

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์

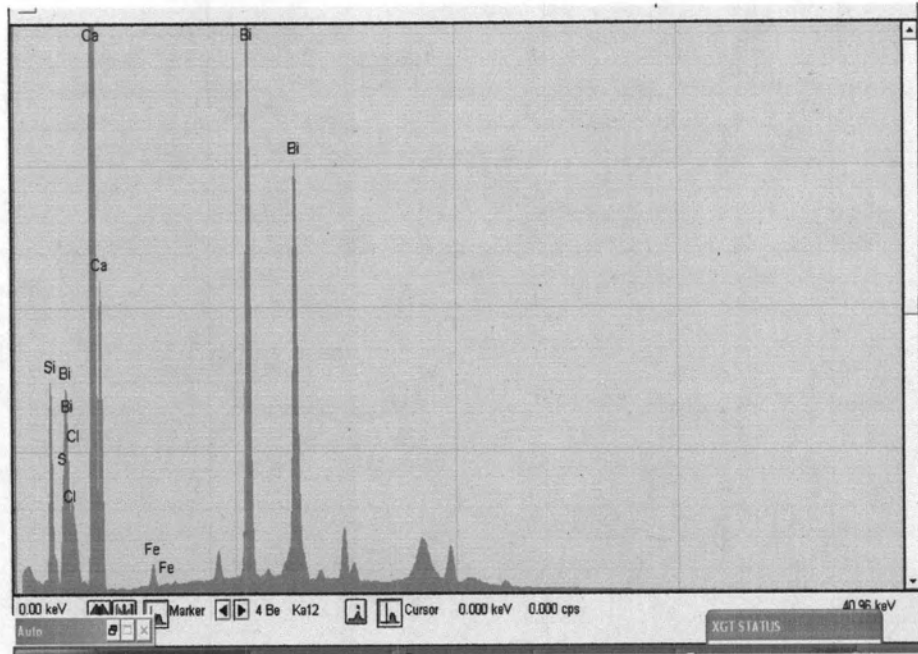
(รายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแสดงไว้ในภาคผนวก)

การศึกษาส่วนประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค และลักษณะสัณฐานวิทยา

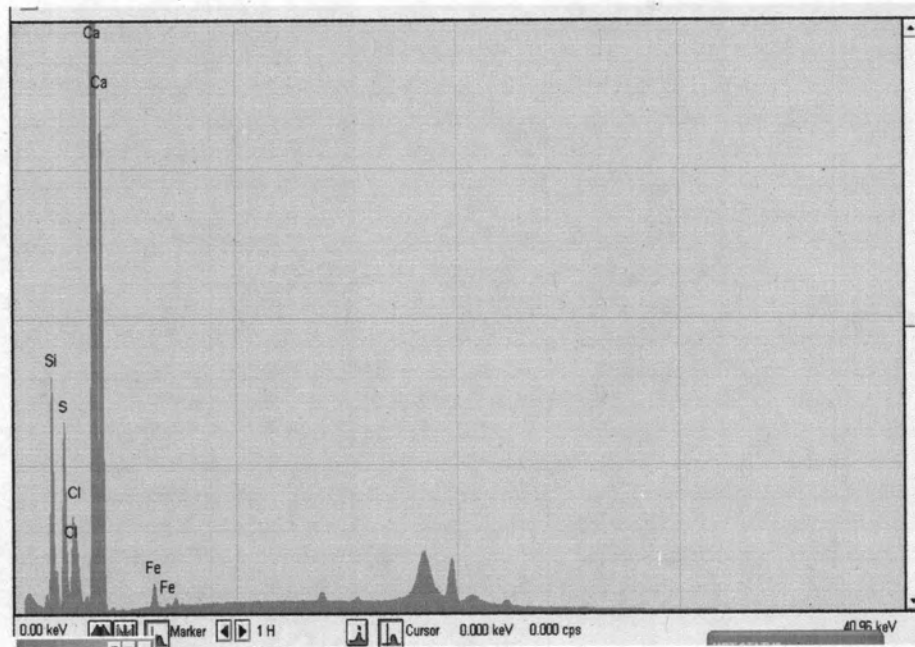
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวที่ผลิตในประเทศไทย มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างจากไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ โดยไม่พบมีบิสมาทออกไซด์ในส่วนประกอบของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวที่ผลิตในประเทศไทย ขณะที่พบได้ในไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ (แสดงดังตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14 - 16) อย่างไรก็ตามเมื่อนำพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวที่ผลิตในประเทศไทยมาผสมกับมีบิสมาทออกไซด์ ในอัตราส่วนตามที่กำหนด จะได้ส่วนประกอบทางเคมีคล้ายกับไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ และพบมีบิสมาทออกไซด์ในเปอร์เซ็นต์ที่ค่อนข้างใกล้เคียง (แสดงดังตารางที่ 4 และ ภาพที่ 17 - 18)

