

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาเบื้องต้น

คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ดินขาว

ดินขาวได้จากการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบด้วยความร้อน โดยดินขาวดิบก่อนการปรับปรุงคุณภาพจะมีลักษณะเป็นก้อนมีสีขาวครีม ดังภาพที่ 4(ก) หลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและบดในระยะเวลาที่เหมาะสม วัสดุจะเปลี่ยนเป็นสีส้มอมชมพูมีลักษณะเป็นผงฝุ่นมากขึ้น ดังในภาพที่ 4(ข) และจากการถ่ายภาพกำลังขยายสูงด้วยเครื่อง SEM พบว่าอนุภาคดินขาวจะมีลักษณะเป็นแผ่นมีรูพรุน จับตัวกันเป็นก้อน ดังแสดงในภาพที่ 5(ก)

เถ้าลอย

เถ้าลอยหลังผ่านการบดจะมีลักษณะเป็นผงฝุ่นสีดำนี้ออมเขียว ดังภาพที่ 4(ค) และจากการถ่ายภาพกำลังขยายสูงพบว่าเถ้าลอยส่วนใหญ่จะมีลักษณะอนุภาคทรงกลม ดังแสดงในภาพที่ 5(ข)

ดินขาว:เถ้าลอย

เมื่อบดดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าสีของวัสดุผสมจะเข้มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4(ค)-4(จ) ที่แสดงลักษณะสีของดินขาวผสมเถ้าลอยอัตราส่วนต่าง ๆ

ค่าความถ่วงจำเพาะของดินขาวมีค่าเท่ากับ 2.51 และเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2.64 ซึ่งต่ำกว่าปูนซีเมนต์ 3.15 ทั้งนี้เป็นผลจากลักษณะอนุภาค โดยอนุภาคของปูนซีเมนต์มีรูปร่างเป็นผลึกมีเนื้อแน่น ในขณะที่อนุภาคดินขาวมีรูปร่างเป็นแผ่น มีรูพรุนและเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ และอนุภาคเถ้าลอยมีรูปร่างลักษณะทั้งแบบทรงกลมกลวงและทรงกลมตัน โดยค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่ามากเมื่อมีปริมาณอนุภาคทรงกลมตันเป็นองค์ประกอบมาก ส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ จะมีค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุทั้งสองชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2



(ก)

ดินขาวดิบ (Kaolin)



(ข)

ดินขาวหลังเผา (Metakaolin)



(ค)

MK:FA/15:5



(ง)

MK:FA/10:10



(จ)

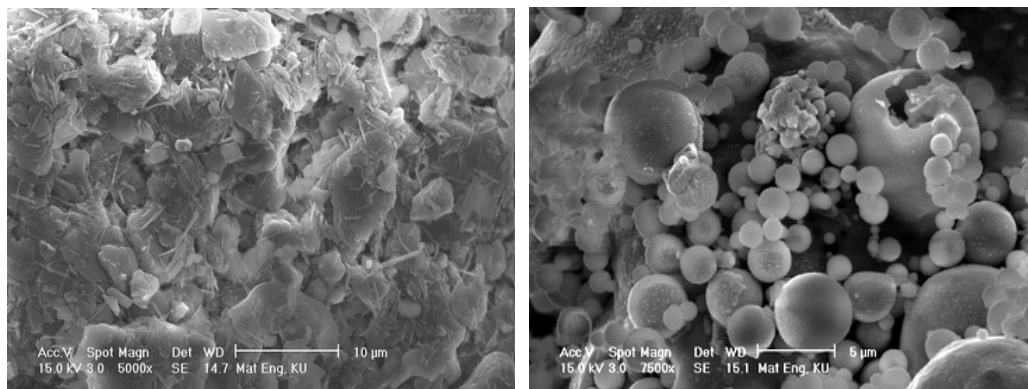
MK:FA/5:15



(ฉ)

เถ้าลอย Fly Ash (FA)

ภาพที่ 4 ลักษณะดินขาวดิบ ดินขาวหลังการเผา เถ้าลอย และดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ



(ก)

อนุภาคดินขาว

(ข)

อนุภาคเถ้าลอย

ภาพที่ 5 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาคดินขาวและอนุภาคเถ้าลอย

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ

วัสดุ	ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	3.15
ดินขาว	2.51
ดินขาวต่อเถ้าลอย (MK:FA/15:5)	2.54
ดินขาวต่อเถ้าลอย (MK:FA/10:10)	2.58
ดินขาวต่อเถ้าลอย (MK:FA/5:15)	2.62
เถ้าลอย	2.64

