

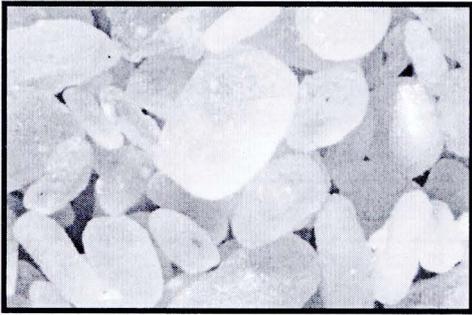
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอฟเจดีอีปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีมาตรการควบคุมปริมาณการปล่อยมลพิษต่าง ๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide, SO_2) ซึ่งเป็นของเสียที่เป็นพิษต่อร่างกายซึ่งเกิดจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าโดยติดตั้งเครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization Plant, FGD) เพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซไอเสียก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ เครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงถึง 92-95 % โดยใช้กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยระบบเปียก (Wet Limestone Process หรือ Wet Purification) โดยใช้หินปูน (Calcium carbonate, CaCO_3) เป็นตัวดูดซับ (Absorbant) และจะได้เอฟเจดีอีปซัม (FGD-Gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เป็นผลพลอยได้ (By-product) ในแต่ละปีต้องใช้ปริมาณหินปูนมากกว่า 1 ล้านตัน และได้เอฟเจดีอีปซัมเป็นผลพลอยได้มากถึง 2.25 ล้านตันโดยประมาณ และจำหน่ายในราคาที่ถูกลงคือ 40 บาทต่อตัน แต่ก็ไม่ได้ได้รับความนิยมในการนำไปแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ มีอุตสาหกรรมจำนวนน้อยมากที่นำเอฟเจดีอีปซัมไปใช้ประโยชน์ อาทิ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ที่ใช้เอฟเจดีอีปซัมประมาณ 10% ของทั้งหมด จึงทำให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะเหลือเอฟเจดีอีปซัมจากการจำหน่ายปีละประมาณ 2 ล้านตัน ซึ่งไม่ได้นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์แต่อย่างใดอีกทั้งยังเป็นของเสียที่ต้องการพื้นที่ในการกำจัด

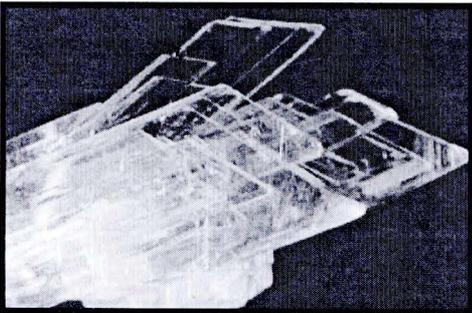
โดยทั่วไปผลึกอีปซัมมีขนาดตั้งแต่ 1-200 ไมโครเมตร และมีรูปร่างผลึกหลายแบบ ตั้งแต่ ผลึกรูปลูกบาศก์ (Cubic Shape) ไปจนถึง ผลึกรูปแท่ง (Rod Shape) สำหรับผลึกเอฟเจดีอีปซัมโดยทั่วไปมีขนาด 5-20 ไมโครเมตร และมีลักษณะเป็นรูปแท่ง



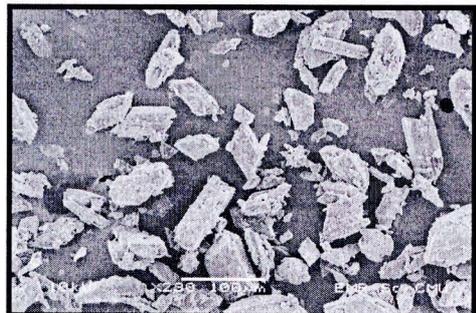
(ก) ผลึกรูปลูกบาศก์



(ข) ผลึกรูปแท่ง



(ค) ผลึกรูปแท่ง



(ง) ผลึกรูปแท่ง

รูป 2.1 โครงสร้างผลึกยิปซัม

- (ก) โครงสร้างผลึกยิปซัม (ผลึกรูปลูกบาศก์) [35]
- (ข) โครงสร้างผลึกยิปซัม (ผลึกรูปแท่ง) [35]
- (ค) โครงสร้างผลึกยิปซัม (ผลึกรูปแท่ง) [34]
- (ง) โครงสร้างผลึกเอพิจิตยิปซัม จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (ผลึกรูปแท่ง)

เอพิจิตยิปซัมมีสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและทางแร่ธาตุเหมือนกับยิปซัมจากธรรมชาติ แสดงดังตาราง 2.1 และในทุก ๆ เดือนโรงไฟฟ้าแม่เมาะตรวจสอบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเอพิจิตยิปซัม พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเอพิจิตยิปซัมมีค่าใกล้เคียงกันในทุก ๆ สายการผลิต แสดงให้เห็นว่าคุณภาพเอพิจิตยิปซัมในแต่ละการผลิตมีความสม่ำเสมอ แสดงดังตาราง 2.2

ตาราง 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติกายภาพ ทางเคมีและทางแร่ของเอฟจีดียิปซัมและยิปซัมธรรมชาติ

สมบัติ	เอฟจีดียิปซัม	ยิปซัมธรรมชาติ
สี	น้ำตาลอ่อน	ขาว
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm ³)	2.23	2.10
ความเป็นกรด-ด่าง	7.3	6.5
องค์ประกอบทางเคมี	มีองค์ประกอบหลักคือ CaO = 42% SO ₃ = 55%	มีองค์ประกอบหลักคือ CaO = 59% SO ₃ = 41%
องค์ประกอบทางแร่	FGD-Gypsum (CaSO ₄ · 2H ₂ O)	FGD-Gypsum (CaSO ₄ · 2H ₂ O)

ตาราง 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดียิปซัมในระยะเวลา 6 เดือน

ปี พ.ศ.	Unit	CaO	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SrO	TiO ₂	LOI
5/6/2549	0	33.76	42.59	0.9	0.79	0.36	0.01	1.64	0.04	0.03	0.12	19.76
	8	36.41	46.67	1.04	0.78	0.36	0.02	1.59	0.04	0.03	0.11	12.95
	12	32.92	46.27	0.68	0.71	0.31	0.01	1.42	0.04	0.03	0.11	17.5
	14	34.54	46.71	0.81	0.74	0.34	0.01	1.49	0.04	0.03	0.1	15.9
7/6/2549	9	35.04	48.36	0.78	0.62	0.29	0.01	1.23	0.02	0.03	0.11	13.5
	11	33.95	46.8	0.71	0.64	0.28	0.01	1.24	0.03	0.03	0.1	16.2
	13	34.53	47.23	0.51	0.49	0.25	0.01	0.96	0.02	0.03	0.12	15.58
	15	35.55	47.51	0.87	0.74	0.36	0.02	1.43	0.04	0.03	0.13	13.32
19/6/2549	8	32.74	44.73	0.874	0.7	0.35	0.01	1.62	0.04	0.03	0.11	18.83
	10	34.07	47.47	0.48	0.63	0.3	0.01	1.39	0.05	0.03	0.1	15.48
	12	34.47	47.79	0.51	0.55	0.27	0.02	1.17	0.06	0.03	0.12	15.01
	14	35.48	47.86	0.76	0.76	0.39	0.03	1.7	0.04	0.04	0.11	12.85

ตาราง 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของออฟดีดีย์ปซัมในระยะเวลา 6 เดือน (ต่อ)

ปี พ.ศ.	Unit	CaO	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SrO	TiO ₂	LOI
21/6/2549	9	33.37	45.04	0.81	0.74	0.36	0.01	1.63	0.02	0.03	0.12	17.86
	11	34.33	45.63	0.46	0.51	0.26	0.01	1.23	0.03	0.03	0.13	17.38
	13	34.7	47.98	0.48	0.58	0.28	0.02	1.22	0.03	0.03	0.12	14.56
	15	35.66	46.46	0.8	0.69	0.37	0.01	1.53	0.04	0.03	0.11	14.3
3/7/2549	8	33.89	45.59	0.8	0.65	0.29	0.01	1.46	0.03	0.03	0.15	17.11
	10	33.54	46.82	0.51	0.69	0.31	0.01	1.57	0.04	0.03	0.11	16.36
	12	35.49	49.49	0.52	0.51	0.22	0.02	1.13	0.03	0.03	0.13	16.43
	14	35.72	48.09	0.93	0.68	0.3	0.02	1.69	0.04	0.03	0.14	12.38
19/7/2549	9	33.45	46.76	0.63	0.73	0.31	0.02	1.74	0.04	0.03	0.13	16.16
	11	35.47	46.21	0.69	0.58	0.29	0.02	1.4	0.04	0.03	0.13	15.13
	13	35.52	45.72	0.61	0.65	0.32	0.02	1.55	0.06	0.03	0.17	15.35
	15	34.88	47.97	0.68	0.77	0.35	0.02	1.76	0.04	0.03	0.14	13.36
17/8/2549	8	34.87	48.59	0.52	0.74	0.31	0.01	1.73	0.04	0.03	0.14	13.02
	12	32.87	44.61	0.46	0.78	0.33	0.01	1.77	0.04	0.03	0.13	18.97
	14	34.07	47.24	0.78	0.88	0.36	0.01	1.94	0.05	0.03	0.12	14.53
19/7/2549	9	34.1	47.12	0.64	0.92	0.41	0.02	2.09	0.05	0.03	0.14	14.49
	11	34.06	46.09	0.58	0.92	0.42	0.02	2.12	0.04	0.03	0.13	15.59
	13	32.72	45.07	0.44	0.8	0.35	0.01	1.77	0.04	0.03	0.11	18.67
	15	34.58	47.62	0.8/1	0.84	0.38	0.03	1.87	0.04	0.03	0.14	13.66
7/8/2549	8	35.34	47.08	0.59	0.66	0.36	0.01	1.62	0.04	0.03	0.12	14.14
	12	37.62	50.1	0.46	0.53	0.29	0.02	1.3	0.02	0.03	0.15	9.38
	14	36.23	49.34	0.67	0.74	0.36	0.02	1.5	0.04	0.03	0.12	10.95
9/8/2549	9	38.16	48.67	0.85	0.75	0.43	0.11	1.92	0.04	0.04	0.12	8.91
	11	41.11	51.11	0.86	0.75	0.44	0.11	2.01	0.05	0.04	0.12	3.4
	13	40.94	51.23	0.85	0.7	0.39	0.11	1.85	0.04	0.04	0.14	3.71
	15	38.37	52.96	1.05	0.84	0.44	0.11	2.04	0.05	0.04	0.14	3.96
21/8/2549	8	38.97	54.52	0.54	0.57	0.31	0.12	1.45	0.03	0.04	0.13	3.32
	12	39.75	55	0.54	0.54	0.29	0.11	1.43	0.02	0.04	0.12	2.16

ตาราง 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดีพีซั่มในระยะเวลา 6 เดือน (ต่อ)

ปี พ.ศ.	Unit	CaO	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SrO	TiO ₂	LOI
23/8/2549	9	38.52	54.48	0.8	0.77	0.38	0.11	1.61	0.06	0.04	0.02	3.21
	11	39.06	53.84	0.48	0.58	0.32	0.11	1.44	0.04	0.04	0.06	4.03
	13	38.48	50.12	0.77	0.75	0.45	0.11	2.14	0.05	0.04	0.06	7.03
	15	39.73	54.17	0.61	0.65	0.37	0.11	1.59	0.06	0.04	0.02	2.65
4/9/2549	8	38.34	53.08	0.64	0.8	0.4	0.11	2.07	0.04	0.04	0.16	4.32
	12	38.91	54.43	0.47	0.61	0.32	0.11	1.7	0.04	0.04	0.17	3.2
	14	38.28	53.01	0.83	0.87	0.44	0.11	2.26	0.05	0.04	0.15	3.96
6/9/2549	9	38.97	53.49	0.49	0.46	0.27	0.11	1.32	0.02	0.04	0.15	4.68
	11	40.74	50.97	0.65	0.66	0.36	0.11	1.87	0.04	0.04	0.16	4.4
	13	42.16	50.3	0.92	0.81	0.42	0.11	2.22	0.04	0.04	0.13	2.85
	15	39.09	53.1	0.67	0.74	0.38	0.12	1.94	0.04	0.04	0.15	3.73
18/9/2549	8	40.24	54.22	0.97	0.74	0.37	0.12	1.96	0.03	0.04	0.15	1.16
	10	40.41	56.49	0.71	0.64	0.32	0.12	1.78	0.03	0.04	0.15	-0.69
	12	38.52	48.75	0.67	0.62	0.31	0.11	1.77	0.02	0.04	0.13	9.06
	14	38.86	53.13	1.14	0.73	0.38	0.11	1.85	0.03	0.04	0.14	3.59
21/9/2549	9	38.18	52.66	0.55	0.6	0.32	0.11	1.65	0.03	0.04	0.17	5.69
	11	39.42	51.7	0.74	0.68	0.34	0.11	1.7	0.03	0.04	0.16	5.08
	15	40.44	53.86	1.02	0.76	0.38	0.12	1.93	0.03	0.04	0.16	1.26
4/12/2549	10	39.7	54.11	0.6	0.66	0.36	0.11	1.71	0.03	0.04	0.09	2.59
	12	40.59	55.59	0.63	0.69	0.35	0.11	1.68	0.03	0.04	0.1	0.19
8/1/2549	8	38.48	52.61	0.74	0.76	0.43	0.11	2.09	0.05	0.04	0.09	4.6
	10	38.63	52.99	0.73	0.46	0.31	0.11	1.39	0.03	0.04	0.09	5.22
	12	37.67	52.01	0.97	0.73	0.41	0.11	2.06	0.03	0.04	0.09	5.88
	14	36.41	49.37	1.11	0.82	0.45	0.11	2.16	0.03	0.04	0.09	9.41
10/1/50	9	37.84	52.8	0.84	0.61	0.33	0.11	1.79	0.05	0.04	0.11	5.48
	13	38.05	51.67	0.86	0.83	0.45	0.11	2.31	0.04	0.04	0.12	5.52
	15	38.18	51.79	1.09	0.83	0.45	0.11	2.28	0.04	0.04	0.11	5.08
22/1/50	8	38.18	53.16	0.6	0.57	0.31	0.11	1.4	0.03	0.04	0.09	5.51
	10	38.05	51.37	0.78	0.65	0.37	0.11	1.68	0.03	0.04	0.09	6.83
	12	37.62	51.62	0.5	0.43	0.25	0.11	0.95	0.02	0.03	0.08	8.39

