



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ

##### 4.1.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดีพีซัม

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบในการทำวัสดุผสมด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดีพีซัม

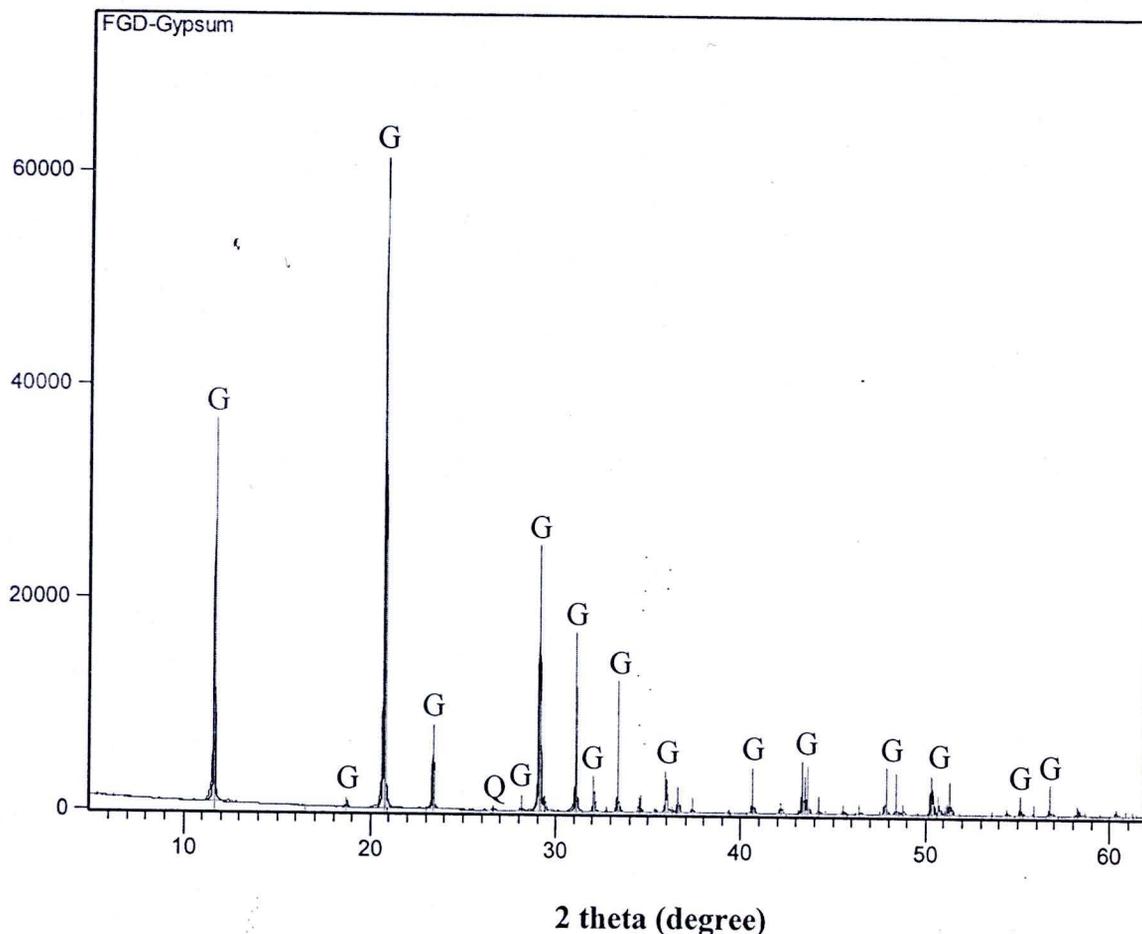
Raw materials	Chemical composition (% โดยน้ำหนัก)									
	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เอฟจีดีพีซัม	-	-	1.08	1.96	55.10	-	41.52	0.05	-	0.34

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีทำให้ทราบปริมาณของออกไซด์แต่ละชนิดในวัตถุดิบ ในตารางที่ 4.1 พบว่าเอฟจีดีพีซัมมี CaO และ SO<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบหลัก คือมีปริมาณของ CaO เท่ากับ 41.52 % และมีปริมาณของ SO<sub>3</sub> เท่ากับ 55.10 % และพบว่ามีสารปนเปื้อนอื่น ๆ ได้แก่ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ปลาสเตอร์ที่ผลิตจากเอฟจีดีพีซัมก่อตัวเร็ว นอกจากนี้ สีเหลืองอ่อนของเอฟจีดีพีซัม มาจากการปนเปื้อนของ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ TiO<sub>2</sub>

#### 4.1.2 การศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของเอฟจีดีอีพีซัมและเอฟจีดีอีพีลาสเตอร์

ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงดังรูป 4.1 และ 4.2

Intensity (counts)

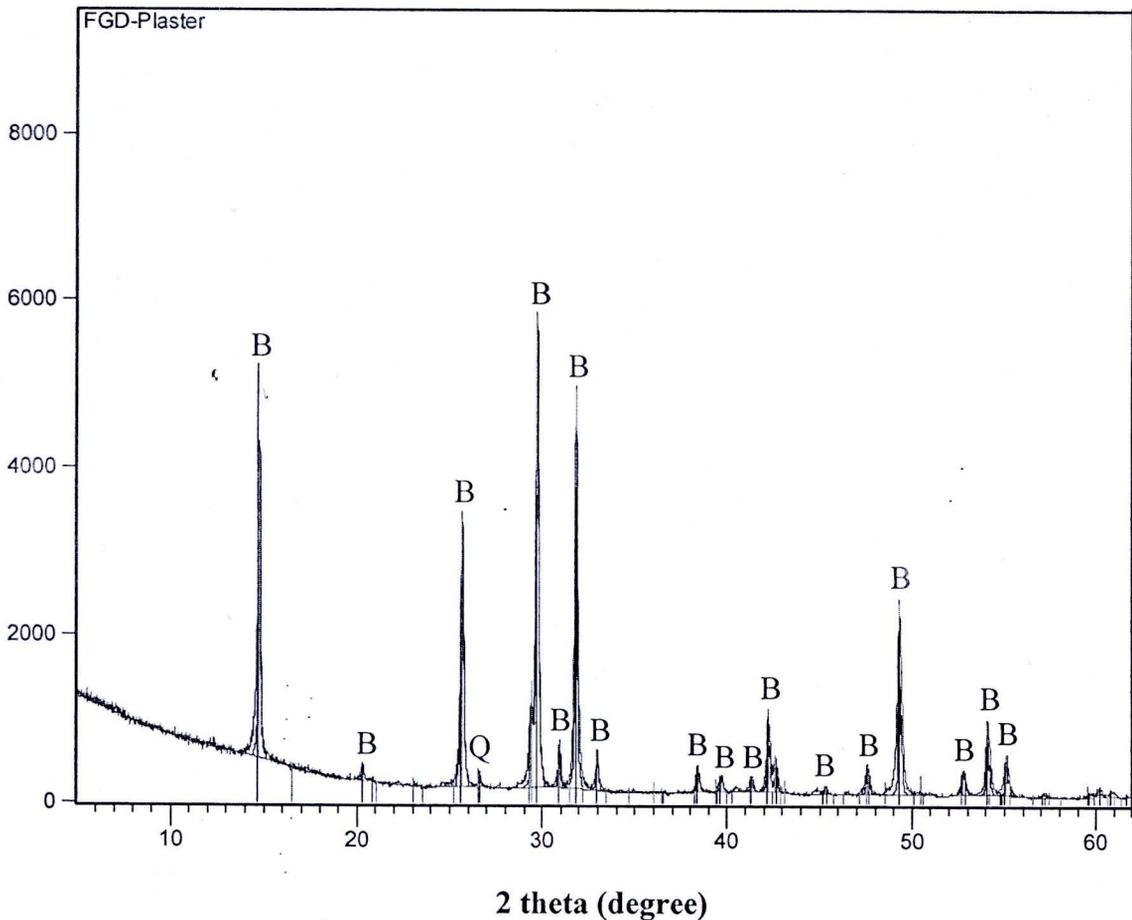


รูป 4.1 องค์ประกอบทางแร่ของเอฟจีดีอีพีซัม

[G : Gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, Q : Quartz (SiO<sub>2</sub>)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเอฟจีดีอีพีซัมพบว่า ประกอบด้วย ยิปซัมเป็นองค์ประกอบหลัก และมีสิ่งเจือปน คือ แร่ควอตซ์ และจากลักษณะของกราฟบ่งบอกความเป็นผลึกที่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และไม่พบองค์ประกอบทางแร่ของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เนื่องจากมีอยู่ในปริมาณน้อย อาจเนื่องมาจากการเตรียมตัวอย่างโดยการนำตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

Intensity (counts)



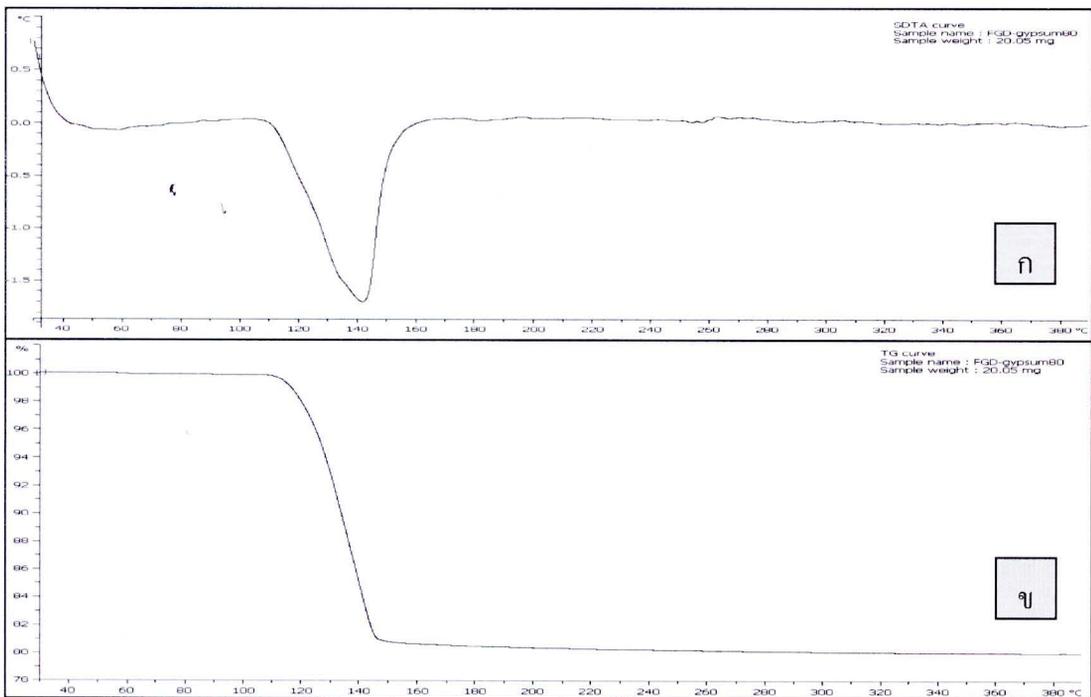
รูป 4.2 องค์ประกอบทางแร่ของเอฟจีดีปลาสเตอร์

[B: Bassanite (Calcium Sulfate Hemihydrate) ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$ ), Q : Quartz ( $\text{SiO}_2$ )]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเอฟจีดีปลาสเตอร์ พบว่าประกอบด้วย Calcium Sulfate Hemihydrate (Bassanite) เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงว่า เอฟจีดียิปซัม (Calcium Sulfate Dehydrate) สามารถเปลี่ยนเป็นเอฟจีดีปลาสเตอร์ (Bassanite) ที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และจากลักษณะของกราฟบ่งบอกความเป็นผลึกที่สมบูรณ์ และไม่พบองค์ประกอบทางแร่ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เนื่องจากมีอยู่ในปริมาณน้อย อาจเนื่องมาจากการเตรียมตัวอย่างโดยการนำตัวอย่างมาผ่านตระแกรงเบอร์ 200 ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรกชัน

#### 4.1.3 การศึกษาผลทางความร้อนของเอพิจีตียิปซัม

วิเคราะห์ผลทางความร้อนของเอพิจีตียิปซัม ด้วยเครื่อง DTA และ TG เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของเอพิจีตียิปซัมเมื่อสัมผัสความร้อน รวมถึงการทำนายอุณหภูมิที่ไשרะเหยนน้ำบางส่วนออกจากโมเลกุลของเอพิจีตียิปซัม (Dehydration) แล้วเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเอพิจีตียิปลาสเตอร์ ดังแสดงในรูป 4.3



รูป 4.3 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง DTA (วัตต์/กรัม) กับ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ของเอพิจีตียิปซัม  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง TG (วัตต์/กรัม) กับ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ของเอพิจีตียิปซัม

เครื่อง DTA เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เครื่อง DTA มีหลักในการทำงานคือ บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีของสารตัวอย่างล้วนแต่เกี่ยวข้องกับการดูดความร้อนและคายความร้อนทั้งสิ้น ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่างจะทำให้ทราบว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมี นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ได้อีกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนหรือคายความร้อน

เครื่อง TG เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนเช่นเดียวกับเครื่อง DTA หลักการทำงานของเครื่อง TG คือ บันทึกอุณหภูมิขณะที่สารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง TG จะทำให้ทราบว่าน้ำหนักของสารตัวอย่างเริ่มต้นหายไปที่อุณหภูมิเท่าใด และเมื่อวิเคราะห์ผลจะทำให้ทราบว่าน้ำหนักของสารที่หายไป เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่นการระเหยของน้ำที่ผิวของอนุภาค หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การระเหยน้ำออกจากโครงสร้างโมเลกุลของสาร

ผลการวิเคราะห์เอพิจิตีปซัมด้วยเครื่อง DTA ในช่วงอุณหภูมิ 30-380 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าที่อุณหภูมิ 80-160 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน(Endothermic Reaction) เนื่องจากมีการระเหยของน้ำส่วนที่เป็นความชื้นและน้ำส่วนที่อยู่ในโครงสร้างของเอพิจิตีปซัมออกไป และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TG พบว่ามีน้ำหนักหายไปจากเอพิจิตีปซัมประมาณ 17% โดยน้ำหนักเริ่มต้นหายไปที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และน้ำหนักจะเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และจะลดลงอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่าผลการทดสอบด้วยเครื่อง DTA แสดงอุณหภูมิสิ้นสุดของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของยิปซัม ณ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง TG โดยแสดงให้เห็นถึงการระเหยน้ำออกจากโครงสร้าง (Combined Water) ของเอพิจิตีปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) แล้ว กลายเป็นเอพิจิตีปลาสเตอร์ ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดจะเริ่มต้นและสิ้นสุดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 80 - 160 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา Dehydration) เพื่อแคลไซน์เอพิจิตีปซัมในระดับห้องปฏิบัติการ

#### 4.1.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุยิป

สมบัติทางกายภาพของเอพิจิตีปซัมเปรียบเทียบกับเอพิจิตีปลาสเตอร์เปรียบเทียบกับปูนปลาสเตอร์ทางการค้า แสดงดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 สมบัติทางกายภาพของเอพิจิตีปซัมเปรียบเทียบกับเอพิจิตีปลาสเตอร์

ลักษณะทางกายภาพ	เอพิจิตีปซัม	เอพิจิตีปลาสเตอร์
สี	น้ำตาลอ่อน	เหลืองอ่อน
ความถ่วงจำเพาะ	2.23	2.10
ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)	ไม่แข็งตัว	10

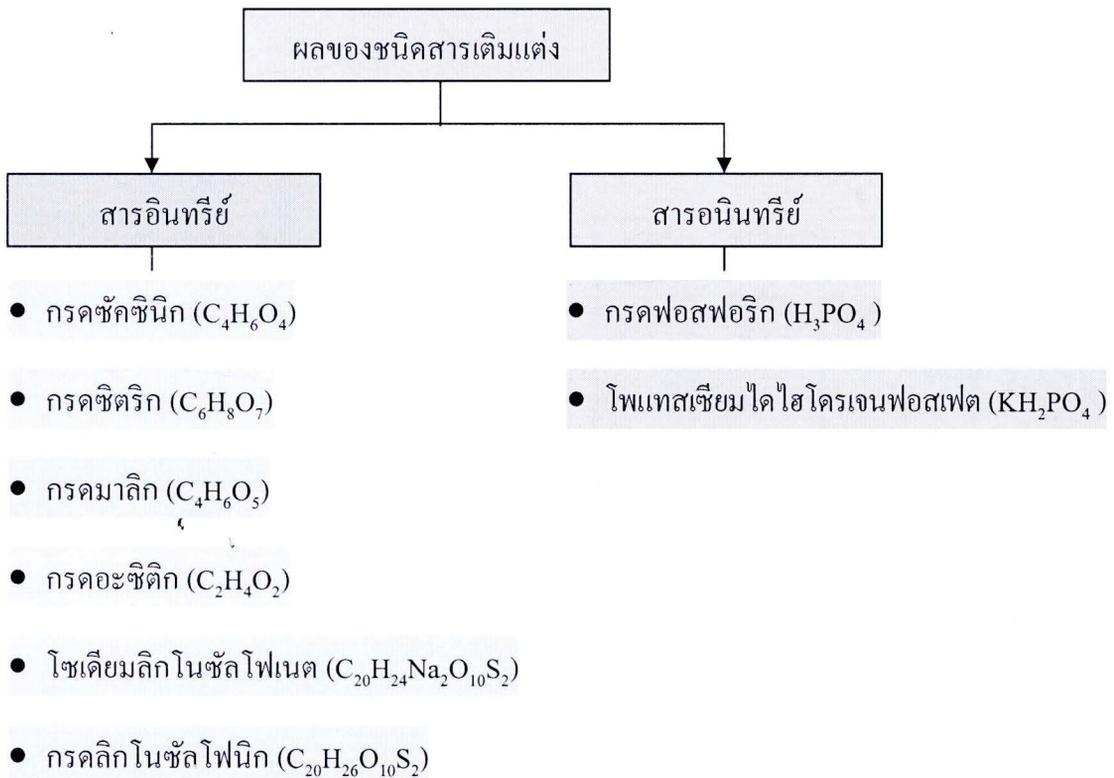
ลักษณะกายภาพของเอฟจีดีพีซีเอ็มมีสีน้ำตาลอ่อนและเอฟจีดีพีลาสเตอร์มีสีเหลืองอ่อน เนื่องจากมีองค์ประกอบของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ปนเปื้อนอยู่ซึ่งพบได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อนำเอฟจีดีพีซีเอ็มผสมน้ำ พบว่าไม่เกิดการก่อตัว เนื่องจากมีแร่ Gypsum เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแร่ยิปซัมจะมีผลึกของน้ำอยู่ 2 โมเลกุล ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นโครงสร้างที่เสถียร จึงไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย

เอฟจีดีพีลาสเตอร์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ทำให้ น้ำในโครงสร้างบางส่วนหลุดออกไป และเกิดเฟสของเฮมิไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) ที่มีโครงสร้างผลึกที่มีความเสถียรน้อย เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดการก่อตัวกลายเป็นผลึกของเอฟจีดีพีซีเอ็มเกิดขึ้นอีกครั้ง เอฟจีดีพีลาสเตอร์มีระยะเวลาการก่อตัวค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับปูนปลาสเตอร์ทางการค้า เนื่องจากสารปนเปื้อนได้แก่  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ในเอฟจีดีพีลาสเตอร์ทำหน้าที่เป็นผลึกล่อ (Seeding) ซึ่งจะก่อให้เกิดการตกผลึกอย่างรวดเร็วส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวมีค่าน้อย ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

#### 4.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัวและสมบัติเชิงกลของเอฟจีดีพีลาสเตอร์

##### 4.2.1 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัวของ เอฟจีดีพีลาสเตอร์

ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) เป็นดัชนีบ่งชี้ความไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของเอฟจีดีพีลาสเตอร์ โดยวัดระยะเวลาการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C472-99 [18] งานวิจัยนี้ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัวของเอฟจีดีพีลาสเตอร์ โดยสารเติมแต่งที่ใช้ศึกษาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม แสดงดังรูป 4.4



รูป 4.4 แผนภาพของกลุ่มสารเติมแต่งที่ใช้ในการศึกษาระยะเวลาการก่อตัวของเอฟฟี่ดีปลาสเตอร์

#### 4.2.1.1 ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ที่ศึกษาคือ

1. กรดซัคซินิก (0.01 0.03 0.05 และ 0.07 % โดยน้ำหนัก)
2. กรดซิตริก (0.01 0.03 0.05 และ 0.07 % โดยน้ำหนัก)
3. กรดมาลิก (0.01 0.03 0.05 และ 0.07 % โดยน้ำหนัก)
4. กรดอะซิติค (0.1 0.3 0.5 และ 0.7 % โดยน้ำหนัก)
5. โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต (0.1 0.3 0.5 และ 0.7 % โดยน้ำหนัก)
6. กรดลิกโนซัลโฟนิก (0.6 0.7 0.8 และ 0.9 % โดยน้ำหนัก)

ตาราง 4.3 ผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงปฏิกิริยาไฮดรเจนที่มีต่อการก่อตัวของ เอฟจีดีพลาสติกเตอร์

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน้ำหนัก)	เวลาในการก่อตัว (นาที)	ความสามารถ ในการหน่วงปฏิกิริยา (เท่า)
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(ไม่เติมสารเติมแต่ง)	10	1
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดซัคซินิก 0.01% โดยน.น.)	13	1
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดซัคซินิก 0.03% โดยน.น.)	17	2
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดซัคซินิก 0.05% โดยน.น.)	21	2
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดซัคซินิก 0.07% โดยน.น.)	29	3
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดซिटริก 0.01% โดยน.น.)	20	2
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดซिटริก 0.03% โดยน.น.)	28	3
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดซिटริก 0.05% โดยน.น.)	44	4
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดซिटริก 0.07% โดยน.น.)	69	7
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดมาลิก 0.01% โดยน.น.)	16	2
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดมาลิก 0.03% โดยน.น.)	30	3
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดมาลิก 0.05% โดยน.น.)	50	5
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดมาลิก 0.07% โดยน.น.)	78	8
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดอะซิติค 0.1% โดยน.น.)	18	2
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดอะซิติค 0.3% โดยน.น.)	28	3
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดอะซิติค 0.5% โดยน.น.)	44	4
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์(กรดอะซิติค 0.7% โดยน.น.)	52	5
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์ (โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.1% โดยน.น.)	14	1
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์ (โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.3% โดยน.น.)	26	3
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์ (โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.5% โดยน.น.)	29	3
เอฟจีดีพลาสติกเตอร์ (โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.7% โดยน.น.)	34	3

ตาราง 4.3 ผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงปฏิกิริยาไฮดรชันชนิดสารอินทรีย์ที่มีต่อการก่อตัวของเอพิจีปลาสเตอร์ (ต่อ)

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	เวลาในการก่อตัว (นาที)	ความสามารถ ในการหน่วงปฏิกิริยา (เท่า)
เอพิจีปลาสเตอร์ (กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.6% โดยน.น.)	22	2
เอพิจีปลาสเตอร์ (กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.7% โดยน.น.)	25	3
เอพิจีปลาสเตอร์ (กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.8% โดยน.น.)	27	3
เอพิจีปลาสเตอร์ (กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.9% โดยน.น.)	31	3

1. ผลของกรดซัคซินิก การเติมกรดซัคซินิกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของเอพิจีปลาสเตอร์นานขึ้น อยู่ในช่วง 13-29 นาที เนื่องจากเกิดการดูดซับของไอออนลบของหมู่คาร์บอกซิลในกรดซัคซินิกกับไอออนบวกของแคลเซียมที่บริเวณผิวผลึกเอพิจีปลาสเตอร์ได้ ทำให้บริเวณผิวผลึกไม่มีพื้นที่ว่างที่จะจับกับน้ำ ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮดรชันเกิดช้าลง ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น [2,26-27]

สรุปคือกรดซัคซินิกสามารถเป็นสารหน่วงปฏิกิริยา ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวช้า

2. ผลของกรดซिटริก การเติมกรดซिटริกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของเอพิจีปลาสเตอร์นานขึ้น อยู่ในช่วง 20-69 นาที เนื่องจากเกิดการดูดซับของไอออนลบของหมู่คาร์บอกซิลในกรดซिटริกกับไอออนบวกของแคลเซียมที่บริเวณผิวผลึกเอพิจีปลาสเตอร์ทำให้บริเวณผิวผลึกไม่มีพื้นที่ว่างที่จะจับกับน้ำเช่นเดียวกับกรดซัคซินิก ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮดรชันเกิดช้าลงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น [2,26-27]

สรุปคือกรดซिटริกสามารถเป็นสารหน่วงปฏิกิริยาได้ ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวช้า

3. ผลของกรดมาลิก การเติมกรดมาลิกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของเอพิจีปลาสเตอร์นานขึ้น อยู่ในช่วง 16 - 78 นาที เนื่องจากเกิดการดูดซับของไอออนลบของหมู่คาร์บอกซิลในกรดมาลิกกับไอออนบวกของแคลเซียมที่บริเวณผิวผลึกเอพิจีปลาสเตอร์ทำให้บริเวณผิวผลึกไม่มีพื้นที่ว่างที่จะจับกับน้ำเช่นเดียวกับกรดซัคซินิกและกรดซिटริก ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮดรชันเกิดช้าลงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น [2,26-27]

สรุปคือกรดมาลิกสามารถเป็นสารหน่วงปฏิกิริยาได้ ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวช้า

4. ผลของกรดอะซิดิก การเติมกรดอะซิดิกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการก่อดัวของเอฟจีดีพลาสติกอร์นานขึ้น อยู่ในช่วง 18 – 52 นาที เนื่องจากเกิดการดูดซับของไอออนลบของหมู่คาร์บอกซิลในกรดอะซิดิกกับไอออนบวกของแคลเซียมที่บริเวณผิวผลึกเอฟจีดีพลาสติกอร์ ทำให้บริเวณผิวผลึกไม่มีพื้นที่ว่างที่จะจับกับน้ำเช่นเดียวกับกรดซัลฟิวริก กรดซिटริก แลกรดมาลิก ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดช้าลงทำให้ระยะเวลาการก่อดัวเพิ่มขึ้น [2,27]

สรุปคือกรดอะซิดิกสามารถเป็นสารหน่วงปฏิกิริยาได้ ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดัวช้า

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาเฉพาะในกลุ่มสารเติมแต่งชนิดกรดอินทรีย์ พบว่าที่ความเข้มข้นเดียวกันกรดซัลฟิวริกมีความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำที่สุด โดยที่ความเข้มข้น 0.07 % โดยน้ำหนัก กรดซัลฟิวริกมีความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาเพียง 3 เท่า ซึ่งที่ความเข้มข้นเดียวกันนั้น กรดอะซิดิก กรดซिटริก และกรดมาลิก มีความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาเป็น 5 7 และ 8 เท่าตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษา พบว่ากรดมาลิกสามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มีประสิทธิภาพ โดยที่ความเข้มข้น 0.07 % โดยน้ำหนัก กรดมาลิกมีความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็น 8 เท่า และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 พบว่าลักษณะของเส้นกราฟที่พลอตระหว่างความเข้มข้นของกรดอินทรีย์กับระยะเวลาการก่อดัว พบว่าเส้นกราฟของกรดมาลิกมีความชันมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นของกรดมาลิกไปหนึ่งหน่วย จะส่งผลให้อัตราการเพิ่มระยะเวลาการก่อดัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ เนื่องจากกรดมาลิกมีความซับซ้อนของโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนมากกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ จึงจับกับน้ำได้ดีกว่า กรดมาลิกจึงเป็นสารหน่วงปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

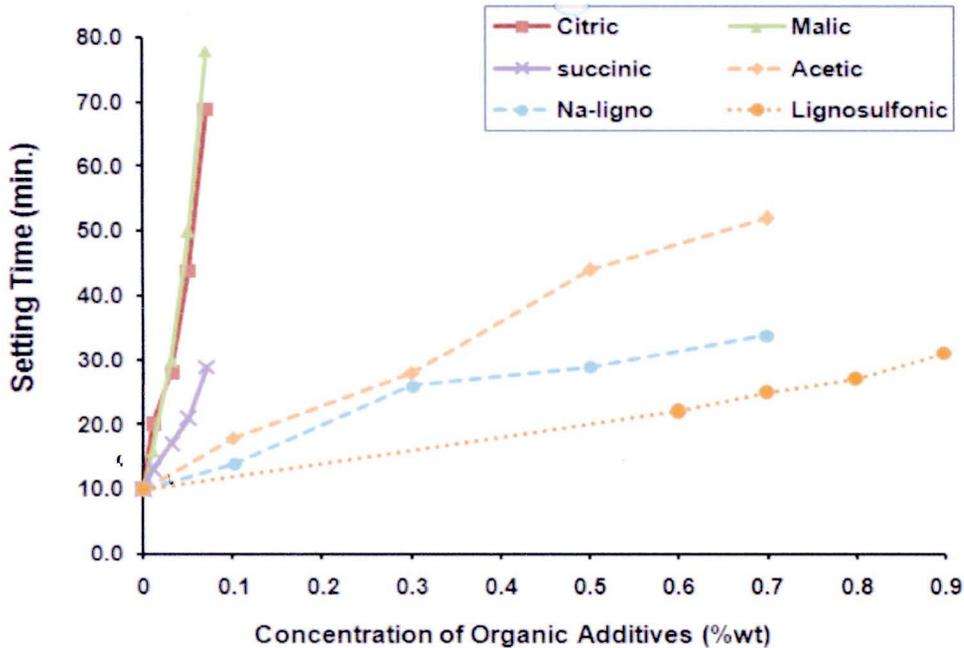
สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการ ให้ระยะเวลาการก่อดัวมีค่าประมาณ 30 นาที ซึ่งเทียบเท่ากับระยะเวลาการก่อดัวของพลาสติกอร์ทางการค้า ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงเป้าหมายงานวิจัยที่ต้องการ พบว่าจะต้องใช้ กรดซัลฟิวริก 0.07 % โดยน้ำหนัก ในขณะที่ถ้าเลือกใช้กรดซिटริกหรือกรดมาลิกจะใช้เพียง 0.03 % โดยน้ำหนัก ดังนั้นการใช้กรดซिटริกหรือกรดมาลิกเป็นสารเติมแต่งจะเหมาะสมกว่าเนื่องจากใช้ปริมาณน้อยแต่มีประสิทธิภาพในการยืดระยะเวลาการก่อดัวสูง

5. ผลของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต การเติมโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของเอฟเจดีพลาสติกอร์นานขึ้น อยู่ในช่วง 14-34 นาที เนื่องจากโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตห่วงปฏิริยาไฮเดรชันโดยการปรับประจุของอนุภาคที่อยู่ในน้ำให้เหมือนกัน ซึ่งเป็นการห่วงปฏิริยาไฮเดรชันโดยอาศัยหลักการของไฟฟ้าสถิตย์ ในทางปฏิบัติเมื่อกวนผสมเอฟเจดีพลาสติกอร์กับน้ำ อนุภาคของเอฟเจดีพลาสติกอร์ในน้ำจะเกาะกลุ่มกัน (Flocculate) เนื่องจากอนุภาคมีทั้งประจุบวกและลบ การเกาะกลุ่มของอนุภาคทำให้น้ำที่ช่วยในการไหลตัวลดลง เนื่องจากน้ำไปอยู่ที่ผิวของอนุภาคมากขึ้น โมเลกุลของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตจะปรับสภาพผิวของอนุภาคพลาสติกอร์และยิปซัมในน้ำให้มีประจุที่เหมือนกัน โดยมีความเป็นบวกเหมือนกัน เนื่องจากโซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) และเนื่องจากโมเลกุลของลิกโนซัลโฟเนตมีขนาดใหญ่จึงสามารถขัดขวางไม่ให้อนุภาคเข้าใกล้กัน ซึ่งเรียกว่า "Steric Hindrance" ทำให้อนุภาคกระจายตัวและมีความหนืดลดลง ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้นด้วย [2,26-27]

สรุปคือโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตสามารถเป็นสารห่วงปฏิริยาได้ ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวช้า

6. ผลของกรดลิกโนซัลโฟนิค การเติมกรดลิกโนซัลโฟนิคในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของเอฟเจดีพลาสติกอร์นานขึ้น อยู่ในช่วง 22-31 นาที เนื่องจากกรดลิกโนซัลโฟนิคห่วงปฏิริยาไฮเดรชันด้วยไฟฟ้าสถิตย์และ Steric Hindrance เช่นเดียวกับโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตซึ่งแรงทางไฟฟ้าสถิตย์เป็นเพียงแรงอ่อน ๆ เท่านั้น โดยทำให้อนุภาคเป็นบวกเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ที่มาจากกรดลิกโนซัลโฟนิค ทำให้การห่วงปฏิริยาไฮเดรชันสิ้นสุดลงในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ยังพบว่าความชันของเส้นกราฟแสดงเวลาการก่อตัวของกรดลิกโนซัลโฟนิคมีความชันน้อยมาก แสดงว่าการเพิ่มปริมาณกรดลิกโนซัลโฟนิค มีผลต่อการเพิ่มของระยะเวลาในการก่อตัวน้อยมาก ทั้งนี้ในกลุ่มสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์กรดลิกโนซัลโฟนิคมีความสามารถในการห่วงปฏิริยาค่ำที่สุด เพราะต้องเติมในปริมาณมากจึงจะสามารถเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวได้ แต่กลับทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของกรดลิกโนซัลโฟนิคแตกตัวได้น้อยกว่าโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตจึงทำให้กลไกการห่วงปฏิริยาไฮเดรชันด้วยไฟฟ้าสถิตย์เกิดได้น้อย แต่ด้วยโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จึงทำหน้าที่เป็นเหมือนกำแพงกันและขัดขวางการรวมตัวกันของอนุภาคเอฟเจดียิปซัม ส่งผลให้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

สรุปคือกรดลิกโนซัลโฟนิค ไม่สามารถห่วงปฏิริยาไฮเดรชันได้



รูป 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์

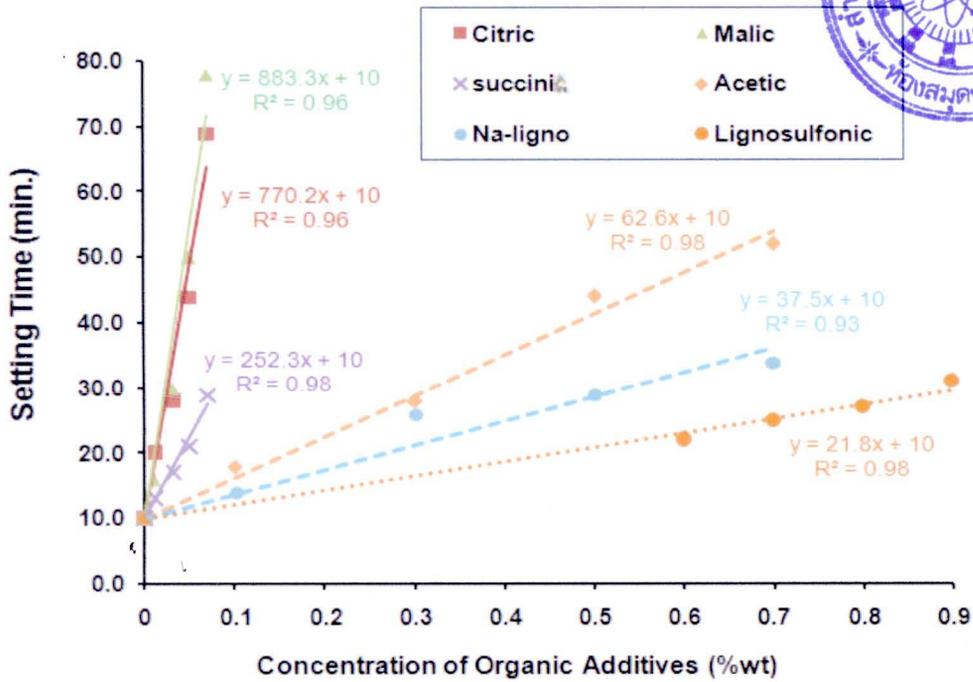
จากผลการทดลองพบว่า กรดมาลิกจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงปฏิกิริยาได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณการเติมและชนิดของสารตัวเติมอื่น ๆ รองลงมาคือ กรดซิตริก ซัคซินิก อะซิติก และ โซเดียมลิกโนซัลไฟเฟนิต ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเติมกรดมาลิกลงไปจะเกิดการดูดซับของไอออนลบของหมู่คาร์บอกซิลกับไอออนบวกของแคลเซียมที่บริเวณผิวผลึกเอพิจีปลาสเตอร์ทำให้ผิวผลึกไม่มีพื้นที่ให้น้ำเข้าจับกับผิวผลึก ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดช้าลงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ผลการดูดซับกรดมาลิก บนผิวผลึกยิปซัมสอดคล้องกับผลของ B. Elisabeth และคณะ [19] ที่พบว่ากรดมาลิกดูดซับบนผิวผลึกสูงถึง 64% ส่งผลให้หน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดี ทำให้มีเวลาการก่อตัวนานที่สุด นอกจากนี้กรดมาลิกมีความซับซ้อนของโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนมากกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ จึงสามารถจับกับน้ำได้ในปริมาณมากกว่า ส่งผลให้การหน่วงปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 2-8 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเอพิจีปลาสเตอร์ที่ไม่ได้มีการเติมสารชนิดใด ๆ

