

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องสุขภัณฑ์

เครื่องสุขภัณฑ์ (sanitary ware) คือ เครื่องอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับห้องน้ำ เช่น อ่างล้างหน้า ชักโครก โถปัสสาวะ เป็นต้น [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยในการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ในอุตสาหกรรมนั้นประกอบด้วย 7 ขั้นตอน [3] ด้วยกัน ดังนี้คือ



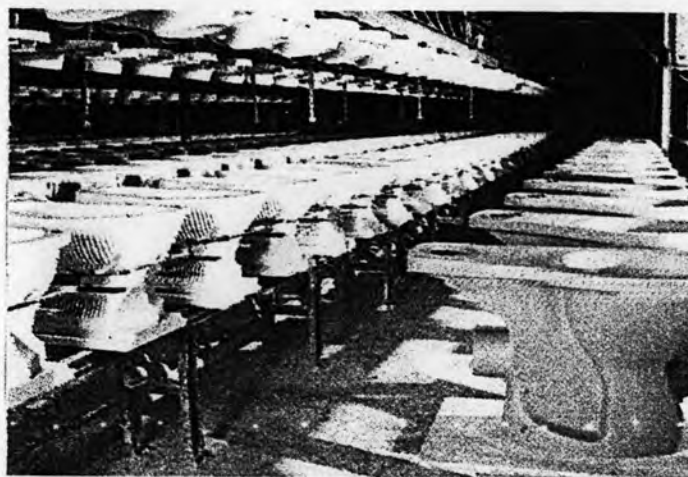
รูปที่ 2.1 เครื่องสุขภัณฑ์

1. การคัดเลือกและเตรียมวัตถุดิบ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้แก่ ดินเหนียว ดินขาว หินฟันม้า และทรายซิลิกา วัตถุดิบเหล่านี้ต้องนำมาคัดแยกตกแต่งและตรวจสอบหาสมบัติต่างๆ ก่อนจึงจะหาอัตราส่วนที่เหมาะสม

2. การบดและการผสม วัตถุดิบจะถูกนำเข้าสู่เครื่องโม่บด (grinding mill) เพื่อบดและผสมวัตถุดิบให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ในการบดและผสมจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง การควบคุมคุณภาพใช้วิธีทดสอบให้ไหลผ่านตะแกรง เมื่อวัตถุดิบถูกบดและผสมกับน้ำแล้วจะได้เป็นน้ำขุ่นๆ สีน้ำตาลเรียกว่า “น้ำสลิป (slip)” หรือในบางที่เรียกว่า “น้ำดิน” จากนั้นน้ำสลิปก็จะไหลไปที่ถังพักเพื่อเติมสารเติมแต่งต่างๆ เช่น โซเดียมซิลิเกต เป็นต้น พร้อมกับกวนผสมและพักไว้ 1 วัน

ขั้นตอนนี้จะมีหน่วยควบคุมคุณภาพสุ่มตัวอย่างน้ำสลิปไปทดสอบโดยการตรวจสอบสมบัติต่างๆ และหล่อเป็นแท่งทดสอบเพื่อทดลองเคลือบและเผา ถ้ามีการแตกร้าวหรือแตกลายงา ก็จะต้องเพิ่มสัดส่วนอื่นๆ ลงไปด้วย

3. การหล่อ น้ำสลิปจะถูกสูบไปตามท่อแล้วเทลงในแบบหล่อ (casting mold) ถ้าเป็นชิ้นเล็กๆ จะใช้เวลาแข็งตัวประมาณ 2 – 3 ชั่วโมง และในหนึ่งวันจะสามารถหล่อได้เพียง 2 รอบเท่านั้น ถ้าเป็นชิ้นใหญ่ เช่น ชักโครก ก็จะหล่อได้เพียงวันละรอบเท่านั้น โดยทั่วไปแบบหล่อจะทำด้วยปูนยิปซัมพลาสติกอร์คิงรูปที่ 2.2 โดยยิปซัมพลาสติกอร์จะมีหน้าที่คูดน้ำออกจากน้ำสลิปทำให้ชิ้นงานแข็งตัว โดยขนาดของแบบหล่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของผลิตภัณฑ์จริงประมาณ 12% เพื่อชดเชยการหดตัวเวลาเผา เมื่อทำการแกะแบบหล่อออก ตัวเครื่องสุขภัณฑ์ที่ได้จะต้องถูกตรวจสอบความเรียบร้อยและตกแต่งแบบหยาบๆ ชิ้นที่ไม่ผ่านการตรวจสอบจะถูกส่งกลับไปทำเป็นน้ำสลิปใหม่



รูปที่ 2.2 การหล่อเครื่องสุขภัณฑ์

4. การพักและอบ การพักเป็นการปล่อยให้เครื่องสุขภัณฑ์ที่เตรียมได้แห้งไปอย่างช้าๆ เพราะถ้านำไปเผาทันทีก็จะมีโอกาสแตกเสียหายได้มาก โดยจะใช้เวลาพักประมาณ 1 วัน แล้วนำเข้าไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง เครื่องสุขภัณฑ์ที่เตรียมก็จะแห้งสนิท จากนั้นนำไปตกแต่งอย่างละเอียด

5. การเคลือบ สารที่ใช้เคลือบจะประกอบด้วย ทราช หินฟีนมา และสี โดยส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกบดกับน้ำให้เข้ากันเป็นของเหลวแล้วพ่นลงบนผิวของตัวสุขภัณฑ์ดิบ

6. การเผา ในการเผาเครื่องสุกัณฑ์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 1,100 – 1,200 องศาเซลเซียส การเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เนื้อดินหลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จะทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำ และมีความแข็งแรงสูง ส่วนเวลาในการเผานั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพของเตาแต่ละเตา โดยจะใช้เวลาประมาณ 7 – 25 ชั่วโมง โดยในการเผาจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่

7. การตรวจสอบคุณภาพ การตรวจสอบจะทำการตรวจสอบตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) หากมีการส่งออกต่างประเทศจะอ้างอิงมาตรฐานของประเทศนั้นๆ

2.2 แบบหล่อเครื่องสุกัณฑ์ (Casting mold)

อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสุกัณฑ์ แบบหล่อจะเป็นวัสดุที่มีรูพรุนทำหน้าที่คูดน้ำออกจากส่วนผสมของน้ำสลิป ทำให้ผนังแบบหล่อมีอนุภาคของของแข็งที่เป็นวัตถุดิบในส่วนผสมของน้ำสลิปก่อตัวขึ้นเป็นชั้นบาง ๆ และมีความแน่นขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป การแพร่ของน้ำจากน้ำสลิปไปยังแบบพิมพ์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ผนังของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แบบหล่อจะเปื่อยขึ้นมากขึ้น การเพิ่มความหนาของผนังผลิตภัณฑ์ หรือเรียกว่าอัตราการหล่อนี้ จะเป็นแปรผันตามกับรากที่สองของเวลา ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหล่อแบบและเวลา [4]

โดยการหล่อแบบนี้จะใช้เวลาแข็งตัวประมาณ 2 – 3 ชั่วโมง และในหนึ่งวันจะสามารถหล่อได้เพียง 2 รอบเท่านั้นสำหรับการหล่อแบบด้วยพลาสติกโพลีโมลด์ ถ้าเป็นชิ้นใหญ่ เช่น ชักโครก ก็จะหล่อได้เพียงวันละรอบเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ได้มีการนำเข้าวัสดุชนิดใหม่เพื่อใช้เป็นแบบหล่อในการขึ้นรูปเครื่องสุกัณฑ์ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในนามของ “เรซิน โมลด์” (resin mold) ซึ่งวัสดุชนิดใหม่นี้สามารถลดระยะเวลาในการหล่อแบบ และเพิ่มผลผลิตในแต่ละวัน แต่การใช้งาน

เรซิน โมลด์ยังพบกับข้อจำกัดในด้านต่างๆ ได้แก่ ราคาซึ่งสูงกว่าปลาสเตอร์โมลด์หลายเท่าตัว และขั้นตอนการขึ้นรูปที่ยุ่งยาก ทำให้วัสดุชนิดนี้ยังไม่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ระดับกลาง และระดับล่าง ซึ่งความแตกต่างระหว่างวัสดุที่ใช้ในการทำแบบหล่อเป็นดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตแบบหล่อ

สมบัติ	ปลาสเตอร์โมลด์ (plaster mold)	เรซินโมลด์ (resin mold)
ชนิดของวัสดุ	ปลาสเตอร์	พอลิเมอร์
ราคาขาย (บาท/กิโลกรัม)	3-5	1,000-1,200
อายุการใช้งาน (รอบ)	80-100	20,000
ประสิทธิภาพในการใช้งาน (รอบ/วัน)	2	20
ความทนแรงอัดอากาศ	ไม่มีการใช้แรงอัดอากาศ	12 บาร์
ขั้นตอนการเตรียมแบบหล่อ	1 ขั้นตอน	3 ขั้นตอน

2.3 ปูนปลาสเตอร์ [4]

ปลาสเตอร์ คือวัสดุชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวเมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวและเกิดความร้อน เมื่อแห้งแล้วจะสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้