ตาราง 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดีพีซั่มในระยะเวลา 6 เดือน (ต่อ)

ปี พ.ศ.	Unit	CaO	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SrO	TiO ₂	LOI
22/1/50	8	38.18	53.16	0.6	0.57	0.31	0.11	1.4	0.03	0.04	0.09	5.51
	10	38.05	51.37	0.78	0.65	0.37	0.11	1.68	0.03	0.04	0.09	6.83
	12	37.62	51.62	0.5	0.43	0.25	0.11	0.95	0.02	0.03	0.08	8.39
	14	38.22	51.6	0.84	0.78	0.42	0.11	2.03	0.05	0.04	0.11	5.8
24/1/50	9	38.39	52.68	0.84	0.61	0.32	0.11	1.44	0.03	0.04	0.08	5.46
	13	39.51	54.92	0.58	0.45	0.26	0.11	1.06	0.02	0.04	0.1	2.95
	15	38.6	53.46	0.52	0.5	0.26	0.1	1.19	0.02	0.03	0.1	5.22
5/2/50	8	38.31	53.08	0.81	0.56	0.31	0.11	1.49	0.02	0.04	0.09	5.18
	10	39.53	52.28	0.88	0.62	0.35	0.11	1.64	0.03	0.04	0.11	4.41
	12	39.38	53.35	0.6	0.52	0.29	0.11	1.3	0.04	0.04	0.09	4.28
	14	38.21	53.15	0.7	0.55	0.31	0.11	1.5	0.02	0.04	0.1	5.31
7/2/50	9	37.67	51.89	0.76	0.65	0.36	0.11	1.78	0.03	0.04	0.09	6.62
	11	40.19	52.81	1.21	0.69	0.39	0.11	1.86	0.03	0.04	0.11	2.56
	13	38.93	52.47	0.57	0.69	0.37	0.11	1.83	0.03	0.04	0.1	4.86
	15	36.94	50.71	0.88	0.6	0.34	0.1	1.71	0.03	0.04	0.09	8.56
21/2/50	11	39.99	52.01	0.85	0.58	0.33	0.11	1.46	0.02	0.04	0.09	4.52
	13	39.38	53.54	0.9	0.69	0.35	0.11	1.7	0.04	0.04	0.09	3.16

ผลวิเคราะห์ทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดีพีซั่ม (ตาราง 2.2) แสดงดัง
ตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรผันขององค์ประกอบทาง
เคมีของเอฟจีดีพีซั่มในระยะเวลา 6 เดือน (5 มิถุนายน 2549–21 กุมภาพันธ์ 2550)

ค่าสถิติ	CaO	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SrO	TiO ₂	LOI
ค่าเฉลี่ย	37.19	50.32	0.73	0.68	0.35	0.07	1.66	0.04	0.04	0.12	8.81
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.43	3.25	0.18	0.11	0.05	0.05	0.31	0.01	0.00	0.03	5.64
ส.ป.ส. ความแปรผัน(%)	6.54	6.46	25.01	16.59	15.73	65.68	18.75	28.87	13.84	24.93	63.95

จากตาราง 2.3 จะเห็นว่าส่วนเบี่ยงมาตรฐานขององค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดีอีพีซั่มมีค่าต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าคุณภาพเอฟจีดีอีพีซั่มในแต่ละการผลิตมีความสม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของ CaO และ SO_3 พบว่ามีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบเคมีอื่น ๆ ซึ่งบ่งบอกว่าเอฟจีดีอีพีซั่มในแต่ละการผลิตจะมีสัดส่วนของปริมาณอีพีซั่มที่ค่อนข้างคงที่กว่าองค์ประกอบเคมีอื่น ๆ คือมีปริมาณเฉลี่ยของ CaO และ SO_3 36.51–37.87% และ 49.41–51.23% ตามลำดับ ด้วยระดับความเชื่อมั่น 99% แม้เอฟจีดีอีพีซั่มจะมีสารปนเปื้อนอยู่บ้าง แต่ก็มีในปริมาณน้อย อีกทั้งยังมีสมบัติทางกายภาพ เคมี และแร่ธาตุเหมือนกับอีพีซั่มธรรมชาติ จากคุณสมบัติที่กล่าวมาสามารถสนับสนุนว่าเอฟจีดีอีพีซั่มมีคุณภาพเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในเชิงอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมฝ้าเพดาน อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปูนปลาสเตอร์

2.2.1 ปูนปลาสเตอร์

ปูนปลาสเตอร์เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีมนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ยุคโบราณก่อนคริสต์ศักราช หลักฐานเก่าแก่ที่สุดของปูนปลาสเตอร์คือเมื่อ 9000 ปีมาแล้ว โดยพบที่ดินแดนอนาโตเลีย (ปัจจุบันคือประเทศตุรกี) และซีเรีย และชาวอียิปต์โบราณผลิตปูนปลาสเตอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในการก่อสร้างปิระมิด ในคริสต์ศตวรรษที่ 18 กษัตริย์ฝรั่งเศสได้ออกกฎหมายให้ชาวกรุงปารีสใช้ปูนปลาสเตอร์ฉาบบ้านไม้เพื่อป้องกันไฟไหม้ ทำให้เกิดโรงงานผลิตปูนปลาสเตอร์ขนาดใหญ่ที่ซานกรุงปารีสเพื่อรองรับความต้องการใช้งานดังกล่าว ทำให้กรุงปารีสได้ชื่อว่าเป็นเมืองหลวงของปูนปลาสเตอร์ จนเป็นที่มาของคำว่า Plaster of Paris อันเป็นชื่อเรียกปูนปลาสเตอร์ในภาษาอังกฤษที่ใช้กันในปัจจุบันนี้

ปูนปลาสเตอร์มีสูตรทางเคมีว่า $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (Calcium Sulfate Hemihydrate) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแร่อีพีซั่ม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ผลิตโดยกรรมวิธีการเผาจนกระทั่งน้ำบางส่วนระเหยออกไปจากโครงสร้างกลายเป็นปูนปลาสเตอร์ ในโครงสร้างของแร่อีพีซั่ม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะมีน้ำ 2 หน่วยต่อแคลเซียมซัลเฟต 1 หน่วย ส่วนโครงสร้างของปูนปลาสเตอร์หรือแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต จะมีน้ำเพียง 1 หน่วยต่อแคลเซียมซัลเฟต 2 หน่วย ปฏิริยาดังกล่าวนี้เป็นปฏิริยาผันกลับได้ ดังนั้นเมื่อเราเติมน้ำให้กับปูนปลาสเตอร์ ปูนปลาสเตอร์จะทำปฏิริยากับน้ำเกิดเป็นผลึกรูปเข็มของอีพีซั่มและกลายเป็นก้อนแข็งอีกครั้ง กระบวนการดังกล่าวนี้จะใช้เวลาประมาณ 20-30 นาที ซึ่งนานเพียงพอที่ปูนเหลวจะไหลตัวเต็มแบบพิมพ์ได้อย่างอิสระ ปูนปลาสเตอร์จึงเป็นวัสดุที่

เหมาะสมมาก กับการหล่อแบบให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ตามต้องการ ปูนปลาสเตอร์ที่เริ่มแข็งตัวใหม่ จะค่อนข้างร้อน เนื่องจากปฏิกิริยาการก่อตัวของปูนปลาสเตอร์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

ปูนปลาสเตอร์มีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ระยะเวลาการก่อตัว และความแข็งแรง ประโยชน์ของปูนปลาสเตอร์ที่สำคัญคือ ใช้ในการหล่อแบบเป็นชิ้นงาน เช่น ตึกต่า สิ่งของประดับบ้าน งานประติมากรรมและศิลปกรรม ทำเฟือกสำหรับคนไข้ที่ประสบอุบัติเหตุกระดูกแขนหรือขาหัก ใช้พิมพ์รอยมือหรือเท้าสำหรับศึกษาและงานสืบสวน ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผนังวอลต์บอร์ด และใช้ในงานก่อสร้างเช่น ใช้นาบผนังและปูรองพื้นกระเบื้อง รวมไปถึงการใช้เป็นส่วนผสมในซีเมนต์ เป็นต้น

2.2.2 วัตถุดิบที่นำมาทำปูนปลาสเตอร์

ในวงการอุตสาหกรรม วัตถุดิบหลักที่ใช้ผลิตปูนปลาสเตอร์ คือ แร่หินยิปซัม (Gypsum Rock) สูตรทางเคมีของยิปซัมคือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ยิปซัมที่ได้จากแหล่งที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีปริมาณแร่ยิปซัมสูงถึง 99% แต่ยิปซัมจากแหล่งที่ไม่ค่อยมีความบริสุทธิ์จะมีปริมาณแร่ยิปซัมเพียง 65% เท่านั้น และมักเจือปนด้วย หินปูน (Limestone) หินเขี้ยวหนูมาน (Quartz) หรือหินชนวน หากใช้แร่ยิปซัมที่ไม่ค่อยบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบในการผลิตจะได้ปูนปลาสเตอร์ที่คุณภาพต่ำ นอกจากนี้ วัตถุดิบชนิดอื่น ๆ ที่สามารถนำมาผลิตปูนปลาสเตอร์ ได้แก่

- 2.2.2.1 แร่ยิปซัมและหินแอนไฮไดรต์ (Gypsum and Anhydrite Rock)
- 2.2.2.2 ยิปซัมผลพลอยได้จากแก๊สกำมะถัน (SO_2 -Flue Gas Gypsum By-product)
- 2.2.2.3 ฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum)
- 2.2.2.4 ยิปซัมผลพลอยได้จากแหล่งอื่น ๆ (Other By-product Gypsum)

2.2.2.1 แร่ยิปซัมและหินแอนไฮไดรต์ (Gypsum and Anhydrite Rock)

แร่ยิปซัมเป็นแร่ธรรมชาติ ชื่อเรียกอื่น ๆ ของยิปซัมได้แก่ เกลือจืด หินแก้ว แก้ว แกลบ ยิปซัมเป็นแร่โลหะที่มีความเปราะมากมีความแข็ง 2 ความถ่วงจำเพาะ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 32.56 และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ร้อยละ 46.51 และ องค์ประกอบทางแร่ประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ร้อยละ 79.07 และน้ำร้อยละ 20.93 แร่ยิปซัมคือเกลือของแคลเซียมที่มีผลึกน้ำ 2 โมเลกุล ยิปซัมที่เกิดโดยธรรมชาติจัดอยู่ในกลุ่มของ แร่อีวาพอไรต์ (Evaporite) ซึ่งเป็นกลุ่มแร่ที่ตกผลึกจากน้ำทะเล (Brine) และสะสมตัวในแอ่งระเหย ขนาดใหญ่ (Evaporite Basin) ในบริเวณชายฝั่งทะเลในเขตภูมิอากาศแห้งแล้ง หรือในทะเลสาบ ชายทะเล (Lagoonal Basin) ด้วยสภาวะแวดล้อมดังกล่าวเมื่อน้ำทะเลระเหยออกไปจากแหล่งสะสม

ทำให้น้ำที่เหลือมีความเข้มข้นสูงสุดขึ้นจนถึงจุดที่แร่กลุ่มนี้สามารถตกผลึกออกมาได้ แร่ยิปซัมแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

- เป็นผลึกโปร่งใส มีชื่อเรียกว่า เซเลไนต์ (Selenite)
- เนื้อแร่เป็นเส้นใยและมีความวาวแบบไหม เรียกว่า ซาตินสปาร์ (Satin Spar)
- ผลึกละเอียด เนื้อแน่น และขาว เรียกว่า อะลาบาสเตอร์ (Alabaster)

แร่ยิปซัมมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย มีการส่งออกมูลค่าหลายร้อยล้านบาทต่อปี ประเทศไทยมีแหล่งแร่ยิปซัมที่มีปริมาณค่อนข้างสูงอยู่หลายแหล่งกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ ภาคใต้พบที่อำเภอนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี และอำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช ภาคเหนือพบที่แหล่งบ้านแม่แก้ว จังหวัดลำปาง และอุดรดิตถ์ ภาคกลางพบที่อำเภอหนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ แหล่งที่สำคัญและมีขนาดใหญ่ที่สุด คือ อำเภอบางมูลนาก จังหวัดพิจิตร คาดว่ามียิปซัมประมาณ 30 ล้านตัน มีคุณภาพดี มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 90

2.2.2.2 ยิปซัมผลพลอยได้จากแก๊สกำมะถัน(SO₂-Flue Gas Gypsum)

Flue Gas Gypsum คือ ยิปซัมที่เป็นผลพลอยได้จากการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Desulphurization) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเช่น แอนทราไซต์ บิตูมินัส ถ่านหิน ลิกไนต์ และน้ำมัน กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างหินปูนและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้ได้ยิปซัมสังเคราะห์ เป็นผลพลอยได้ โดยมีลำดับปฏิกิริยาดังนี้

