11.2.3 งานฉนวนไฟฟ้า เครื่องประดับ

2.11.2.4 งานหล่อไฟเบอร์กลาส เคพลาร์ คาร์บอนไฟเบอร์

2.11.2.5 งานหล่อชิ้นงาน งานหล่อต้นแบบ

2.11.2.6 นำไปเคลือบสติ๊กเกอร์ที่บดงอได้ ด้วยEpoxy resinชนิดเคลือบนิ่ม



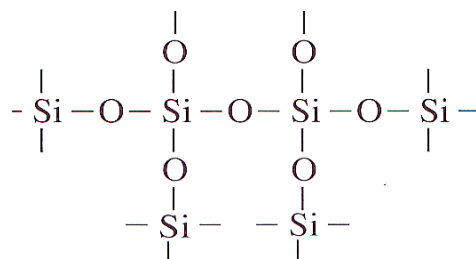
รูปที่ 2. 41 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ Epoxy resin[26]

ตารางที่ 2. 7 แสดงสมบัติของEpoxy resin เรซิน [25]

ชื่อ	Epoxy resin
สูตรโมเลกุล	
Density	1-1.4 g/cm ³
สี	ใส หรือ เหลือง
จุดเดือด	ประมาณ 260 °C
Tensile Strength	276-897 MPa
ความหนาแน่น	1.17 g/cm ³
จุดเยือกแข็ง	-8 °C

2.12 ซิลิโคน

ซิลิโคน (Silicone) คือ สารพอลิเมอร์ที่มีชื่อว่า Polysiloxane หรือ Poly Organosiloxane เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์สังเคราะห์ ประกอบด้วยอะตอมของธาตุซิลิคอนสลับกับออกซิเจน โครงสร้างโดยทั่วไปของ ซิลิโคน เป็นดังแสดงในรูปที่ 2.42 จัดอยู่ในพอลิเมอร์ประเภทยาง



รูปที่ 2. 42 โครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของ ซิลิโคน [26]

ซิลิโคน เป็นพอลิเมอร์ของธาตุซิลิคอน ซึ่งแตกต่างจากพลาสติกทั่วไปซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของธาตุคาร์บอน มีหลายชนิด และหลายลักษณะทั้งเป็นของเหลว เป็นเจล เป็นของแข็ง และแข็งของแข็ง ขึ้นอยู่กับขนาดของพอลิเมอร์ ถ้าเป็นพอลิเมอร์ขนาดเล็กจะมีลักษณะเป็นของเหลว แต่ถ้าเป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่จะเป็นขี้ผึ้ง ส่วนซิลิโคน ที่มีลักษณะเป็นยางเหนียวจะมีโครงสร้างแบบตาข่าย สามารถทำให้คงรูปได้โดยกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ [26]

ตารางที่ 2. 8 แสดงสมบัติของซิลิโคน [28]

ชื่อ	ซิลิโคน
สูตรโมเลกุล	$ \begin{array}{ccccccc} & & \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 & & \\ & & & & & & \\ & - & \text{O} - \text{Si} & - & \text{O} & - & \text{Si} & - & \text{O} & - & \\ & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & \\ & & \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 & & & & & & \\ & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & \end{array} $
ความหนาแน่น	1.1-2.3 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	ประมาณ 315°C
Elongation	100-500%
Ductility	0.8-5.3
TS strength	2.4-5.5 MPa
อุณหภูมิใช้งาน	-115 °C ถึง 315 °C

2.12.1 สมบัติโดยทั่วไปของซิลิโคน

สมบัติโดยทั่วไปของซิลิโคน คือไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมี จึงสลายได้ยาก ทั้งยังทนต่อสภาพแสงแดด ความร้อน และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้มาก ทนน้ำได้ปานกลาง แต่ไม่ทนต่อกรดและด่าง สารเคมีพวก คีโตน และอีเทอร์ และไม่ยึดติดกับวัตถุดังแสดงในตาราง 2.8

2.12.2 การใช้งาน

การใช้งานของยางซิลิโคนจะถูกจำกัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้อย่างชนิดอื่นๆ ได้ เพราะยางชนิดนี้มีราคาสูงมาก ส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตยางที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบินและรถยนต์ ใช้ทำฉนวนเคเบิล และใช้ในงานทางการแพทย์และเภสัชกรรมรวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร



บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 อะลูมิเนียมอินกอตบริสุทธิ์
- 3.1.2 อะลูมิเนียมผสม (Aluminium alloy) เกรด ADC12 (JIS)
- 3.1.3 โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foams) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi และ 12 ppi
- 3.1.4 เทียน (Wax)
- 3.1.5 ปูนที่ใช้ในงานหล่อยี่ห้อม Old Moon สูตร Standard
- 3.1.6 ยางธรรมชาติ
- 3.1.7 พอลิเอทิลีน
- 3.1.8 Epoxy resin
- 3.1.9 ซิลิโคน

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

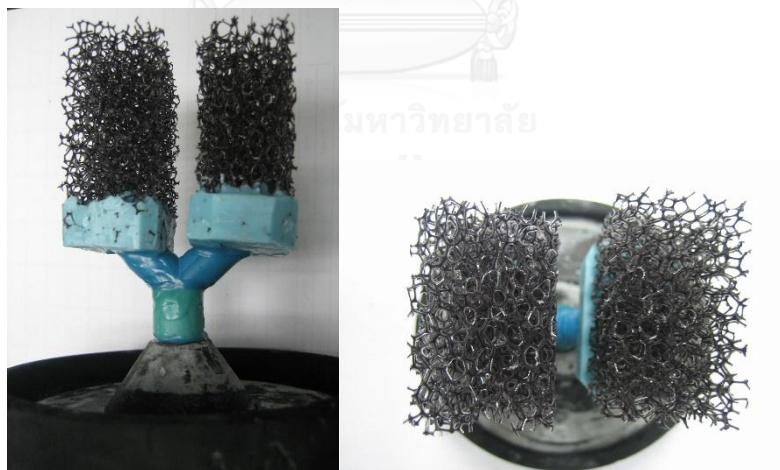
- 3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.2 หัวบัดกรี
- 3.2.3 เครื่องแปลงไฟเอนกประสงค์ (Dimmer)
- 3.2.3 ฐานยาง สำหรับขึ้นแบบต้นเทียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว
- 3.2.4 แท่นให้ความร้อน (Hotplate)
- 3.2.5 แผ่นอะลูมิเนียมบาง (Aluminium foil)
- 3.2.6 กระบอกเหล็กกล้าปลอดสนิมเจาะรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว
- 3.2.7 เครื่องผสมปูน ยี่ห้อม Old Moon รุ่น IVM 100
- 3.2.8 เครื่องหล่อสุญญากาศ ยี่ห้อม Old Moon รุ่น OMC 102
- 3.2.9 เตาอบกระบอกปูน ยี่ห้อม Old Moon รุ่น BU 450
- 3.2.10 ตู้ฉีบน้ำล้างกระบอกปูน ยี่ห้อม Old Moon รุ่น INC 100

- 3.2.11 เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Hero
- 3.2.12 เครื่องตัดชิ้นงาน (Precision cutting machine) ยี่ห้อ Struer รุ่น Accutom-5
- 3.2.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
- 3.2.14 กระดาษทราย และ ผงเพชร สำหรับขัดชิ้นงาน
- 3.2.15 เครื่องขัดชิ้นงาน
- 3.2.16 เครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัด (Universal testing machine) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น EZ-S

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมแบบเทียนสำหรับการหล่อ

นำโฟมพอลิยูรีเทนขนาด 12 ppi และ 8 ppi มาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 50 x 25 x 90 mm หลังจากนั้นหลอมเทียนบนเครื่องให้ความร้อนในแผ่นอะลูมิเนียมบางที่ทำขึ้นเป็นถาดสี่เหลี่ยม นำโฟมพอลิยูรีเทนที่ตัดไว้แล้ววางบนเทียนหลอมเหลว หลังจากเย็นตัวแล้ว ได้เป็นโฟมพอลิยูรีเทนที่มีฐานเป็นเทียน จากนั้นจึงนำส่วนนี้ไปติดเป็นต้นเทียนซึ่งมีฐานเป็นยาง โดยใช้หัวบัดกรีในการติดให้มีลักษณะคล้ายต้นไม้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3. 1 ต้นเทียนที่ใช้เป็นต้นแบบในการผลิต

3.3.2 การเตรียมอะลูมิเนียมก่อนการทำการหล่อ

ก่อนทำการหล่อต้องเตรียมอะลูมิเนียมให้พอกับการหล่อแต่ละครั้ง ในการคำนวณจะคำนวณน้ำหนักของอะลูมิเนียมที่ต้องใช้ ชั้นแรกชั่งน้ำหนักฐานยาง และวัดปริมาตรบริเวณโคนที่มี

ลักษณะเป็นกรวย หลังจากเตรียมแบบเทียนเรียบร้อยแล้ว นำมาชั่งน้ำหนัก หาน้ำหนักของส่วนที่เป็นแบบโดยนำน้ำหนักแบบเทียนทั้งหมดลบด้วยน้ำหนักฐานยาง เนื่องจากเทียนมีความหนาแน่นโดยประมาณเท่ากับน้ำซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1 g/cm^3 เพราะฉะนั้นจึงนำผลลัพธ์ส่วนนี้ไปรวมกับปริมาตรกรวยตรงโคนฐานยาง ก็จะได้เป็นปริมาตรอะลูมิเนียมที่ต้องใช้ทั้งหมด คำนวณเป็นน้ำหนักตามสมการที่ 3.1

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่น (g/cm^3)

M = มวล (g)

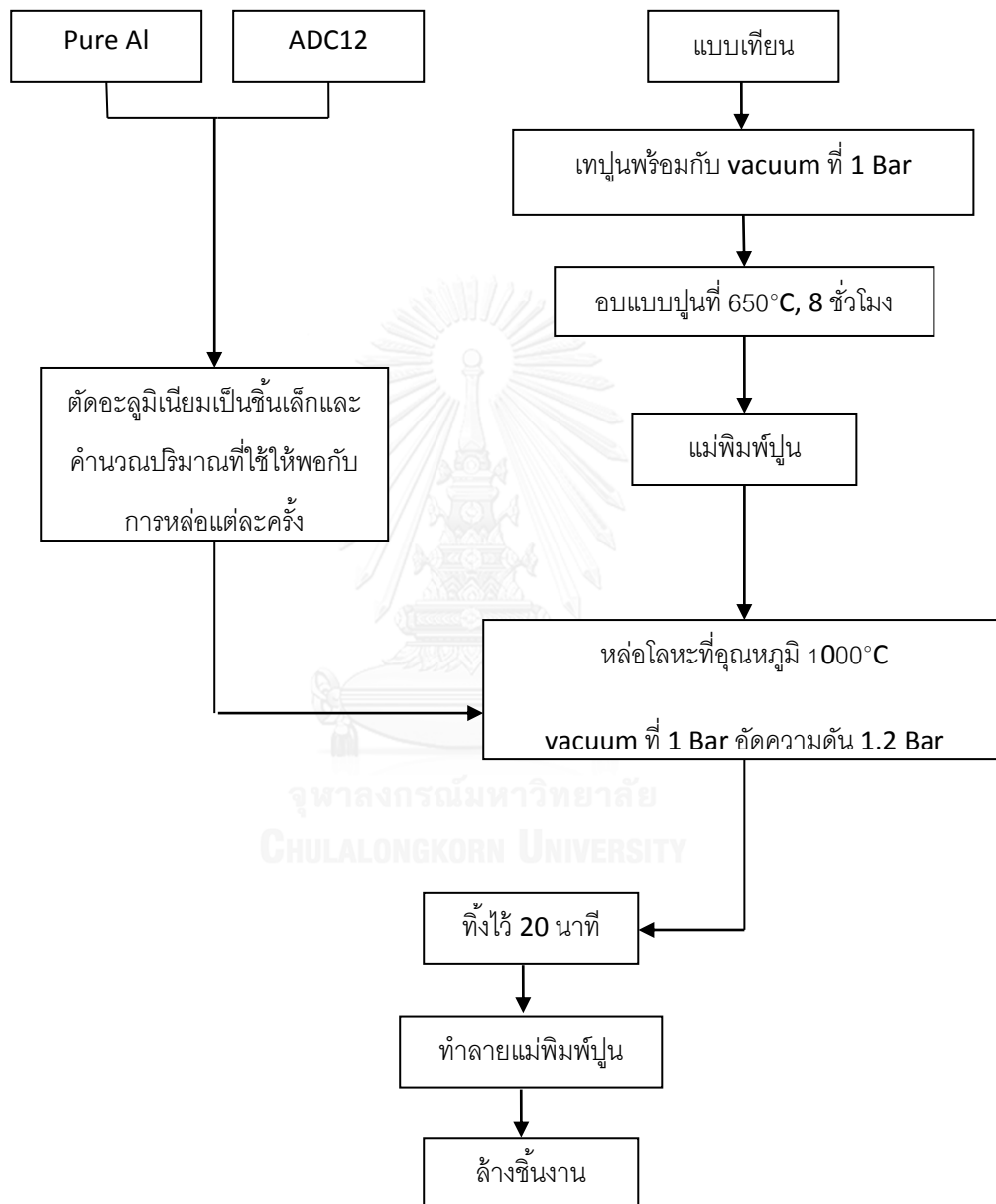
V = ปริมาตร (cm^3)

โดยที่ความหนาแน่นของอะลูมิเนียมมีค่า 2.70 g/cm^3 แต่ควรเผื่อปริมาณของอะลูมิเนียมที่จะใช้จากปริมาตรที่คำนวณได้ประมาณ 10%

3.3.3 การผลิตโฟมอะลูมิเนียม

นำแบบเทียนครอบด้วยกระบอกเหล็กกล้าปลอดสนิมเจาะรู ปิดรูด้วยเทปกาว หลังจากนั้นทำการผสมปูนปลาสเตอร์ยี่ห้อ Old Moon สูตร Standard กับน้ำในอัตราส่วน 38:100 ด้วยเครื่องผสมปูนยี่ห้อ Old Moon รุ่น IVM 100 แล้วกวนเป็นเวลา 3 นาที ซึ่งในขณะกวนมีการดูดอากาศออกเพื่อให้เกิดสภาวะสุญญากาศและทำให้เกิดความดันประมาณ 1 Bar ไปด้วย หลังจากนั้นจึงเทลงในกระบอกเหล็กกล้าปลอดสนิมที่ครอบแบบเทียนไว้แล้ว ซึ่งในกระบวนการเทปูนทั้งหมดจะทำในระบบสุญญากาศเพื่อให้เนื้อปูนเข้าไปเต็มเต็มในรูของโฟมพอลิยูรีเทน หลังจากนั้นทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ปูนแข็งตัว จากนั้นจึงนำแบบปูนไปวางในเตาอบกระบอกปูนยี่ห้อ Old Moon รุ่น BU 450 ซึ่งเปิดทิ้งไว้ก่อนแล้วจนภายในเตามีอุณหภูมิเป็น 650°C อบแบบปูนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำแม่พิมพ์ปูนที่อบแล้วเข้าเครื่องหล่อสุญญากาศยี่ห้อ Old Moon รุ่น OMC 102 นำอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้ใส่ในเครื่อง หลังจากนั้นจึงทำการหล่อโดยลำดับการทำงานของเครื่องเป็นดังแสดงไว้ในภาพที่ 3.2 เริ่มแรกเครื่องจะทำการดูดอากาศออกเพื่อให้เกิดสภาวะสุญญากาศและทำให้เกิดแรงดันประมาณ 1 Bar เป็นเวลา 20 วินาที ต่อจากนั้นทำการหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 1000°C เมื่ออะลูมิเนียมหลอมหมดและมีอุณหภูมิเป็น 1000°C แล้ว เครื่องจะทำการเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมลงไปในแบบปูน โดยจะเทลงมาก่อน 2.5 วินาที แล้วจึงทำการอัดแรงดันเพื่อไม่ให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดการกระจาย ไม่ลงแบบ

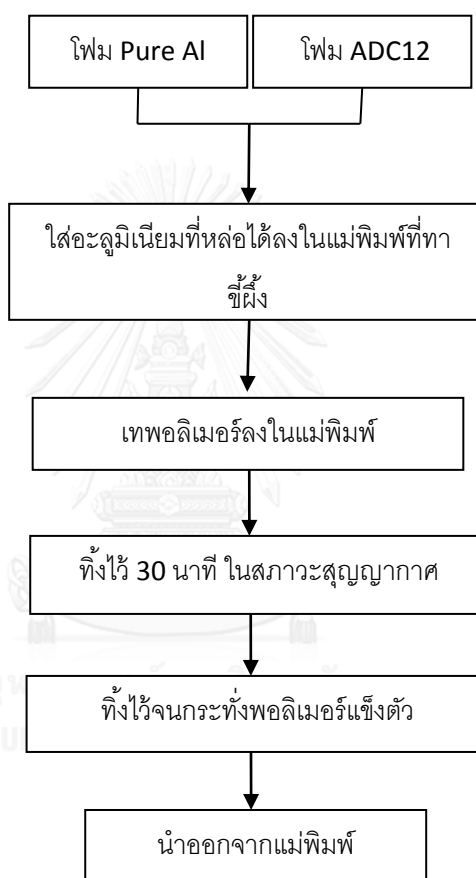
การอัดแรงดันจะทำที่ 1.2 Bar โดยจะทำไปพร้อมๆกับการดูดอากาศ ซึ่งจะใช้เวลา 5 นาที จึงนำแบบปูนที่ทำการหล่อแล้วออกจากเครื่อง ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงทำลายแบบปูนด้วยการแช่น้ำ หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกมาล้างเศษปูนออก เป่าให้แห้ง ดังรูป 3.2



รูปที่ 3. 2 ขั้นตอนการผลิตโฟมอะลูมิเนียม

3.3.4 การผลิตวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีอะลูมิเนียมและพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

นำโพลีอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโครงอากาศแบบเปิด ใส่ในแม่พิมพ์ที่ทาด้วยซีฟิ้งเพื่อป้องกันไม่ให้ติดผนังแม่พิมพ์และสามารถแกะออกได้ง่าย หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์เทลงไปในแม่พิมพ์ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ คือ ยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และ พอลิเอทิลีน โดยทำในสภาวะสุญญากาศเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้พอลิเมอร์สามารถไหลเข้าไปในโครงสร้างโครงอากาศได้ทั้งหมด หลังจากนั้นทิ้งไว้จนกระทั่งพอลิเมอร์แข็งตัวแล้วจึงแกะออกจากแม่พิมพ์ ดังรูป 3.3



รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนการผลิตโพลีอะลูมิเนียมวัสดุผสม IPCs พอลิเมอร์

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของโพลีอะลูมิเนียม

3.4.1 การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานจะเตรียมไว้ 2 แบบคือ แบบแรกทำการตัดโพลีอะลูมิเนียมขนาด $1 \times 1 \times 1$ cm ด้วยเครื่อง Precision cutting machine ส่วนอีกแบบหนึ่งทำเช่นเดียวกันกับแบบแรก นำชิ้นงานที่ตัดแล้วไปทำการขึ้นรูปตัวเรือนแบบร้อน โดยใช้ Epoxy resin หลังจากนั้นนำไปทำการขัด

หยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 200, 400, 600, 800, 1200 และขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6, 3, และ 1 μm .

3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปตัวเรือนมาตรวจสอบโครงสร้างของโพลีเอทิลีน โดยทำการตรวจสอบบริเวณโครงข่ายของเนื้อพอลิเอทิลีน, บริเวณขอบมุม และจุดเชื่อมต่อของโครงข่ายโพลีเอทิลีนแต่ละเส้น และตรวจสอบการยึดติดกันของเนื้อโพลีเอทิลีนและพอลิเมอร์

3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดขนาด $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}$ และชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปตัวเรือนและทำการขัดแล้ว มาตรวจสอบด้วย SEM โดยที่การตรวจสอบจะเริ่มจากการตรวจสอบโครงสร้างโดยทั่วไปจากกำลังขยายต่ำไปสูง เพื่อตรวจสอบบริเวณที่เป็นโครงข่ายของเนื้อพอลิเอทิลีน, บริเวณขอบมุม และจุดเชื่อมต่อของโครงข่ายโพลีเอทิลีนแต่ละเส้น

3.5 การทดสอบสมบัติการรับแรงอัดของโพลีเอทิลีน

นำโพลีเอทิลีนที่ได้ ตัดด้วยเครื่อง Precision cutting machine ให้มีขนาด $25 \times 30 \times 30 \text{ mm}$ นำไปทดสอบการรับแรงอัด โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min เมื่อได้กราฟความเค้นความเครียดจากผลการทดสอบแรงอัด ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปหาค่าสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนได้ดังนี้

3.5.1 ความแข็งแรงจุดคราก

สามารถหาค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ได้โดยลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกที่เป็นเส้นตรง ให้ตัดแกนที่ 0.2% ของค่าความเครียด ซึ่งจุดที่เส้นขนานตัดกับกราฟความเค้นความเครียดคือความแข็งแรงจุดคราก มีหน่วยเป็น MPa

3.5.2 ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน

สามารถหาค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption, E) ได้โดยหาพื้นที่ใต้กราฟความเค้นความเครียดตั้งแต่ค่าความเครียดที่ศูนย์จนถึงค่าความเครียด ณ ช่วงการอัดแน่นดังภาพที่ 2.18 โดยคำนวณจากสมการที่ 3.2 โดยที่ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานมีหน่วยเป็น kJ/m^3

$$E = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \quad (3.2)$$

โดยที่ σ = ความเค้น (MPa)

ε = ความเครียด

ทำการอินทิเกรตจาก 0 ถึงค่า ε_D (Densification Strain) ซึ่งค่า ε_D หาได้จากสมการที่ 2.4

3.6 วิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของตัวเสริมแรงต่อการผลิต โครงสร้าง และสมบัติทางกล โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีน และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่นำมาใช้ผลิตวัสดุผสม IPCs



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 คุณลักษณะของอะลูมิเนียม

4.4.1 คุณลักษณะของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีปริมาณของ Al 99.95 wt.% มีความเหนียวสูง และมีความหนืดต่ำขณะหลอมเหลว มีจุดหลอมเหลวประมาณ 660°C และมีความหนาแน่น 2.69 g/cm³

4.4.2 คุณลักษณะของอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12

ADC12 เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่ใช้กันทั่วไปในการหล่อชิ้นงานในแม่พิมพ์โลหะ (Die casting) ตามมาตรฐานของญี่ปุ่นจะมีปริมาณซิลิคอน (Si) ผสมอยู่ในปริมาณ 12 wt.% ใกล้จุดยูเทคติก และมีธาตุผสมหลักอื่นๆ เช่น Cu, Mg, Zn, Fe, Mn, Ni, Ti, Pb, Sn และ Cr ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 อะลูมิเนียมชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวไม่เกิน 650°C และมีความหนืดต่ำขณะหลอมเหลว มีความหนาแน่น 2.65 g/cm³ มีความสามารถในการไหลสูงและมีสมบัติทางกลดี เช่น มีความแข็งแรงจุดครากสูง มีความแข็งแรงสูง ซึ่งเป็นผลมาจากการมีธาตุผสมซิลิคอนในปริมาณมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ตารางที่ 4. 1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12


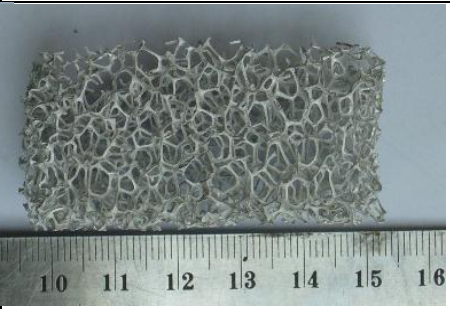


Alloy	wt. %										
	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr
ADC12	12	0.015	0.015	0.015	0.2	0.015	0.02	0.01	0.015	0.015	0.02