ตารางที่ 4 แสดงส่วนประกอบหลักของตัวอย่างการศึกษา

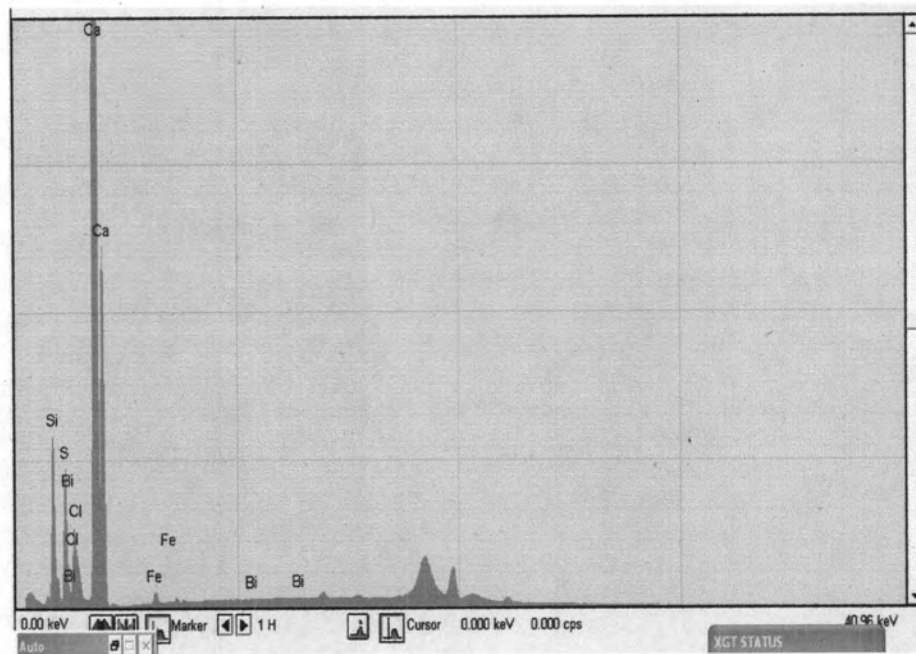
ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก				
	ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ	ซังเผือก	กิเลน	ซังเผือกผสมบิสมาทออกไซด์	กิเลนผสมบิสมาทออกไซด์
Mg	0.48	0.56	0.53	0.49	0.51
Al	1.76	1.68	1.65	1.65	1.53
Si	10.96	14.76	14.91	9.04	9.46
S	0.70	3.11	3.24	0.81	0.83
Ca	50.58	79.52	79.18	50.63	50.91
Ti	0.03	0.12	0.12	0.05	0.04
Cr	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01
Fe	0.22	0.19	0.26	0.18	0.15
Ni	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Sr	0.09	0.04	0.08	0.03	0.07
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.04	0.00	0.00	0.09	0.11
Bi	35.14	0.00	0.00	36.97	36.38



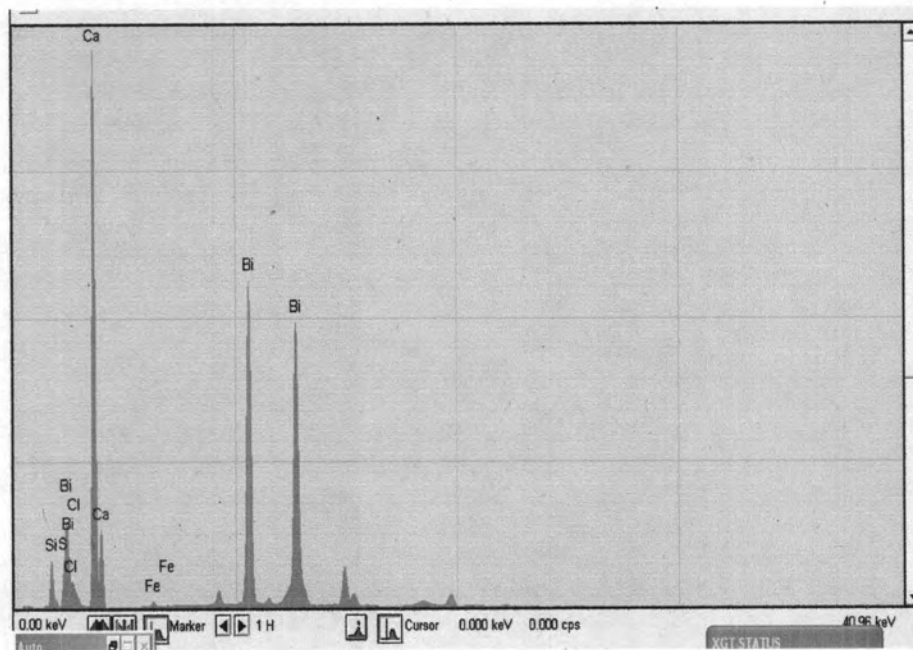
ภาพที่ 14 แสดงส่วนประกอบหลักของไวท์โปรรุธเอ็มทีเอ



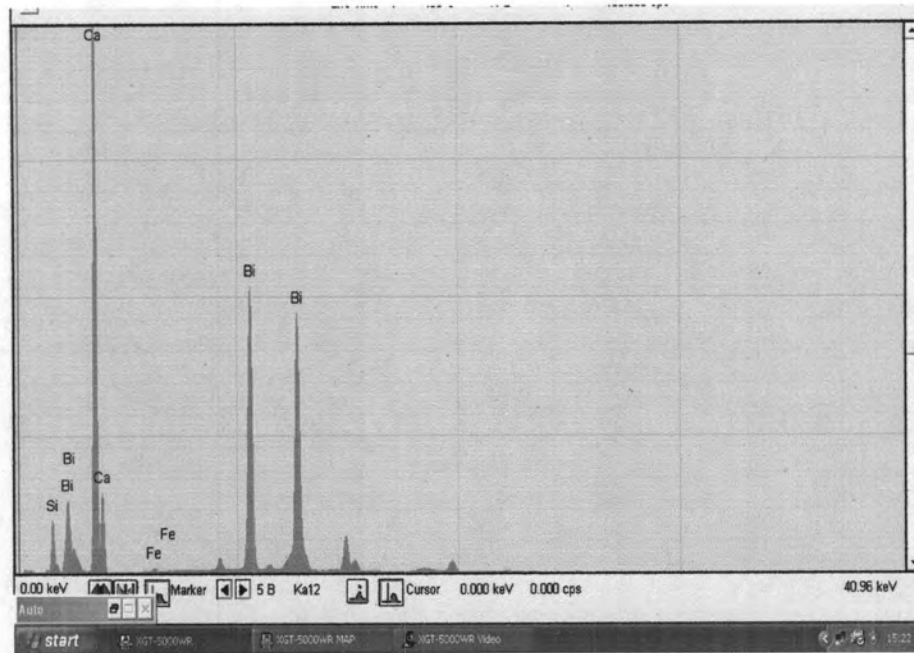
ภาพที่ 15 แสดงส่วนประกอบหลักของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตราช้างเผือก



