

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของเรซิน โมลด์เพื่อใช้ในการสืบหาสารเทียบเคียงที่ผลิตได้ในประเทศไทยเพื่อนำมาใช้เตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก เทนการ ใช้เรซิน โมลด์ รวมถึงทดสอบความสามารถในการใช้งานของสารเทียบเคียงที่สืบหาได้ ด้วยการทดสอบ โดยการขึ้นรูปของสารเทียบเคียงกับพลาสติกที่อัตราส่วน 10:90 และพิจารณาสารเทียบเคียงที่มีสมบัติที่ดีที่สุด เมื่อได้สารเทียบเคียงที่เหมาะสมที่สุดแล้วจึงทำการหาอัตราส่วนระหว่างสารเทียบเคียงกับพลาสติกที่เหมาะสมเพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีคุณภาพในการขึ้นรูปที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

#### 4.1 เรซินโมลด์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ หน้าที่ของแต่ละองค์ประกอบ รวมทั้งสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเรซิน โมลด์ เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับพลาสติก โมลด์ และวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้

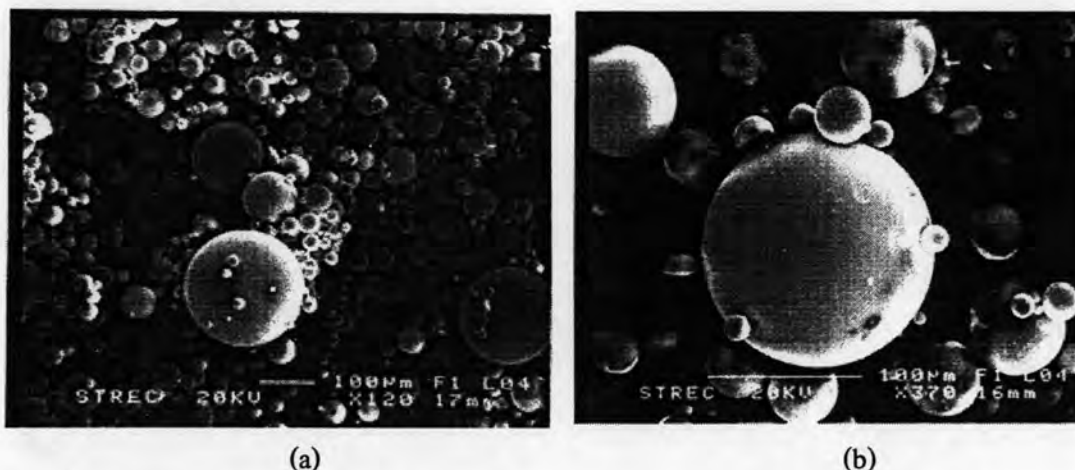
##### 4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเรซินโมลด์

องค์ประกอบของเรซิน โมลด์นั้น ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักทั้งหมด 4 ชนิด ซึ่งเป็นของเหลว 3 ชนิด คือ สาร A สาร X และน้ำ และเป็นของแข็ง 1 ชนิดที่เรียกว่า Powder (สาร P) โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สารที่เป็นของแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) ในส่วนสารที่เป็นของเหลวนั้นได้ทำการวิเคราะห์เฉพาะสาร A และ สาร X เท่านั้น ซึ่งนอกจากจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แล้วยังได้ทำการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS)

##### 4.1.1.1 สาร P

จากการวิเคราะห์ลักษณะของสาร P ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.1 พบว่า สาร P มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 8 – 225  $\mu\text{m}$  และเมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ สาร P ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุในโครงสร้างจุลภาคชนิดกระเจิงพลังงานรังสีเอกซ์ (energy dispersive X-

ray Spectrometer :EDS) พบเพียง คาร์บอน และ ออกซิเจนเท่านั้น จึงทำให้คาดเดาได้ว่า สาร P น่าจะเป็นสารอินทรีย์ ประเภทไฮโดรคาร์บอน แต่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ไม่สามารถแสดงองค์ประกอบของธาตุไฮโดรเจนภายในโมเลกุลได้ ทำให้ยังไม่สามารถสรุปชนิดของสาร P ได้

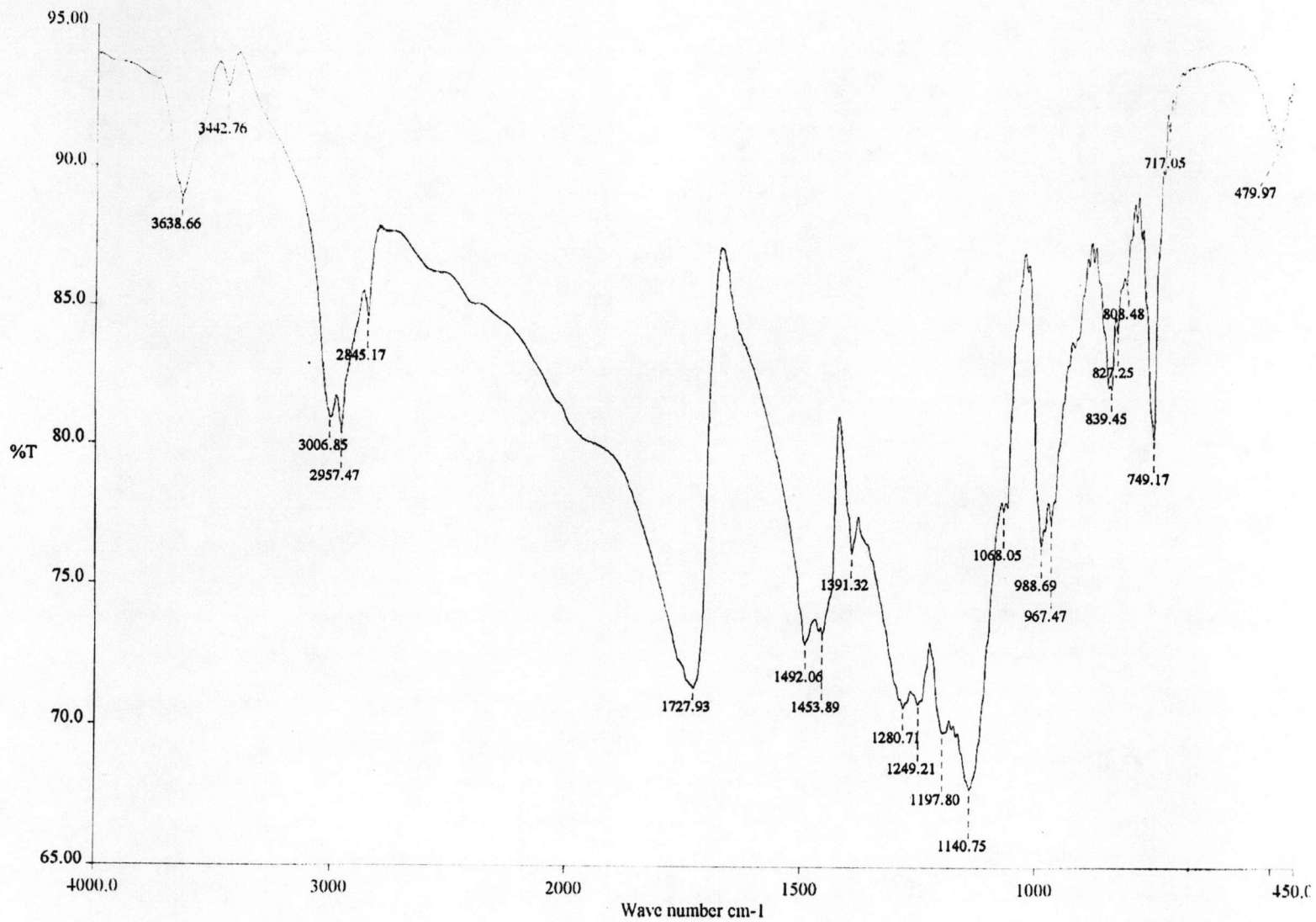


รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสาร P (a) กำลังขยาย 120 เท่า (b) กำลังขยาย 370 เท่า

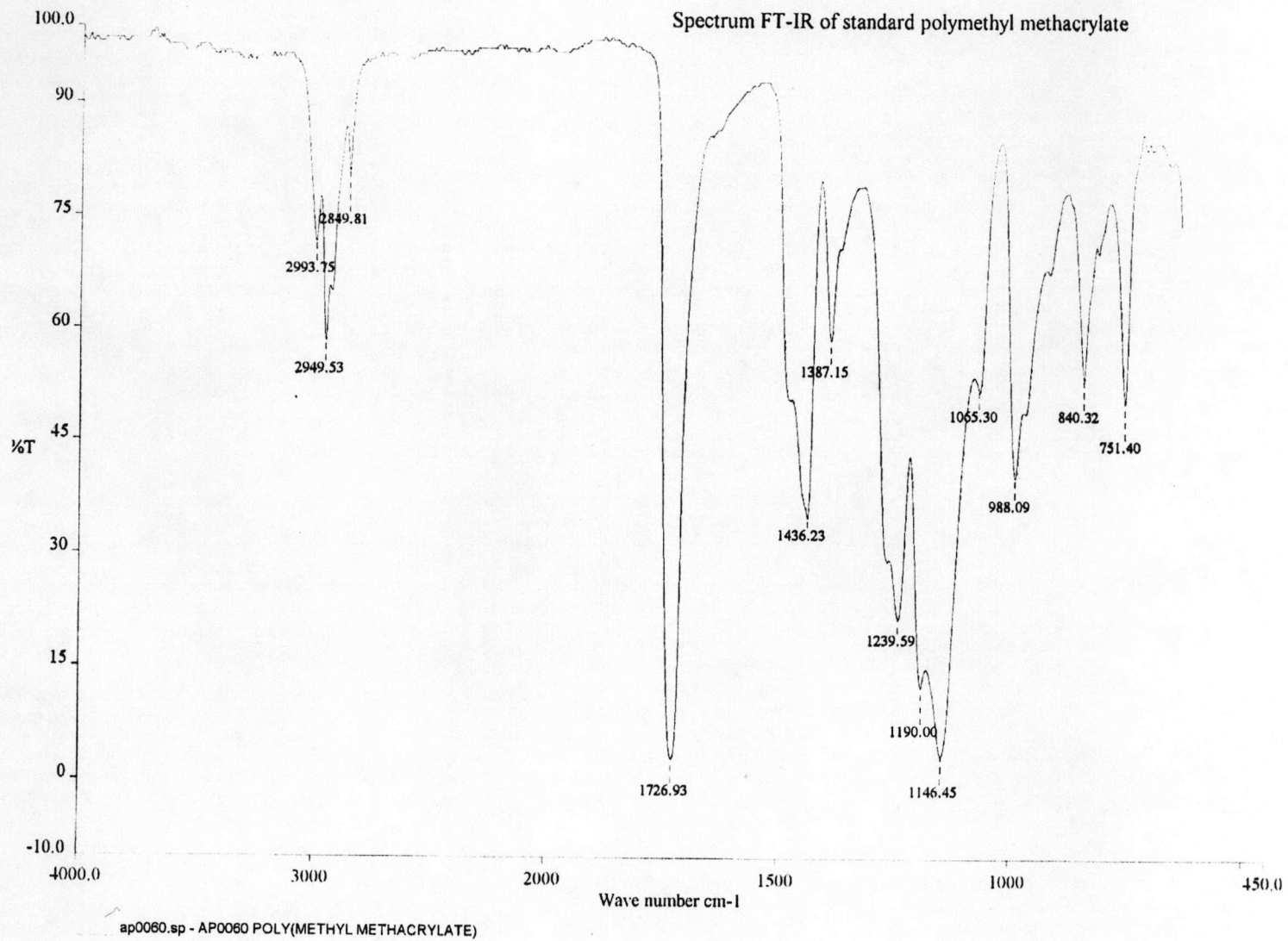
เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และชนิดของสาร P งานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิค FT-IR ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 4.2 และตำแหน่งของพีคต่างๆ บนอินฟราเรดสเปกตรัมของสาร P แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 จากการเปรียบเทียบลักษณะ FT-IR สเปกตรัมของสาร P กับสเปกตรัมอ้างอิงจากฐานข้อมูล (รูปที่ 4.3) พบว่า สเปกตรัมของสาร P มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงและสอดคล้องกับสารประเภทพอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate:PMMA) และเมื่อพิจารณาดำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันของสาร P เปรียบเทียบกับสูตรโครงสร้างของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (รูปที่ 4.4) นั้นจะพบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1727\text{ cm}^{-1}$  แสดงหมู่ฟังก์ชันของ C=O และตำแหน่งที่  $1197, 1280\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะ C-O ในฟังก์ชันของ O-CH<sub>3</sub> และ O=C-O ตามลำดับ และนอกจากนี้ยังพบว่ามีการประกอบอื่นๆ ผสมอยู่ด้วยเล็กน้อยเพราะปรากฏหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งไม่สามารถระบุได้ เช่น พันธะระหว่าง O-H ที่ตำแหน่ง  $3,631\text{ cm}^{-1}$

จากนั้นนำสาร P มาวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight : Mw) ด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (gel permeation chromatography(GPC)) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของสาร P มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 130,157

รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของสาร P

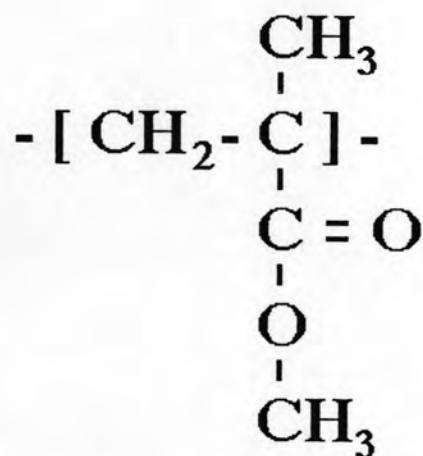
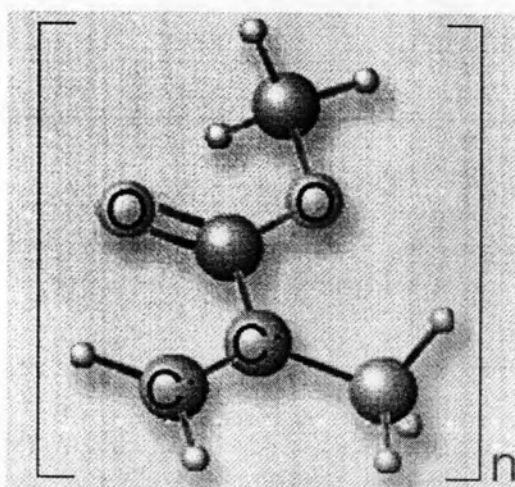


รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมมาตรฐานของพอลิเมทิลเมทาคริลเลต



ตารางที่ 4.1 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสาร P

หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )
Overtone of C=O	3442
Aliphatic C-H stretching	3006, 2957, 2845
C=O stretching of O=C-O	1727
CH <sub>2</sub> and CH <sub>3</sub> bending	1492, 1453
CH <sub>3</sub> bending	1391
C-O stretching of O=C-O	1280, 1249
C-O stretching of O-CH <sub>3</sub>	1197, 1140
O-H stretching	3631