สำหรับกรดลิกโนซัลไฟเฟนิต และ โซเดียมลิกโนซัลไฟเฟนิต หน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยไฟฟ้าสถิตย์และ Steric Hindrance ซึ่งแรงทางไฟฟ้าสถิตเป็นเพียงแรงอ่อน ๆ เท่านั้น ทำให้การหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันสั้นสุดลงในระยะเวลาอันสั้น จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าความชันของเส้นกราฟแสดงเวลาการก่อตัวของกรดลิกโนซัลไฟเฟนิต มีความชันน้อยมาก แสดงว่าการเพิ่มปริมาณกรด

ลิกโนซัลโฟนิก มีผลต่อการเพิ่มของระยะเวลาในการก่อตัวน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาไฮดรชันของ กรดลิกโนซัลโฟนิก และโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต พบว่าโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตสามารถหน่วงปฏิกิริยาได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตเป็นเกลือของโลหะอัลคาไลด์จึงมีความสามารถในการละลายได้ดีกว่า จึงแตกตัวเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีส่งผลให้กลไกการหน่วงปฏิกิริยาไฮดรชันด้วยไฟฟ้าสถิตย์เกิดได้ดี

#### 4.2.1.1.1 การสร้างสมการเพื่อพยากรณ์ระยะเวลาการก่อตัวของเอฟจีดีพลาสติกอร์ในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์โดยใช้ปริมาณของสารเติมแต่งเป็นตัวพยากรณ์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่งในรูป 4.5 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ในช่วงของความเข้มข้นที่สนใจศึกษามีแนวโน้มของลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงและมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก แสดงให้เห็นว่า หากเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งจะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ จึงสร้างสมการเส้นตรงเพื่อทำนายระยะเวลาในการก่อตัว โดยความชันของกราฟเส้นตรงจะบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการก่อตัวเมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งความชันของกราฟนี้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการหน่วงปฏิกิริยาของสารเติมแต่งแต่ละชนิด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R$ ) บอกถึงระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่ง และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยความเข้มข้นของสารเติมแต่ง สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานแสดงให้เห็นค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยของการทำนายด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ โดยตาราง 4.4 และ รูป 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่ง และสมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวโดยใช้ปริมาณของสารเติมแต่งเป็นตัวพยากรณ์



รูป 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ และสมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัว

ตาราง 4.4 สมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ และค่าสถิติต่าง ๆ

สารเติมแต่ง	สมการพยากรณ์ ระยะเวลา การก่อตัว $f(x)$	ความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ $\frac{df(x)}{dx}$ (นาที / % โดยน.น.)	สัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (R)	สัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ (R <sup>2</sup> )	ค่าความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (นาที)
กรดซัคซินิก	$252.3x + 10$	252.3	0.99	0.98	1.13
กรดซิตริก	$770.2x + 10$	770.2	0.98	0.96	4.04
กรดมาติก	$883.3x + 10$	883.2	0.98	0.96	5.14
กรดอะซิติก	$62.6x + 10$	62.6	0.99	0.98	1.89
โซเดียมลิก โนซัลโฟเนต	$37.5x + 10$	37.5	0.97	0.93	2.63
กรดลิกโน ซัลโฟนิก	$21.8x + 10$	21.8	0.99	0.98	0.61

1. กรดซัลฟูริก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวในระบบที่มีกรดซัลฟูริกเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $f(x) = 252.3x + 10$  โดยที่  $f(x)$  คือ ระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการพยากรณ์ ความชันของกราฟเส้นตรงนี้มีค่าเท่ากับ 252.3 แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง หากความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 0.01% โดยน้ำหนัก แล้วจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัว เปลี่ยนแปลงไป 2.523 นาที หรือ ประมาณ 2 นาที 31 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.99 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.98 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกสามารถใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวได้ถูกต้อง 98% และขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 2% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 1.13 นาที หรือ ประมาณ 1 นาที 8 วินาที แสดงว่า การทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเป็น 1 นาที 8 วินาที แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นจึงสร้างช่วงของการพยากรณ์ได้ดังนี้  $f(x) \pm 1.13$

2. ผลของกรดซिटริก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวในระบบที่มีกรดซिटริกเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $f(x) = 770.2x + 10$  โดยที่  $f(x)$  คือ ระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการพยากรณ์ ความชันของกราฟเส้นตรงนี้มีค่าเท่ากับ 770.2 แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง หากความเข้มข้นของกรดซิทริกเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 0.01% โดยน้ำหนัก แล้วจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัว เปลี่ยนแปลงไป 7.7 นาที หรือ ประมาณ 7 นาที 42 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.98 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของกรดซิทริกมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 0.96 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดซิทริกสามารถใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวได้ถูกต้อง 96 % และขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 4% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 4.04 นาที หรือ ประมาณ 4 นาที 3 วินาที แสดงว่า การทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเป็น 4 นาที 3 วินาที แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นจึงสร้างช่วงของการพยากรณ์ได้ดังนี้  $f(x) \pm 4.04$

3. ผลของกรดมอลิก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวในระบบที่มีกรดมอลิกเป็นตัวหน่วยปฏิกิริยา คือ  $f(x) = 883.3x + 10$  ความชันของกราฟเส้นตรงนี้มีค่าเท่ากับ 883.3 แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง หากความเข้มข้นของกรดมอลิกเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 0.01% โดยน้ำหนัก แล้วจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัว เปลี่ยนแปลงไป 8.8 นาที หรือ ประมาณ 8 นาที 50 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.98 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของกรดมอลิกมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 0.96 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดมอลิกสามารถใช้ในการทำนายระยะเวลาการก่อตัวได้ถูกต้อง 96% และขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 4% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 5.14 นาที หรือ ประมาณ 5 นาที 8 วินาที แสดงว่า การทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเป็น 5 นาที 8 วินาที แต่ความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นจึงสร้างช่วงของการพยากรณ์ได้ดังนี้  $f(x) \pm 5.14$

4. ผลของกรดอะซีติก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวในระบบที่มีกรดอะซีติกเป็นตัวหน่วยปฏิกิริยา คือ  $f(x) = 62.6x + 10$  ความชันของกราฟเส้นตรงนี้มีค่าเท่ากับ 62. เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ความเข้มข้นของกรดอะซีติกในหน่วย 0.1% โดยน้ำหนัก จึงอาจกล่าวได้ว่าเปลี่ยนแปลง หากความเข้มข้นของกรดอะซีติกเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 0.1% โดยน้ำหนัก แล้วจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัว เปลี่ยนแปลงไป 6.2 นาที หรือ ประมาณ 6 นาที 16 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.99 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของกรดอะซีติกมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.98 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดอะซีติกสามารถใช้ในการทำนายระยะเวลาการก่อตัวได้ถูกต้อง 98% และขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 2% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 1.89 นาที หรือ ประมาณ 1 นาที 53 วินาที แสดงว่า การทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเป็น 1 นาที 53 วินาที แต่ความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นจึงสร้างช่วงของการพยากรณ์ได้ดังนี้  $f(x) \pm 1.89$

5. ผลของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อดัวในระบบที่มีโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $f(x) = 37.5x + 10$  ความชันของกราฟเส้นตรงนี้มีค่าเท่ากับ 37.5 แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการวิจัยนี้ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตในสเกล 0.1% โดยน้ำหนัก จึงอาจกล่าวได้ว่าเปลี่ยนแปลง หากความเข้มข้นของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 0.1% โดยน้ำหนัก แล้วจะทำให้ระยะเวลาการก่อดัวเปลี่ยนแปลงไป 3.75 นาที หรือ ประมาณ 3 นาที 45 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.97 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อดัวกับความเข้มข้นของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.93 บ่งบอกว่าความเข้มข้นของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตสามารถใช้ในการทำนายระยะเวลาการก่อดัวได้ถูกต้อง 94% และขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 7% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 2.63 นาที หรือ ประมาณ 2 นาที 38 วินาที แสดงว่า การทำนายระยะเวลาการก่อดัวด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเป็น 2 นาที 38 วินาที แต่ความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างระยะเวลาการก่อดัวที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นไปได้ทั้งกรณีที่ค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นจึงสร้างช่วงของการพยากรณ์ได้ดังนี้  $f(x) \pm 2.63$

6. ผลของกรดลิกโนซัลโฟนิค สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อดัวในระบบที่มีกรดลิกโนซัลโฟนิค คือ  $f(x) = 21.8x + 10$  ความชันของกราฟเส้นตรงนี้มีค่าเท่ากับ 21.8 แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการวิจัยนี้ใช้ความเข้มข้นของกรดลิกโนซัลโฟนิค ในหน่วย 0.1% โดยน้ำหนัก จึงอาจกล่าวได้ว่าเปลี่ยนแปลง หากความเข้มข้นของกรดลิกโนซัลโฟนิค เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 0.1% โดยน้ำหนัก แล้วจะทำให้ระยะเวลาการก่อดัวเปลี่ยนแปลงไป 2.2 นาที หรือ ประมาณ 2 นาที 11 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.99 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อดัวกับความเข้มข้นของกรดลิกโนซัลโฟนิค มีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.98 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตสามารถใช้ในการทำนายระยะเวลาการก่อดัวได้ถูกต้อง 98% และขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 2% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 0.61 นาที หรือ ประมาณ 37 วินาที แสดงว่าการทำนายระยะเวลาการก่อดัวด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเป็น 37 วินาที แต่ความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างระยะเวลาการก่อดัวที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นไปได้ทั้งกรณีที่ค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นจึงสร้างช่วงของการพยากรณ์ได้ดังนี้  $f(x) \pm 0.61$

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่ง และการสร้างกราฟเพื่อทำนายแนวโน้มทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ จากความชันของกราฟดังกล่าวทำให้ทราบว่า กรดมาลิกเป็นสารเติมแต่งที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงที่สุด นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ บอกถึงระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่ง ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการก่อตัวในระดับสูงมาก สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสารเติมแต่งนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.94 - 0.99 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยความเข้มข้นของสารเติมแต่งว่ามีความถูกต้องถึง 94-99 % ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่หายไปแสดงให้เห็นถึงปัจจัยร่วมอื่น ๆ อาทิเช่นอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น ส่วนค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานแสดงให้เห็นค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยของการทำนายด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 1 - 5 นาที

เมื่อพิจารณาสมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวโดยใช้ปริมาณของสารเติมแต่งชนิดอินทรีย์เป็นตัวพยากรณ์ พบว่าสมการพยากรณ์ที่ใช้กรดซัคซินิก กรดอะซิติก และกรดลิกโนซัลโฟนิก เป็นตัวพยากรณ์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.99 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.98 ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุด เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์พบว่าสมการของกรดลิกโนซัลโฟนิกมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำที่สุดคือ 0.61 นาที รองลงมาคือสมการของกรดซัคซินิก มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 1.13 นาที แต่เนื่องจากกรดลิกโนซัลโฟนิกไม่สามารถหน่วงปฏิกิริยาได้ ดังนั้นสมการพยากรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือที่สุดคือ สมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวที่ใช้ปริมาณของกรดซัคซินิกเป็นตัวพยากรณ์ แสดงสมการดังต่อไปนี้

$$f(x) = 252.3x + 10$$

เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.99 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.99 ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุด และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน 1.13 นาที แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของกรดซัคซินิก มีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และมีประสิทธิภาพในการทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยความเข้มข้นของสารเติมแต่งว่ามีความถูกต้องถึง 99 % และมีความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์เพียง 1.13 นาที

อย่างไรก็ตามสมการพยากรณ์นี้เหมาะสำหรับใช้พยากรณ์ในช่วง (Interpolation) กล่าวคือเหมาะที่จะนำไปพยากรณ์ระยะเวลาการก่อตัว เมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ในช่วงของขอบเขตที่ศึกษา ทั้งนี้เพราะไม่ทราบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการก่อตัวเมื่อความเข้มข้นอยู่นอกช่วงขอบเขตที่ศึกษา เช่น สมการพยากรณ์ระยะเวลาการก่อตัวของเอพิจีดีพลาสติกเตอร์ในระบบที่มีกรดมาลิกเป็นสารเติมแต่ง สมการนี้จะใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวได้ดี เมื่อกรดมาลิกมีความเข้มข้นในช่วง 0.01 – 0.07 % โดยน้ำหนัก แต่ถ้าหากใช้สมการดังกล่าวทำนายระยะเวลาการก่อตัวเมื่อกรดมาลิกมีความเข้มข้นอยู่นอกช่วงของขอบเขตที่ศึกษา อาจพบความคลาดเคลื่อนได้มาก

#### 4.2.1.2 ชนิดและปริมาณของตัวเติมสารอนินทรีย์ที่ศึกษาคือ

1. กรดฟอสฟอริก (0.1 0.2 0.3 และ 0.4 % โดยน้ำหนัก)
2. โพลีแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (0.1 0.3 0.5 และ 0.7 % โดยน้ำหนัก)

ตาราง 4.5 ผลของชนิดและปริมาณของสารหน่วงปฏิกิริยาไฮดรอนที่มีต่อการก่อตัวของเอพิจีดีพลาสติกเตอร์

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	เวลาใน การก่อตัว (นาที)	ความสามารถ ในการหน่วงปฏิกิริยา (เท่า)
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (ไม่เติมสารเติมแต่ง)	10	1
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (กรดฟอสฟอริก 0.1% โดยน.น.)	30	3
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (กรดฟอสฟอริก 0.2% โดยน.น.)	50	5
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (กรดฟอสฟอริก 0.3% โดยน.น.)	68	7
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (กรดฟอสฟอริก 0.4% โดยน.น.)	78	8
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.1% โดยน.น.)	19	2
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.3% โดยน.น.)	33	3
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.5% โดยน.น.)	42	4
เอพิจีดีพลาสติกเตอร์ (โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.7% โดยน.น.)	50	5

1. ผลของกรดฟอสฟอริก การเติมกรดฟอสฟอริกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการก่อดัวของเอฟจีดีพลาสติกอร์นานขึ้น อยู่ในช่วง 30 - 78 นาที เนื่องจากเมื่อกรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะแตกตัวให้  $H^+$  และ  $H^+$  จะทำหน้าที่ปรับประจุของอนุภาคในน้ำให้เป็นบวกเหมือนกัน ซึ่งเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยอาศัยหลักการของไฟฟ้าสถิตย์เช่นเดียวกับโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต และกรดลิกโนซัลโฟนิค จึงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดัวเพิ่มขึ้น 3-8 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเอฟจีดีพลาสติกอร์ที่ไม่ได้มีการเติมสารชนิดใด ๆ

สรุปคือกรดฟอสฟอริก สามารถเป็นสารหน่วงปฏิกิริยา ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดัวเพิ่มขึ้น

2. ผลของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต การเติมโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการก่อดัวของเอฟจีดีพลาสติกอร์นานขึ้น อยู่ในช่วง 19 - 50 นาที ซึ่งเห็นได้ชัดว่าสามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยกว่ากรดฟอสฟอริกเนื่องจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็น  $K^+$  และ  $H^+$  ซึ่ง  $K^+$  และ  $H^+$  จะทำหน้าที่ปรับประจุของอนุภาคในน้ำให้เป็นบวกเหมือนกัน ซึ่งเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยอาศัยหลักการของไฟฟ้าสถิตย์เช่นเดียวกับโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต กรดลิกโนซัลโฟนิค และกรดฟอสฟอริก จึงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดัวเพิ่มขึ้น 2-5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเอฟจีดีพลาสติกอร์ที่ไม่ได้มีการเติมสารชนิดใด ๆ เนื่องจากการละลายของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตซึ่งตัวถูกละลายสถานะของแข็งในตัวทำละลายของเหลวจะต้องใช้พลังงานในการละลายมากกว่าจึงทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนบวกได้น้อยกว่ากรดฟอสฟอริก นอกจากนี้หากเติมโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในปริมาณเพิ่มขึ้นโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตส่วนที่ละลายไม่หมดจะกลายเป็นตัวล่อผลึก (Seeding) ทำให้ระยะเวลาในการก่อดัวเร็วกว่าการเติมกรดฟอสฟอริก

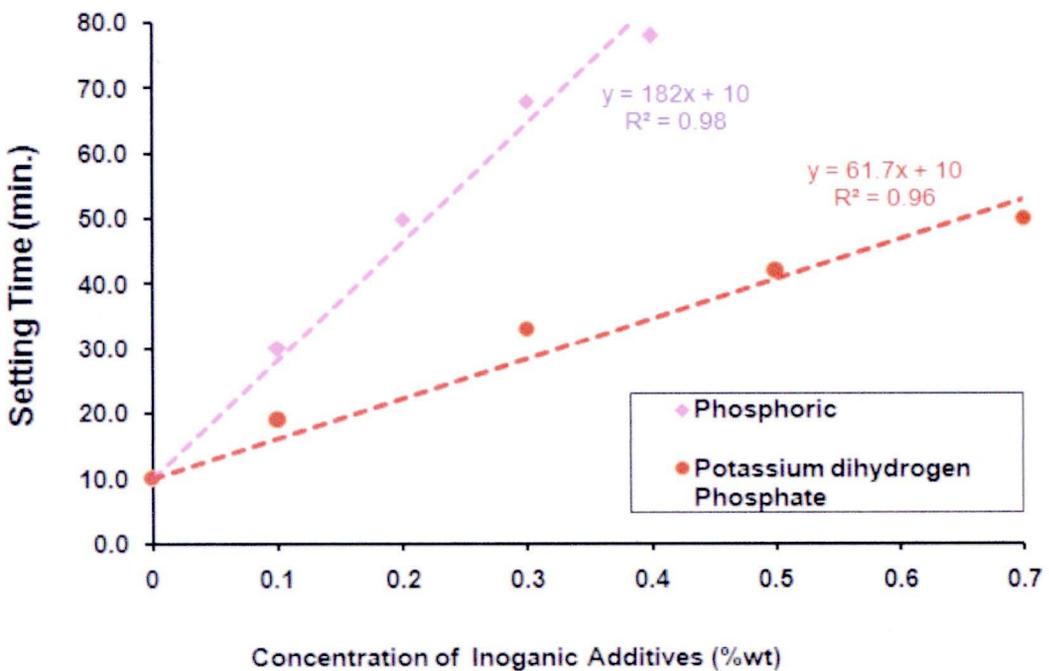
สรุปคือโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต สามารถเป็นสารหน่วงปฏิกิริยา ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดัวเพิ่มขึ้น 2 - 5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเอฟจีดีพลาสติกอร์ที่ไม่ได้มีการเติมสารเติมแต่ง