2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนปลาสเตอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปลาสเตอร์มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ เกลือซึด ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำนาเกลือหรือโรงงานอุตสาหกรรมทางเคมีบางประเภท และแร่ยิปซัมจากธรรมชาติ โดยในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวรายละเอียดในส่วนของแร่ยิปซัม

2.3.1.1 ยิปซัม (Gypsum) [5]

ยิปซัม เป็นแร่ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมซัลเฟต (calcium sulfate) หรือสูตรทางเคมี คือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งสามารถแบ่งองค์ประกอบออกไซด์ออกได้เป็น CaO (แคลเซียมออกไซด์) 32.6 % SO_3 46.5 % และ H_2O 20.9 % ลักษณะโดยทั่วไปของแร่จะเป็นสีขาวหรือใสไม่มีสี (รูปที่ 2.4) ในประเทศไทยและหลายๆ ส่วนของโลกยังพบสายแร่ยิปซัมจำนวนมาก ในอีกทางหนึ่งแร่ยิปซัมเกิดจากผลพลอยได้ในกระบวนการผลิต (by product) ของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น

กระบวนการผลิตฟลูแก๊ส (flue gas) หรือ กระบวนการผลิตเกลือแคลเซียม (calcium salts) ทั้งนี้ในปัจจุบันการผลิตพลาสติกอร์นั้นจะเป็นการเตรียมจากแร่ยิปซัม เป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2.4 ก้อนแร่ยิปซัม

2.3.2 การแปรรูปยิปซัม [5]

การแปรรูปแร่ยิปซัมเพื่อผลิตเป็นปูนปลาสเตอร์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ต้องผ่านขั้นตอนพื้นฐาน 2 ขั้นตอน คือ

2.3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ



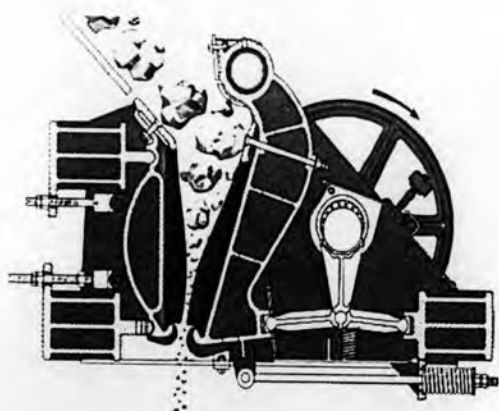
รูปที่ 2.5 เหมืองแร่ยิปซัม

การแปรรูปแร่ดิบจะเริ่มต้นตั้งแต่การนำแร่มาเข้าโรงบดเพื่อคัดขนาดให้มีขนาดตามต้องการ รวมถึงการแยกมลทินที่ติดมากับตัวแร่ออกเพื่อให้วัสดุดิบมีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนต่อไป การทำเหมืองแร่ดิบเป็นการทำเหมืองแบบเปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.5

การบด

การบดจะเริ่มด้วยการบดเพื่อลดขนาดแร่ที่ได้จากหน้าเหมืองด้วยเครื่องบดหยาบ เช่น เครื่องบด Gyratory crushers, Jaw crushers (รูปที่ 2.6) หรือ Impact crushers ขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของแร่ จากนั้นทำการบดอีกครั้งด้วยเครื่องย่อยแร่แบบค้อนทุบ (hammer mill) และเครื่องบดแบบโคน (cone-type crushers) ซึ่งเป็นที่นิยมกันมาก และหลังจากนั้นจะนำมาบดละเอียดด้วยเครื่องย่อยแร่แบบลูกกลิ้ง (roller mills) ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งแร่ก่อนการเผา (uncalcined) และหลังการเผา (calcined) เครื่องย่อยแร่แบบลูกกลิ้งอาจมีการติดเครื่องแยกด้วยอากาศ (air separators) เพื่อช่วยในการควบคุมขนาดของอนุภาค

ในการบดหยาบทั้ง 2 ขั้นตอน มักมีการติดตะแกรงสั่น (vibrating screens) เพื่อคัดขนาดและแยกหินหรืออนุภาคขนาดใหญ่ออกเพื่อช่วยลดเวลาและพลังงานในขั้นตอนการบดละเอียดลง การแยกด้วยตะแกรงสั่นนี้จะแยกหินที่ใช้ในการทำปูนซีเมนต์ (portland cement rock) ออกจากแร่ขนาดเล็ก ซึ่งเป็นตลาดแรกของแร่ดิบ ขนาดของหินดังกล่าวมีหลายขนาดขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ โดยทั่วไปขนาดใหญ่จะอยู่ในช่วง 1 ½ - 2 นิ้ว ขนาดเล็กจะอยู่ในช่วง ¼ - ½ นิ้ว สำหรับแร่ดิบขนาดเล็กที่ผ่าน Air separators จะถูกนำมาบรรจุถุงเพื่อส่งขายให้แก่อุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่น เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ อุตสาหกรรมเกษตร และอุตสาหกรรมเครื่องแก้ว เป็นต้น



(a)

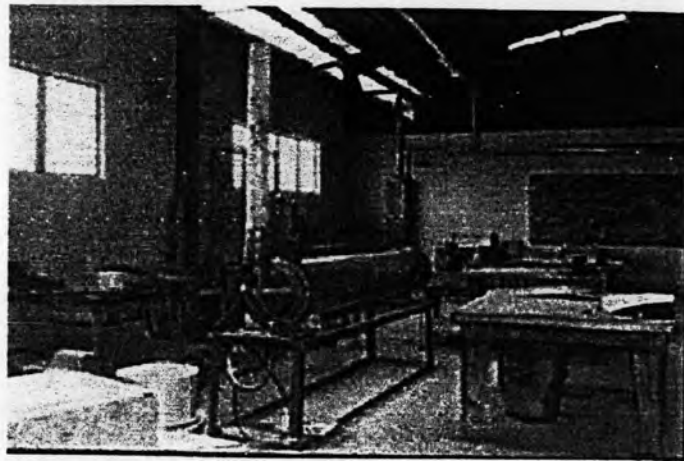


(b)

รูปที่ 2.6 รูปเครื่องบด (a) แบบจำลองการทำงาน (b) Jaw crushers

การอบแห้ง

การอบแห้งอาจแทรกอยู่ในขั้นตอนการบดหยาบ หากแร่ที่ป้อนมีความชื้นสูงจนทำให้การป้อนแร่ไม่สามารถทำได้ตามปกติหรือกรณีของยิปซัมที่มีขนาดเล็กกว่า 4 เมช หรือ 5 มิลลิเมตร ทำให้การเคลื่อนตัวไม่เป็นอิสระต่อกัน จึงมักป้อนแร่ดังกล่าวเข้าเครื่องอย่างแร่แบบหมุนก่อน ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ไม่ให้เกิน 120°F (~39°C) เพราะหากอุณหภูมิเกินกว่านั้นจะทำให้ น้ำที่เกาะที่ผิวของยิปซัมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเนื้อแร่ ขั้นตอนการบดและการผ่านตะแกรงร้อน สามารถช่วยแยกมลทิน ดินทรายออกจากแร่ได้ เนื่องจากยิปซัมมีค่าความแข็ง 2 ซึ่งต่ำกว่าทรายมาก (ทรายมีค่าความแข็ง 7) ดังนั้นแร่ที่ผ่านการบดจะกลายเป็นผงของยิปซัมในเปอร์เซ็นต์ที่มากกว่าทรายและมีขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อผ่านตะแกรงร้อนก็จะสามารถลดปริมาณทรายออกจากแร่ได้ ทำให้ความบริสุทธิ์ของยิปซัมเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.7 เครื่องอย่างแร่แบบหมุน

การล้างหรือการร่อนเปียก

ขั้นตอนนี้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพในบางกรณีเท่านั้น เพื่อต้องการให้แร่ที่ได้มีสีขาวยิ่งขึ้น หรือบางครั้งอาจจะใช้น้ำเป็นตัวกลางช่วยแยกมลทินโดยใช้วิธีการตกจม (sink - float separation) เข้ามาช่วย เช่นในบางอุตสาหกรรมของบริษัทผู้ผลิตในอเมริกาและแคนาดา ส่วนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการแร่ที่มีความบริสุทธิ์มาก ก็จะใช้เทคนิคการลอยแร่ (floatation) แต่เทคนิคดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

2.3.3 ระบบของแคลเซียมซัลเฟต [7]

2.3.3.1 เฟส (Phases)

ในระบบของแคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) นั้น ลักษณะเฟสของของแข็งของแคลเซียมซัลเฟต นั้นจะมีทั้งหมด 5 เฟสโดยที่อุณหภูมิห้องจะพบเพียง 4 เฟส คือแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (calcium sulfate dihydrate) แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (calcium sulfate hemihydrate) แอนไฮไดรต์ III (anhydrite III) และแอนไฮไดรต์ II (anhydrite II) ส่วนแอนไฮไดรต์ I (anhydrite I) จะพบที่อุณหภูมิมากกว่า 1,180 องศาเซลเซียสเท่านั้น โดยแอนไฮไดรต์ I นั้นในปัจจุบันยังไม่สามารถผลิตได้ แต่แคลเซียมซัลเฟต ทั้ง 4 เฟสนั้นสามารถผลิตได้แล้วในอุตสาหกรรม โดยรายละเอียดของแต่ละเฟสสามารถดูได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะของแคลเซียมซัลเฟตเฟสต่างๆ [8]