(1) ปล่อยน้ำหินปูนร้อนเข้าจับ Flue Gas ที่เกิดจากการเผาไหม้โดยตรง จากปฏิกิริยานี้จะทำให้ได้แคลเซียมซัลเฟต (CaSO₃·0.5H₂O) ที่ไม่ละลายน้ำออกมามีสมการเคมีแสดงปฏิกิริยา คือ



(2) ที่ pH ต่ำกว่า 5 : แคลเซียมซัลเฟต (CaSO₃·0.5H₂O) ที่แขวนลอยจะถูกเปลี่ยนเป็น แคลเซียมไบซัลเฟต (Ca(HSO₃)₂) ที่ละลายน้ำได้ สมการเคมีแสดงปฏิกิริยา คือ



(3) แคลเซียมไบซัลเฟต ($\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$) จะถูกออกซิไดซ์ในบรรยากาศของออกซิเจนไปเป็น แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือยิปซัมซึ่งเราเรียกว่า Flue Gas Desulfurization – Gypsum สมการเคมีแสดงปฏิกิริยา คือ



(4) กรดซัลฟิวริกที่ได้จะทำปฏิกิริยากับหินปูนต่อกลายเป็นยิปซัม สมการเคมีแสดงปฏิกิริยา คือ



หรือปฏิกิริยารวม คือ



ซึ่ง FGD-Gypsum (Flue Gas Desulfurization – Gypsum) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณของแร่ยิปซัมสูงถึง 90% และมีสีค่อนข้างเหลืองเมื่อเทียบกับแร่ยิปซัมธรรมชาติเนื่องจากมีสิ่งเจือปนจำพวกเหล็ก

2.2.2.3 ฟอสโฟยิปซัม (Phospogypsum)

เป็นยิปซัมที่ได้จากกระบวนการผลิต Wet Phosphoric Acid จากหินฟอสเฟต (Fluorapatite) กับกรดซัลฟิวริก โดยมีสมการของปฏิกิริยาทางเคมีเป็น



ฟอสโฟยิปซัมที่ได้จะเป็นผงละเอียดและมีความชื้นประมาณ 20-30% ปัญหาที่พบในการใช้ฟอสโฟยิปซัมคือ มีปริมาณความชื้นสูงและสิ่งเจือปนที่มาจากหินฟอสเฟต



2.2.2.4 ยิปซัมผลพลอยได้จากแหล่งอื่นๆ (Other By-product Gypsum)

ยิปซัมที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับกรดอินทรีย์ เช่น กรดทาร์ทาริก กรดซิตริกและกรดออกซาลิก หรือกรดอินทรีย์ เช่น กรดบอริก ปฏิกริยาระหว่างเกลือแคลเซียมของกรดเหล่านี้กับกรดกำมะถันที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าว จะทำให้เกิดยิปซัมเป็นผลพลอยได้ในปริมาณไม่มากนัก

2.2.3 ชนิดของปูนปลาสเตอร์

ปูนปลาสเตอร์เป็นวัสดุที่ผลิตจากแร่หินยิปซัม สามารถแบ่งปูนปลาสเตอร์ออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้หลายแบบขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้จำแนก

2.2.3.1 ชนิดของปูนปลาสเตอร์ที่จำแนกตามลักษณะการใช้งาน

(1) ปูนปลาสเตอร์ (Plaster of Paris)

ปูนปลาสเตอร์ ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) ผลิตจากยิปซัมที่ผ่านการเผาแคลไซน์ไอน้ำออกจากโครงสร้างผลึกทำให้เหลือน้ำในผลึกเพียงครึ่งโมเลกุล ปูนปลาสเตอร์ชนิดนี้ผลิตเป็นหลายคุณภาพแตกต่างกัน ได้แก่ แอลฟา และ เบตา ปลาสเตอร์ สำหรับใช้ในงานประเภทต่าง ๆ กัน เช่น ปูนปลาสเตอร์สำหรับงานปติมากรรม (Casting plaster) และปูนปลาสเตอร์สำหรับแบบพิมพ์เครื่องปั้นดินเผา (Pottery plaster) โดยทั่วไปปูนปลาสเตอร์ที่ใช้ทำเครื่องปั้นดินเผา จะมีคุณภาพดีกว่าปูนปลาสเตอร์ สำหรับงานปติมากรรม มีเนื้อละเอียดกว่าและไม่มีเม็ดทรายเจือปน

(2) ปูนปลาสเตอร์เฮมิไฮเดรตก่อตัวช้า

ปูนปลาสเตอร์ชนิดนี้เดิมสารหน่วงการก่อตัว เพื่อยืดระยะเวลาก่อตัวช้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือปูนยิปซัมรองพื้น (Under Coat Plaster) และปูนยิปซัมฉาบหน้า (Final Coat Plaster)

(3) ปูนปลาสเตอร์แอนไฮเดรต (Anhydrous Gypsum Plaster)

ปูนปลาสเตอร์ชนิดนี้ ประกอบด้วย แอนไฮเดรตแคลเซียมซัลเฟต (Anhydrous Calcium Sulfate, CaSO_4) ได้จากการแคลไซน์เพื่อไอน้ำออกจากโครงสร้างผลึกของยิปซัมจนหมด ทำให้ได้ปูนปลาสเตอร์ชนิดแอนไฮเดรต

(4) ปูนยิปซัมคีน (Keen's Plaster)

ปูนยิปซัมชนิดนี้เหมาะสำหรับงานฉาบ เพราะสามารถฉาบให้ผิวเรียบต่อเนื่องกันได้โดยง่าย เนื่องจากปูนยิปซัมค่อย ๆ ก่อตัว

2.2.3.2 ชนิดของปูนปลาสเตอร์ที่จำแนกตามลักษณะกระบวนการให้ความร้อนแก่ยิปซัม

ในกระบวนการเผาหรือให้ความร้อนแก่ยิปซัม จะสามารถผลิตปูนปลาสเตอร์ได้ 2 ชนิด

(1) ปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟา (α -Plaster)

เป็นปูนปลาสเตอร์ผลิตโดยใช้กระบวนการที่ให้ความร้อนแก่ยิปซัมในบรรยากาศที่มีความชื้นอย่างเพียงพอ หรือโดยการเผาในสภาวะแบบไอน้ำ (Steam Treatment)

(2) ปูนปลาสเตอร์ชนิดเบตา (β -Plaster)

เป็นปูนปลาสเตอร์ผลิตโดยวิธีการคั่วให้ไอน้ำระเหยออกจากผลึกปูน กระบวนการนี้จะให้ความร้อนแก่ยิปซัมอย่างรวดเร็ว และมีการกวนอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไปได้ดี

ปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟาและเบตามีความแตกต่างในด้านลักษณะและสมบัติสรุปได้ดังตาราง 2.4

ตาราง 2.4 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกันของปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟาและเบตา

ลักษณะและสมบัติ	ปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟา	ปูนปลาสเตอร์ชนิดเบตา
ขนาดผลึก	มีขนาดเล็ก (10-20 μm)	มีขนาดเล็กมาก (1-5 μm)
รูพรุนภายในอนุภาค	ไม่มีรูพรุน	มีรูพรุน
พื้นที่ผิวจำเพาะ	มีปริมาณน้อย	มีปริมาณมาก
ตำหนิที่พบในผลึก	พบน้อย	พบมาก
ความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยา	ต้องการน้ำน้อย	ต้องการน้ำมาก
อัตราเร็วในการให้ความแข็งแรง	เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ	เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
ความแข็งแรง	แข็งแรงสูง	แข็งแรงต่ำ

ด้วยสมบัติที่แตกต่างกันของปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟาและเบตา ทำให้มีรูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกัน ปูนปลาสเตอร์ชนิดซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าและมีคุณสมบัติแข็งตัวช้า แข็งตัวแล้วมีผิวเรียบมัน เหมาะสำหรับใช้งานทำพิมพ์กรอบ พิมพ์ต้นแบบหรือพิมพ์อัดที่ใช้แรงดันสูงในระบบไฮดรอลิก สำหรับปูนปลาสเตอร์ชนิดเบตา เหมาะสำหรับใช้ทำพิมพ์โดยทั่วไปและงานประติมากรรมเนื่องจากมีราคาถูก

2.2.4 การผลิตปูนปลาสเตอร์

หลักการทำปูนปลาสเตอร์จากวัตถุดิบยิปซัม

ปูนปลาสเตอร์เป็นวัสดุที่ผลิตจากแร่ยิปซัม ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนปลาสเตอร์มีกรรมวิธีในการผลิตปูนปลาสเตอร์ 2 วิธี ทำให้คุณภาพของปูนปลาสเตอร์ที่ได้แตกต่างกันไปด้วย

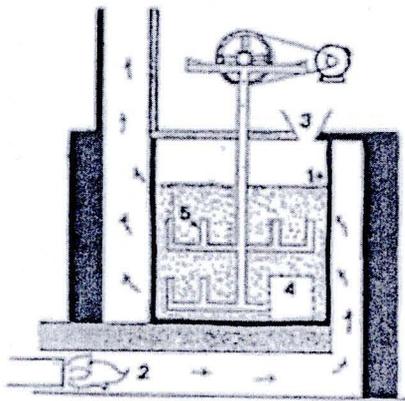
2.2.4.1 การผลิตปูนโดยวิธีการคั่วให้อิออระเหยออกจากผลึกปูน

การผลิตปูนปลาสเตอร์วิธีนี้ทำให้ได้ปูนปลาสเตอร์ชนิดเบตา (β -Plaster) โดยจะต้องใช้ยิปซัมที่ผ่านการบดย่อยจนเป็นผงละเอียด แล้วนำมาคั่วในกระทะเหล็ก (Steel Pans) โดยให้ความร้อนแก่ยิปซัมประมาณ 160 องศาเซลเซียส และจะต้องมีการกวนอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไปได้ดี ถ้าผลิตปูนปลาสเตอร์ในปริมาณน้อยสามารถใช้พายกวนด้วยมือ ให้ไอน้ำระเหยออกไปทางด้านบน แต่ถ้าผลิตในปริมาณมากควรใช้เครื่องจักรกวนด้วยความเร็วรอบประมาณ 15 รอบต่อนาที โดยทำเป็นถังโลหะสำหรับกวนผงปูนขณะให้ความร้อน น้ำในผลึกยิปซัมจะระเหยครั้งแรกที่อุณหภูมิ 128 องศาเซลเซียส เป็นการเดือดครั้งแรก (First Boil) และน้ำในผลึกจะระเหยอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียส เป็นการเดือดครั้งที่สอง (Second Boil) และถ้ากระบวนการดังกล่าวดำเนินต่อเนื่องไปอีกจนกระทั่งไม่มีน้ำเหลืออยู่ในผลึกอีกเลย (หรือ Dead-Burnt) จะได้แคลเซียมซัลเฟตที่ไม่มีน้ำอยู่เลย (Anhydrous Calcium Sulphate) ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียไอน้ำกับอุณหภูมิ ดังรูป 2.3

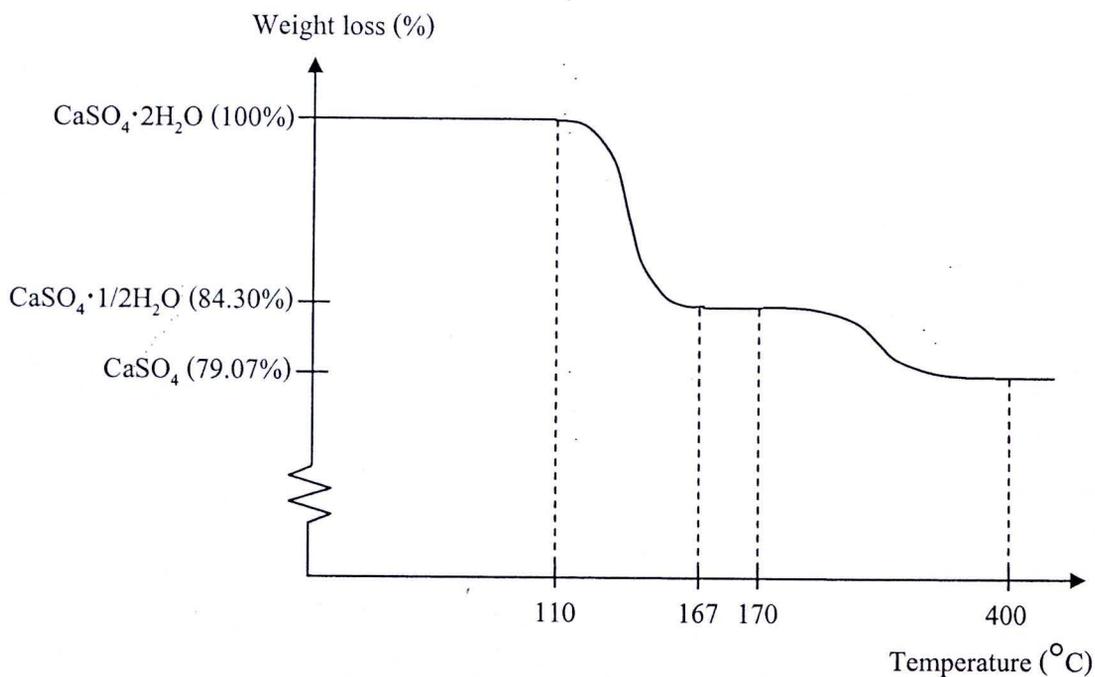
2.2.4.2 การผลิตปูนโดยวิธีอบด้วยแรงดันไอน้ำ