รูปที่ 4.4 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

#### 4.1.1.2 สาร A

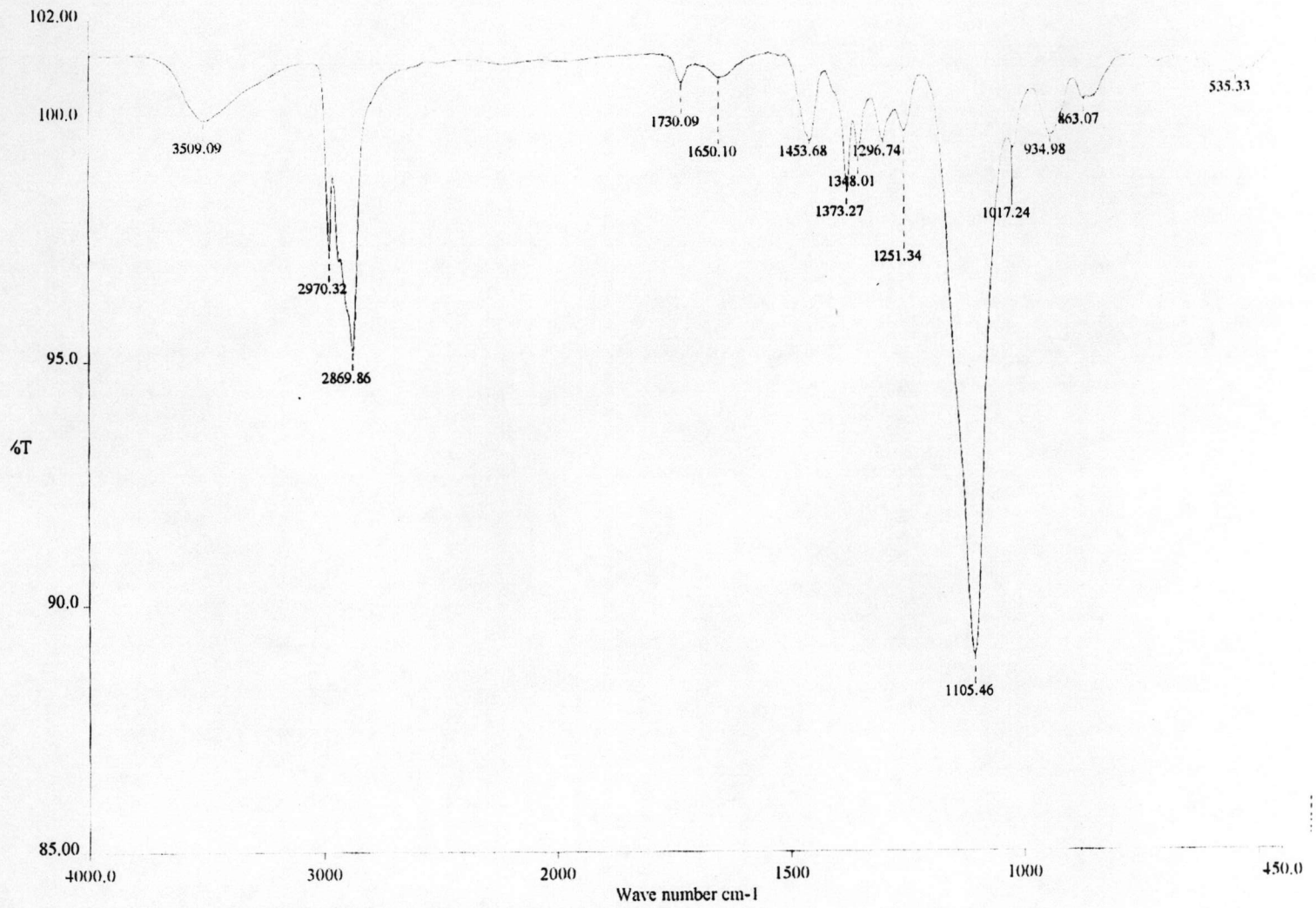
ในส่วนของสาร A ได้ทำการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยเทคนิค FT-IR โดยสเปกตรัมของสาร A ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และมีหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนสเปกตรัมดังตารางที่ 4.2 แต่เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล พบว่าในสารที่อยู่ในฐานะข้อมูลนั้นไม่มีลักษณะของสเปกตรัมใกล้เคียงกับผลที่วิเคราะห์ได้ จึงต้องนำสารไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี (gas chromatography / mass spectrometry (GC/MS) ซึ่งเทคนิคนี้จะเป็นการแยกสารที่เป็นองค์ประกอบด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี และจากนั้นจะนำสารที่แยกออกมาเข้าวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี โดยเทคนิคนี้สามารถบ่งบอกชนิดของสารที่เป็นองค์ประกอบ และปริมาณของแต่ละองค์ประกอบ ทั้งนี้จากการวิเคราะห์พบว่าสาร A มีองค์ประกอบทั้งหมด 3 ชนิด โดยปริมาณของแต่ละองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันของสาร A

หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )
O-H stretching	3509
Aliphatic C-H stretching	2970, 2869
CH <sub>2</sub> and CH <sub>3</sub> bending	1453
CH <sub>3</sub> bending	1373
C-O-C stretching of C-O-C	1105, 1017
C-H deformation (out-of-plane)	934, 863

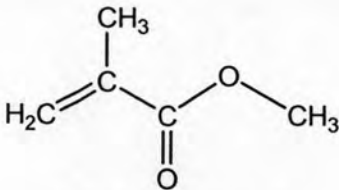
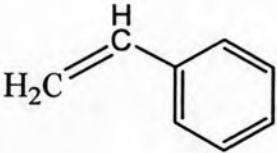
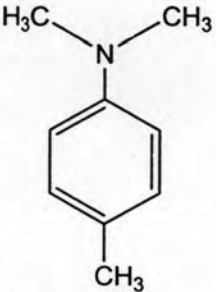
เมื่อพิจารณาโครงสร้างของสารต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของสาร A จะเห็นได้ว่ามีลักษณะโครงสร้างสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค FT-IR กล่าวคือจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS พบว่าสาร A มีองค์ประกอบของเมทิลเมทาคริเลตมากที่สุด คือสูงถึง ร้อยละ 62.26 โดยเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR จะเห็นตำแหน่งของเลขคลื่นที่ 1105, 1017 cm<sup>-1</sup> ที่แสดงพันธะระหว่าง C-O-C ซึ่งเป็นพันธะภายในของเมทิลเมทาคริเลต สำหรับสารอื่น เช่น เบนซีน ไม่นั้น เนื่องจากมีปริมาณน้อย จึงไม่สามารถตรวจวิเคราะห์พบตำแหน่งของพันธะ C-N ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารนี้ได้

รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของสาร A



c:\pel\_data\spectra\mt.48\mt268648\sample\_a\_2686.sp - sample A (MTEC No. 2686/48)

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของสาร A จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี /แมสสเปกโตรเมตรี

จำนวน องค์ประกอบ	สารที่เป็นองค์ประกอบของสารตัวอย่าง	
	ชื่อสารและโครงสร้างทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
3	 <p>Methyl methacrylate</p>	62.26
	 <p>Ethylbenzene</p>	34.69
	 <p>Benzenamine</p>	3.05

#### 4.1.1.3 สาร X

ในส่วนของสาร X นั้น ได้ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสาร A กล่าวคือวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นด้วยเทคนิค FT-IR (รูปที่ 4.6 และตาราง 4.4 ) และเมื่อนำไปเทียบกับฐานข้อมูลพบว่าไม่สามารถบ่งบอกชนิดของสารได้เนื่องจากเป็นสารที่มีองค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิด จึงต้องนำสาร X ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี (gas chromatography / mass spectrometry (GC/MS) เช่นเดียวกัน จากการวิเคราะห์สาร X พบว่ามีองค์ประกอบทั้งหมด 5 ชนิด ซึ่งโครงสร้าง ชนิดของสาร และปริมาณดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างของสารต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของสาร X จะเห็นได้ว่ามีลักษณะ



โครงสร้างสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค FT-IR กล่าวคือ ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่  $3415\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดง พันธะระหว่าง O-H ที่พบได้ใน 1-(2-methoxypropoxy) และ 2-propanal หรือที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1730, 1233 และ 1158 ซึ่งแสดงพันธะ C=O และพันธะ C-O ของหมู่ฟังก์ชัน O=C-O ซึ่งสามารถพบได้ทั้งในไดไอโซออกทิล มาลีเอทและ 2-เอทิลเฮกซิล ฟูมาเรท นอกจากนี้ยังพบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1089, 1042 และ 1010 นั้น แสดงพันธะระหว่าง C-O-C ซึ่งเป็นพันธะที่มีอยู่ในทุกองค์ประกอบของสาร X

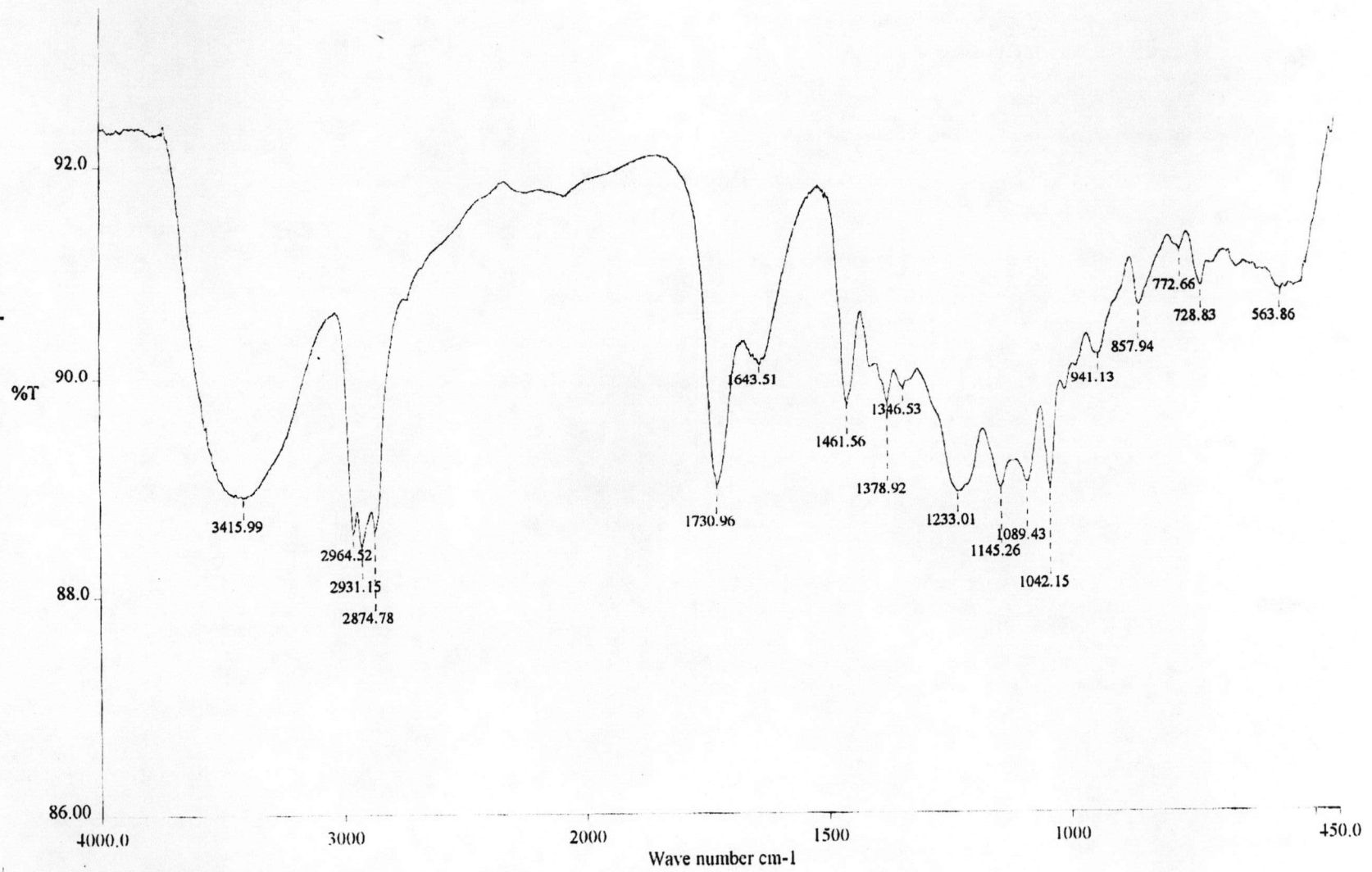
ตารางที่ 4.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันของสาร X

หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )
O-H stretching	3415
Aliphatic C-H stretching	2964, 2931, 2874
C=O stretching	1730
CH <sub>2</sub> and CH <sub>3</sub> bending	1461
CH <sub>3</sub> bending	1378
C-O stretching of O=C-O	1233, 1158
C-O-C stretching of C-O-C	1089, 1042, 1010
C-H deformation (out-of-plane)	941, 857

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆของเรซิน โมลด์ทั้ง 3 ชนิดจึงสรุปได้ว่า

- สาร P คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate) หรือ PMMA
- สาร A มีองค์ประกอบ 3 ชนิด คือ เมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate) เอทิลเบนซีน (ethylbenzene) และ เบนซีนนาไมด์ (benzenemine)
- สาร X มีองค์ประกอบทั้งหมด 5 ชนิด คือ 1-2 เมทอกซีโพรพอกซี 1-(2-methoxypropoxy) 2-โพรพานอล (2-propanal) แบบ CIS และ TRANS ไดไอโซออกทิล มาลีเอท (diisooctyl maleate) และ 2-เอทิลเฮกซิล ฟูมาเรท (2-ethylhexyl fumarate)

รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของสาร X



c:\pel\_data\spectra\mt.48\mt268648\sample\_x\_2686.sp - sample X (MTEC No. 2686/48)

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของสาร X จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี /แมสสเปกโตรเมตรี

จำนวน องค์ประกอบ	สารที่เป็นองค์ประกอบของสารตัวอย่าง	
	ชื่อสารและโครงสร้างทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
5	<p>1-(2-methoxypropoxy)</p>	5.71
	<p>2-Propanal (cis)</p>	11.63
	<p>2-Propanal (trans)</p>	15.25
	<p>Diisooctyl maleate</p>	4.59
	<p>2 ethylhexyl fumarate</p>	62.81

#### 4.1.2 การทดสอบสมบัติและหน้าที่ของแต่ละองค์ประกอบของเรซินโมลด์

จากการวิเคราะห์ชนิดขององค์ประกอบของเรซิน โมลด์ แต่ละชนิดพบว่า สาร A และ สาร X มีองค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิด ในขณะที่สาร P มีองค์ประกอบหลักเพียง 1 ชนิด คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการใช้สารแต่ละชนิดในการขึ้นรูปเรซิน โมลด์ (ตารางที่ 3.2) พบว่าองค์ประกอบหลักของเรซิน โมลด์ คือสาร P ซึ่งมีปริมาณการใช้ถึงร้อยละ 60.5 รองลงมาคือน้ำกลั่น สาร A และสาร X ตามลำดับ โดยเฉพาะสาร X นั้นจะใช้ในปริมาณที่น้อยมาก คือเพียงร้อยละ 0.23 จึงคาดว่าสาร P ควรจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุด ในขณะที่สาร X นั้น แม้จะใช้ในปริมาณน้อยมาก แต่อาจจะเป็นสารสำคัญและมีผลต่อการขึ้นรูปเรซิน โมลด์ ดังนั้นก่อนที่จะจัดหาสารเทียบเคียงของสารต่างๆ ดังกล่าว ภายในประเทศ จึงควรพิจารณาถึงหน้าที่และความสำคัญของสารที่เป็นองค์ประกอบเหล่านั้นก่อน การทดลองนี้จึงได้ขึ้นรูปเรซิน โมลด์จากองค์ประกอบต่างๆ 4 ชนิด (สาร A สาร P สาร X และ น้ำ) และ 3 ชนิด (โดยการตัดองค์ประกอบออก 1 ชนิด) เพื่อดูว่าองค์ประกอบใดมีบทบาทน้อยที่สุดในการขึ้นรูปและเพื่อศึกษาถึงสมบัติและหน้าที่ขององค์ประกอบแต่ละตัว โดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่ได้ ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการขึ้นรูปเรซินโมลด์จากองค์ประกอบต่างๆ

