

## ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

การรายงานผลการทดสอบประกอบด้วยการทดสอบ 3 หัวข้อได้แก่คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ การทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์และการทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์ ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบช่วงก่อนคอนกรีตแข็งตัวและหลังคอนกรีตแข็งตัว ตัวอย่างน้ำสลัดจ์ที่ใช้ในการทดสอบจะเก็บจากป่อกายกากของโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ 3 โรงคือ ศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย บริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัดและบริษัท ทีพีไอ คอนกรีต จำกัด

ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานทั้ง 3 แห่งมีรายละเอียดคร่าวๆดังนี้คือศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย ของบริษัทอิตาเลียน-ไทย ดีเวล็อบเมนต์ จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ที่อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ศูนย์แห่งนี้เป็นแหล่งผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่สำคัญของบริษัท โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้อันได้แก่ เสาคีม หมอนรถไฟ ชิ้นส่วนบ้านสำเร็จรูป บล็อกคอนกรีตรับน้ำหนัก ชิ้นส่วนอุโมงค์ใต้ดิน ชิ้นส่วนสะพาน จะถูกป้อนให้กับโครงการที่กำลังดำเนินการอยู่ในปัจจุบันคือ โครงการสนามบินสุวรรณภูมิ โครงการบ้านเอื้ออาทรเป็นต้น กำลังการผลิตคอนกรีตของโรงงานมีค่าเฉลี่ยประมาณ 500 ลบม. ต่อวัน โรงงานแห่งที่ 2 คือโรงงานของบริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ที่ถนนสรงประภา เขตดอนเมือง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ลักษณะของโรงงานจะผลิตคอนกรีตทั่วไปจำหน่ายให้กับลูกค้า ซึ่งมีทั้งส่วนราชการและเอกชนที่อยู่ในบริเวณโดยรอบ กำลังการผลิตคอนกรีตของโรงงานมีค่าเฉลี่ยประมาณ 100 ลบม. ต่อวัน ในส่วนโรงงานแห่งที่ 3 คือโรงงานของบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี โดยโรงงานจะผลิตคอนกรีตทั่วไปจำหน่ายให้กับลูกค้าที่อยู่ในบริเวณโดยรอบเช่นโครงการก่อสร้างในวัดธรรมกาย ปริมาณการผลิตคอนกรีตของโรงงานมีค่าเฉลี่ยประมาณ 300 ลบม. ต่อวัน

### 5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่จะใช้ในการวิจัยซึ่งประกอบด้วย มวลรวม ปูนซีเมนต์ ปอร์ิตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำ น้ำสลัดจ์ ผงสลัดจ์ ใ้ลยและสารเคมีผสมเพิ่ม แสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

### 5.1.1 ผลการทดสอบมวลรวม

การทดสอบมวลรวมประกอบด้วยมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด มีขั้นตอนเริ่มจากการทำความสะอาดและทำการสุ่มเก็บตัวอย่างที่จะใช้ในการวิจัย โดยหลังจากเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บและแยกวัสดุออกมาเพื่อใช้ในการวิจัยต่างหาก ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 จากผลการทดสอบพบว่ามวลรวมทั้ง 2 ประเภทอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปผสมคอนกรีตได้ โดยผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C33

#### ตารางที่ 5.1

รายละเอียดคุณสมบัติของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการวิจัย

ชนิดการทดสอบ	ศูนย์นิคม อุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	บริษัท เอเชีย ผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์ จำกัด	บริษัท ทีพีไอ คอนกรีต จำกัด	มาตรฐาน ASTM C33
หน่วยน้ำหนัก (กก./ม <sup>3</sup> )	1,535	1,553	1,506	-
ร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม	50.05	53.52	45.20	-
ร้อยละของค่าความคงตัว	0.36	1.52	0.87	18.00
ร้อยละของค่าปริมาณส่วนละเอียดกว่าตะแกรงเบอร์ 200	0.38	0.75	0.27	-
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.69	2.53	2.57	-
ร้อยละของค่าการดูดซับน้ำ	0.71	0.65	0.78	-
ความทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบ	18.27	20.19	25.84	50.00
ขนาดคละ	หมายเลข 67 <sup>1</sup>	หมายเลข 67 <sup>1</sup>	หมายเลข 67 <sup>1</sup>	-
โมดูลัสความละเอียด	6.68	6.55	6.53	-
ร้อยละของค่าปริมาณดินและส่วนที่แตก่วน	0.13	0.55	0.20	3.00

หมายเหตุ <sup>1</sup> ขนาดคละของชุดตะแกรงหมายเลข 67 ประกอบด้วยตะแกรงขนาด 1 นิ้ว ¾ นิ้ว

หมายเลข 4 และ 8 ตามลำดับ รายละเอียดผลการทดสอบแสดงได้ดังภาคผนวกที่ ก.2

## ตารางที่ 5.2

รายละเอียดคุณสมบัติของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการวิจัย

ชนิดการทดสอบ	ศูนย์นิคม อุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	บริษัทเอเชีย ผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์ จำกัด	บริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด	มาตรฐาน ASTM C33
หน่วยน้ำหนัก (กก./ม <sup>3</sup> )	1,615	1,653	1,621	-
ร้อยละช่องว่างระหว่างมวลรวม	32.52	35.66	31.02	-
ร้อยละของค่าความคงตัว	1.70	1.95	2.13	-
ร้อยละของค่าปริมาณส่วน ละเอียดกว่าตะแกรงเบอร์ 200	2.15	3.20	3.34	5.00
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.38	2.43	2.37	-
ร้อยละของค่าการดูดซับน้ำ	0.68	0.72	0.78	-
ปริมาณสารอินทรีย์	1 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>
ขนาดคละ	ASTM C33	ASTM C33	ASTM C33	ASTM C33
โมดูลัสความละเอียด	2.58	2.67	2.61	-
ร้อยละของค่าปริมาณดินและ ส่วนที่แตกร่วน	0.25	0.32	0.12	3.00

หมายเหตุ <sup>1</sup> ตัวเลขที่แสดงเป็นปริมาณสารอินทรีย์เทียบตามสีของสารละลายมาตรฐาน ปริมาณสารอินทรีย์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 5 โดยตัวเลขแสดงค่าที่ผ่านเกณฑ์คือค่าที่ ตั้งแต่ 3 ลงมา

## 5.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จากการตรวจสอบและเก็บตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ใช้ในโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จทั้งหมด แห่งพบว่าในส่วนโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จของศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลิตโดยบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ส่วน โรงงานของบริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด ใช้ปูนจากโรงงานของบริษัทเอง และบริษัททีพีไอ คอนกรีตก็ใช้ปูนซีเมนต์จากโรงงานของบริษัทเองเช่นกัน ส่วนการทดสอบซีเมนต์เฟสต์ผสมด้วยน้ำ