ภาพที่ 16 แสดงส่วนประกอบหลักของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตรากิเลน



ภาพที่ 17 แสดงส่วนประกอบหลักของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตราช้างเผือก
ผสมกับบิสมัทออกไซด์



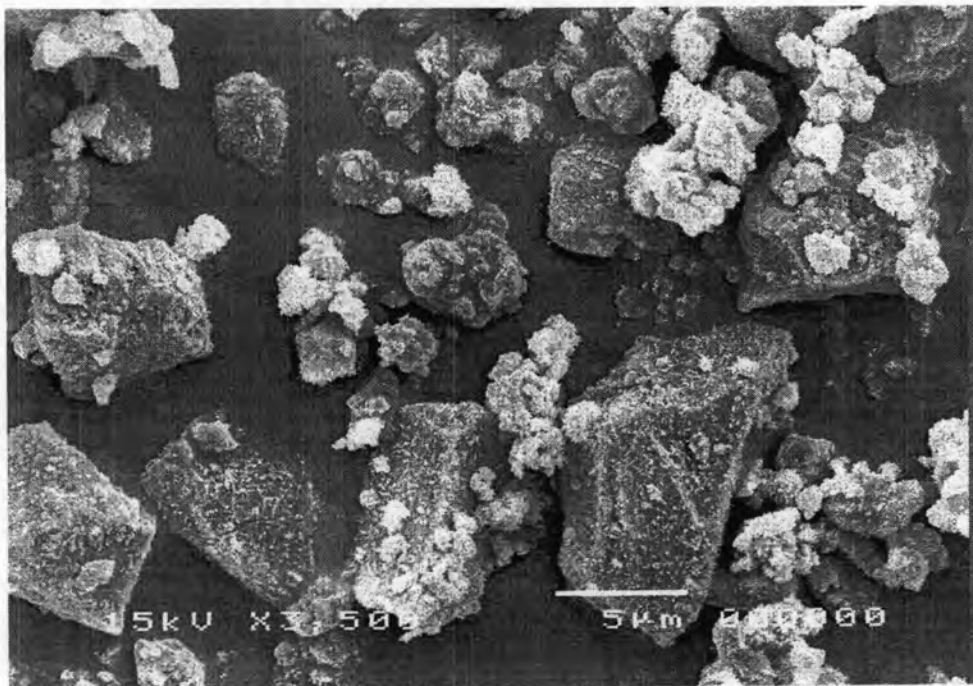
ภาพที่ 18 แสดงส่วนประกอบหลักของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีชาวดราภิเลนผสมกับ
บิส്മัทออกไซด์

นอกจากนั้นยังพบว่า พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีชาวดราภิเลนที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 2 บริษัทจะมีขนาดอนุภาคใหญ่สุดโดยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีชาวดราภิเลนซึ่งเผือกมีขนาดอนุภาค 17.28 ± 13.11 ไมโครเมตร และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีชาวดราภิเลนมีขนาดอนุภาค 18.74 ± 13.91 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามเมื่อนำพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีชาวดราภิเลนที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 2 บริษัทมาผสมกับบิส്മัทออกไซด์ และนำไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาคกลับพบว่าขนาดอนุภาคของสารมีขนาดลดลง โดยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีชาวดราภิเลนซึ่งเผือกผสมกับบิส്മัทออกไซด์มีขนาดอนุภาค 14.49 ± 10.77 ไมโครเมตร และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีชาวดราภิเลนผสมกับบิส്മัทออกไซด์มีขนาดอนุภาค 16.60 ± 12.27 ไมโครเมตร ส่วนไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ็มมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดโดยมีขนาดอนุภาค 12.48 ± 7.291 ไมโครเมตร (แสดงดังตารางที่ 5)

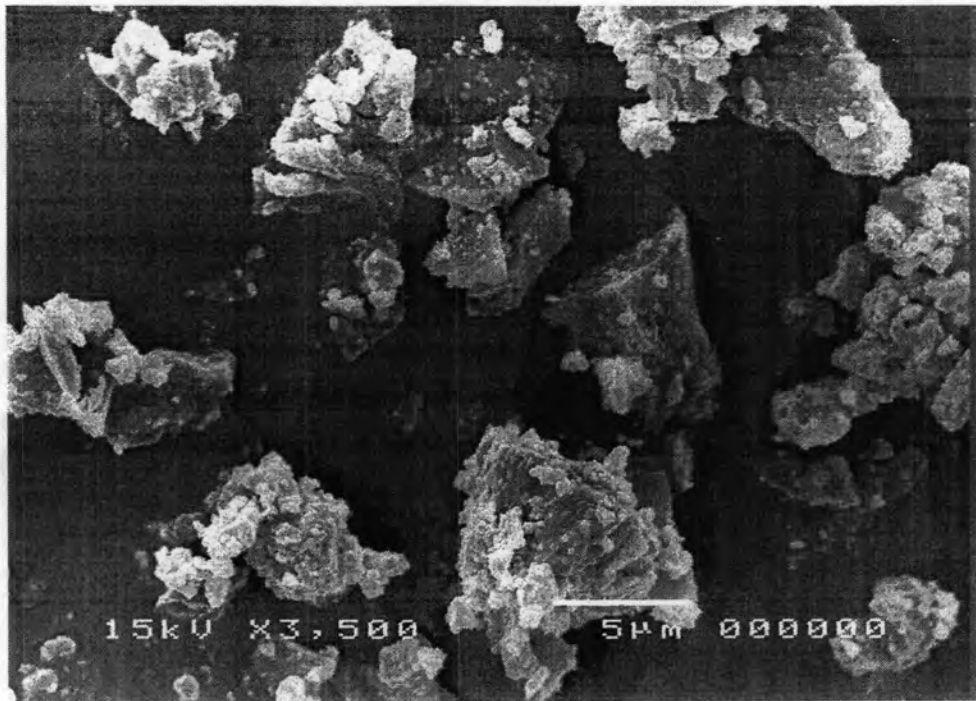
ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)