จากผลการทดลองพบว่ากรดฟอสฟอริกและโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นสารอนินทรีย์ที่สามารถหน่วงปฏิกิริยาได้ เนื่องจากเมื่อกรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วแตกตัวให้  $H^+$  และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะแตกตัวให้  $H^+$  และ  $K^+$  จากนั้นไอออนบวกเหล่านั้นจะทำหน้าที่ปรับประจุของอนุภาคในน้ำให้เป็นบวกเหมือนกัน จึงเกิดแรงผลักรัน ซึ่งเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยอาศัยหลักการของไฟฟ้าสถิตย์ จึงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเอฟจีดีพลาสติกอร์ที่ไม่ได้มีการเติม

สารเติมแต่ง ดังนั้นการเติมกรดฟอสฟอริกและโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต จึงสามารถ  
 หน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของเอฟจีดีปลาสเตอร์ได้

#### 4.2.1.1.2 การสร้างสมการเพื่อพยากรณ์ระยะเวลาการก่อตัวของเอฟจีดีปลาสเตอร์ใน ระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดสารอนินทรีย์โดยใช้ปริมาณของสารเติมแต่งเป็นตัวพยากรณ์

จากรูป 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่ง  
 พบว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่งในช่วงของ  
 ความเข้มข้นที่สนใจศึกษา มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเชิงบวก ทำนองเดียวกับหัวข้อ  
 4.2.1.1.1 โดยตาราง 4.6 แสดงสมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวและค่าสถิติต่าง ๆ ในระบบที่  
 มีสารเติมแต่งชนิดสารอนินทรีย์



รูป 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดสารอนินทรีย์  
 และสมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัว

ตาราง 4.6 สมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดสารอนินทรีย์ และค่าสถิติต่าง ๆ

สารเติมแต่ง	สมการพยากรณ์ ระยะเวลา การก่อตัว $f(x)$	ความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ $\frac{df(x)}{dx}$ (นาที/%โดยน.น.)	สัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (R)	สัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ ( $R^2$ )	ค่าความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน (นาที)
กรดฟอสฟอริก	$182x + 10$	182	0.99	0.98	8.49
โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต	$61.7x + 10$	61.7	0.98	0.96	3.64

1. กรดฟอสฟอริก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวในระบบที่มีกรดฟอสฟอริกเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $f(x) = 182x + 10$  ความชันของกราฟเส้นตรงนี้มีค่าเท่ากับ 182 แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง หากความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 0.1% โดยน้ำหนัก แล้วจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัว เปลี่ยนแปลงไป 18.2 นาที หรือ ประมาณ 18 นาที 12 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.99 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.98 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกสามารถใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวได้ถูกต้อง 98% และขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 2% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 8.49 นาที หรือ ประมาณ 8 นาที 29 วินาที แสดงว่า การทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเป็น 8 นาที 29 วินาที แต่ว่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ได้จากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นจึงสร้างช่วงของการพยากรณ์ได้ดังนี้  $f(x) \pm 8.49$

2. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวในระบบที่มีโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $f(x) = 61.7x + 10$  ความชันของกราฟเส้นตรงนี้มีค่าเท่ากับ 61.7 แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง หากความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 0.1% โดยน้ำหนัก แล้วจะทำให้

ระยะเวลาการก่อตัว เปลี่ยนแปลงไป 6.2 นาที หรือ ประมาณ 6 นาที 12 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.98 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต มีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.96 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต สามารถใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวได้ถูกต้อง 96% และขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 4% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์เท่ากับ 3.64 นาที หรือ ประมาณ 3 นาที 38 วินาที แสดงว่า การทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเป็น 3 นาที 38 วินาที แต่ว่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นไปได้ทั้งกรณีที่ค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นจึงสร้างช่วงของการพยากรณ์ได้ดังนี้  $f(x) \pm 3.64$

เมื่อพิจารณาสมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวโดยใช้ปริมาณของสารเติมแต่งชนิดอนินทรีย์เป็นตัวพยากรณ์ พบว่าสมการพยากรณ์ที่ใช้กรดฟอสฟอริก เป็นตัวพยากรณ์มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.99 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.98 ซึ่งมีค่าสูงกว่าสมการพยากรณ์ที่ใช้โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เป็นตัวพยากรณ์เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์พบว่าสมการของกรดฟอสฟอริกมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 8.49 นาที ซึ่งมีค่ามากกว่าสมการของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ถึงสองเท่า ดังนั้นสมการพยากรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือที่สุดคือ สมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวที่ใช้ปริมาณของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นตัวพยากรณ์ แสดงสมการดังต่อไปนี้

$$f(x) = 61.7x + 10$$

เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.98 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.96 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวกับความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และมีประสิทธิภาพในการทำนายระยะเวลาการก่อตัวด้วยความเข้มข้นของสารเติมแต่งว่ามีความถูกต้องถึง 96 % และมีความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์เพียง 3.64 นาที

อย่างไรก็ตามสมการพยากรณ์นี้เหมาะสำหรับใช้พยากรณ์ในช่วง (Interpolation) กล่าวคือสมการนี้จะใช้ทำนายระยะเวลาการก่อตัวได้ดี เมื่อกรดฟอสฟอริกและโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต มีความเข้มข้นในช่วง 0.1 – 0.7 % โดยน้ำหนัก แต่ถ้าหากใช้สมการดังกล่าวทำนาย

ระยะเวลาการก่อตัวเมื่อมีความเข้มข้นอยู่นอกช่วงของขอบเขตที่ศึกษา อาจพบความคลาดเคลื่อนได้มาก เนื่องจากไม่ทราบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการก่อตัวเมื่อความเข้มข้นอยู่นอกช่วงของขอบเขตที่ศึกษา

#### 4.2.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติเชิงกลของเอพิจีดีพลาสติกอร์

ความหนาแน่น (Bulk Density) วิเคราะห์ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบแทนที่น้ำ ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและค่าความทนต่อการกัดกร่อนตามมาตรฐาน ASTM C472-99 [18]

4.2.2.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตาราง 4.7 ผลของชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ	ความแข็งแรงต่อ การกัดกร่อน (เมกะปาสกาล)
เอพิจีดีพลาสติกอร์(ไม่เติมสารเติมแต่ง)	1.12	32.20	10.5
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดซัลฟูริก 0.01% โดยน.น.)	1.11	26.8	10.8
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดซัลฟูริก 0.03% โดยน.น.)	1.10	30.0	9.3
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดซัลฟูริก 0.05% โดยน.น.)	1.09	31.7	8.7
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดซัลฟูริก 0.07% โดยน.น.)	1.07	32.2	7.6
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดซिटริก 0.01% โดยน.น.)	1.15	27.1	8.5
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดซิทริก 0.03% โดยน.น.)	1.11	27.4	7.6
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดซิทริก 0.05% โดยน.น.)	1.08	32.6	7.3
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดซิทริก 0.07% โดยน.น.)	1.06	37.4	7.1
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดมาลิก 0.01% โดยน.น.)	1.15	28.4	11.9
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดมาลิก 0.03% โดยน.น.)	1.14	29.2	10.2
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดมาลิก 0.05% โดยน.น.)	1.13	30.3	9.2
เอพิจีดีพลาสติกอร์(กรดมาลิก 0.07% โดยน.น.)	1.13	32.4	7.9

ตาราง 4.7 ผลของชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม (ต่อ)

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ	ความแข็งแรงต่อ การกดอัด (เมกะปาสกาล)
เอพิจีดีพลาสติก (กรดอะซีติก 0.1% โดยน.น.)	1.09	26.8	8.6
เอพิจีดีพลาสติก (กรดอะซีติก 0.3% โดยน.น.)	1.09	30.0	6.7
เอพิจีดีพลาสติก (กรดอะซีติก 0.5% โดยน.น.)	1.05	31.7	6.5
เอพิจีดีพลาสติก (กรดอะซีติก 0.7% โดยน.น.)	1.03	32.2	5.3
เอพิจีดีพลาสติก (โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.1% โดยน.น.)	1.07	28.3	9.9
เอพิจีดีพลาสติก (โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.3% โดยน.น.)	1.10	25.9	11.5
เอพิจีดีพลาสติก (โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.5% โดยน.น.)	1.06	26.1	12.2
เอพิจีดีพลาสติก (โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.7% โดยน.น.)	1.05	29.2	11.6
เอพิจีดีพลาสติก (กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.6% โดยน.น.)	1.12	27.7	8.3
เอพิจีดีพลาสติก (กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.7% โดยน.น.)	1.13	27.1	9.1
เอพิจีดีพลาสติก (กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.8% โดยน.น.)	1.14	24.8	10.2
เอพิจีดีพลาสติก (กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.9% โดยน.น.)	1.16	21.3	12.8

### 1. ผลของกรดซัคซินิก

ความหนาแน่น กรดซัคซินิกส่งผลให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.07 - 1.11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงตามปริมาณการเติมกรดซัคซินิก เนื่องจากปริมาณกรดซัคซินิกที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของผลึกทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ความยาวเพิ่มขึ้นและความกว้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาในการเติบโตผลึกได้นานขึ้น แต่อัตราการเติบโตของด้านกว้างจะเพิ่มขึ้นมากกว่าหากเติมกรดซัคซินิกที่ความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งการจัดเรียงตัวของผลึกในลักษณะดังกล่าวจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมลดลง

ค่าการดูดซึมน้ำ กรดซัคซินิกส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 26.8-32.2% เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่มีอัตราการเติบโตของด้านกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่า ทำให้มีช่องว่างขนาดใหญ่มากขึ้น และการสานเกี่ยวกันของผลึกลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีรูพรุน

เปิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น

ค่าการทนต่อแรงกดอัด กรดซัลฟูริกส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดอยู่ในช่วง 7.6 – 10.8 เมกะปาสกาล แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

สรุปคือเมื่อปริมาณกรดซัลฟูริก เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

## 2. ผลของกรดซัลฟูริก

ความหนาแน่น กรดซัลฟูริกส่งผลให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.06 - 1.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงตามปริมาณการเติมกรดซัลฟูริก เนื่องจากปริมาณกรดซัลฟูริกที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของผลึกทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ความยาวเพิ่มขึ้นและความกว้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาในการเติบโตผลึกได้นานขึ้น แต่อัตราการเติบโตของด้านกว้างจะเพิ่มขึ้นมากกว่าหากเติมกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งการจัดเรียงตัวของผลึกในลักษณะดังกล่าวจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมลดลง

ค่าการดูดซึมน้ำ กรดซัลฟูริกส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 27.1 - 37.4% เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่มีอัตราการเติบโตของด้านกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่า ทำให้มีช่องว่างขนาดใหญ่มากขึ้น และการสานเกี่ยวกันของผลึกลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีรูพรุนเปิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น

ค่าการทนต่อแรงกดอัด กรดซัลฟูริกส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดอยู่ในช่วง 7.1 – 8.5 เมกะปาสกาล แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

สรุปคือเมื่อปริมาณกรดซัลฟูริก เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

### 3. ผลของกรดมาลิก

ความหนาแน่น กรดมาลิกส่งผลให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.13 - 1.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงตามปริมาณการเติมกรดมาลิก เนื่องจากปริมาณกรดมาลิกที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของผลึกทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ความยาวเพิ่มขึ้นและความกว้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาในการเติบโตผลึกได้นานขึ้น แต่อัตราการเติบโตของด้านกว้างจะเพิ่มขึ้นมากกว่าหากเติมกรดมาลิก ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งการจัดเรียงตัวของผลึกในลักษณะดังกล่าวจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมลดลง

ค่าการดูดซึมน้ำ กรดมาลิกส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 28.4 - 32.4% เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่มีอัตราการเติบโตของด้านกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่า ทำให้มีช่องว่างขนาดใหญ่มากขึ้น และการสานเกี่ยวกันของผลึกลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีรูพรุนเปิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น

ค่าการทนต่อแรงกดอัด กรดมาลิกส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดอยู่ในช่วง 7.9 - 11.9 เมกะปาสกาล แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

สรุปคือเมื่อปริมาณกรดมาลิก เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

### 4. ผลของกรดอะซิติก

ความหนาแน่น กรดอะซิติกจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.03 - 1.09 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงตามปริมาณการเติมอะซิติก เนื่องจากปริมาณกรดอะซิติกที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของผลึกทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ความยาวเพิ่มขึ้นและความกว้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาในการเติบโตผลึกได้นานขึ้น แต่อัตราการเติบโตของด้านกว้างจะเพิ่มขึ้นมากกว่าหากเติมกรดอะซิติกที่ความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งการจัดเรียงตัวของผลึกในลักษณะดังกล่าวจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมลดลง

ค่าการดูดซึมน้ำ กรดอะซิติกจะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 26.8 - 32.2% เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่มีอัตราการเติบโตของด้านกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่า ทำให้มีช่องว่างขนาดใหญ่มากขึ้น และการสานเกี่ยวกันของผลึกลักษณะดังกล่าวส่งผลให้

มีรูพรุนเปิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น

ค่าการทนต่อแรงกดอัด กรดอะซิติกส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดอยู่ในช่วง 5.3 – 8.6 เมกะปาสกาล แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

สรุปคือเมื่อปริมาณอะซิติกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

### 5. ผลของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต

ความหนาแน่น โซเดียมลิกโนซัลโฟเนตส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 1.05-1.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต เป็นรูพรุนอยู่ภายในจึงทำให้น้ำหนักรวมของวัสดุผสมลดลง

ค่าการดูดซึมน้ำ โซเดียมลิกโนซัลโฟเนตส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 25.9-29.2% แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น คือเมื่อค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นค่าการดูดซึมน้ำจะลดลง

ค่าการทนต่อแรงกดอัด โซเดียมลิกโนซัลโฟเนตส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดอยู่ในช่วง 9.9-12.2 เมกะปาสกาล แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ คือ เมื่อปริมาณ ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลงด้วย

สรุปคือเมื่อปริมาณโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

### 6. ผลของกรดลิกโนซัลโฟนิค

ความหนาแน่น กรดลิกโนซัลโฟนิคส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 1.05-1.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต เป็นรูพรุนอยู่ภายในจึงทำให้น้ำหนักรวมของวัสดุผสมลดลง

ค่าการดูดซึมน้ำ กรดลิกโนซัลโฟนิคส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 25.9-29.2% แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น คือเมื่อค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำจะลดลง

ค่าการทนต่อแรงกดอัด กรดลิกโนซัลโฟนิคส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดอยู่ในช่วง 9.9-12.2 เมกะปาสกาล แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ คือเมื่อปริมาณ ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

สรุปคือเมื่อปริมาณกรดลิกโนซัลโฟนิค เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

จากผลการทดลองพบว่าสารตัวเติมชนิดสารอินทรีย์คือ กรดซัลซินิกที่ปริมาณการเติม 0.01 % โดยน้ำหนัก กรดมาลิกที่ปริมาณการเติม 0.01 และ 0.03% โดยน้ำหนัก โซเดียมลิกโนซัลโฟเนตที่ปริมาณการเติม 0.03 - 0.07% โดยน้ำหนัก และ กรดลิกโนซัลโฟนิค ที่ปริมาณการเติม 1.4 และ 1.6 % โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุผสมมีค่ามากกว่าเอพิจีดีพลาสติกที่ไม่ได้เติมสารชนิดใด ๆ ที่ให้ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 10.5 เมกะปาสกาล สำหรับสารตัวเติมชนิดสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุผสมมีค่าน้อยกว่าเอพิจีดีพลาสติกที่ไม่ได้เติมสารชนิดใด ๆ

4.2.2.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตาราง 4.8 ผลของชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ	ความแข็งแรงต่อ การกดอัด (เมกะปาสกาล)
เอพิจีดีพลาสติก (ไม่เติมสารเติมแต่ง)	1.12	32.20	10.5
เอพิจีดีพลาสติก (กรดฟอสฟอริก 0.1% โดยน.น.)	1.18	28.4	8.9
เอพิจีดีพลาสติก (กรดฟอสฟอริก 0.2% โดยน.น.)	1.15	32.7	8.2
เอพิจีดีพลาสติก (กรดฟอสฟอริก 0.3% โดยน.น.)	1.10	34.9	7.5
เอพิจีดีพลาสติก (กรดฟอสฟอริก 0.4% โดยน.น.)	1.03	38.6	5.2

ตาราง 4.8 ผลของชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม (ต่อ)

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ	ความแข็งแรงต่อ การกดอัด (เมกะปาสกาล)
เอพิจีตปีลาสเตอร์ (โพลีเอทเธอร์ไคโกลิโคนฟอสเฟต 0.1% โดยน.น.)	1.15	28.0	9.2
เอพิจีตปีลาสเตอร์ (โพลีเอทเธอร์ไคโกลิโคนฟอสเฟต 0.3% โดยน.น.)	1.14	31.4	8.5
เอพิจีตปีลาสเตอร์ (โพลีเอทเธอร์ไคโกลิโคนฟอสเฟต 0.5% โดยน.น.)	1.14	31.7	7.9
เอพิจีตปีลาสเตอร์ (โพลีเอทเธอร์ไคโกลิโคนฟอสเฟต 0.7% โดยน.น.)	1.12	32.4	7.3

### 1. ผลของกรดฟอสฟอริก

ความหนาแน่น กรดฟอสฟอริกส่งผลให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.03 - 1.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงตามปริมาณการเติมกรดฟอสฟอริก เนื่องจากปริมาณกรดฟอสฟอริกที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของผลึกทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ความยาวเพิ่มขึ้นและความกว้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาในการเติบโตผลึกได้นานขึ้น แต่อัตราการเติบโตของด้านกว้างจะเพิ่มขึ้นมากกว่าหากเติมกรดฟอสฟอริก ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งการจัดเรียงตัวของผลึกในลักษณะดังกล่าวจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมลดลง

ค่าการดูดซึมน้ำ กรดฟอสฟอริกส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 28.4-38.6% เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่มีอัตราการเติบโตของด้านกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่า ทำให้มีช่องว่างขนาดใหญ่มากขึ้น และการสานเกี่ยวกันของผลึกลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีรูพรุนเปิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น คือเมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น

ค่าการทนต่อแรงกดอัด กรดฟอสฟอริกส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดอยู่ในช่วง 5.2 – 8.9 เมกะปาสกาล แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ คือ เมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

สรุปคือเมื่อปริมาณกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดลดลง และให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