สลัดจ์จากทั้ง 3 โรงงานจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 トラ้างในการทดสอบทั้งหมด รายละเอียดผลการทดสอบปูนซีเมนต์แสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C150

### ตารางที่ 5.3

รายละเอียดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้ในการวิจัย

ชนิดการทดสอบ	ศูนย์นิคม อุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	บริษัทเอเชีย ผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์ จำกัด	บริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด	มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์	มาตรฐาน ASTM C150
ค่ากำลังอัด (กก./ซม <sup>2</sup> )					
- อายุ 3 วัน	257	129	142	133	มากกว่า 123
- อายุ 7 วัน	288	197	217	209	มากกว่า 194
ค่าระยะเวลาการ ก่อตัว (นาที)					
- เริ่มต้น	111	89	92	95	มากกว่า 45
- สิ้นสุด	212	161	207	187	น้อยกว่า 375
ค่าพื้นที่ผิว จำเพาะ (ซม <sup>2</sup> /ก.)	3,656	3,331	3,415	3,219	มากกว่า 2,800

#### 5.1.3 ผลการทดสอบน้ำ

การตรวจสอบน้ำเป็นการประเมินคุณภาพน้ำที่ใช้ในโรงงานมีปริมาณสารเคมีที่เกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนดไว้หรือไม่ โดยในการทดสอบใช้รายละเอียดการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C94 ในการตรวจสอบประกอบด้วยการทดสอบหาปริมาณสารเคมีได้แก่ คลอไรด์ ซัลเฟต ปริมาณของแข็งทั้งหมด ค่าความเป็นกรดต่างและปริมาณอัลคาไล จากการศึกษพบว่าปริมาณอัลคาไลที่มาตรฐาน ASTM C94 กำหนดไว้เป็นรูปแบบอัลคาไลที่เรียกว่าปริมาณอัลคาไลเทียบเท่า (Equivalent Alkalies) ซึ่งอยู่ในรูปของผลรวมของโซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) และ

โปแตสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) ตามรูปสมการ  $Na_2O + 0.658K_2O$  สารเคมีที่กำหนดไว้ 2 ตัวนี้ถ้ามีปริมาณที่มากเกินไปถึงจุดหนึ่งจะทำให้คอนกรีตมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในคอนกรีต มีผลทำให้เนื้อคอนกรีตขยายตัวจนเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งค่าปริมาณสารอัลคาไลเทียบเท่าที่กำหนดไว้สำหรับปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำคือน้อยกว่าร้อยละ 0.6

จากการตรวจสอบข้อมูลของทั้ง 3 โรงงานพบว่าวิธีการทดสอบปริมาณอัลคาไลในตัวอย่างน้ำเพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีตของโรงงานทั้ง 3 แห่งจะใช้วิธีการทดสอบปริมาณอัลคาไลหรือค่าอัลคาลินิตีในรูปแบบปริมาณอัลคาไลทั้งหมด (Total Alkalies) แสดงผลในรูปแบบปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) การทดสอบค่าปริมาณอัลคาไลทั้งหมดทดสอบด้วยการไตเตรทหาปริมาณส่วนที่เป็นประจุลบ  $HCO_3^-$   $CO_3^{2-}$   $OH^-$  ในน้ำ ซึ่งค่าอัลคาไลทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับปริมาณอัลคาไลที่แตกตัวจากส่วนที่เป็นประจุบวกรวมถึงโซเดียมออกไซด์และโปแตสเซียมออกไซด์ (Werner Stumm and James J. Morgan, 1981) แสดงดังสมการ (5.1)

$$\begin{aligned} Alk_{ca} &= [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-] - [H^+] \\ &= [Na^+] + [K^+] + 2[Ca^{2+}] + 2[Mg^{2+}] - [Cl^-] - 2[SO_4^{2-}] - [NO_3^{2-}] \end{aligned} \quad (5.1)$$

โดยที่ $Alk_{ca}$	คือ ปริมาณอัลคาไลทั้งหมดแสดงผล	
	ในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนต	(โมล/ลิตร)
$HCO_3^-$	คือ ไบแคลเซียมคาร์บอเนตอิออน	(โมล/ลิตร)
$CO_3^{2-}$	คือ คาร์บอเนตอิออน	(โมล/ลิตร)
$OH^-$	คือ ไฮดรอกไซด์อิออน	(โมล/ลิตร)
$H^+$	คือ ไฮโดรเจนอิออน	(โมล/ลิตร)
$Na^+$	คือ โซเดียมอิออน	(โมล/ลิตร)
$K^+$	คือ โปแตสเซียมอิออน	(โมล/ลิตร)
$Ca^{2+}$	คือ แคลเซียมอิออน	(โมล/ลิตร)
$Mg^{2+}$	คือ แมกนีเซียมอิออน	(โมล/ลิตร)
$Cl^-$	คือ คลอไรด์อิออน	(โมล/ลิตร)
$SO_4^{2-}$	คือ ซัลเฟตอิออน	(โมล/ลิตร)
$NO_3^{2-}$	คือ ไนเตรตอิออน	(โมล/ลิตร)

การหาปริมาณอัลคาไลในรูปของโซเดียมออกไซด์และโปแตสเซียมออกไซด์พบว่าต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการทดสอบไม่สามารถใช้วิธีการไตเตรตหาในรูปสารละลายได้ ดังนั้นการทดสอบน้ำที่ใช้ผลิตคอนกรีตในโรงงานจึงนิยมใช้วิธีการที่สะดวกและสามารถทำได้ตามห้องปฏิบัติการทั่วไป การทดสอบน้ำที่ใช้งานวิจัยจึงเลือกที่จะทดสอบปริมาณอัลคาไลในรูปแบบที่ปฏิบัติกันอยู่เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบกับข้อมูลเดิมและปริมาณอัลคาไลในรูปของค่าปริมาณอัลคาไลทั้งหมดก็เป็นค่าที่แสดงรวมถึงปริมาณอัลคาไลในรูปของโซเดียมออกไซด์และโปแตสเซียมออกไซด์อยู่ด้วย ผลการทดสอบของน้ำจากโรงงานทั้ง 3 แห่งและน้ำที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่างซีเมนต์เพสต์แสดงดังตารางที่ 5.4 จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างมีปริมาณอัลคาไลอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C94