ตัวอย่างการศึกษา	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร; μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ	12.48	7.29
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรป	17.28	13.11
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรป	18.74	13.91
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรปผสม กับบิสมาทออกไซด์	14.49	10.77
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรปผสมกับ บิสมาทออกไซด์	16.60	12.27

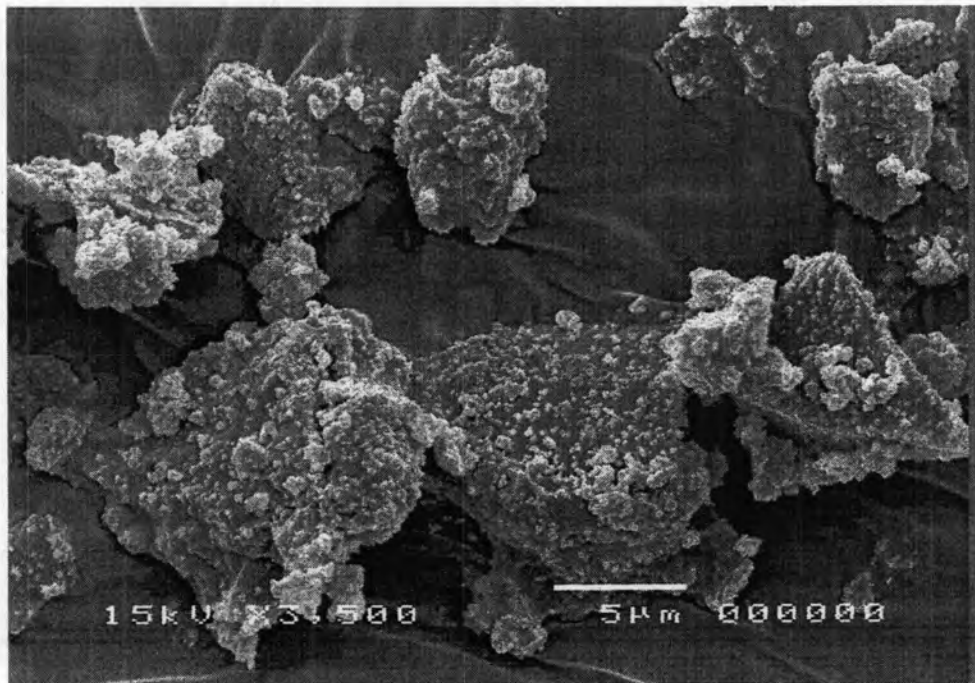
นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาส่วนผงและซีเมนต์ที่แข็งตัวเต็มที่พบว่า ซีเมนต์ทุกชนิดมีลักษณะสัณฐานวิทยาค่อนข้างคล้ายกัน (แสดงดังภาพที่ 19 - 28)



ภาพที่ 19 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาส่วนผงของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ



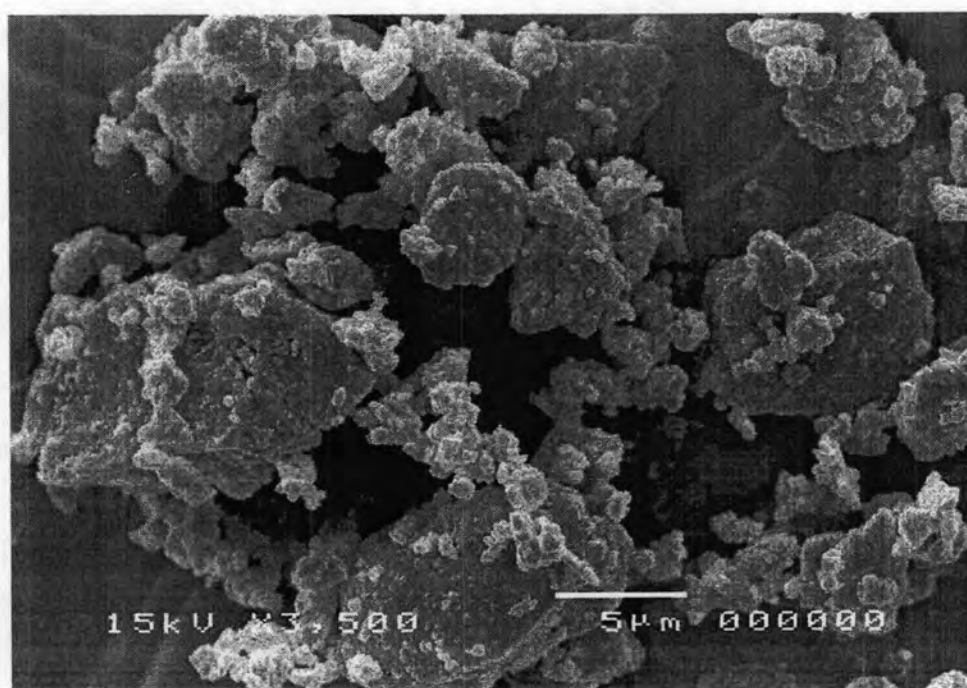
ภาพที่ 20 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาส่วนผงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตราช้างเผือก