สูตร	องค์ประกอบ				ผลการทดสอบ
	สาร P	สาร A	สาร X	น้ำ	
1	✓	✓	✓	✓	ขึ้นรูปได้ มีกลิ่นแรง ลักษณะของชิ้นทดสอบที่ได้มีสีชมพูอ่อนๆ
2	✓	✓	✗	✓	ขึ้นรูปได้ มีกลิ่นแรง ลักษณะของชิ้นทดสอบ ที่ได้มีสีชมพูอ่อนๆ
3	✓	✓	✓	✗	ขึ้นรูปได้ มีกลิ่นแรง แต่ไม่สามารถเทลงในแม่แบบได้ เนื่องจากของผสมมีความหนืดสูง
4	✓	✗	✓	✓	ไม่สามารถขึ้นรูปได้
5	✗	✓	✓	✓	ไม่สามารถขึ้นรูปได้ อยู่ในสภาพของเหลว เกิดการเปลี่ยนจากสีขาวใส เป็นสีขาวขุ่น

หมายเหตุ: ✓ หมายถึงเติม, ✗ หมายถึงไม่เติม

จากการทดลองพบว่าสาร P สาร A และน้ำ อย่างใดอย่างหนึ่งนั้นมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่เตรียมได้ โดยเฉพาะสาร P และสาร A (สูตร 4 และ 5) นั้นจะเห็นได้ว่าถ้าปราศจากสารดังกล่าวอย่างใดอย่างหนึ่งจะทำให้ชิ้นงานเหล่านั้นไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ สำหรับน้ำ(สูตร 3) แม้จะขึ้นรูปได้ แต่ของผสมที่ได้ก็มีความหนืดสูงเกินไปไม่เหมาะสม ส่วนชิ้นงานที่ปราศจากสาร X (สูตร 2) สามารถขึ้นรูปได้

และชิ้นงานนั้นมีสมบัติทางกายภาพเหมือนกับชิ้นงานที่มีองค์ประกอบครบทั้ง 4 ชนิด (สูตรที่ 1) ดังนั้นจึงทำให้สรุปได้ว่าการขึ้นรูปแบบหล่อเครื่องสุขภัณฑ์จากเรซิน โมลด์นั้น จำเป็นจะต้องมีองค์ประกอบอย่างน้อย 3 ชนิด คือ สาร P สาร A และน้ำจึงสามารถขึ้นรูปได้ซึ่งเมื่อสอบถามไปยังผู้ประกอบการที่นำเข้าเรซิน โมลด์มาใช้ และได้ทดลองใช้ทำแม่แบบ พบว่าในภาคอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ส่วนใหญ่ก็ไม่ได้มีการใช้สาร X เป็นองค์ประกอบในการเตรียมเรซิน โมลด์แล้ว จากเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นสืบหาสารเทียบเคียงของสาร P และสาร A ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเรซิน โมลด์

#### 4.1.3 สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

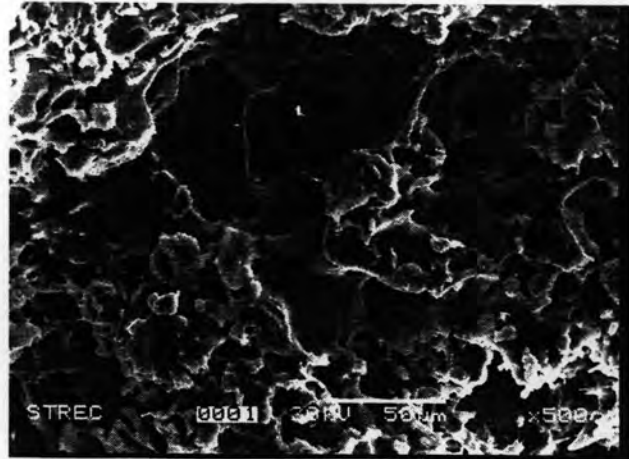
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ความสามารถในการใช้งานและ โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ของเรซิน โมลด์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสมบัติของสารเทียบเคียงที่สืบหาภายในประเทศ โดยการเตรียมชิ้นทดสอบของเรซิน โมลด์ตามขั้นตอนในบทที่ 3 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติของเรซินโมลด์

สมบัติ	ผลการทดสอบ
<b>สมบัติเชิงกายภาพ</b>	
การตกตะกอน	ไม่ตกตะกอน (-)
ความเป็นเนื้อเดียวกัน	เป็นเนื้อเดียวกัน (+++)
ความหนาแน่น (กรัม / ลบ.ซม.)	0.66
การไหลตัว (มม.)	120
เวลาในการก่อตัว (นาที)	1:30 (+)
<b>สมบัติเชิงกล</b>	
ค่าความต้านแรงดัดโค้ง (MPa)	23.88
ค่าความความต้านแรงกด (MPa)	มากกว่า 40
<b>สมบัติในการใช้งาน</b>	
ความทนแรงขัดถู (%)	0.48
อัตราการดูดซึมน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)	$0.06 \pm 0.02$
ปริมาตรการดูดซึมน้ำ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	$0.162 \pm 0.001$
ความทนแรงอัดอากาศสูงสุด (บาร์)	มากกว่า 6
จำนวนครั้งในการใช้งานต่อวัน (ครั้ง)	8
อายุการใช้งาน (รอบ)	20,000

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเรซิน โมลด์ ในขณะที่เรซิน โมลด์ยังไม่ก่อตัวนั้น พบว่า ของผสมที่เตรียมได้นั้นไม่เกิดการตกตะกอน และมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ทำให้แบบหล่อที่เตรียมได้มีสมบัติที่สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน ดังจะเห็นได้จากความหนาแน่นของเรซิน โมลด์นั้นมีค่าเท่ากับ 0.66 ในทุกชิ้นทดสอบ และจากการทดสอบความสามารถในการไหลตัวตามมาตรฐาน JIS 9112 มีค่าเท่ากับ 120 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการใช้งาน (80 – 160 มิลลิเมตร) ทั้งนี้ถ้าค่าการไหลตัวนั้นน้อยกว่า 80 มิลลิเมตร จะส่งผลให้เรซิน โมลด์ไม่สามารถใช้งานในแม่แบบที่มีความซับซ้อน เพราะในขั้นตอนการเตรียมแบบหล่อ ของผสมจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังที่ว่างเล็กๆ ภายในได้ แต่หากพบว่าค่าการไหลตัวมีค่ามากเกินไปกว่า 160 มิลลิเมตร จะทำให้ของผสมที่เตรียมได้ไหลออกมาทางรอยต่อระหว่างแม่แบบ อย่างไรก็ตามพบว่าเวลาในการก่อตัวของเรซิน โมลด์นั้นจะเกิดขึ้นเร็วมาก เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่อยู่ระหว่าง 12 -15 นาที ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการเทของผสมลงในแม่แบบเพื่อเตรียมแบบหล่อมียุคสั้น ไม่สามารถเทของผสมลงในแม่แบบทัน และเกิดข้อจำกัดในรูปแบบของโมเดลต้องไม่มีความซับซ้อนมาก

ทางด้านสมบัติเชิงกลของเรซิน โมลด์และความสามารถในการใช้งานของเรซิน โมลด์นั้น พบว่าค่าความต้านแรงดัดโค้งมีค่าสูงถึง 23.88 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของแบบหล่อโดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่า 4 MPa ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลการทดสอบมีค่ามากกว่ามาตรฐานมาก และเมื่อพิจารณาความต้านแรงกดของเรซิน โมลด์ พบว่าชิ้นทดสอบจะค่อยๆ เปลี่ยนรูปตามแนวแรงที่มากกระทำ กล่าวคือ ชิ้นทดสอบมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ เมื่อออกแรงกดจากทางด้านบนจะทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการยุบตัว และแบนออกตามแนวแรง โดยค่าความต้านแรงกดนั้น มีค่ามากกว่า 40 MPa ทั้งนี้โดยปกติแบบหล่อที่นำมาใช้งานต้องการความต้านแรงกดมากกว่า 10 MPa ทั้งนี้จากการที่สมบัติเชิงกลทั้ง 2 ชนิดมีค่าสูงนั้น ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติในการใช้งาน เช่น ความทนแรงอัด อากาศสูงสุด และอายุการใช้งาน จากนั้นเมื่อพิจารณาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเรซิน โมลด์ จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.7 พบว่าภายในโครงสร้างของเรซินมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถตรวจพบช่องว่างภายในได้ชัดเจน จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าวทำให้เรซิน โมลด์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำ ดังที่จะเห็นได้จากอัตราการดูดซึมน้ำของเรซิน โมลด์มีค่า เท่ากับ  $0.06 \pm 0.02$  เซนติเมตร/วินาที ซึ่งอัตราการดูดซึมน้ำคือความเร็วที่น้ำสามารถเคลื่อนที่ในช่องว่างภายในของเรซิน โมลด์ ทั้งนี้ยังสามารถหาปริมาณการดูดซึมน้ำได้โดยปริมาณการดูดซึมน้ำเป็นการที่น้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในของเรซิน โมลด์ ซึ่งปริมาณการดูดซึมน้ำของเรซิน โมลด์มีค่า  $0.158 \pm 0.004$  กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเรซินโมลด์

#### 4.1.4 สารเทียบเคียง

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเรซินโมลด์ เพื่อเป็นแนวทางในการสืบหาสารเทียบเคียง โดยมุ่งเน้นที่จะหาวัสดุที่ผลิตภายในประเทศ ที่มีองค์ประกอบชนิดเดียวกับองค์ประกอบของเรซินโมลด์ กล่าวคือ มุ่งเน้นที่จะสืบหาสารเทียบเคียงสาร P และ A โดยสาร P จะเป็นวัสดุในกลุ่มของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในลักษณะต่างๆ ทางด้านสาร A นั้นจะเป็นกลุ่มของเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์

##### 4.1.4.1 การสืบหาสารเทียบเคียง

งานวิจัยนี้ได้สืบหาสารที่มีสมบัติเทียบเคียงกับสาร P และสาร A โดยมุ่งเน้นหาสารที่มีการผลิตในประเทศไทยเพื่อเป็นการลดการนำเข้าสารจากต่างประเทศ รวมถึงเป็นการส่งเสริมการนำสารที่ผลิตในประเทศมาใช้ โดยผลการสืบหาแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 วัสดุทางการค้าที่นำมาใช้เป็นสารเทียบเคียง

องค์ประกอบของเรซินโมลด์	ชนิดของสาร	วัสดุทางการค้าที่นำมาใช้เทียบเคียง	สัญลักษณ์	ราคา(บาท)/กิโลกรัม
สาร P	Polymethyl methacrylate	PMMA ที่ใช้ในวัสดุอุดฟัน (บ.เด็นนทรี วิดชัน)	P <sub>D</sub>	3,500
		PMMA ชนิดเกล็ด (บ.ไทย อะคริลิก)	P <sub>เกล็ด</sub>	105
		PMMA อิมัลชัน	P <sub>E</sub>	-
สาร A	Methyl methacrylate	MOW LDM 7760 (บ. Clariant)	A <sub>LDM</sub>	100
		MMA (บ.ไทย เอ็ม เอ็ม เอ)	A <sub>MMA</sub>	75

จากตารางจะเห็นได้ว่า วัสดุที่จะนำมาใช้แทนสาร P หรือ PMMA นั้น มีอยู่ 3 ชนิด ซึ่งลักษณะและราคาแตกต่างกันไป สำหรับ PMMA ที่ใช้ในวัสดุอุดฟันนั้นจะมีราคาแพงที่สุดแต่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว มีลักษณะคล้ายสาร P มากที่สุด ในขณะที่ PMMA ที่มีราคารองลงมาคือ 105 บาทต่อกิโลกรัม นั้น มีลักษณะเป็นเกล็ดต่างจากสาร P ที่เป็นอนุภาคทรงกลม ส่วน PMMA emulsion นั้นจะมีลักษณะเป็นของเหลว ที่สังเคราะห์ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งคาดว่าน่าจะสามารถเข้ากันได้กับสาร A ที่เป็นของเหลว

สำหรับสาร A นั้น แม้ว่าผลการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่ามีองค์ประกอบ 3 ชนิด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในสาร A จะพบว่าปริมาณของเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (MMA) มีมากที่สุด ถึง 80% และเพื่อความคล่องตัวและสะดวกในการออกสูตรการผลิตเรซิน โมลด์ และวัสดุเชิงประกอบจากสารภายในประเทศ งานวิจัยนี้จึงทดลองใช้ (จัดหา) สารที่มีสูตร โครงสร้างประเภทเมทิลเมทาคริเลตเป็นหลักเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้จากการค้นคว้าทำให้สามารถหาสารเทียบเคียงได้ 2 ชนิด คือ MOW LDM 7760 ซึ่งเป็นของเหลวสีขาวขุ่น เป็นสารประเภทโคพอลิเมอร์ระหว่างเมทิลเมทาคริเลตกับสไตรีน ที่เตรียมในสถานะอิมัลชัน โดยมีราคา 100 บาทต่อกิโลกรัม และเมทิลเมทาคริเลต (MMA) มอนอเมอร์ ซึ่งเป็นของเหลวสีขาวใส มีกลิ่นฉุน และต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 °C ทั้งนี้ราคาสูงกว่าสารเทียบเคียงชนิดแรกอยู่ 25 บาทต่อกิโลกรัม

#### 4.1.4.2 การทดสอบความสามารถในการใช้งานของสารเทียบเคียง

จากการเตรียมขึ้นทดสอบระหว่างสารเทียบเคียงกับพลาสติกอร์ในอัตราส่วน 10 : 90 โดยพลาสติกอร์ที่ใช้เป็นชนิดบีตาที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกอร์ชนิดบีตาที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (B2) นั้น เป็นพลาสติกอร์ชนิดเดียวกับที่ทางอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ ใช้อยู่ในปัจจุบัน เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีการใช้สารเทียบเคียงดังกล่าว โดยในขั้นแรกได้ทำการทดลอง โดยใช้สารเทียบเคียงเพียง 1 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ทั้งนี้ในการทดสอบสูตรที่ 1-3 เป็นการเปลี่ยนชนิดของสารเทียบเคียงเพื่อใช้แทนสาร A และในสูตรที่ 4-7 เป็นการเปลี่ยนชนิดของสารเทียบเคียงเพื่อใช้แทนสาร P ซึ่งการรายงานผลนั้นใช้เกณฑ์ในการรายงานผลตามตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็น ตารางที่ใช้ในการเปรียบเทียบการสังเกตด้วยตาเปล่ากับการทดสอบทั้งเวลาในการก่อตัว การตกตะกอน และความเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการรายงานผลเนื่องจากการก่อตัวของสารเทียบเคียงนั้นมีช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกันมาก กล่าวคือ ในบางสูตรปฏิกิริยาเกิดรวดเร็วมากจนไม่สามารถจับเวลาในการก่อตัวได้ทัน และในบางสูตรก็ใช้เวลาในการก่อตัวเป็นระยะเวลาที่นานมากกว่า 20 นาที



ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบสารเทียบเคียง 1 ตัวแปร

สูตรที่	สารเทียบเคียง (10%)	พลาสติกอร์ (90%)	ผลการทดสอบ			
			การก่อตัว	การตกตะกอน	ความเป็นเนื้อ เดียวกัน	ความต้านแรงคัดโค้ง (MPa)
1	สาร A	B2	+	+	++	1.48
2	A <sub>MMA</sub>	B2	+	++	+++	1.98
3	A <sub>LDM</sub>	B2	++	-	++	1.92
4	สาร P	B2	+++	-	-	1.42
5	P <sub>E</sub>	B2	+++	-	+	1.62
6	P <sub>D</sub>	B2	+++	-	-	1.32
7	P <sub>พัสติก</sub>	B2	+++	-	-	1.65