#### 5.1.4 ผลการทดสอบน้ำสลัดจ์

หลังจากทำการเก็บตัวอย่างจากบ่อคายากาก น้ำสลัดจ์จะถูกกรองแยกส่วนที่เป็นมวลรวมออก โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตะแกรงเบอร์ 50 มีขนาดของตะแกรงเท่ากับ 0.30 มม. ในการร่อนแยกต่อจากนั้นตัวอย่างน้ำสลัดจ์บางส่วนจะนำไปทดสอบหาปริมาณสารเคมี โดยใช้ตามรายละเอียดการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C94 โดยการทดสอบค่าปริมาณอัลคาไลจะทำการทดสอบทั้งในรูปแบบปริมาณอัลคาไลทั้งหมดและปริมาณอัลคาไลเทียบเท่า ซึ่งการทดสอบหาปริมาณโซเดียมออกไซด์และโปแตสเซียมออกไซด์ในน้ำสลัดจ์จะทดสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescent ทำการทดสอบโดยแผนกคุณภาพมาตรฐานและสิ่งแวดล้อมของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ทดสอบหาปริมาณอัลคาไลเทียบเท่าต้องเตรียมตัวอย่างในรูปผงสลัดจ์ ดังนั้นการรายงานผลการทดสอบค่าปริมาณอัลคาไลเทียบเท่าจึงจะรายงานผลในหัวข้อการทดสอบผงสลัดจ์หัวข้อที่ 5.1.5

ผลการทดสอบของน้ำสลัดจ์ของโรงงานทั้ง 3 แห่งแสดงได้ดังตารางที่ 5.5 พบว่าปริมาณคลอไรด์และปริมาณซัลเฟตในน้ำสลัดจ์มีปริมาณไม่แตกต่างจากปริมาณที่พบในตัวอย่างน้ำประปาที่ทำการทดสอบในหัวข้อผ่านมา จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์และปริมาณซัลเฟตมีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C94 ส่วนค่าปริมาณอัลคาไลในรูปปริมาณอัลคาไลทั้งหมดพบว่าค่าที่สูงเกินเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้ทำให้ทราบว่าค่าปริมาณอัลคาไลในรูปปริมาณอัลคาไลทั้งหมดของน้ำสลัดจ์ไม่สามารถใช้ในการพิจารณาการผ่านเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C94 ได้ จากผลทดสอบพบว่าตัวอย่างน้ำสลัดจ์จากทั้ง 3 โรงงานมีค่าความเป็น

กรดต่างที่สูง โดยมีค่าที่มากกว่า 12 เนื่องจากน้ำสลัดจ์มีผลิตภัณฑ์จากปูนซีเมนต์ผสมอยู่ ส่วนค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำสลัดจ์จากตัวอย่างทั้งสามโรงงานพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 56,325 ถึง 73,126 มก./ล. โดยค่าที่ทดสอบได้นี้เป็นค่าของน้ำสลัดจ์ที่ผ่านการร่อนและสุ่มตักมาตรวจสอบ โดยให้มีปริมาณความเข้มข้นของตะกอนใกล้เคียงกัน ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำสลัดจ์ทั้งสามโรงงานพบว่ามีค่าที่สูงกว่าน้ำประปาที่มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.993 เนื่องจากน้ำสลัดจ์มีส่วนที่เป็นตะกอนอยู่จำนวนหนึ่ง

#### ตารางที่ 5.4

รายละเอียดคุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการวิจัย

ชนิดการทดสอบ	ศูนย์นิคม อุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	บริษัทเอเชีย ผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์ จำกัด	บริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด	มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์	มาตรฐาน ASTM C94
ปริมาณคลอไรด์ (มก./ล.)	8.12	37.15	6.53	16.53	500
ปริมาณซัลเฟต (มก./ล.)	52.38	68.78	45.12	32.65	3,000
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	70.22	35.11	23.45	50.38	50,000
ปริมาณอัลคาไลน์ตี (CaCO <sub>3</sub> ) (มก./ล.)	6.52	13.50	11.64	68.61	-
ความเป็นกรดต่าง	6.9	7.5	7.6	7.2	-

ตารางที่ 5.5  
รายละเอียดคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์ที่ได้จากการสูมเก็บ

ชนิดการทดสอบ	ศูนย์นิคม อุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	บริษัทเอเชีย ผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์ จำกัด	บริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด	มาตรฐาน ASTM C94
ปริมาณคลอไรด์ (มก./ล.)	26.50	5.90	17.42	500
ปริมาณซัลเฟต (มก./ล.)	22.35	17.32	23.14	3,000
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	56,325	65,622	73,126	50,000
ปริมาณอัลคาไลน์ดี (CaCO <sub>3</sub> ) (มก./ล.)	1,593	2,755	2,420	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.051	1.058	1.062	-
ความเป็นกรดต่าง	12.15	12.35	12.43	-

#### 5.1.5 ผลการทดสอบผงสลัดจ์

ผงสลัดจ์ที่ได้จากตัวอย่างน้ำสลัดจ์ตัวอย่างของทั้ง 3 โรงงานบางส่วนจะถูกนำไปทดสอบหาค่า ปริมาณสารประกอบออกไซด์โดยใช้วิธี X-ray Fluorescent (XRF) ทำการทดสอบโดยแผนกคุณภาพมาตรฐานและสิ่งแวดล้อมของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) การทดสอบองค์ประกอบของผงสลัดจ์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) ทำการทดสอบโดยบริษัทสยามวิจัยและพัฒนา จำกัด ส่วนการถ่ายภาพขยายของผงสลัดจ์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และการวิเคราะห์หาขนาดการกระจายตัว (Size Distribution) ของผงสลัดจ์ ทำการทดสอบโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รายละเอียดผลการทดสอบผงสลัดจ์แสดงเป็นหัวข้อตามลำดับดังนี้

### 5.1.5.1 ผลการทดสอบลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของผงสัลดจ์

ผลการทดสอบปริมาณสารประกอบออกไซด์โดยใช้วิธี X-ray Fluorescent (XRF) แสดงได้ดังตารางที่ 5.6 จากผลการทดสอบสามารถคำนวณหาค่าปริมาณอัลคาไลเทียบเท่าของตัวอย่างผงสัลดจ์จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย บริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด และบริษัทพีไอ คอนกรีต จำกัด ได้เท่ากับร้อยละ 0.56 0.54 และ 0.47 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณที่ได้เป็นค่าที่คำนวณได้จากปริมาณสารในรูปผงสัลดจ์ เมื่อเทียบย้อนกลับหาปริมาณที่มีอยู่ในน้ำสัลดจ์ โดยคำนวณจากปริมาณผงสัลดจ์ในน้ำสัลดจ์ที่ค่าเท่ากับร้อยละ 10 พบว่าค่าปริมาณอัลคาไลเทียบเท่าของตัวอย่างน้ำสัลดจ์ทั้งสามโรงงานจะมีค่า 560 540 และ 470 มก./ล. ตามลำดับ ผลการคำนวณที่ได้พบว่าตัวอย่างน้ำสัลดจ์ทั้งสามโรงงานมีค่าปริมาณอัลคาไลต่ำกว่าเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C94 คือ 600 มก./ล. จากผลทดสอบพบว่าปริมาณสารประกอบออกไซด์ของผงสัลดจ์ มีค่าอยู่ระหว่างค่าปริมาณของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ชัชวาล เศรษฐบุตตร, 2544) และเถ้าลอย (ธนวัฒน์ นุกุลการ, 2547) การเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนคือค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบหาสิ่งเจือปนในปูนซีเมนต์ ตลอดจนทดสอบหาปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) จากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันในปูนซีเมนต์ (Kosmatka S. et al, 2002) ซึ่งผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับความเป็นจริงที่ผงสัลดจ์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน มวลรวมขนาดเล็กและเถ้าลอยดังแสดงในภาพถ่ายขยายของผงสัลดจ์ภาพที่ 5.4, 5.6, 5.8 และผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี XRD แสดงดังตาราง 5.8