การผลิตวิธีนี้จะได้ปูนปลาสเตอร์ชนิดอัลฟา (α -Plaster) โดยนำแร่ยิปซัมที่บดเป็นผงมาเผาในหม้ออบความดันที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส การใช้วิธีนี้ทำให้ได้ปูนปลาสเตอร์ที่มีความแข็งเป็นพิเศษ ใช้น้ำเป็นปริมาณน้อยในการผสมปูน มีคุณสมบัติแข็งตัวช้า แข็งตัวแล้วมีผิวเรียบมัน มีน้ำหนักมากกว่าปลาสเตอร์ธรรมดา และยังสามารถทนความร้อนได้ดี ปูนปลาสเตอร์ชนิดอัลฟาได้ที่ผลิตโดยผสมกับสีฝุ่นให้เกิดสีต่าง ๆ แบ่งเป็นหลายเกรดตามความแข็งแรง ทั้งนี้

ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ ปูนปลาสเตอร์ชนิดอัลฟา มีราคาแพงมาก เหมาะสำหรับใช้ใช้งานทำพิมพ์ครอบ พิมพ์ต้นแบบหรือพิมพ์อัดที่ใช้แรงดันสูงในระบบไฮดรอลิก



รูป 2.2 ภาคตัดขวางของ (1) ถังโลหะ (2) ช่องไฟให้ความร้อน (3) ช่องใส่ปูนปลาสเตอร์เข้าและช่องระบายความร้อน (4) ช่องเทปูนออก (5) แกนหมุนเกลี้ยงผงปูนขณะเผา



รูป 2.3 กราฟของร้อยละของโมเลกุลของน้ำที่หลุดจาก $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ทำให้เกิด $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ และ CaSO_4 [6, 12]

ตาราง 2.5 เฟสที่พบในกระบวนการผลิตปูนปลาสเตอร์

เฟสที่พบในการผลิตปูนปลาสเตอร์	สิ่งที่พบ	สัญลักษณ์	รูปร่างผลึก	ความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิก
แอนไฮไดรต์ (CaSO ₄)	<ul style="list-style-type: none"> แอนไฮไดรต์ที่มีอุณหภูมิสูง แอนไฮไดรต์ที่ไม่ละลายน้ำ แอลฟาแอนไฮไดรต์ที่ละลายน้ำ เบตาแอนไฮไดรต์ที่ละลายน้ำ 	A-I A-II A-III α A-III β	ลูกบาศก์ รอมบิก เฮกซะโกนอล	> 1180 °ซ. < 1180 °ซ. เสถียรในช่วงอุณหภูมิกลางๆ
เฮมิไฮเดรต (CaSO ₄ ·0.5H ₂ O)	<ul style="list-style-type: none"> แอลฟา-เฮมิไฮเดรต เบตา-เฮมิไฮเดรต 	α -HH β -HH	ออร์โธโรมบิก	เสถียรในช่วงอุณหภูมิกลางๆ
ไดไฮเดรต (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	<ul style="list-style-type: none"> ไดไฮเดรต (ยิปซัม) 	DH	โมโนคลินิก	< ~ 45 °ซ.

2.2.5 สมบัติของปูนปลาสเตอร์

สมบัติกายภาพที่สำคัญของของปูนปลาสเตอร์ได้แก่

2.2.5.1 ความแข็งแรง (Mechanical Strength)

ความแข็งแรงของปูนปลาสเตอร์จะเกิดหลังจากที่นำปูนปลาสเตอร์ผสมกับน้ำแล้วเกิดการก่อตัวจนได้ยิปซัมที่มีความแข็งแรง โดยความแข็งแรงจะแปรผันแบบผกผันกับอัตราส่วนของปริมาณน้ำกับปูนปลาสเตอร์ คือ ถ้ามีอัตราส่วนน้ำต่อปูนปลาสเตอร์มากจะทำให้ค่าความแข็งแรงน้อย ปกติในการใช้งานทั่วไปอัตราส่วนน้ำต่อปูนปลาสเตอร์ หรือ Consistency อยู่ในช่วง 60-80 (น้ำ 60-80 มิลลิลิตรต่อปูนปลาสเตอร์ 100 กรัม) และค่าความแข็งแรงยังแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่น หากความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ความแข็งแรงยังแปรผันแบบผกผันกับกับปริมาตรของรูพรุนและค่าการดูดซึมน้ำ โดยถ้ามีรูพรุนมากจะดูดซึมน้ำได้มากและทำให้ความแข็งแรงน้อย

2.2.5.2 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

การดูดซึมน้ำของปูนปลาสเตอร์แปรผันตรงกับปริมาตรรูพรุนของชิ้นงาน ซึ่งปริมาตรรูพรุนนี้แปรผันตรงกับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนปลาสเตอร์หรือค่าคอนซิสเทนซี คือถ้ามีอัตราส่วนน้ำต่อปูนปลาสเตอร์สูง จะมีปริมาตรของรูพรุนมากตามไปด้วย นอกจากนี้ปริมาตรรูพรุนยังขึ้นกับฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างการผสม โดยปกติแล้วจะทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานจากปูนปลาสเตอร์โดยแช่ชิ้นงานในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2.5.3 การก่อตัวของปลาสเตอร์ (Setting of Plaster)

เมื่อปูนปลาสเตอร์ผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม ประมาณ 20 นาที ปลาสเตอร์จะเริ่มเกิดการก่อตัวและการก่อตัวจะสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที การก่อตัวเกิดจากการสานถ่ายกันไปมาของผลึกรูปเข็ม ทดสอบค่าการก่อตัวโดยใช้เครื่องวัดการก่อตัว (Vicat)

การก่อตัวของปูนปลาสเตอร์มีความสัมพันธ์กับกระบวนการดูดซับระหว่างโมเลกุลของน้ำกับผิวผลึกของปลาสเตอร์ และการแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผิวของปลาสเตอร์ เมื่ออนุภาคของปลาสเตอร์กระจายในน้ำจะแสดงประจุและสมบัติการดูดซับไอออนเป็นประจุสองชั้น (Electrical Double Layer) ที่บริเวณผิวของอนุภาค โดยประจุสองชั้นจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการก่อตัวของปลาสเตอร์

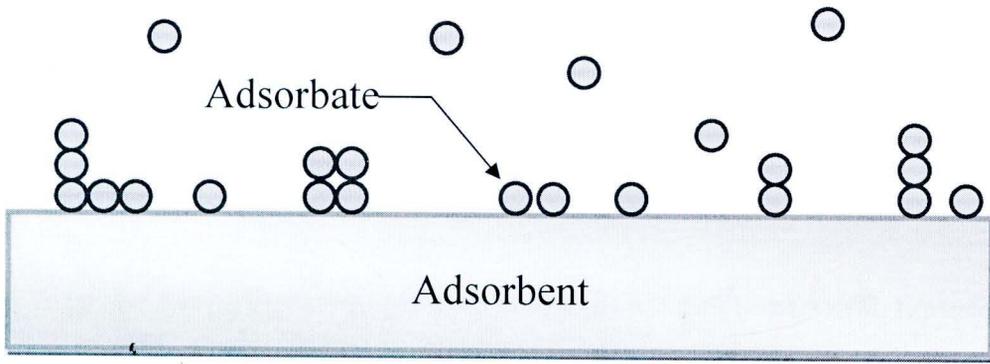
ปัจจัยที่ทำให้อนุภาคแสดงสมบัติทางไฟฟ้าคือ

- (1) ความสามารถในการดูดซับไอออนที่อยู่ในน้ำ
- (2) ความสามารถในการแตกตัวของ Ca^{2+} และ SO_4^{2-} ไอออน โดยปริมาณของไอออนขึ้นอยู่กับค่า pKa ของปลาสเตอร์และค่า pH ของน้ำ และความแตกต่างของค่า Dielectric constant ระหว่างอนุภาคของปลาสเตอร์กับน้ำ

การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซหรือของเหลวเกิดการยึดเกาะหรือรวมตัวกันบริเวณผิวหน้าของของแข็ง [13] โดยโมเลกุลที่เข้ายึดเกาะที่บริเวณผิวหน้าของของแข็งเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และของแข็งที่ตัวถูกดูดซับเข้าไปยึดเกาะบริเวณผิวหน้าเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ดังแสดงในรูป 2.4 กระบวนการดูดซับเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และการจับกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับเอง กระบวนการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่ โครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมี

ของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ



รูป 2.4 การยึดเกาะของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ [13]

ประเภทของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลไม่สูง โดยส่วนใหญ่มักเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals' Forces) และการดูดซับทางกายภาพนี้เป็นการเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic Reaction) เมื่อมีการดูดซับจะมีความร้อนเกิดขึ้น (Heat of Adsorption, ΔH_{Ads}) ในช่วง -10 ถึง -40 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นบริเวณใดก็ได้ เช่นบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับ หรือระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการดูดซับทางกายภาพจะเกิดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับมากกว่า โดยการดูดซับชนิดนี้สามารถเกิดได้หลายชั้น (Multilayer Adsorption) ดังแสดงในรูป 2.5 ข

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงมาก แรงยึดเหนี่ยวของการดูดซับลักษณะนี้ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) หรือพันธะไอออนิก (Ionic Bond) และปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการดูดซับทางเคมีจะสูงกว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการดูดซับทางกายภาพมาก คืออยู่ในช่วง -40 ถึง -1000 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับทางเคมีนี้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเท่านั้น และเกิดได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer

Adsorption) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก การดูดซับในลักษณะนี้สามารถ Desorption ได้ โดยการรบกวนสถานะที่สมดุลนั้น เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ หรือ การลดความดัน



รูป 2.5 การดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ (ก) การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) (ข) การดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption) [2, 13]

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลต่ำกว่าการดูดซับทางเคมี เป็นผลให้การดูดซับทางกายภาพสามารถทำการ Desorption ได้ง่ายกว่าการดูดซับทางเคมีมาก และการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่บริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับ เมื่อบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับเต็มพื้นที่แล้ว จะไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีอีกได้ เป็นผลให้การดูดซับทางเคมีเป็นเกิดเพียงชั้นเดียว ขณะที่การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับเอง จึงเป็นการดูดซับที่สามารถเกิดได้หลายชั้น

การดูดซับไอออนแบบประจุสองชั้น (Electrical Double Layer)

เมื่อผิวอนุภาคของพลาสติกสัมผัสกับน้ำ โดยสมมุติให้มีประจุบวกถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคตามแนว aa' ชั้นที่ถัดออกมาจะมี Counter Ion ซึ่งในกรณีนี้คือไอออนลบไปจับกับไอออนบวกที่ผิวอนุภาคอย่างหนาแน่น เรียกว่า Fixed Layer หรือ Shear Plane ซึ่งจะสิ้นสุดที่แนว bb' โดยชั้นนี้จะยึดติดและเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาค ชั้นถัดมาอยู่ระหว่างแนว bb' กับ cc' ชั้นนี้ ไอออนลบจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่ห่างจากแนว aa' มากขึ้น ชั้นนี้เรียกว่า Mobile Layer หรือ Diffuse Layer ทั้งสองชั้นนี้ เรียกรวมกันว่า Electrical Double Layer เมื่อพื้นแนว cc' ออกไป ไอออนบวกและลบจะสมดุลกัน ชั้นนี้เรียกว่า Electro-Neutral Region แสดงดังรูป 2.6 ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวอนุภาคจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างจากผิวของอนุภาค แสดงในรูป 2.7 ทำให้ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ผิวอนุภาคมี 2 ชนิดคือ

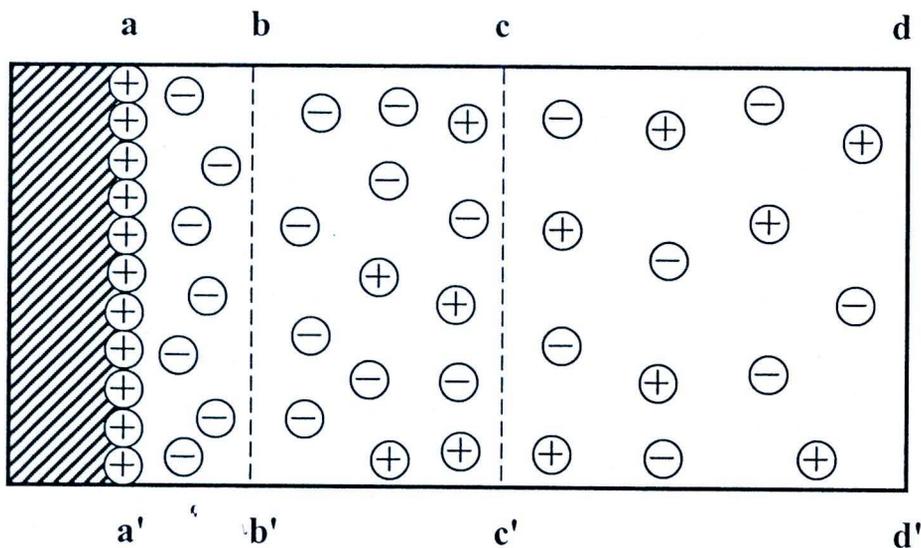
(1) Electrothermodynamic Potential (E) เป็นความต่างศักย์ระหว่างผิวที่แท้จริงของอนุภาคกับ Electroneutral Region ของน้ำ

(2) Electrokinetic Potential (Zeta Potential) เป็นความต่างศักย์ระหว่าง Fixed Layer กับ Electroneutral Region ของน้ำ โดยพบว่าความต่างศักย์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อระยะห่างจากผิวอนุภาคเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Counter Ion ที่เกาะอยู่ที่ผิวอนุภาคจะทำหน้าที่เป็นฉากกั้นลดแรงดึงดูดระหว่างไอออนที่ผิวอนุภาคกับ Counter Ion ที่อยู่ห่างออกไปโดยค่าซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential) จะบอกถึงความคงตัวของอนุภาคที่แขวนลอย เนื่องจากค่านี้อาจบ่งบอกถึงแรงผลักระหว่างอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน ถ้าค่าซีตาโพเทนเชียลลดลงจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้แรงดึงดูดมีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคจะสามารถยึดเกาะกันอย่างหลวม ๆ ส่งผลให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันและตกจม ทำให้ปลาสเตอร์แข็งตัวได้