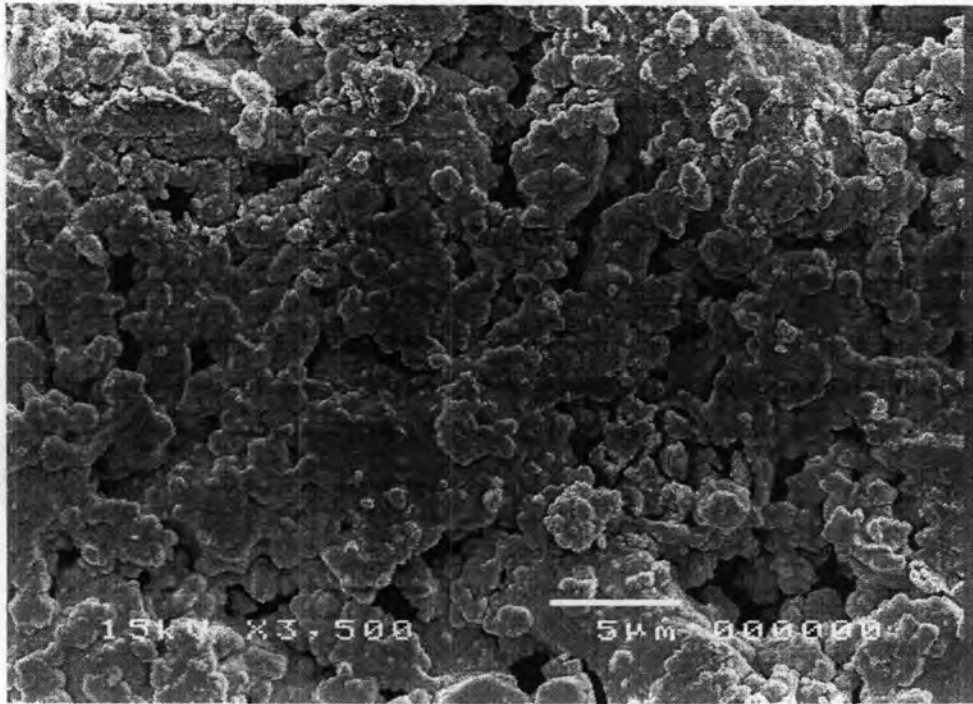
ภาพที่ 21 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาส่วนผงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตรากิเลน



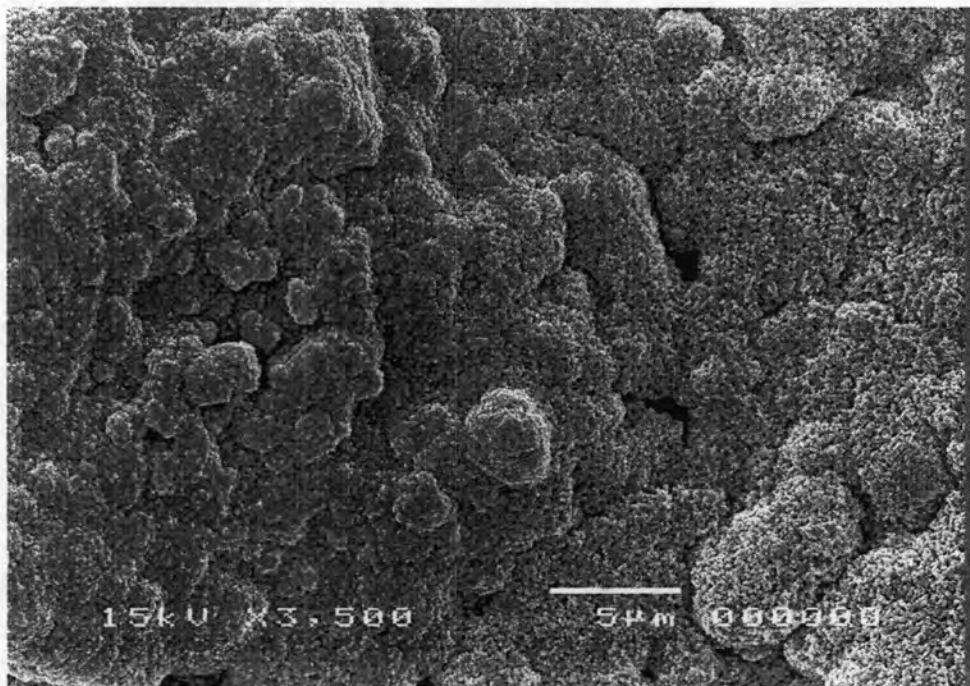
ภาพที่ 22 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาส่วนผิวนองของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตราช้างเผือกผสมบิสมัทออกไซด์



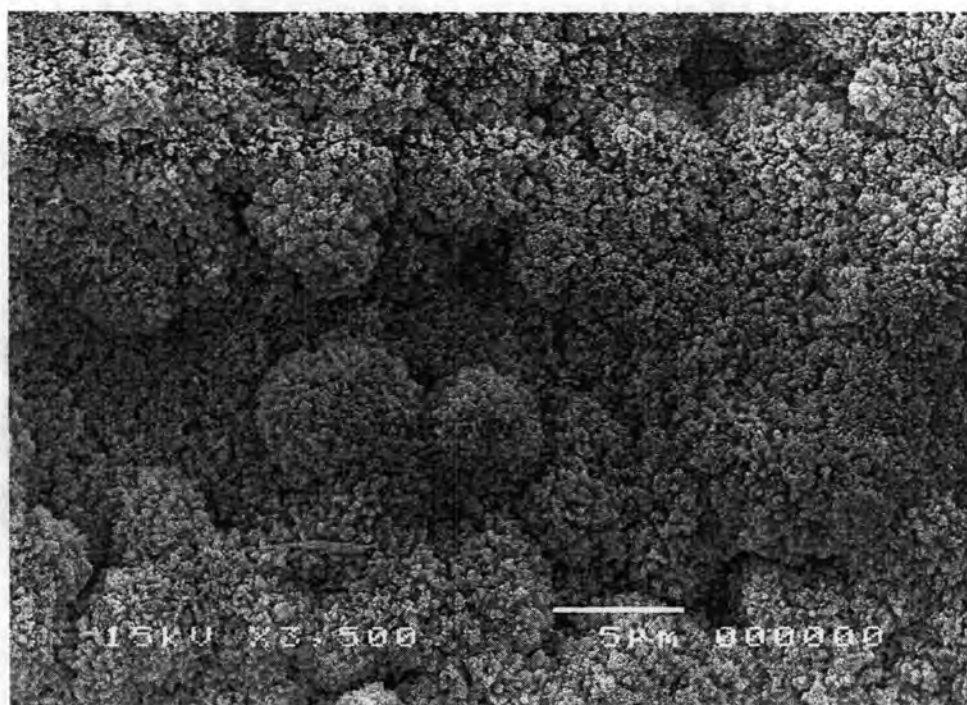
ภาพที่ 23 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาส่วนผิวนองของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตรากิเลนผสมบิสมัทออกไซด์