4.2 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียมและ วัสดุผสม IPCs

4.2.1 โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม









โครงสร้างมหภาคของโฟมอะลูมิเนียม และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 แสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าโฟมทั้งสองชนิดมีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi ตามลำดับ มีโครงสร้างโลหะที่เชื่อมต่อกันอย่างดี สามารถหล่อได้เต็มแบบในแม่พิมพ์ ไม่มีรอยฉีกขาดระหว่างก้านโพรงอากาศ แต่ขนาดของก้านโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 8 ppi มีความหนาของก้านโพรงอากาศน้อยกว่าโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 12 ppi ทั้งโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12

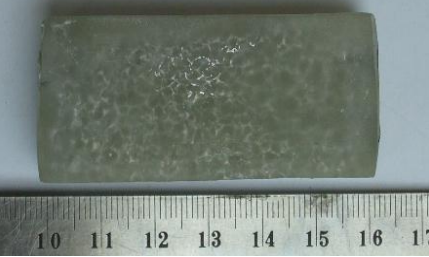







ตารางที่ 4. 2 แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

ขนาดโพรง ชนิดวัสดุ	12 ppi	8 ppi
โฟมอะลูมิเนียม บริสุทธิ์		
โฟมอะลูมิเนียม เกรด ADC12		

4.2.2 โครงสร้างมหภาคของวัสดุผสม IPCs

ตารางที่ 4. 3 แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานผสม IPCs

ขนาดโพรง ชนิดวัสดุ	12 ppi	8 ppi
IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และยางธรรมชาติ		
IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียมเกรด ADC 12 และ ยางธรรมชาติ		
IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และซิลิโคน		
IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียมเกรด ADC 12 และ ซิลิโคน		

ขนาดโครง ชนิดวัสดุ	12 ppi	8 ppi
IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และ Epoxy resin		
IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียมเกรด ADC 12 และ Epoxy resin		
IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และพอลิเอทิลีน		
IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียมเกรด ADC 12 และ พอลิเอทิลีน		

ตารางที่ 4.3 แสดงโครงสร้างมหภาคของวัสดุผสม IPCs กับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ ยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ สามารถเติมเต็มโพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ทั้งสองขนาดอย่างสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคพบว่า วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดที่เติมเต็มโพรงอากาศด้วยยางธรรมชาติมีสีเหลือง และพบรอยฉีกขาดเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างก้านโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมและยางธรรมชาติ อีกทั้งยังมีพื้นผิวเรียบ แต่สามารถตัดให้ขาดจากกันได้ยาก

เนื่องจากความเหนียวของยางธรรมชาติ วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดที่เติมเต็มด้วยซิลิโคนมีสีขาว มีผิวขรุขระเล็กน้อย มีความยืดหยุ่น แต่มีความเหนียวน้อยกว่ายางธรรมชาติ สามารถตัดให้ขาดจากกันได้ง่าย และพบรอยฉีกขาดบางส่วนบริเวณรอยต่อระหว่างก้านโครงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมและซิลิโคน

วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดที่เติมเต็มโครงอากาศด้วย Epoxy resin มีผิวใสสามารถมองเห็นโฟมอะลูมิเนียมภายในได้ ผิวมีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่พบรอยฉีกขาดที่พื้นผิว เช่นเดียวกับวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมทั้งสองชนิดที่เติมเต็มโครงอากาศด้วยพอลิเอทิลีนซึ่งมีสีขาวขุ่น ผิวเรียบ ไม่มีรอยฉีกขาด

4.3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม IPCs

ตารางที่ 4. 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของชิ้นงานผสม IPCs

กำลังขยาย ชนิดวัสดุ	X 150	X 600	X 1000
รอยต่อของ IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียม และ ยางธรรมชาติ			
รอยต่อของ IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียม และ ซิลิโคน			
รอยต่อของ IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียม และ Epoxy resin			
รอยต่อของ IPCs ที่ใช้โฟม อะลูมิเนียม และ พอลิเอทิลีน			

ตารางที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้อย่างธรรมดา, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนเป็นวัสดุเติมเต็มโพรงอากาศ จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 150, 600 และ 1000 เท่าตามลำดับ พบว่า วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับยางธรรมดา มีรอยแยกบางบริเวณระหว่างผิวสัมผัสของก้านโฟมอะลูมิเนียมและเนื้อยางธรรมดา ส่งผลให้การยึดเกาะกันไม่ดี เช่นเดียวกับวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับซิลิโคน ซึ่งมีรอยแยกระหว่างผิวสัมผัสของก้านโฟมอะลูมิเนียมและซิลิโคน ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับ Epoxy resin บริเวณรอยต่อระหว่างก้านโฟมอะลูมิเนียมและ Epoxy resin ไม่มีรอยแยกที่สามารถเห็นได้จากรูป ส่งผลให้มีการยึดเกาะกันดีระหว่างผิวสัมผัสของโฟมอะลูมิเนียมกับ Epoxy resin เช่นเดียวกับวัสดุผสม IPCs ที่ใช้พอลิเอทิลีนที่มีการยึดเกาะกันดีระหว่างผิวสัมผัสของโฟมอะลูมิเนียม และพอลิเอทิลีน ไม่พบรอยแยกบริเวณรอยต่อ

4.4 สมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม

4.4.1 การทดสอบการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi ใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min

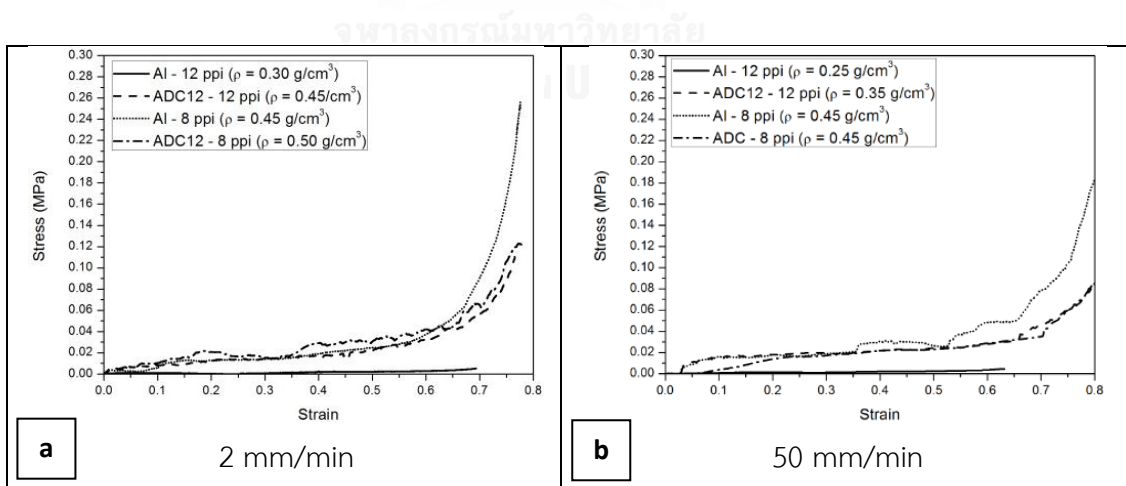
พฤติกรรมการรับแรงอัดในอุดมคติของโฟมอะลูมิเนียมแสดงในรูปที่ 2.15 โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปภายใต้แรงอัด 3 ขั้นตอนคือ การเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear elastic deformation) บริเวณที่ราบ (Plateau stress) และช่วงการอัดแน่น (Densification) ซึ่งในช่วงแรกเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง เมื่อให้แรงเกินจุดคราก โฟมโลหะจะเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงในช่วงบริเวณที่ราบคือช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดภายใต้ความเค้นคงที่ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของโฟมโลหะจึงเหมาะกับการใช้งานประเภทการดูดซับพลังงาน เมื่อโพรงอากาศในโฟมโลหะจนพังตัวจนหมด ก็จะเข้าสู่ช่วงอัดแน่น ซึ่งเป็นช่วงความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยโพรงอากาศจะเริ่มพังจากโพรงอากาศช่วงบนของชิ้นงานและพังลงมาเรื่อยๆ จนหมด

รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบแรงอัดในรูปของกราฟความเค้นความเครียดเปรียบเทียบกันระหว่างโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min ในรูปที่ 4.1a เมื่ออัตราเร็วในการอัดที่ 2 mm/min พบว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi มีค่าความเค้นสูงสุด สามารถรับแรงได้ถึง 75% ความเครียด และโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีค่าความเค้น

ต่ำที่สุด ส่วนโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi มีค่าความเค้นใกล้เคียงกัน เมื่อใช้อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min ความสามารถในการรับแรงอัดแสดงในรูป 4.1b พบว่าโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาด 8 ppi มีค่าความเค้นสูงสุดและอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีค่าความเค้นต่ำสุด ส่วนอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีความเค้นใกล้เคียงกัน

รูป 4.1a และ 4.1b แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi ที่ใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 5 mm/min พบว่าโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi มีความสามารถในการรับความเค้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะทางที่ได้รับความเค้นและเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย ส่วนโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีกราฟความเค้นความเครียดที่ใกล้เคียงกับกราฟของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi แต่มีแนวโน้มในการรับความเค้นเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายเพียงเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi ที่ใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min พบว่าโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi และ 12 ppi มีกราฟที่ไม่สม่ำเสมอ และมีแนวโน้มในการรับความเค้นได้สูงขึ้นตามระยะทางที่ได้รับความเค้นและเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย

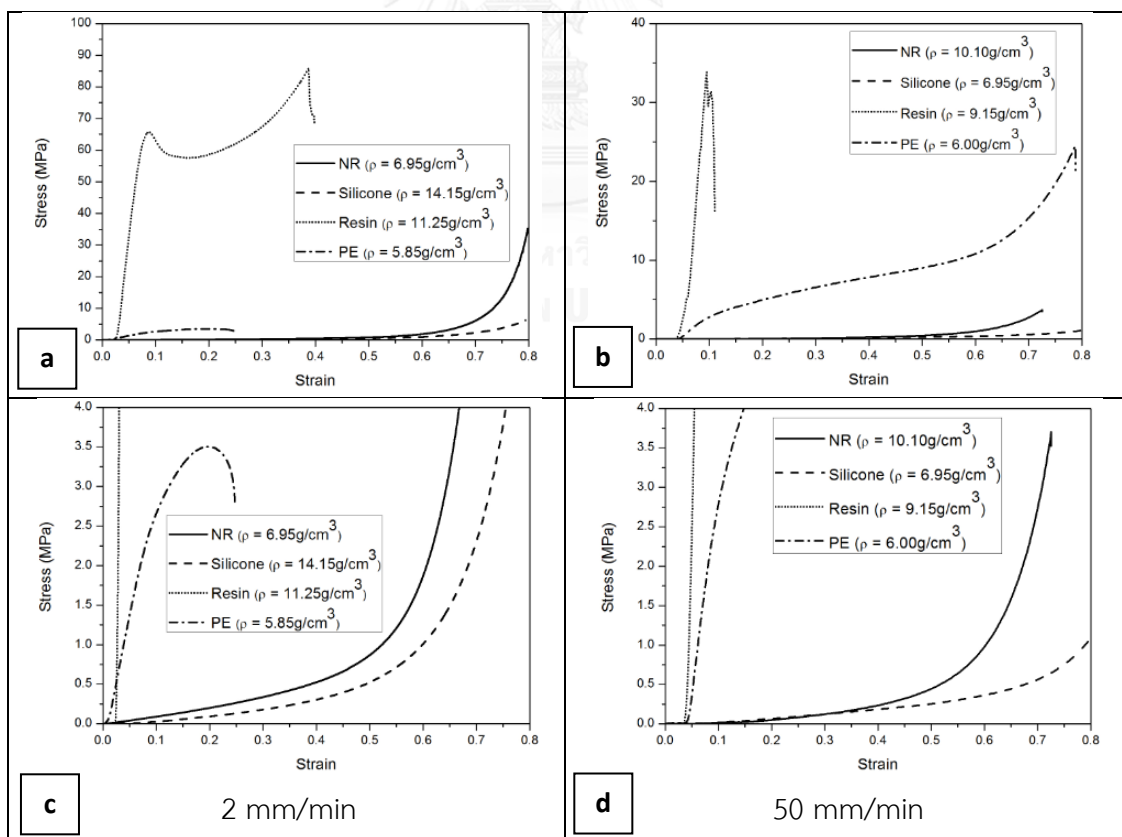


รูปที่ 4. 1 กราฟความเค้น ความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi ใช้อัตราเร็วในการอัด a.) 2 mm/min และ b.) 50 mm/min

4.5 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์

4.5.1 การทดสอบการรับแรงอัดของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min

ในรูป 4.2a และ 4.2c แสดงผลการทดสอบแรงอัดในรูปของกราฟความเค้น และความเครียด พฤติกรรมการรับแรงอัดของพอลิเมอร์ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min โดยรูป 4.2c เป็นรูปขยายจากรูป 4.2a พบว่า Epoxy Resin สามารถรับความเค้นได้สูงที่สุด กราฟมีความสม่ำเสมอ อีกทั้งยังสามารถรับแรงอัดได้สองช่วง โดยสามารถรับความเค้นได้สูงตั้งแต่ช่วงแรกอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งแตกหักในช่วง 40% ของความเครียด ส่วนกราฟของพอลิเอทิลีนมีความสม่ำเสมอ สามารถรับความเค้นได้สูงในช่วงแรก แต่สามารถรับความเค้นได้เพียง 20% ของความเครียด ส่วนกราฟของยางธรรมชาติและซิลิโคนมีลักษณะคล้ายกัน สามารถรับความเค้นในช่วงแรกได้เพียงเล็กน้อย และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย ซึ่งสามารถรับความเค้นได้ถึง 80% ของความเครียด



รูปที่ 4. 2 กราฟความเค้นความเครียดของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้อัตราเร็วในการอัด a.) และ c.) 2 mm/min และ b.) และ d.) 50 mm/min

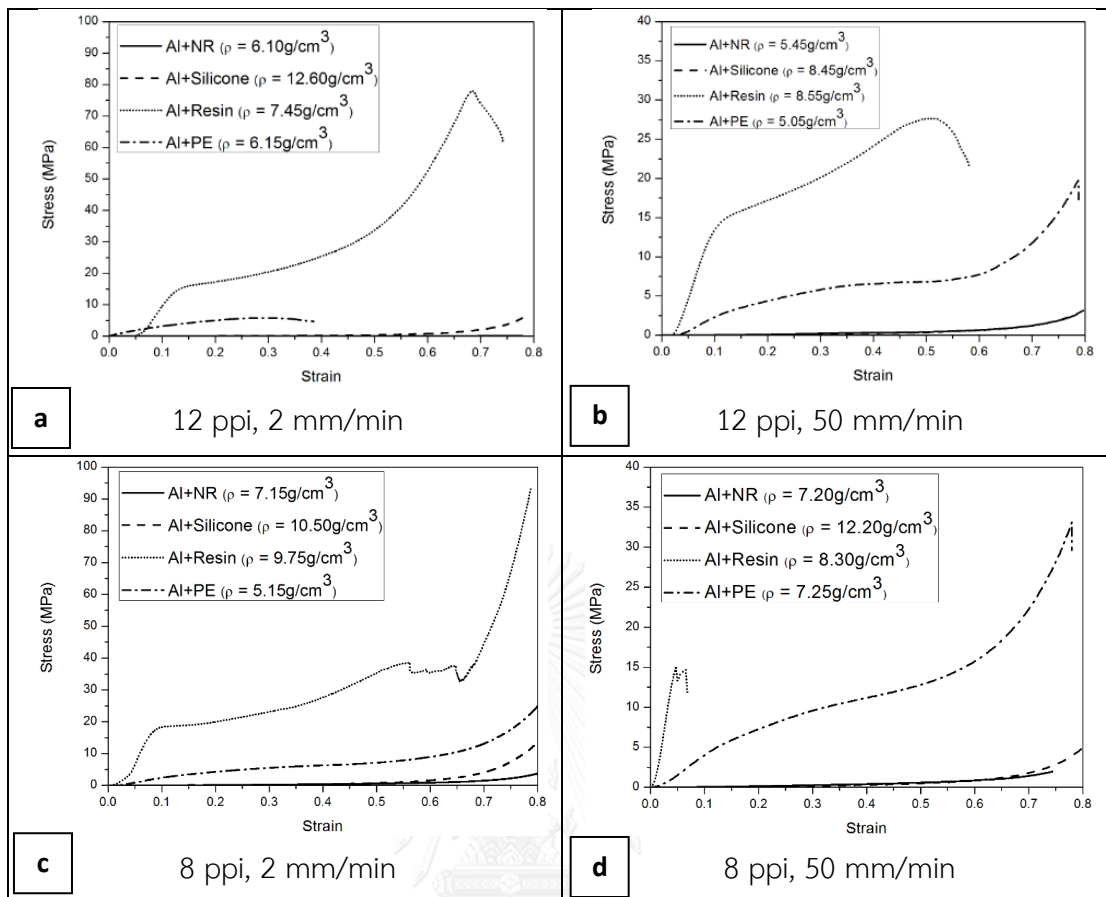
ในรูป 4.2b และ 4.2d แสดงพฤติกรรมการรับความเค้นของพอลิเมอร์ที่ใช้ความเร็วในการอัด 50 mm/min โดยรูป 4.2c เป็นรูปขยายจากรูป 4.2a พบว่า Epoxy Resin สามารถรับความเค้นได้สูงที่สุด กราฟมีความสม่ำเสมอ อีกทั้งยังสามารถรับความเค้นได้สองช่วง โดยสามารถรับความเค้นได้สูงตั้งแต่ช่วงแรกอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการแตกหักในช่วง 15% ของความเครียด ส่วนกราฟของพอลิเอทิลีนกราฟมีความสม่ำเสมอ สามารถรับความเค้นได้ในช่วงแรก มีแนวโน้มการรับความเค้นเพิ่มสูงขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย ซึ่งสามารถรับความเค้นได้ถึง 80% ของความเครียด เช่นเดียวกับกราฟของยางธรรมชาติและกราฟของซิลิโคนที่กราฟมีลักษณะคล้ายกัน คือมีความสม่ำเสมอ สามารถรับความเค้นในช่วงแรกได้เพียงเล็กน้อย และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย

4.6 สมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs

การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ระหว่างโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min

4.6.1 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ระหว่างโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนโดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min

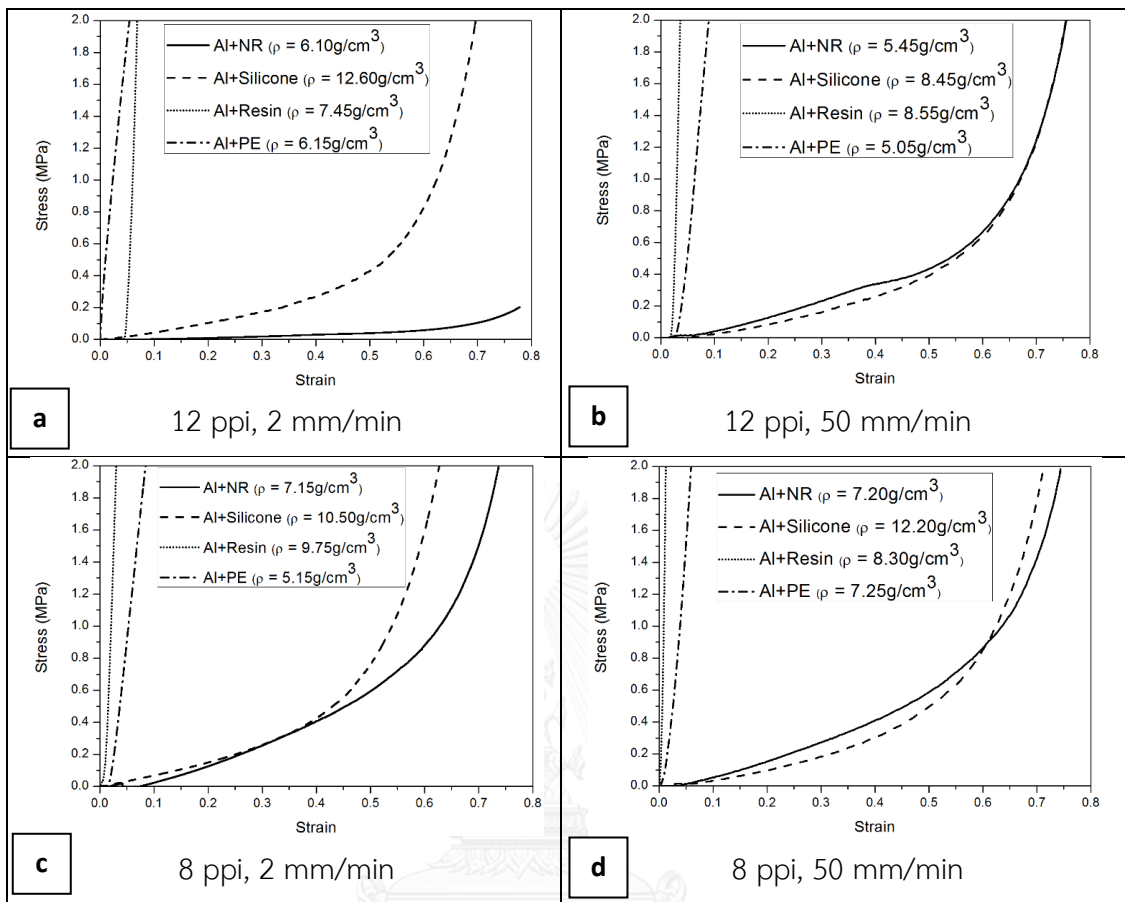
รูป 4.3 และ 4.4 แสดงการทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน รูปที่ 4.3a. และ 4.4a. แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ Epoxy resin สามารถรับความเค้นได้สูงที่สุดประมาณ 80 MPa โดยกราฟจะแสดงความสามารถในการรับแรงอัดสองช่วง วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และยางธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงต่ำที่สุด ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และพอลิเอทิลีน สามารถรับความเค้นได้เพียง 40% ของความเครียด



รูปที่ 4. 3 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน a.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min, b.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min, c.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ d.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min

รูปที่ 4.3b และ 4.4b. แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ Epoxy resin มีความสามารถในการรับความเค้นสูง 38 MPa ส่วนโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับยางธรรมชาติ และซิลิโคน มีความสามารถในการรับแรงต่ำสุดใกล้เคียงกัน

รูปที่ 4.3c และ 4.4c. แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ Epoxy resin สามารถรับความเค้นได้สูงสุดประมาณ 95 MPa วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับยางธรรมชาติมีความสามารถในการรับความเค้นต่ำสุด



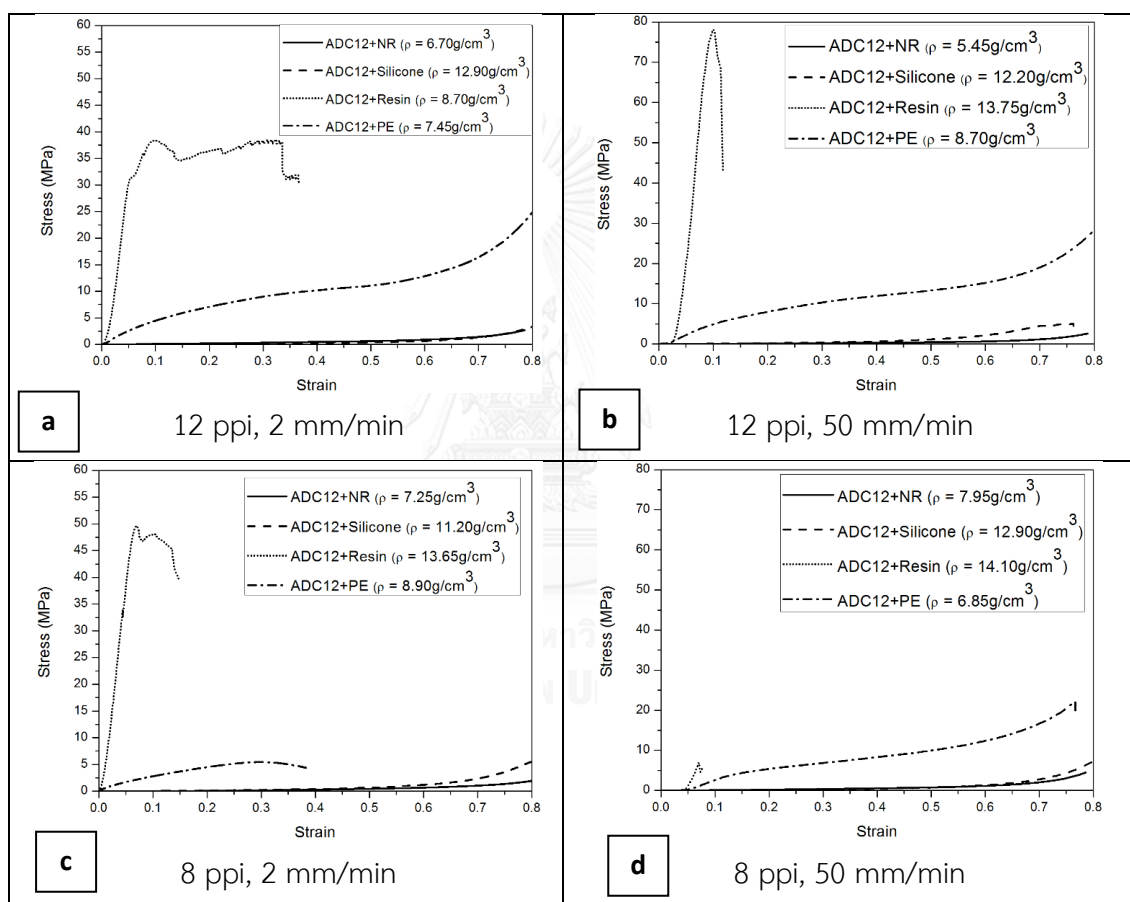
รูปที่ 4. 4 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนโดยขยายมาจากรูป 4.3 a.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min, b.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min, c.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ d.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min