## ตารางที่ 5.6

รายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของผงสัลดจ์จาก 3 โรงงานด้วยวิธี XRF

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ศูนย์นิคม อุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	บริษัทเอเชีย ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด	บริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	31.33	28.85	30.88
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	25.05	35.17	30.31
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.39	8.25	7.32
ไอรอนออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.99	5.18	3.98
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.59	1.69	1.23
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	0.85	0.70	0.65
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	0.00	0.08	0.04
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	0.03	0.03	0.03
ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	0.00	0.00	0.00
การเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้	21.07	22.69	23.11

ส่วนผลการทดสอบองค์ประกอบของผงสัลดจ์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) และวิเคราะห์ผลตัวอย่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถแสดงดังตารางที่ 5.8 โดยแสดงผลการทดสอบผงสัลดจ์ของศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทยแสดงดังภาพที่ 5.1 ส่วนผลการทดสอบผงสัลดจ์ของบริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัดแสดงดังภาพที่ 5.2 และผลการทดสอบผงสัลดจ์ของบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัดแสดงดังภาพที่ 5.3 จากผลทดสอบพบว่าการทดสอบการหาองค์ประกอบของผงสัลดจ์ด้วยวิธี XRD แสดงผลการทดสอบที่ต่างจากการทดสอบด้วยวิธี XRF กล่าวคือวิธี XRF แสดงในรูปปริมาณของออกไซด์ที่มีอยู่ในผงสัลดจ์ แต่ไม่สามารถแสดงผลออกถึงรูปแบบสารประกอบในผงสัลดจ์ ซึ่งการทดสอบด้วยวิธี XRD สามารถแสดงผลออกถึงรูปแบบสารประกอบในผงสัลดจ์ แต่ไม่สามารถระบุถึงสัดส่วนปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในผงสัลดจ์ได้ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบทั้ง 2 วิธีให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน โดยจากผลการทดสอบด้วยวิธี XRF พบว่าปริมาณออกไซด์ที่มีปริมาณสูง 3 ลำดับแรกของผงสัลดจ์คือซิลิคอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ สอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยวิธี XRD ที่

พบว่าสารประกอบในผงสัลดัจที่ตรวจพบทั้ง 3 โรงงานประกอบด้วย คิวอท์ แคลไซต์ เอ็ททริงไท์ และแคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์คาร์บอนไฮเดรต จากผลการทดสอบด้วยวิธี XRD พบว่าสารประกอบในผงสัลดัจบางส่วนเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้มีค่าผลการทดสอบการสูญเสียจากการเผาไหม้ที่สูง

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบผงสัลดัจของทั้งสองวิธีพบว่ามีจุดเด่นที่แตกต่างกัน การทดสอบผงสัลดัจด้วยวิธี XRF มีความเหมาะสมในทางปฏิบัติมากกว่าเนื่องจากสามารถวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมออกไซด์และโปแตสเซียมออกไซด์เพื่อหาค่าปริมาณอัลคาไลเทียบเท่า ส่วนการทดสอบด้วยวิธี XRD มีขีดจำกัดในการแสดงผลปริมาณสัดส่วนขององค์ประกอบในผงสัลดัจและการแสดงผลในรูปแบบสารประกอบเหมาะสำหรับการแปรผลในระดับการทำงานวิจัยมากกว่าสำหรับการผลิตคอนกรีตทั่วไป

#### ตารางที่ 5.7

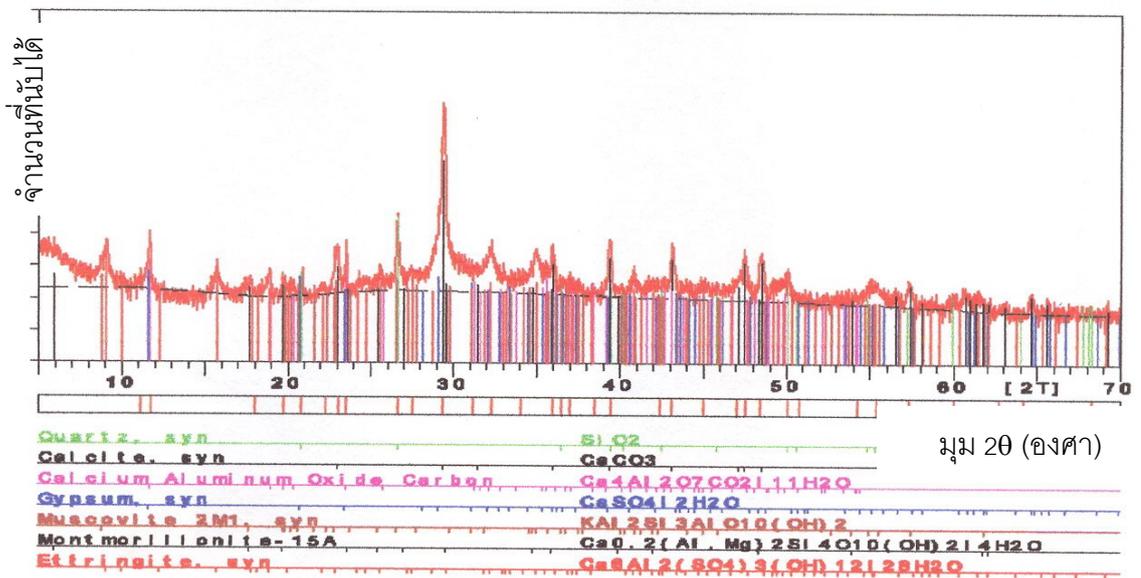
การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 แก้วลอยและผงสัลดัจจาก 3 โรงงาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1	แก้วลอยแม่เกาะ	ผงสัลดัจจาก 3 โรงงาน
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	60-67	27.97-22.51	28.85-31.33
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	17-25	32.50-57.13	25.05-35.17
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3-8	17.08-25.97	7.32-8.25
ไอรอนออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.5-0.6	10.53-16.92	3.98-5.18
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.1-5.5	1.90-3.65	1.23-1.69
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	0.3-1.5	0.85-3.15	0.65-0.85
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)		0.71-1.56	0.00-0.08
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	1-3	0.70-5.08	0.03
ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	0.00	0.00	0.00
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	< 3	< 1	21.07-23.11