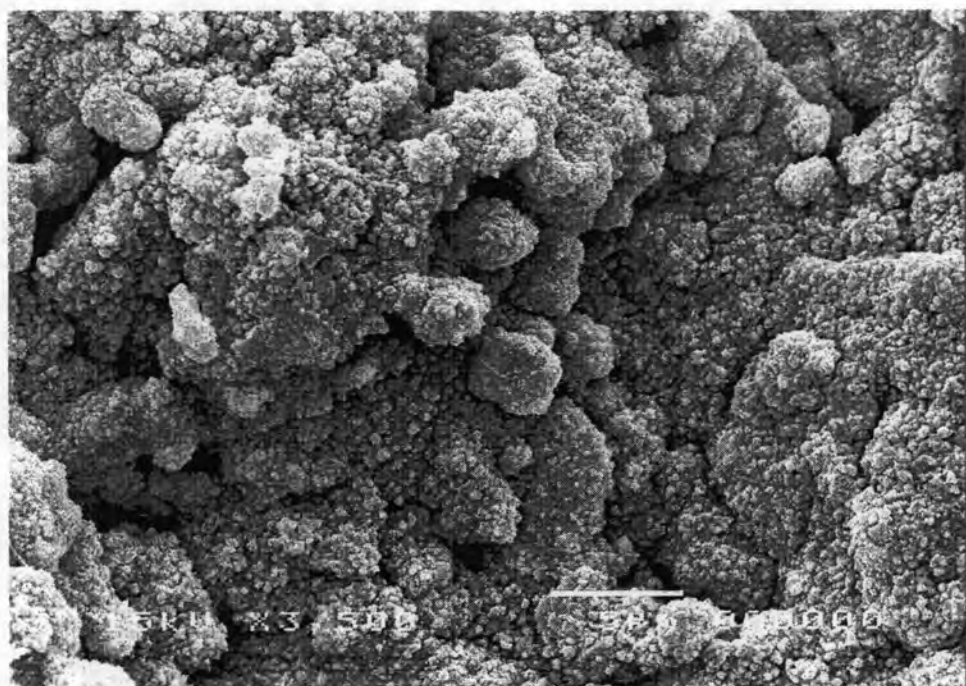
ภาพที่ 24 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอทีแข็งตัวเต็มที่



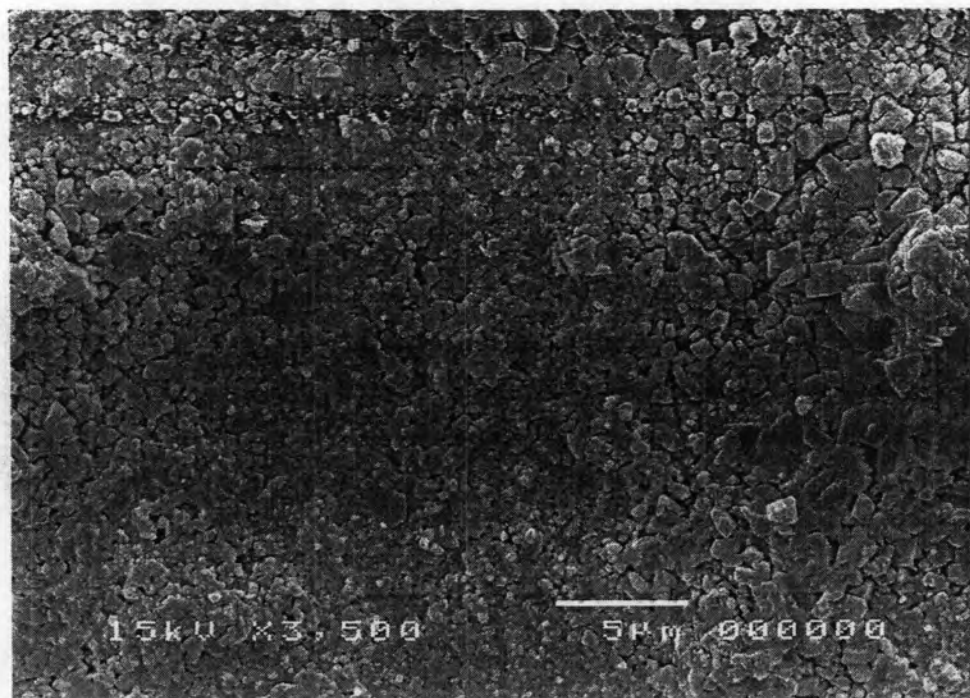
ภาพที่ 25 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ซิลิกาฟิวมส์ชาวดราซังเผือกที่แข็งตัวเต็มที่



ภาพที่ 26 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุคแรกที่ทำขึ้นที่
เดิมที่



ภาพที่ 27 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุคแรกที่ทำขึ้นที่
บิสมัทออกไซด์ที่แข็งตัวเดิมที่



ภาพที่ 28 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุติการผสมบิสมันท์ ออกไซด์ที่แข็งตัวเต็มที่

การศึกษาความที่บั้งสี

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุติการผสมบิสมันท์ที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 2 บริษัท จะมีค่าความที่บั้งสีต่ำกว่า ไวท์โปรรูทเอ็มทีเออย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่เมื่อเติมบิสมันท์ออกไซด์ลงไปแล้วกลับพบว่ามีค่าความที่บั้งสีมากกว่าไวท์โปรรูทเอ็มทีเอเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ไม่พบความแตกต่างระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุติการผสมบิสมันท์ที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 2 บริษัท หลังจากผสมกับบิสมันท์ออกไซด์ (แสดงดังตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 แสดงความถี่รังสีต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่รังสี เทียบกับชั้นของอคูมิเนียมสตีปเวจจ์