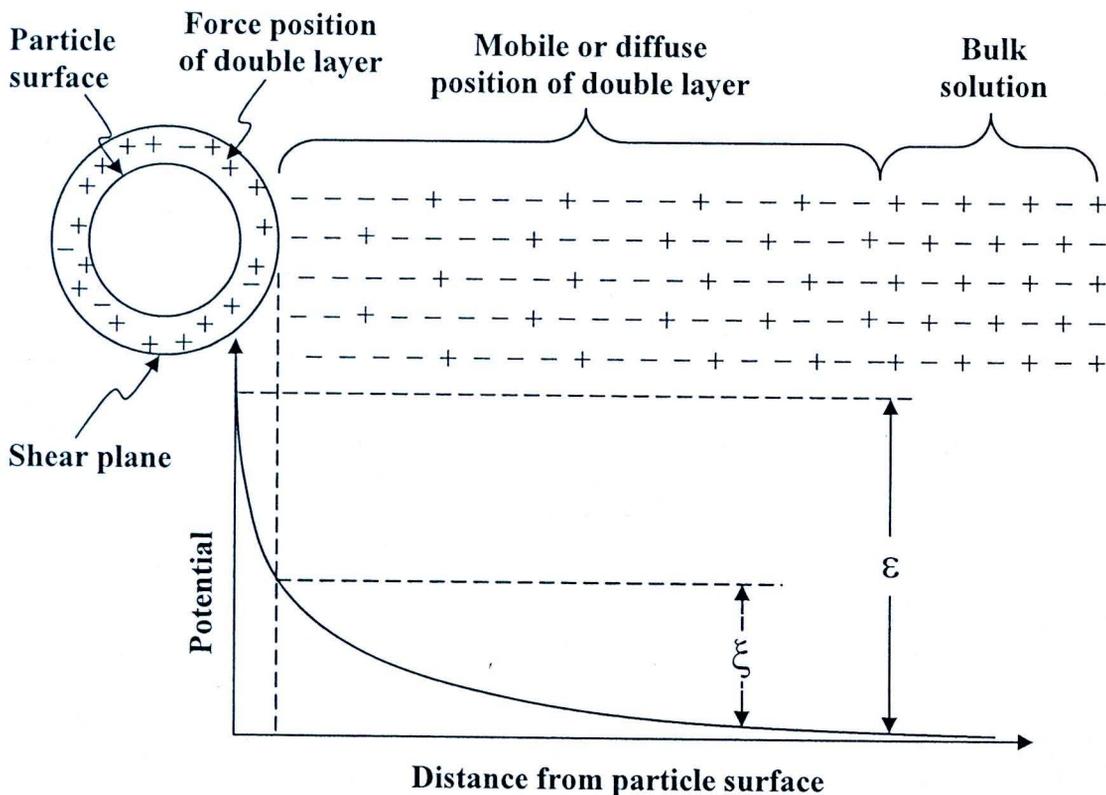
2.2.5.4 การขยายตัวของปลาสเตอร์ที่ก่อตัวแล้ว (Expansion of Plaster on Setting)

หลังจากเกิดการก่อตัวในช่วงแรกปูนปลาสเตอร์จะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อผ่านไปประมาณ 20 นาที การขยายตัวจะเริ่มช้าและลดลง การขยายตัวจะเริ่มตั้งแต่ปูนปลาสเตอร์เกิดการก่อตัวและขณะขยายตัวของปูนปลาสเตอร์จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการคายความร้อน การขยายตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในบางกรณี แต่การขยายตัวอย่างสมบูรณ์จะต้องใช้เวลาถึง 24 ชั่วโมง และมีค่าการขยายตัวประมาณ 0.2-0.4% ซึ่งค่าการขยายตัวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

- (1) ธรรมชาติของปูนปลาสเตอร์
- (2) อัตราส่วนของปูนปลาสเตอร์
- (3) เวลาในการผสม



รูป 2.6 การดูดซับไอออนแบบประจุสองชั้น (Electrical Double Layer) ที่ผิวของอนุภาคพลาสติกอร์



รูป 2.7 การดูดซับไอออนแบบประจุสองชั้น (Electrical Double Layer) และซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential) ที่ผิวของอนุภาคพลาสติกอร์ [13]

2.2.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนปลาสเตอร์

2.2.6.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนปลาสเตอร์

“ปฏิกิริยาไฮเดรชัน” เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำ จะเกิดขึ้นเมื่อนำปูนปลาสเตอร์มาผสมกับน้ำ ปฏิกิริยาดังกล่าวจะคายความร้อนออกมา ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ประกอบด้วยด้วยกัน 2 ขั้นตอน คือ

(1) การละลาย (Dissolution)

เมื่อนำปูนปลาสเตอร์ผสมกับน้ำแล้ว $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ จะเกิดการละลาย โดยเริ่มจากการที่ผลึกของปูนปลาสเตอร์ค่อย ๆ เคลื่อนที่เข้ามาหากัน แล้วรวมตัวกันจากสองผลึกเป็นผลึกเดี่ยว หลังจากนั้นจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของ Ca^{2+} และ SO_4^{2-} และเกิดสารละลายที่มีค่าพีเอชเป็นกลางดังสมการ (1)



(2) การตกตะกอน (Precipitation)

หลังจากการละลายเกิดขึ้นสมบูรณ์แล้ว ระบบจะเกิดการตกตะกอนอย่างช้า ๆ ดังรูป 2.7 กลายเป็นยิปซัม ที่มีน้ำ 2 โมเลกุลในโครงสร้างผลึก โดยผลึกของยิปซัมมีลักษณะเป็นรูปเข็มและสานก่ายกันไปมา เมื่อผลึกเติบโตขึ้นจะทำให้เกิดการผนึกตัวของโครงสร้างผลึก (Interlocking) ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ (2)

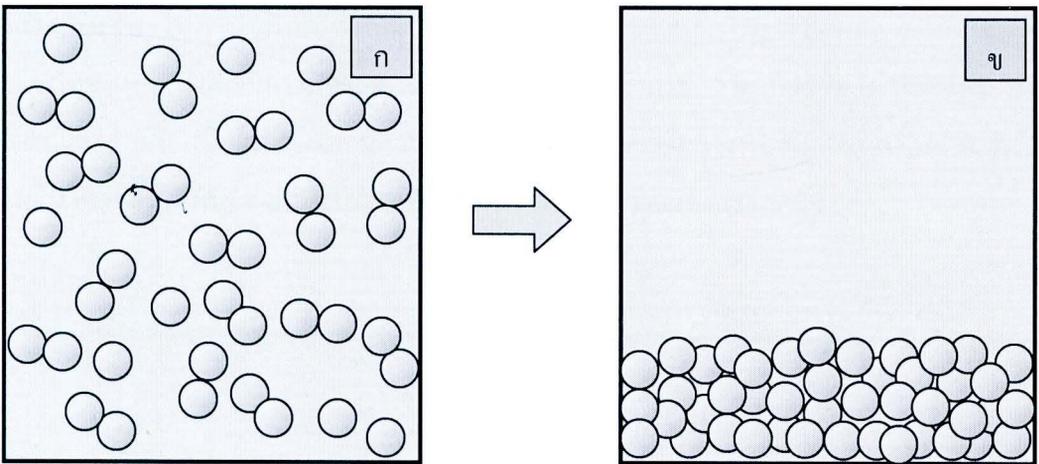


2.2.6.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงเวลา จำแนกโดยใช้ปริมาณการละลายของไอออนเป็นตัวชี้วัด ได้แก่ ช่วงเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะพบว่าการละลายของไอออนเริ่มเกิดขึ้นในช่วงเวลานี้ ช่วงเวลาที่สองเป็นช่วงที่ไอออนเกิดการละลายอย่างรวดเร็ว และช่วงเวลาที่สุดท้าย เป็นช่วงที่การละลายของไอออนจะลดลงจนถึงสิ้นสุด แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ ดังสมการ (3) และรูป 2.9

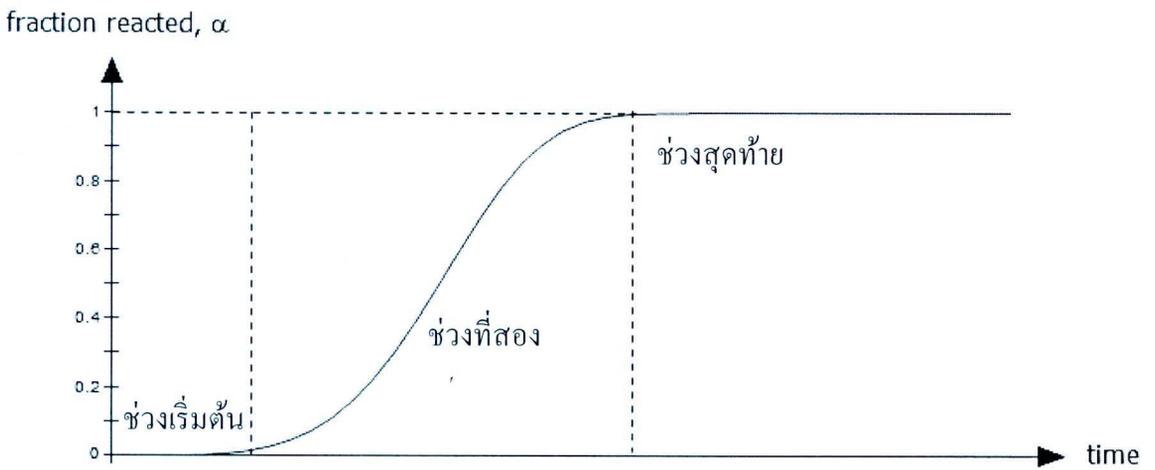
$$\alpha = 1 - \exp(-at^m) \dots\dots\dots (3)$$

กำหนดให้ α คือ ค่าการเกิดปฏิกิริยา และ t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดย m จะขึ้นอยู่กับเวลาในการเกิดและอัตราการเกิดผลึก a คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา



รูป 2.8 ปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนปลาสเตอร์ [2]

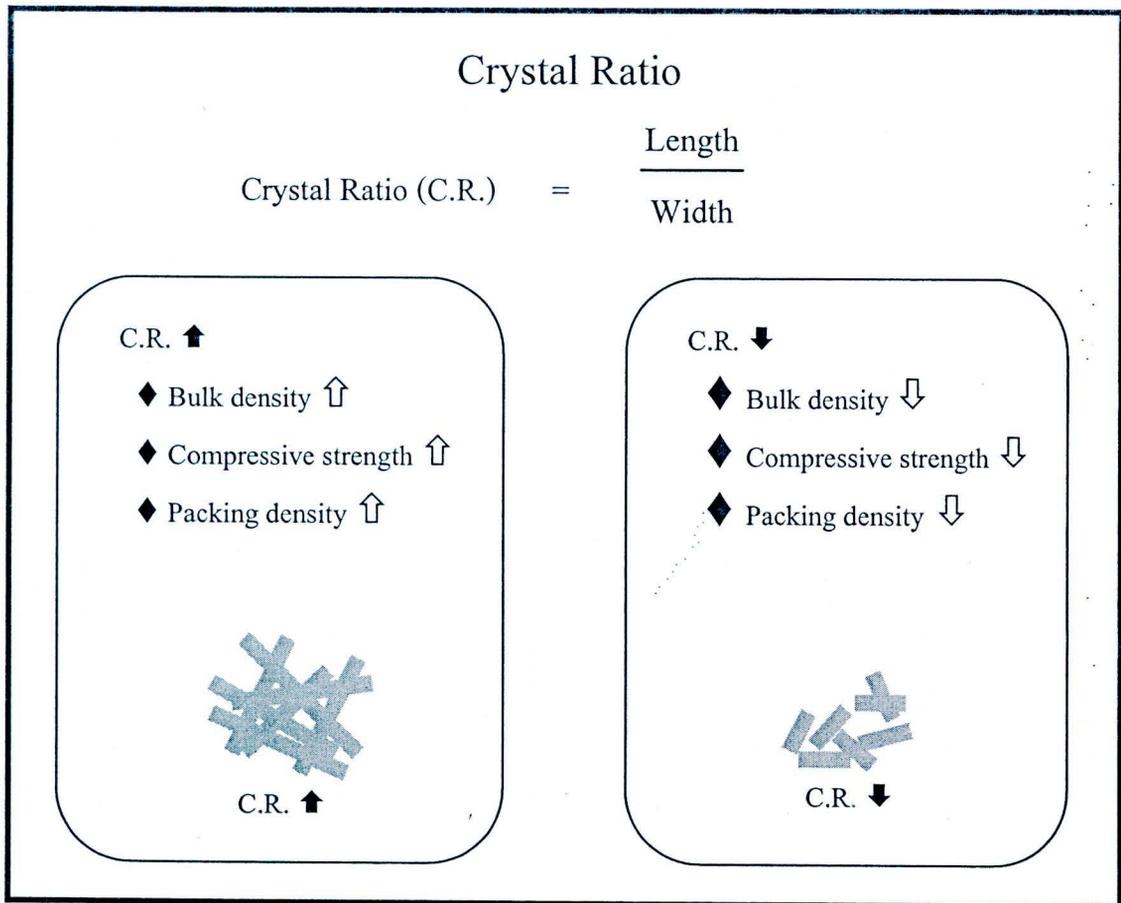
(ก) การละลายของปลาสเตอร์ (Dissolution) (ข) การตกตะกอนของยิปซัม (Precipitation)



รูป 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนปลาสเตอร์ [26]