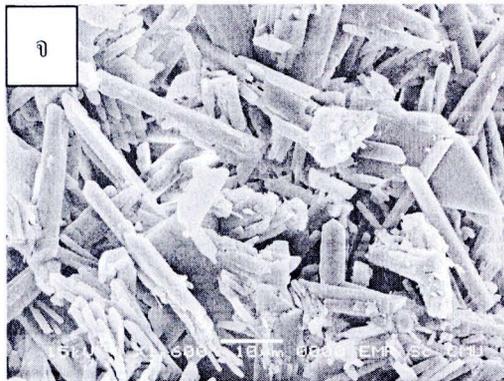
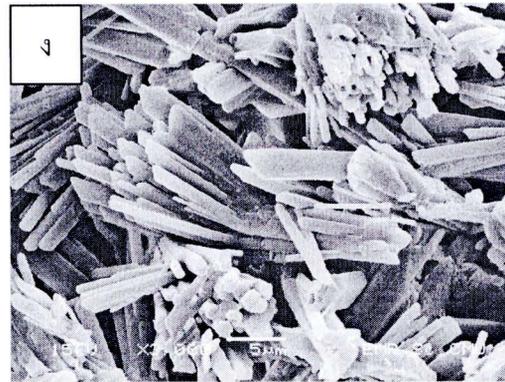
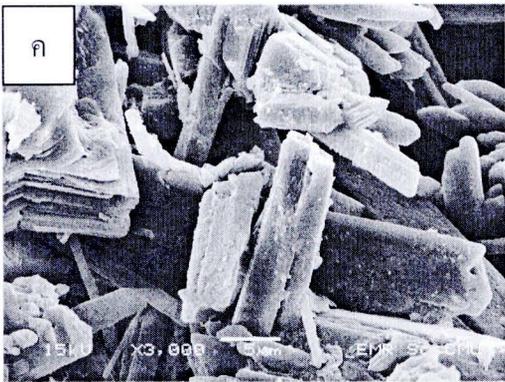
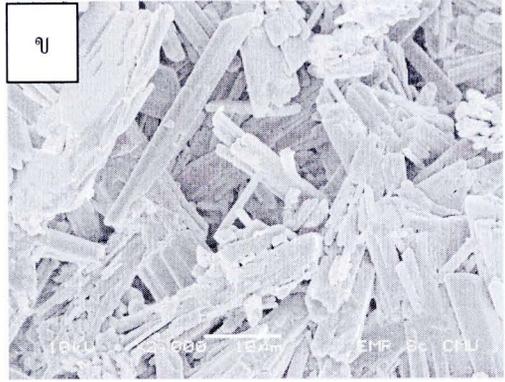
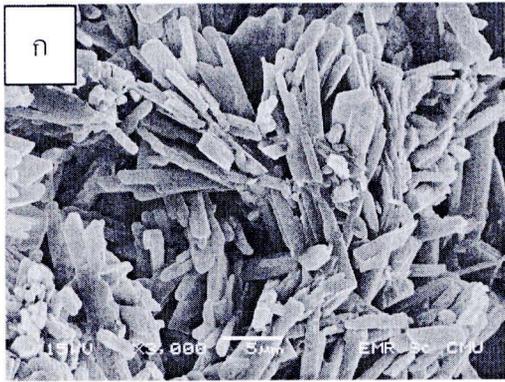
## 2. ผลของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

ความหนาแน่น โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตส่งผลให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.12 - 1.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงตามปริมาณการเติมโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เนื่องจากปริมาณโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของผลึกทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ความยาวเพิ่มขึ้นและความกว้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาในการเติบโตผลึกได้นานขึ้น แต่อัตราการเติบโตของด้านกว้างจะเพิ่มขึ้นมากกว่าหากเติมโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ซึ่งการจัดเรียงตัวของผลึกในลักษณะดังกล่าวจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมลดลง

ค่าการดูดซึมน้ำ โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 27.1 - 37.4% เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่มีอัตราการเติบโตของด้านกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่า ทำให้มีช่องว่างขนาดใหญ่มากขึ้น และการสานเกี่ยวกันของผลึกลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีรูพรุนเปิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น คือ เมื่อค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น

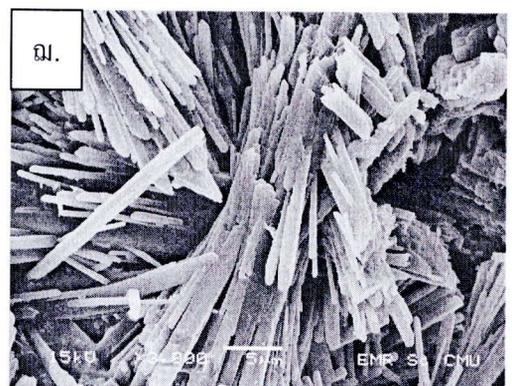
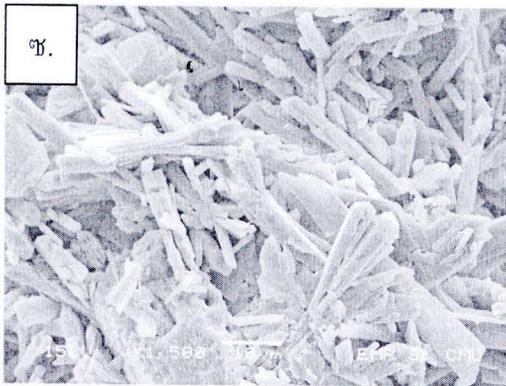
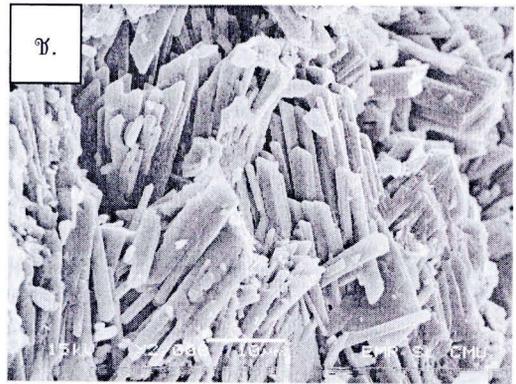
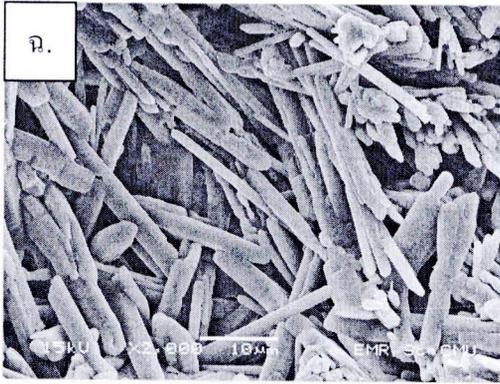
ค่าการทนต่อแรงกดอัด โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงกดอัดอยู่ในช่วง 7.1 – 8.5 เมกะปาสกาล แนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำ คือ เมื่อ ค่าความหนาแน่นลดลง ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงอัดลดลง

สรุปคือเมื่อปริมาณโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดลดลง และให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น



รูป 4.8 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

- (ก) เอฟจีดีพลาสติกเตอร์ในระบบที่ไม่มีสารเติมแต่ง
- (ข) เอฟจีดีพลาสติกเตอร์และกรดซัลฟอนิก 0.07% โดยน้ำหนัก
- (ค) เอฟจีดีพลาสติกเตอร์และกรดซิติริก 0.07% โดยน้ำหนัก
- (ง) เอฟจีดีพลาสติกเตอร์ และกรดมาลิก 0.07% โดยน้ำหนัก
- (จ) เอฟจีดีพลาสติกเตอร์ และกรดอะซิติก 0.7% โดยน้ำหนัก



#### รูป 4.9 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

(ก) เอฟจีดีพลาสติกอร์และโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.7%โดยน้ำหนัก

(ข) เอฟจีดีพลาสติกอร์และกรดลิกโนซัลโฟนิก 0.9% โดยน้ำหนัก

(ค) เอฟจีดีพลาสติกอร์และกรดฟอสฟอริก 0.4%โดยน้ำหนัก

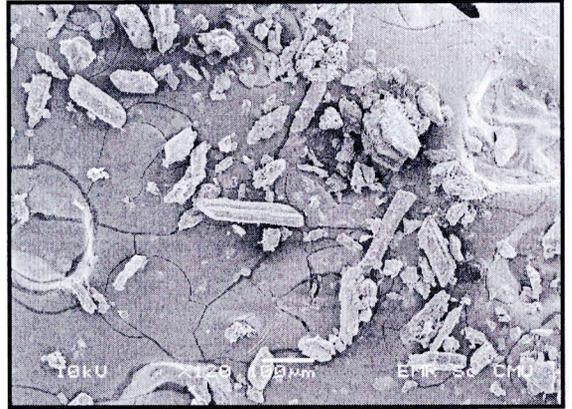
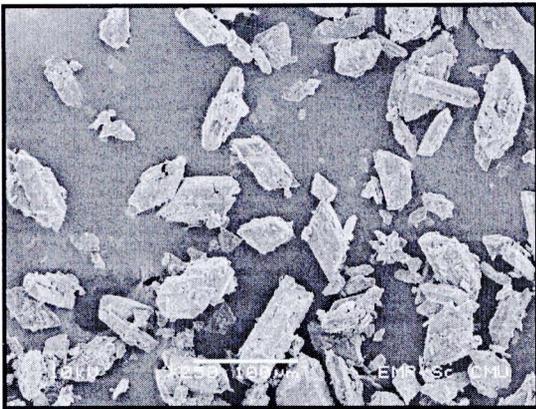
(ง) เอฟจีดีพลาสติกอร์ และ โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.7%โดยน้ำหนัก

### 4.3 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเอฟจีดีอีพีซั่ม

#### 4.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเอฟจีดีอีพีซั่มจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

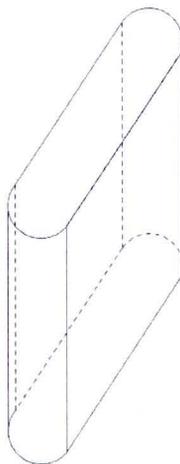
##### 4.3.1.1 การศึกษารูปร่างของผลึกของเอฟจีดีอีพีซั่มจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเอฟจีดีอีพีซั่มจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่เตรียมตัวอย่างโดยการโรยผงยิปซั่ม จากการศึกษาด้วยกล้องเอซซีเอ็ม พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเอฟจีดีอีพีซั่มจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีลักษณะดังรูป 4.10



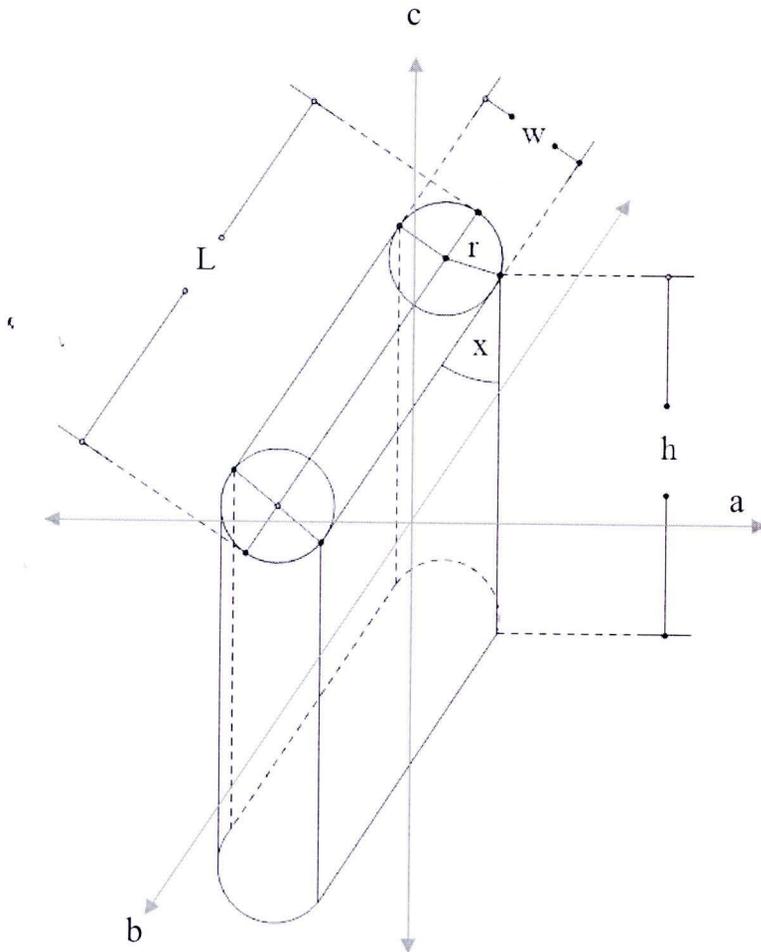
รูป 4.10 โครงสร้างจุลภาคของเอฟจีดีอีพีซั่มจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

จากการวิเคราะห์ภาพจากกล้องเอซซีเอ็ม พบว่าผลึกของเอฟจีดีอีพีซั่มมีลักษณะรูปทรงที่เรียกว่า แท่งขนาน (Parallel Rod) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.11



รูป 4.11 รูปทรงผลึกแบบแท่งขนาน (Parallel Rod)

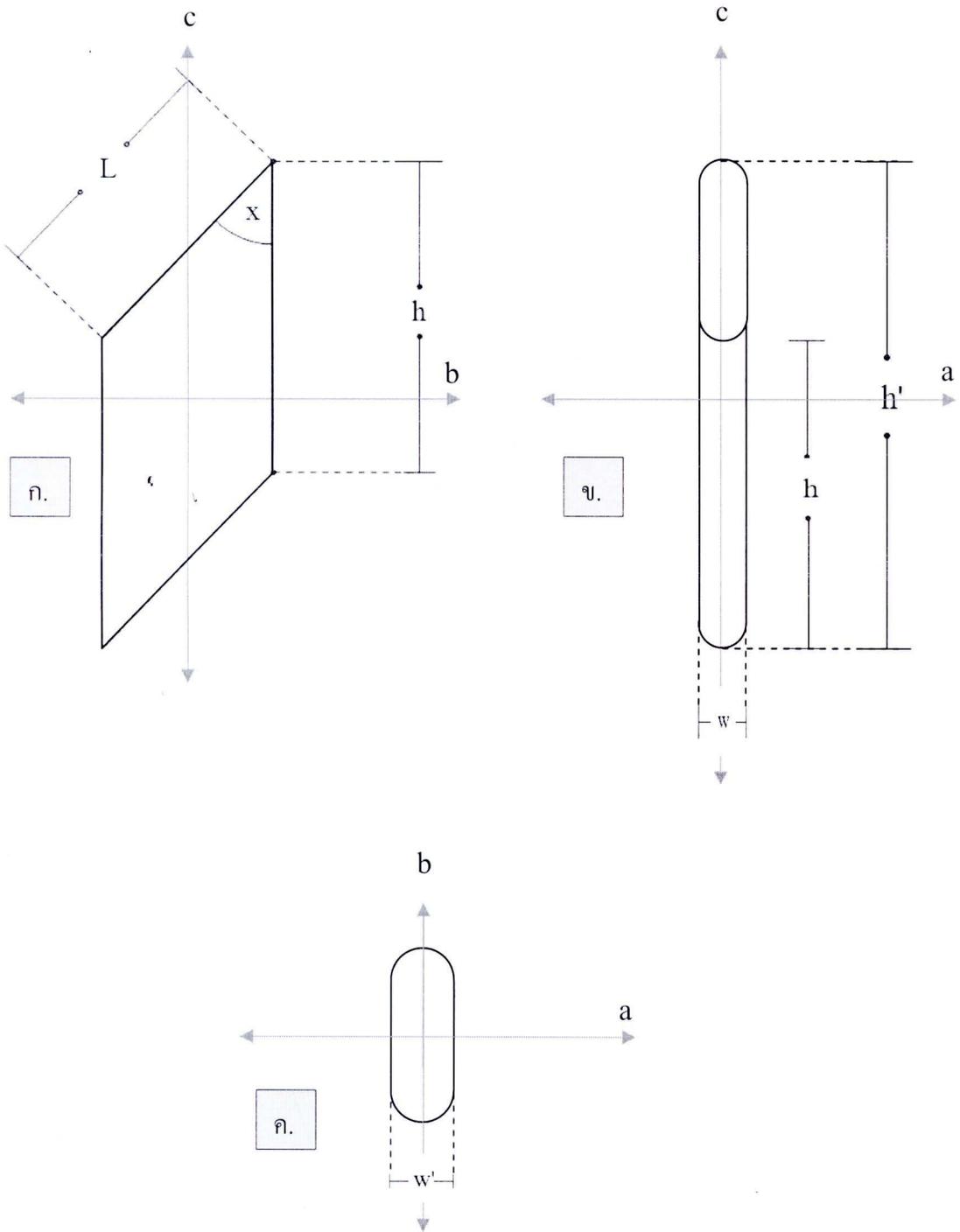
รูปทรงผลึกแบบแท่งขนาน (Parallel Rod) อธิบายโดยใช้รูปทรงเรขาคณิตทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูป 4.12



รูป 4.12 แบบจำลองรูปทรงเรขาคณิตของผลึกเอฟจีดีบีปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

โดยที่

$h$	คือ	ความยาวของผลึก
$L$	คือ	ความกว้างของผลึก
$w$	คือ	ความหนาของผลึก
$r$	คือ	รัศมีของส่วนโค้งที่ปลายทั้งสองของหน้าผลึก
$x$	คือ	มุมแหลมของผลึก



รูป 4.13 ภาพฉายในระนาบต่างๆ ของแบบจำลองผลึกเอพิตีอิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

- (ก) ภาพฉายของแบบจำลองผลึกเอพิตีอิปซัมในระนาบ  $bc$
- (ข) ภาพฉายของแบบจำลองผลึกเอพิตีอิปซัมในระนาบ  $ac$
- (ค) ภาพฉายของแบบจำลองผลึกเอพิตีอิปซัมในระนาบ  $ab$

#### 4.3.1.2 การศึกษาขนาดของผลึกของเอฟเจดีบีพีซมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

การศึกษาขนาดของขนาดของผลึกของเอฟเจดีบีพีซมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยใช้โปรแกรม SemAfore5SP1 วัดขนาดของผลึกจากกล้องเอซอีเอ็ม มิติต่าง ๆ ของผลึกที่สนใจศึกษาได้แก่

h	คือ	ความยาวของผลึก
L	คือ	ความกว้างของผลึก
w	คือ	ความหนาของผลึก
r	คือ	รัศมีของส่วนโค้งที่ปลายทั้งสองของหน้าผลึก
x	คือ	มุมแหลมของผลึก