Characteristic	Calcium sulfate dihydrate	Calcium sulfate hemihydrate	Anhydrite III	Anhydrite II	Anhydrite I
Formula	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4	CaSO_4	CaSO_4
Molecular mass M_r	172.17	145.15	136.14	136.14	136.14
Thermodynamic stability, °C	< 40	metastable*	metastable*	40–1180	> 1180
Forms or stages		two forms: α β	three stages: β -anhydrite III β -anhydrite III' α -anhydrite III	three stages: AII-s, slowly soluble anhydrite AII-u, insoluble anhydrite AII-E, <i>Estrichgips</i>	
Other names, often based on the application	gypsum raw gypsum synthetic gypsum chemical gypsum byproduct gypsum set gypsum hardened gypsum	α -form: α -hemihydrate autoclave plaster α -plaster β -form: β -hemihydrate stucco plaster β -plaster plaster of Paris [26499-65-0]	soluble anhydrite	raw anhydrite natural anhydrite anhydrite synthetic anhydrite chemical anhydrite byproduct anhydrite calcined anhydrite	high-temperature anhydrite
Synthesis conditions: temperature, °C, and atmosphere	< 40	α -form: > 45, from aqueous solution β -form: 45–200 in dry air	α - and β -AIII: 50 and vacuum or 100 in air β -AIII': 100 in dry air	200–1180	> 1180
Production temperature, °C	< 40	α -form: 80–180 β -form: 120–180	β -AIII and β -AIII': 290 α -AIII: 110	300–900, specifically AII-s: < 500 AII-u: 500–700 AII-E: > 700	not produced commercially

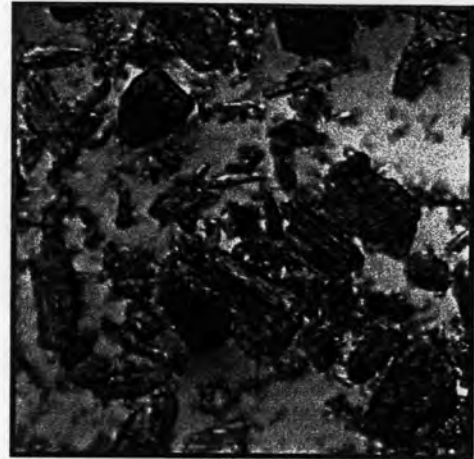
* Metastable in air saturated with water vapor

แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) นั้นเป็นสารตั้งต้นของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต และเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาการรับน้ำ โดยแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) นั้นเราจะพบอยู่ใน 2 ลักษณะ คือ แอลฟา (α) และ บีต้า (β) โดยทั้ง 2 ลักษณะนี้จะมีสมบัติการใช้งานและกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยแอลฟาเฮมิไฮเดรต (α -hemihydrate) จะมีลักษณะเป็น

ผลึกไอโซขนาดใหญ๋ ดังแสดงในรูปที่ 2.9(a) ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตที่มีการใช้น้ำและหม้ออบความดัน (autoclave) ส่วนบีต้าเฮมิไฮเดรต (β -hemihydrate) จะมีลักษณะเป็นผลึกละเอียดขนาดเล็กรูป 2.9(b) ซึ่งจะผลิตโดยการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว



(a)



(b)

รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายผลึกของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (a) แอลฟาเฮมิไฮเดรต และ (b) บีต้าเฮมิไฮเดรต

โดยหลักการพื้นฐานพบว่า แอนไฮไดรต์ III นั้นจะประกอบด้วยแอนไฮไดรต์ที่ละลายน้ำได้ มี 3 สถานะ คือ บีต้าแอนไฮไดรต์ III (β -anhydrite III) บีต้าแอนไฮไดรต์ III' (β -anhydrite III') และ แอลฟาแอนไฮไดรต์ III (α -anhydrite III) ซึ่งสามารถพิจารณาความแตกต่างของแอนไฮไดรต์ทั้ง 3 สถานะ ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น เอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรกชัน (x-ray diffraction) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) เมอร์คิวรี พอร์ซิเมทรี (mercury porosimetry) และ พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) สำหรับแอนไฮไดรต์ II ได้จากการผลิตโดยการเผาไฮเดรต (dehydrate) เฮมิไฮเดรต (hemihydrate) และ แอนไฮไดรต์ III (anhydrite III)

โดยสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของแคลเซียมซัลเฟตเฟสต่างๆ นั้นสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมซัลเฟต [4]

Property	Calcium sulfate dihydrate	Calcium sulfate hemihydrate		Anhydrite III	Anhydrite II	Anhydrite I
		α -form	β -form			
Water of crystallization, wt%	20.92	6.21		0.00	0.00	0.00
Density ρ , g/cm ³	2.31	2.757	2.619–2.637	2.580	2.93–2.97	undetermined
Hardness, Mohs	1.5	–		–	3–4	–
Solubility in water at 20 °C, g per 100 g of solution	0.21	0.67	0.88	hydrates to the hemihydrate	(0.27)	–
Refractive indices n_x	1.521	1.559*		1.501	1.570	undetermined
n_y	1.523	1.5595*		1.501	1.576	
n_z	1.530	1.584		1.546	1.614	
Optical character	+			+	+	undetermined
Optical orientation	$n_y \parallel b$ $n_z/c = 52^\circ$	$c \parallel n_x$		$c \parallel n_x$	$n_x \parallel c$ $n_y \parallel c$	undetermined
Axial angle $2V$	$58-60^\circ$	14°		$\approx 0^\circ$	$42-44^\circ$	undetermined
Lattice symmetry	monoclinic	rhombohedral		hexagonal	rhombic	cubic
Space group	$C2/c = C_{2h}^6$	$C3_2 = D_3^3$		$C6_2 = D_6^4$	$Ccmm = D_{2h}^{17}$	undetermined
Lattice spacing, nm, a	1.047	0.683		0.699	0.696	undetermined
b	1.515	0.683		0.699	0.695	
c	0.628	1.270		0.634	0.621	

* Average

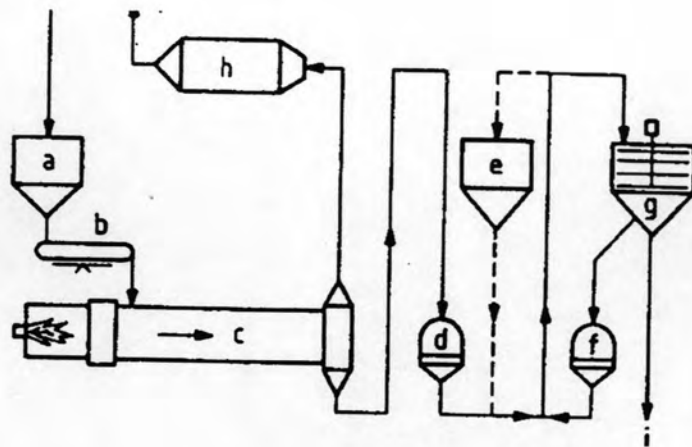
2.3.3.2 กระบวนการผลิตปลาสเตอร์

การผลิตบีต้าเฮมิไฮเดรตปลาสเตอร์ (β -hemihydrate plaster)

การผลิตปลาสเตอร์รูปแบบนี้จะใช้ยิปซัมธรรมชาติเป็นวัสดุตั้งต้น โดยในการผลิตนั้นจะเป็นการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 120 – 180 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องจักร 2 แบบ คือ rotary kilns และ kettle ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (batch process)

1) การผลิตด้วยเครื่อง Rotary kilns

Rotary kilns เป็นกระบวนการผลิตที่เผาและให้ความร้อนโดยตรง คือมีเปลวไฟสัมผัสกับแรยิปซัม ดังรูปที่ 2.10 โดยขนาดของอนุภาคของแรยิปซัมที่เหมาะสมในการผลิตด้วยวิธีนี้อยู่ระหว่าง 0-25 มิลลิเมตร

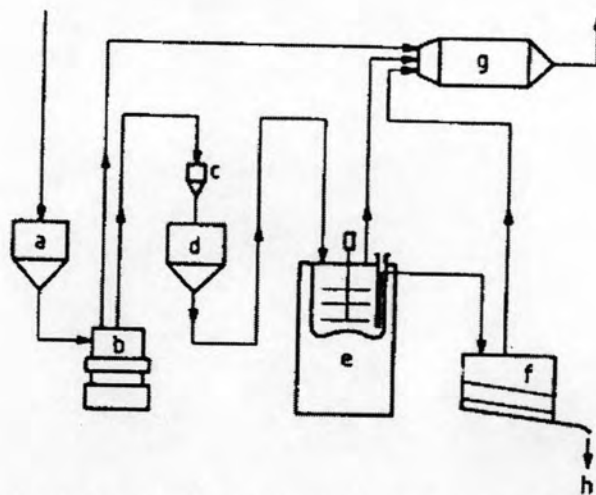


a) Silo of gypsum rock, b) Weigh-belt feeder, c) Rotary kiln with combustion chamber, d) Primary mill, e) Start-up and shut-down bin, f) Fine mill, g) Air classifier, h) Electrostatic precipitator, i) β -hemihydrate plaster

รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตด้วย Rotary kilns

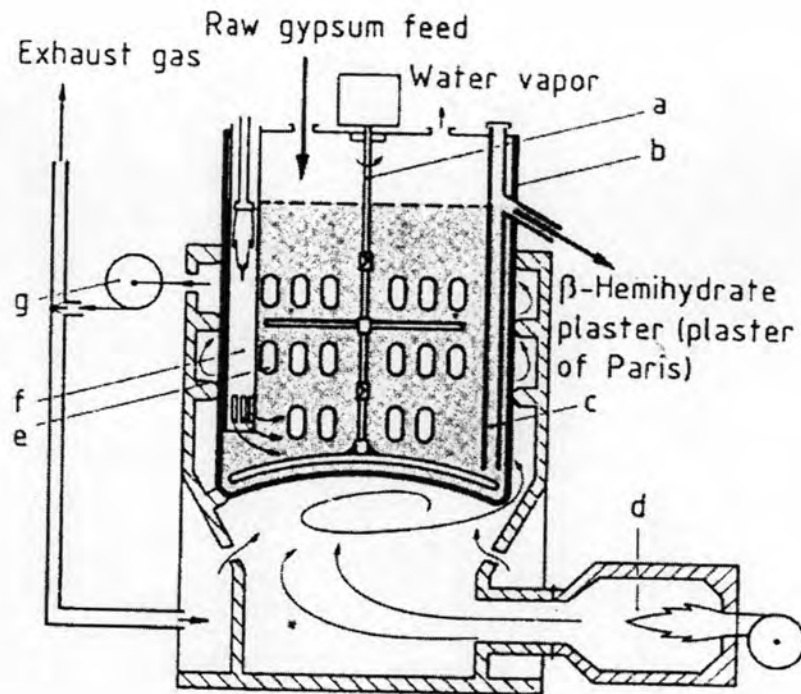
2) การผลิตด้วยเครื่อง Kettles

Kettle เป็นกระบวนการผลิตที่ไม่ได้ให้ความร้อนโดยตรง คือเปลวไฟจะสัมผัสที่ก้นของภาชนะที่บรรจุแร่ยิปซัม แล้วส่งผ่านความร้อนเข้าไปด้านในเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของยิปซัม ดังรูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12



a) Silo of gypsum rock, b) Drying-grinding unit, c) Cyclone, d) Kettle and bin, e) Continuous kettle, f) Cooling bin (hot bin), g) Electrostatic precipitator, h) β -hemihydrate plaster

รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตด้วย Kettle

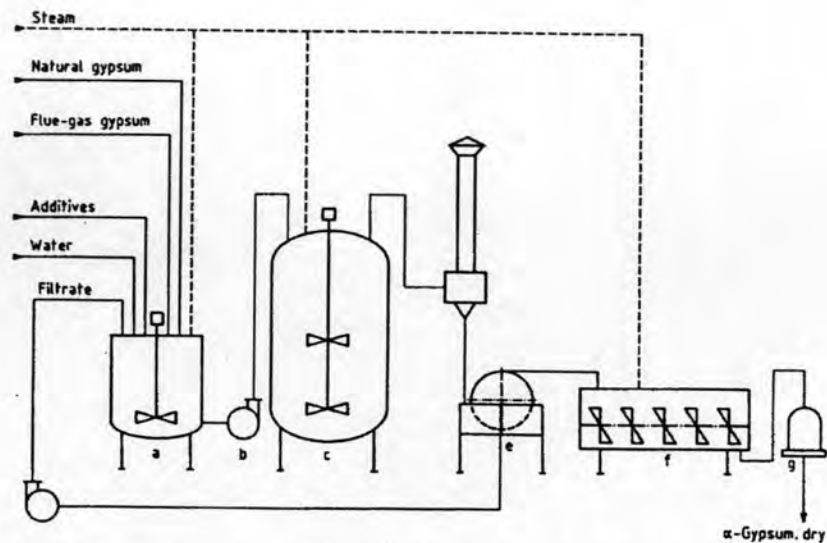


a) Agitator, b) Outer casing of kettle, c) Ascending pipe for stucco plaster discharge, d) Combustion chamber.
e) Cross pipe for hot gases, f) Submerged pipe with submerged combustion burner, g) Ventilating fan for exhaust and circulating gas

รูปที่ 2.12 การทำงานภายใน kettle

การผลิต แอลฟาเฮมิไฮเดรตปลาสเตอร์

การผลิตแอลฟาเฮมิไฮเดรตปลาสเตอร์นั้นเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยหลักการสำคัญของกระบวนการผลิตนี้คือ มีการใช้น้ำเข้ามาในกระบวนการผลิต (wet process) เพื่อป้องกันการเกิดการแข็งตัวในระหว่างกระบวนการผลิต โดยเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้มีแบบเดียวคือหม้ออบความดัน ดังรูปที่ 2.13 และเพื่อที่จะให้ได้ แอลฟาเฮมิไฮเดรต นั้นจะมีการให้ความร้อนกับแรยิปซัมที่ 135 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และมีการเติมสารเติมแต่งเข้าไปเพื่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่



a) Mixing tang, b) Slurry pump, c) Autoclave, d) Expander, e) Vacuum filter, f) Dryer, g) Pulvarizer

รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิต แอลฟาฮีโมไฮเดรตพลาสติก ด้วยหม้ออบความดันในระบบต่อเนื่อง

2.3.3.3 สมบัติของแอลฟาและบีต้าฮีโมไฮเดรต

แอลฟาฮีโมไฮเดรตพลาสติกนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำแล้ว จะประกอบด้วยผลึกที่เป็นระเบียบ อยู่ในระบบ Trigonal [7] มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็มชัดเจนจับตัวกันอย่างหนาแน่น จึงมีความหนาแน่นสูงกว่าบีต้าฮีโมไฮเดรตพลาสติก ดังนั้นในการใช้งานแอลฟาฮีโมไฮเดรตพลาสติก จึงใช้ปริมาณของน้ำน้อยกว่าบีต้าฮีโมไฮเดรตพลาสติก แอลฟาฮีโมไฮเดรตพลาสติกมีความแข็งแรงสูง โดยส่วนมากจะนำไปใช้วัสดุที่ต้องการความทนทานมาก เช่นแม่พิมพ์ (case mould) พลาสติกสำหรับทันตกรรม (dental plaster) แบบหล่อโลหะ (cast metal) และ กระเบื้องหลังคา (roofing tile) โดยการใช้งานอาจจะมีการผสมกับ บีต้าฮีโมไฮเดรตพลาสติก เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

บีต้าฮีโมไฮเดรตพลาสติก นั้น หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำแล้ว จะประกอบด้วยผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ จับตัวกันอย่างหลวมๆ เป็นก้อนคล้ายฟองน้ำ มีรูพรุนสูง มีลักษณะเป็นรอยแยกความหนาแน่นน้อย เนื่องจากในการผสมจะมีการใช้ปริมาณของน้ำที่มากกว่าแอลฟาฮีโมไฮเดรตพลาสติก และจากการที่ผลึกมีขนาดเล็กทำให้หลังจากปฏิกิริยาผลึกที่ได้จะอยู่กันอย่างหลวมๆ และมีการกระจายขนาดของอนุภาคในช่วงกว้าง รวมถึงรูปผลึกอยู่ในระบบ Orthorhombic[8] เมื่อเทียบกับแอลฟาฮีโมไฮเดรตพลาสติกแล้วบีต้าฮีโมไฮเดรตพลาสติก จะมีความสามารถในการละลายสูงกว่า (high solubility) ในกระบวนการผลิตนั้นบีต้าฮีโมไฮเดรตพลาสติกจะมีต้นทุนทางการผลิตต่ำกว่าแอลฟาฮีโมไฮเดรตพลาสติกมาก โดยส่วนมากจะใช้ในงานที่ต้องการการดูดซึมน้ำมากๆ เช่น แบบหล่อ (cast mould หรือ working mould) ในการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์

2.4 พลาสติกโมลด์

พลาสติกโมลด์ (molding plaster) คือพลาสติกที่ใช้เป็นต้นแบบ แบบพิมพ์ หรือแบบหล่อ งานสุขภัณฑ์ ซึ่งต้องมีความบริสุทธิ์ของยิปซัมสูง 95% ทั้งนี้เพราะต้องการความขาว และสามารถในการดูดซึมน้ำของยิปซัม นอกจากนี้การใช้ยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์สูงเวลาในการก่อตัว การหดตัวและการขยายตัวมีค่าใกล้เคียงกันทั้งชิ้นงาน ทางด้านสมบัติความแข็งแรงจะพบว่าพลาสติกโมลด์ที่ทำจากบีต้าเฮมิไฮเดรต (beta hemihydrate) จะมีความแข็งแรงมากกว่าแอลฟาเฮมิไฮเดรต (alpha hemihydrate) แต่ในการใช้งานก็มีการใช้พลาสติกทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ และในทางการค้านั้นจะมีการปรับปรุงสมบัติโดยการเติมยิปซัมบดหรือเกลือบางตัวลงไป เพื่อควบคุมเวลาในการแข็งตัวของพลาสติก (setting time) การขยายตัว (expansion) การไหลตัว (flow) และสมบัติอื่นๆ ทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ

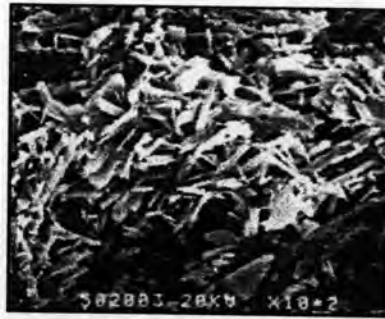
2.4.1 สมบัติของพลาสติกโมลด์ [4]

2.4.1.1 การก่อตัว

การก่อตัวของพลาสติกโมลด์นั้นเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงรูปของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต เมื่อได้รับน้ำเข้าไปในโมเลกุล จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ขั้นตอนในการก่อตัวของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต เป็นดังนี้ คือเมื่อนำแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตมาผสมกับน้ำจะได้สารแขวนลอย (suspension) ซึ่งเริ่มเป็นของไหล จากนั้นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตจะเกิดการละลายน้ำจนกระทั่งกลายเป็นสารละลายอิ่มตัว (saturated solution) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปสารละลายอิ่มตัวของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตนี้จะเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวดจนกลายเป็นแคลเซียมซัลเฟต ไดไฮเดรต ตกผลึกออกมา ซึ่งขณะที่แคลเซียมซัลเฟต ไดไฮเดรต ตกผลึกออกมานั้น สารละลายจะเกิดการไม่อิ่มตัว ทำให้มีการละลายได้เพิ่มขึ้นผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดโตขึ้น โดยที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะสังเกตได้จากความร้อนที่คายออกมา เมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อยมากทำให้อุณหภูมิคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เวลาที่ใช้ในช่วงนี้เรียกว่า Initial period ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถเทใส่แบบเพื่อขึ้นรูปได้และสามารถใช้งานในการหล่อแบบ หรือใช้งานอย่างอื่นได้ โดยลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นเป็นผลึกที่ไม่มีระเบียบ จับตัวกันอย่างหลวมๆ ดังรูปที่ 2.14 มีลักษณะเป็นก้อนคล้ายฟองน้ำมีรูพรุนสูง ลักษณะเป็นรอยแยก ความหนาแน่นน้อย



รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายSEMของแคลเซียมซัลเฟต ไดไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตกับน้ำ

2.4.1.2 เวลาในการก่อตัว (Setting time) [5]

จากปฏิกิริยาการรับน้ำเพื่อให้เกิดการก่อตัวของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต จะมีการใช้เวลาที่แน่นอนในการรวมตัว ดังนั้นช่วงเวลาที่ผงพลาสติกผสมกับน้ำจนกระทั่งเกิดการแข็งตัว เราเรียกช่วงเวลานี้ว่า เวลาในการก่อตัว (setting time) โดยการก่อตัวของพลาสติกนั้นเกิดจากการที่ผลึกของแคลเซียม ซัลเฟต ไดไฮเดรตตกลงมา และจะสิ้นสุดลงเมื่อเกิดการตกผลึกอย่างสมบูรณ์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตัวของพลาสติกนั้น มีอยู่ 3 ปัจจัยด้วยกัน ดังนี้ คือ

1. ความสามารถในการละลายของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต กล่าวคือ แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ส่งผลให้ปริมาณการละลายของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตในน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการตกผลึกกลับออกมาของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตจะเพิ่มขึ้น (เวลาในการก่อตัว:ต่ำ) ด้วยเช่นกัน แต่ถ้าความสามารถในการละลายของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตต่ำ ก็จะส่งในทางตรงกันข้าม

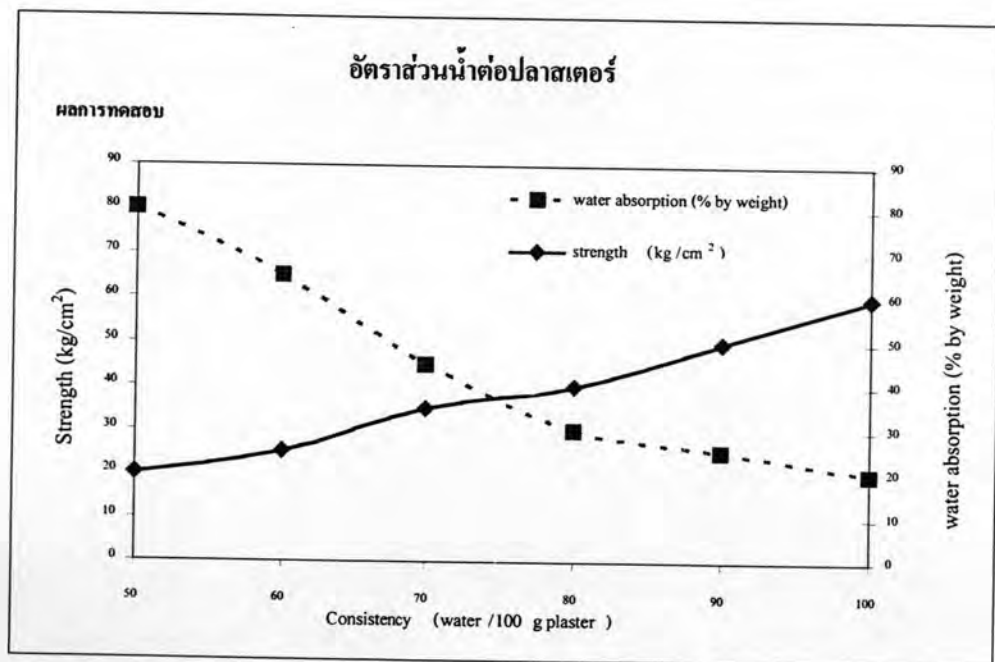
2. จำนวนของนิวเคลียส (Nuclei) ของการตกผลึก ปริมาณของนิวเคลียสมีผลต่อความสามารถในการตกผลึก กล่าวคือเมื่อปริมาณของนิวเคลียสสูงขึ้น ก็จะสามารถลดระยะเวลาในการก่อตัวลงได้ ถ้าพิจารณาที่ลักษณะทางกายภาพจะพบว่า การแข็งตัวของพลาสติกจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของนิวเคลียสที่สูงจะทำให้อัตราการโตและจำนวนของผลึกเพิ่มขึ้น

3. อัตราการโตของผลึก นั่นคือถ้าตัวผลึกของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต สามารถขยายขนาดได้เร็ว ทำให้ผลึกสามารถก่อตัวได้เร็วขึ้น เวลาในการก่อตัวก็จะต่ำลง

2.4.1.3 อัตราส่วนระหว่างน้ำตออิปซัมปลาสเตอร์ (W/P ratio, consistency)

W/P ratio หรือ water/plaster ratio เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำตอผงแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต โดยคิดเป็นน้ำหนัก อัตราส่วน W/P มีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์อิปซัมที่ได้ ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้อัตราส่วน W/P สูง จะทำให้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้น ไม่แข็งแรง อัตราส่วนของ W/P นี้จะเปลี่ยนไปตามชนิดและขนาดอนุภาคของอิปซัมปลาสเตอร์

อัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณน้ำที่ใช้ผสมกับปริมาณแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต จะต้องมีการศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมหรือค่าความแข็งแรงที่พอดีกับค่าการดูดซึมน้ำ โดยในการศึกษาทดลองจะทำโดยการผสมแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกับน้ำในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำขึ้นทดสอบมาหาค่าการดูดซึมน้ำและค่าความแข็งแรง จากนั้นนำมาเขียนกราฟแล้วหาจุดตัดกราฟ ดังแสดงในรูป 2.15 ซึ่งเป็นการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกับน้ำที่ใช้ทำแบบพิมพ์สำหรับการขึ้นรูปสุขภัณฑ์ โดยอัตราส่วนระหว่างน้ำตอแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต คือ 75 ส่วน ตอแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ชนิดบีต้า ให้ค่าความแข็งแรงประมาณ 40 kg/cm^2 และมีค่าการดูดซึมน้ำ 37 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำตอแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ชนิดบีต้า

2.4.1.4 ความแข็งแรง (Strength)