รูปที่ 4.3d และ 4.4d. แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ Epoxy resin สามารถรับความเค้นได้สูงที่สุดประมาณ 15 MPa แต่รับความเค้นได้เพียง 8% ของความเครียด วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับยางธรรมชาติ และซิลิโคน มีความสามารถในการรับความเค้นต่ำที่สุดที่ใกล้เคียงกัน

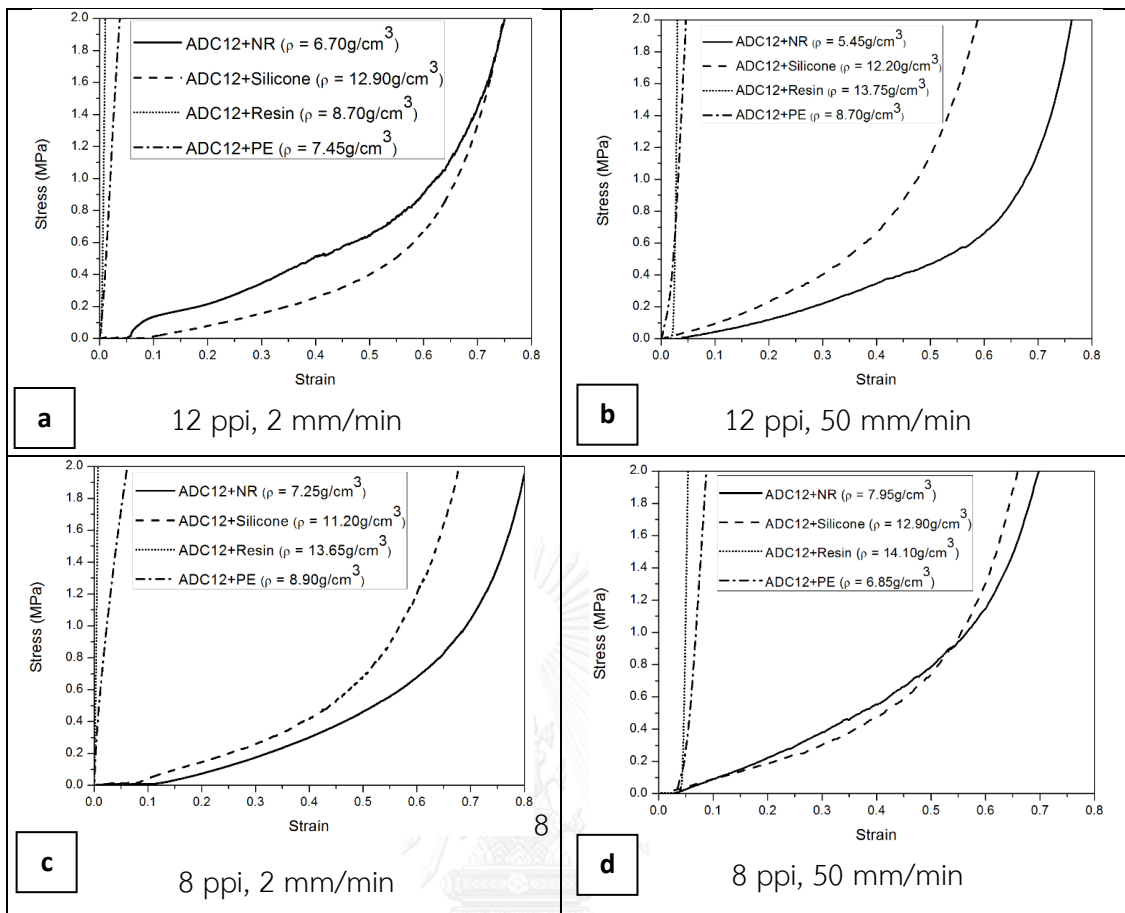
เมื่อพิจารณารูป 4.3 และ 4.4 พบว่าพฤติกรรมของกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนมีแนวโน้ม

ของกราฟความเค้นความเครียดคล้ายกับแนวโน้มของกราฟความเค้นความเครียดของพอลิเมอร์ที่ใช้
 ดังแสดงในรูป 4.2

4.6.2 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด
 ADC12 กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8
 ppi โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min



รูปที่ 4. 5 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับ
 ยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน a.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วใน
 การอัด 2 mm/min, b.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min, c.) ขนาด
 โพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ d.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วใน
 การอัด 50 mm/min



รูปที่ 4. 6 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนโดยขยายมาจากรูป 4.5 a.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min, b.) ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min, c.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ d.) ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min

รูป 4.5 และ 4.6 แสดงกราฟความเค้นความเครียดจากการทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีน จากรูปที่ 4.5a. และ 4.6a โพลีเอทิลีนขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 และ Epoxy resin สามารถรับความเค้นได้สูงประมาณ 38 MPa แต่สามารถรับความเค้นได้เพียง 40% ของความเครียดวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติ และซิลิโคนมีความสามารถในการรับความเค้นต่ำสุดใกล้เคียงกัน

รูปที่ 4.5b และ 4.6b แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 12 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับ Epoxy resin มีค่าความสามารถในการรับความเค้นสูงสุด 80 MPa แต่สามารถรับความเค้นได้เพียง 12% ของความเครียด ส่วนโฟมอะลูมิเนียมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติมีค่าความสามารถในการรับความเค้นต่ำสุด

รูปที่ 4.5c. และ 4.6c แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 และ Epoxy resin สามารถรับความเค้นได้สูงที่สุดประมาณ 50 MPa แต่รับแรงได้เพียง 15% ของความเครียด ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 และพอลิเอทิลีน สามารถรับความเค้นได้เพียง 40% ของความเครียด วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติมีความสามารถในการรับความเค้นต่ำสุด

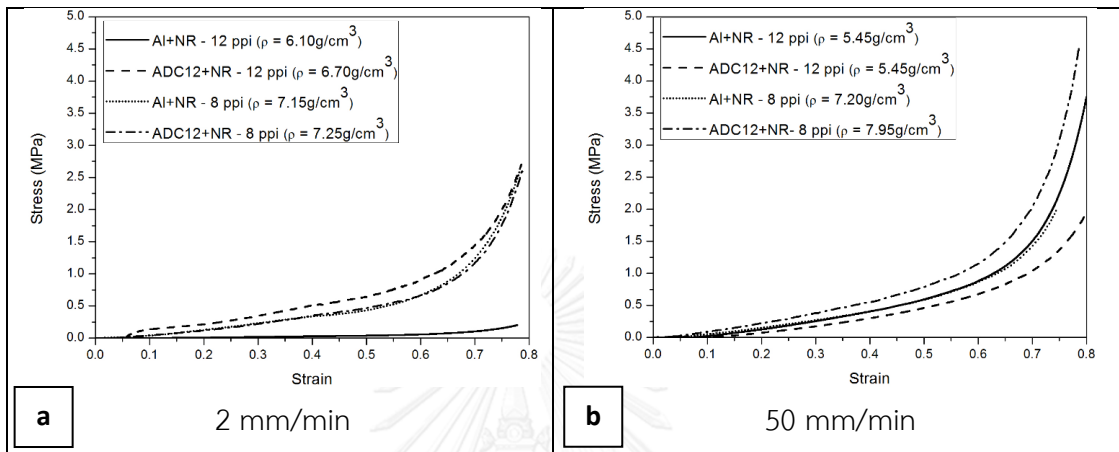
รูปที่ 4.5d. และ 4.6d แสดงกราฟความเค้นความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมขนาดโพรงอากาศ 8 ppi อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับพอลิเอทิลีน สามารถรับความเค้นได้สูงที่สุดประมาณ 23 MPa วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติมีความสามารถในการรับความเค้นต่ำสุด ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 และ Epoxy resin สามารถรับความเค้นได้สูงที่สุดประมาณ 8 MPa แต่รับความเค้นได้เพียง 8% ของความเครียด

เมื่อพิจารณารูป 4.5 และ 4.6 พบว่าพฤติกรรมกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมเกรด ADC12 กับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนมีแนวโน้มของกราฟความเค้นความเครียดคล้ายกับกราฟความเค้นความเครียดของพอลิเมอร์ที่ใช้ ดังแสดงในรูป 4.2

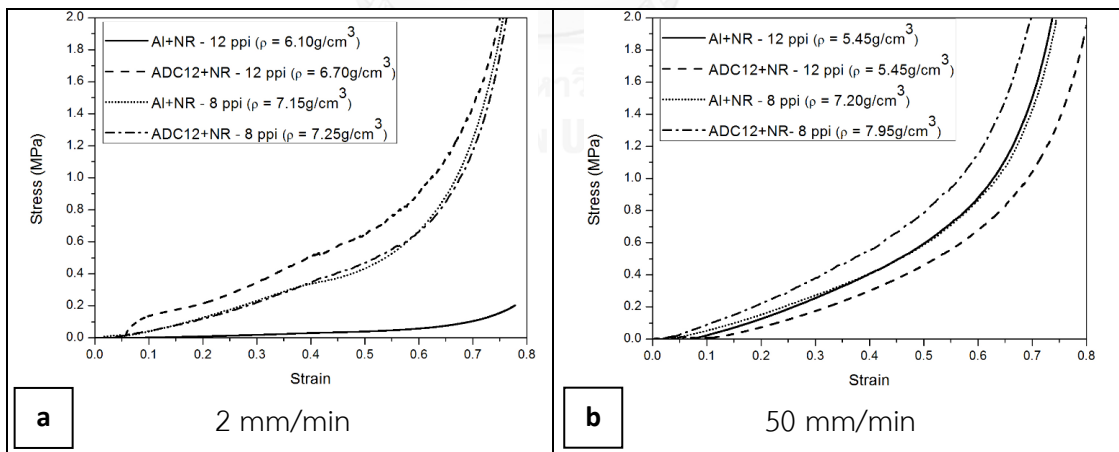
4.6.3 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาด 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min

รูป 4.7a และ 4.8a แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาด 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min วัสดุผสม IPCs สามารถรับความเค้นได้ถึง 80% ของความเครียด เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ แต่ความเค้นในช่วงท้ายมีค่าลดลง โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ยางธรรมชาติเป็น

วัสดุเติมเต็มโพรงอากาศที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi จะมีความสามารถในการรับความเค้นสูงสุดประมาณ 2.5 MPa และวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุเติมเต็มโพรงอากาศที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi จะสามารถรับความเค้นได้ต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 1 MPa



รูปที่ 4. 7 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min

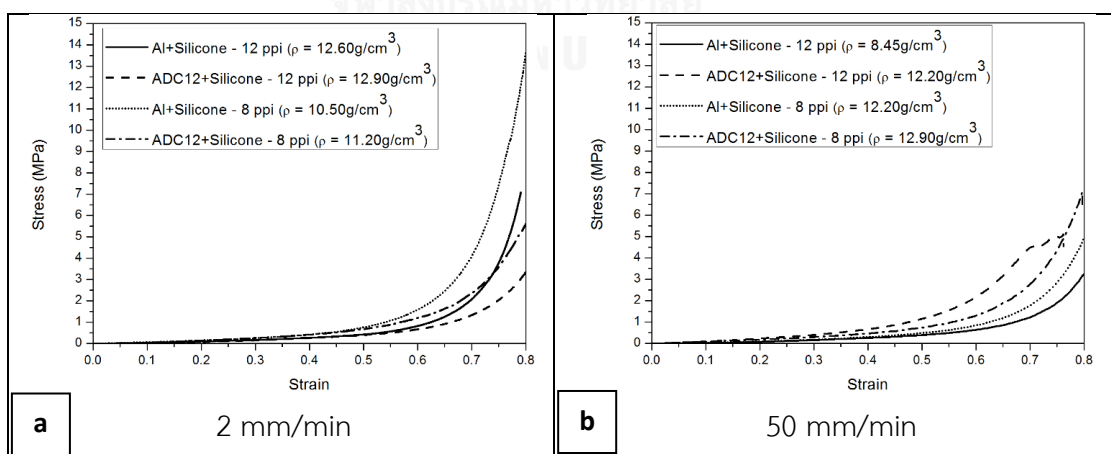


รูปที่ 4. 8 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติโดยขยายมาจากรูป 4.7 a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min

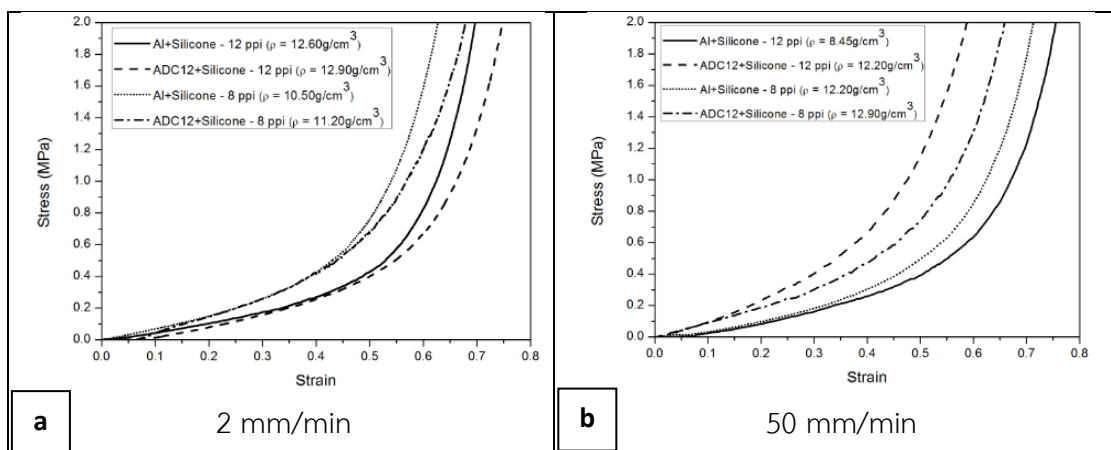
รูป 4.7b และ 4.8b แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาด 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อใช้อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min วัสดุผสม IPCs สามารถรับความเค้นได้ถึง 80% ของความเครียด ซึ่งสูงกว่ายางธรรมชาติที่รับความเค้นได้เพียง 75% ของความเครียด อีกทั้งยังสามารถรับความเค้นในช่วงแรกที่สูงกว่ายางธรรมชาติ โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุเติมเต็มโพรงอากาศที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi จะสามารถรับความเค้นได้ สูงสุดประมาณ 4.6 MPa ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi มีค่าความสามารถในการรับความเค้นที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณารูป 4.7 และ 4.8 พบว่าพฤติกรรมของกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min มีลักษณะคล้ายกราฟความเค้นความเครียดของยางธรรมชาติในรูป 4.2 โดยกราฟมีความสม่ำเสมอ สามารถรับความเค้นได้ต่ำในช่วงแรก แต่ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย

4.6.4 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคน โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min แสดงในรูป 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4. 9 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคน a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min



รูปที่ 4. 10 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคนโดยขยายจากรูป 4.9 a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min

รูปที่ 4.9a และ 4.10a แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs เมื่อใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคน อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs สามารถรับความเค้นได้สูงขึ้นตั้งแต่ช่วง 70% ขึ้นไปของความเครียด และเกิดการเสียหายของชิ้นงานที่ 75% ของความเครียด เช่นเดียวกับซิลิโคนแต่สามารถรับความเค้นได้สูงกว่า โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi กับซิลิโคน สามารถรับความเค้นได้สูงสุด และวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi กับซิลิโคน สามารถรับความเค้นได้ต่ำที่สุด

รูป 4.9b และ 4.10b แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs เมื่อใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคน พบว่าเมื่อใช้อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min วัสดุผสม IPCs สามารถรับความเค้นได้สูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วง 60% ของความเครียดขึ้นไป โดย IPCs ที่มีซิลิโคนเป็นวัสดุเติมเต็มโพรงอากาศที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi จะมีความสามารถในการรับความเค้นความเค้นสูงสุด และวัสดุผสม IPCs ที่มีซิลิโคนเป็นวัสดุเติมเต็มโพรงอากาศที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi สามารถรับความเค้นได้ต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาจากรูป 4.9 และ 4.10 พบว่าพฤติกรรมของกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ระหว่างโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคน โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min มีลักษณะ

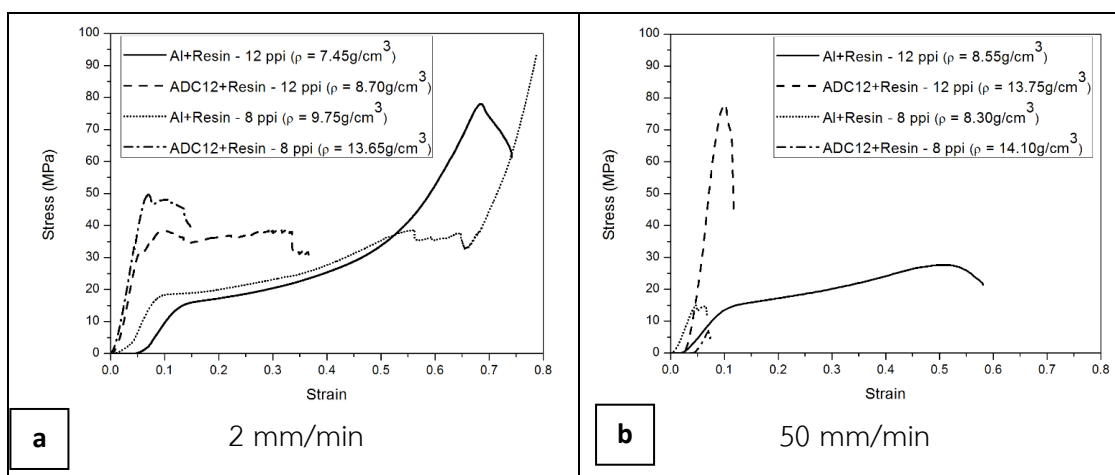
คล้ายกราฟความเค้นความเครียดของซิลิโคนในรูป 4.2 โดยกราฟมีความสม่ำเสมอ สามารถรับความเค้นได้ต่ำในช่วงแรก แต่ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย

4.6.5 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A ออลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาด 12 ppi และ 8 ppi กับ Epoxy resin โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min

รูปที่ 4.11a แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A ออลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับ Epoxy resin เมื่อใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min วัสดุผสม IPCs ที่มีเนื้อพื้นเป็นโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A สามารถรับความเค้นได้ถึง 75% ของความเครียดซึ่งสูงกว่า Epoxy resin แต่มีความสามารถในการรับความเค้นที่ต่ำลง ซึ่งขนาดโพรงอากาศ 8 ppi สามารถรับความเค้นได้ต่ำกว่าขนาดโพรงอากาศ 12 ppi ส่วน วัสดุผสม IPCs ที่ใช้ Epoxy resin เป็นวัสดุเติมเต็มโพรงอากาศที่มีเนื้อพื้นเป็นโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A เกรด ADC12 ขนาด 12 ppi สามารถรับความเค้นได้เพียง 40% ของความเครียด เช่นเดียวกับขนาด 8 ppi ที่สามารถรับความเค้นได้เพียง 15% ของความเครียด แต่สามารถรับความเค้นได้สูงสุดและสูงกว่า วัสดุผสม IPCs ที่มีเนื้อพื้นเป็นโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A

รูปที่ 4.11b แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A ออลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับ Epoxy resin เมื่อใช้อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่มีเนื้อพื้นเป็นโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A สามารถรับความเค้นได้ถึง 60% ของความเครียดซึ่งสูงสุด ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ Epoxy resin เป็นวัสดุเติมเต็มโพรงอากาศที่มีเนื้อพื้นเป็นโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A เกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi สามารถรับความเค้นได้เพียง 13% ของความเครียดแต่มีความสามารถในการรับความเค้นสูงสุดในช่วง 10% ของความเครียดประมาณ 78 MPa และวัสดุผสม IPCs มีขนาดโพรงอากาศ 8 ppi ที่มีเนื้อพื้นเป็นโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A ออลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 สามารถรับความเค้นได้เพียง 8% ของความเครียด

เมื่อพิจารณารูป 4.11 พบว่าพฤติกรรมของกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A ออลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับ Epoxy resin โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min มีลักษณะคล้ายกราฟความเค้นความเครียดของ Epoxy resin ในรูป 4.2 แต่จะสามารถรับความเค้นได้สูงสุดเพียงช่วงเดียว โดยกราฟส่วนใหญ่มีความสม่ำเสมอ สามารถรับความเค้นได้สูงตั้งแต่ต้นและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งจะค่อยๆคงลดลง

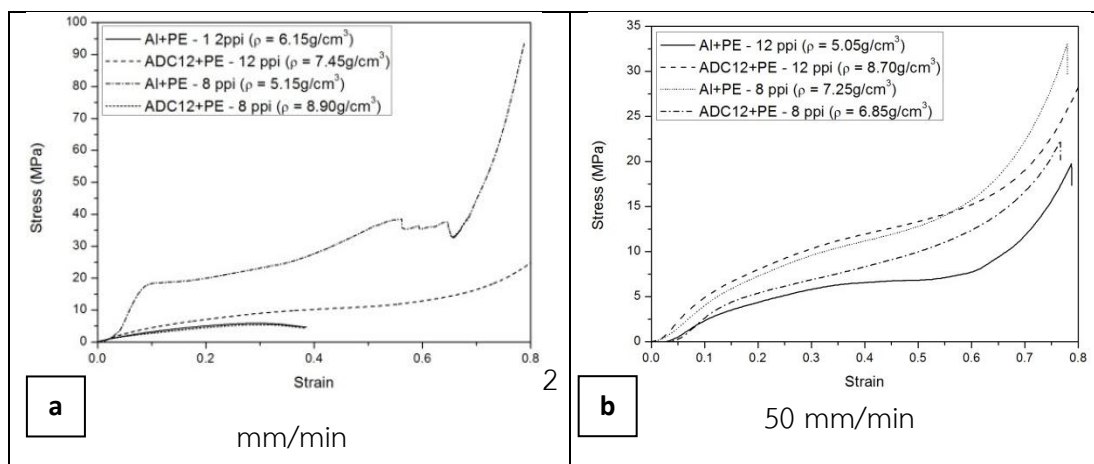


รูปที่ 4. 11 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ไฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และไฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับ Epoxy resin a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min

4.6.6 การทดสอบการรับแรงอัดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ไฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และไฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับพอลิเอทิลีน โดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min

รูปที่ 4.12a แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ไฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และไฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับพอลิเอทิลีน เมื่อใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ขนาดโพรงอากาศโพรงอากาศ 8 ppi สามารถรับความเค้นได้สูงสุด