2.2.6.3 อัตราการเจริญเติบโตของผลึกในแนวแกน c

เมื่อผลึกเกิดการเจริญเติบโต ความกว้างและความยาวของผลึกจะเพิ่มขึ้น คำนวณดัชนีชี้วัดการเจริญเติบโตของผลึกในแนวแกน c คือ อัตราการเติบโตของผลึกในแนวแกน c (Crystal Ratio) คำนวณได้จากนำความยาวของผลึกหารด้วยความกว้างของผลึก ถ้าอัตราการเจริญเติบโตของผลึกเพิ่มขึ้นจะทำให้ความยาวของผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลึกสามารถสานเกี่ยวกันได้ดี ซึ่งทำให้ผลึกจัดเรียงตัวกันได้ดี มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่แน่น ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหากอัตราการเจริญเติบโตของผลึกในแนวแกน c ลดลง จะทำให้การเติบโตของผลึกในด้านยาวมีค่าลดลง ส่งผลให้ผลึกไม่สามารถสานเกี่ยวกันได้ดี ส่งผลกระทบให้ผลึกจัดเรียงตัวกันได้ไม่แน่น และมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคอย่างหลวม ๆ เกิดเป็นช่องว่างหรือรูพรุนในโครงสร้างวัสดุ ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมและความแข็งแรงลดลง



รูป 2.10 ผลของอัตราการเจริญเติบโตของผลึกต่อสมบัติบางประการของปูนปลาสเตอร์ [2]

2.2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนปลาสเตอร์ [6]

(1) อัตราส่วนของปูนปลาสเตอร์ต่อน้ำที่ใช้ในการผสม (P/W)

ควรเลือกค่าคอนซิสเทนซีที่เหมาะสมกับการใช้งาน เป็นค่าคอนซิสเทนซีที่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าประมาณ 20 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ไม่เร็วและไม่ช้าเกินไป และเป็นค่าคอนซิสเทนซีที่ทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงสูง ซึ่งค่าคอนซิสเทนซีหรืออัตราส่วนของปูนปลาสเตอร์ต่อน้ำมีผลต่อปูนปลาสเตอร์ดังนี้

1.1 การผสมและการก่อตัว (Blending and Setting Time)

- ถ้าใช้ปริมาณน้ำมาก (P/W ต่ำ) ปูนปลาสเตอร์จะเหลวและแห้งช้า ต้องใช้เวลาในการก่อตัวนาน
- ถ้าใช้ปริมาณน้ำน้อย (P/W สูง) ปูนปลาสเตอร์จะข้นและแห้งเร็ว ใช้เวลาในการก่อตัวน้อย

1.2 ความแข็งแรง (Strength)

- ถ้าใช้ปริมาณน้ำมาก (P/W ต่ำ) จะส่งผลให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำ
- ถ้าใช้ปริมาณน้ำน้อย (P/W สูง) จะส่งผลให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง

1.3 อัตราการดูดซึมน้ำ (Absorption Rate) และความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Absorption Capacity)

- ถ้าใช้ปริมาณน้ำมาก (P/W ต่ำ) จะส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำสูงและเร็ว ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุสูง
- ถ้าใช้ปริมาณน้ำน้อย (P/W สูง) จะส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำต่ำและช้า ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุต่ำ

1.4 การขยายตัวของปูนปลาสเตอร์ (Expansion)

- ถ้าใช้ปริมาณน้ำมาก (P/W ต่ำ) จะส่งผลให้ค่าการขยายตัวของวัสดุต่ำ
- ถ้าใช้ปริมาณน้ำน้อย (P/W สูง) จะส่งผลให้ค่าการขยายตัวของวัสดุสูง

(2) คุณภาพของน้ำ

2.1 ต้องเป็นน้ำที่ไม่มีไอออน

2.2 น้ำต้องมีค่าพีเอชเป็นกลาง เพราะถ้าน้ำเป็นด่าง จะส่งผลให้ค่าการก่อตัวสูงขึ้น และถ้าน้ำเป็นกรดจะส่งผลให้ค่าการก่อตัวลดลง

(3) อุณหภูมิของน้ำ

เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนปลาสเตอร์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของน้ำสูง จะส่งผลให้ปูนปลาสเตอร์ก่อตัวช้า แต่ถ้าหากอุณหภูมิของน้ำต่ำ จะส่งผลให้ปูนปลาสเตอร์ก่อตัวเร็ว

(4) คุณภาพของปูนปลาสเตอร์

4.1 ปูนปลาสเตอร์ต้องสะอาดและไม่มีสิ่งเจือปน

4.2 ความละเอียดของปูนปลาสเตอร์ มีผลดังนี้

- ถ้าปูนปลาสเตอร์มีความละเอียดมาก จะส่งผลให้ความแข็งแรงสูง
- ถ้าปูนปลาสเตอร์มีความละเอียดมาก จะส่งผลให้ค่าการขยายตัวสูง

4.3 ปูนปลาสเตอร์ที่เหมาะสมต่อการใช้งานคือปูนใหม่ เนื่องจากปูนปลาสเตอร์เก่าจะดูดความชื้นเก็บไว้และกลายเป็นอิมพัชัม ทำให้เมื่อนำไปใช้งานจริงจะดูดซึมน้ำเพิ่มได้น้อยและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในอัตราที่ต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง

4.4 ลักษณะของเนื้อปูนปลาสเตอร์

- ถ้าปูนปลาสเตอร์มีเนื้อละเอียด เมื่อผสมน้ำแล้วปูนปลาสเตอร์จะไม่เกาะกันเป็นเม็ด ทำให้เกิดสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)
- ถ้าปูนปลาสเตอร์มีเนื้อหยาบ เมื่อผสมน้ำแล้วปูนปลาสเตอร์จะเกาะตัวกันเป็นเม็ด สารละลายที่ได้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจน

4.5 ชนิดของปูนปลาสเตอร์ ปูนปลาสเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด จำแนกตามกระบวนการผลิตได้แก่ชนิดแอลฟาและชนิดเบตา โดยปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟาจะให้ความแข็งแรงมากกว่าปูนปลาสเตอร์ชนิดเบตา และในการใช้งานอัตราส่วนของ P / W ของปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟา จะสูงกว่าชนิดเบตา

(5) การผสมปูน จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

5.1 อัตราส่วนปูนต่อน้ำต้องคงที่

5.2 ใช้น้ำสะอาดและเป็นกลาง

5.3 ภาชนะสำหรับผสมปูนต้องสะอาด เพราะสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ภาชนะจะทำให้ปูนปลาสเตอร์ก่อตัวเร็ว ทำให้ได้วัสดุที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน และเวลาในการทำงานสั้นลง

5.4 การโรยปูนต้องโรยอย่างสม่ำเสมอและพยายามโรยปูนให้กระจายตัวและแช่ปูนจนปูนค่อย ๆ ตกจมลงไปในน้ำเองจนหมด ซึ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปูนปลาสเตอร์



ต่อน้ำที่เหมาะสมและเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือปูนปลาสเตอร์ 100 ส่วน ต่อน้ำ 30 ส่วน แต่ในการใช้งานจริงมักใช้ปริมาณน้ำมากกว่าอัตราส่วนดังกล่าว เช่น ปูนปลาสเตอร์ 100 ส่วน ต่อน้ำ 70 ส่วน เพื่อช่วยในการไหลตัว ควรแช่ปูนทิ้งไว้ประมาณ 3-5 นาที เพื่อให้ น้ำซึมเข้าไปในเนื้อปูนทั้งหมดก่อน หลังจากนั้นจะกวนปูนปลาสเตอร์ โดยพยายามไม่ให้เกิดฟองอากาศ หากกวนปูนปลาสเตอร์เร็วเกินไป จะทำให้ปูนปลาสเตอร์แข็งตัวเร็วและเกิดฟองอากาศได้ง่าย แต่หากกวนช้าเกินไป เนื้อปูนจะไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ความหนาแน่นและความสามารถในการดูดซึมน้ำต่างกัน ในกรณีที่ต้องการผสมปูนปลาสเตอร์ในปริมาณมาก ๆ ควรชั่งปูนตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้แล้วผสมโดยใช้เครื่องกวนชนิดใบพัดเพื่อให้ความเร็วรอบของการกวนคงที่

‘(6) สารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน

6.1 ชนิดของสารหน่วงการเกิดปฏิกิริยา

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเอพิจีดีปลาสเตอร์ มีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วกว่าปูนปลาสเตอร์ทางการค้า เนื่องจากสารปนเปื้อนจำพวกเกลือในเอพิจีดีปลาสเตอร์มีปริมาณสูงกว่าปูนปลาสเตอร์ทางการค้า ถ้าหากต้องการนำเอพิจีดีปลาสเตอร์ไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ จำเป็นต้องทำให้เวลาการก่อตัวของเอพิจีดีปลาสเตอร์เทียบเท่ากับปูนปลาสเตอร์ทางการค้า การก่อตัวเร็วหรือช้าของเอพิจีดีปลาสเตอร์จะมีผลต่อการทำงานมาก จึงเกิดแนวคิดในการใช้สารยืดเวลาการก่อตัวหรือสารช่วยหน่วงการก่อตัว ซึ่งพบว่ากรดอ่อนชนิดอินทรีย์ และเกลือของกรด กรดและเกลือของกรด อนินทรีย์บางชนิด รวมทั้งเบสแก่ เป็นสารหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้คือ

1. สารหน่วงปฏิกิริยาจะทำให้กระบวนการละลายของไอออนและการก่อตัวเกิดอย่างช้า ๆ

2. เมื่อปลาสเตอร์ละลายและมีผลึกเริ่มต้นเกิดขึ้น พบว่าสารหน่วงปฏิกิริยาจะเข้าไปแทรกตัวตามบริเวณพื้นผิวของผลึกเริ่มต้น ส่งผลให้อัตราการโตของผลึกเกิดขึ้นช้าลง สามารถยืนยันถึงกระบวนการที่สารเข้าไปแทรกตัวปกคลุมที่ผิวของผลึกได้ด้วย เทคนิค DSC และเทคนิค FTIR

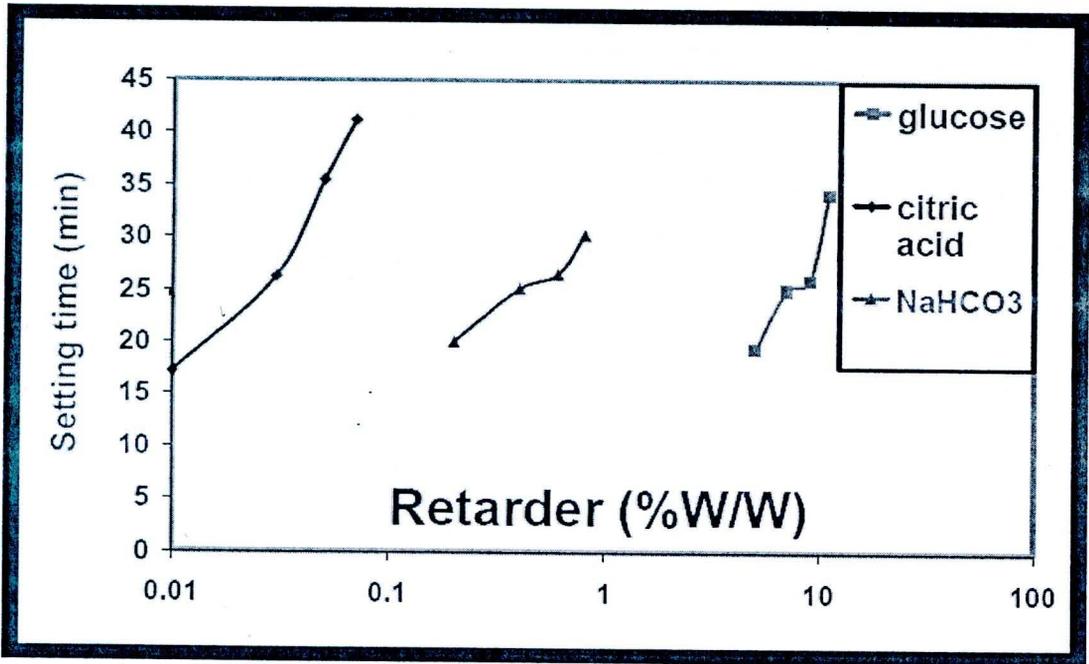
6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหน่วงปฏิกิริยา

ผลของการทำปฏิกิริยาของสารหน่วงการก่อตัว (Retarder) ยังมีความผันแปรซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

1. สารประกอบและชนิดของปูนปลาสเตอร์
2. อัตราส่วนของการผสมของสารหน่วงการก่อตัวกับปูนปลาสเตอร์

3. อุณหภูมิขณะทดลอง

การเติมสารหน่วงปฏิกิริยาจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการก่อตัว พบว่าเมื่อปริมาณสารหน่วงปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการก่อตัวจะนานขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.11



รูป 2.11 ผลของการเติมสารหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดกลูโคส กรดซิตริก และโซเดียมไบคาร์บอเนต [3]

2.3 ชนิดของสารเติมแต่ง

ในทางเคมีนิยมจำแนกสารประกอบเป็น 2 ประเภท[16, 26] คือสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ งานวิจัยนี้สนใจผลของสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีต่อการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากเอพิจีตีสเตอรที่ใช้ในการทดลองเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วกว่าปูนปลาสเตอร์ทางการค้ามาก จนทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปวัสดุได้ การใช้สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เป็นสารเติมแต่ง (Chemical Additive) [8] เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยสารเติมแต่งจะไปดูดซับตรงบริเวณผิวหน้าของผลึกเอพิจีตีสเตอรจนไม่เหลือพื้นที่ให้โมเลกุลของน้ำเข้าทำปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้น