ความแข็งแรงของพลาสติกโพลีไธมโดยทั่วไปจะแสดงด้วย ความต้านแรงกด (compressive strength) และความต้านแรงดัดโค้ง (bending strength) โดยความแข็งแรงของพลาสติกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะเกิดความแข็งแรงหลังจากเกิดการก่อตัว อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในพลาสติกที่แข็งตัวแล้ว จะมีผลต่อความแข็งแรงของพลาสติก จากเหตุผลนี้จึงได้มีการเปรียบเทียบความแข็งแรงขณะเปียก (wet strength) กับความแข็งแรงขณะแห้ง (dry strength) โดยความแข็งแรงขณะเปียกเป็นความแข็งแรงของพลาสติกที่ยังคงเหลือน้ำอยู่จากปฏิกิริยารับน้ำของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต และเมื่อทำให้พลาสติกปราศจากน้ำแล้ว ความแข็งแรงที่วัดได้นี้จะเป็นความแข็งแรงขณะแห้ง ซึ่งความแข็งแรงขณะแห้งจะมีค่าเป็นสองเท่าหรือมากกว่าความแข็งแรงขณะเปียก ทั้งนี้ตารางที่ 2.4 แสดงผลของความต้านแรงกดจากการทำให้พลาสติกแห้ง (drying)

ตารางที่ 2.4 เวลาการอบให้แห้งที่มีผลต่อความแข็งแรงของพลาสติก

Drying Period (hrs)	Compressive Strength		Loss in Weight (percent)
	(MPa)	(Psi)	
2	9.6	1400	5.1
4	11.7	1700	11.9
8	11.7	1700	17.4
16	13.0	1900	-
24	23.3	3400	18.0
48	23.3	3400	18.0
72	23,3	3400	-

โดยปกติแล้วพลาสติกจะมีความพรุนตัว และถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อพลาสติกสูง (w/p ratio) จะทำให้พลาสติกมีความพรุนตัวสูงขึ้นไปด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.5 และมีผลเกี่ยวเนื่องทำให้ความแข็งแรงลดลงไปด้วย ทั้งนี้อัตราส่วนของน้ำต่อพลาสติกจะมีผลต่อความต้านแรงดึง (tensile strength) น้อยกว่าความต้านแรงดัน และในตารางที่ 2.6 ยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการกวนผสมนั้นก็ส่งผลต่อความแข็งแรงของพลาสติก คือเมื่อเพิ่มเวลาในการผสมจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.5 ความพรุนตัวของพลาสติกที่อัตราส่วนของน้ำต่อพลาสติกต่างๆกัน

W/P ratio	Porosity (percent)
0.25	10.3
0.30	15.3
0.35	20.3
0.40	25.3
0.50	25.3
0.60	45.3
1.00	85.3

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผสมและความต้านแรงกดที่อัตราส่วนของน้ำต่อพลาสติกต่างๆกัน

W/P ratio	Mixing Time (min)	Dry Compressive strength	
		(MPa)	(Psi)
0.45	0.5	23.4	3400
0.45	1.0	26.2	3800
0.60	1.0	17.9	2600
0.60	2.0	13.8	2000
0.80	1.0	11.0	1600

2.4.2 การปรับปรุงสมบัติของพลาสติก

จากการที่พลาสติกเป็นวัสดุที่มีราคาถูกและมีสมบัติในการดูดซึมน้ำ แต่มีข้อด้อยหลายประการ เช่น อายุการใช้งานที่ต่ำ ความต้านแรงดัดโค้ง ความต้านแรงกด รวมถึงความสามารถในการทนแรงอัดอากาศที่ต่ำ ทำให้มีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของพลาสติก หรือวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมซัลเฟตในรูปแบบต่าง ๆ ดังเช่น งานวิจัยของ Ei-ichi Tazawa ในปี ค.ศ. 1998 [10] ซึ่งได้ทำการศึกษาความสามารถในการทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์กับแคลเซียมซัลเฟต โดยการสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethy

methacrylate) จากเมทิล เมทาคริเลต (methyl methacrylate) มอนอเมอร์กับอะโซบิสไอโซบิวทิลไทรออลไนไตรด์ (azobisisobutyronitrile: AIBN) และได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบกับแคลเซียมซัลเฟต ในรูปของแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตทั้งผลึกแบบแอลฟาและบีตา จากงานวิจัยพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตมีค่าความต้านแรงค้ำโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตแบบบีตาจะสามารถทนแรงค้ำโค้งได้มากกว่าชนิดแอลฟา แม้ว่าความต้านแรงค้ำโค้งของแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตแบบแอลฟาจะมีค่าสูงกว่าแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตแบบบีตาก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากความมีรูพรุน (porosity) ของแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตแบบบีตามีค่าสูงกว่าแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตแบบแอลฟา ดังนั้นเมื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบจะสามารถยึดติดกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตและสามารถกระจายแรงได้ดี

ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 M. Arıkan และ K. Sobolev [11] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรต โดยการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบกับสาร 4 ชนิด คือ กรดซิตริก (citric acid) เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการเกิดการแข็งตัวของแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรต (retarder) เมทิลเซลลูโลสที่ถูกดัดแปร (modified methyl cellulose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ (water soluble polymer)เกลือของโอเลฟินซัลโฟเนตโซเดียม (olefine sulfonate sodium salt) ซึ่งเป็นสารช่วยในการจับอากาศในขณะผสม (air entraining admixture) และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ซัลโฟเนต (melamine formaldehyde sulfonate) ซึ่งเป็นซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (superplasticizer) โดยจากการศึกษาพบว่า เมทิลเซลลูโลสที่ถูกดัดแปรสามารถเพิ่มความสามารถในการทนแรงกด (Compressive strength) ให้กับแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตได้ ในขณะที่การเติมสารเติมแต่งอื่นๆนั้นส่งผลให้ความต้านแรงกดลดลง

นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าในปี ค.ศ. 2005 J.C Rubio-Avalos และคณะ [12] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์ลาเท็กซ์ชนิดสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR-latex) กับแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรต และทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติการทนแรงค้ำโค้งของวัสดุเชิงประกอบชนิดนี้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในเฟสของพอลิเมอร์ลาเท็กซ์ชนิดสไตรีนบิวตะไดอินจะเกิดเป็นโครงสร้างแบบตาข่าย (polymer network) หรือ แผ่นฟิล์มบางๆ บริเวณผลึกของแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งการเกิดพฤติกรรมแบบนี้จะเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่น (elasticity) หรือความสามารถในการทนแรงค้ำโค้งให้กับแคลเซียมซัลเฟตได้

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมซัลเฟตที่มีส่วนผสมของสารอื่นๆ เช่นงานวิจัยเกี่ยวกับซีเมนต์ที่มีแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ ดังงานวิจัยของ Etsuo sakai และ Jun

Sugita ใน [13] ได้ทำการศึกษากลไกของวัสดุเชิงประกอบซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยเอทิลิน ไวนิลอะซิเตท โคลอไรด์ (ethylene vinyl acetate: EVA) ทั้งชนิดผงและอิมัลชัน ผลการวิจัยพบว่าในการปรับปรุงด้วย EVA ชนิดผง จะพบการกระจายตัวของอนุภาค EVA อยู่ภายในวัสดุเชิงประกอบ ส่วนการปรับปรุงด้วย EVA อิมัลชันจะเกิดเป็นฟิล์มบางๆบนผิวของวัสดุเชิงประกอบนี้ โดยพบว่าที่ปริมาณของ EVA 10% โดยน้ำหนักจะสามารถเพิ่มความสามารถในการทนแรงดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบได้มากที่สุด และจะเริ่มลดลงเมื่อปริมาณของ EVA เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการทนแรงกดจะมากที่สุดเมื่อมีปริมาณ EVA 5% โดยน้ำหนัก และจะลดลงเมื่อปริมาณของ EVA เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

ต่อมาในปี ค.ศ. 2001 J.M. Gao และคณะ[14] ได้ศึกษาสมบัติของซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิอะคริลิกเอสเทอร์ (polyacrylic ester) อิมัลชัน และมีการเติมเขม่าของซิลิกา (silica fume) จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณพอลิอะคริลิกเอสเทอร์และเขม่าของซิลิกาเพิ่มขึ้น ค่าการทนแรงดัดโค้งและค่าความต้านแรงกดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ชั้นทดสอบที่มีเขม่าของซิลิกาเพียงอย่างเดียวจะให้ค่าทั้ง 2 สูงกว่าชั้นทดสอบที่มีเฉพาะพอลิอะคริลิกเอสเทอร์ เท่านั้น