ค่าความละเอียดของวัสดุ ทดสอบด้วยวิธีวัดพื้นที่ผิวจำเพาะแบบ Air Blaine Permeability โดยจะใช้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นเกณฑ์เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบด จากการบดดินขาวและเถ้าลอยด้วยเครื่องบดแบบ Ball Mill ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข2 โดยมีอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกัน 5 ระดับ และใช้ระยะเวลาการบด 1, 1½, 2 และ 2½ ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าค่าความละเอียดของวัสดุไม่ได้ตามขอบเขตของการศึกษา ซึ่งกำหนดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุให้อยู่ระหว่าง 10,000-11,000 ตร.ซม./ก ดังนั้นจึงเปลี่ยนวิธีการบดโดยใช้เครื่องบดแบบ Rod Mill ดังภาพผนวกที่ ข3 ซึ่งให้ค่าความละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าเมื่อเวลาการ

บดเพิ่มขึ้นวัสดุจะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความละเอียดของวัสดุจากอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยพบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้จากการใช้เครื่องบดแบบ Rod Mill ยังไม่ได้ตามขอบเขตของการศึกษาเช่นกันทั้งนี้ คาดว่ามีสาเหตุจากขีดจำกัดของเครื่องมือ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้วัสดุที่ผ่านการบดเป็นระยะเวลา $2\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความละเอียดสูงสุดเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3 ความละเอียดของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยการบดด้วยเครื่อง Ball Mill

เวลาการบด (ชม.)	พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี Blaine ($\text{cm}^2/\text{g.}$)				
	ส่วนผสม				
	MK	MK:FA/15:5	MK:FA/10:10	MK:FA/5:15	FA
1	*	*	*	*	*
$1\frac{1}{2}$	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*
$2\frac{1}{2}$	7,777	*	*	*	2,864

ตารางที่ 4 ความละเอียดของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยการบดด้วยเครื่อง los Angeles

เวลาการบด (ชม.)	พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี Blaine ($\text{cm}^2/\text{g.}$)				
	ส่วนผสม				
	MK	MK:FA/15:5	MK:FA/10:10	MK:FA/5:15	FA
1	8,769	*	*	*	*
$1\frac{1}{2}$	9,852	*	*	*	*
2	10,863	9,984	8,973	6,794	3,205
$2\frac{1}{2}$	13,890	11,615	9,983	5,892	4,045

หมายเหตุ * : ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากคาดว่าความละเอียดของวัสดุมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยแสดงในตารางที่ 5 พบว่าดินขาวมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นสารองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณร้อยละ 58.26 และ 35.18 ตามลำดับ และเถ้าลอยมีสารทั้งสองชนิด เป็นสารองค์ประกอบหลักเช่นกัน โดยมีปริมาณร้อยละ 47.65 และ 18.51 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตามการแบ่งประเภทของวัสดุปอชโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 168 ดังแสดงในตารางที่ 6 ดินขาวที่ใช้ในงานวิจัยนี้อาจจัดได้ว่าเป็นวัสดุปอชโซลาน Class N เนื่องจากผลรวมร้อยละของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับ 94.41 มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ในขณะที่เถ้าลอยที่มีปริมาณของออกไซด์ของสารประกอบหลักดังกล่าวทั้ง 3 ชนิดรวมกันเท่ากับร้อยละ 76.45 และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 11.94

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ดินขาวและเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (ปริมาณร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	ดินขาว	เถ้าลอย
SiO_2	21.16	58.26	47.65
Al_2O_3	5.09	35.18	18.51
Fe_2O_3	3.01	0.97	10.29
CaO	66.22	0.03	11.94
MgO	1.27	0.04	1.70
K_2O	0.25	1.48	3.14
Na_2O	0.04	4.02	4.08
SO_3	2.42	0.03	2.69
LOI	0.98	1.20	0.5

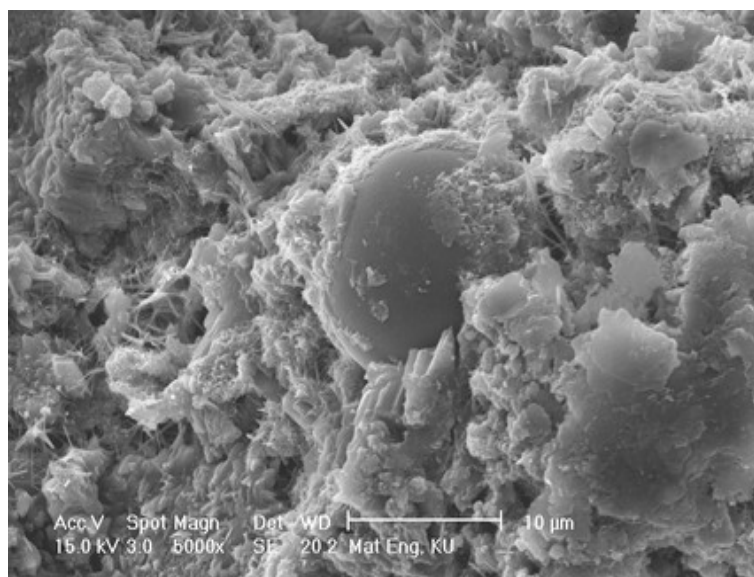
ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติ	ประเภท			ดินขาว	เถ้าลอย (หลังการบด)
	N	F	C		
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่า (%)	70	70	50	94.41	76.45
SO_3 ไม่เกิน (%)	4	5	5	0.03	2.69
Moisture content ไม่เกิน (%)	3	3	3	-	-
Loss on ignition (LOI) ไม่เกิน (%)	10	6	6	1.20	0.5
Specific gravity	2.10 - 2.58			2.51	2.64
Blaine fineness , cm^2/g	2,400-4,800			13,890	4,045