หมายเหตุ : + หมายถึง เกิด, - หมายถึง ไม่เกิด

ตารางที่ 4.10 ตารางสัญลักษณ์ที่แทนในผลการทดสอบทางกายภาพ

สัญลักษณ์	+	++	+++	-
ช่วงเวลาในการ ก่อตัว (นาท)	น้อยกว่า 10	10-20	20-60	มากกว่า 60
การตกตะกอน	มีการแยกเฟสกัน เล็กน้อย แต่ยังไม่สามารถ มองเห็นรอยต่อที่ ชัดเจนระหว่าง เฟสทั้ง 2	มีการแยกเฟสที่ ชัดเจน คล้ายน้ำ กับน้ำมัน แต่ ยังคงมีสถานะ เป็นของเหลว เหมือนกัน	มีการแยกเฟส อย่างชัดเจน ระหว่างของแข็ง และของเหลว	ไม่เกิดการ ตกตะกอน
ความเป็นเนื้อ เดียวกัน	มองด้วยตาเปล่า แยกไม่ออก เมื่อสัมผัสด้วยมือ พบว่ามีอนุภาค ขนาดใหญ่ กระจายอยู่	มองด้วยตาเปล่า แยกไม่ออก เมื่อสัมผัสด้วยมือ พบว่ามีอนุภาค ขนาดเล็กกระจาย อยู่	มองด้วยตาเปล่า แยกไม่ออก เมื่อสัมผัสด้วยมือ ไม่พบส่วนที่ แตกต่างกัน	ไม่เป็นเนื้อ เดียวกัน

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า เมื่อทดลองใช้สาร A หรือ สาร P อย่างใดอย่างหนึ่งร่วมกับพลาสติกอร์ วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีสมบัติที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน กล่าวคือ สาร A นั้นทำให้เกิดการตกตะกอนของพลาสติกอร์ ในขณะที่สาร P นั้นไม่สามารถผสมรวมกับพลาสติกอร์ เป็นเนื้อเดียวกันได้ เกิดการแยกเฟสระหว่างสาร P และพลาสติกอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วย FTIR ทำให้ทราบว่าสาร P นั้น เป็นพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งไม่ละลายน้ำ ต่างจากพลาสติกอร์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำ และในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาสารเทียบเคียงของสาร P ทั้ง 2 ชนิดคือ  $P_D$  และ  $P_{\text{กลัด}}$  จะเห็นได้ว่าสารทั้งสองต่างก็ให้ผลเช่นเดียวกัน แม้ว่า  $P_{\text{กลัด}}$  จะให้สมบัติความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าสาร P เล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสารเทียบเคียงชนิด  $P_E$  พบว่า ของผสมที่เตรียมได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของ  $P_E$  มีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งแตกต่างจากสารอื่นๆ ประกอบกับในการเตรียมในสภาวะที่เป็นอิมัลชัน นั้นมีการใช้สารช่วยเปียก (wetting agent) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถที่จะละลายทั้งส่วนที่มีขี้และส่วนที่ไม่มีขี้ ซึ่งพลาสติกอร์โมลด์เป็นสารที่มีขี้ เนื่องจากในการเตรียมพลาสติกอร์โมลด์จะทำให้แคลเซียมซัลเฟตแตกตัวเป็นไอออนในน้ำ ซึ่งน้ำเป็นส่วนที่มีขี้ [4] ส่วน PMMA นั้นเป็นสารที่ไม่มีขี้ ทำให้  $P_E$  จึงสามารถเข้ากันได้ดีกับพลาสติกอร์โมลด์ (B2)

สำหรับสารเทียบเคียงสาร A นั้น ผลการทดสอบพบว่าสารเทียบเคียงของสาร A คือ  $A_{\text{MMA}}$  นั้นให้ผลเช่นเดียวกับสาร P คือการเกิดการตกตะกอนของพลาสติกอร์ ส่วนสาร  $A_{\text{LDM}}$  นั้นให้สมบัติทางกายภาพที่เหนือกว่าสาร A คือในขั้นตอนการเตรียมขึ้นทดสอบจะไม่เกิดการตกตะกอน ทั้งนี้เนื่องมาจากองค์ประกอบของ  $A_{\text{LDM}}$  นั้นเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเมทิลเมทาคริเลตกับพอลิสไตรีน โดยในการผลิตสาร  $A_{\text{LDM}}$  นั้นใช้กระบวนการแบบอิมัลชันซึ่งในองค์ประกอบมีส่วนผสมของตัวกระทำอิมัลชัน (emulsifier) ทำให้มีความสามารถในการเข้ากับน้ำที่อยู่ในพลาสติกอร์มากกว่าสารชนิดอื่น นอกจากนี้สมบัติเชิงกลคือความต้านแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพลาสติกอร์และสารเทียบเคียง  $A_{\text{LDM}}$  ยังมีค่าสูงถึง 1.92 MPa ซึ่งมากกว่าการใช้สาร A หรือ สาร P อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเทียบสมบัติดังกล่าวนี้กับพลาสติกอร์โมลด์ หรือเรซิน โมลด์ พบว่ายังมีค่าต่ำกว่ามาก (ตาราง 4.7 และ 4.14) นั่นคือ ความต้านแรงดัดโค้งของพลาสติกอร์และเรซิน โมลด์มีค่าประมาณ 4-10 MPa และ 24 MPa ตามลำดับ

ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติของของผสมให้ดียิ่งขึ้นจึงทำการเพิ่มจำนวนตัวแปรของสารเทียบเคียงเป็น 2 ชนิด ดังตารางที่ 4.11 โดยสูตรที่ 1-4 นั้นเป็นของผสมระหว่างพลาสติกอร์กับสาร A (องค์ประกอบของเรซิน โมลด์) และเปลี่ยนชนิดของสาร P เป็นสารเทียบเคียงชนิดต่างๆและในทำนองเดียวกันสูตรที่ 5-8 จะเป็นการผสมพลาสติกอร์กับ  $A_{\text{MMA}}$  และ สูตรที่ 9-12 สารที่คงไว้คือ  $A_{\text{LDM}}$  ทั้งนี้ สูตรที่ 13-19 เป็นการศึกษาผลของน้ำที่มีต่อสารเทียบเคียงชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบสารเทียบเคียง 2 ตัวแปร

สูตร	สารเทียบเคียง(10%)		พลาสติกอร์ (90%)	ผลการทดสอบ			
	ตัวแปรที่			การก่อตัว	การตกตะกอน	ความเป็น เนื้อเดียวกัน	ความต้านแรงดัดโค้ง (MPa)
	1	2					
1	สาร A	สาร P	B2	+	+	-	1.82
2	สาร A	P <sub>D</sub>	B2	+	+	-	0.78
3	สาร A	P <sub>เม็ด</sub>	B2	+	++	-	1.72
4	สาร A	P <sub>E</sub>	B2	+	-	+	1.38
5	A <sub>MMA</sub>	สาร P	B2	+	-	-	1.97
6	A <sub>MMA</sub>	P <sub>D</sub>	B2	+	-	-	1.49
7	A <sub>MMA</sub>	P <sub>เม็ด</sub>	B2	+	-	-	1.65
8	A <sub>MMA</sub>	P <sub>E</sub>	B2	+	+	+	1.86
9	A <sub>LDM</sub>	สาร P	B2	+++	-	+	1.77
10	A <sub>LDM</sub>	P <sub>D</sub>	B2	++	-	+	1.84
11	A <sub>LDM</sub>	P <sub>เม็ด</sub>	B2	++	-	+	3.29
12	A <sub>LDM</sub>	P <sub>E</sub>	B2	+	-	+	1.15
13	สาร A	น้ำกลั่น	B2	+	+	+	1.25
14	A <sub>MMA</sub>	น้ำกลั่น	B2	+	++	++	1.64
15	A <sub>LDM</sub>	น้ำกลั่น	B2	+	-	++	1.49
16	สาร P	น้ำกลั่น	B2	++	-	-	1.27
17	P <sub>E</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.37
18	P <sub>D</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	-	1.25
19	P <sub>เม็ด</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	-	1.19

หมายเหตุ : + หมายถึง เกิด, - หมายถึง ไม่เกิด

เมื่อพิจารณา สูตรที่ 1-4 พบว่า ในสูตรที่ 1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบระหว่างสาร A กับสาร P นั้นให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงที่สุดใน 4 สูตรนี้ แต่ยังคงพบปัญหาการตกตะกอนของพลาสติกอร์ และความไม่เป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างการเตรียมขึ้นทดสอบและในทำนองเดียวกันเมื่อเปลี่ยนจากสาร P เป็นสารเทียบเคียงชนิด P<sub>D</sub> กับ P<sub>เม็ด</sub> ยกเว้นเมื่อเติมสาร PMMA อิมัลชัน (P<sub>E</sub>) (สูตรที่ 4) นั้นไม่พบปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องมาจากสาร A และสาร P<sub>E</sub> ต่างก็เป็นของเหลวจึงสามารถผสมกันเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

จากนั้นเมื่อทดลองเปลี่ยนสาร A เป็น MMA ชนิดน้ำ ( $A_{MMA}$ ) ในสูตรที่ 5-8 พบว่า สาร P และสารเทียบเคียงชนิดอื่น ยกเว้น PMMA อิมัลชัน ( $P_E$ ) นั้นไม่เกิดการตกตะกอนแต่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ตรงข้ามสำหรับ PMMA อิมัลชันนั้น แม้ว่าจะเกิดการตกตะกอนของ  $A_{MMA}$  ในระหว่างการเตรียมขึ้นทดสอบ แต่ของผสมก็มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลของสารเทียบเคียง 1 ตัวแปร (ตารางที่ 4.9) ประกอบจะเห็นได้ว่าทั้งสาร  $A_{MMA}$  และ  $P_E$  ต่างก็ทำให้ขึ้นทดสอบมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เช่นเดียวกับสูตรที่ 4 ซึ่งเกิดจากการผสมกันระหว่างสาร A และ  $P_E$

เมื่อทำการเปลี่ยนสาร A เป็น MOW LDM ( $A_{LDM}$ ) ในสูตรที่ 9-12 นั้น ให้ผลเหมือนกันทั้งหมด คือ ไม่มีการตกตะกอน สามารถการก่อตัวได้ และมีความเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการในการเตรียมวัสดุแม่แบบ และเมื่อพิจารณาความต้านแรงดัดโค้งของทั้ง 4 สูตรนี้ พบว่าสูตรที่  $A_{LDM}$  ผสมกับ  $P_{\text{กลั่น}}$  (สูตรที่ 11) ให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงที่สุด

สำหรับสูตรที่ 13-19 นั้น เป็นการศึกษาผลกระทบของน้ำเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.9 จะพบว่าให้ผลการทดสอบทางกายภาพเช่นเดียวกัน แต่ค่าความต้านแรงดัดโค้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการที่พลาสติกอร์ได้รับน้ำเข้าไปมากเกินไปเกินความต้องการนั้นจะไปยับยั้งการก่อผลึก ทำให้ผลึกมีขนาดเล็กลง ซึ่งส่งผลต่อค่าความต้านแรงดัดโค้งที่ลดลง [4]

ขั้นตอนต่อไปเป็นการเพิ่มจำนวนตัวแปร เป็น 3 ชนิด เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงในการเตรียมเรซิน โมลด์ในภาคอุตสาหกรรม กล่าวคือ ในภาคอุตสาหกรรม การขึ้นรูปเรซิน โมลด์นั้นไม่ได้ใช้สาร X แต่ยังคงใช้น้ำ ดังผลในตารางที่ 4.6 โดยน้ำมีความสามารถในการลดความหนืดของของผสมที่เตรียมได้ เพื่อพิจารณาผลของน้ำที่มีของผสมที่เตรียมจากสารเทียบเคียงกับพลาสติกอร์ เมื่อใช้สารเทียบเคียง 2 ชนิด พร้อมกัน ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.12

จากตารางที่ 4.12 เมื่อพิจารณาเทียบกับตารางที่ 4.11 พบว่าเมื่อมีน้ำกลั่นเป็นส่วนประกอบในการเตรียมขึ้นทดสอบจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นสูตรที่ 2, 3, 7 และ 12 แต่ในขณะเดียวกันน้ำกลั่นทำให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น สูตรที่ 1, 3 และ 6 ซึ่งพบว่าของผสมไม่เกิดการตกตะกอน และมีความเป็นเนื้อเดียวกันต่างจากเดิมซึ่งเกิดการตกตะกอน และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อย่างไรก็ตาม สำหรับสูตรที่สมบัติทางกายภาพคืออยู่แล้ว (สูตรที่ 9-12) การเติมน้ำกลั่นกลับทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ได้รับมีมากเกินไปดังที่ได้อธิบายไปแล้ว ซึ่งจะทำการเกิดผลึกของแคลเซียมซัลเฟตไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ความต้านแรงดัดโค้งลดต่ำลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลจากการทดสอบสารเทียบเคียง 3 ตัวแปรแล้วอาจกล่าวได้ว่าน้ำกลั่นที่เติมลงไป ในพอลิเมอร์เฟสนั้นอาจไม่มีความจำเป็นเท่าไรนัก ทั้งนี้เนื่องจาก แม้ว่าสมบัติทางกายภาพดีขึ้นในบางสูตร แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่ากลับทำให้ความต้านแรงดัดโค้งมีค่าลดลงต่างจากการเตรียมแม่แบบจากเรซิน โมลด์โดยตรง ซึ่งจำเป็นต้องมีน้ำเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบสารเทียบเคียง 3 ตัวแปร

สูตร	สารเทียบเคียง(10%)			พลาสติกอร์ (90%)	ผลการทดสอบ			
	ตัวแปรที่				การก่อตัว	การตก ตะกอน	ความเป็น เนื้อเดียวกัน	ความต้าน แรงคัด โคง (MPa)
	1	2	3					
1	สาร A	สาร P	น้ำกลั่น	B2	+++	-	+	1.57
2	สาร A	P <sub>D</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	+	-	1.05
3	สาร A	P <sub>เกลือ</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	+	2.07
4	สาร A	P <sub>E</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.35
5	A <sub>MMA</sub>	สาร P	น้ำกลั่น	B2	+	+	-	1.69
6	A <sub>MMA</sub>	P <sub>D</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.36
7	A <sub>MMA</sub>	P <sub>เกลือ</sub>	น้ำกลั่น	B2	+	+	+	1.97
8	A <sub>MMA</sub>	P <sub>E</sub>	น้ำกลั่น	B2	+	+	+	1.77
9	A <sub>LDM</sub>	สาร P	น้ำกลั่น	B2	+	-	+	1.50
10	A <sub>LDM</sub>	P <sub>D</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.39
11	A <sub>LDM</sub>	P <sub>เกลือ</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	+	2.11
12	A <sub>LDM</sub>	P <sub>E</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.41

หมายเหตุ : + หมายถึง เกิด, - หมายถึง ไม่เกิด

ตารางที่ 4.13 แสดงการสรุปผลการทดสอบจากตารางที่ 4.9, 4.11 และ 4.12 โดยเลือกเฉพาะสูตรที่ให้คุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกับพลาสติกอร์โมลด์และเรซินโมลด์ กล่าวคือของผสมที่เตรียมได้สามารถก่อตัวได้ และในระหว่างขั้นตอนการเตรียมนั้นไม่เกิดการตกตะกอน และของผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกัน

จากตารางเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลด้านความต้านแรงคัด โคง พบว่าในสูตรที่ 6 ขึ้นทดสอบมีค่าความต้านแรงคัด โคงมากที่สุด โดยในสูตรที่ 6 นั้นมีสารเทียบเคียงที่ใช้คือ Mow LDM 7760 (A<sub>LDM</sub>) และ PMMA ชนิดเกลือ (P<sub>เกลือ</sub>) เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกอร์ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ Mow LDM 7760 (21%) และ PMMA ชนิดเกลือ (79%) เป็นสารเทียบเคียงแทนสาร A และสาร P ตามลำดับ เพื่อเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกอร์

ตารางที่ 4.13 สรุปผลการทดสอบสารเทียบเคียง

สูตร	สารเทียบเคียง(10%)			พลาสติก (90%)	ผลการทดสอบ			
	ตัวแปรที่				การก่อตัว	การตก ตะกอน	ความเป็น เนื้อเดียวกัน	ความต้านแรงดัด โค้ง (MPa)
	1	2	3					
1	A <sub>LDM</sub>			B2	++	-	+	1.92
2	P <sub>E</sub>			B2	+++	-	+	1.62
3	สาร A	P <sub>E</sub>		B2	+	-	+	1.38
4	A <sub>LDM</sub>	สาร P		B2	+++	-	+	1.77
5	A <sub>LDM</sub>	P <sub>D</sub>		B2	++	-	+	1.84
6	A <sub>LDM</sub>	P <sub>เท็ค</sub>		B2	++	-	+	3.29
7	A <sub>LDM</sub>	P <sub>E</sub>		B2	+	-	+	1.15
8	A <sub>LDM</sub>	น้ำกลั่น		B2	+	-	++	1.49
9	P <sub>E</sub>	น้ำกลั่น		B2	++	-	++	1.37
10	สาร A	สาร P	น้ำกลั่น	B2	+++	-	+	1.57
11	สาร A	P <sub>เท็ค</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	+	2.07
12	สาร A	P <sub>E</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.35
13	A <sub>MMA</sub>	P <sub>D</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.36
14	A <sub>LDM</sub>	สาร P	น้ำกลั่น	B2	+	-	+	1.50
15	A <sub>LDM</sub>	P <sub>D</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.39
16	A <sub>LDM</sub>	P <sub>เท็ค</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	+	2.11
17	A <sub>LDM</sub>	P <sub>E</sub>	น้ำกลั่น	B2	++	-	++	1.41

หมายเหตุ : + หมายถึง เกิด, - หมายถึง ไม่เกิด

#### 4.2 พลาสติกโพลด์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ความสามารถในการใช้งานและ โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพลาสติกโพลด์ ทั้งนี้งานวิจัยนี้ยังมีการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชนิดและขนาดอนุภาคของพลาสติกโพลด์ โดยการขึ้นรูปพลาสติกโพลด์นั้นเป็นไปตามกระบวนการเตรียมขึ้นทดสอบในบทที่ 3 ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 สมบัติของพลาสติกโพลีเอทิลีน

สมบัติ	ผลการทดสอบ			
	แอลฟา		บีตา	
	อนุภาคขนาด ใหญ่ (A1)	อนุภาคขนาด เล็ก (A2)	อนุภาคขนาด ใหญ่ (B1)	อนุภาคขนาด เล็ก (B2)
<b>สมบัติเชิงกายภาพ</b>				
ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )	46.24	11.90	26.96	23.38
การตกตะกอน	ตกตะกอน	ตกตะกอน	ไม่ตกตะกอน	ไม่ตกตะกอน
ความเป็นเนื้อเดียวกัน	เป็นเนื้อ เดียวกัน	เป็นเนื้อ เดียวกัน	เป็นเนื้อ เดียวกัน	เป็นเนื้อ เดียวกัน
ความหนาแน่น (กรัม / ลบ.ซม.)	$1.51 \pm 0.02$	$1.26 \pm 0.02$	$1.03 \pm 0.04$	$1.45 \pm 0.01$
การไหลตัว (มิลลิเมตร)	250.2	168.8	122.3	82.0
เวลาในการก่อตัว (นาทีก)	8.30	7.45	9.00	9.00
<b>สมบัติเชิงกล</b>				
ค่าความต้านทาน แรงดัดโค้ง (MPa)	$10.22 \pm 1.27$	$8.55 \pm 0.96$	$4.06 \pm 1.07$	$4.07 \pm 0.79$
ค่าความความต้านแรง กด (MPa)	$24.77 \pm 2$	$12.61 \pm 0.32$	$5.96 \pm 1.84$	$6.76 \pm 0.32$
<b>สมบัติในการใช้งาน</b>				
ความทนแรงขั้ว (%)	0.0536	0.0783	0.0856	0.5276
อัตราการดูดซึมน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)	$0.0009 \pm 0.0003$	$0.0014 \pm 0.0006$	$0.0032 \pm 0.0005$	$0.0029 \pm 0.0007$
ปริมาตรการดูดซึมน้ำ (กรัม / ลบ.ซม.)	$0.278 \pm 0.007$	$0.232 \pm 0.014$	$0.116 \pm 0.054$	$0.207 \pm 0.008$
ความทนแรงอัดอากาศ สูงสุด (บาร์)	5	5	1	1
จำนวนครั้งในการใช้ งานต่อวัน (ครั้ง)	1	1	2	2
อายุการใช้งาน (รอบ)	83	79	65	60

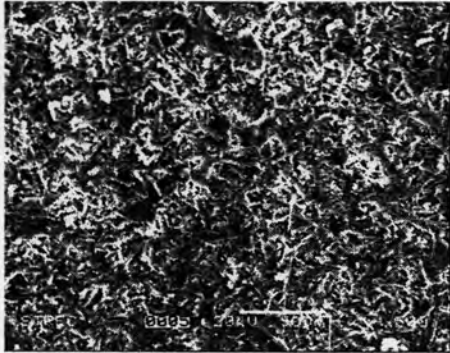
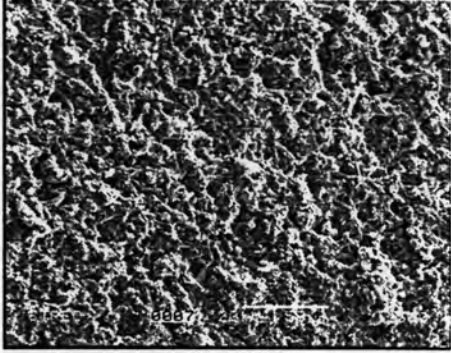
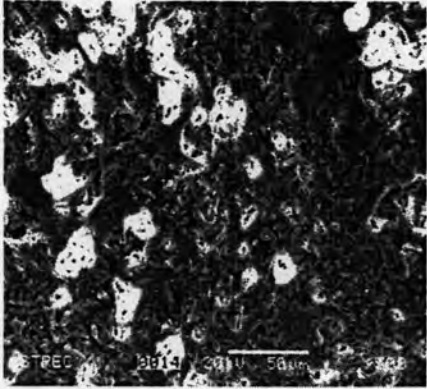
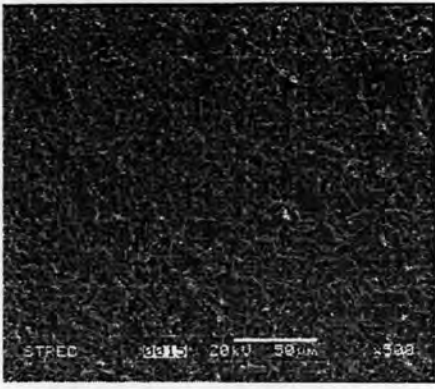
จากตารางที่ 4.14 เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพของพลาสติกโมลด์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย พบว่าพลาสติกชนิดแอลฟาทั้ง 2 ขนาดอนุภาคนั้น เกิดการตกตะกอน แต่ไม่พบลักษณะดังกล่าวในชนิดบีตา ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะผลึกของแอลฟามีขนาดของผลึกใหญ่ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 จึงส่งผลให้เกิดการตกตะกอนเล็กน้อยในขณะขึ้นรูป แต่อย่างไรก็ตามของผสมที่เตรียมจากพลาสติกทั้ง 2 ชนิดมีความเป็นเนื้อเดียวกันเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของพลาสติกทั้ง 4 นั้น พบว่าชนิดแอลฟามีความหนาแน่นมากกว่าบีตา หากพิจารณาผลของขนาดอนุภาคพบว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะมีค่าความหนาแน่นมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเห็นได้ชัดในแอลฟา แต่ยังไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนในบีตา ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคของบีตาที่นำมาใช้เป็นสารตัวอย่งนั้นยังคงมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ในการทดสอบความสามารถในการไหลตัว พบว่าพลาสติกชนิดแอลฟามีความสามารถในการไหลตัวได้สูงกว่าชนิดบีตา โดยขนาดอนุภาคใหญ่จะไหลตัวได้ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งพบในลักษณะเดียวกันในพลาสติกทั้ง 2 ชนิด

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของพลาสติกโมลด์จะพบว่าค่าความต้านแรงคัดโค้ง และค่าความความต้านแรงกดของพลาสติกชนิดแอลฟานั้นจะมีค่าสูงกว่าบีตา ทั้งนี้เป็นผลโดยตรงจากผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าของพลาสติกชนิดแอลฟานั้นเอง

สำหรับสมบัติการใช้งานของพลาสติกโมลด์ทั้ง 4 ชนิดนี้ พบว่าพลาสติกชนิดแอลฟาจะให้ค่าความทนแรงอัดอากาศได้สูงกว่าพลาสติกชนิดบีตา โดยขนาดอนุภาคไม่ได้ส่งผลต่อสมบัตินี้ ในส่วนของสมบัติการดูดซึมน้ำนั้นจะประกอบด้วยอัตราเร็วในการดูดซึมน้ำกับปริมาตรการดูดซึมน้ำ โดยเมื่อพิจารณาอัตราเร็วในการดูดซึมน้ำของพลาสติกโมลด์นั้น พบว่าพลาสติกชนิดบีตานั้นมีอัตราเร็วในการดูดซึมน้ำสูงกว่าพลาสติกชนิดแอลฟา เนื่องจากช่องว่างระหว่างผลึกของพลาสติกชนิดบีตามีขนาดเล็กกว่าพลาสติกชนิดแอลฟา และเมื่อพิจารณาถึงขนาดอนุภาคของแอลฟาพลาสติก พบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีอัตราการดูดซึมน้ำได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพราะในอนุภาคขนาดเล็กนั้นผลึกของพลาสติกจะเกิดการฟอร์มตัวกันหนาแน่นและชิดติดกันมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้ช่องว่างระหว่างผลึกของอนุภาคขนาดเล็กมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ โดยจะเห็นได้จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาในตารางที่ 4.15 ทำให้อัตราเร็วในการดูดซึมน้ำสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ส่วนทางด้านปริมาตรการดูดซึมน้ำนั้น จะเป็นการทำนายปริมาณของช่องว่างภายในของพลาสติก กล่าวคือในวัสดุที่มีช่องว่างภายในมากจะมีปริมาตรการดูดซึมน้ำมากกว่าวัสดุที่ปริมาณของช่องว่างน้อย ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาตรการดูดซึมน้ำของแอลฟาจะมากกว่าบีตา ซึ่งแสดงว่าช่องว่างภายในของแอลฟามีมากกว่าบีตานั้นเอง



ตารางที่ 4.15 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพลาสติกอร์

ชนิดของพลาสติกอร์	อนุภาคขนาดใหญ่	อนุภาคขนาดเล็ก
แอลฟา		
บีตา		

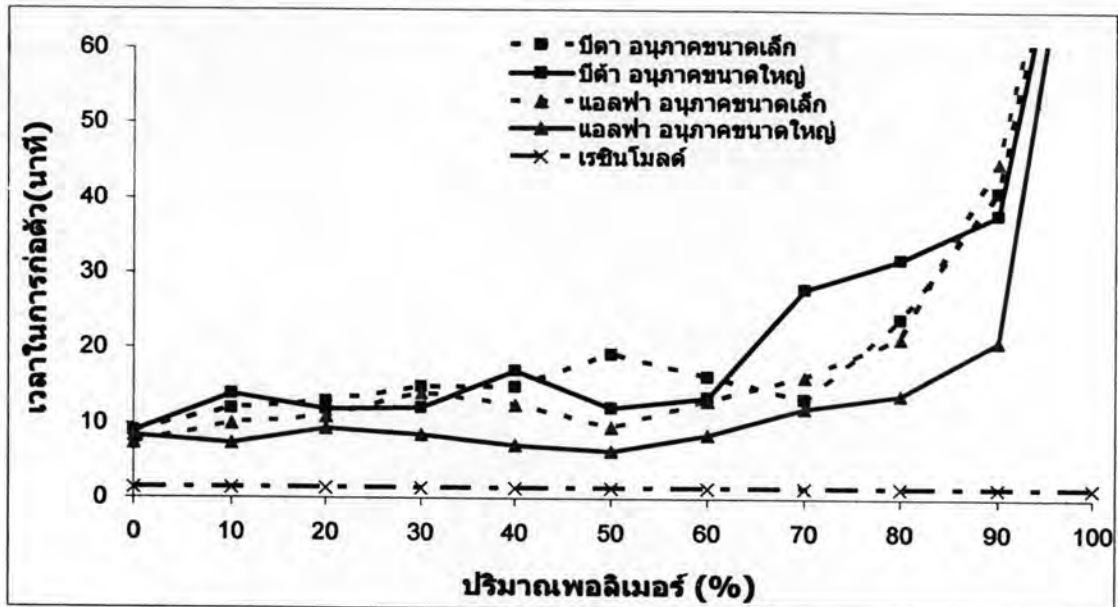
#### 4.3 วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกอร์

ในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกอร์ที่ดีที่สุด รวมถึงชนิดและขนาดอนุภาคของพลาสติกอร์ที่นำมาใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบเพื่อทำเป็นแม่แบบเครื่องสุกัณฑ์ ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นสารเทียบเคียงคือ PMMA ชนิดเกล็ดกับโคพอลิเมอร์ระหว่าง PMMA กับ PS (MOW LLDM 7760) ในอัตราส่วน 79:21 โดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้เทียบกับสมบัติต่างๆ ของเรซิน โมลด์และพลาสติกอร์โมลด์

### 4.3.1 สมบัติเชิงกายภาพ

#### 4.3.1.1 เวลาในการก่อตัว (setting time)

ผลการทดสอบเวลาในการก่อตัวโดยใช้เครื่อง Vicat Apparatus ตามมาตรฐาน JIS 9112 แสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เวลาในการก่อตัวของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก

จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างสารเทียบเคียงกับพลาสติกทั้ง 4 ชนิด ซึ่งเพิ่มปริมาณของสารเทียบเคียงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าเวลาในการก่อตัวของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นั้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของสารเทียบเคียง (พอลิเมอร์) เพิ่มขึ้น ซึ่งการที่เวลาในการก่อตัวของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มสูงขึ้นนั้น เป็นผลมาจากสารเทียบเคียงส่งผลต่อการแตกตัวของแคลเซียมซัลเฟตในน้ำ และเข้าขัดขวางการตกผลึกของแคลเซียมซัลเฟต

เมื่อพิจารณาเวลาในการก่อตัวของวัสดุเชิงประกอบเทียบกับเรซิน โมลด์พบว่า เวลาในการก่อตัวของวัสดุเชิงประกอบนั้นมีค่าสูงกว่าเรซิน โมลด์พลาสติกมาก ทั้งนี้เนื่องจากการก่อตัวของเรซิน โมลด์กับพลาสติกโมลด์มีกลไกที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การก่อตัวของพลาสติกโมลด์นั้นเกิดจากการที่แคลเซียมซัลเฟตที่ละลายในน้ำจนเป็นสารละลายอิ่มตัว และเกิดการตกผลึกออกมา ส่วนการก่อตัวของเรซิน โมลด์นั้น เป็นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารตั้งต้นทั้ง 4 ชนิด ซึ่งใช้เวลาเร็วมากเพียง 1.30 นาที ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นนั้นเป็นการก่อตัวแบบการตกผลึก จึงทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวใช้เวลานานกว่าเรซิน โมลด์