รูป 4.12b แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ไฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และไฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับพอลิเอทิลีน เมื่อใช้อัตราเร็วในการอัด 50 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs สามารถรับความเค้นได้ถึง 80% ของความเครียด โดยวัสดุผสม IPCs ที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi สามารถรับความเค้นได้สูงสุด 33 MPa และวัสดุผสม IPCs ที่มีเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi สามารถรับความเค้นได้ต่ำที่สุด



รูปที่ 4. 12 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับพอลิเอทิลีน a.) อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ b.) อัตราเร็วในการ อัด 50 mm/min

เมื่อพิจารณารูป 4.12 พบว่าพฤติกรรมของกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับพอลิเอทิลีนโดยใช้อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min มีลักษณะคล้ายกราฟความเค้นความเครียดของพอลิเอทิลีน ในรูป 4.2 โดยกราฟส่วนใหญ่มีความสม่ำเสมอ สามารถรับความเค้นได้สูงตั้งแต่ต้นและค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย

4.7 ความเค้นจุดคราก, การดูดซับพลังงาน และความเค้นพลาโตของวัสดุผสม IPCs

4.7.1 ความเค้นจุดคราก (Yield strength)

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าเมื่อพิจารณาชนิดอะลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิตโฟมอะลูมิเนียมทั้งสองขนาดคือขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min พบว่าวัสดุผสม IPCs จะมีค่าความเค้นจุดครากสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมและโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 จะมีค่าความเค้นจุดครากสูงกว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับ Epoxy resin จะมีค่าความเค้นจุดครากสูงกว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้พอลิเอทิลีน, ซิลิโคน และยางธรรมชาติตามลำดับ โดยค่าความเค้นจุดครากของซิลิโคน และยางธรรมชาติจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4. 5 แสดงความเค้นจุดคราก, การดูดซับพลังงานที่ 25%, 50%, 75% และความเค้นพลาโตของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์, โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

ชนิดชิ้นงาน	ขนาด โพรง อากาศ	ความ เร็วใน การอัด	ความเค้น จุดคราก (MPa)	E _{25%} (KJ/cm ³)	E _{50%} (KJ/cm ³)	E _{75%} (KJ/cm ³)	
Al PURE	12 ppi	2 mm/ min	0.002	2	8	18	
ADC12			0.013	9	17	24	
Al PURE	8 ppi		0.013	9	7	22	
ADC12			0.021	9	9	22	
NR	-		0.201	31	158	1,127	
Silicone	-		0.095	13	85	468	
Resin	-		58.603	-	-	-	
PE	-		3.500	613	-	-	
Al PURE	12 ppi		50 mm/ min	0.002	2	7	-
ADC12				0.018	4	9	18
Al PURE	8 ppi	0.014		20	7	15	
ADC12		0.018		30	10	23	
NR	-	0.053		7	63	377	
Silicone	-	0.067		10	53	168	
Resin	-	33.824		-	-	-	
PE	-	5.045		801	2,647	5,889	

เมื่อพิจารณาขนาดโพรงอากาศของวัสดุผสม IPCs ที่มีขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่มีขนาดโพรงอากาศ 8 ppi ส่วนใหญ่จะมีค่าความเค้นจุดครากสูงกว่าขนาดโพรงอากาศ 12 ppi

เมื่อพิจารณาความเร็วที่ใช้ในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min พบว่าส่วนใหญ่วัสดุผสม IPCs ที่ความเร็วในการอัด 50 mm/min จะมีค่าความเค้นจุดครากสูงกว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min

ตารางที่ 4. 6 แสดงความเค้นจุดคราก, การดูดซับพลังงานที่ 25%, 50%, 75% และความเค้นพลาสติกของชิ้นงานผสม IPCs

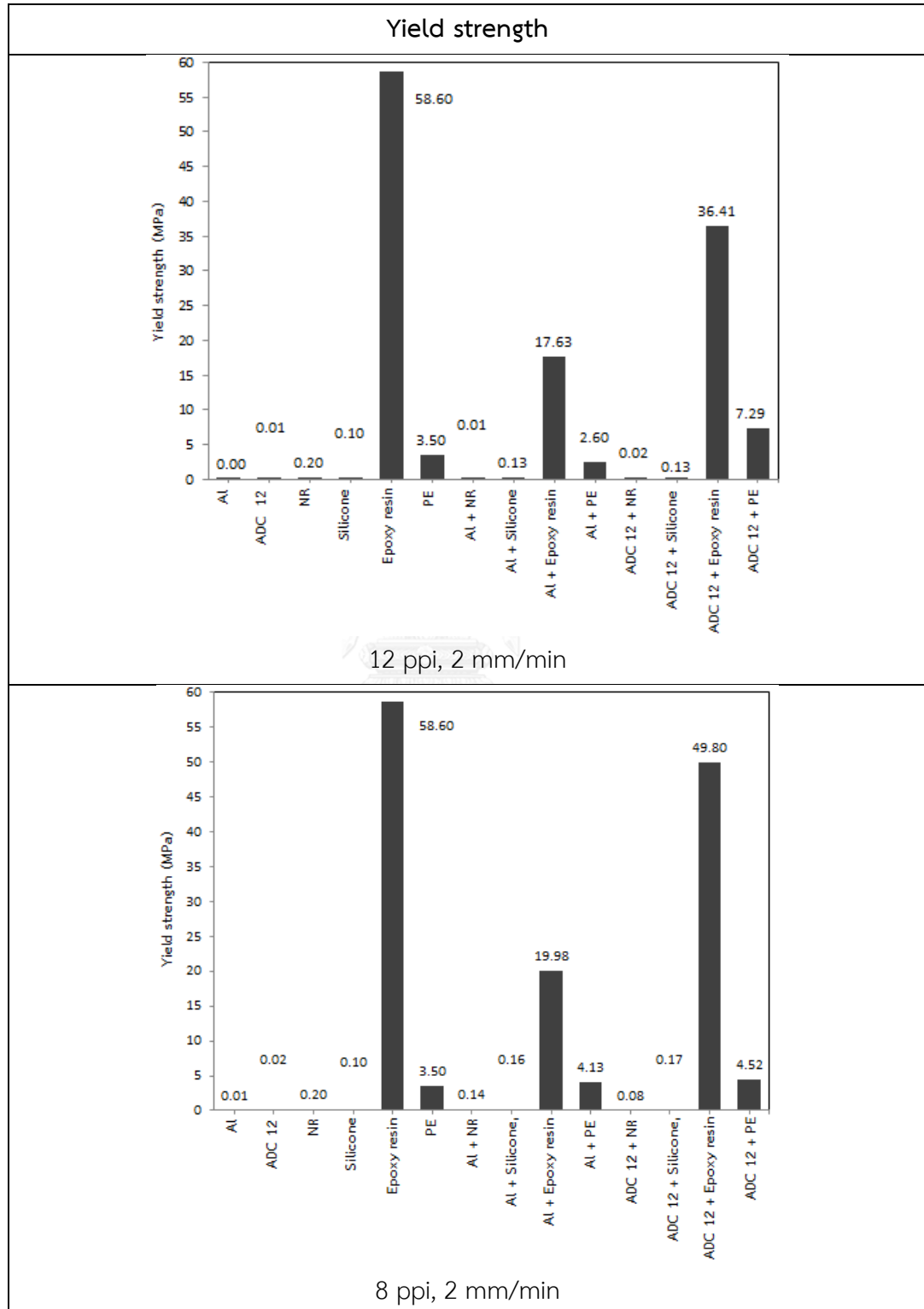
ชนิด AI	ชนิดพอลิเมอร์	ขนาดโพรงอากาศ	ความเร็วในการอัด	ความเค้นจุดคราก (MPa)	E _{25%} (KJ/cm ³)	E _{50%} (KJ/cm ³)	E _{75%} (KJ/cm ³)
PURE	NR	12 ppi	2 mm/min	0.011	13	082	269
PURE	Silicone			0.126	31	123	278
PURE	Resin			17.626	280	1,135	2,481
PURE	PE			2.600	131	-	-
ADC12	NR			0.022	311	1,240	2,771
ADC12	Silicone			132	26	87	255
ADC12	Resin			36.407	-	-	-
ADC12	PE			7.289	12	24	38
PURE	NR	8 ppi	2 mm/min	0.135	0.4	2	5
PURE	Silicone			0.156	33	120	259
PURE	Resin			19.983	-	-	-
PURE	PE			4.127	9	20	30
ADC12	NR			0.075	0.9	3	6
ADC12	Silicone			0.169	55	155	297
ADC12	Resin			49.797	-	-	-
ADC12	PE			4.522	2	-	-

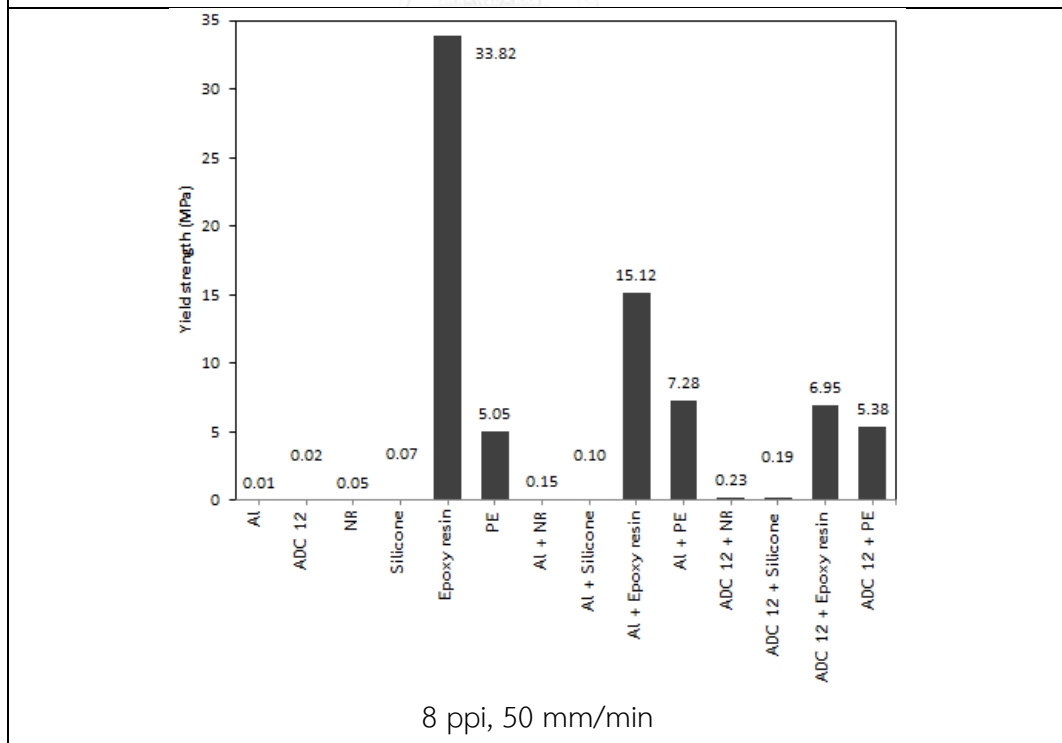
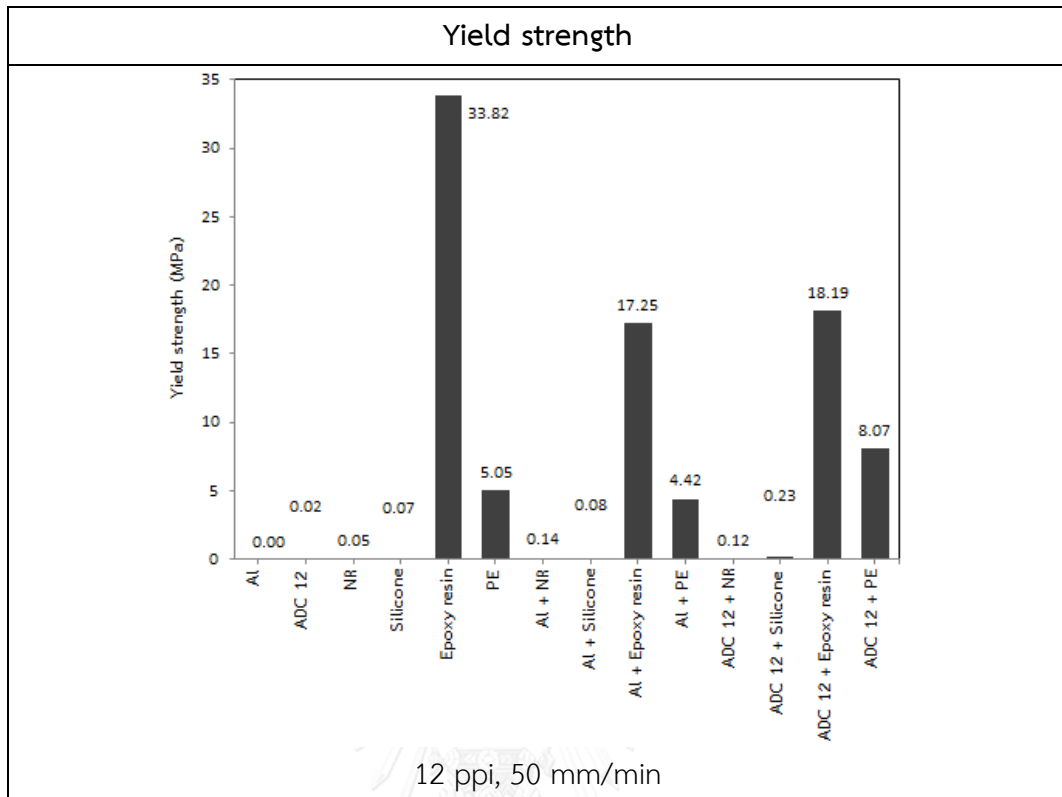
ชนิด AI	ชนิด พอลิเมอร์	ขนาด โพรง อากาศ	ความ เร็วใน การอัด	ความเค้น จุดคราก (MPa)	E _{25%} (MJ/cm ³)	E _{50%} (MJ/cm ³)	E _{75%} (MJ/cm ³)
PURE	NR	12 ppi	50 mm/ min	0.138	6	14	24
PURE	Silicone			0.081	67	188	339
PURE	Resin			17.246	-	-	-
PURE	PE			4.420	2	7	20
ADC12	NR			0.119	13	55	138
ADC12	Silicone			0.234	35	197	294
ADC12	Resin			18.189	-	-	-
ADC12	PE			8.071	1,328	4,245	8,379
PURE	NR	8 ppi	50 mm/ min	0.154	21	117	370
PURE	Silicone			0.099	14	87	391
PURE	Resin			15.124	-	-	-
PURE	PE			7.283	1,145	3,895	8,402
ADC12	NR			0.225	32	162	550
ADC12	Silicone			0.188	60	195	377
ADC12	Resin			6.949	-	-	-
ADC12	PE			5.380	48	146	260

เมื่อพิจารณาชนิดของพอลิเมอร์ที่ในการผลิตวัสดุผสม IPCs พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับ Epoxy resin จะมีค่าความเค้นจุดครากสูงสุด โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi กับ Epoxy resin ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min มีค่าความเค้นจุดครากสูงสุด 49.797 MPa

เมื่อเปรียบเทียบวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนพบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi กับพอลิเอทิลีนที่ใช้ความเร็วในการอัด 50 mm/min มีค่าความเค้นจุดครากสูงสุด 8.071 MPa

ตารางที่ 4. 7 แสดงกราฟความเค้นจุดครากของชิ้นงานผสม IPCs เทียบกับโฟมอะลูมิเนียมชนิดต่างๆ และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ





เมื่อเปรียบเทียบวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนกับยางธรรมชาติ และซิลิโคนพบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ยางธรรมชาติและซิลิโคนมีค่าความเค้นจุดครากใกล้เคียงกัน โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi กับยางธรรมชาติที่ใช้ความเร็วในการอัด 50 mm/min มีค่าความเค้นจุดครากสูงสุด 0.225 MPa และวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi กับซิลิโคนที่ใช้ความเร็วในการอัด 50 mm/min มีค่าความเค้นจุดครากสูงสุด 0.234 MPa

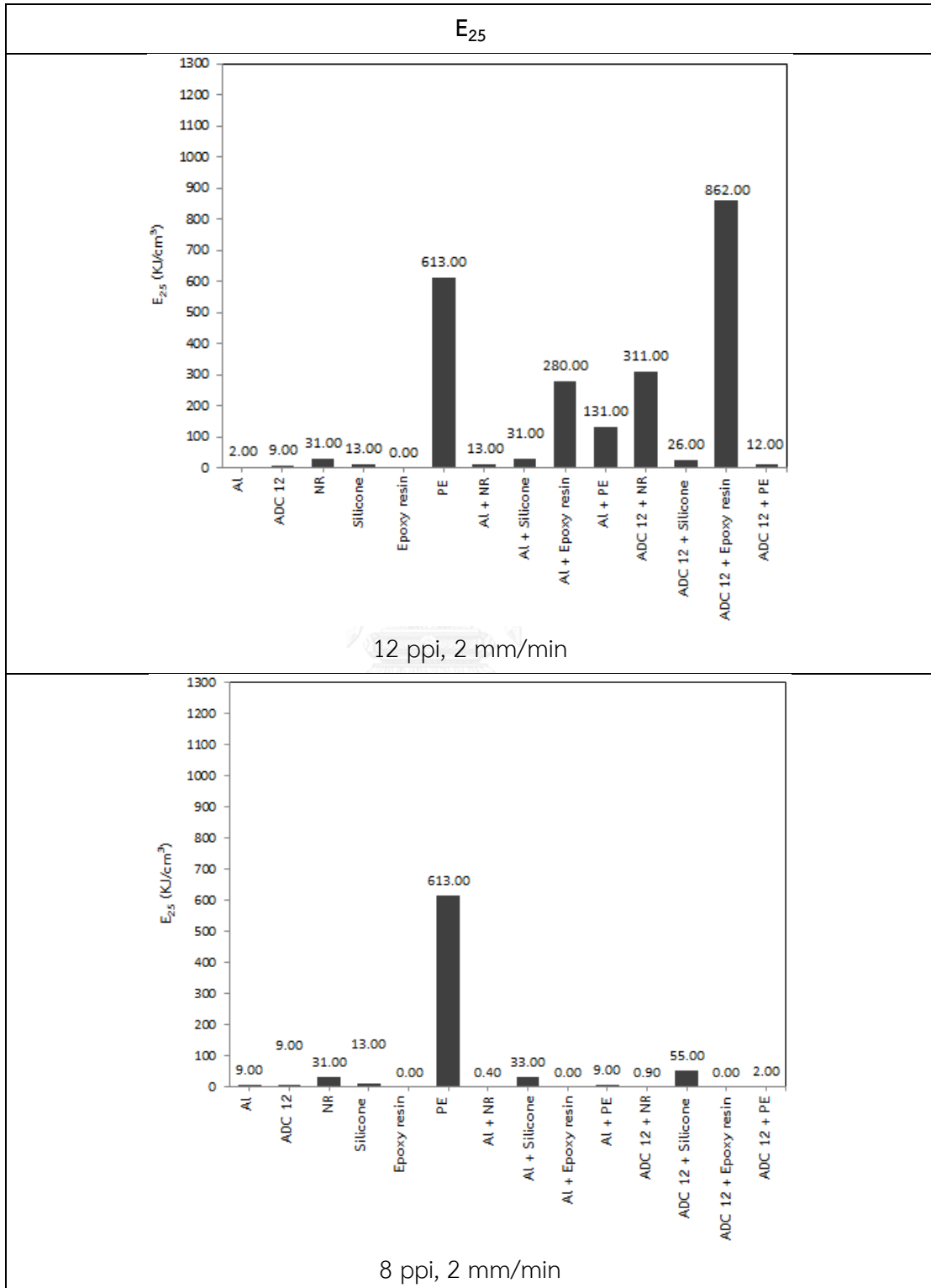
เมื่อพิจารณาดารงที่ 4.7 พบว่าวัสดุผสม IPCs มีค่าความเค้นจุดครากมากกว่าโพลีเอทิลีนที่ใช้แต่มีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์ที่ใช้ ยกเว้นวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 กับพอลิเอทิลีนที่มีค่าความเค้นมากกว่าพอลิเมอร์ที่ใช้ ในทั้งสองขนาดโพรงอากาศคือ 8 ppi และ 12 ppi และทั้งสองความเร็วที่ใช้ในการอัดคือ 2 mm/min และ 50 mm/min

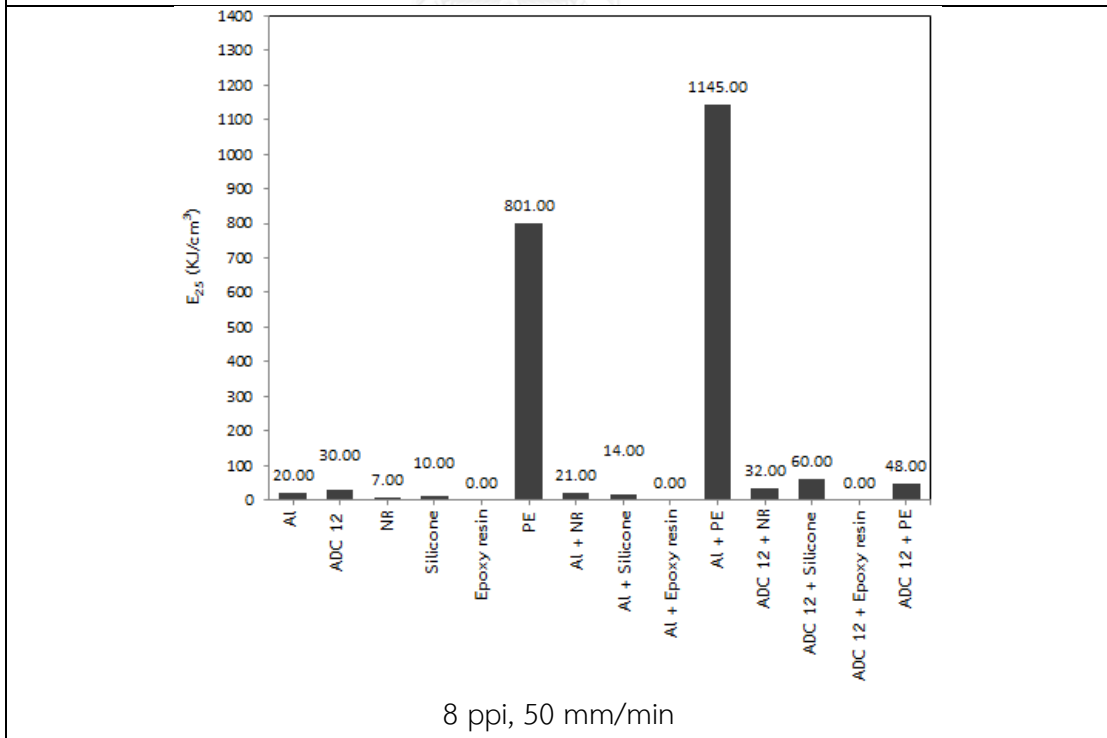
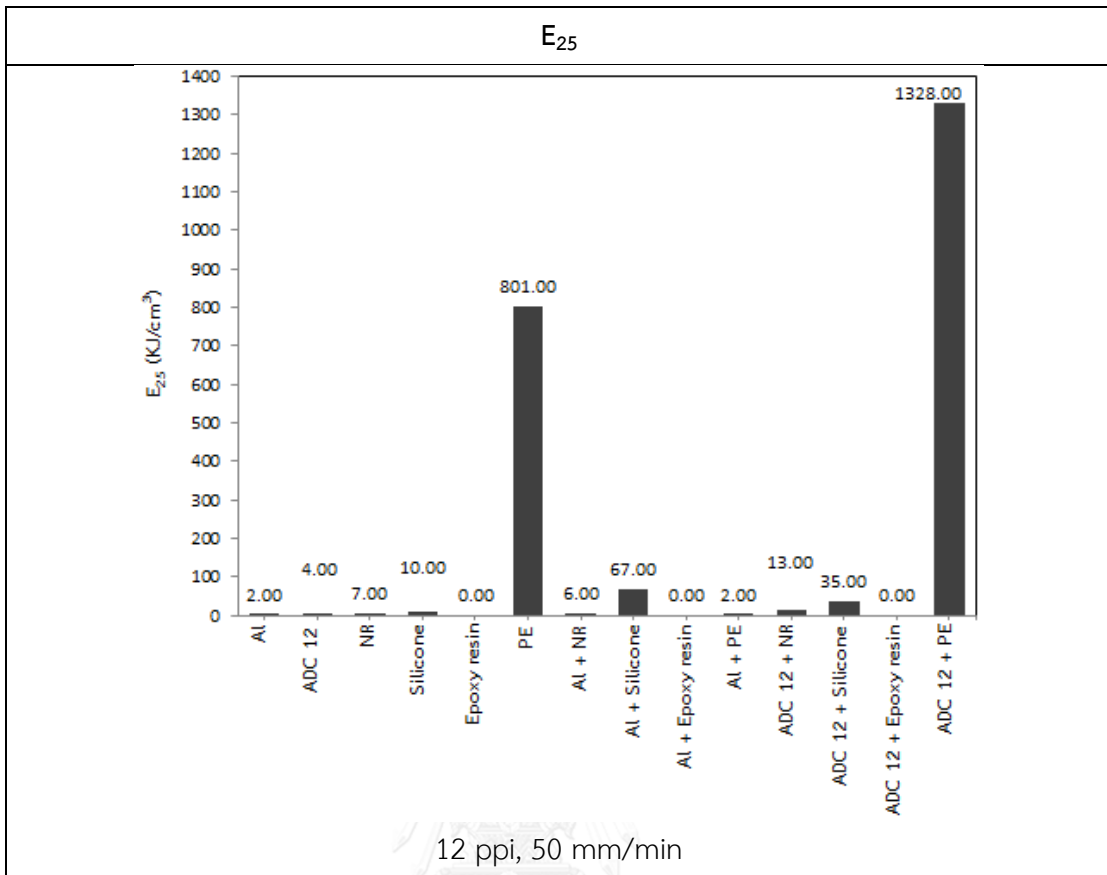
4.7.2 การดูดซับพลังงาน