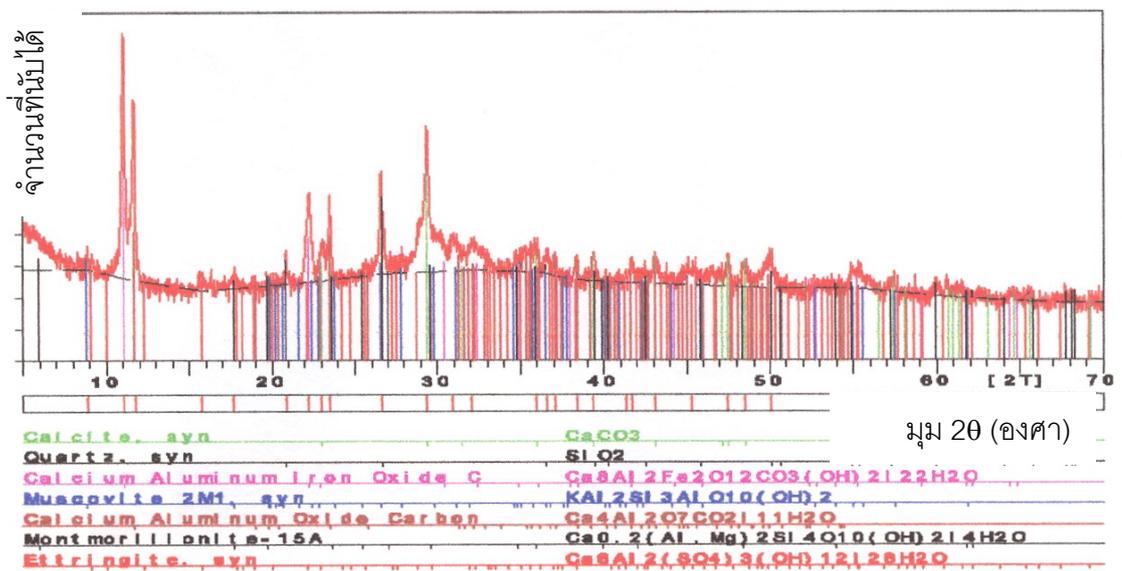
## ตารางที่ 5.8

รายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของผงสัจจาก 3 โรงงานด้วยวิธี XRD

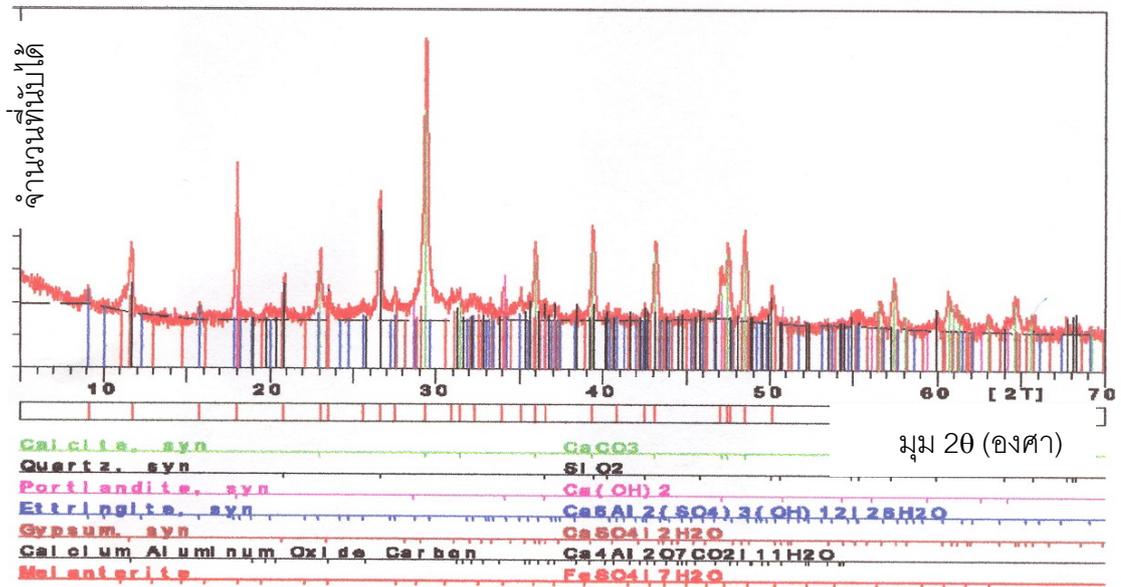
องค์ประกอบทางเคมี		ศูนย์นิคม อุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	บริษัทเอเชีย ผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์ จำกัด	บริษัทที่ฟิโอ คอนกรีต จำกัด
ชื่อ	สัญลักษณ์			
ควอทซ์	SiO <sub>2</sub>	พบ	พบ	พบ
แคลไซต์	CaCO <sub>3</sub>	พบ	พบ	พบ
แคลเซียมอะลูมิเนียม ออกไซด์ คาร์บอเนต ไฮเดรต	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>7</sub> CO <sub>2</sub> .11H <sub>2</sub> O	พบ	พบ	พบ
เอ็ททริงไกท์	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> .26H <sub>2</sub> O	พบ	พบ	พบ
มัสโคไวท์	KAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	พบ	พบ	-
มอนท์มอริลโลไนท์	Ca <sub>0.2</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	พบ	พบ	-
ยิบซัม	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	พบ	-	พบ
เมแลนเทอริท์	FeSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	-	-	พบ
แคลเซียมไฮดรอก ไซด์	Ca(OH) <sub>2</sub>	-	-	พบ
แคลเซียมอะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนตไฮดรอก ไซด์ไฮเดรต	Ca <sub>8</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>12</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> .22H <sub>2</sub> O	-	พบ	-



ภาพที่ 5.1 ผลการทดสอบXRD ของผงสไลด์จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย



ภาพที่ 5.2 ผลการทดสอบXRDของผงสไลด์จากบริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด

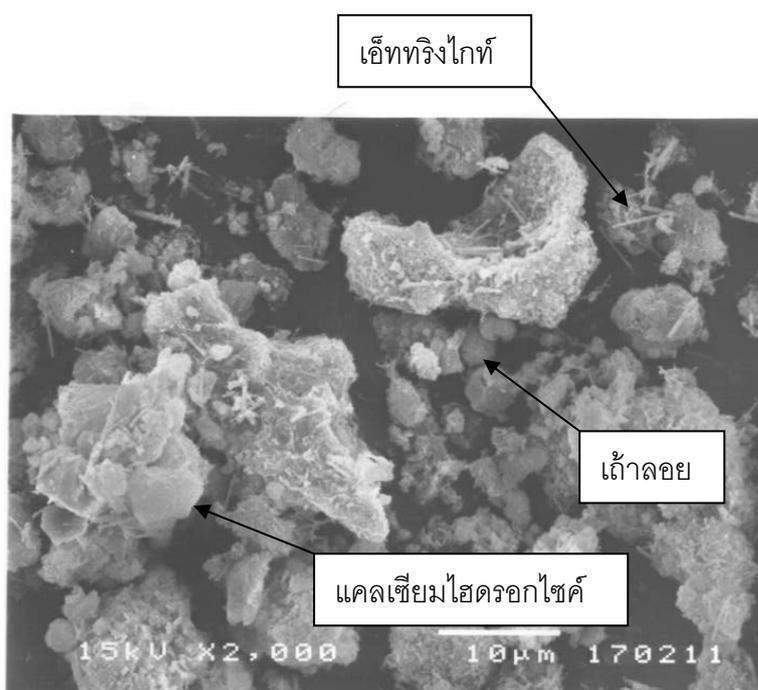


ภาพที่ 5.3 ผลการทดสอบ XRD ของผงสลัดจ์จากบริษัทที่พีไอ คอนกรีต จำกัด

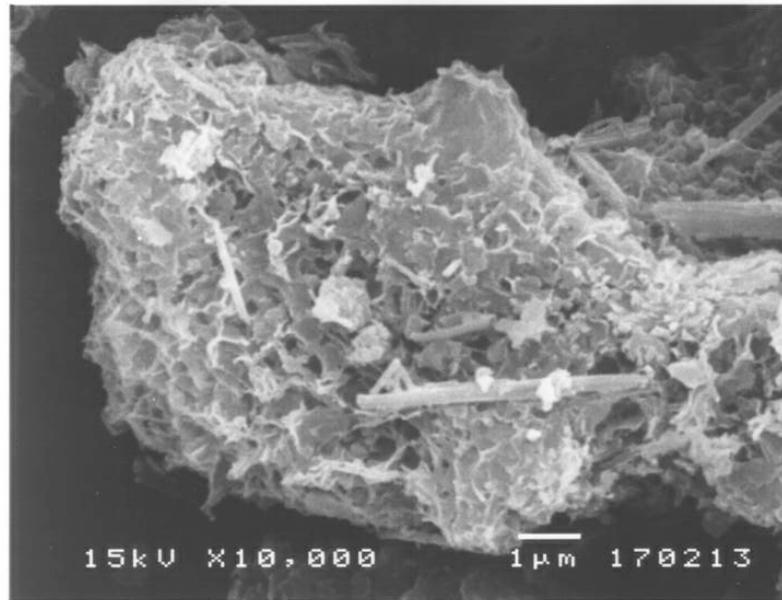
ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคผงสลัดจ์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) แสดงได้ดังภาพที่ 5.4 ถึง 5.10 โดยภาพถ่ายของผงสลัดจ์จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทยแสดงดังภาพที่ 5.4 ถึง 5.5 ภาพถ่ายของผงสลัดจ์ของบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัดแสดงดังภาพที่ 5.6 และ 5.7 ส่วนภาพถ่ายของผงสลัดจ์จากบริษัทที่พีไอ คอนกรีต จำกัดแสดงดังภาพที่ 5.8 และ 5.9 จากภาพถ่ายพบว่าผงสลัดจ์จากทั้ง 3 แหล่งประกอบไปด้วยมวลรวมขนาดเล็ก แก้วลอยที่ถูกห่อหุ้ม ยึดเกาะด้วยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และเอ็ทริงไกท์ เมื่อพิจารณาภาพถ่ายที่กำลังขยาย 10,000 เท่าพบว่าผิวของอนุภาคผงสลัดจ์มีลักษณะขรุขระ ประกอบด้วยโพรงขนาดเล็กที่เกิดจากการปฏิกิริยาไฮเดรชัน

รูปแบบอนุภาคผงสลัดจ์ที่อยู่ในน้ำสลัดจ์จะมีรูปแบบที่แตกต่างจากที่ได้จากภาพถ่ายผงสลัดจ์ เนื่องจากเมื่ออยู่ในสภาพสารละลายอนุภาคผงสลัดจ์ที่เป็นส่วนผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายน้ำ ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ตลอดจนทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแก้วลอย ลักษณะรูปแบบของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นที่สภาวะต่างๆสามารถพิจารณาจากภาพที่ 5.10 ซึ่งแสดงแผนภูมิของระบบของ  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากภาพแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH) มี

รูปแบบขึ้นอยู่กับสภาวะส่วนประกอบของ  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ในสภาวะที่มีส่วนประกอบของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ที่มาก ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะอยู่ในรูปแบบสารละลาย เมื่ออยู่ในสภาพที่มีปริมาณน้ำที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะสามารถเชื่อมตัวประสานกัน จากภาพทำให้สามารถอนุมานได้ว่าผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในน้ำสลัดจ์ย่อยที่มีปริมาณน้ำในองค์ประกอบที่สูง ทำให้มีความแข็งแรงของพันธะที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในสภาพปกติ ซึ่งผลกระทบจากผองอนุภาคในน้ำสลัดจ์นี้จะทำการศึกษาต่อไปในส่วนการทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์และการทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์



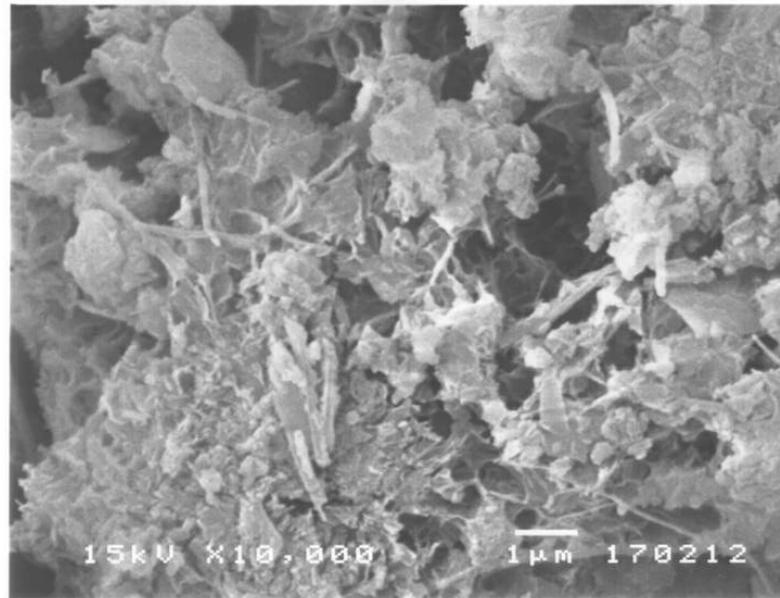
ภาพที่ 5.4 ภาพขยายอนุภาคผงสลัดจ์จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย  
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