ตัวอย่างการศึกษา	ความถี่ รังสีต่ำสุด	ความถี่ รังสีสูงสุด	ความถี่ รังสีเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ไวท์โปรรุธเอ็มทีเอ	5.50	5.50	5.50	0.00
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว ตราช้างเผือก	1.26	1.36 ^a	1.26	0.09
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว ตรากิเลน	1.16	1.36 ^a	1.26	0.10
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว ตราช้างเผือกผสมกับบิสมัท ออกไซด์	5.57	5.90 ^b	5.62	0.10
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว ตรากิเลนผสมกับบิสมัท ออกไซด์	5.54	5.89 ^b	5.61	0.10

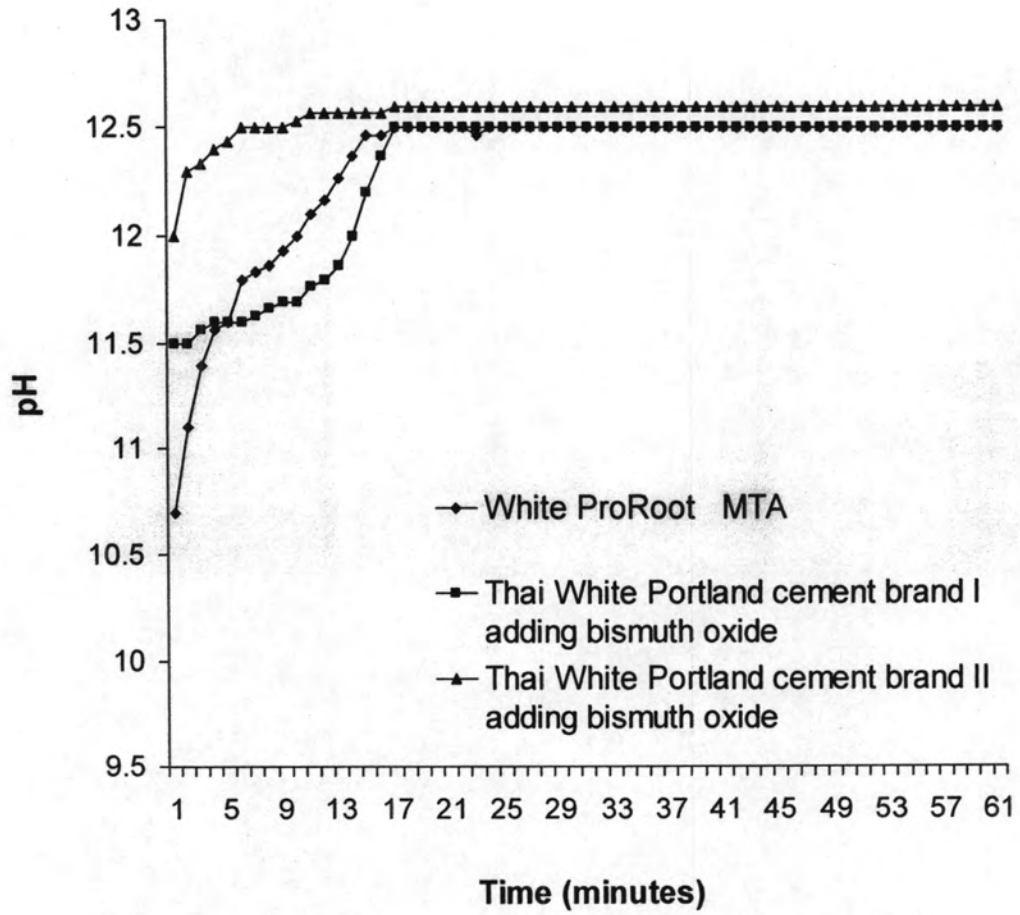
(a = ต่ำกว่าไวท์โปรรุธเอ็มทีเออย่างมีนัยสำคัญ $p < 0.05$, b คือสูงกว่าไวท์โปรรุธเอ็มทีเออย่างมีนัยสำคัญ $p < 0.05$)

การศึกษาค่าความเป็นกรด - เบส

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด - เบส ของซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าหลังจากผสมเสร็จไวท์โปรรุธเอ็มทีเอจะมีค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 10.7 ส่วนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตราช้างและตรากิเลน ผสมกับบิสมัทออกไซด์ มีค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 11.5 และ 12.1 ตามลำดับ แต่เมื่อเวลาผ่านไปที่ เวลา 16 นาทีพบว่า พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตรากิเลนผสมกับบิสมัทออกไซด์จะมีค่าความเป็นกรด - เบสคงที่คือ 12.6 ส่วนไวท์โปรรุธเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวตราช้างเผือกผสมกับบิสมัทออกไซด์จะมีค่าความเป็นกรด - เบสคงที่ด้วยค่า 12.5 เมื่อเวลาผ่านไป 23 และ 24 นาทีตามลำดับ (แสดงดังตารางที่ 7 และ ภาพที่ 29)

ตารางที่ 7 แสดงค่าความเป็นกรด - เบสของตัวอย่างการศึกษาเมื่อเวลาผ่านไป (นาที)