2.5 เรซินโมลด์

เรซิน โมลด์ [17] เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ทั้งนี้ยังต้องใช้เครื่องจักรที่เฉพาะเจาะจง โดยในการหล่อแบบจากน้ำสลิปต้องมีการให้ความดันลม และในการทำแบบหล่อจะมีการทำรูไว้ภายในเพื่อไล่น้ำออกจากแม่แบบหลังจากหล่อแบบเสร็จ โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตเรซิน โมลด์นั้นเป็นวัสดุสังเคราะห์ โดยภายในเป็นโครงสร้างแบบเปิด (open cell) ซึ่งความหนาแน่น (density) ของสารกลุ่มนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.2 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรช่องว่างภายในมีค่าระหว่าง 70-90 เปอร์เซ็นต์ โดยขนาดของช่องว่างภายในอยู่ระหว่าง 1 – 50 ไมโครเมตร ในการใช้งานเป็นแบบหล่อเครื่องสุขภัณฑ์พบว่า เรซิน โมลด์มีประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าพลาสติกโมลด์ จากการค้นคว้าพบว่าในหลายสิทธิบัตร [18-21] กล่าวถึงความสามารถในการใช้งานของเรซิน โมลด์เทียบกับพลาสติกโมลด์ไว้หลายด้าน อาทิ อายุการใช้งานที่มากกว่าพลาสติกโมลด์ถึง 200 เท่า ทางด้านความแข็งแรงพบว่าเรซิน โมลด์จะมีความแข็งแรงสูง ทำให้สามารถทนต่อแรงอัดอากาศได้สูง ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเรซิน โมลด์ได้มากกว่าพลาสติกโมลด์ถึง 4 เท่า แต่อย่างไรก็ตามการใช้เรซิน โมลด์ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ภายในประเทศยังคงประสบกับปัญหาหลายด้าน ได้แก่ การขึ้นรูป เนื่องจากลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาในขณะที่หล่อขึ้นรูปนั้นมีการปลดปล่อยสารพิษออกมา และขั้นตอนในการขึ้นรูปเองก็ยุ่งยากกว่าพลาสติกหลายเท่าตัว นอกจากนั้นยังต้องการ

ผู้ที่มีความรู้เฉพาะในการขึ้นรูป และการวางโครงสร้างของท่อลมภายใน ในส่วนของการนำไปหล่อแบบ เรซิน โมลด์ต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาสูง ในการทำงาน ซึ่งเป็นข้อที่แตกต่างกับพลาสติกเรซิน โมลด์อย่างมาก เนื่องจากพลาสติกเรซิน โมลด์สามารถหล่อแบบได้โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องจักรแม้แต่ขั้นตอนทางด้านราคาของเรซิน โมลด์นั้น สูงกว่าพลาสติกเรซิน โมลด์ถึง 400 เท่า ซึ่งจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น ทั้งนี้อุตสาหกรรมเครื่องสุขภัณฑ์เองก็มีการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณะอยู่บ่อยครั้งเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ทำให้การใช้เรซิน โมลด์ยังไม่ได้รับความนิยมเป็นที่แพร่หลาย ทำให้ทุกบริษัทที่ผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ยังคงใช้พลาสติกเรซิน โมลด์เป็นวัสดุหลักในการหล่อแบบ

2.6 วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) [16]

วัสดุเชิงประกอบ (composite materials) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาผสมกันในระดับไมโครที่สามารถมองเห็นได้ (macroscopic scale) และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบมาจนถึงระดับของนาโน (nano scale) แล้ว วัสดุเชิงประกอบนั้นถูกทำขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติและคุณภาพของวัสดุให้ตรงกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเป็นการนำเอาข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมารวมกันเพื่อทำให้ได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติดีขึ้น ซึ่งในการผสมวัสดุให้เข้ากันนั้นจะใช้วิธีการผสมกันทางกายภาพ ไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น โดยในวัสดุเชิงประกอบนั้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 องค์ประกอบคือ วัสดุที่เป็นเมทริกซ์ (matrix) ซึ่งจะทำหน้าที่ล้อมรอบและส่งผ่านแรงไปยังวัสดุที่เป็นสารเสริมแรง (reinforcement) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สอง โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงที่มากกระทำกับวัสดุ ช่วยทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

วัสดุเชิงประกอบนั้นสามารถแบ่งได้หลายแบบ อาทิ แบ่งตามชนิดของเมทริกซ์ หรือ แบ่งตามลักษณะของสารเสริมแรง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามประเภทของเมทริกซ์

การแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามประเภทของเมทริกซ์ นั้นสามารถแบ่งตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์ได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

- วัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์
- วัสดุเชิงประกอบที่มีเซรามิกเป็นเมทริกซ์
- วัสดุเชิงประกอบที่มีโลหะเป็นเมทริกซ์

วัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์

วัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ มีลักษณะเป็นโซ่ยาวๆพันกันไปมาหรือเป็นโครงตาข่าย (network) พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous) ในขณะที่บางชนิดจะมีส่วนที่เป็นผลึกร่วมกับส่วนที่เป็นอสัณฐาน หรือเรียกว่าพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymer) เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างภายในทำให้วัสดุพอลิเมอร์ส่วนมากเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี บางชนิดเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก จึงได้มีการนำมาประยุกต์กับงานด้านนี้อย่างมาก โดยทั่วไปแล้ววัสดุพอลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำ และมีจุดอ่อนตัวหรืออุณหภูมิของการสลายตัวค่อนข้างต่ำ

วัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (Polymer Matrix Composites : PMCs) ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติค้ำของพอลิเมอร์ เช่น การเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า การเพิ่มความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ประกอบกับการที่วัสดุพอลิเมอร์จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าวัสดุที่เป็นโลหะและเซรามิก ทำให้การทำวัสดุเชิงประกอบโดยมีเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ได้รับความนิยม เพราะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปไม่สูง และใช้พลังงานไม่สูง ตัวอย่างของ PMCs ได้แก่ ไฟเบอร์กลาสที่มีอีพอกซีเป็นเมทริกซ์และมีเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรง เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบที่มีเซรามิกเป็นเมทริกซ์

วัสดุเซรามิกจัดเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง ถ้าเพียงแต่ไม่มีการแตกหักแบบเปราะเกิดขึ้น วัสดุเซรามิกบางชนิดอาจจะจัดได้ว่าเป็นวัสดุในอุดมคติเลยทีเดียว โดยเป็นวัสดุที่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงและในระดับความเค้นที่รุนแรง แต่ค่าความต้านทานการแตกหักเสียหายของเซรามิกนั้นค่อนข้างต่ำซึ่งตรงข้ามกับโลหะ

วัสดุเชิงประกอบที่เมทริกซ์เป็นเซรามิก (ceramic Matrix Composites: CMCs) นั้นถูกนำมาใช้ เพื่อตอบสนองความต้องการในการหาวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการทำงานประเด็นหลักในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีโครงสร้างทางเซรามิกนั้น คือการปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการแตกหักโดยการนำเอาผงอนุภาคเส้นใยวิสเกอร์ของเซรามิกชนิดหนึ่งเข้าไปฝังไว้ในเมทริกซ์ของวัสดุเซรามิกอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งจะทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เมทริกซ์เป็นเซรามิกจะมีค่าความต้านทานการแตกหักเพิ่มขึ้น

การปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการแตกหักนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างรอยแตกที่จะขยายตัวกับอนุภาคที่กระจายอยู่ จุดเริ่มต้นของการแตกปกติจะเกิดขึ้นในเฟสของเมทริกซ์ ขณะที่รอยแตกขยายตัวไป หรือ โด่ขึ้น รอยแตกจะถูกยับยั้งขัดขวางโดยอนุภาคเส้นใยหรือวิสเกอร์

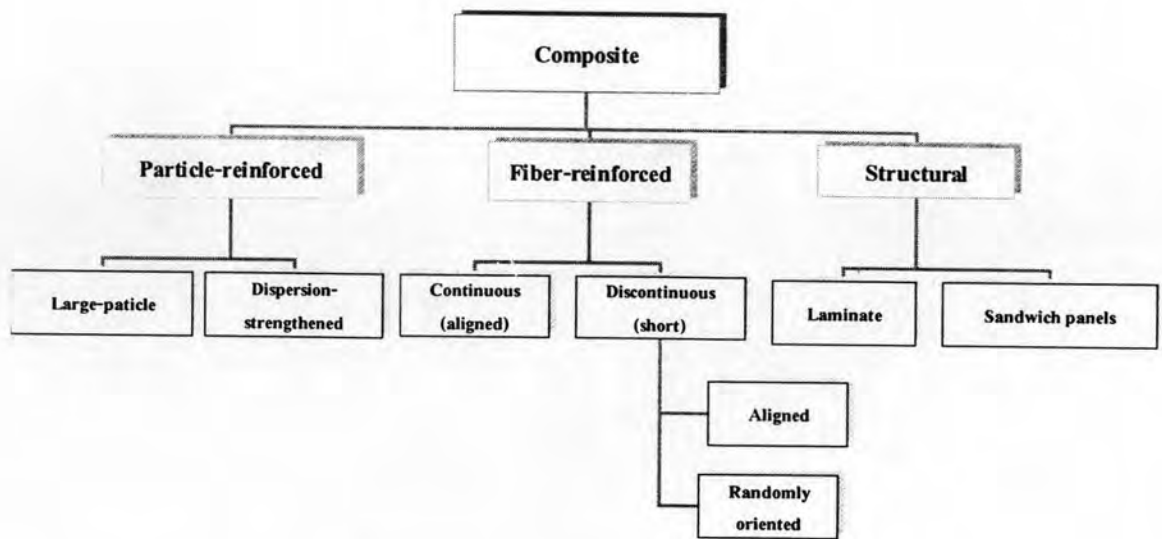
เทคนิคหลายอย่างถูกนำมาใช้ในการทำให้การขยายตัวของรอยแตกช้าลง ตัวอย่างของ CMCs ได้แก่ คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีคอนกรีตเป็นเมทริกซ์และมีเหล็กเส้นเป็นวัสดุเสริมแรง โดยที่คอนกรีตนั้นเป็นวัสดุเซรามิกเป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบที่มีโลหะเป็นเมทริกซ์