หากเปรียบเทียบเวลาในการก่อตัวระหว่างวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแอลฟากับบิต้านั้น จะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแอลฟาพลาสติกจะมีระยะเวลาในการก่อตัวน้อยกว่า

บิตาพลาสติก นอกจากนั้นพบว่าขนาดอนุภาคของพลาสติกก็ส่งผลต่อระยะเวลาในการก่อตัว โดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีระยะเวลาในการก่อตัวนานกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นแบบเดียวกันทั้งในแอลฟาและบิตาพลาสติก

จากมาตรฐานในการใช้งานของพลาสติกโมลด์ ช่วงเวลาในการก่อตัวที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 7.30-15.00 นาที [26] ดังนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกทั้งสองชนิดที่ 0:100-40:60 หรือที่ปริมาณพอลิเมอร์ไม่เกิน 40% นั้นมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการเตรียมแบบหล่อเครื่องสุกภัณฑ์

#### 4.3.1.2 การตกตะกอนและความเป็นเนื้อเดียวกัน

การทดสอบการตกตะกอนและความเป็นเนื้อเดียวกันสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ผลการสังเกตแสดงดังตารางที่ 4.16 และ 4.17

ตารางที่ 4.16 การตกตะกอน

อัตราส่วน		Alpha		Beta	
พอลิเมอร์	พลาสติก	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่
0	100	+	+	-	-
10	90	-	-	-	-
20	80	-	-	-	-
30	70	-	-	-	-
40	60	-	-	-	-
50	50	-	-	-	-
60	40	-	-	-	-
70	30	-	-	-	-
80	20	-	-	-	-
90	10	-	-	-	-
100	0	-	-	-	-

หมายเหตุ : + หมายถึง เกิด, - หมายถึง ไม่เกิด

ตารางที่ 4.17 ความเป็นเนื้อเดียวกัน

อัตราส่วน		Alpha		Beta	
พอลิเมอร์	พลาสติก	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่
0	100	++	++	++	++
10	90	++	++	++	++
20	80	++	++	++	++
30	70	++	++	++	++
40	60	++	++	++	++
50	50	+	+	+	+
60	40	+	+	+	+
70	30	-	-	-	-
80	20	-	-	-	-
90	10	-	-	-	-
100	0	-	-	-	-

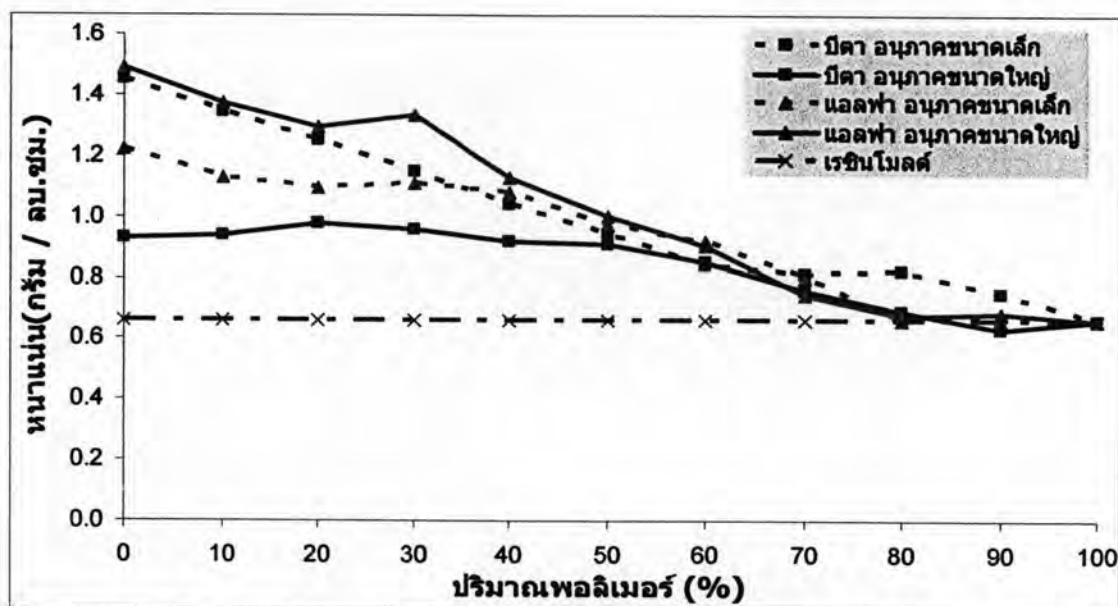
หมายเหตุ : + หมายถึง เกิด, - หมายถึง ไม่เกิด

จากตารางที่ 4.16 พบว่าทุกอัตราส่วนไม่พบการตกตะกอนแต่อย่างใด ยกเว้นพลาสติกชนิดแอลฟาทั้ง 2 ขนาดอนุภาค หรือกล่าวได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกทั้งชนิดแอลฟา และบีตาต่างก็ไม่เกิดการตกตะกอน และเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์ขึ้นเรื่อยๆความสามารถในการตกตะกอนก็ยังไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเรซิน โมลด์เอง (ตารางที่ 4.7) ก็ไม่เกิดการตกตะกอนเช่นกัน นอกจากนี้ ขนาดอนุภาคของพลาสติกก็ไม่มีผลต่อสมบัติการตกตะกอนของวัสดุเชิงประกอบ

ส่วนทางด้านความเป็นเนื้อเดียวกัน (ตารางที่ 4.17) พบว่าที่ปริมาณพอลิเมอร์ต่างๆ ขึ้นทดสอบจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันเช่นเดียวกับเรซิน โมลด์ (ตารางที่ 4.7) แต่เมื่อใช้ปริมาณพอลิเมอร์:พลาสติกในอัตราส่วนที่มากกว่า 60:40 ขึ้นทดสอบจะไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันทั้งวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบีตา และแอลฟา นอกจากนี้ขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันก็ไม่ได้ให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกันแต่อย่างใด ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์:พลาสติกที่เหมาะสมและสามารถนำมาใช้ได้เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพด้านการตกตะกอนและความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีจึงไม่ควรเกิน 60:40 หรือปริมาณพอลิเมอร์ไม่เกิน 60 % นั่นเอง

### 4.3.1.3 ความหนาแน่น

จากรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.18 พบว่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบชนิดบีตาและแอลฟา ทั้ง 2 ขนาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้สารเทียบเคียงหรือพอลิเมอร์ในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารเทียบเคียง (พอลิเมอร์ : พลาสติกที่อัตราส่วน 100:0) ที่ใช้มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.58 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร น้อยกว่าพลาสติกโมลด์มาก จึงส่งผลให้สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นได้อย่างชัดเจนเมื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นไปตามกฎของของผสม (rule of mixer) [27] ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วน พอลิเมอร์ : พลาสติก ประมาณ 80:20 เป็นต้นไป มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของเรซิน โมลด์ (0.66 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ซึ่งนับว่าเป็นสมบัติที่ดีในการใช้เตรียมแม่แบบเครื่องสุกซ์กัณฑ์ เนื่องจากทำให้แม่แบบที่เตรียมได้มีน้ำหนักเบา สะดวกแก่การใช้งานนั่นเอง



รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของพลาสติกของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟานั้นมีความหนาแน่นมากกว่าพลาสติกชนิดบีตา เนื่องจากผลึกของพลาสติกชนิดแอลฟามีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็มอย่างชัดเจนจะจับตัวกันอย่างหนาแน่น จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบระหว่างพลาสติกชนิดแอลฟามีความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกชนิดบีตา ที่ผลึกจะอยู่กันอย่างหลวมๆ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงปริมาณน้ำที่ใช้ในการเตรียมนั้น พบว่าแอลฟาใช้น้ำเพียง 40-55g ต่อพลาสติก 100 กรัม แต่บีตาจะใช้น้ำถึง 75 กรัมต่อพลาสติก 100 กรัม ดังนั้นจึงทำให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิดแอลฟามีความหนาแน่นมากกว่า และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกชนิด

แอลฟา พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแอลฟาพลาสติกเทอร์โมพลาสติกขนาดเล็กมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแอลฟาพลาสติกเทอร์โมพลาสติกขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของน้ำที่ใช้ในการเตรียมขึ้นทดสอบของแอลฟาพลาสติกที่มีอนุภาคขนาดเล็กนั้นมีปริมาณน้ำมากกว่าแอลฟาพลาสติกขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีค่าที่ต่ำกว่า เนื่องจากปริมาณของน้ำจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึกมากกว่า[4] ทำให้ความหนาแน่นต่ำกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นระหว่างวัสดุเชิงประกอบกับเรซิน โมลด์นั้น พบว่าวัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่นสูงกว่าเรซิน โมลด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของพลาสติกนั้นมีค่ามากกว่าเรซิน โมลด์หลายเท่าตัว อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลงจนใกล้เคียงกับความหนาแน่นของเรซิน โมลด์ ดังที่กล่าวไปแล้ว ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าที่อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกตั้งแต่ 80 : 20 ของแบบแอลฟาทั้ง 2 ขนาดอนุภาค และบีตาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะให้ค่าใกล้เคียงกับเรซิน โมลด์มากที่สุด

ทั้งนี้มาตรฐานการใช้งานของพลาสติกโมลด์นั้นไม่ได้มีการพิจารณาสมบัตินี้ แต่ความหนาแน่นของสารจะส่งผลกระทบต่อน้ำหนักของแบบหล่อหลังจากขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว นั่นคือวัสดุเชิงประกอบที่มีความหนาแน่นต่ำจะทำให้แบบหล่อน้ำหนักน้อย และเป็นการเพิ่มความสะดวกสบายในการทำงาน

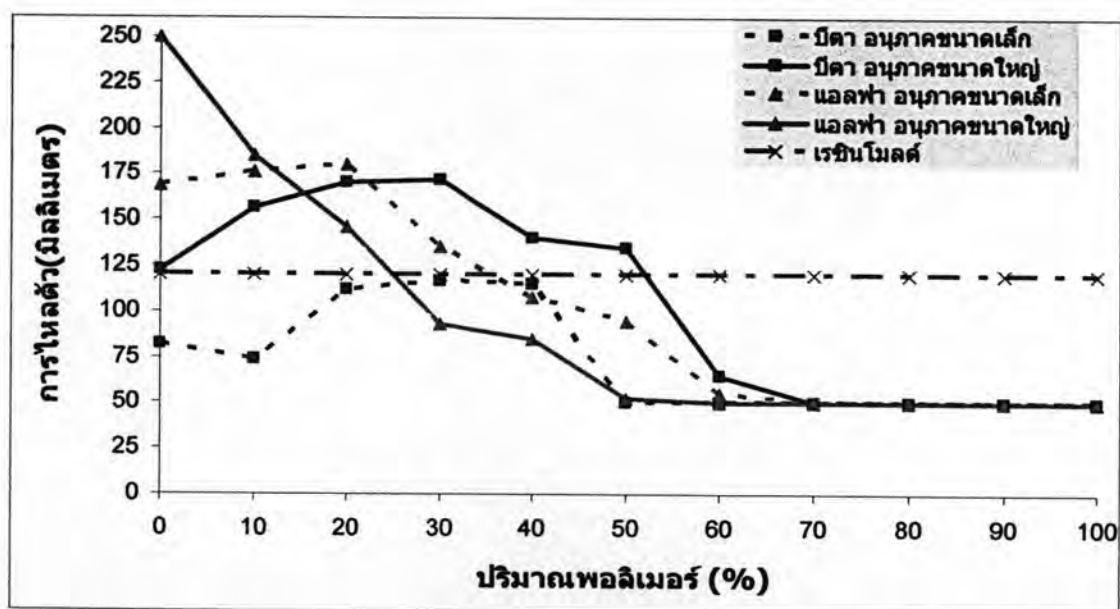
ตารางที่ 4.18 ความหนาแน่น

อัตราส่วน		แอลฟา (Alpha)				บีตา (Beta)			
พอลิเมอร์	พลาสติก	อนุภาคขนาดเล็ก		อนุภาคขนาดใหญ่		อนุภาคขนาดเล็ก		อนุภาคขนาดใหญ่	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	100	1.26	0.020	1.51	0.020	1.45	0.01	1.03	0.040
10	90	1.13	0.03	1.38	0.04	1.35	0.02	0.94	0.050
20	80	1.09	0.02	1.29	0.09	1.25	0.15	0.98	0.020
30	70	1.11	0.02	1.34	0.31	1.15	0.04	0.96	0.030
40	60	1.08	0.04	1.13	0.02	1.04	0.03	0.92	0.030
50	50	0.98	0.03	1.00	0.01	0.95	0.42	0.91	0.010
60	40	0.92	0.01	0.91	0.02	0.84	0.00	0.85	0.020
70	30	0.80	0.01	0.74	0.01	0.81	0.03	0.76	0.028
80	20	0.66	0.30	0.68	0.01	0.82	0.01	0.69	0.080
90	10	0.68	0.03	0.68	0.08	0.75	0.02	0.63	0.020
100	0	0.58	0.04	0.58	0.04	0.58	0.04	0.58	0.039

#### 4.3.1.4 การไหลตัว

จากรูปที่ 4.10 พบว่าอัตราการไหลตัวของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบีตาและแอลฟามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารเทียบเคียงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการไหลตัวต่ำ จากการทดสอบความสามารถในการไหลตัวของสารเทียบเคียง (อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ต่อพลาสติก เท่ากับ 100:0) พบว่าค่าการไหลตัวเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อปริมาณของสารเทียบเคียงเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการไหลตัวของวัสดุเชิงประกอบจะลดต่ำลง ซึ่งก็เป็นไปตามกฎของผสมเช่นเดียวกัน

เมื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบแล้วพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบีตาจะมีความสามารถในการไหลตัวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดบีตาเอง (พอลิเมอร์ 0%) ในช่วงที่อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์:พลาสติก 10:90 ถึง 50:50 ทั้งนี้เนื่องจากสารเทียบเคียงที่ใส่ลงไปนั้นจะเข้าไปเพิ่มความสามารถในการละลายของพลาสติกชนิดบีตา ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีความสามารถในการไหลตัวดีขึ้น [16] แต่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟาให้ผลตรงกันข้าม เนื่องจากสารเทียบเคียงไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการละลายของแอลฟาได้



รูปที่ 4.10 การไหลตัวของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก

เมื่อพิจารณาความสามารถในการไหลตัวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิดบีตา อนุภาคขนาดเล็ก พบว่า ค่าการไหลตัวมีค่าน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกชนิดบีตาที่อนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งอัตราส่วนที่ให้ค่าการไหลตัวดีที่สุดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกชนิดบีตาที่อนุภาคขนาดใหญ่และเล็กเท่ากับ 30:70 ซึ่งแตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบ

ที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟา กล่าวคือค่าการไหลตัวของพลาสติกชนิดแอลฟาที่อนุภาคขนาดใหญ่ นั้นมีค่าการไหลตัวสูงที่สุด แต่หลังจากเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบแล้วค่าการไหลตัวนั้นลดต่ำลง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกับมาตรฐานการไหลตัวของพลาสติกโมลด์ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 80 – 160 มิลลิเมตร [26] นั้นพบว่าอัตราส่วนระหว่างวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกชนิดบีตาที่อนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในเกณฑ์คือ อัตราส่วนระหว่าง 0:100 ถึง 50:50 แต่ในอนุภาคขนาดเล็กจะอยู่ในเกณฑ์ที่อัตราส่วนระหว่าง 20:80 ถึง 40:60 ทางด้านวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกชนิดแอลฟา อนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่ในเกณฑ์คือ อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกเท่ากับ 20:80 ถึง 40:60 ในส่วนของวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกชนิดแอลฟา อนุภาคขนาดเล็ก นั้นคือ อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกเท่ากับ 30:70 ถึง 50:50