การดูดซับบนอนุภาคของแข็ง

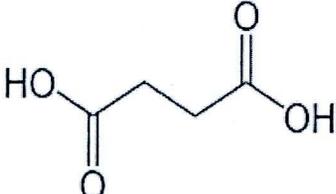
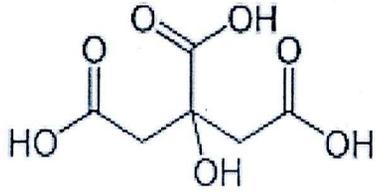
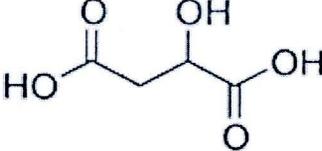
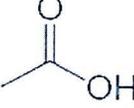
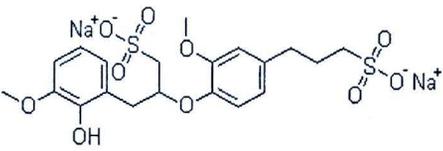
เมื่ออนุภาคของของแข็งกระจายตัวอยู่ในตัวกลางชนิดของเหลว อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่เข้าหากันได้ พลังงานรวมที่ผิวของอนุภาค (Van de waals Total, VT) เกิดจากผลรวมของแรงที่เกิดระหว่างอนุภาค 2 อนุภาค ได้แก่ แรงผลักรวม (Van de waals Repulsion, VR) และแรงดึงดูด (Van de waals Attraction, VA) ซึ่งแรงดังกล่าวจะขึ้นกับระยะห่างของอนุภาคทั้งสอง ตามทฤษฎีของ DLVO คือความสัมพันธ์ของแรงผลักรวม (VR) กับระยะทางจะเป็นแบบ Exponential Function โดยแรงผลักรวมจะค่อย ๆ มีค่าลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น สำหรับความสัมพันธ์ของแรงดึงดูด (VA) กับระยะทาง แรงผลักรวมจะมีค่าลดลงเป็นส่วนกลับกับระยะทาง ถ้าแรงผลักรวมมีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดจะทำให้พลังงานรวมที่ผิวของอนุภาค (VT) มีค่าเป็นบวกสูง ทำให้เกิดการอนุภาคผลักรวม แต่ถ้าอนุภาคเข้าใกล้กันในระยะน้อยกว่า 100 nm พบว่าอนุภาคของของแข็งจะเคลื่อนที่เข้าไปดูดซับเกาะติดกันแน่น โดยอนุภาคขนาดเล็กจะแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคขนาดใหญ่ และอนุภาคจะเกิดการเกาะติดกันของเนื่องจากน้ำหนักรวมที่กดทับกัน

2.3.1 สารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์

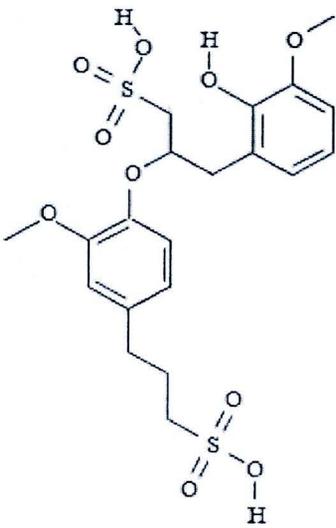
สารอินทรีย์ หมายถึงสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วม เช่นธาตุ H O N P S Cl และ Br เป็นต้น สารอินทรีย์ทุกชนิดจะต้องมีธาตุ C เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยเสมอ จึงกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์คือสารประกอบของคาร์บอน ยกเว้นสารประกอบของคาร์บอนบางชนิดที่แม้ว่าจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบแต่ไม่จัดว่าเป็นสารอินทรีย์ เช่น สารประกอบคาร์ไบด์ สารประกอบคาร์บอนเนต สารประกอบไซยาไนด์ และออกไซด์ของคาร์บอน

สารอินทรีย์เป็นสารประกอบที่ได้จากธรรมชาติและสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้นักวิทยาศาสตร์ยังสามารถสังเคราะห์สารอินทรีย์จากสารอนินทรีย์ได้ ดังนั้นแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์อาจเป็นได้ทั้งสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต แต่ต้นกำเนิดของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่คือสิ่งมีชีวิต ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ค้นพบสารอินทรีย์มากกว่า 2 ล้านชนิด และในแต่ละวันยังมีการค้นพบสารอินทรีย์ใหม่อย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างของสารอินทรีย์ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเชื้อเพลิง โปรตีน น้ำตาล และกรดอินทรีย์ เป็นต้น สารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์ที่เลือกใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาไฮดรอลิกในงานวิจัยนี้ได้แก่ กรดซัคซินิก กรดซิตริก กรดมาลิก กรดอะซิติก กรดลิกโนซัลโฟนิก และโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต สูตรโมเลกุลและโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตาราง 2.6

ตาราง 2.6 สูตรโมเลกุลและโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน [36,37]

สารเติมแต่ง	สูตรโมเลกุล	โครงสร้าง
1. กรดซัคซินิก	$C_4H_6O_4$	
2. กรดซิตริก	$C_6H_8O_7$	
3. กรดมาลิก	$C_4H_6O_5$	
4. กรดอะซิติก	$C_2H_4O_2$	
5. โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต	$C_{20}H_{24}Na_2O_{10}S_2$	

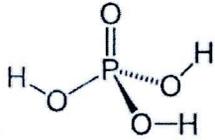
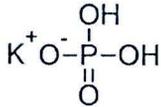
ตาราง 2.6 สูตรโมเลกุลและโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน [36,37]

สารเติมแต่ง	สูตรโมเลกุล	โครงสร้าง
6. กรดลิกโนซัลโฟนิก	$C_{20}H_{26}O_{10}S_2$	

2.3.2 สารเติมแต่งชนิดสารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์ หมายถึงสารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ จำนวนมาก เช่น S O Cl Na Mg Al และ C เป็นต้น ยกตัวอย่างสารอนินทรีย์ได้แก่ เกลือแกง ปูนขาว กรดซัลฟิวริก โซดาไฟ ด่างทับทิม เป็นต้น สารเติมแต่งชนิดสารอนินทรีย์ที่เลือกใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในงานวิจัยนี้ได้แก่ กรดฟอสฟอริก และ โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต สูตรเคมีและโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตาราง 2.7

ตาราง 2.7 สูตรเคมีและโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน [36]

สารเติมแต่ง	สูตรเคมี	โครงสร้าง
1. กรดฟอสฟอริก	H_3PO_4	
2. โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต	KH_2PO_4	

2.3.3 กลไกการดูดซับของสารเติมแต่ง

2.3.3.1 กลไกการดูดซับของสารอินทรีย์

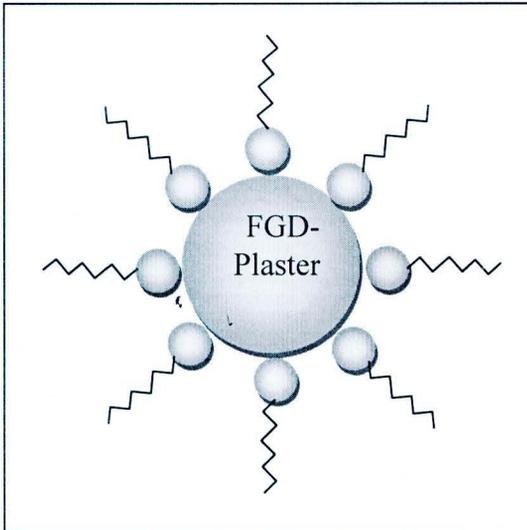
สารอินทรีย์มีลักษณะโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาว และเมื่อเข้าไปดูดซับอยู่บนอนุภาคของเอพิจีปลาสเตอร์ จะทำหน้าที่เสมือนเป็นกำแพงป้องกัน ที่เรียกว่า “Steric Hindrance” ไม่ให้น้ำเข้าทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับเอพิจีปลาสเตอร์ ดังนั้นสารอินทรีย์จึงสามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันได้

2.3.3.2 กลไกการดูดซับของสารอนินทรีย์

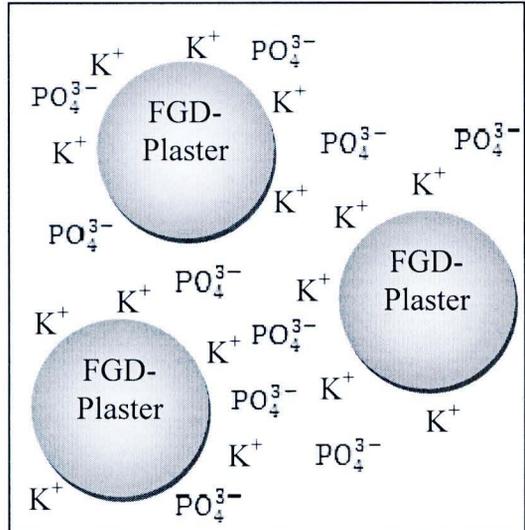
สารอนินทรีย์ประเภทเกลือสามารถแตกตัวเป็นไอออน และไอออนเหล่านี้จะเข้าไปดูดซับอยู่บริเวณผิวของเอพิจีปลาสเตอร์และทำหน้าที่เป็นแคตไอออน ไอออน ซึ่งเป็นตัวกำหนดสภาพพื้นผิวของอนุภาคให้มีความเป็นบวกหรือลบ จึงส่งผลให้อนุภาคของเอพิจีปลาสเตอร์อยู่ชิดหรือห่างกัน

กลไกการดูดซับของสารเติมแต่ง

การดูดซับของสารอินทรีย์



การดูดซับของสารอนินทรีย์



รูปที่ 2.12 กลไกการดูดซับของสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ [2, 7]

ตาราง 2.8 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

สมบัติ	สารอินทรีย์	สารอนินทรีย์
1. ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ส่วนใหญ่เป็นธาตุ C และ H ธาตุอื่น ๆ เช่น O N S P Cl Br และ I มีเป็นส่วนน้อย	มีธาตุทุกชนิด
2. ชนิดของพันธะเคมี	พันธะโคเวเลนต์	มีทั้งพันธะ โคเวเลนต์ และ พันธะไอออนิก (ส่วนมากเป็น พันธะไอออนิก)
3. การละลายน้ำ	ส่วนมากไม่ละลายน้ำยกเว้น พวกโมเลกุลมีขั้วขนาดเล็ก ๆ เช่น แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์	ส่วนมากละลายน้ำได้ดี

ตาราง 2.8 การเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (ต่อ)

สมบัติ	สารอินทรีย์	สารอนินทรีย์
4. การนำไฟฟ้าของสารละลาย (ในน้ำ)	ไม่นำไฟฟ้าหรือนำไฟฟ้าได้น้อยมาก	ส่วนใหญ่พวกที่ละลายน้ำจะนำไฟฟ้าได้ดีโดยเฉพาะสารไอออนิก
5. การละลายในตัวทำละลายอินทรีย์	ส่วนมากละลายได้ดี	ส่วนมากไม่ละลาย
6. จุดเดือด-จุดหลอมเหลว	ส่วนมากค่อนข้างต่ำ	ส่วนมากค่อนข้างสูง
7. การเผาไหม้	ติดไฟง่าย อาจจะมีเขม่า	ติดไฟยาก ต้องใช้ความร้อนสูงมาก และเมื่อติดไฟแล้วจะมีกากของแข็งเหลืออยู่
8. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี	เกิดค่อนข้างช้า	เกิดเร็ว
9. ตัวเร่งปฏิกิริยา	ส่วนมากต้องใช้	ส่วนมากไม่ต้องใช้

2.4 สารสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนปลาสเตอร์

กรกนก บุญเสริมและเกศรินทร์ พิมรักษา ศึกษาการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเอพิจีดีอีปซัมของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเอพิจีดีอีปลาสเตอร์ที่ได้จากการนำเอพิจีดีอีปซัมมาเผาแคลไซน์เมื่อผสมกับน้ำแล้วเกิดการก่อตัวเร็วมาก ทำให้ไม่มีเวลาเพียงพอในการนำมาใช้งาน จึงมีการใช้เติมสารเติมแต่งเพื่อหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของเอพิจีดีอีปลาสเตอร์ โดยใช้สารเติมแต่งชนิดสารเคมีได้แก่ กลูโคส กรดซิตริก และ โซเดียมไบคาร์บอเนต และสารเติมแต่งชนิดเส้นใยจากธรรมชาติได้แก่ ขุยมะพร้าว เส้นใยยาสูบ และขี้เถ้า ผลการทดลองพบว่าสารเติมแต่งดังกล่าว ยกเว้น ขุยมะพร้าวและขี้เถ้า สามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้เวลาการก่อตัวของเอพิจีดีอีปลาสเตอร์เพิ่มขึ้น โดยกรดซิตริกสามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยัง

พบว่า การเติมกรดซิตริก 0.03% โดยน้ำหนัก และเส้นใยยาสูบ 0.02% โดยน้ำหนักใน เอฟจีดีพลาสติกอร์ ทำให้เวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นจนเทียบเท่ากับพลาสติกอร์ทางการค้าคือ ประมาณ 25–26 นาที นอกจากนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นฉนวนกันความร้อนและ โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของผลึกอีพ็อกซีเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง แล้วพบว่าผลึกอีพ็อกซี มีลักษณะสั้นลง เป็นผลให้แรงดึงดูภายในผลึกอ่อนลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แผ่นฉนวนกัน ความร้อนที่เป็นวัสดุผสมระหว่างเอฟจีดีพลาสติกอร์กับสารเติมแต่งมีค่าความทนต่อแรงอัด ลดลง 40% เมื่อเทียบกับแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเอฟจีดีพลาสติกอร์ที่ไม่ได้เติม สารเติมแต่งใด ๆ [3,28]