วัสดุเชิงประกอบที่มีโลหะเป็นเมทริกซ์ (Metal Matrix Composites: MMCs) หรือวัสดุผสมชนิดที่มีเนื้อโลหะเป็นหลัก ส่วนมากจะพบในการใช้งานในยานพาหนะ ตัวอย่างเช่น Al-MMC เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่ให้สมบัติที่ดีเรื่องความทนทานต่อการเสียดสี และมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับเหล็กหล่อ นอกจากนี้ยังมีการนำซิลิเซียม (silesium) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับเหล็กหล่อ และมีน้ำหนักเบาเหมือนเส้นใยคาร์บอนมาใช้ทำเบรก

2.6.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามประเภทของสารเสริมแรง

การแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามประเภทของสารเสริมแรงนั้นแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มหลัก 3 กลุ่มคือ วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced) วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced) และ วัสดุเชิงประกอบโครงสร้าง (structural composite) โดยในแต่ละกลุ่มยังสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีกอย่างละ 2 กลุ่ม สำหรับวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคนั้นเฟสที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปภายจะมีลักษณะเป็นรูปทรงคล้ายทรงกลม ทั้งนี้ อนุภาคที่เสริมแรงนั้นมีทั้งขนาดใหญ่ (large-particle) และขนาดเล็ก (dispersion strengthened) แต่ในวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเฟสที่กระจายตัวหรือเฟสเสริมแรงจะมีรูปทรงของเส้นใยนั่นเองซึ่งเส้นใยจะมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงและสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยยาวต่อเนื่อง และเส้นใยสั้นไม่ต่อเนื่อง ส่วนวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างจะเป็นการเสริมแรงในลักษณะโครงสร้าง ได้แก่ วัสดุเสริมแรงแบบลามิเนต และแบบแซนวิช อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะขออธิบายเพิ่มเติมเฉพาะในส่วนของวัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาคและแบบเส้นใย ซึ่งมีลักษณะคร่าวๆ ดังนี้



รูปที่ 2.16 การแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composites)

วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุและ/หรือ เพื่อนำไปใช้ทดแทนเนื้อที่ของเมทริกซ์ที่มีราคาสูง ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์เป็นเมทริกซ์ และมีเม็ดทรายและก้อนหิน ก้อนกรวดเป็นสารเสริมแรงชนิดผง (particle) หรือการเติมซีลี้อยเข้าไปในพอลิเมอร์บางชนิด โดยปกติอนุภาคที่ใช้เป็นสารเสริมแรงจะมีรูปทรงแตกต่างกัน แต่อนุภาคที่มีรูปทรงที่เท่ากันในทุกทิศทาง (ทรงกลม) จะเป็นลักษณะที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด นอกจากนี้การกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ยังคงเป็นปัจจัยที่สำคัญ ยิ่งไปกว่านั้นสัดส่วนของปริมาตรของเฟสทั้งสองก็จะส่งผลต่อพฤติกรรม เป็นต้นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเสริมงานชนิดผงมากขึ้น สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบก็สูงขึ้น

วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ถูกนำไปใช้งานในวัสดุทั้ง 3 กลุ่ม (โลหะ, พอลิเมอร์ และเซรามิก) เช่น เซอร์เมท (cermets) ที่เป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างโลหะกับเซรามิก หรืออีลาสโตเมอร์และพลาสติกก็มีการนำมาเสริมแรงโดยการใช้วัสดุผงอนุภาค เช่นการนำผงถ่านสีดำ (carbon black) มาปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงดึง ความแกร่ง และความต้านทานการฉีกขาดและการเสียดสีให้ยาง

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคนาขนาดเล็ก (Dispersion-strengthening composites)

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคนาเล็กนั้นจะพบมากในวัสดุเชิงประกอบของโลหะหรือ โลหะผสมที่เรียกว่า “Alloy” เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและความแข็ง ซึ่งอนุภาคนาเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอจะเพิ่มสมบัติดังกล่าวได้ โดยอนุภาคนาเล็กเหล่านี้จะต้องมีสมบัติแข็งและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ ซึ่งสารเสริมแรงในกลุ่มนี้จะเป็นได้ทั้งโลหะหรือโลหะ

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced composites)

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย ในปัจจุบันอาจจะถือได้ว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความสำคัญมากที่สุด คือวัสดุเชิงประกอบที่มีเฟสกระจายตัวอยู่ในรูปของเส้นใย จุดมุ่งหมายในการออกแบบวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย คือต้องการความแข็งแรง และ/หรือมอดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักโมเลกุลสูง คุณลักษณะดังกล่าวเรียกว่า แข็งแรงจำเพาะ (specific strength) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่น (ความถ่วงจำเพาะ) และมอดูลัสจำเพาะ (specific modulus) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างมอดูลัสต่อความหนาแน่น (ความถ่วงจำเพาะ) โดยวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ต้องการความแข็งแรงจำเพาะและมอดูลัสจำเพาะสูง ควรผลิตขึ้นโดยใช้เส้นใยและวัสดุที่เป็น matrix ที่มีความหนาแน่นต่ำ สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีอิทธิพลมาจากความยาว ปริมาณหรือความเข้มข้น และการเรียงตัวของเส้นใย

1. อิทธิพลของความยาวของเส้นใย (Influence of fiber length)

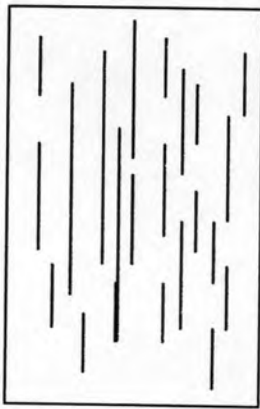
สมบัติเชิงกลของวัสดุที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ได้ขึ้นกับสมบัติของเส้นใยเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับระดับความสามารถในการส่งผ่านแรงกระทำจากเมทริกซ์สู่เส้นใยอีกด้วย สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการส่งผ่านแรงกระทำคือพันธะการยึดเหนี่ยว (interfacial bonding) ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำจะเห็นได้ว่าการยึดเหนี่ยวของเมทริกซ์ กับเส้นใยจะสิ้นสุดลงที่บริเวณปลายของเส้นใย หรือกล่าวได้ว่า ไม่มีการส่งผ่านแรงกระทำจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใยอีกปลายสุดของเส้นใย ความยาวของเส้นใยเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงหรือ มอดูลัสของสมบัติวัสดุเชิงประกอบ โดยเส้นใยที่มีความยาวมากจะเรียกว่าเส้นใยยาวหรือเส้นใยต่อเนื่อง (continuous fiber) และถ้ามีความยาวสั้นๆ จะเรียกว่าเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fiber) หรือเส้นใยสั้น (short fiber) โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นจะปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบได้ไม่ดีเท่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวต่อเนื่อง

2.อิทธิพลของความเข้มข้นและการเรียงตัวของเส้นใย (influence of orientation and concentration)

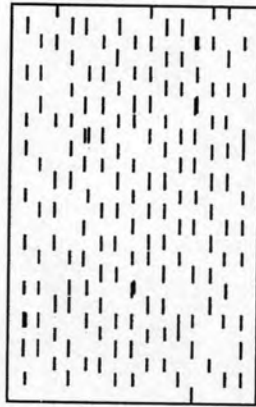
การจัดเรียงตัวของเส้นใย ความเข้มข้นของเส้นใย และการกระจายตัวส่งผลต่อความแข็งแรงและสมบัติอื่นๆ ของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยอย่างมาก แนวการเรียงตัวมีอยู่ 2 แบบที่น่าสนใจคือ

- (1) การเรียงตัวขนานแกนความยาวของเส้นใยในทิศทางเดียวกัน (parallel alignment)
- (2) การเรียงตัวแบบอิสระ (random alignment)

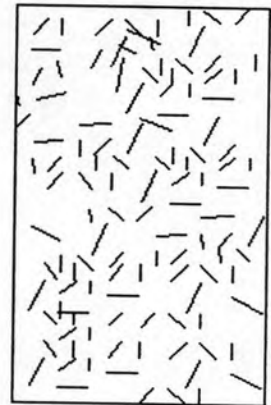
โดยปกติเส้นใยต่อเนื่องจะมีแนวการเรียงตัวแบบรูปที่ 2.17a ในขณะที่เส้นใยสั้นจะเรียงตัวแนวเดียวกัน ดังรูป 2.17b หรืออาจจะเรียงตัวเป็นอิสระในรูปที่ 2.17c หรือเรียงแนวเดียวกันบางส่วน



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.17 ภาพวาดแสดงวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใย

- (a) ต่อเนื่องและวางในแนวเดียวกัน
- (b) ไม่ต่อเนื่องและวางในแนวเดียวกัน
- (c) ไม่ต่อเนื่องและวางแบบอิสระ