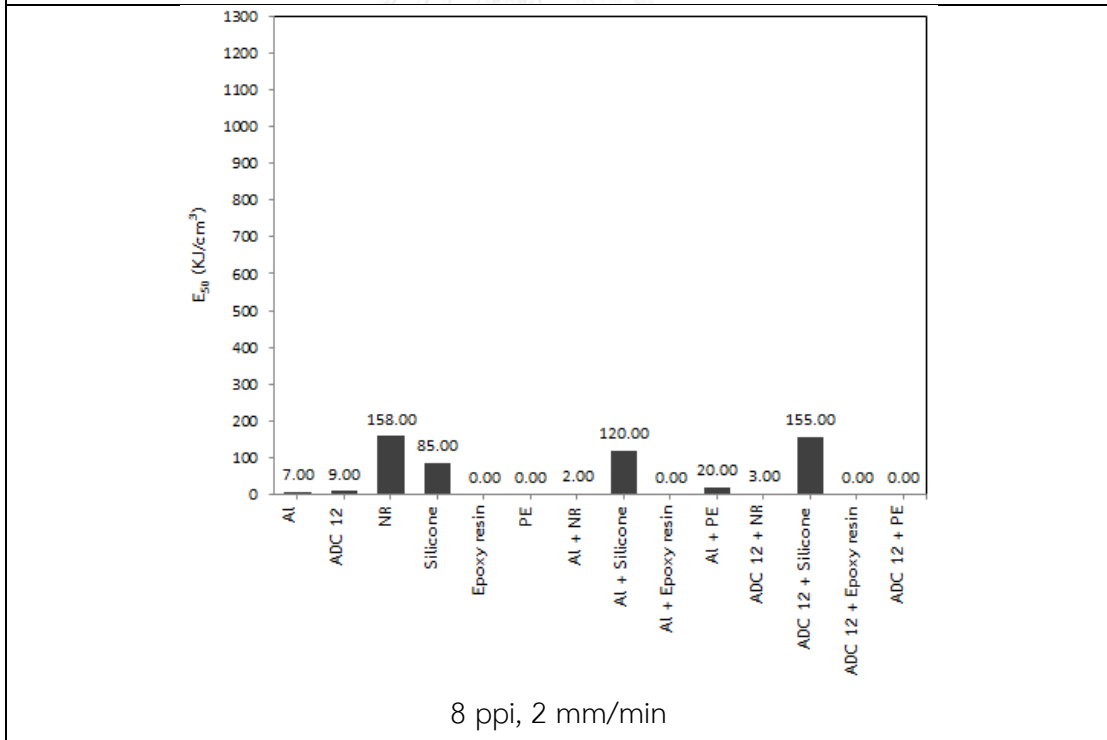
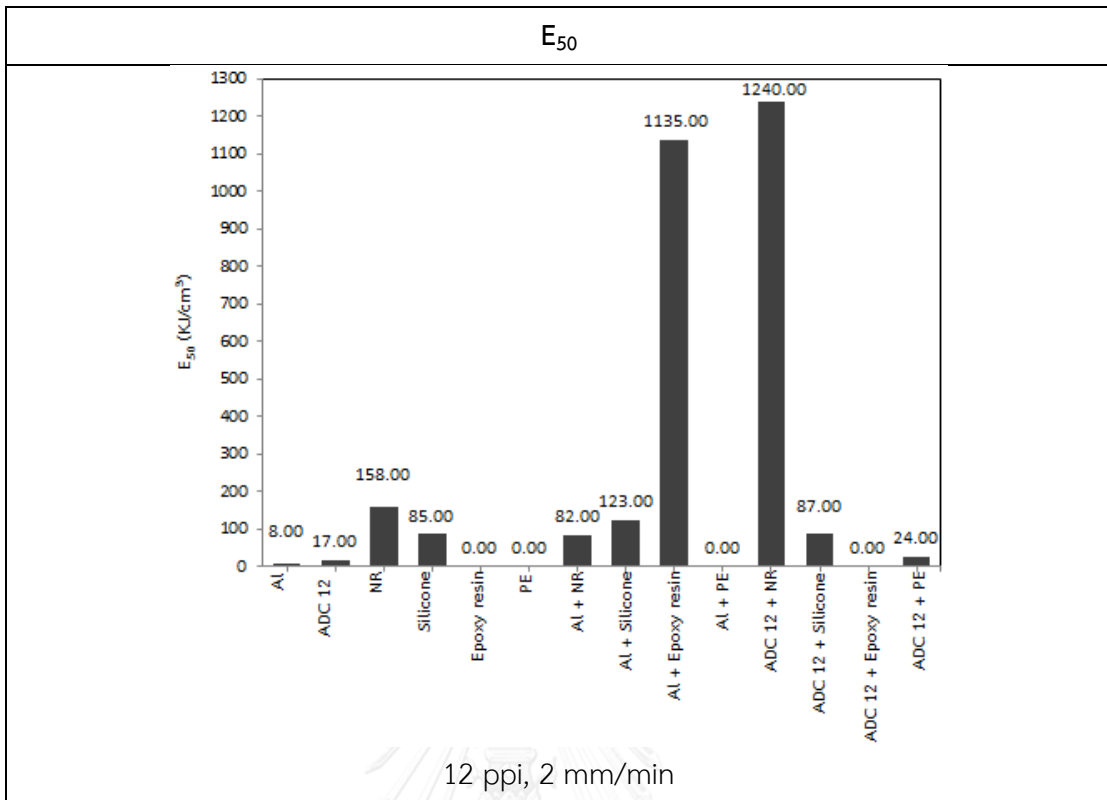
จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อพิจารณาการดูดซับพลังงานที่ 25%, 50% และ 75% พบว่าวัสดุผสม IPCs จะสามารถดูดซับพลังงานได้สูงขึ้นกว่าโพลีเอทิลีนบริสุทธิ์, โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนกับ Epoxy resin จะไม่มีค่าการดูดซับพลังงานที่ 25% เนื่องจากไม่สามารถรับแรงได้ถึง 25% ของความเครียด วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi กับพอลิเอทิลีนที่ใช้ความเร็วในการอัด 50 mm/min มีค่าการดูดซับพลังงานที่ 25%, 50% และ 75% สูงสุด $1,328 \text{ KJ/cm}^3$, $4,245 \text{ KJ/cm}^3$ และ $8,379 \text{ KJ/cm}^3$ ตามลำดับ ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi กับยางธรรมชาติที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min มีค่าการดูดซับพลังงานที่ 25%, 50% และ 75% ต่ำสุด 0.4 KJ/cm^3 , 2 KJ/cm^3 และ 5 KJ/cm^3 ตามลำดับ

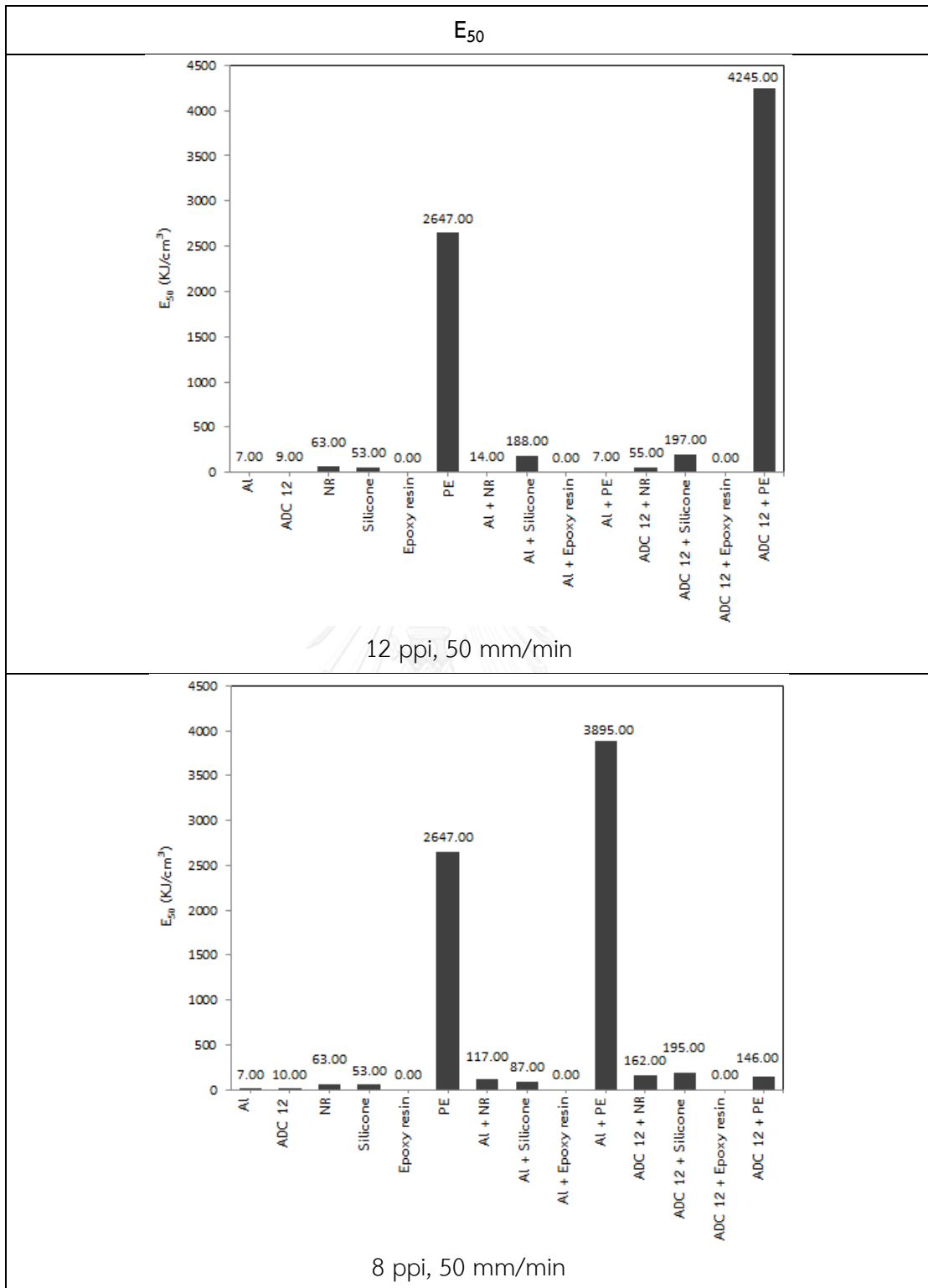
จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับพลังงานพบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้พอลิเอทิลีนมีค่าการดูดซับพลังงานที่มากกว่าค่าการดูดซับพลังงานของโพลีเอทิลีน และพอลิเอทิลีน โดยขนาดโพรงอากาศ 12 ppi ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min วัสดุ IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 กับพอลิเอทิลีนมีค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด ส่วนขนาดโพรงอากาศ 8 ppi ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min วัสดุ IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนบริสุทธิ์กับพอลิเอทิลีนมีค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด

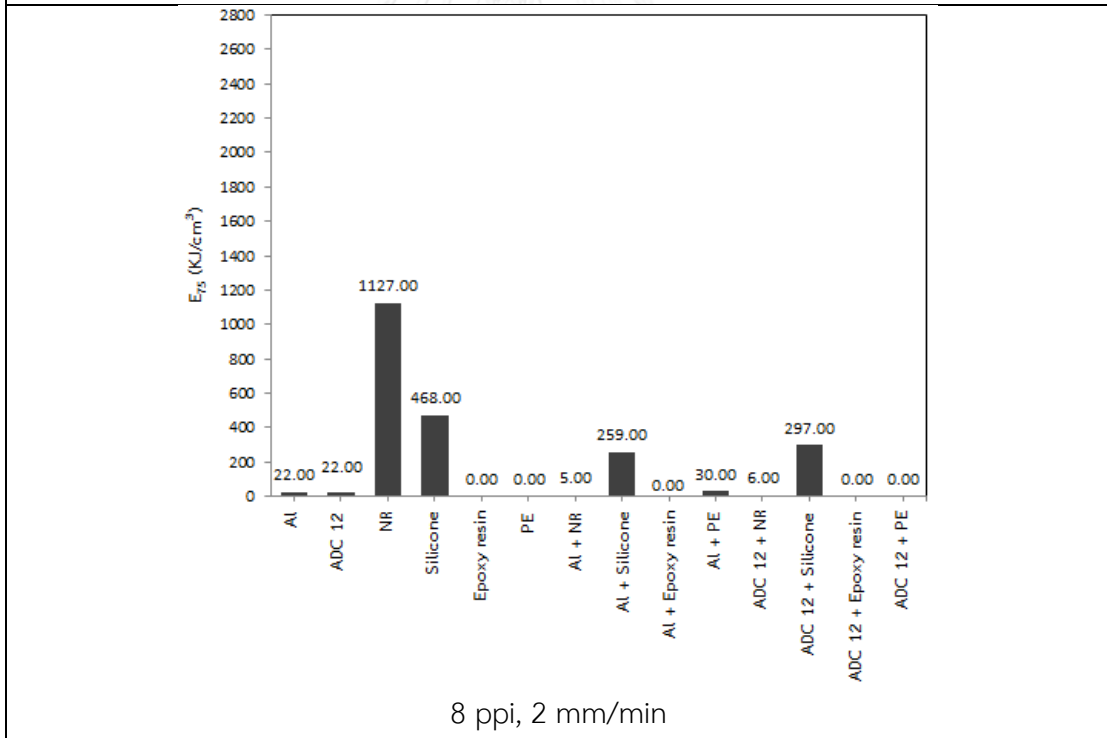
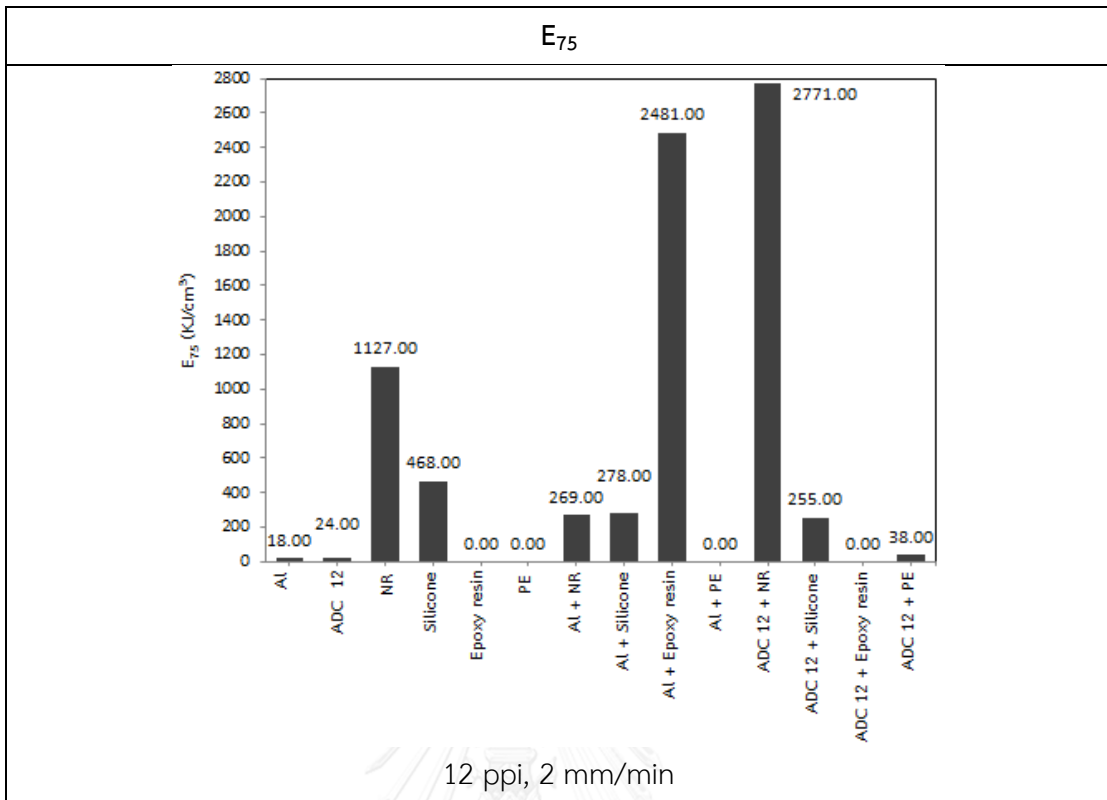
ตารางที่ 4. 8 แสดงกราฟการดูดซับพลังงานของชิ้นงานผสม IPCs เทียบกับโพลีเมอร์เหนียวชนิดต่างๆ และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่ 25%, 50% และ 75% ของความเครียดตามลำดับ

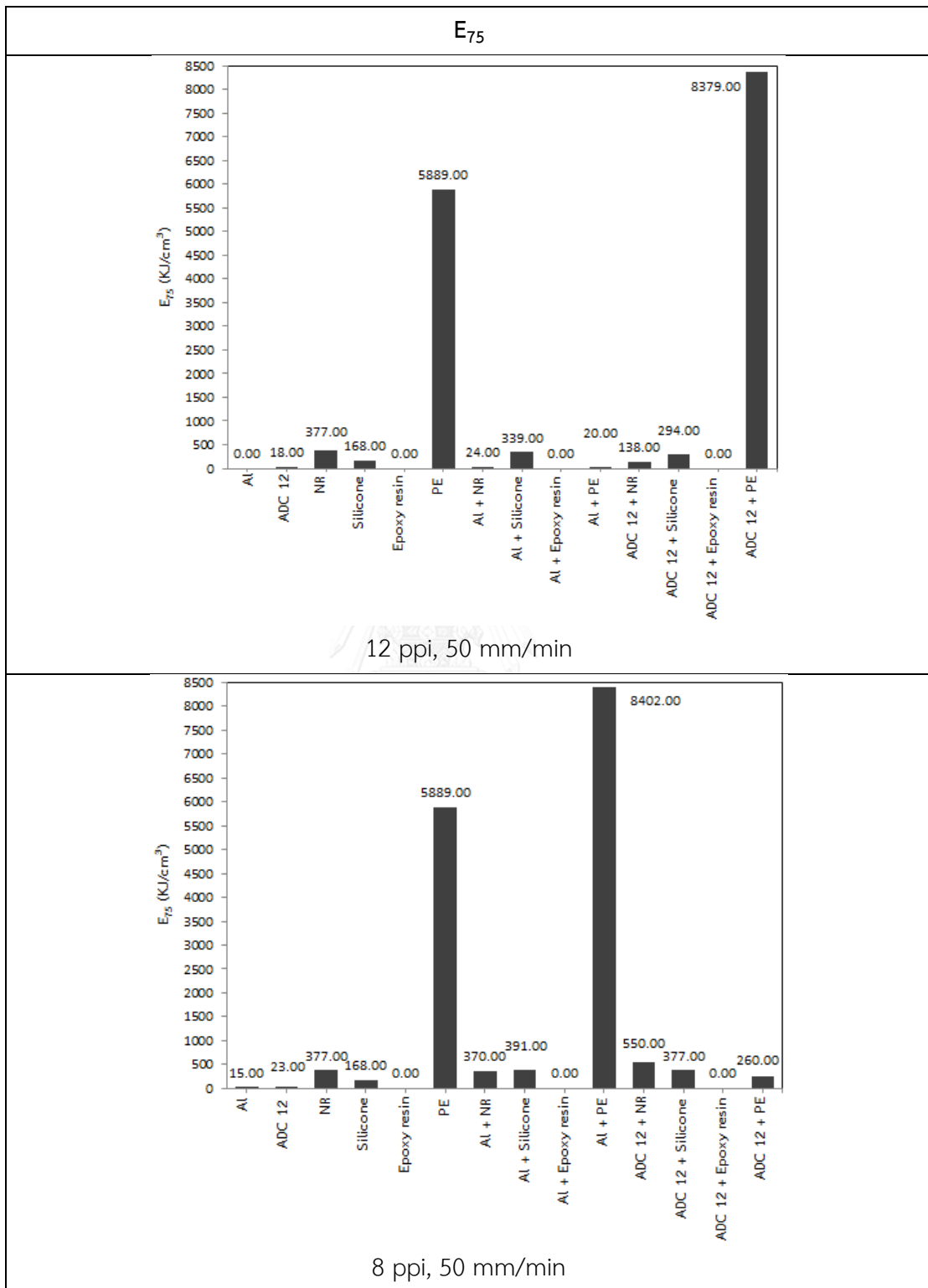












บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ผลของชนิดอะลูมิเนียม

5.1.1 ผลของชนิดอะลูมิเนียมต่อกระบวนการผลิต

ในการผลิตโฟมโลหะด้วยวิธีการหล่อแทรกซึ่มด้วยแรงดัน ปัจจัยหลักในการผลิตในการหล่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์คือความหนืดของน้ำโลหะหลอมเหลว [35] โลหะที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองชนิดคือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ณ อุณหภูมิใดๆ ที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ อะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 มีความหนืดต่ำกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เนื่องจากมีธาตุผสมหลักคือซิลิคอนในอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ซึ่งธาตุผสมซิลิคอนส่งผลให้ความหนืดของอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ลดลง [28]

5.1.2 ผลของชนิดอะลูมิเนียมต่อโครงสร้างมหภาค

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 นั้น เมื่อผลิตเป็นชิ้นงานโฟมโลหะโดยใช้โฟมพอลิเมอร์ต้นแบบที่มีขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi สามารถหล่อได้เต็มแบบ ลักษณะของโครงสร้างมหภาคไม่ต่างกันดังแสดงในตาราง 4.2 เนื่องจากเมื่ออะลูมิเนียมบริสุทธิ์หลอมเหลวจะมีค่าความหนืดต่ำ และเมื่อใช้อะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ซึ่งมีธาตุผสมหลักเป็นซิลิคอนซึ่งส่งผลให้ความหนืดของอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลวลดลงจึงสามารถไหลได้ดี อีกทั้งความดันที่ใช้ในกระบวนการหล่อมีค่าความดันสุญญากาศ 1 Bar และความดันการอัด 1.2 Bar ที่สูงพอทำให้น้ำอะลูมิเนียมสามารถไหลเข้าไปในโพรงอากาศขนาด 12 ppi และ 8 ppi ได้เต็มแบบ