เนื่องจากค่าที่วัดได้ในงานวิจัยนี้เป็นค่าที่ได้จากการวัดขนาดจากกล้องเอซอีเอ็ม ซึ่งเป็นเพียงภาพถ่ายของผลึกเอฟเจดีบีพีซม ดังนั้นค่าที่วัดได้ในงานวิจัยนี้จึงมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่วัดจากผลึกจริง และกำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ต่อไปนี้แทนค่าที่ได้จากการวัดภาพถ่ายผลึก

h'	คือ	ความยาวที่วัดจากภาพถ่ายของผลึก
L'	คือ	ความกว้างที่วัดจากภาพถ่ายของผลึก
w'	คือ	ความหนาที่วัดจากภาพถ่ายของผลึก
r'	คือ	รัศมีของส่วนโค้งที่ปลายทั้งสองของหน้าผลึก
x'	คือ	ขนาดมุมแหลมที่วัดจากภาพถ่ายของผลึก

เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการโรยผงบีบีพีซมเพียงวิธีเดียวทำให้ภาพถ่ายของผลึกที่ได้ สามารถวัดค่าความยาวของผลึก (h) และค่าความกว้างจากภาพถ่ายของผลึก (L') ได้ แต่สำหรับค่าความหนาที่วัดจากภาพถ่ายของผลึก (w') และ รัศมีของส่วนโค้งที่ปลายทั้งสองของหน้าผลึก (r) เป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้ ในงานวิจัยนี้จึงวัดขนาดของผลึกเฉพาะในมิติ ค่าความยาวของผลึก (h) ค่าความกว้างจากภาพถ่ายของผลึก (L') และขนาดมุมแหลมของผลึก (x) เท่านั้น

ตาราง 4.9 ขนาดของผลึกเอพิจิตียิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและค่าสถิติต่าง ๆ

มิติของผลึก	ผลึกเอพิจิตียิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ		
	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	สัมประสิทธิ์ความ แปรผัน(C.V.)
h (ไมโครเมตร)	65.4	16.1	24.6
L' (ไมโครเมตร)	37.4	9.2	24.7
x (องศา)	50.9	1.5	2.9
Crystal Ratio ( $\frac{h}{L'}$ )	1.9	0.5	27.0

#### 4.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่ง

##### 4.3.2.1 การศึกษารูปร่างของผลึกของเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่ง

จากการวิเคราะห์ภาพจากกล้องเอสซีเอ็ม พบว่าผลึกของเอพิจิตียิปซัมมีลักษณะรูปร่างที่เรียกว่า แท่งขนาน (Parallel Rod) เช่นเดียวกับเอพิจิตียิปซัมที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แต่มีลักษณะเป็นแท่งยาวกว่า

ทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.3.1 โดยตาราง 4.10 แสดงขนาดของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่ง

ตาราง 4.10 ขนาดของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งและค่าสถิติต่างๆ

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	h (ไมโครเมตร)			L' (ไมโครเมตร)			x' (องศา)		
	Mean	S.D.	C.V.	Mean	S.D.	C.V.	Mean	S.D.	C.V.
ไม่เติมสารเติมแต่ง	8.6	2.0	25.7	1.3	0.4	35.6	56.6	5.4	9.5
กรดซัลฟูริก 0.01% โดยน.น.	10.8	4.5	41.9	1.7	0.7	47.5	52.1	7.4	14.2
กรดซัลฟูริก 0.03% โดยน.น.	11.3	2.5	22.5	2.6	0.9	32.8	51.7	8.4	16.2
กรดซัลฟูริก 0.05% โดยน.น.	12.2	2.6	21.2	2.3	1.0	40.4	51.2	9.7	19.0
กรดซัลฟูริก 0.07% โดยน.น.	16.7	7.8	46.7	3.0	1.3	42.4	50.8	8.4	1.5
กรดซิตริก 0.01% โดยน.น.	9.7	3.3	34.2	1.6	1.1	65.6	46.6	10.7	22.9
กรดซิตริก 0.03% โดยน.น.	9.8	3.8	38.6	2.2	1.5	70.1	47.2	12.0	25.4
กรดซิตริก 0.05% โดยน.น.	10.0	3.4	34.2	1.6	0.7	41.2	48.1	11.5	24.0
กรดซิตริก 0.07% โดยน.น.	12.9	5.2	40.0	5.1	2.8	54.9	48.3	9.9	20.4
กรดมาลิก 0.01% โดยน.น.	10.9	3.9	35.8	2.1	0.7	34.3	53.3	11.5	21.6
กรดมาลิก 0.03% โดยน.น.	8.2	4.4	53.4	1.4	0.7	50.9	50.4	7.3	14.5
กรดมาลิก 0.05% โดยน.น.	10.3	4.8	47.0	2.0	1.1	54.3	49.8	6.9	13.8
กรดมาลิก 0.07% โดยน.น.	9.5	2.8	29.7	1.9	0.9	44.9	49.6	7.1	14.3
กรดอะซิติค 0.1% โดยน.น.	16.8	4.5	26.5	2.8	0.8	30.1	54.2	6.9	12.7
กรดอะซิติค 0.3% โดยน.น.	15.2	6.1	39.8	2.5	0.9	35.3	53.6	8.9	16.5
กรดอะซิติค 0.5% โดยน.น.	16.6	6.0	36.2	3.0	1.2	39.7	52.0	10.4	20.0
กรดอะซิติค 0.7% โดยน.น.	17.6	6.6	37.4	3.3	1.3	36.6	51.4	10.8	21.1
โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.1% โดยน.น.	9.9	5.8	58.4	1.1	0.3	54.2	52.5	9.5	18.0
โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.3% โดยน.น.	10.0	6.1	61.3	1.3	0.7	58.7	51.4	8.3	16.1
โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.5% โดยน.น.	14.3	5.9	41.1	2.8	1.4	50.5	48.3	10.7	22.1
โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต 0.7% โดยน.น.	16.1	6.8	42.3	3.4	1.8	50.9	45.8	11.8	25.9

ตาราง 4.10 ขนาดของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งและค่าสถิติต่าง ๆ (ต่อ)

ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	h (ไมโครเมตร)			L' (ไมโครเมตร)			x' (องศา)		
	Mean	S.D.	C.V.	Mean	S.D.	C.V.	Mean	S.D.	C.V.
กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.6% โดยน.น.	92	29	31.5	1.0	0.4	36.6	51.6	6.6	12.8
กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.7% โดยน.น.	97	3.6	36.7	1.2	0.5	42.1	52.1	9.5	18.3
กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.8% โดยน.น.	123	3.5	28.5	1.7	0.8	47.1	50.7	8.4	16.6
กรดลิกโนซัลโฟนิค 0.9% โดยน.น.	164	2.7	16.2	2.3	0.7	30.4	48.2	12.1	21.5
กรดฟอสฟอริก 0.1% โดยน.น.	13.7	7.8	46.7	2.8	1.0	36.2	54.6	13.5	24.8
กรดฟอสฟอริก 0.2% โดยน.น.	15.7	6.4	38.2	3.1	1.4	45.6	51.0	11.6	22.7
กรดฟอสฟอริก 0.3% โดยน.น.	16.8	6.8	40.6	3.5	1.4	40.1	46.9	13.1	28.0
กรดฟอสฟอริก 0.4% โดยน.น.	16.3	5.8	35.5	3.3	1.5	46.2	44.1	10.8	24.6
โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.1% โดยน.น.	152	4.8	31.6	2.4	0.8	33.3	46.3	11.7	25.2
โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.3% โดยน.น.	18.4	6.8	37.0	3.1	1.2	38.7	48.7	10.3	20.6
โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.5% โดยน.น.	20.6	6.5	31.6	3.4	1.6	47.1	52.1	8.5	16.3
โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.7% โดยน.น.	22.5	7.4	32.9	4.2	1.8	42.9	51.6	9.7	18.8

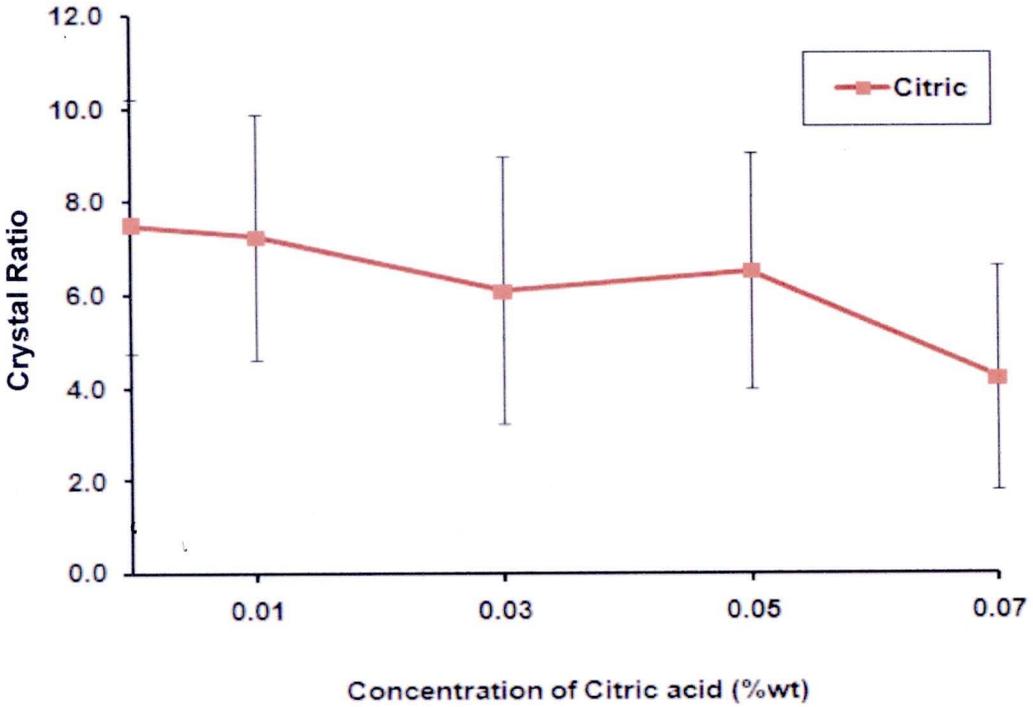
จากตาราง 4.10 จะเห็นว่า การเติมสารเติมแต่งทุกชนิดจะทำให้ขนาดของผลึกของเอพิจิตียิปซัมมีความยาวและความกว้างเพิ่มขึ้นและมากกว่าขนาดของผลึกของเอพิจิตียิปซัมที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง เมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงมาตรฐานของความกว้าง ความยาวและขนาดมุมแหลมของผลึกมีค่าค่อนข้างสูง แสดงให้เห็นว่าผลึกเอพิจิตียิปซัมมีความแปรผันของมิติทางคณิตศาสตร์ด้านต่าง ๆ ค่อนข้างสูง และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความกว้าง ความยาวและขนาดมุมแหลมของผลึกในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ พบว่าขนาดมุมแหลมของผลึก มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับมิติด้านอื่น ๆ ซึ่งบ่งบอกว่ารูปทรงของผลึกเอพิจิตียิปซัมมีขนาดมุมแหลมของผลึกที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ความยาวและความกว้างของผลึกนั้นจะมีความแปรผันค่อนข้างสูงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับ กรกนก [3,28] พบว่าการเติมกรดซัลฟิวริกลงไปในการละลาย 0.01-0.07 % โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นจาก 10 นาที เป็น 41 นาที และผลึกมีความยาวและความกว้างค่าอยู่ในช่วง 9.5-12.8 ไมโครเมตร และ 2.5-3.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ขนาดผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีกรดซัลฟิวริก 0.01-0.07 % โดยน้ำหนัก ผลึกมีความยาวและความกว้างค่าอยู่ในช่วง 9.7-12.9 ไมโครเมตร และ 3.3-5.2 ไมโครเมตร เนื่องจากกรดซัลฟิวริกเป็นสารหน่วงปฏิกิริยาซึ่งจะเข้าไปอุดซับอยู่บนพื้นผิวของผลึกเอพิจิตีพลาสติกอร์ ทำให้น้ำไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเอพิจิตีพลาสติกอร์ได้ ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น จึงทำให้มีระยะเวลาในการเติบโตของผลึกเพิ่มขึ้น ผลึกจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับ Badens และคณะ [19] ศึกษาการหน่วงปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์โดยกล่าวว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการอุดซับบนผิวผลึกมากขึ้น และเวลาในการก่อตัวนานขึ้น โดยทำการทดลองเรื่องการอุดซับของกรดบนผิวของผลึกยิปซัม ใช้เครื่องแคปปริลารี อิเล็กโทรโฟเรซิส ซึ่งพบว่าอะตอมของออกซิเจนในหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดซัลฟิวริก เข้าไปแทนที่อะตอมของออกซิเจนในหมู่ซัลเฟต แล้วเกิดการสร้างพันธะกับแคลเซียมเกิดเป็นสารประกอบ นอกจากนี้ยังพบว่าอะตอมของออกซิเจนในหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดจะเข้าไปแทนที่อะตอมของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก จึงได้มีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอะตอมของออกซิเจนในหมู่ซัลเฟต (2 อะตอม) และในหมู่คาร์บอกซิลิกของกรด และเปรียบเทียบระหว่างอะตอมของออกซิเจนในหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดกับหมู่ซัลเฟตและน้ำในโครงสร้างผลึก โดยพบว่าระหว่างอะตอมของออกซิเจน 2 อะตอม กับแคลเซียมไอออนในระนาบ (1 2 0) เท่ากับ 4 อังสตรอม และในระนาบ (1 1 1) เท่ากับ 4 อังสตรอม พบว่ากรดซัลฟิวริกมีความหนาแน่นของประจุรวมเป็นลบมาก และมีระยะห่างระหว่างอะตอมของออกซิเจนในหมู่คาร์บอกซิลิกเท่ากับกับระยะห่างระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับแคลเซียมไอออนในระนาบ (1 2 0) และ (1 1 1) คือ 4 อังสตรอม ทำให้อะตอมของออกซิเจนในกรดซัลฟิวริกสามารถเข้าไปแทนที่ได้พอดีส่งผลให้กรดซัลฟิวริกสามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ และส่งผลต่อการเติบโตของผลึกยิปซัม

ตาราง 4.11 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งและค่าสถิติต่าง ๆ

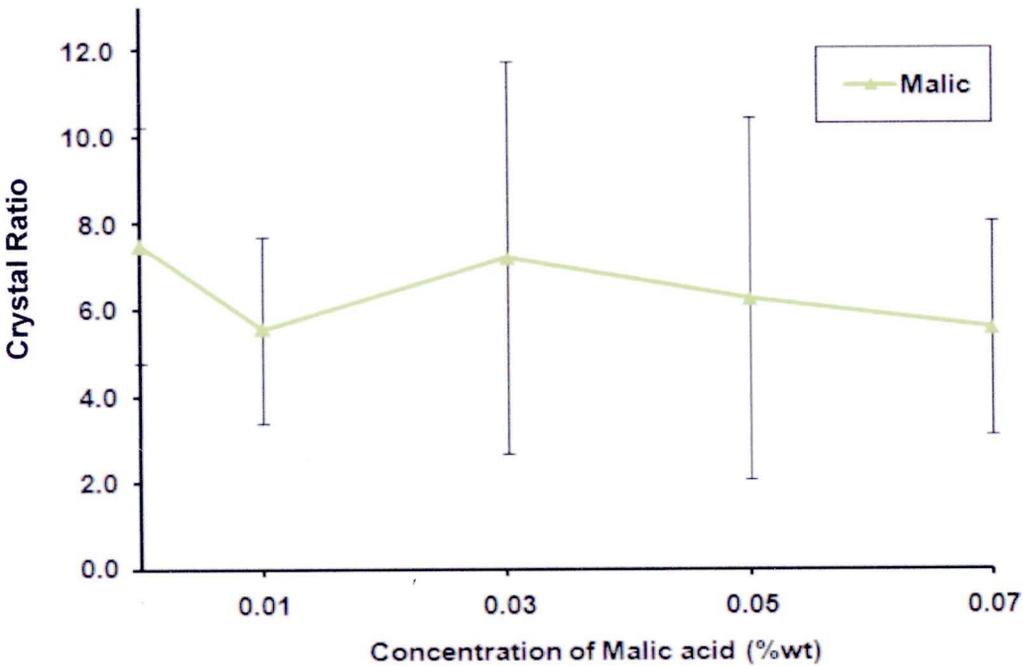
ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	Crystal Ratio ( $\frac{h}{L'}$ )		
	Mean	S.D.	C.V.
No additive	75	27	36.5
กรดซัลฟูริก 0.01% โดยน.น.	83	32	38.4
กรดซัลฟูริก 0.03% โดยน.น.	60	28	46.6
กรดซัลฟูริก 0.05% โดยน.น.	50	14	28.0
กรดซัลฟูริก 0.07% โดยน.น.	48	14	29.8
กรดซिटริก 0.01% โดยน.น.	73	26	36.3
กรดซिटริก 0.03% โดยน.น.	61	29	47.1
กรดซिटริก 0.05% โดยน.น.	65	25	38.6
กรดซिटริก 0.07% โดยน.น.	42	24	57.3
กรดมาลิก 0.01% โดยน.น.	56	22	38.8
กรดมาลิก 0.03% โดยน.น.	72	45	63.0
กรดมาลิก 0.05% โดยน.น.	63	42	66.9
กรดมาลิก 0.07% โดยน.น.	56	25	43.2
กรดอะซิติค 0.1% โดยน.น.	65	22	33.2
กรดอะซิติค 0.3% โดยน.น.	54	16	28.9
กรดอะซิติค 0.5% โดยน.น.	50	12	24.6
กรดอะซิติค 0.7% โดยน.น.	47	13	28.8
โซเดียมลิกโนซัลไฟเนต 0.1% โดยน.น.	88	35	44.4
โซเดียมลิกโนซัลไฟเนต 0.3% โดยน.น.	84	36	42.9
โซเดียมลิกโนซัลไฟเนต 0.5% โดยน.น.	57	22	38.6
โซเดียมลิกโนซัลไฟเนต 0.7% โดยน.น.	51	16	30.8
กรดลิกโนซัลไฟนิก 0.6% โดยน.น.	81	32	39.5
กรดลิกโนซัลไฟนิก 0.7% โดยน.น.	75	24	32.0
กรดลิกโนซัลไฟนิก 0.8% โดยน.น.	77	37	48.1
กรดลิกโนซัลไฟนิก 0.9% โดยน.น.	58	26	44.8

ตาราง 4.11 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งและค่าสถิติต่างๆ (ต่อ)