ชญาพร กาสูยะ ศึกษาเอฟจีดีพลาสติกอร์ที่เติมสารหน่วงปฏิกิริยาไฮดรอกซิล คือ กลูโคส กรดซิตริก และโซเดียมไบคาร์บอเนต พบว่าการเติมกรดซิตริก 0.04–0.05% โดย น้ำหนัก สามารถให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสารหน่วงชนิดอื่น คือ มีค่าการก่อตัว ความหนาแน่น และค่าความทนต่อแรงอัด เป็น 21–27 นาที, 1.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 52–56 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษาโครงสร้างทาง จุลภาคพบว่าเมื่อเติมกรดซิตริกลงไปแล้ว ผลึกเอฟจีดีอีพ็อกซีบางส่วน มีอัตราการเติบโตของ ผลึกลดลงส่งผลให้ผลึกมีขนาดสั้นและเล็ก ซึ่งผลึกที่มีลักษณะดังกล่าว จะเข้าไปแทรกตาม ผลึกที่สมบูรณ์ ทำให้มีการแตกตัวที่แน่น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นและค่าความทน ต่อแรงอัดของเอฟจีดีอีพ็อกซีที่มีการเติมกรดซิตริกเพิ่มขึ้น [8]

ภาวรินทร์ กุณา ศึกษาอิทธิพลชนิดและขนาดของกาบาโยธรรมชาติ ที่มีผลต่อค่า การนำความร้อน ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างทางจุลภาคของเอฟจีดีอีพ็อกซี โดยกาบาโยธรรมชาติที่ใช้ คือ ซีเลื้อย และ วัสดุอินทรีย์สารชนิด ดินเบาและเถ้าไม้ พบว่า เมื่อปริมาณของกาบาโยธรรมชาติเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวจะลดลง และค่าการดูดซึมน้ำ จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการเป็นวัสดุฉนวนคือ มีค่าการนำความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังได้ ศึกษาสารหน่วงปฏิกิริยาไฮดรอกซิลของเอฟจีดีพลาสติกอร์ คือ ซูโครส กลูโคส และกรดออก ซาลิก พบว่ากลูโคส 5% โดยน้ำหนัก สามารถหน่วงปฏิกิริยาได้ดีกว่าสารอื่น ทำให้

ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นจาก 8 นาที เป็น 18 นาที เมื่อเทียบกับปูนปลาสเตอร์ทางการค้า อยู่ที่ 24 นาที [12]

สายรุ้ง ปิ่นคำ ศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของเอฟจีดีปลาสเตอร์ ที่เติมสารหน่วงปฏิกิริยาเคมี คือกลูโคส กรดซิตริก และโซเดียมไบคาร์บอเนต และติดตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยวัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของเอฟจีดีปลาสเตอร์ เมื่อเติมด้วยกลูโคสมิแนวโน้มลดลงได้เร็วกว่าเมื่อเติมด้วยกรดซิตริก ซึ่งแสดงว่า กรดซิตริกสามารถหน่วงปฏิกิริยาได้ดีกว่ากลูโคส และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าเมื่อเติมด้วย กรดซิตริก และโซเดียมไบคาร์บอเนต พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของเอฟจีดีปลาสเตอร์เมื่อเติมด้วยกรดซิตริกมีแนวโน้มลดลงได้เร็วกว่าเมื่อเติมด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต ดังนั้นสรุปได้ว่า โซเดียมไบคาร์บอเนต สามารถหน่วงปฏิกิริยาได้ดีกว่ากรดซิตริก และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า [14]

สุพัตรา จินาวัดน์ พัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอฟจีดีอีพซัมจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยล้างเอฟจีดีอีพซัมโดยวิธีชะด้วยกรดซัลฟิวริกและตกตะกอนเพื่อให้สีจางลงเป็นสีน้ำตาลอ่อนแล้วนำไปเผาแคลไซน์เพื่อผลิตเบตาปลาสเตอร์ จากนั้นนำปลาสเตอร์ที่สังเคราะห์ได้มาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น แผ่นฉนวนกันความร้อนและปลาสเตอร์ฉาบผนัง เทียบกับอีพซัมธรรมชาติ พัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์เบตาปลาสเตอร์โดยการเติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ได้แก่ โซเดียมลิกโนซัลโฟเนต เมทิลเซลลูโลส ไวนิลเอซิเตท กรดซิตริก กรดแอซติก และโซเดียมบอเรท โดยพบว่าการเติมกรดซิตริก 0.04% โดยน้ำหนักสามารถเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวได้นานที่สุดคือ 12.41–13.59 นาที รองลงมาคือ เมทิลเซลลูโลส ซึ่งสารเติมแต่งตัวเหล่านี้สามารถปรับปรุงให้คุณภาพของเอฟจีดีอีพซัมเท่าเทียมกับอีพซัมธรรมชาติและเท่าเทียมกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า [16]

Arikan และคณะ ศึกษาสมบัติของยิปซัมในเรื่อง การก่อดัว ความสามารถในการทำงาน ความทนต่อแรงอัด ความสามารถในการยึดและหดตัว ความเป็นฉนวนความร้อน และฉนวนเสียง โดยทำการทดลอง 4 วิธี วิธีแรกเป็นการเติมกรดซัลฟิวริกเพื่อหน่วงปฏิกิริยา วิธีที่สองเป็นการเติมสารพอลิเมอร์ชนิดเมทิลเซลลูโลสซึ่งสามารถละลายน้ำได้ วิธีที่สามเป็นการเพิ่มอากาศเข้าไปในยิปซัมเพื่อให้เกิดรูพรุน โดยการเติมสาร โอลิฟินซัลเฟตโซเดียมซอลท์ วิธีที่สี่เป็นการเติมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ชนิดเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์ซัลโฟเนต โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อพลาสติกเท่ากับ 0.45 จากผลการทดลองพบว่า การเติมกรดซัลฟิวริกลงไปนสารละลาย 0.05 - 0.2% จะทำให้ค่าการก่อดัวเพิ่มขึ้นจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2.40 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงอัดลดลงจาก 11.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็น 8.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับการเติมสารเมทิลเซลลูโลส การเพิ่มอากาศ และการเติมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์จะช่วยเพิ่มค่าก่อดัวได้เช่นเดียวกันแต่ให้ผลน้อยกว่าการเติมกรดซัลฟิวริก สำหรับค่าความทนต่อแรงอัดพบว่าเมื่อเติมกรดซัลฟิวริกในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงอัดลดลงมากที่สุด รองลงมาคือการเพิ่มอากาศและการเติมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ แต่สำหรับการเติมสารเมทิลเซลลูโลส จะส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงอัดเพิ่มขึ้น [22]

Hamdona และคณะ ศึกษาผลของฟอสเฟตและพอลิฟอสเฟตที่มีต่อการเกิดผลึกของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยใช้สารเติมแต่งชนิดกรด H_3PO_4 และสารประกอบพอลิฟอสเฟตชนิด NaH_2PO_4 , Na_2HPO_4 , Pyrophosphate PYP, Hexametaphosphate HMP ด้วยความเข้มข้น 1,5,10,15 และ 30 mol^{-1} เพื่อยืดระยะเวลาในการเกิดผลึกยิปซัม จากการศึกษพบว่าสารเติมแต่งชนิดฟอสเฟตเหล่านี้จะเข้าไปจับผิวผลึกของยิปซัม ทำให้สารละลายไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ จึงสามารถหน่วงการเกิดผลึกของยิปซัมได้ แต่พบว่าหากใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งน้อยกว่า 10^{-6} โมลลาร์ จะไม่มีสามารถหน่วงการเกิดผลึกของยิปซัมได้ โดยเรียงลำดับความสามารถในการหน่วงการเกิดผลึกของสารเติมแต่งแต่ละชนิดพบว่า มีลำดับดังนี้ คือ $H_3PO_4 > NaH_2PO_4 > Na_2HPO_4 > HMP > PYP$ [32]

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติบโตผลึกของยิปซัมในระบบที่มีสารเติมแต่ง

สุพัตรา จินาวัดน์ ศึกษาผลของโซเดียมซัลไฟเนตและกรดซัลฟูริก ต่อสมบัติของแอลฟาพลาสติกอร์ ที่สังเคราะห์จากเอพิจิยิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเทียบกับยิปซัมธรรมชาติ พบว่าสารเติมแต่งนี้มีผลต่อปริมาณและโครงสร้างจุลภาคของผลึกแอลฟาพลาสติกอร์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องถึงผลึกยิปซัม ผลการทดลองพบว่า สารเติมแต่งในปริมาณที่เหมาะสมช่วยเพิ่มปริมาณแอลฟาพลาสติกอร์ แต่มีแนวโน้มที่จะลดค่า Aspect Ratio (c/a Axis) ของทั้งผลึกแอลฟาพลาสติกอร์และผลึกยิปซัม โดยผลึกของแอลฟาพลาสติกอร์ เปลี่ยนรูปร่างจากแท่งยาวไปเป็นทรงกระบอกสั้น ส่วนผลึกของผลึกยิปซัม เปลี่ยนรูปร่างจากแผ่นบางยาว ไปเป็นแผ่นขนาดเล็กสั้นและหนา และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกอร์ที่เตรียมจาก แอลฟาพลาสติกอร์ โดยใช้มาตรฐานของ Dental Stone (Type III) พบว่าเอพิจิยิปซัมที่ได้จากพลาสติกอร์ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อพลาสติกอร์เท่ากับ 0.32 มีค่าความทนต่อแรงอัด 28.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเปรียบเทียบระหว่างเอพิจิยิปซัมกับยิปซัมธรรมชาติ พบว่าสารเติมแต่งจะมีผลต่อเอพิจิยิปซัมมากกว่า และกรดซัลฟูริก จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าโซเดียมซัลไฟเนต [17]

Elisabeth และคณะ ศึกษาการตกผลึกของยิปซัมเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งประเภทกรดอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ กรดซिटริก กรดแอสซิทิก กรดมาลิก และกรดทาร์ทาริก เปรียบเทียบกับการตกผลึกของยิปซัมที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งลงไป สารเติมแต่งดังกล่าวทำหน้าที่หน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ช้าลงโดยสารเติมแต่งจะเข้าไปอุดซับที่บริเวณผิวผลึกของพลาสติกอร์แทนน้ำ ผลการทดลองพบว่ากรดซिटริกสามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีที่สุด รองลงมาคือกรดมาลิก ส่วนกรดแอสซิทิกไม่สามารถหน่วงปฏิกิริยาได้ และพบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดสูงขึ้น ความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาก็จะเพิ่มตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่ากรดซिटริกที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 200 ppm จะไม่สามารถหน่วง

ปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ สำหรับการศึกษาคผลของสารเติมแต่งต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาของผลึกยิปซัม พบว่าการเติมกรดซัลฟิวริกและกรดมาลิกลงไปจะส่งผลให้โครงสร้างและรูปร่างของผลึกยิปซัมเกิดการเปลี่ยนแปลงจากรูปร่างยาวเหมือนเข็มเปลี่ยนเป็นผลึกที่สั้นลงและมีลักษณะแบนราบและมีผิวขรุขระคล้ายรูปทรงหกเหลี่ยมแบบเฮกซะโกนอล แต่ถ้ากรดที่เติมลงไปมีความเข้มข้นต่ำจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกหรือเปลี่ยนแปลงแต่น้อยมาก สำหรับการเติมกรดแอดิพิกและกรดทาร์ทาริกจะทำให้ผลึกยิปซัมมีความยาวเพิ่มขึ้นจากเดิม 18 ไมโครเมตร เป็น 25-30 ไมโครเมตร [19]

Moussaouiti และคณะ ศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของยิปซัม โดยสร้างแบบจำลองของนิวคลีเอชัน (Nucleation) และแบบจำลองอัตราการเติบโตของผลึกยิปซัม (Crystal Growth Rates) ในสารละลายกรดฟอสฟอริก และนำข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการวัด ผู้วิจัยได้วัดความหนาแน่นของจำนวนผลึกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายอิมิตวียังยวดต่อความเข้มข้น ณ สมดุลของแคลเซียม ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก และอัตราการกวนสารละลาย แบบจำลองของนิวคลีเอชันและแบบจำลองอัตราการเติบโตของผลึกยิปซัมสร้างโดยวิธี Moments Analysis โดยใช้ข้อมูลจากความหนาแน่นของจำนวนผลึก ซึ่งแบบจำลองนี้สร้างเพื่ออธิบายกระบวนการตกผลึกของยิปซัม แบบจำลองได้แสดงให้เห็นว่าการเกิดนิวคลีเอชันและอัตราการเติบโตของผลึกยิปซัมเป็นฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic Function) ของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายอิมิตวียังยวด ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกมีผลต่ออัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายอิมิตวียังยวด แต่ถ้าอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายอิมิตวียังยวดมีค่าเท่าเดิม อัตราการเติบโตของผลึกยิปซัมไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่า การเกิดนิวคลีเอชันไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการกวนสารละลาย และที่อัตราการกวนสารละลายตั้งแต่ 500 rpm มีผลกระทบต่ออัตราการเติบโตของผลึกยิปซัมเพียงเล็กน้อย และเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณพบว่า การใช้วิธี Moment Method เป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองดีที่สุด [25]

Singh และ Middendorf รวบรวมเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตกผลึกของ ยิปซัม โดยอภิปรายในประเด็นต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของ ปฏิริยาไฮเดรชันของพลาสติกทั้งชนิดแอลฟาและเบตา กลไกของปฏิริยาไฮเดรชันและ การเติบโตของผลึกยิปซัม รวมไปถึงการอภิปรายเรื่องผลของสารเติมแต่งต่อการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของยิปซัมที่ก่อตัวแล้ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้ ยิปซัมมีความแข็งแรงลดลง [26]