5.1.3 ผลของชนิดอะลูมิเนียมต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมคือสัดส่วนของค่าความหนาแน่นของโฟมกับค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ผลิตโฟม วัสดุเนื้อพื้นที่ใช้ผลิตชิ้นงานโฟมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ เนื่องจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันสูง ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 2.7 g/cm^3 และ 2.65 g/cm^3 ตามลำดับ [26]

5.1.4 ผลของของชนิดอะลูมิเนียมต่อสมบัติทางกล

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโพลีโพลีเอทิลีน คือชนิดวัสดุ [20] ถ้าวัสดุที่ใช้ผลิตมีความแข็งแรงสูงโพลีโพลีเอทิลีนก็จะมีค่าความแข็งแรงสูงตาม วัสดุที่ใช้ผลิตโพลีโพลีเอทิลีนคือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ซึ่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความแข็งแรงจุดครากโดยทั่วไปประมาณ 90 MPa อะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 มีค่าความแข็งแรงจุดครากสูงกว่า 190 MPa [26] อะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง เนื่องจากธาตุผสม Si ที่เติมลงไป 12 wt.% ดังแสดงในตารางที่ 4.1 กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมช่วยเพิ่มความแข็งแรง โพลีโพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 จึงมีความแข็งแรงสูงกว่าโพลีโพลีเอทิลีนบริสุทธิ์ ทั้งยังมีค่าความเค้นพลาสติกและการดูดซับพลังงานที่สูงกว่าด้วย แต่ธาตุผสมซิลิคอนในอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ส่งผลทำให้ความเหนียวลดลงสูง ส่งผลให้มีความเปราะสูงขึ้น ทำให้กราฟความเค้นความเครียดของโพลีโพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC12 มีลักษณะไม่เรียบเมื่อได้รับความเค้นเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีโพลีเอทิลีนผสมเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ดังแสดงในรูปที่ 4.1

5.2 ผลของชนิดโพลีโพลีเอทิลีนต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs

แม้ว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโพลีโพลีเอทิลีน คือชนิดวัสดุ [20] ถ้าวัสดุที่ใช้ผลิตมีความแข็งแรงสูงโพลีโพลีเอทิลีนก็จะมีค่าความแข็งแรงสูงตาม วัสดุที่ใช้ผลิตโพลีโพลีเอทิลีนคือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 แต่ในการผลิตวัสดุผสม IPCs ได้มีการใช้โพลีโพลีเอทิลีนบริสุทธิ์และโพลีโพลีเอทิลีนผสมเกรด ADC 12 ที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ซึ่งความเค้นที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดจากพอลิเมอร์ ดังนั้นชนิดของอะลูมิเนียมจึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญของการเพิ่มขึ้นของความเค้น

5.3 ผลของชนิดพอลิเมอร์ในการผลิตวัสดุผสม IPCs

ในการผลิตวัสดุผสม IPCs ได้มีการใช้โพลีโพลีเอทิลีนที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ พลาสติก (Plastics) และอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) หรือพวกกยาง (Rubber)

5.3.1 ผลของชนิดพอลิเมอร์ต่อกระบวนการผลิตวัสดุผสม IPCs

ในการผลิตวัสดุผสม IPCs ได้นำโฟมอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด ใส่ในแม่พิมพ์ที่ทาด้วยซีเมนต์เพื่อป้องกันไม่ให้ติดผนังแม่พิมพ์และสามารถแกะออกได้ง่าย หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์เทลงไปในแม่พิมพ์ โดยทำในสภาวะสุญญากาศ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้พอลิเมอร์สามารถไหลเข้าไปในโครงสร้างโพรงอากาศได้ทั้งหมด หลังจากนั้นทิ้งไว้จนกระทั่งพอลิเมอร์แข็งตัวแล้วจึงแกะออกจากแม่พิมพ์ ดังรูป 3.3 โดยพอลิเมอร์ที่สามารถผลิตวัสดุผสม IPCs ได้ด้วยวิธีการนี้คือ ยางธรรมชาติ, Epoxy resin และซิลิโคน เนื่องจากยางธรรมชาติ, Epoxy resin และซิลิโคน มีความหนืดต่ำ สามารถไหลตัวได้ดีจึงสามารถไหลผ่านช่องว่างซึ่งเป็นโพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียมได้ ส่วนพอลิเอทิลีนมีลักษณะเป็นเม็ดพลาสติกสามารถหลอมและใช้งานได้หลายครั้งเนื่องจากเป็นเทอร์โมพลาสติก จะมีลักษณะอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 75°C ขึ้นไป ดังนั้นจึงต้องนำโฟมอะลูมิเนียมและพอลิเอทิลีนใส่ลงในแม่พิมพ์ และให้ความร้อนภายในเตาอบที่อุณหภูมิ 200°C เพื่อให้พอลิเอทิลีนหลอมเหลว และสามารถไหลเข้าไปภายในโพรงอากาศได้

5.3.2 ผลของชนิดพอลิเมอร์ต่อโครงสร้างมหภาคของวัสดุผสม IPCs

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของวัสดุผสม IPCs พบว่าพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิดได้แก่ ยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และ พอลิเอทิลีน สามารถเติมเต็มโพรงอากาศภายในโฟมอะลูมิเนียม และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ได้ โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับยางธรรมชาติจะมีลักษณะสีเหลือง มีรอยฉีกขาดเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างก้านโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียม ซึ่งรอยฉีกขาดนี้อาจเกิดจากการตัดชิ้นงาน เนื่องจากยางธรรมชาติมีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง อีกทั้งบริเวณรอยต่อระหว่างก้านโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมและยางธรรมชาติ ไม่เกิดพันธะระหว่างกันจึงไม่มีแรงยึดเหนี่ยวที่ดี เช่นเดียวกับวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับซิลิโคนซึ่งมีสีขาว และมีรอยฉีกขาดเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างก้านโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมและซิลิโคน ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับ Epoxy resin จะมีสีใส ผิวเรียบสม่ำเสมอ ไม่พบรอยฉีกขาดบริเวณรอยต่อระหว่างก้านโพรงอากาศของโฟมอะลูมิเนียมเช่นเดียวกับวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีน เนื่องจาก Epoxy resin และ พอลิเอทิลีนมีความแข็ง และคงรูปได้ระหว่างการตัด ทำให้สามารถตัดได้ง่ายจึงไม่เกิดการฉีกขาดระหว่างการตัดและได้ผิวที่เรียบ

5.3.3 ผลของชนิดพอลิเมอร์ต่อโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของวัสดุผสม IPCs [29]

ตาราง 5. 1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุต่างๆ

ชนิดวัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน ($\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)
อะลูมิเนียม	23.1
ADC 12	21 [31]
ยางธรรมชาติ	0.067 [31]
ซิลิโคน	3-5 [30-32]
Epoxy resin	45-65 [31, 33]
พอลิเอทิลีน	22 [31, 34]

จากตารางที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน, Epoxy resin และพอลิเอทิลีนเป็นวัสดุเติมเต็มโพรงอากาศ โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับยางธรรมชาติ มีรอยแยกบางบริเวณระหว่างผิวสัมผัสของก้านโฟมอะลูมิเนียมกับเนื้อยางธรรมชาติเนื่องจากการเปียกผิว (Wetting) ที่ไม่ดีในระหว่างการผลิตชิ้นงานวัสดุผสม IPCs ซึ่งอาจทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสระหว่างก้านโฟมอะลูมิเนียมและยางธรรมชาติ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันมากระหว่างอะลูมิเนียมและยางธรรมชาติแสดงในตาราง 5.1 ซึ่งกระบวนการแข็งตัวของยางธรรมชาติเป็นกระบวนการคายความร้อน เมื่อเย็นตัวลงทำให้มีการหดตัวที่ต่างกันจึงเกิดรอยแยกบริเวณรอยต่อ อีกทั้งบริเวณผิวสัมผัสของก้านโฟมอะลูมิเนียม และยางธรรมชาติมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสเป็นการยึดเหนี่ยวทางกล [30] อีกทั้งการตัดชิ้นงานซึ่งทำได้ยากเนื่องจากยางธรรมชาติมีลักษณะเหนียว และยืดหยุ่นได้ดี จึงทำให้ตัดได้ยากเช่นเดียวกับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับซิลิโคน ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับ Epoxy resin ไม่มีรอยแยก มีการยึดเกาะกันดีระหว่างผิวสัมผัสเนื่องจาก Epoxy เป็นพลาสติกแบบเทอร์โมเซตติงที่มีความแข็ง สามารถคงรูปหลังจากการเย็นตัว อีกทั้งยังมีการเปียกผิวที่ดีกว่ายางธรรมชาติและซิลิโคน เนื่องจากมีความหนืดที่ต่ำกว่าขณะหลอมเหลวทำให้สามารถไหลเข้าไปแทนที่โพรงอากาศได้ดี ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนไม่มีรอยแยกเนื่องจากพอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกแบบเทอร์โมพลาสติกที่มีความหนืดต่ำขณะหลอมเหลวทำให้สามารถไหลเข้าไปแทนที่โพรงอากาศได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงอะลูมิเนียมทำให้การหด

ตัวไม่แตกต่างกันมากหลังจากเย็นตัว อีกทั้งมีความแข็งหลังจากเย็นตัวทำให้มีการยึดเกาะด้วยแรงทางกลที่ดีบริเวณระหว่างรอยต่อของผิวสัมผัส

5.3.4 ผลของชนิดพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs

ตาราง 5. 2 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs แต่ละชนิดเทียบกับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

ชนิด AI	ชนิดพอลิเมอร์	ขนาดโพรงอากาศ	ความเร็วในการอัด	ความเค้นจุดคราก (%)	E _{25%} (%)	E _{50%} (%)	E _{75%} (%)
PURE	NR	12 ppi	2	-1727.27	-138.46	-92.68	-318.96
PURE	Silicone			24.60	58.06	30.89	-68.35
PURE	Resin			-232.48	-	-	-
PURE	PE			-34.62	-367.94	-	-
ADC12	NR			-813.64	90.03	87.26	59.33
ADC12	Silicone			28.03	50.00	2.30	-83.53
ADC12	Resin			-60.97	-	-	-
ADC12	PE			51.98	-5008.33	100.00	100.00
PURE	NR	8 ppi	mm/min	-48.89	-7650.00	-7800.00	-22440.00
PURE	Silicone			39.10	60.61	29.17	-80.69
PURE	Resin			-193.26	-	-	-
PURE	PE			15.19	-6711.11	100.00	100.00
ADC12	NR			-168.00	-3344.44	-5166.67	-18683.33
ADC12	Silicone			43.79	76.36	45.16	-57.58
ADC12	Resin			-17.68	-	-	-
ADC12	PE			22.60	-30550.00	-	-

ชนิด AI	ชนิด พอลิเมอร์	ขนาด โพรง อากาศ	ความเร็วในการ อัด	ความเค้น จุดคราก (%)	E _{25%} (%)	E _{50%} (%)	E _{75%} (%)
PURE	NR	12 ppi	50 mm/min	61.59	-16.67	-350.00	-1470.83
PURE	Silicone			17.28	85.07	71.81	50.44
PURE	Resin			-96.13	100.00	100.00	
PURE	PE			-14.14	-39950.00	-37714.29	-29345.00
ADC12	NR			55.46	46.15	-14.55	-173.19
ADC12	Silicone			71.37	71.43	73.10	42.86
ADC12	Resin			-85.96	-	-	-
ADC12	PE			37.49	39.68	37.64	29.72
PURE	NR	8 ppi	50 mm/min	65.58	66.67	46.15	-1.89
PURE	Silicone			32.32	28.57	39.08	57.03
PURE	Resin			-123.64	-	-	-
PURE	PE			30.73	30.04	32.04	29.91
ADC12	NR			76.44	78.13	61.11	31.45
ADC12	Silicone			64.36	83.33	72.82	55.44
ADC12	Resin			-386.75	-	-	-
ADC12	PE			6.23	-1568.75	-1713.01	-2165.00

ตาราง 5. 3 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs แต่ละชนิดเทียบกับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิต

ชนิด AI	ชนิด พอลิเมอร์	ขนาด โพรงอากาศ	ความเร็วในการอัด	ความเค้นจุดคราก (%)	E _{25%} (%)	E _{50%} (%)	E _{75%} (%)
PURE	NR	12 ppi	2 mm/min	x	x	x	x
PURE	Silicone			/	/	/	x
PURE	Resin			x	-	-	-
PURE	PE			x	x	-	-
ADC12	NR			x	/	/	/
ADC12	Silicone			/	/	/	x
ADC12	Resin			x	x	-	-
/ADC12	PE			/	x	/	/
PURE	NR	8 ppi	mm/min	x	x	x	x
PURE	Silicone			/	/	/	x
PURE	Resin			x	x	/	/
PURE	PE			/	x	/	/
ADC12	NR			x	x	x	x
ADC12	Silicone			/	/	/	x
ADC12	Resin			x	-	-	-
ADC12	PE			/	x	-	-

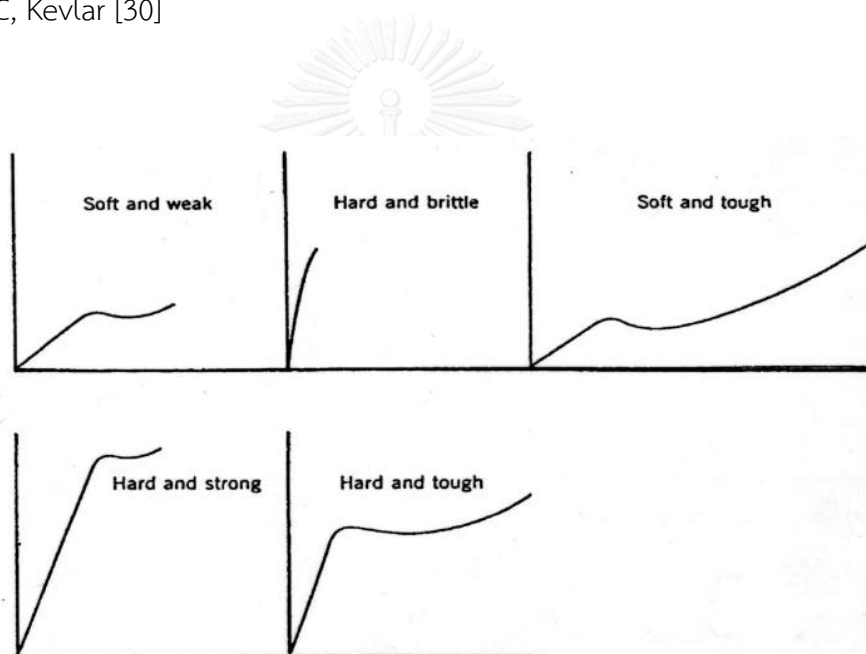
ชนิด AI	ชนิด พอลิ เมอร์	ขนาด โพรง อากาศ	ความ เร็วใน การอัด	ความ เค้นจุด คราก (%)	E _{25%} (%)	E _{50%} (%)	E _{75%} (%)
PURE	NR	12 ppi	50	/	x	x	x
PURE	Silicone			/	/	/	/
PURE	Resin			x	-	-	-
PURE	PE			x	x	x	x
ADC12	NR			/	/	x	x
ADC12	Silicone			/	/	/	/
ADC12	Resin			x	-	-	-
ADC12	PE			/	/	/	/
PURE	NR	8 ppi	mm/min	/	/	/	x
PURE	Silicone			/	/	/	/
PURE	Resin			x	-	-	-
PURE	PE			/	/	/	/
ADC12	NR			/	/	/	/
ADC12	Silicone			/	/	/	/
ADC12	Resin			x	-	-	-
ADC12	PE			/	x	x	x

หมายเหตุ :

เครื่องหมาย / แทนค่าสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs ที่ดีกว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิต เครื่องหมาย X แทนค่าสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs ที่แย่กว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิต

จากตาราง 5.2 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs แต่ละชนิดเทียบกับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ และตาราง 5.3 แสดงผลสรุปสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs แต่ละชนิดเทียบกับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิต

สำหรับพฤติกรรมของกราฟความเค้นความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุพอลิเมอร์แต่ละประเภทนั้น จะแตกต่างกันออกไป วัสดุบางตัวจะนิ่ม และ ไม่แข็งแรง (Soft and weak) เช่น เทียนไข พาราฟิน หรือ Wax วัสดุบางตัวจะแข็งแต่เปราะ (Hard and brittle) เช่น PS, PMMA วัสดุบางตัวจะนิ่มแต่เหนียว (Soft and tough) เช่น ยางธรรมชาติ NR วัสดุบางตัวจะแข็งและแข็งแรง (Hard and strong) เช่น พอลิเมอร์ชนิดเทอโมเซต วัสดุบางตัวจะแข็งและเหนียว (Hard and tough) เช่น Nylon, PC, Kevlar [30]



รูปที่ 5. 1 ลักษณะกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์กลุ่มต่างๆ

5.3.4.1 ผลของยางธรรมชาติต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs

ยางธรรมชาติจัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์ประเภทอีลาสโตเมอร์หรือยางซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงเมื่อออกแรงกระทำและจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิมเมื่อไม่มีแรงกระทำ [31] จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของยางธรรมชาติโดยยางธรรมชาติสามารถรับความเค้นได้ต่ำในช่วงแรก และค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้ายซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีความนิ่มแต่เหนียวดังรูปที่ 5.1

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โคมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโคมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับยางธรรมชาติ อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และอัตราเร็วในการ อัด 50 mm/min มีลักษณะกราฟคล้ายกราฟความเค้นความเครียดของยางธรรมชาติที่สามารถรับความเค้นได้ต่ำในช่วงแรกและค่อยๆ รับความเค้นได้สูงขึ้นจนกระทั่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย

ค่าความเค้นจุดคราก การดูดซับพลังงาน และความเค้นพลาโตของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โคมอะลูมิเนียมกับยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่าโคมอะลูมิเนียมแต่น้อยกว่ายางธรรมชาติเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของอะลูมิเนียมและยางธรรมชาติมีค่าแตกต่างกันโดยอะลูมิเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน $23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{K}$ [32] ยางธรรมชาติมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน $0.067 \times 10^{-6} / ^\circ\text{K}$ [33] และอาจเกิดจากการมีรอยแยกระหว่างผิวสัมผัสของก้านโคมอะลูมิเนียมกับยางธรรมชาติซึ่งอาจเกิดจากการตัดชิ้นงานวัสดุผสม IPCs กับยางธรรมชาติที่มีความเหนียวสูงทำให้ตัดได้ยากอีกทั้งอาจมีการเปื่อยกผิวที่ไม่ดีเท่าที่ควร

5.3.4.2 ผลของซิลิโคนต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs

ซิลิโคนจัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์ประเภทเดียวกับยางธรรมชาตินั้นคือมีความยืดหยุ่นสูง [31] จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของซิลิโคนโดยซิลิโคนสามารถรับความเค้นได้ต่ำในช่วงแรก และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้ายซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีความนิ่มแต่เหนียวดังรูปที่ 5.1 คล้ายกับยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โคมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโคมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับซิลิโคน อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และอัตราเร็วในการ อัด 50 mm/min มีลักษณะกราฟคล้ายกราฟความเค้นความเครียดของซิลิโคนที่สามารถรับความเค้นได้ต่ำในช่วงแรกและค่อยๆ รับความเค้นได้สูงขึ้นจนกระทั่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้าย

ความเค้นจุดคราก การดูดซับพลังงาน และความเค้นพลาโตของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โคมอะลูมิเนียมกับซิลิโคนมีค่าสูงกว่าโคมอะลูมิเนียมและซิลิโคนเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของอะลูมิเนียมและซิลิโคนมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยโดยอะลูมิเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน $23 \times 10^{-6} / \text{K}$ [32] ซิลิโคนมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน $3-5 \times 10^{-6} / \text{K}$ [33] จึงมีการหดตัวหลังจากการเย็นตัวของอะลูมิเนียมและซิลิโคนใกล้เคียงกัน

5.3.4.3 ผลของ Epoxy resin ต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs

Epoxy resin จัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติ้งพลาสติก เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน พลาสติกชนิดนี้จะคงรูปร่างอย่างถาวรโดยการบ่มด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือด้วยความร้อน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวหรือไหม้ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ โดยสูงเทอร์โมเซตติ้งพลาสติก ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมที่เกิดพันธะโคเวเลนต์เข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายได้เป็นของแข็ง บางครั้งในโครงข่ายนั้นจะมีอะตอมของธาตุไนโตรเจน ออกซิเจน กำมะถัน หรืออะตอมอื่นๆ เข้าไปเกิดพันธะโคเวเลนต์ร่วมด้วย [30] จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของ Epoxy resin โดย Epoxy resin สามารถรับความเค้นได้สูงในช่วงแรก และค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งแตกหักซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีความแข็งและแข็งแรงดังรูปที่ 5.1

จากรูปที่ 4.11 แสดงกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A ผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi กับ Epoxy resin อัตราเร็วในการอัด 2 mm/min และอัตราเร็วในการอัด 50 mm/min มีลักษณะกราฟคล้ายกราฟความเค้นความเครียดของ Epoxy resin ที่สามารถรับความเค้นได้สูงช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งแตกหัก

ค่าความเค้นจุดคราก การดูดซับพลังงาน และความเค้นพลาโตของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A กับ Epoxy resin มีค่าสูงกว่าโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A แต่ต่ำกว่า Epoxy resin เนื่องจาก Epoxy resin มีความแข็งสูง เมื่อรับความเค้นถึงจุดหนึ่งจึงเกิดการแตกหักจากบริเวณผิวสัมผัสก่อนซึ่งผิวสัมผัสของโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และ Epoxy resin มีการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกลโดยปัจจัยหลักของการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกลคือความเรียบของผิวสัมผัสซึ่ง Epoxy resin มีผิวสัมผัสที่เรียบดังนั้นจึงส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวทางกลระหว่างผิวสัมผัสของก้านโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A กับ Epoxy resin มีค่าต่ำจึงทำให้รอยต่อบริเวณผิวสัมผัสกลายเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และ Epoxy resin มีค่าแตกต่างกันอีกด้วยโดยโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน $23 \times 10^{-6} / K$ [32] Epoxy resin มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน $45-65 \times 10^{-6} / K$ [33] ซึ่งอาจก่อให้เกิดการหดตัวที่แตกต่างกันหลังจากการเย็นตัวของโพลีเอทิลีนบิสฟีนอล A และ Epoxy resin

5.3.4.4 ผลของพอลิเอทิลีนต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก เป็นพลาสติกที่สามารถทำให้หลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็น พลาสติกพวกนี้จึงสามารถนำไปรีไซเคิลได้

IPCs ได้มีการใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC 12 ที่มีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดจึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น

จากรูป 4.7 - 4.12 เมื่อพิจารณารูปภาพความเค้นความเครียดพบว่าวัสดุผสม IPCs ที่มีโพรงอากาศขนาด 12 ppi และ 8 ppi มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากขนาดโพรงอากาศขนาด 12 ppi และ 8 ppi มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยดังตารางที่ 4.2 ซึ่งอาจทำให้มีเนื้ออะลูมิเนียมในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเป็นวัสดุผสม IPCs ขนาดของโพรงอากาศจึงส่งผลน้อยต่อความเค้นที่เพิ่มขึ้นซึ่งความเค้นที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่เข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโพรงอากาศ

เมื่อพิจารณตารางที่ 4.7 พบว่าวัสดุผสม IPCs ที่ใช้พอลิเอทิลีนมีค่าการดูดซับพลังงานมากกว่าค่าการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียม และพอลิเอทิลีน โดยขนาดโพรงอากาศ 12 ppi ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min วัสดุ IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 กับพอลิเอทิลีนมีค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด เนื่องจากโพรงอากาศขนาด 12 ppi มีขนาดเล็ก จึงมีจำนวนก้านโพรงอากาศมากกว่าเมื่อชิ้นงานมีขนาดปริมาตรเท่ากัน ผลของชนิดโฟมอะลูมิเนียมที่ใช้จึงส่งผลต่อวัสดุผสม IPCs ซึ่งวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 มีซิลิกอนกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นจึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ ส่วนขนาดโพรงอากาศ 8 ppi ที่ใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min และ 50 mm/min วัสดุ IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับพอลิเอทิลีนมีค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุดเนื่องจากโพรงอากาศขนาด 8 ppi มีขนาดใหญ่กว่า จำนวนของก้านโพรงอากาศจึงน้อยกว่าขนาด 12 ppi ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จึงสามารถรับความเค้นได้มากกว่า เนื่องจากโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความเหนียวและขยายตัวได้มากกว่า ดังนั้นจึงสามารถดูดซับพลังงานในการอัดได้มากกว่าก่อนที่ก้านโพรงอากาศจะขาดออกจากกัน