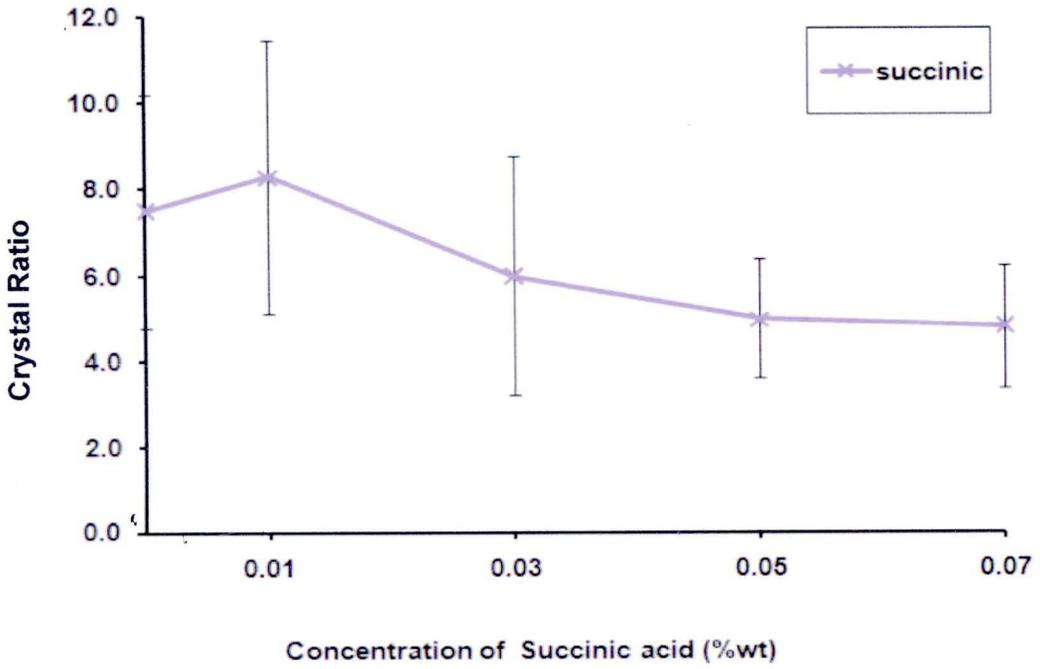
ตัวอย่าง ปริมาณการเติม (% โดยน.น.)	Crystal Ratio ( $\frac{h}{L'}$ )		
	Mean	S.D.	C.V.
กรดฟอสฟอริก 0.1% โดยน.น.	83	25	30.1
กรดฟอสฟอริก 0.2% โดยน.น.	76	32	42.1
กรดฟอสฟอริก 0.3% โดยน.น.	63	27	42.9
กรดฟอสฟอริก 0.4% โดยน.น.	66	24	36.4
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.1% โดยน.น.	72	28	38.9
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.3% โดยน.น.	59	26	44.1
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.5% โดยน.น.	54	31	57.4
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.7% โดยน.น.	48	26	54.2



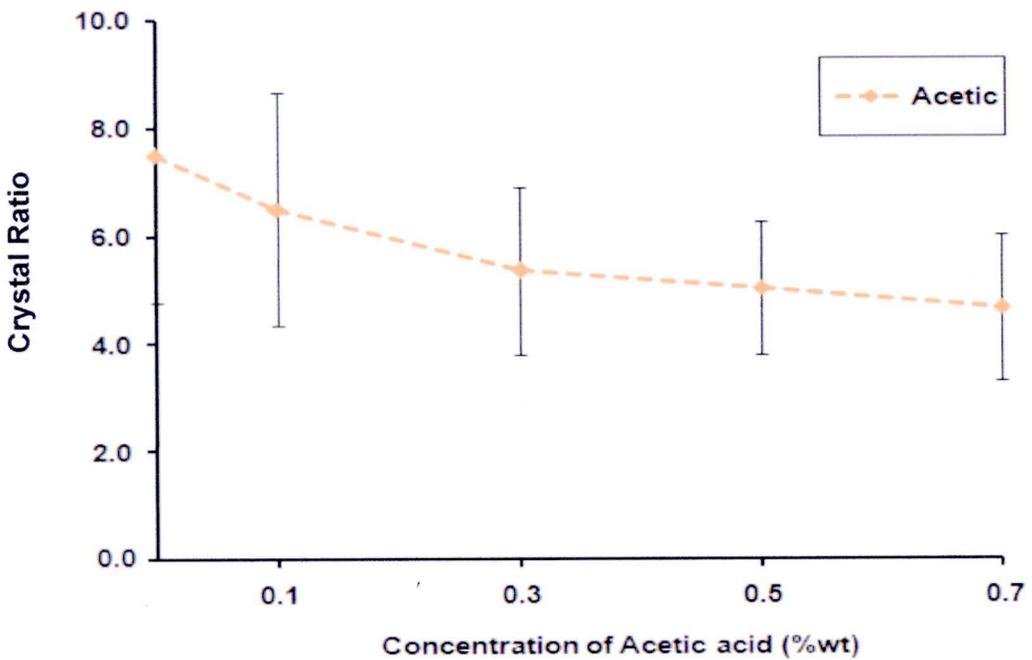
รูป 4.14 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดกรดซิตริก



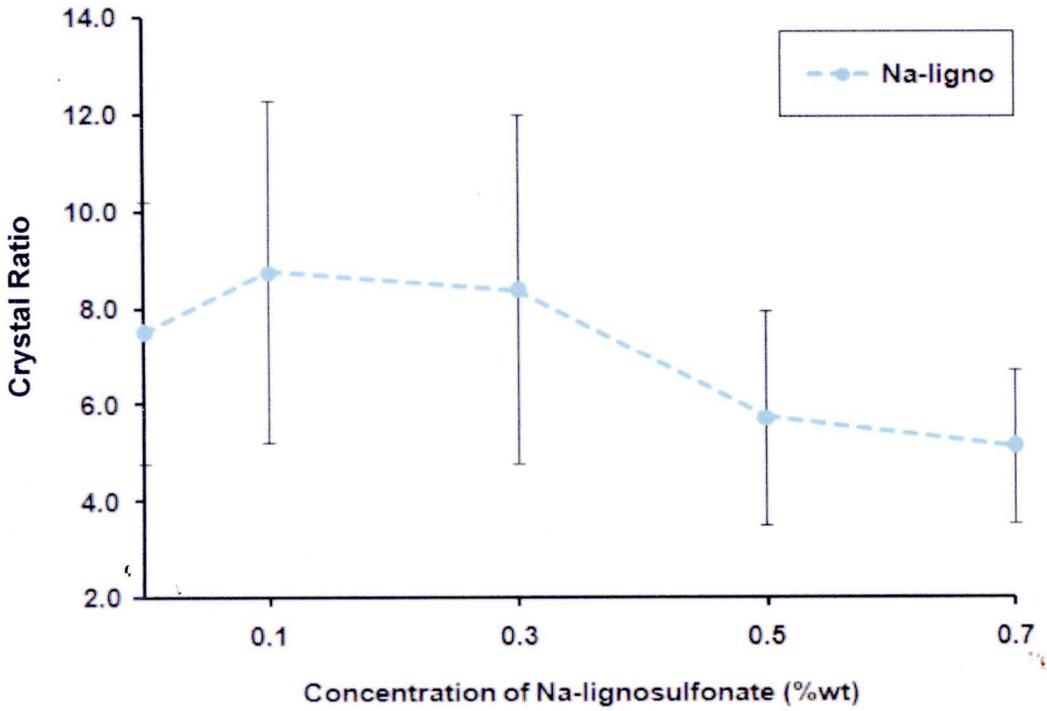
รูป 4.15 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดกรดมาลิก



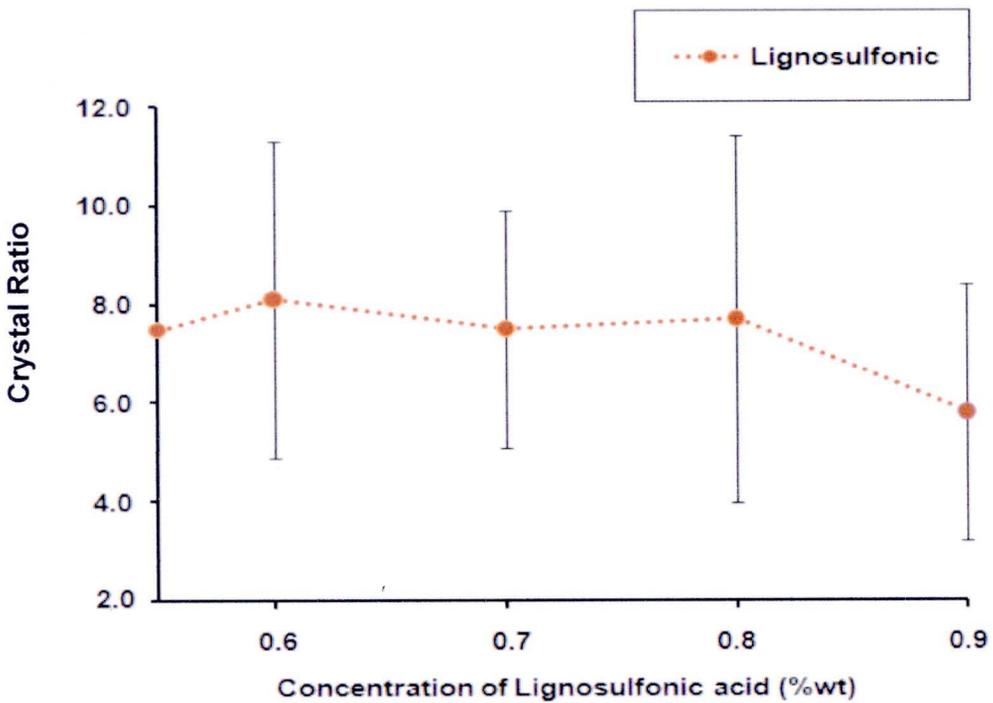
รูป 4.16 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดกรดซัลฟอนิก



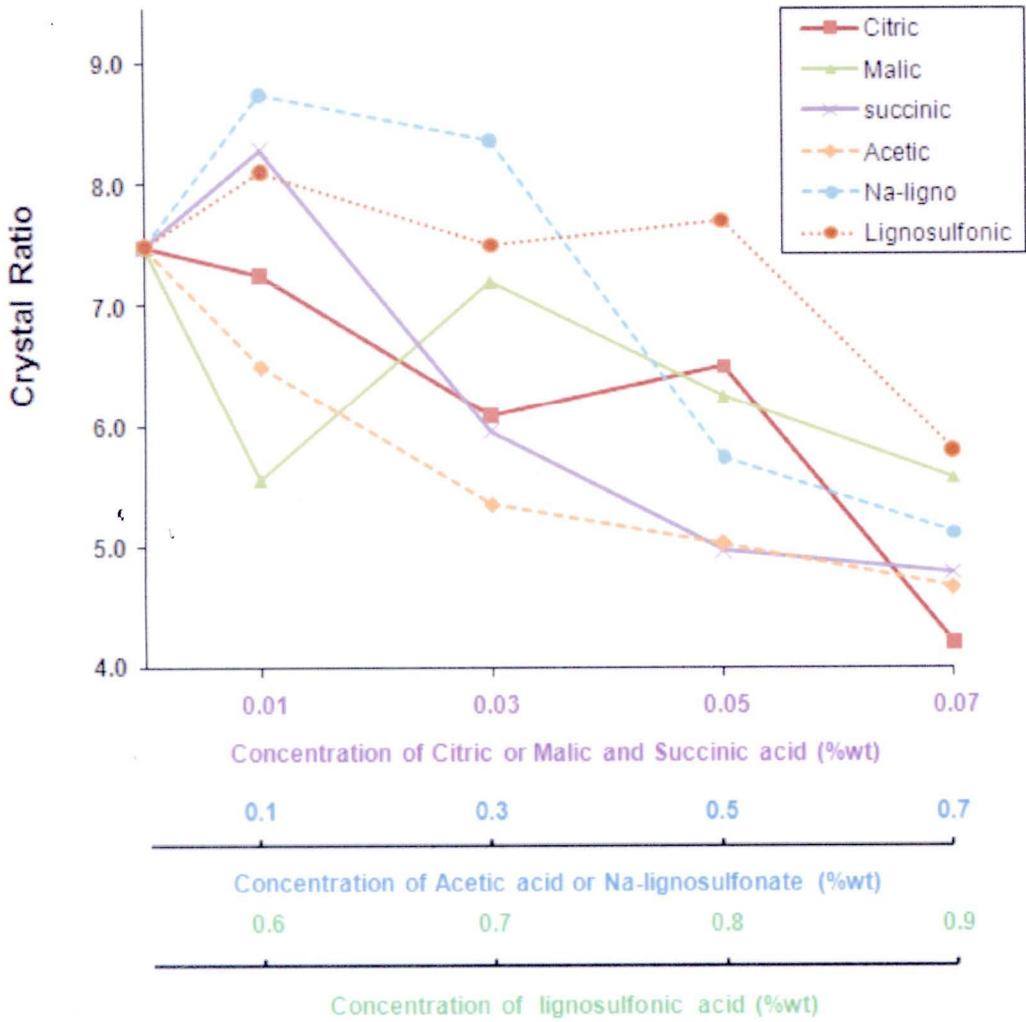
รูป 4.17 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดกรดอะซิติก



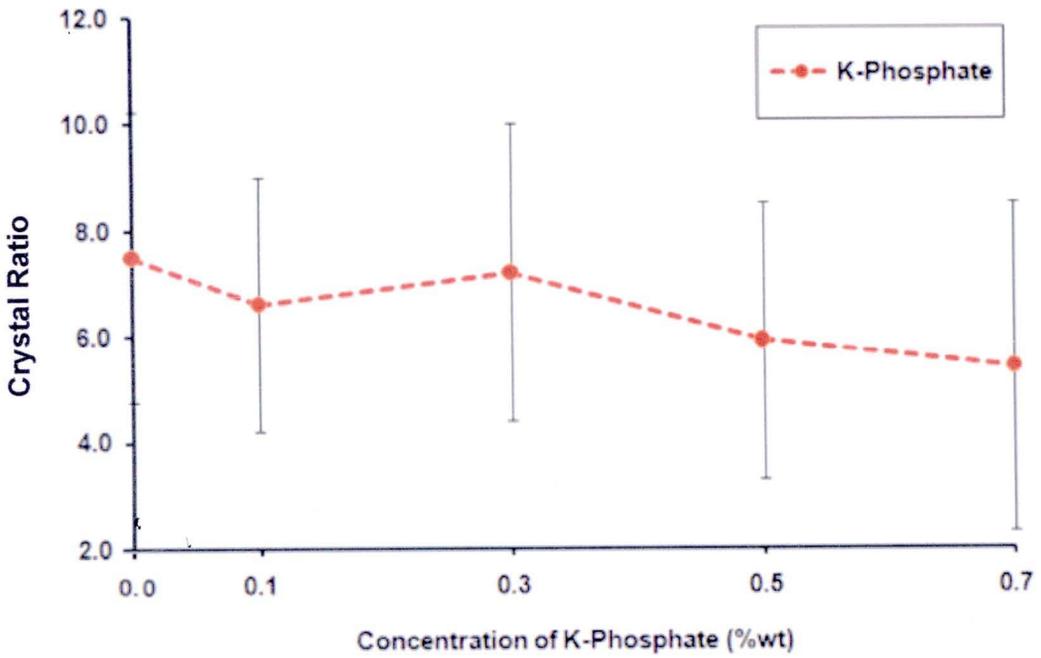
รูป 4.18 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต



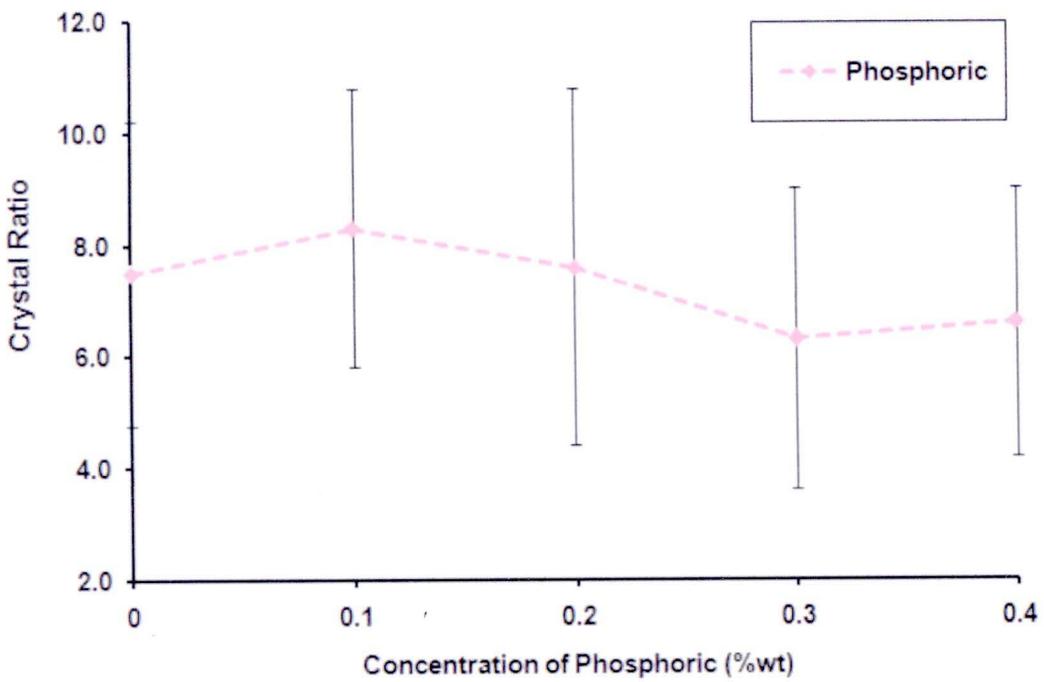
รูป 4.19 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดกรดลิกโนซัลโฟนิก



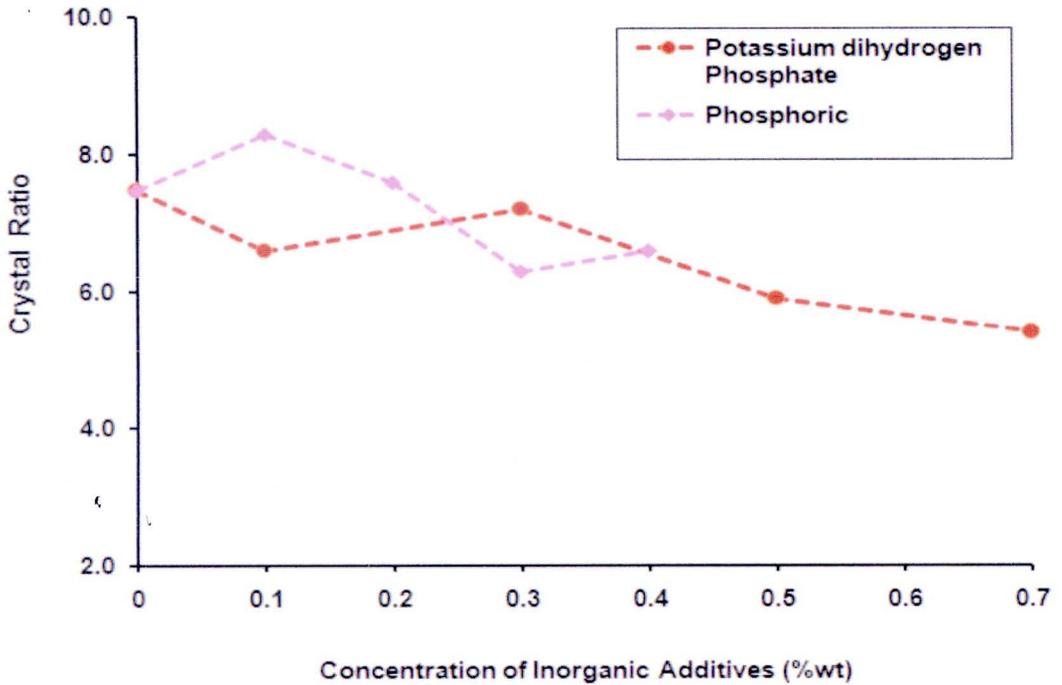
รูป 4.20 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมชนิดสารอินทรีย์



รูป 4.21 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิตีปีปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต



รูป 4.22 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิตีปีปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดกรดฟอสฟอริก



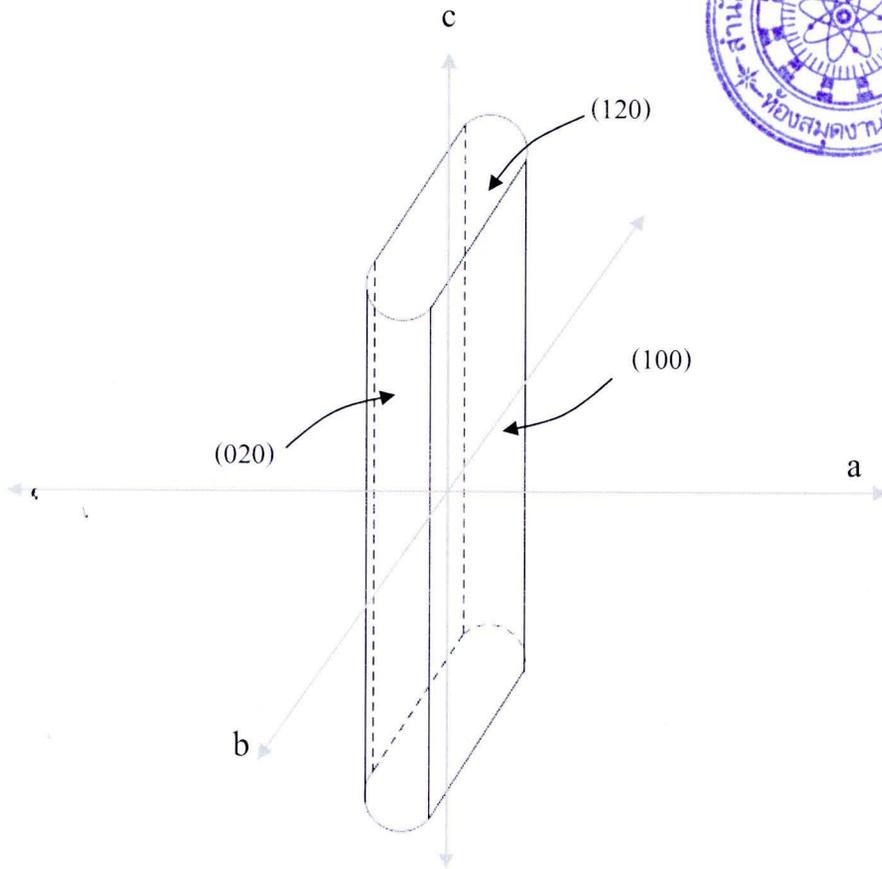
รูป 4.23 ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจีตียิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดสารอนินทรีย์

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างเอพิจีตียิปลาสเตอร์สารเติมแต่งพบว่าผลึกของเอพิจีตียิปซัมเมื่อยังไม่ได้เติมสารชนิดใด ๆ จะมีลักษณะเป็นผลึกยาวเป็นรูปร่างที่มีขนาดสั้น เมื่อปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นพบว่ารูปร่างของผลึกเอพิจีตียิปซัมจะมีความยาว (h) เพิ่มขึ้น และมีความกว้าง (L) ของผลึกเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากสารเติมแต่งเป็นสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเข้าไปอุดขั้วอยู่บนพื้นผิวของผลึกเอพิจีตียิปลาสเตอร์ ทำให้น้ำไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเอพิจีตียิปลาสเตอร์ได้ ส่งผลให้ค่าการก่อตัวนานขึ้น จึงทำให้มีระยะเวลาในการเติบโตผลึกได้นานขึ้น ผลึกจึงมีความยาวเพิ่มขึ้นและความกว้างเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเติบโตของความยาวของผลึกชะลอตัว ส่งผลให้ค่า Crystal ratio ของผลึกลดลง โดยเมื่อสารเติมแต่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอัตราการโตของผลึกและกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับ Badens และคณะ[19] ศึกษากลไกการหน่วงปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์ โดยกล่าวว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการอุดขั้วบนผิวผลึกมากขึ้น และเวลาในการก่อตัวนานขึ้น โดยทำการทดลองเรื่องการอุดขั้วของกรดบนผิวของผลึกยิปซัม ซึ่งกรดที่เติมลงไปนในสารละลายปูนปลาสเตอร์จะส่งผลทำให้โครงสร้างและรูปร่างของผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากรูปร่างยาวเหมือนเข็ม เปลี่ยนเป็นผลึกที่มีลักษณะแบนราบเป็น

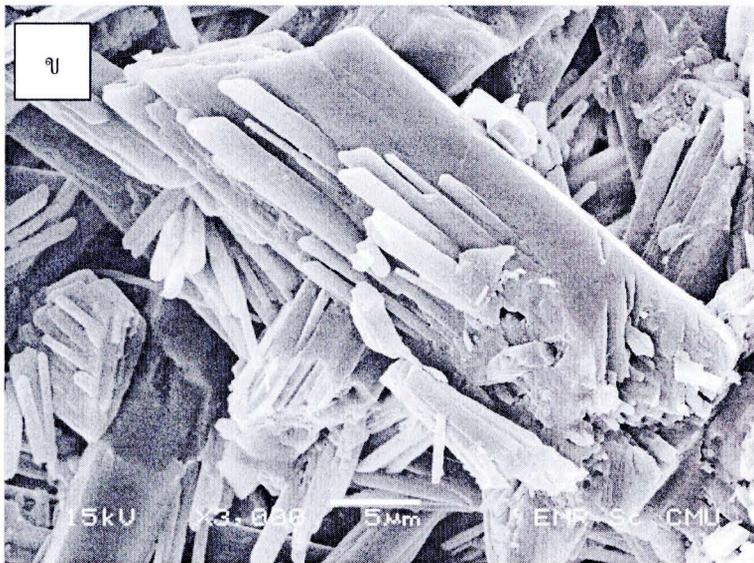
แผ่นและมีผิวขรุขระคล้ายรูปทรงหกเหลี่ยมแบบเฮกซะโกนอล แต่หากกรดที่เติมลงไปมีความเข้มข้นต่ำจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึก หรือเปลี่ยนแปลงแต่น้อยมาก

สารเติมแต่งที่เติมลงไปในสารละลายพลาสติกจะเข้าไปดูดซับและเกาะอยู่บนผิวของผลึกแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต และสร้างพันธะระหว่างไอออนลบของหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดกับไอออนบวกของแคลเซียมไอออนที่ละลายออกมา การดูดซับกรดบนผิวผลึก โดยสารเติมแต่งจะเข้าไปดูดซับกับแคลเซียมไอออนในระนาบ (100) และ (020) ส่งผลให้ผลึกเกิดการเติบโตในระนาบ (120) ได้ดีกว่า [29,32] ดังแสดงในรูป 4.24 แต่ถ้าเติมสารเติมแต่งในปริมาณมากจะส่งผลให้ การเติบโตของผลึกในด้าน (120) ถูกครอบงำด้วยทำให้ผลึกเกิดการเติบโตในทุกระนาบอย่างช้า ๆ ทำให้มีลักษณะของผลึกกลับไปคล้ายกับรูปทรงแท่งขนานของผลึกเอพิตีปีซึมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การเติมสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้ผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีค่า Crystal Ratio ของผลึกน้อยกว่าการเติมสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นต่ำ ดังรูปที่ 4.25

สรุปคือสารเติมแต่งจะส่งผลให้เอพิตีปีพลาสติกมีเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้นานขึ้น โดยสารเติมแต่งจะดูดซับกับผลึกในระนาบ ระนาบ (100) และ (020) ทำให้เกิดการชะลอการเติบโตของผลึกในดังกล่าว ส่งผลให้ผลึกเกิดการเติบโตในระนาบ (120) ได้ดี ส่งผลให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีค่า Crystal Ratio ลดลง ทำให้เกิดการसानเกี่ยวของผลึกลดลง และเกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างวัสดุไม่แน่น ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงอัดและความหนาแน่นรวมลดลง แต่ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น โดยกรดซัลฟูริกส่งผลให้ค่า Crystal Ratio ลดลงมากที่สุด



รูป 4.24 ผลึกเฟฟจิตึยิปซั่มในระบบที่มีสารเติมแต่ง



รูป 4.25 ผลึกเอฟจีดีอีพีซึ่มในระบบที่มีสารเติมแต่ง

(ก) ผลึกเอฟจีดีอีพีซึ่มจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

(ข) ผลึกเอฟจีดีอีพีซึ่มในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดกรดมาลิก 0.07% โดยน้ำหนัก

#### 4.3.2.2 การสร้างสมการเพื่อพยากรณ์ค่า Crystal Ratio ของเอฟจีดีปลาสเตอร์ในระบบที่มีสารเติมแต่งโดยใช้ปริมาณของสารเติมแต่งเป็นตัวพยากรณ์

ตาราง 4.12 สมการพยากรณ์ค่า Crystal Ratio ของผลึกเอฟจีดีพีซึ่มในระบบที่มีสารเติมแต่งและค่าสถิติต่างๆ

สารเติมแต่ง	สมการพยากรณ์ ระยะเวลา การก่อตัว $h(x)$	ความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ $\frac{dh(x)}{dx}$	สัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (R)	สัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ ( $R^2$ )	ค่าความ คลาดเคลื่อน มาตรฐาน
กรดซัลฟูริก	$-42.2x + 7.5$	-42.2	0.90	0.81	0.77
กรดซिटริก	$-38.6x + 7.5$	-38.6	0.90	0.81	0.66
กรดมาลิก	$-26.8x + 7.5$	-26.8	0.22	0.05	0.91
กรดอะซิติก	$-4.7x + 7.5$	-4.7	0.90	0.81	0.59
โซเดียมลิกโน ซัลโฟเนต	$-2.6x + 7.5$	-2.6	0.68	0.46	1.36
กรดลิกโน ซัลโฟนิก	$-0.4x + 7.5$	-0.4	0.30	0.09	0.97
กรดฟอส ฟอริก	$-2.1x + 7.5$	-2.1	0.61	0.38	0.73
โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต	$-2.9x + 7.5$	-2.9	0.87	0.76	0.49

ตาราง 4.12 สมการพยากรณ์ค่า Crystal Ratio และค่าสถิติต่างๆ ในระบบที่มีสารเติมแต่งชนิดด้วยสมการเส้นตรงที่มีความสัมพันธ์ในเชิงลบ แสดงให้เห็นว่าถ้าเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งจะส่งผลให้ค่า Crystal Ratio ลดลง โดยความชันของกราฟเส้นตรงจะบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Crystal Ratio เมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งเปลี่ยนแปลงไป ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) บอกถึงระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของค่า Crystal Ratio กับปริมาณสารเติมแต่ง และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการทำนายค่า Crystal Ratio ด้วย

ความเข้มข้นของสารเคมีแต่ง สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานแสดงให้เห็นค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยของการทำนายด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์

1. กรดซัลฟิวริก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ในระบบที่มีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $h(x) = -42.2x + 7.5$  โดยที่  $h(x)$  คือ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.90 แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 0.81 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกสามารถใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ได้ถูกต้อง 81% และ ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 19% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 0.77 แสดงว่าการทำนายค่า Crystal Ratio ด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.77 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่กำลังจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นช่วงของการพยากรณ์คือ  $h(x) \pm 0.77$

2. ผลของกรดซिटริก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ในระบบที่มีกรดซिटริกเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $h(x) = -38.6x + 7.5$  โดยที่  $h(x)$  คือ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.90 แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของกรดซิทริกมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 0.81 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดซิทริกสามารถใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ได้ถูกต้อง 81% และ ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 19% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 0.66 แสดงว่าการทำนายค่า Crystal Ratio ด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.66 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่กำลังจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นช่วงของการพยากรณ์คือ  $h(x) \pm 0.66$

3. ผลของกรดมาลิก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ในระบบที่มีกรดมาลิกเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $h(x) = -26.8x + 7.5$  โดยที่  $h(x)$  คือ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.22 แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของกรดมาลิกมีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.05 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดมาลิกสามารถใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ได้ถูกต้องเพียง 5% ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเตรียมตัวอย่างเพียงวิธีเดียว และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์

พลาสติกในระบบที่มีกรดมัลิกในแต่ละความเข้มข้นด้วยกล้องเอสอีเอ็มเพียงครั้งเดียว ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 0.91 แสดงว่าการทำนายค่า Crystal Ratio ด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.91 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ได้จากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นช่วงของการพยากรณ์คือ  $h(x) \pm 0.91$

4. ผลของกรดอะซิติก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ในระบบที่มีกรดอะซิติกเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $h(x) = -4.7x + 7.5$  โดยที่  $h(x)$  คือ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.90 แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของกรดอะซิติกมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 0.81 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดอะซิติกสามารถใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ได้ถูกต้อง 81% และ ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 19% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 0.59 แสดงว่าการทำนายค่า Crystal Ratio ด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.59 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ได้จากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นช่วงของการพยากรณ์คือ  $h(x) \pm 0.59$

5. ผลของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ในระบบที่มีโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา คือ  $h(x) = -2.6x + 7.5$  โดยที่  $h(x)$  คือ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.68 แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตมีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.46 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของโซเดียมลิกโนซัลโฟเนตสามารถใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ได้ถูกต้อง 46% และ ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 54% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 1.36 แสดงว่าการทำนายค่า Crystal Ratio ด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.36 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ได้จากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นช่วงของการพยากรณ์คือ  $h(x) \pm 1.36$

6. ผลของกรดลิกโนซัลโฟนิค สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ในระบบที่มีกรดลิกโนซัลโฟนิค เป็นตัวหน่วยปฏิกิริยา คือ  $h(x) = -0.4x + 7.5$  โดยที่  $h(x)$  คือ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.30 แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของกรดลิกโนซัลโฟนิค มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.09 บ่งบอกว่าความเข้มข้นของกรดลิกโนซัลโฟนิค สามารถใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ได้ถูกต้องเพียง 9% ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเตรียมตัวอย่างเพียงวิธีเดียว และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์พลาสติกในกระบวนการที่มีกรดลิกโนซัลโฟนิคในแต่ละความเข้มข้นด้วยกล้องเอชไอเอ็มเพียงครั้งเดียว ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 0.97 แสดงว่าการทำนายค่า Crystal Ratio ด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.97 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นช่วงของการพยากรณ์คือ  $h(x) \pm 0.97$

7. กรดฟอสฟอริก สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ในระบบที่มีกรดฟอสฟอริก เป็นตัวหน่วยปฏิกิริยา คือ  $h(x) = -2.1x + 7.5$  โดยที่  $h(x)$  คือ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.61 แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลางและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.38 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก สามารถใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ได้ถูกต้อง 38% และ ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 62% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 0.73 แสดงว่า การทำนายค่า Crystal Ratio ด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.73 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่มีค่าจากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นช่วงของการพยากรณ์คือ  $h(x) \pm 0.73$

8. โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต สมการเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ในระบบที่มีโปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เป็นตัวหน่วยปฏิกิริยา คือ  $h(x) = -2.9x + 7.5$  โดยที่  $h(x)$  คือ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.87 แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของโปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต มีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 0.76 บ่งบอกว่า ความเข้มข้นของ

โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต สามารถใช้ทำนายค่า Crystal Ratio ได้ถูกต้อง 76% และ ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ 24% ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการพยากรณ์เท่ากับ 0.49 แสดงว่า การทำนายค่า Crystal Ratio ด้วยสมการที่ใช้ในการพยากรณ์จะมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.49 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์คือผลต่างระหว่างค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่า Crystal Ratio ที่ได้จากการพยากรณ์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นได้ทั้งกรณีที่ได้จากการพยากรณ์มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าข้อมูลจริง ดังนั้นช่วงของการพยากรณ์คือ  $h(x) \pm 0.49$

เมื่อพิจารณาสมการพยากรณ์ค่า Crystal Ratio โดยใช้ปริมาณของสารเติมแต่งชนิดอินทรีย์เป็นตัวพยากรณ์ พบว่าสมการพยากรณ์ที่ใช้กรดซัลฟอนิก กรดซิติริกและกรดอะซิติก เป็นตัวพยากรณ์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.90 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.81 ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุด จึงเป็นสมการพยากรณ์ที่สามารถทำนาย ค่า Crystal Ratio ได้ดี และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์พบว่าสมการของกรดอะซิติก มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานต่ำที่สุดคือ 0.59 ดังนั้นสมการพยากรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือที่สุดคือสมการพยากรณ์ระยะเวลาในการก่อตัวที่ใช้ปริมาณของกรดอะซิติก เป็นตัวพยากรณ์ แสดงสมการดังต่อไปนี้

$$h(x) = -4.7x + 7.5$$

เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.90 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.81 ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุด แต่มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานน้อย แสดงให้เห็นว่าค่า Crystal Ratio กับความเข้มข้นของกรดซัลฟอนิก มีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก และมีประสิทธิภาพในการทำนายค่า Crystal Ratio ของสารเติมแต่งที่มีความถูกต้องถึง 81 % และมีความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ 0.59

อย่างไรก็ตามสมการพยากรณ์นี้เหมาะสำหรับใช้พยากรณ์ในช่วง (Interpolation) กล่าวคือเหมาะที่จะนำไปพยากรณ์ค่า Crystal Ratio เมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งอยู่ในช่วงของขอบเขตที่ศึกษา ทั้งนี้เพราะไม่ทราบลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า Crystal Ratio ของผลึกเอพิจิอิลิปซัม เมื่อความเข้มข้นอยู่นอกช่วงขอบเขตที่ศึกษา