#### 4.3.2 สมบัติเชิงกล

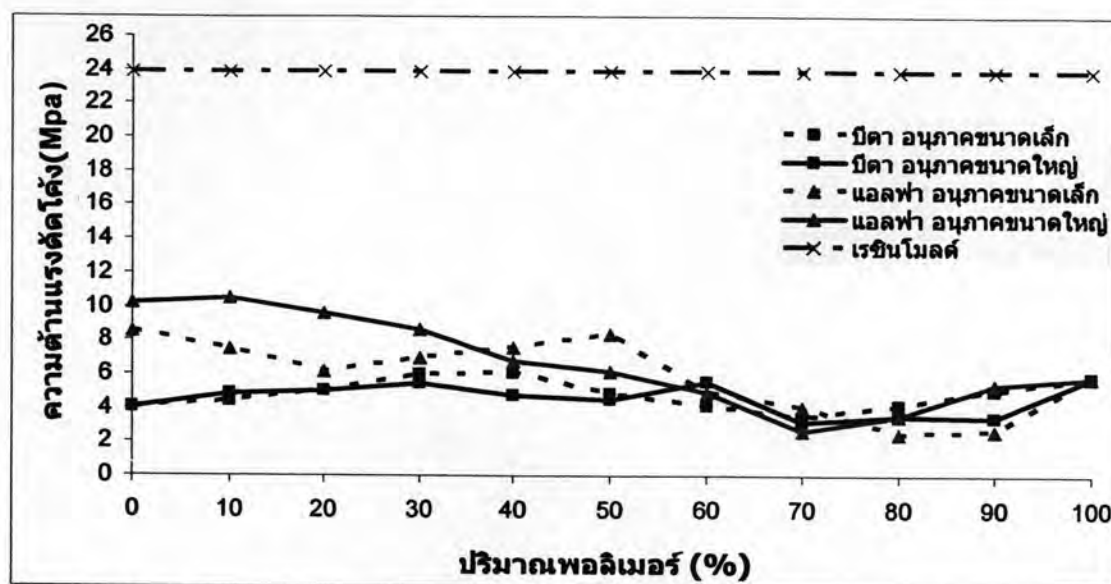
##### 4.3.2.1 ความต้านแรงดัดโค้ง (bending strength)

จากรูปที่ 4.11 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการต้านทานแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบนั้นจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะลดลงหลังจากอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ต่อพลาสติกเท่ากับ 40:60 เป็นต้นไป ยกเว้นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมอร์มากกว่าร้อยละ 20 ทั้งนี้การที่ความต้านแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเกิดจากพอลิเมอร์สามารถเข้าไปเติมในช่องว่างระหว่างผลึกของพลาสติกได้ แต่เมื่อปริมาณของพอลิเมอร์ที่มากเกินไปจะทำให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งลดลง ซึ่งผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับงานวิจัยของ J.C Rubio [14] ที่ศึกษาความสามารถในการปรับปรุงความต้านแรงดัดโค้งของชนิดบีตาด้วยพอลิเมอร์ในกลุ่มของสไตรีนบิวตะไคอิน (SBR) ผลการศึกษาพบว่าความต้านแรงดัดโค้งจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณของ SBR 10% เนื่องจาก SBR เข้าไปเกิดร่างแหในผลึกของพลาสติก แต่เมื่อปริมาณของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณของพลาสติกจะเกิดเป็นแผ่นเกล็ดอยู่บนผลึก จึงไม่สามารถเข้ามาช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดัดโค้งได้

เมื่อพิจารณาชนิดพลาสติกของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ พบว่าความต้านแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟามีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบของบีตาพลาสติก ทั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะของผลึกของพลาสติก กล่าวคือแอลฟาพลาสติกนั้นมีผลึกที่มีขนาดใหญ่ และมีรูปทรงที่ชัดเจน แต่บีตาพลาสติกนั้นผลึกจะมีขนาดเล็ก และไม่มีรูปทรงที่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถต้านทานแรงดัดโค้งได้ดีเท่ากับพลาสติกชนิดแอลฟา



ทางด้านขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกชนิดบีตาพบว่าขนาดอนุภาคไม่ส่งผลต่อความต้านแรงคดโค้ง แต่ในวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกชนิดแอลฟาพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ นั้น มีความสามารถในการทนแรงคดโค้งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคขนาดเล็ก



รูปที่ 4.11 ความต้านแรงคดโค้งของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก

เมื่อพิจารณา ผลการทดสอบเทียบกับค่าความต้านแรงคดโค้งของเรซิน โมลด์ (24 MPa) พบว่าต่างกันถึง 2 เท่าตัว แต่หากพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในการใช้งานเป็นแบบหล่อเครื่องสุขภัณฑ์ (4MPa) นั้น วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ก็ยังคงมีค่าสูงกว่าถึง 1 เท่าตัว ซึ่งอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกที่ผ่านมาตรฐานในการทำงาน อยู่ช่วงระหว่าง 0:100-60:40 โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ นั้น ให้ค่าความต้านแรงคดโค้งสูงสุด

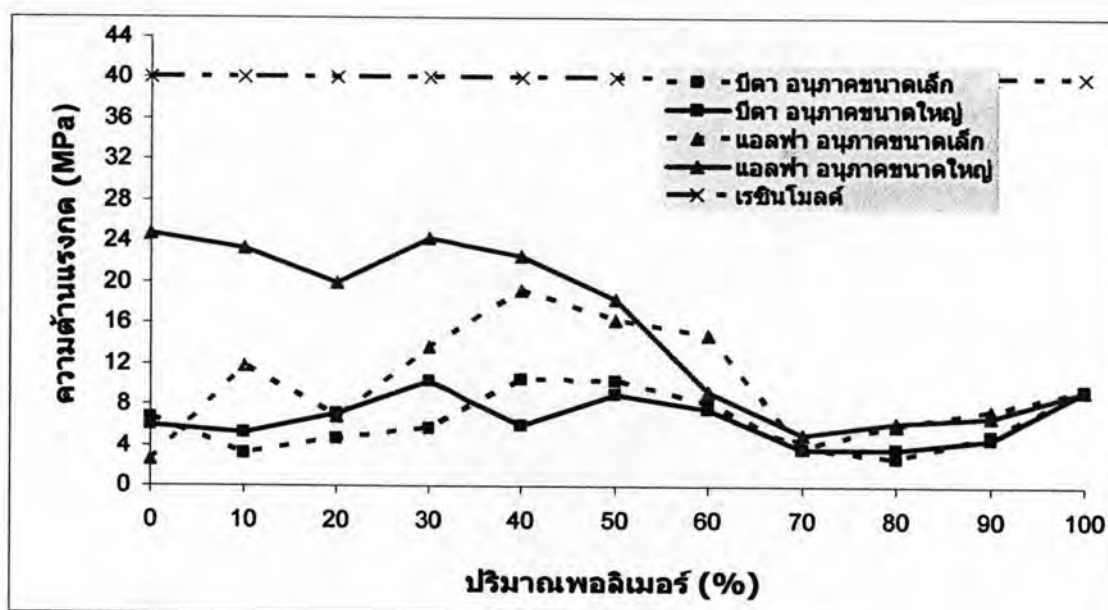
#### 4.3.2.2 ความต้านแรงกด (compressive strength)

จากรูปที่ 4.12 พบว่าวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกชนิดแอลฟาจะให้ค่าความความต้านแรงกดมากกว่าชนิดบีตา ทั้งนี้เนื่องจากการผลึกของแอลฟาพลาสติกมีขนาดใหญ่กว่าผลึกของบีตา [4]

หากพิจารณาในด้านขนาดอนุภาคของพลาสติกพบว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะมีค่าความต้านแรงกดมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากปริมาณพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) และความชิดหุ่่นนั้นเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกของพลาสติก ทั้งนี้ ในอนุภาคขนาดใหญ่จะมีปริมาณช่องว่างระหว่างผลึกสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกที่มี

อนุภาคขนาดเล็ก จึงทำให้พอลิเมอร์สามารถแทรกตัวไปในช่องว่างได้มากกว่าส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่สามารถรับแรงกดได้มากกว่า

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาความต้านแรงกดเทียบกับมาตรฐานการใช้งานเป็นแบบหล่อเครื่องสุกภัณฑ์ซึ่งมีค่าความต้านแรงกดเท่ากับ 10 MPa นั้น พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบีตาให้ค่าการทดสอบที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟาให้ค่าการทดสอบที่สูงกว่า ทั้ง 2 ขนาดอนุภาค โดยอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่คือ ตั้งแต่ 10- 50 % ในขณะที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์สำหรับอนุภาคขนาดเล็กจะผ่านมาตรฐานในช่วง 30-60 % เท่านั้น



รูปที่ 4.12 ความต้านแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก

สำหรับความความต้านแรงกดของเรซิน โมลด์นั้น พบว่ามีค่ามากกว่า 40 MPa กล่าวคือชิ้นทดสอบของเรซิน โมลด์จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามแรงที่กด ลักษณะคล้ายฟองน้ำที่หดตัวไปตามแนวแรงที่มากระทำ ซึ่งเครื่องทดสอบสามารถหาค่ามากที่สุดได้ที่ 40 MPa

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกสามารถสรุปอัตราส่วนที่ดีที่สุดในแต่ละการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.19

จากตารางที่ 4.19 แสดงอัตราส่วนที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้เตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และพลาสติกในการเตรียมเป็นแบบหล่อเครื่องสุกภัณฑ์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่มีค่าอยู่ในมาตรฐานในการใช้งาน ซึ่งพบว่าสำหรับวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกชนิดบีตาทั้ง 2 ขนาดอนุภาคนั้นมีค่าการทดสอบอยู่ในมาตรฐานทุกขเว้นความทนแรงกดซึ่งไม่ผ่านมาตรฐาน โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปทดสอบการใช้

งานอยู่ที่อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกเท่ากับ 20:80-40:60 ในส่วนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟานั้น อนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ที่ผ่านมาตรฐานอยู่ที่ระหว่าง 30:70 -40:60 และ 20:80-40:60 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.19** สรุปร้อยอัตราส่วนของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกที่เหมาะสมในการเตรียมเป็นแบบหล่อเครื่องสุกัณฑ์

สมบัติ	อัตราส่วนระหว่างวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และพลาสติก			
	แอลฟา		บีตา	
	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่
<b>สมบัติเชิงกายภาพ</b>				
การตกตะกอน	10:90-100:0	10:90-100:0	ทุกอัตราส่วน	ทุกอัตราส่วน
ความเป็นเนื้อเดียวกัน	0:100-60:40	0:100-60:40	0:100-60:40	0:100-60:40
ความหนาแน่น	ทุกอัตราส่วน	ทุกอัตราส่วน	ทุกอัตราส่วน	ทุกอัตราส่วน
การไหลตัว	30:70-50:50	20:80-40:60	20:80-40:60	0:100-50:50
เวลาในการก่อตัว	0:100-40:60	0:100-40:60	0:100-40:60	0:100-40:60
<b>สมบัติเชิงกล</b>				
ค่าความต้านแรงดัดโค้ง	0:100-70:30	0:100-70:30	0:100-70:30	0:100-60:40
ค่าความความต้านแรงกด	30:70 -60:40	10:90-50:50	-	-
<b>สรุป</b>				
อัตราส่วนที่นำไปทดสอบสมบัติทางการใช้งาน	30:70-40:60	20:70-40:60	20:80-40:60	0:100-40:60

หมายเหตุ : - ไม่มีอัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานการใช้งาน

เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่ออุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสุกัณฑ์ ทางผู้วิจัยได้อาศัยข้อสรุปข้างต้นมาเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบความสามารถในการใช้จริงของแบบหล่อที่เตรียมได้ ซึ่งมีการทดสอบเพิ่มเติมดังนี้ คือ การทดสอบความทนแรงขีดถู อัตราและปริมาตรการดูดซึมน้ำ ความต้านแรงกดอากาศ และ โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา และเพื่อพิจารณาผลของชนิดและขนาดอนุภาคของพลาสติกโมลด์ ผู้วิจัยยังคงเตรียมตัวอย่างในส่วนของบีตาพลาสติกทั้ง 2 ขนาด โดยอัตราส่วนที่เลือกใช้คือ อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกเท่ากับ 30:70 และ 40: 60

#### 4.4 สมบัติด้านการใช้งาน

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาทดลองชิ้นรูปวัสดุเชิงประกอบในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อทดสอบความสามารถในการใช้งานจริง และเปรียบเทียบกับสมบัติของเรซิน โมลด์และพลาสติกเรซิน โมลด์ เพื่อหาชนิดและขนาดอนุภาคของพลาสติกที่เหมาะสมในการใช้งานจริงต่อไป โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 ความทนแรงขัดถู (Abrasive resistance)

การทดสอบนี้เพื่อเป็นการบ่งบอกถึงความสึกกร่อนของแบบหล่อเมื่อมีการใช้งานจริง กล่าวคือ ในการใช้งานเราต้องการความทนแรงขัดถูมาก ดังนั้นชิ้นทดสอบต้องมีรอยละในการสึกกร่อนน้อย เพื่อให้แบบหล่อไม่เสียรูปร่างเมื่อผ่านการใช้งาน เพราะหากแบบหล่อเกิดการสึกกร่อนแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป ตารางที่ 4.20 แสดงร้อยละของการสึกกร่อนของชิ้นทดสอบต่างๆ

ตารางที่ 4.20 ร้อยละของการสึกกร่อน (Abrasive : %)

ชนิด	ขนาดอนุภาค	เรซิน โมลด์ (%)	พลาสติกเรซิน โมลด์ (%)	วัสดุเชิงประกอบระหว่าง พอลิเมอร์และพลาสติก (%)	
				30:70	40:60
แอลฟา	ขนาดใหญ่	0.0769	0.0536	0.0498	0.0437
	ขนาดเล็ก		0.0783	0.0694	0.0615
บีตา	ขนาดใหญ่		0.0856	0.0803	0.0756
	ขนาดเล็ก		0.5276	0.5134	0.5063

จากตารางที่ 4.20 พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกเรซินชนิดแอลฟามีร้อยละการสึกกร่อนน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกเรซินชนิดบีตา เพราะผลึกของแอลฟาพลาสติกเรซินจะมีขนาดใหญ่และแข็งแรงมากกว่าบีตา ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากบีตาพลาสติกเรซินจะมีผลึกขนาดเล็กและเกาะกันอย่างหลวมๆ ทำให้สามารถหลุดออกจากกันได้ง่ายกว่า และเมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคพบว่าพลาสติกเรซินทั้ง 2 ชนิดให้ผลในทำนองเดียวกัน นั่นคือวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีค่าการสึกกร่อนมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคขนาดเล็กไม่สามารถทนแรงขัดถูได้เท่ากับอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้แต่ละอนุภาคหลุดออกจากกันได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ และเมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบกับเรซินและพลาสติกเรซิน โมลด์ พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกเรซินชนิดแอลฟา ทั้ง 2 ขนาดอนุภาคนั้นมีค่าการสึก

กร่อนน้อยกว่าทั้งพลาสติกโมลด์และเรซินโมลด์ แต่วัสดุเชิงประกอบของบิตาพลาสติกนั้นมีค่าการสึกกร่อนมากกว่าเรซินโมลด์ แต่ยังคงน้อยกว่าพลาสติกโมลด์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