5.2.6 ผลของความเร็วในการอัดต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs

จากรูป 4.7 - 4.12 แสดงพฤติกรรมของกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสม IPCs จะเปลี่ยนแปลงไปโดยความเร็วในการอัดสูงจะทำให้พอลิเมอร์มีการตอบสนองในแบบยืดหยุ่นสูง หรือมีค่ามอดุลัสและความเค้นสูงแต่มีค่าการยืดตัวต่ำ ค่าการดูดซับพลังงานจึงต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าอัดวัสดุผสม IPCs อย่างช้าๆ ด้วยความเร็วต่ำก็จะทำให้มีการหดตัวสูงขึ้นและมีค่าความเค้นจุดครากหรือความแข็งแรงต่ำลง ผลดังกล่าวเกิดจากการที่วัสดุผสม IPCs มีการตอบสนองต่อแรงกับเวลาโดยถ้ามี

เวลาน้อย วัสดุผสม IPCs ไม่มีเวลาที่จะส่งผ่านแรงและชิ้นงานไม่สามารถหดตัวได้สูงเมื่อรับความเค้น
จึงแตกหักง่าย แต่ถ้ามีเวลาสูงวัสดุผสม IPCs จะมีเวลาในการส่งผ่านแรงให้ทำให้มีการหดตัวของ
ชิ้นงานสูงขึ้นโดยใช้แรงกดที่ต่ำลง และมีค่าการดูดซับพลังงานที่สูงขึ้น



บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 การผลิตวัสดุผสม IPCs ด้วยวิธีการหล่อแทรกซึมด้วยความดัน สามารถผลิตได้จากโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศ 12 ppi และ 8 ppi โดยโครงสร้างโฟมโดยทั่วไปมีโครงสร้างดี ลักษณะค่อนข้างเหมือนโฟมโพลียูรีเทนต้นแบบ และนำไปผลิตวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับยางธรรมชาติ, ซิลิโคน และ Epoxy resin ในระบบสุญญากาศ และสามารถผลิตวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนได้

6.1.2 โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 จะมีสมบัติทางกลที่ดีกว่า โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เนื่องจากการมีธาตุผสมหลักคือซิลิคอนกระจายตัวในเนื้ออะลูมิเนียมช่วยเพิ่มความแข็งแรงภายในโฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12

6.1.3 วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 จะมีสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน เนื่องจากชนิดของโฟมอะลูมิเนียมไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสมบัติทางกลส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับความเค้นของพอลิเมอร์ที่ใช้เติมเต็มโพรงอากาศ ยกเว้นในวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับพอลิเอทิลีนโดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 ขนาดโพรงอากาศขนาด 12 ppi กับพอลิเอทิลีนมีค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด ส่วนวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ขนาดโพรงอากาศ 8 ppi กับพอลิเอทิลีนมีค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด

6.1.4 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ยางธรรมชาติ และซิลิโคนพบรอยแยกบริเวณผิวสัมผัสของโฟมอะลูมิเนียมและยางธรรมชาติ หรือซิลิโคน เนื่องจากยางธรรมชาติและซิลิโคนเป็นพอลิเมอร์ประเภทโพลีลาสโตเมอร์ซึ่งมีความเหนียวและยืดหยุ่นทำให้ตัดได้ยากจึงอาจเกิดการฉีกขาดระหว่างการตัดชิ้นงาน

6.1.5 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้ Epoxy resin ไม่พบรอยแยกบริเวณผิวสัมผัสของโฟมอะลูมิเนียมและ Epoxy resin เนื่องจาก Epoxy resin จัดอยู่ในพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติงที่มีความแข็งแรงและแข็งแรงหลังจากเย็นตัว เช่นเดียวกับวัสดุผสม IPCs ที่ใช้พอลิเอทิลีนซึ่งจัดอยู่ในพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่มีความแข็งแรงหลังการเย็นตัว

6.1.6 สมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมอะลูมิเนียม แต่จะมีค่าที่แตกต่างกันไปตามชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้โดยวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โฟมอะลูมิเนียมกับยางธรรมชาติจะมีค่าความเค้นจุดคราก และการดูดซับพลังงานที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ เช่นเดียวกับ

วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนเนียมกับ Epoxy resin ที่มีค่าความเค้นจุดครากและการดูดซับพลังงานต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับ Epoxy resin เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันของโพลีเอทิลีนเนียมและพอลิเมอร์ที่ใช้ และจุดบัพพองภายในชิ้นงาน

6.1.7 สมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนเนียมกับซิลิโคน และวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนเนียมกับพอลิเอทิลีนส่วนใหญ่จะมีค่าความเค้นจุดคราก และค่าการดูดซับพลังงานที่สูงขึ้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงกันระหว่างโพลีเอทิลีนเนียมและพอลิเมอร์ที่ใช้

6.1.8 โครงสร้าง และขนาดโพรงอากาศของโพลีเอทิลีนเนียมไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม IPCs เนื่องจากโพรงอากาศขนาด 12 ppi มีโพรงอากาศขนาด 8 ppi มีขนาดใกล้เคียงกันสูง ดังนั้นสมบัติทางกลจึงมีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังมีโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดจึงไม่ส่งผลต่อค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น ยกเว้นในวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนเนียมกับพอลิเอทิลีนโดยโพรงอากาศขนาด 12 ppi วัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนเนียมผสมเกรด ADC12 มีค่าการดูดซับพลังงานสูงขึ้นไปกว่าโพลีเอทิลีนเนียมและพอลิเอทิลีน และวัสดุผสม IPCs ที่ใช้โพลีเอทิลีนเนียมบริสุทธิ์กับพอลิเอทิลีนโพรงอากาศขนาด 8 ppi มีค่าการดูดซับพลังงานมากกว่าโพลีเอทิลีนเนียมและพอลิเอทิลีน

6.1.9 ความเร็วที่ใช้ในการอัดส่งผลต่อสมบัติทางกลเมื่อใช้ความเร็วในการอัด 50 mm/min ส่งผลต่อวัสดุผสม IPCs ทำให้วัสดุผสม IPCs ไม่มีเวลาที่ส่งผ่านแรงเมื่อรับความเค้นจึงแตกหักง่าย แต่ถ้าใช้ความเร็วในการอัด 2 mm/min วัสดุผสม IPCs จะมีเวลาในส่งผ่านแรงทำให้มีการหดตัวของชิ้นงานได้สูงขึ้นดังนั้นจึงใช้แรงกดต่ำลงแต่มีค่าการดูดซับพลังงานที่สูงขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การผลิตด้วยกระบวนการหล่อแทรกซึมด้วยความดันมีข้อจำกัดคือกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากไม่สามารถผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ ชิ้นงานผลิตได้จึงมีปริมาณน้อย ถ้าสามารถผลิตชิ้นงานได้ขนาดใหญ่และปริมาณสูงกว่านี้ ผลการทดลองที่ได้ก็จะชัดเจนสูงขึ้น

6.2.2 กระบวนการผลิตวัสดุผสม IPCs สามารถทำได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ในการผลิต และความไม่พร้อมของเครื่องมือ เช่นเครื่องสุญญากาศ เตอบอบ เครื่องมือตัด ถ้ามีเครื่องมือที่ดีกว่านี้จะส่งผลให้การทดลองได้ผลที่ชัดเจนสูงขึ้น

6.2.3 การทำความสะอาดชิ้นงานโพลีทำได้ยาก และใช้เวลานาน ซึ่งทางโรงงานที่ให้ความอนุเคราะห์ผลิตชิ้นงานโพลีนั้น แนะนำให้ทำความสะอาดด้วยตู้ฉีดน้ำ แต่ตู้ของทางโรงงานนั้นไม่สามารถปรับแรงดันน้ำของตู้ฉีดน้ำได้ ทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ต้องนำกลับมาทำความสะอาดเองซึ่งอาจมีเศษปูนตกค้างบ้างดังนั้นจึงควรมีเครื่องที่เหมาะสม

รายการอ้างอิง

1. Ashby M. , et al., *Metal foams: a design guide*. 2002: Butterworth-Heinemann.
2. Banhart, J., *Manufacture characterization and application of cellular metals and metal foams*. *Progress in Materials Science*, 2001. 46(6): p. 559-632.
3. *Metal Foam*. http://www.selee.com/Selee_Corporation_Metal_Foam.php.
4. Andrew, K., *Porous Metals and Metal Foams Made from Powders*. Manufacturing Division. University of Nottingham: Nottingham,UK.
5. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, สารระนำรู้ : รู้จักโฟมโลหะ (*metal foam*). <http://www.mtec.or.th>.
6. Assavavisitchai, S., *Production of aluminium foam by powder metallurgical route*. 2001.
7. Conde, Y., *Replication Processing of Highly Porous Materials*. *Advance Engineering Material* 2006. 8(9): p. 795-803.
8. Esmaeelzadeh, S., *Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi7 foam*. *Materials Science and Engineering* 2006. A(424): p. 290-299.
9. *Al – Si phase diagram*, <http://www.al-mg.com/en/Al-50Si.html>, Editor. 2012.
10. Horn, V., *Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams Aluminium*. American Society for Metals. Vol. 1. 1967.
11. Matthews, F., *Composite Materials : Engineering and Science*. 1994, Chapman & Hall.
12. Soboyejo, W., *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization and Applications*. 2006, CRC Press.
13. Simone, A., *Aluminum Foams Produced by Liquid-State Process*. *Acta mater* 46(9): p. 3109 – 3123.
14. Gibson, L., *Cellular Solids, Structure and Properties*. 1997.
15. San, C.M., *Uniaxial deformation of open-cell aluminum foam : the role of internal damage*. *Acta Materialia*, 2004. 52: p. 2895 – 2902.

16. San, C.M., *Deformation of Open-Cell Aluminum Foam*. Acta Materialia, 2001. 49: p. 3959 – 3969.
17. Karsten, S., *Aluminum foam-polymer hybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing*. International Journal of Solids and Structures, 2008. 45: p. 5627–5641.
18. Andrews, E., *Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results*. International Journal of Mechanical Sciences, 2001. 43: p. 701 – 703.
19. Nihad, D., *Characterization of aluminum foam-polypropylene interpenetrating phase composites: Flexural test results*. Mechanics of Materials, 2010. 42: p. 134-141.
20. นันทวัฒน์, ช., โครงสร้างเหล็กผสมแนวใหม่. วิศวกรรมสาร มช, 2538. 1: p. 93-100.
21. Satoshi, K., *Compressive mechanical properties of closed-cell aluminum foam-polymer composites*. Composites: Part B, 2014. 64: p. 43-49.
22. Liu, Y., *Compressive behavior and energy absorption of metal porous polymer composite with interpenetrating network structure*. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2006. 16: p. 439-443.
23. Ziyang, Y., *Modeling of the mechanical properties of a polymer-metal foam hybrid*. Procedia Materials Science, 2014. 4: p. 215-219.
24. Rahul, J., *Processing, compression response and finite element modeling of syntactic foam based interpenetrating phase composite (IPC)*. Materials Science and Engineering, 2009. A(499): p. 507-517.
25. รศ.แมน, อ., วัสดุวิศวกรรม.
26. พงษ์ธร, ช., ยาง ชนิดและสมบัติการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2548. 25-29.
27. ผศ.ดร.จตุพร, ว., ปฏิบัติการตัดแปรรูปโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์. 12: p. 177-178.
28. Materials, A., *Silicone Rubber*. <http://www.azom.com/properties>.
29. Matbase. <https://www.matbase.com/>.
30. Balsea, *Coefficient of Thermal Expansion for Various Materials at Different Temperatures*. www.balsea.com.
31. *engineering tool box*. http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html.

32. Plastics, P., *Thermal Properties of Plastic Materials*.
www.professionalplastics.com.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

ตารางที่ ก. 1 แสดงข้อมูลของชิ้นงานทดสอบ

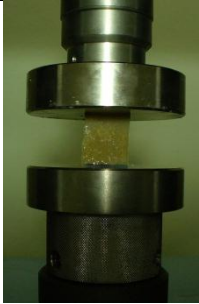
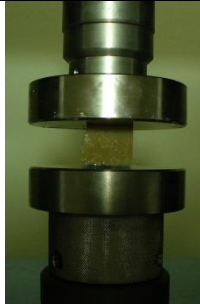


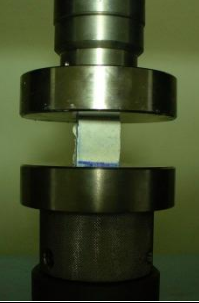
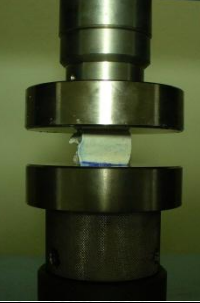
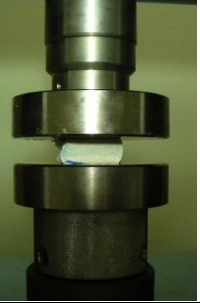
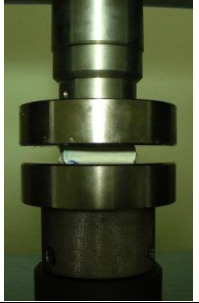
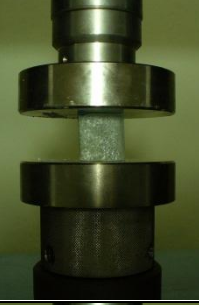
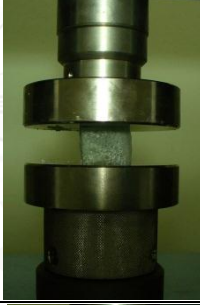
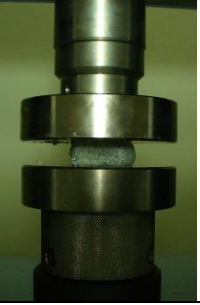


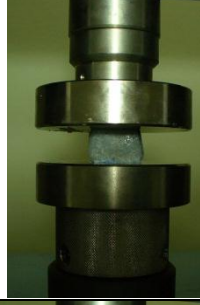



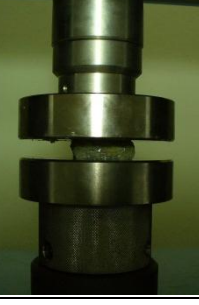
ชนิดอะลูมิเนียม	ชนิดพอลิเมอร์	ขนาด	ความเร็ว	ความหนาแน่น (D) (g/cm^3)	ความหนา (cm)	ความกว้าง (cm)	ความสูง (LO) (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm^3)
PURE	NR	12 ppi	2 mm/min	6.12	0.25	2.66	3.00	12.20	2.00
PURE	Silicone			12.40	0.25	2.71	3.00	25.20	2.03
PURE	Resin			8.51	0.25	2.73	3.00	17.40	2.05
PURE	PE			5.75	0.25	2.88	3.00	12.30	2.14
ADC12	NR			6.71	0.25	2.51	3.20	13.40	2.00
ADC12	Silicone			10.03	0.25	2.48	2.90	17.80	1.78
ADC12	Resin			6.81	0.25	2.86	3.10	14.90	2.19
ADC12	PE			8.37	0.25	2.47	2.90	14.90	1.78
PURE	NR	8 ppi	2 mm/min	7.33	0.25	2.55	3.10	14.50	1.98
PURE	Silicone			12.02	0.25	2.61	2.90	22.40	1.86
PURE	Resin			9.42	0.25	2.61	3.20	19.50	2.07
PURE	PE			4.85	0.25	2.74	3.10	10.30	2.13
ADC12	NR			7.41	0.25	2.50	3.10	14.30	1.93
ADC12	Silicone			11.01	0.25	2.51	2.90	20.10	1.83
ADC12	Resin			11.11	0.25	2.88	3.40	27.30	2.46
ADC12	PE			7.08	0.25	2.94	3.40	17.80	2.51
PURE	NR	12 ppi	50 mm/min	5.39	0.25	2.54	3.20	10.90	2.02
PURE	Silicone			10.84	0.25	2.40	2.60	16.90	1.56
PURE	Resin			7.60	0.25	2.83	3.20	17.10	2.25
PURE	PE			4.58	0.25	2.78	3.20	10.10	2.20
ADC12	NR			5.40	0.25	2.54	3.20	10.90	2.02
ADC12	Silicone			11.99	0.25	2.48	3.30	24.40	2.04
ADC12	Resin			13.82	0.25	2.57	3.10	27.50	1.99
ADC12	PE			8.26	0.25	2.75	3.10	17.40	2.11

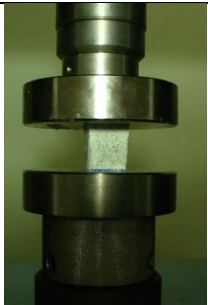



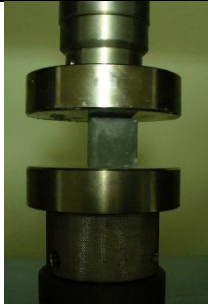
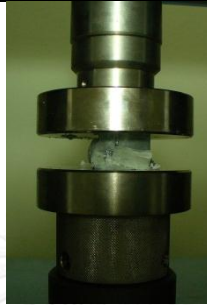

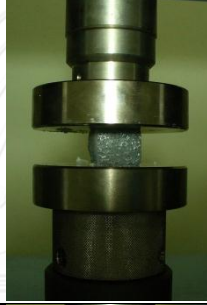
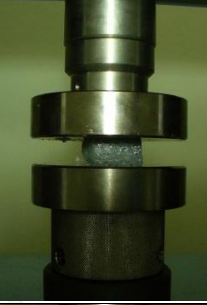

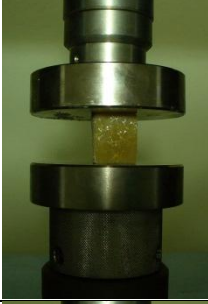
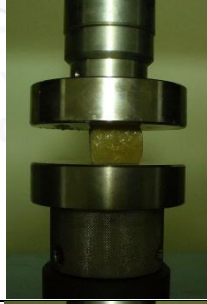
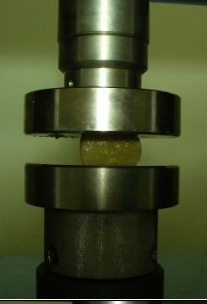
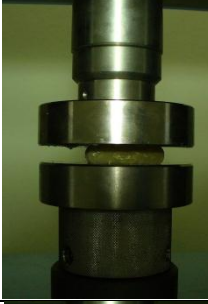
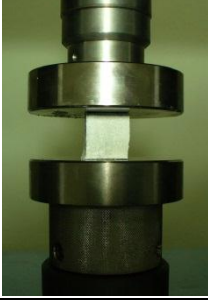
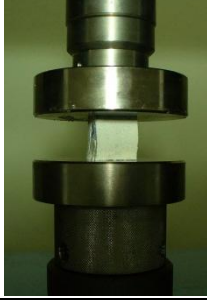
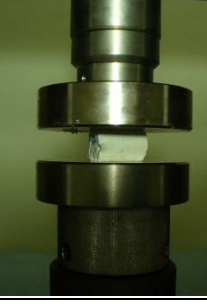
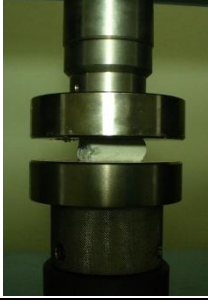
ชนิดอะลูมิเนียม	ชนิดพอลิเมอร์	ขนาด	ความเร็ว	ความหนาแน่น (D) (g/cm ³)	ความหนา (cm)	ความกว้าง (cm)	ความสูง (LO) (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm ³)
PURE	NR	8 ppi	50 mm/min	6.75	0.25	2.54	3.40	14.40	2.13
PURE	Silicone			11.24	0.25	2.80	3.10	24.40	2.17
PURE	Resin			7.98	0.25	2.59	32	16.60	2.08
PURE	PE			7.39	0.25	2.45	32	14.50	1.96
ADC12	NR			7.84	0.25	2.55	32	15.90	2.03
ADC12	Silicone			11.42	0.25	2.88	31	25.80	2.26
ADC12	Resin			14.06	0.25	2.67	30	28.20	2.01
ADC12	PE			6.50	0.25	2.59	33	13.70	2.11

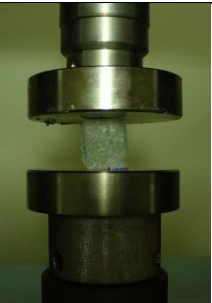
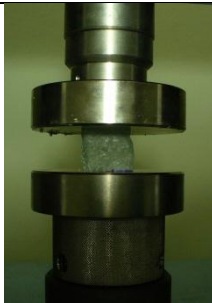

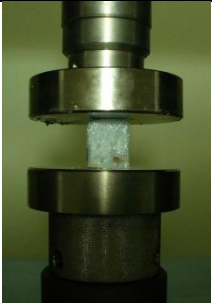
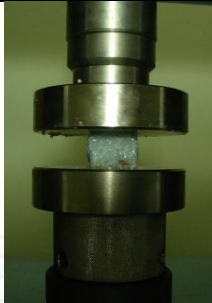
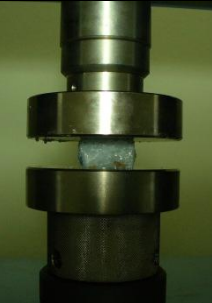

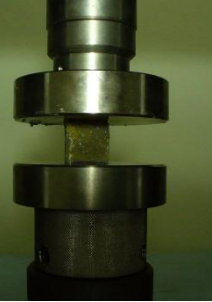
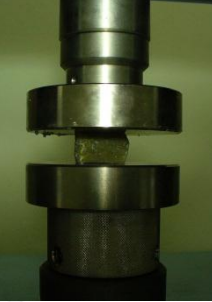
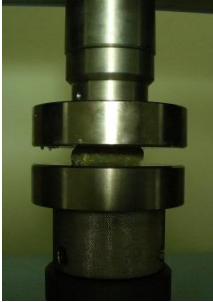
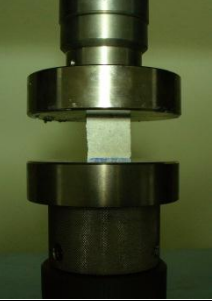

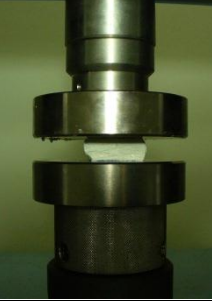
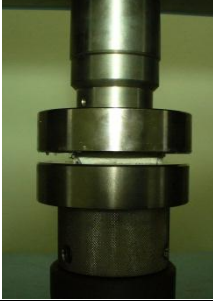
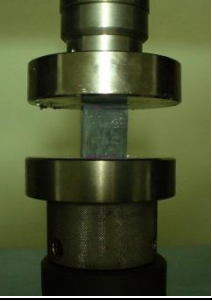
ชนิดวัสดุ	ขนาด	ความเร็ว	ความหนาแน่น (D) (g/cm ³)	ความหนา (cm)	ความกว้าง (cm)	ความสูง (LO) (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm ³)
PURE	12 ppi	2 mm/min	0.21	0.25	3.19	36	0.60	2.87
ADC12			0.39	0.25	2.83	33	0.90	2.31
PURE	8 ppi		0.46	0.25	2.46	32	0.90	1.98
ADC12			0.44	0.25	2.84	32	1.00	2.28
NR	-		6.41	0.25	2.77	31	13.90	2.17
Silicone	-		12.25	0.25	2.94	31	28.30	2.31
Resin	-		10.69	0.25	2.72	31	22.50	2.10
PE	-		4.72	0.25	3.08	32	11.70	2.48
PURE	12 ppi	50 mm/min	0.18	0.25	2.76	40	0.50	2.73
ADC12			0.30	0.25	2.96	31	0.70	2.32
PURE	8 ppi		0.53	0.25	2.54	30	1.00	1.88
ADC12			0.41	0.25	2.82	31	0.90	2.20
NR	-		9.56	0.25	2.45	34	20.20	2.11
Silicone	-		6.22	0.25	2.90	31	13.90	2.23
Resin	-		7.87	0.25	3.02	31	18.30	2.33
PE	-		5.12	0.25	2.95	32	12.00	2.34