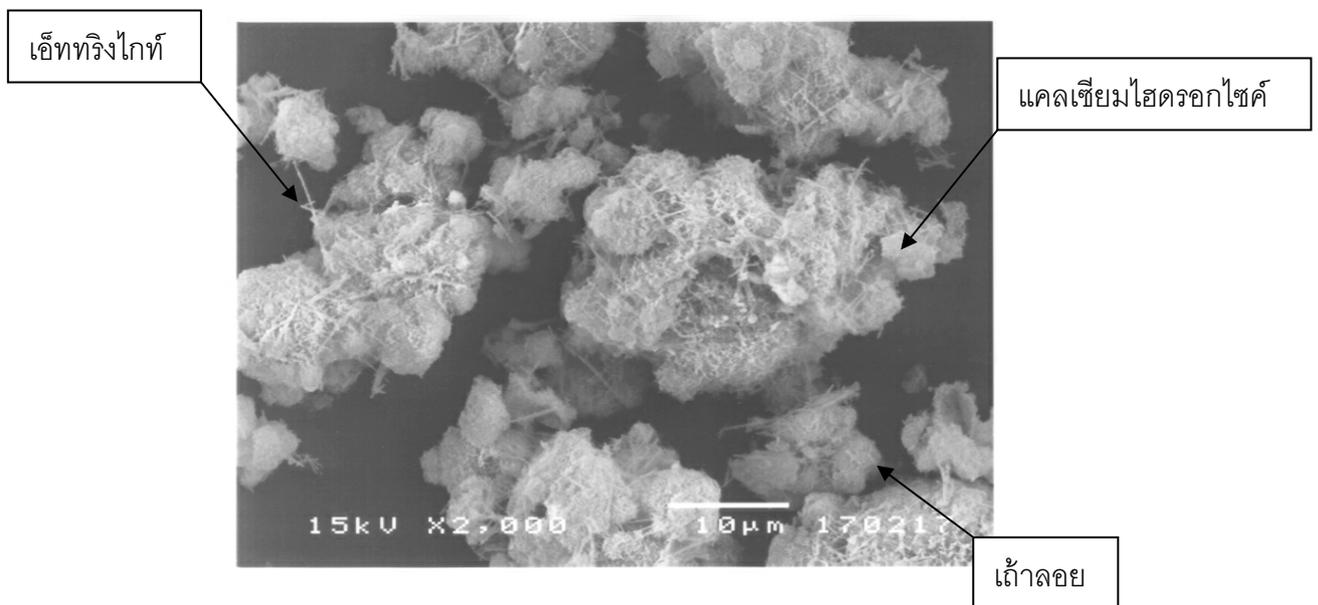
ภาพที่ 5.5 ภาพขยายอนุภาคผงสไลด์จี้จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย  
ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



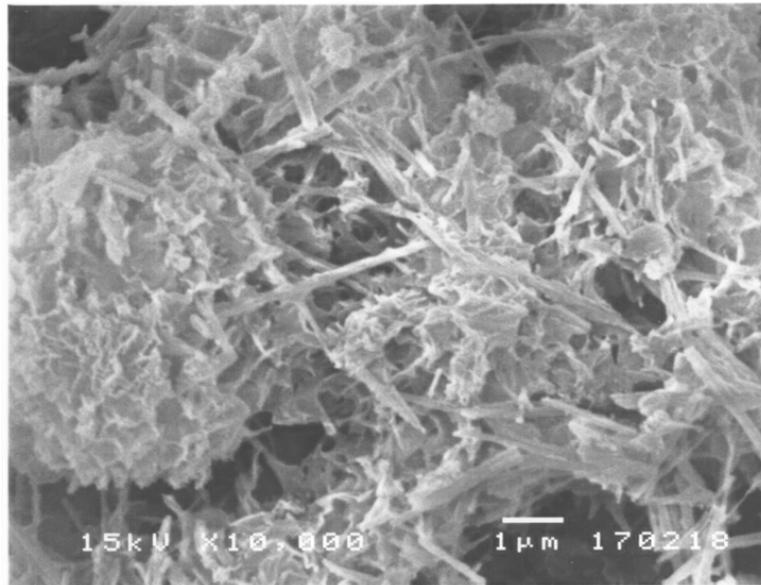
ภาพที่ 5.6 ภาพขยายอนุภาคผงสไลด์จี้จากบริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด  
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



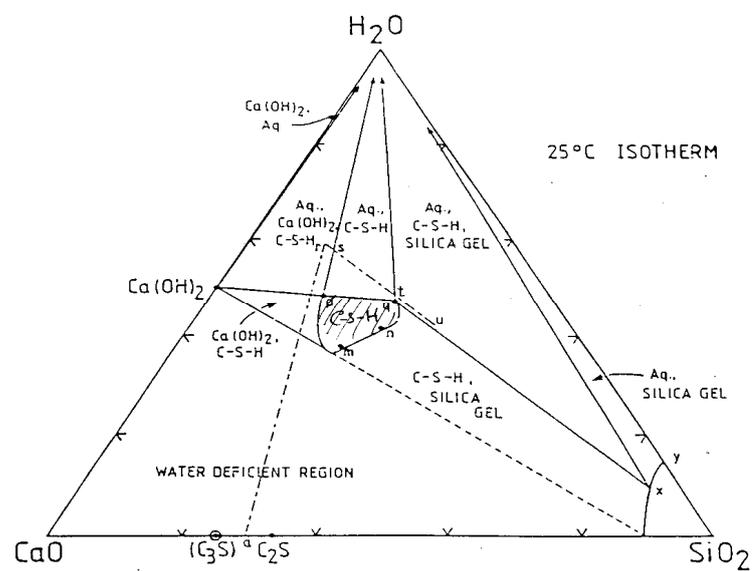
ภาพที่ 5.7 ภาพขยายอนุภาคผงสไลด์จี้จากบริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด  
ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



ภาพที่ 5.8 ภาพขยายอนุภาคผงสไลด์จี้จากบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด  
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