เวลา (นาที)	ชนิดซีเมนต์			เวลา (นาที)	ชนิดซีเมนต์		
	MTA	Elephant	KILAN		MTA	Elephant	KILAN
0	10.7	11.5	12.1	31	12.5	12.5	12.6
1	11.1	11.6	12.4	32	12.5	12.5	12.6
2	11.4	11.6	12.4	33	12.5	12.5	12.6
3	11.5	11.6	12.4	34	12.5	12.5	12.6
4	11.6	11.6	12.5	35	12.5	12.5	12.6
5	11.7	11.6	12.5	36	12.5	12.5	12.6
6	11.8	11.6	12.5	37	12.5	12.5	12.6
7	11.8	11.6	12.5	38	12.5	12.5	12.6
8	11.7	11.7	12.5	39	12.5	12.5	12.6
9	11.8	11.7	12.5	40	12.5	12.5	12.6
10	11.9	11.8	12.6	41	12.5	12.5	12.6
11	11.9	11.8	12.6	42	12.5	12.5	12.6
12	11.9	11.9	12.6	43	12.5	12.5	12.6
13	11.9	12	12.6	44	12.5	12.5	12.6
14	11.9	12.2	12.6	45	12.5	12.5	12.6
15	11.9	12.4	12.6	46	12.5	12.5	12.6
16	12	12.5	12.6	47	12.5	12.5	12.6
17	12.2	12.5	12.6	48	12.5	12.5	12.6
18	12.3	12.5	12.6	49	12.5	12.5	12.6
19	12.3	12.5	12.6	50	12.5	12.5	12.6
20	12.4	12.5	12.6	51	12.5	12.5	12.6
21	12.4	12.5	12.6	52	12.5	12.5	12.6
22	12.4	12.5	12.6	53	12.5	12.5	12.6
23	12.5	12.5	12.6	54	12.5	12.5	12.6
24	12.5	12.5	12.6	55	12.5	12.5	12.6
25	12.5	12.5	12.6	56	12.5	12.5	12.6
26	12.5	12.5	12.6	57	12.5	12.5	12.6
27	12.5	12.5	12.6	58	12.5	12.5	12.6
28	12.5	12.5	12.6	59	12.5	12.5	12.6
29	12.5	12.5	12.6	60	12.5	12.5	12.6
30	12.5	12.5	12.6				



ภาพที่ 29 แสดงค่าความเป็นกรด - เบสของตัวอย่างการศึกษา

การศึกษาเวลาแข่งตัว

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สี่ขาวดราข้างเผือกผสมกับบิสมัทออกไซด์จะมีระยะเวลาแข่งตัวเริ่มต้น 110 ± 4.50 นาที และแข่งตัวเต็มที 225.40 ± 2.27 นาที ซึ่งน้อยกว่าเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สี่ขาวดราสีเทาผสมกับบิสมัทออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่เอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สี่ขาวดราสีเทาผสมกับบิสมัทออกไซด์มีระยะเวลาแข่งตัวเริ่มต้นไม่แตกต่างกัน โดยมีค่า 149.40 ± 1.50 นาที และ 143.40 ± 9.29 นาทีตามลำดับ แต่มีระยะเวลาแข่งตัวเต็มทีต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยไวท์โปรรูทเอ็มทีเอใช้ระยะเวลาเพื่อแข่งตัวเต็มที 315.80 ± 2.53 นาที ซึ่งนานกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สี่ขาวดราที่ผลิตในประเทศไทยตราสีเทาผสมกับบิสมัทออกไซด์ที่มีค่า 265.80 ± 2.69 นาที (แสดงดังตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาแข่งตัวเริ่มต้น และเวลาแข่งตัวเต็มที (นาที)

ชนิดของวัสดุ	เวลาแข่งตัวเริ่มต้น (นาที)		เวลาแข่งตัวเต็มที (นาที)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ	149.40	1.50	315.80
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สี่ขาวดรา ข้างเผือกผสมกับบิสมัทออกไซด์	110.60 ^a	4.50	225.40 ^a	2.27
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สี่ขาวดรา สีเทาผสมกับบิสมัทออกไซด์	143.40	9.29	265.80	2.69

(a = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ: $p < 0.05$)

การศึกษาความทนแรงอัด

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรปมาตรฐานซึ่งผูกผสมกับบิสม์ทอกไซด์ มีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยมากที่สุด เมื่อแช่ทิ้งไว้ในน้ำ 1 วัน รองลงมาเป็นไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรปมาตรฐานซึ่งผูกผสมกับบิสม์ทอกไซด์ โดยมีค่า 37.027 ± 0.68225 , 35.8 ± 0.15239 และ 32.292 ± 1.59671 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แต่เมื่อแช่ตัวอย่างทิ้งไว้ในน้ำ 21 วันพบว่า ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอมีค่าความทนแรงอัดสูงสุด รองลงมาเป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรปมาตรฐานซึ่งผูกผสมกับบิสม์ทอกไซด์ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรปมาตรฐานซึ่งผูกผสมกับบิสม์ทอกไซด์ โดยมีค่า 449.686 ± 1.14214 , 103.467 ± 0.08460 และ 85.805 ± 0.38471 เมกะปาสคาล ตามลำดับ (แสดงดังตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความทนแรงอัดของตัวอย่างการศึกษา ในแต่ละช่วงเวลา (MPa)

ชนิดของวัสดุ	ค่าความทนแรงอัด (MPa)			
	1 วัน		21 วัน	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ	35.80	0.15	449.69	1.14 ^a
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรปมาตรฐานซึ่งผูกผสมกับบิสม์ทอกไซด์	37.02 ^a	0.68	103.50	0.08
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวยุโรปมาตรฐานซึ่งผูกผสมกับบิสม์ทอกไซด์	32.29	1.60	85.80	0.38

(a = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ; $p < 0.05$)

สภาพละลายได้

ซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการละลายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน 7 วัน และ 21 วัน (แสดงดังตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสภาพละลายได้ของตัวอย่างการศึกษาเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน 7 วัน และ 21 วัน (ร้อยละ)

ชนิดของวัสดุ	สภาพละลายได้ (ร้อยละ)					
	หลังจาก 1 วัน		หลังจาก 7 วัน		หลังจาก 21 วัน	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ	0.79429	0.12650	0.39521	0.17977	0.20967	0.09063
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สี ขาวตราช้างเผือกผสม บิสม์ทออกไซด์	0.76062	0.12238	0.33526	0.11962	0.15659	0.08846
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สี ขาวตรากิเลนผสม บิสม์ทออกไซด์	0.78842	0.12303	0.25668	0.13186	0.19805	0.17539