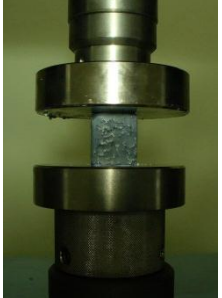


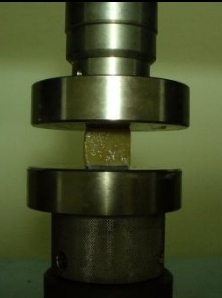
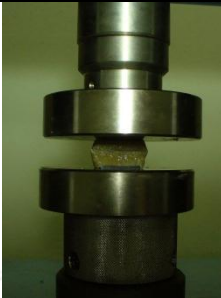
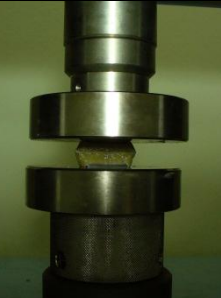
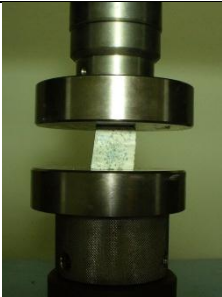
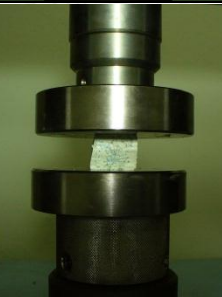
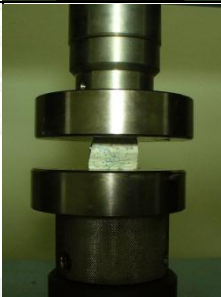
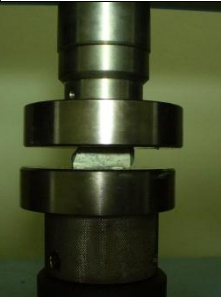

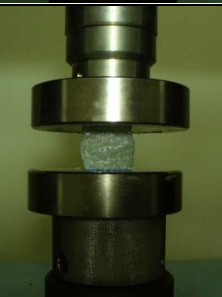
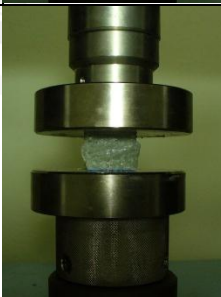

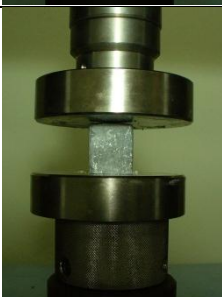

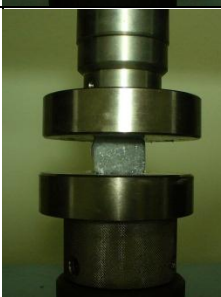
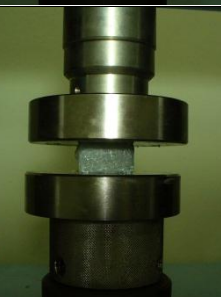
ลักษณะของโฟมอะลูมิเนียมขณะรับแรงอัด


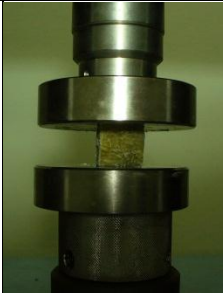
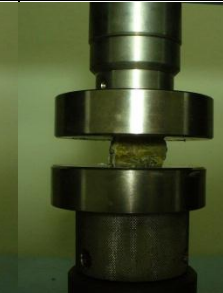
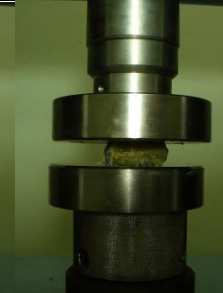
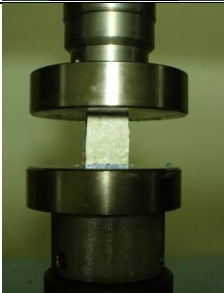
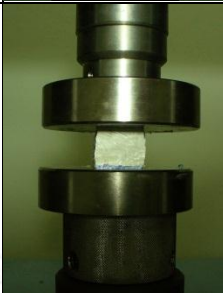
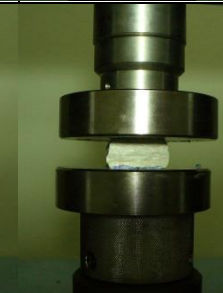
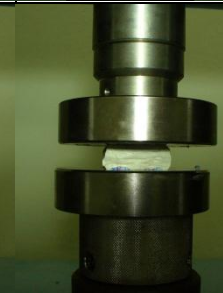

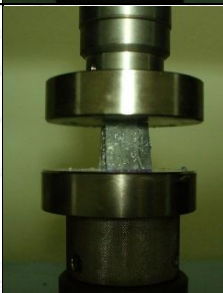

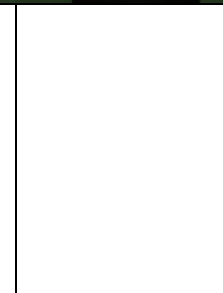
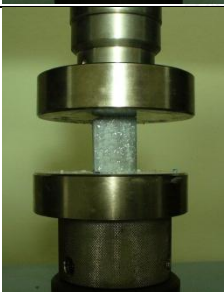
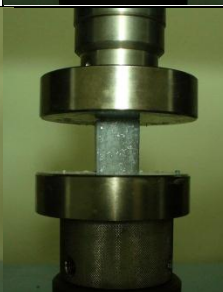
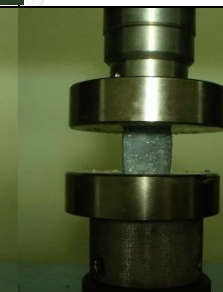
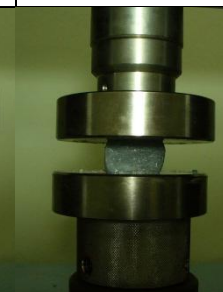
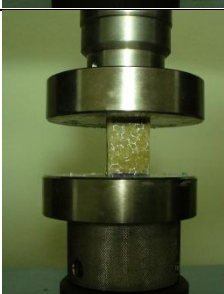
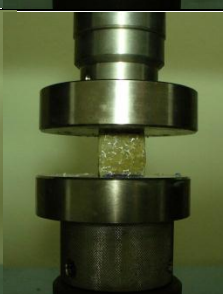
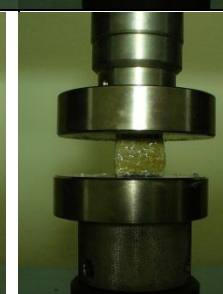
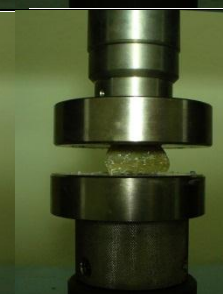
ตารางที่ ก. 2 ลักษณะการพังตัวของชิ้นงานทดสอบที่ความเครียด 0% 25% 50% และ 75%


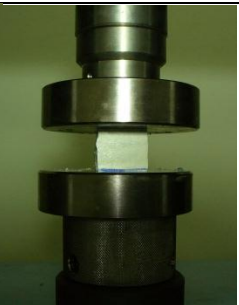

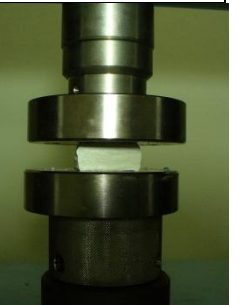
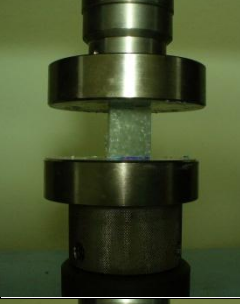

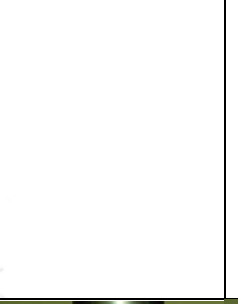
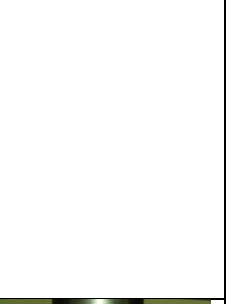



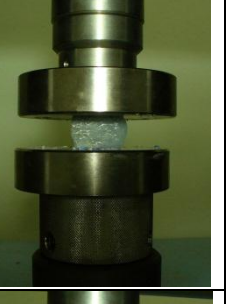

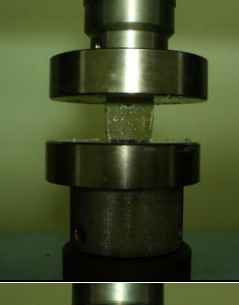
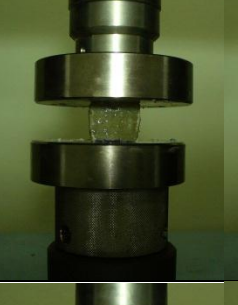
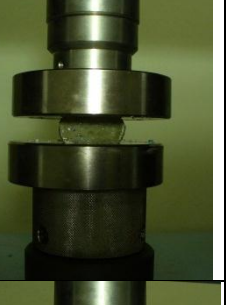

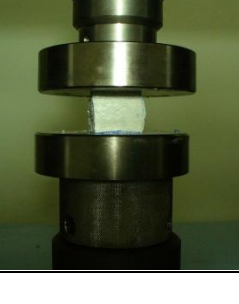
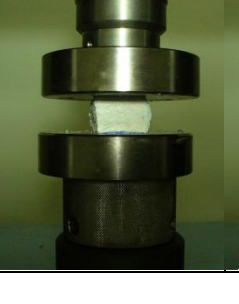

ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
Pure-NR 12 ppi, 2 mm/s				
Pure-silicone 12 ppi, 2 mm/s				
Pure-Epoxy resin 12 ppi, 2 mm/s				
Pure-PE 12 ppi, 2 mm/s				
ADC 12-NR 12 ppi, 2 mm/s				




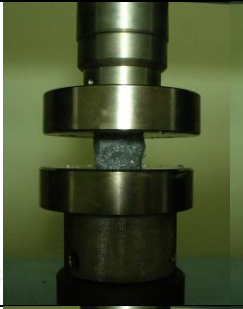
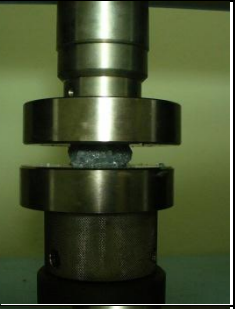

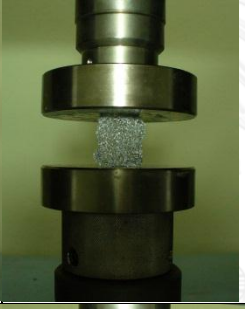
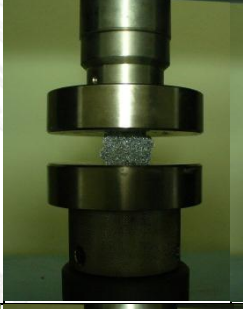



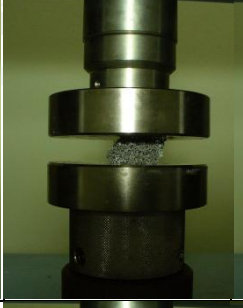
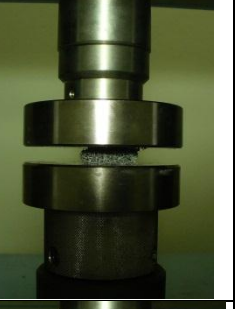

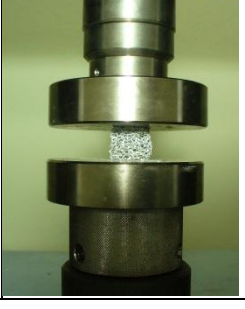
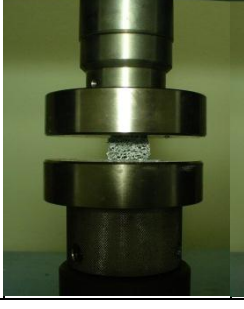
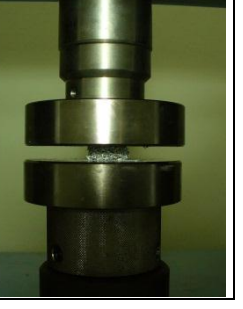
ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
ADC 12- silicone 12 ppi, 2 mm/s				
ADC 12- Epoxy resin 12 ppi, 2 mm/s				
ADC 12-PE 12 ppi, 2 mm/s				
Pure-NR 8 ppi, 2 mm/s				
Pure- silicone 8 ppi, 2 mm/s				


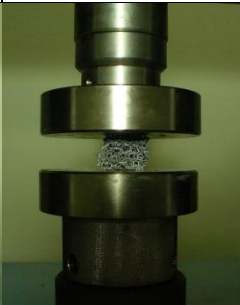
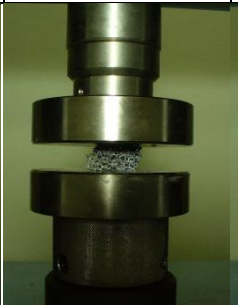
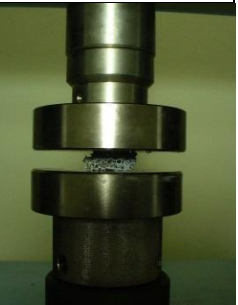


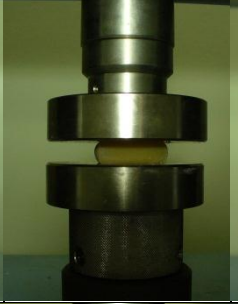
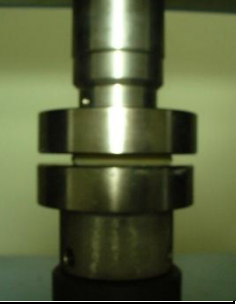
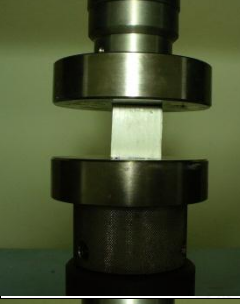


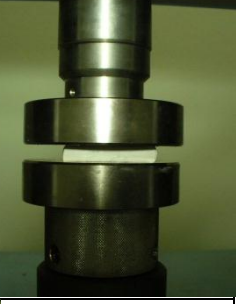

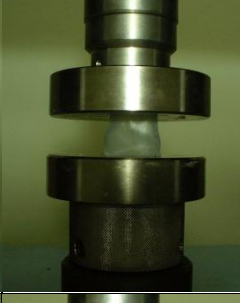
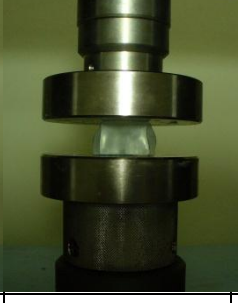
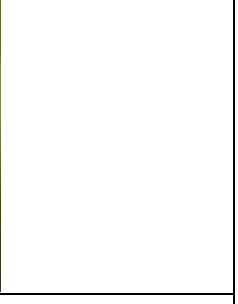
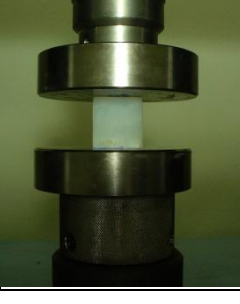
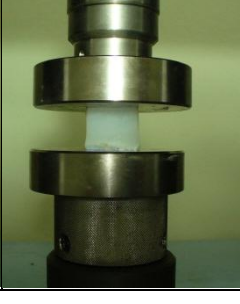
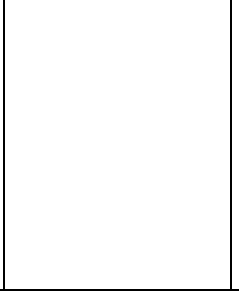
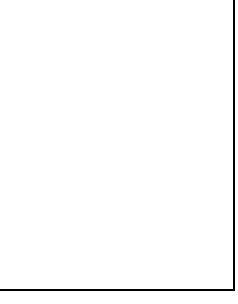
ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
Pure-Epoxy resin 8 ppi, 2 mm/s				
Pure-PE 8 ppi, 2 mm/s				
ADC 12-NR 8 ppi, 2 mm/s				
ADC 12-silicone 8 ppi, 2 mm/s				
ADC 12-Epoxy resin 8 ppi, 2 mm/s				



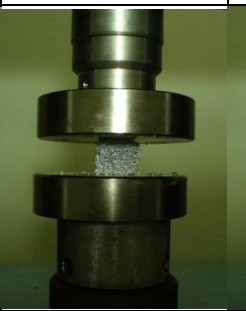


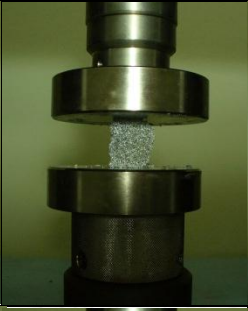

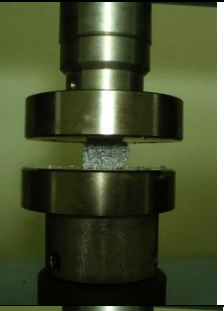
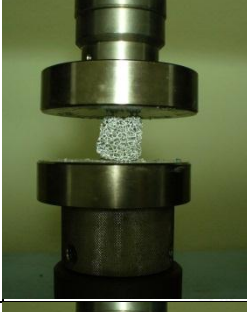

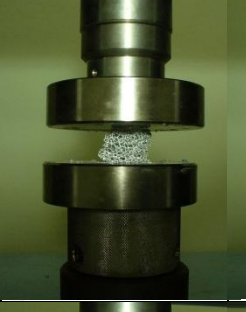
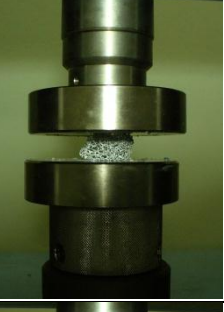
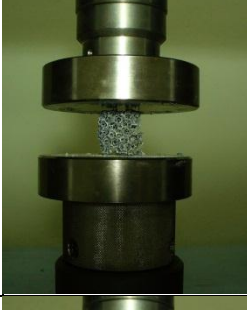
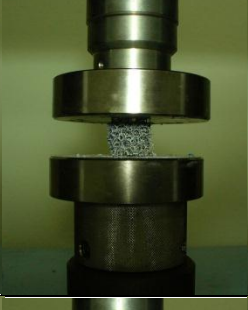
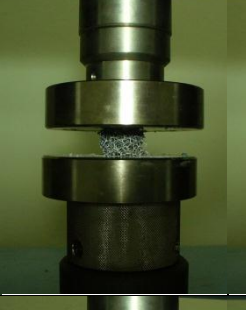
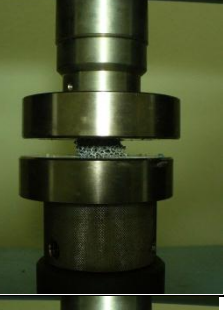
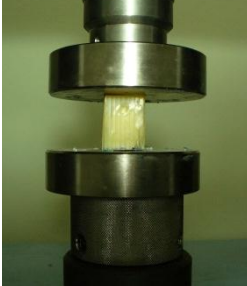
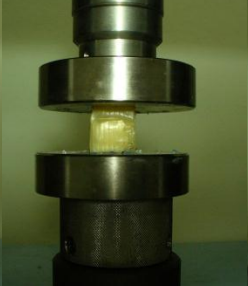
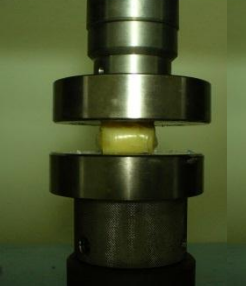

ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
ADC 12-PE 8 ppi, 2 mm/s				
Pure-NR 12 ppi, 50 mm/s				
Pure-silicone 12 ppi, 50 mm/s				
Pure-Epoxy resin 12 ppi, 50 mm/s				
Pure-PE 12 ppi, 50 mm/s				



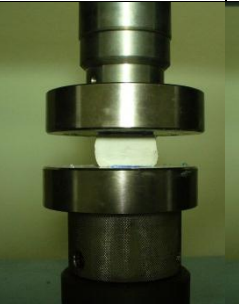
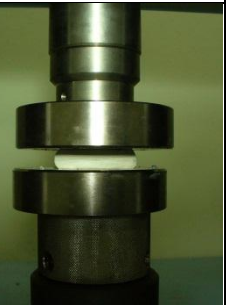


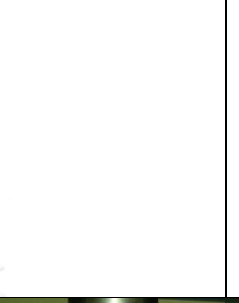
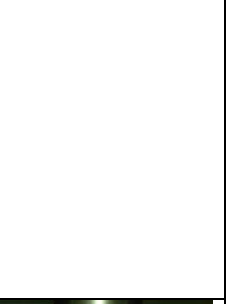
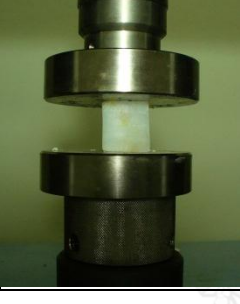
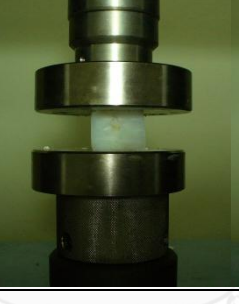
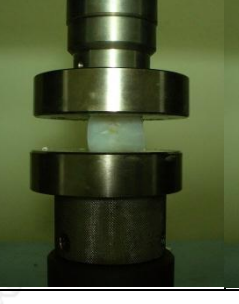
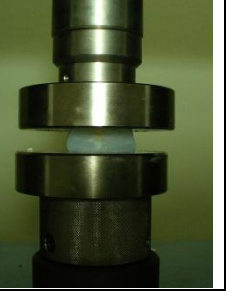
ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
ADC 12-NR 12 ppi, 50 mm/s				
ADC 12- silicone 12 ppi, 50 mm/s				
ADC 12- Epoxy resin 12 ppi, 50 mm/s				
ADC 12-PE 12 ppi, 50 mm/s				
Pure-NR 8 ppi, 50 mm/s				

ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
Pure-silicone 8 ppi, 50 mm/s				
Pure-Epoxy resin 8 ppi, 50 mm/s				
Pure-PE 8 ppi, 50 mm/s				
ADC 12-NR 8 ppi, 50 mm/s				
ADC 12-silicone 8 ppi, 50 mm/s				

ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
ADC 12- Epoxy resin 8 ppi, 50 mm/s				
ADC 12-PE 8 ppi, 50 mm/s				
Pure, 12 ppi, 2 mm/s				
ADC 12, 12 ppi, 2 mm/s				
Pure, 8 ppi, 2 mm/s				

ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
ADC 12, 8 ppi, 2 mm/s				
NR, 2 mm/s				
Silicone, 2 mm/s				
Epoxy resin, 2 mm/s				
PE, 2 mm/s				

ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
Pure, 12 ppi, 50 mm/s				
ADC 12, 12 ppi, 50 mm/s				
Pure, 8 ppi, 50 mm/s				
ADC 12, 8 ppi, 50 mm/s				
NR, 50 mm/s				

ชิ้นงาน	0% Strain	25% Strain	50% Strain	75% Strain
Silicone, 50 mm/s				
Epoxy resin, 50 mm/s				
PE, 50 mm/s				

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวกัญมูหตา อังอำนวยศิริ
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531
ที่อยู่	286/33 ถ.ศรีสุริยวงศ์ อ.เมือง จ.ราชบุรี 70000
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนนารีวิทยา จังหวัดราชบุรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและ วิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
โทรศัพท์	09-57099463