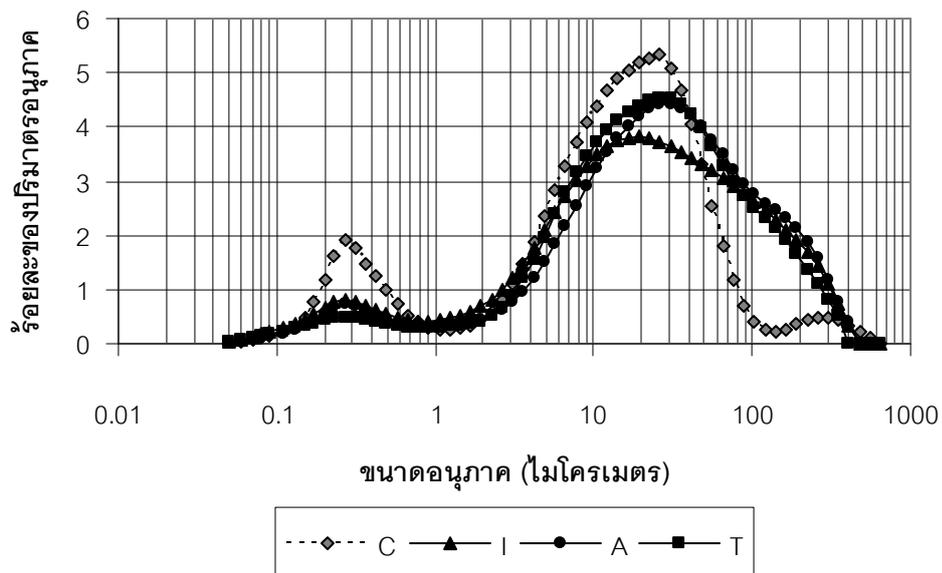
ภาพที่ 5.9 ภาพขยายอนุภาคผงสไลด์จากบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด  
ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



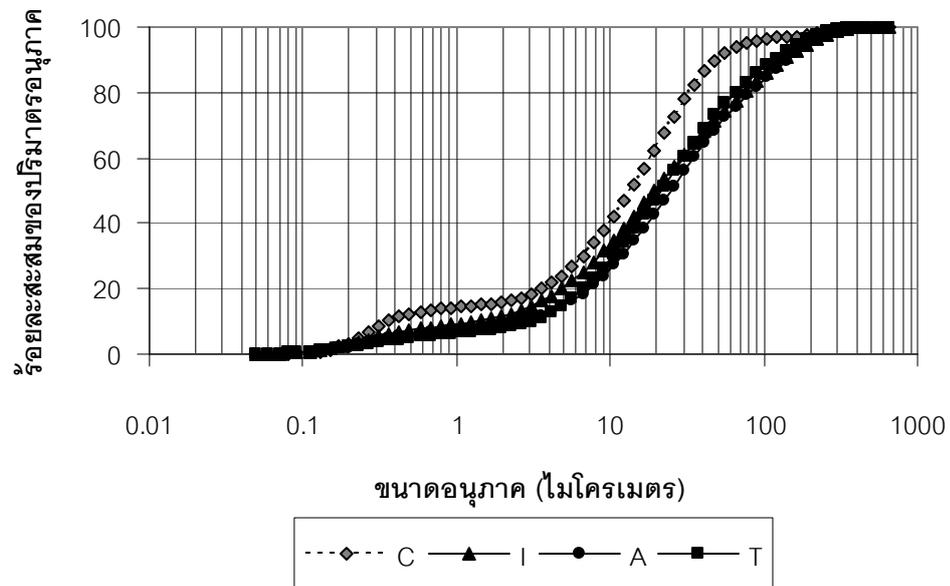
ภาพที่ 5.10 ระบบของ  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
(Glasser et al, 1987)

### 5.1.5.2 ผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดผงสัลดจ์

การทดสอบการกระจายตัว (Size Distribution) ของขนาดผงสัลดจ์จากทั้ง 3 โรงงาน และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.1 และแสดงได้ดังภาพที่ 5.11 และ 5.12 จากภาพสัญลักษณ์ C ใช้แสดงถึงตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วนสัญลักษณ์ I, A, T ใช้แสดงถึงตัวอย่างผงสัลดจ์จากโรงงานของศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย บริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด และบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัดตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าขนาดของผงสัลดจ์จะมีขนาดใหญ่สุดถึง 400 ไมโครเมตร หรือ 0.40 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับการกระจายขนาดของอนุภาคปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงสัลดจ์มีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่นำมาทดสอบซึ่งมีขนาดเท่ากับ 28.58 ไมโครเมตร ส่วนขนาดเฉลี่ยของผงสัลดจ์จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย บริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัดและบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด มีค่าเท่ากับ 50.32 55.53 และ 46.75 ไมโครเมตรตามลำดับ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ของผงสัลดจ์น่าจะมาจากส่วนที่เป็นมวลรวมละเอียดที่ผ่านการคัดแยกด้วยตะแกรงเบอร์ 50 ซึ่งมีขนาด 0.30 มม. หรือ 300 ไมโครเมตร และถูกยึดเกาะโดยผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 5.11 การกระจายขนาดของผงสัลดจ์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ภาพที่ 5.12 การกระจายขนาดสะสมของผงสัลดจ์เปรียบเทียบกับ  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

#### 5.1.6 ผลการทดสอบเถ้าลอย

จากการเก็บข้อมูลพบว่าแหล่งของเถ้าลอยที่ใช้ในโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอมิตาเลียน-ไทย ก็เหมือนกับโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จอื่น ๆ คือนำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นแหล่งผลิตเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศ รายละเอียดการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าลอยแสดงดังตารางที่ 5.9 จากผลการทดสอบเถ้าลอยที่ใช้งานอยู่ผ่านคุณสมบัติตามเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท 1014-46

ตารางที่ 5.9  
รายละเอียดคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดการทดสอบ	ศูนย์นิคมอุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	มาตรฐาน ว.ส.ท 1014-46
ค่าดัชนีกำลังอัด (กก./ซม <sup>2</sup> )		
- อายุ 7 วัน	85	มากกว่า 70
- อายุ 28 วัน	92	มากกว่า 75
ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (ซม <sup>2</sup> /ก.)	3,159	มากกว่า 2,300

#### 5.1.7 ผลการทดสอบสารเคมีผสมเพิ่มเบื้องต้น

สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ในงานคอนกรีตผสมเสร็จของศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย บริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัดและบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัดมีรายละเอียดข้อมูลที่แนะนำโดยผู้ผลิตแสดงได้ดังตารางที่ 5.10 ข้อมูลที่ได้จะใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดจะกระทำในหัวข้อที่ 5.3 การทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจืดต่อไป

ตารางที่ 5.10  
รายละเอียดคุณสมบัติของสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ในงานวิจัย

รายละเอียด	ศูนย์นิคม อุตสาหกรรม อิตาเลียน-ไทย	บริษัทเอเชีย ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด	บริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด
ชนิดสารเคมีผสมเพิ่ม	สารลดน้ำระดับสูง	สารกันซึม แบบลดน้ำ	สารลดน้ำและ หน่วงการก่อตัว
ชนิดตาม ASTM C494	F	A	D
ชื่อผลิตภัณฑ์	Mighty MX-T	Hydratite WR	Plastiment R
ค่าความถ่วงจำเพาะ	1.250	1.150	1.170
อัตราการการใช้ (มล/100กก.)	1,000	700	200