การที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีความสามารถในการทนต่อความสึกกร่อนมากขึ้นนั้น เนื่องจาก โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เข้าแทรกอยู่ภายในระหว่างผลึกของแคลเซียมซัลเฟต ทั้งนี้สารเทียบเคียงที่ใช้เป็นสารในกลุ่มของเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้จะมีความสามารถในการทนทานต่อการสึกกร่อนได้สูง

เมื่อพิจารณาหาวัสดุเชิงประกอบที่เหมาะสมต่อการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการแบบหล่อที่สึกกร่อนได้น้อย ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบที่ควรเลือกคือวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก เท่ากับ 40:60

#### 4.4.2 อัตราการดูดซึมน้ำ

อัตราการดูดซึมน้ำหรือระยะทางที่น้ำเคลื่อนที่ภายในตัวของแม่แบบในเวลา 1 วินาที สามารถบอกขนาดของรูพรุนภายในของวัสดุได้ โดยแบบหล่อที่มีขนาดรูที่เล็กจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ภายในตัวอย่างน้อยกว่าหรืออัตราในการดูดซึมน้ำจะมีค่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากสารที่มีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำแสดงว่าน้ำต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ในตัวกลาง โดยการเคลื่อนที่ของน้ำเป็นไปตามทฤษฎีการเคลื่อนที่ของของเหลว กล่าวคือ ในช่องว่างที่แคบของเหลวจะเคลื่อนที่ไปได้เร็วกว่าช่องว่างที่กว้าง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวกลางกับโมเลกุลของน้ำ (Adhesive Force) กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของน้ำ (Cohesive Force) ซึ่งในงานวิจัยนี้หมายถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในช่องว่างของชิ้นทดสอบ ซึ่งหมายถึงวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก เรซินโมลด์ และพลาสติกโมลด์

จากตารางที่ 4.21 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบิตาทั้ง 2 ขนาดอนุภาคจะมีอัตราในการการดูดซึมน้ำต่ำกว่าแอลฟาพลาสติกทั้งนี้เนื่องจากช่องว่างภายในของวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกชนิดบิตามีขนาดเล็กกว่าและหนาแน่นมากกว่าในวัสดุเชิงประกอบของพลาสติกโมลด์ชนิดแอลฟา เพราะในการเกิดผลึกภายในของพลาสติกชนิดบิตา ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและหนาแน่น ช่องว่างภายในของวัสดุเชิงประกอบนั้นจะมีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลให้อัตราในการดูดซึมน้ำมีค่าสูง เมื่อพิจารณาถึงขนาดของอนุภาคจะพบว่าขนาดอนุภาคของผลึกพลาสติกชนิดบิตานั้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซึมน้ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดของอนุภาคค่อนข้างใกล้เคียงกัน หากพิจารณาจากหลักการดังกล่าวจะพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบิตานั้นจะมีขนาดของรูภายในเล็กกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟา แต่ยังคงมีขนาดใหญ่กว่าเรซินโมลด์ซึ่งมีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงกว่ามาก (0.06 เซนติเมตร/วินาที)

ตารางที่ 4.21 อัตราการดูดซึมน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)

ชนิด	ขนาดอนุภาค	เรซิน โมลด์ (ชม./วินาที)	พลาสติก โมลด์ (ชม./วินาที)	วัสดุเชิงประกอบระหว่าง พอลิเมอร์และพลาสติก (ชม./ วินาที)	
				30:70	40:60
แอลฟา	ขนาดใหญ่	0.0600±0.0200	0.0009±0.0003	0.0005±0.0001	0.0005±0.0001
	ขนาดเล็ก		0.0014±0.0006	0.0016±0.0007	0.0010±0.0002
บีตา	ขนาดใหญ่		0.0032±0.0005	0.0028±0.0009	0.0028±0.0008
	ขนาดเล็ก		0.0029±0.0007	0.0026±0.0004	0.0025±0.0008

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบค่อนข้างไม่ต่างจากอัตราการดูดซึมน้ำของพลาสติกโมลด์เท่าไรนัก นั่นคือวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ใกล้เคียงกับแม่แบบที่ทำมาจากพลาสติกโมลด์ ดังนั้นหากพิจารณาเพียงสมบัติด้านนี้ ก็อาจกล่าวได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีความเหมาะสมในการนำไปทำแม่แบบเช่นเดียวกับพลาสติกโมลด์นั่นเอง ในด้านการใช้งานพบว่าภาคอุตสาหกรรมต้องการอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงเพื่อลดระยะเวลาในการหล่อแบบ ดังนั้นจากผลการทดสอบนี้วัสดุเชิงประกอบที่ควรเลือกใช้คือวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากบีตาพลาสติกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่นั่นเอง

#### 4.4.3 ปริมาณการดูดซึมน้ำ

ปริมาณการดูดซึมน้ำนั้นเป็นการทดสอบที่สามารถบ่งบอกได้ว่ามีปริมาณของรูพรุนของแบบหล่ออยู่มากน้อยเพียงใด ถ้าแบบหล่อมีปริมาณการดูดซึมน้ำสูง แสดงว่าในตัวของแบบหล่อมีปริมาณของรูพรุนมาก เพราะน้ำสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างได้มาก

จากตารางที่ 4.22 พบว่าเมื่อเตรียมพลาสติกเป็นวัสดุเชิงประกอบแล้ว ปริมาณในการดูดซึมน้ำของพลาสติกลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่พอลิเมอร์หรือสารที่ขบเคี้ยวเข้ามาฝังตัวหรือแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างระหว่างผลึกของพลาสติก ทำให้ปริมาณรูพรุนภายในของวัสดุลดลง โดยจะเห็นได้ชัดเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ต่อพลาสติกที่เทียบกับพลาสติกโมลด์ที่ไม่ได้ถูกปรับปรุง นั่นคือเมื่อปริมาณของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการดูดซึมน้ำจะลดลงตามลำดับ

ตารางที่ 4.22 ปริมาณการดูดซึมน้ำ

ชนิด	ขนาดอนุภาค	เรซิน โมลต์ (กรัม/ลบ.ซม.)	พลาสติก โมลต์	วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก	
				30:70	40:60
แอลฟา	ขนาดใหญ่	0.162±0.001	0.278±0.007	0.253±0.004	0.245±0.003
	ขนาดเล็ก		0.322±0.014	0.228±0.006	0.210±0.004
บีตา	ขนาดใหญ่		0.116±0.054	0.109±0.018	0.106±0.012
	ขนาดเล็ก		0.207±0.008	0.192±0.008	0.188±0.001

เมื่อพิจารณาชนิดของพลาสติก พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟานั้นมีปริมาณการดูดซึมน้ำได้สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบีตา เนื่องจากช่องว่างระหว่างผลึกของแอลฟามีขนาดใหญ่กว่าบีตา ซึ่งสามารถเห็นได้จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบทั้ง 2 ชนิด เมื่อพิจารณาขนาดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับแอลฟาพลาสติกนั้น พบว่าวัสดุเชิงประกอบของแอลฟาพลาสติกอนุภาคขนาดใหญ่มีปริมาณการดูดซึมน้ำมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบของแอลฟาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะเกิดผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างภายในมากกว่าวัสดุเชิงประกอบของแอลฟาพลาสติกที่อนุภาคขนาดเล็ก แต่ในวัสดุเชิงประกอบของบีตาพลาสติกอนุภาคขนาดเล็กมีปริมาณการดูดซึมน้ำมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากช่องว่างระหว่างผลึกของบีตาพลาสติกอนุภาคขนาดเล็กมีปริมาณมากกว่าอนุภาคใหญ่นั้นเอง ทั้งนี้สามารถสังเกตได้จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของวัสดุเชิงประกอบกับเรซิน โมลต์ พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกนั้นมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้มากกว่าเรซิน โมลต์ ยกเว้นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากบีตาพลาสติกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

และเพื่อตอบสนองความต้องการต่อการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม พบว่าแบบหล่อที่ต้องการควรมีปริมาณของรูภายในเป็นจำนวนมาก เพื่อเพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำไว้ได้นาน ทำให้น้ำไม่ระเหยออก และเมื่อมีการใช้แรงดันลมใส่เข้าไปภายในแบบหล่อ เพื่อไล่น้ำออก แบบหล่อที่มีปริมาณของรูที่มากกว่าจะใช้เวลาน้อยกว่า ดังนั้นในการทดสอบนี้วัสดุเชิงประกอบที่ควรเลือกคือวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก เท่ากับ 30:70 ซึ่งมีค่าปริมาณการดูดซึมน้ำสูงสุด

#### 4.4.4 ความสามารถในการทนแรงอัดอากาศ

การทดสอบการใช้งานนี้เป็นการทดสอบเพื่อบอกถึงความแข็งแรงของแบบหล่อ กล่าวคือแบบหล่อที่มีความแข็งแรงมากจะมีความสามารถในการทนต่อแรงอัดอากาศสูงตามไปด้วย โดยปัจจุบันการทนแรงอัดอากาศนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นแบบหล่อ

วัสดุที่สามารถทนต่อแรงอัดอากาศได้สูงจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการทำงาน เนื่องจากในกระบวนการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ในปัจจุบัน ได้มีการใช้แรงลมในการไล่น้ำออกจากแบบหล่อ ซึ่งการที่เรซินโมลด์สามารถทำงานได้ถึง 8 รอบต่อ 1 วันนั้น เนื่องจากสามารถทนแรงอัดอากาศได้ถึง 12 บาร์ (ในห้องปฏิบัติการสามารถทดลองความสามารถในการทนแรงอัดอากาศได้สูงสุดที่ 6 บาร์เท่านั้น)

จากตารางที่ 4.23 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นสามารถปรับปรุงสมบัติในการทนแรงอัดอากาศของพลาสติกโมลด์ได้ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ชัดเจนในส่วนของบีตาพลาสติกที่ความทนแรงอัดอากาศมีค่าสูงขึ้นจากพลาสติกโมลด์อย่างเด่นชัด และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของพลาสติกจะเห็นว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟามีความสามารถในการทนต่อแรงอัดอากาศมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบีตา ทั้งนี้ขนาดอนุภาคเองก็ส่งผลด้วยเช่นกัน กล่าวคืออนุภาคขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการทนแรงอัดอากาศได้สูงกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

ดังนั้นในการใช้งานจะเลือกใช้วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกชนิดแอลฟาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่อัตราส่วนเท่ากับ 30:70 ซึ่งมีความสามารถในการทนต่อแรงอัดอากาศได้สูงสุดที่ 5 บาร์

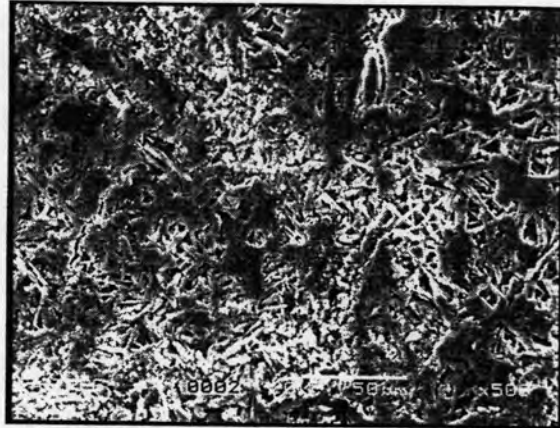
ตารางที่ 4.23 ความสามารถในการทนแรงอัดอากาศ

ชนิด	ขนาดอนุภาค	เรซิน โมลด์	พลาสติก โมลด์	วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติก	
				30:70	40:60
แอลฟา	ขนาดใหญ่	มากกว่า 6 บาร์	4 บาร์	5 บาร์	4 บาร์
	ขนาดเล็ก		4 บาร์	4 บาร์	4 บาร์
บีตา	ขนาดใหญ่		น้อยกว่า 1 บาร์	4 บาร์	3 บาร์
	ขนาดเล็ก		น้อยกว่า 1 บาร์	3 บาร์	3 บาร์



#### 4.5 ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ

ภาพที่ 4.13 แสดงโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกชนิดแอลฟาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่อัตราส่วน 30:70



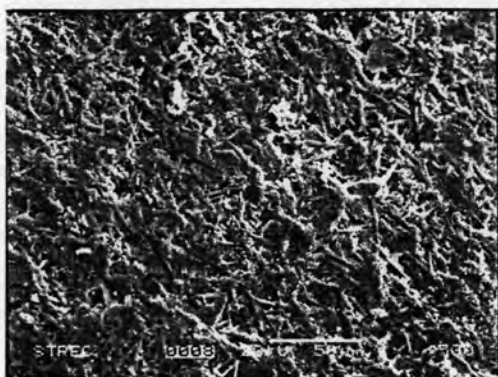
รูปที่ 4.13 วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกชนิดแอลฟา (30:70) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพจะเห็นลักษณะของผลึกของแคลเซียมซัลเฟต กระจายอยู่ทั่วไป และเห็นพอลิเมอร์เกาะกลุ่มกัน กระจายอยู่บนผลึกของแคลเซียมซัลเฟต โดยลักษณะดังกล่าวแสดงว่าชั้นทดสอบที่เตรียมได้เป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยจะเห็นว่าพอลิเมอร์จะเข้าไปสร้างเป็นร่างแหอยู่ระหว่างผลึกของแคลเซียมซัลเฟต (รูปที่ 4.14) โดยลักษณะที่เป็นร่างแหนี้จะส่งผลให้ค่าความต้านแรงกดและความต้านแรงดัดโค้งเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการที่พอลิเมอร์สามารถเข้าไปเกิดร่างแหภายในผลึกของแคลเซียมซัลเฟตนั้น แสดงว่าค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์กับแคลเซียมซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการทดสอบนี้คล้ายกับงานวิจัยของ J.C Rubio [14]



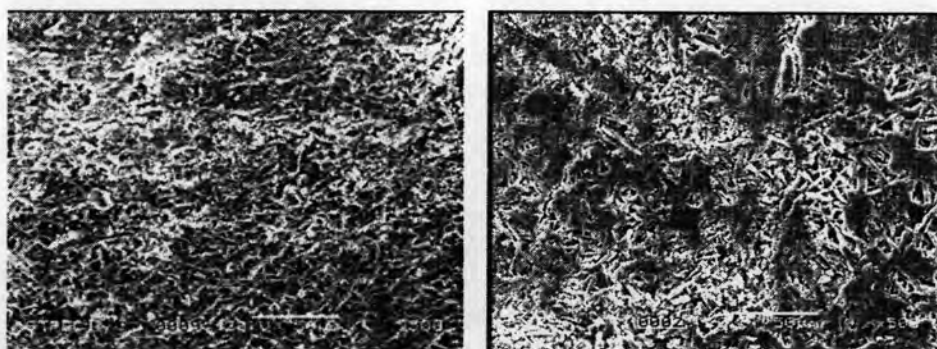
รูปที่ 4.14 วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกชนิดแอลฟา (30:70) ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า

เมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์:พลาสติกเป็น 40:60 (รูปที่ 4.15) จะเห็นว่าพอลิเมอร์กระจายอยู่ทั่วไปจนแทบจะไม่สามารถสังเกตเห็นผลึกของแคลเซียมซัลเฟต และจากการที่ปริมาณของพอลิเมอร์มากเกินไปจนช่องว่างภายในของพลาสติก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบลดลง



รูปที่ 4.15 วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกชนิดแอลฟา (40:60) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยังสามารถช่วยยืนยันผลการทดลองอัตราการดูดซึมน้ำได้ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยพิจารณารูปที่ 4.16 เปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟาและบีตา จะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดบีตาจะมีขนาดของรูภายในเล็กกว่า ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถหรืออัตราการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพลาสติกชนิดแอลฟานั้นเอง



(a)

(b)

รูปที่ 4.16 วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติก (30:70) (a) บีตาพลาสติก (b) แอลฟาพลาสติก