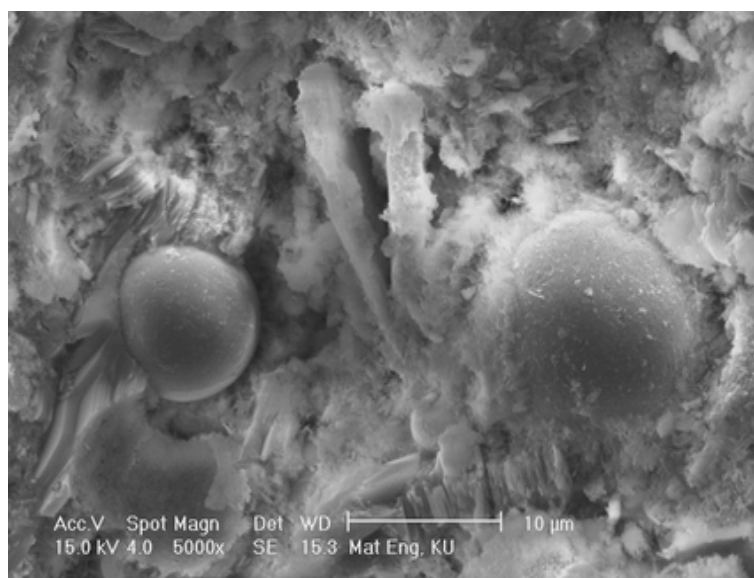
คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย

จากการถ่ายภาพกำลังขยายสูงตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ด้วยเครื่อง (SEM) แสดงในภาพที่ 6-10 ที่อายุทดสอบ 3 วัน ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยมีช่องว่างมาก มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์และสามารถมองเห็นดินขาวและเถ้าลอยที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ชัดเจน เมื่ออายุซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเป็น 7 และ 14 วัน จะพบว่าลักษณะเป็นแผ่นพรุนของดินขาวลดลง โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีความทึบแน่นมากขึ้น ที่อายุซีเมนต์เพสต์ 28 วัน ไม่ปรากฏอนุภาคดินขาวให้เห็นมากนักซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และที่อายุซีเมนต์เพสต์ 91 วัน ไม่พบอนุภาคดินขาวเลย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าดินขาวเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับกับเถ้าลอยที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อเนื่องโดยผิวอนุภาคเถ้าลอยมีผลิตภัณฑ์ปกคลุมชัดเจน เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นและได้สารที่มีคุณสมบัติยึดประสาน ทำให้โครงสร้างจุลภาคซีเมนต์เพสต์มีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ช่วยลดปริมาณช่องว่างและรูพรุน ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังและความทนทานสูงขึ้น



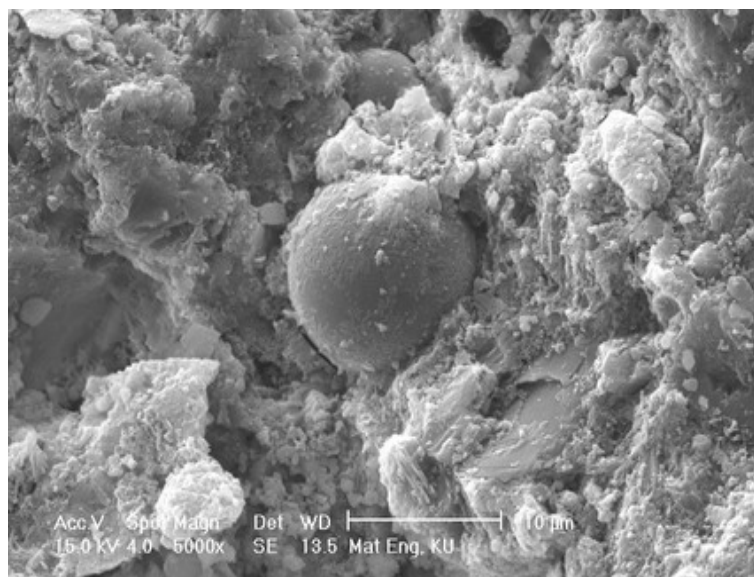
ภาพที่ 6 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 3 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



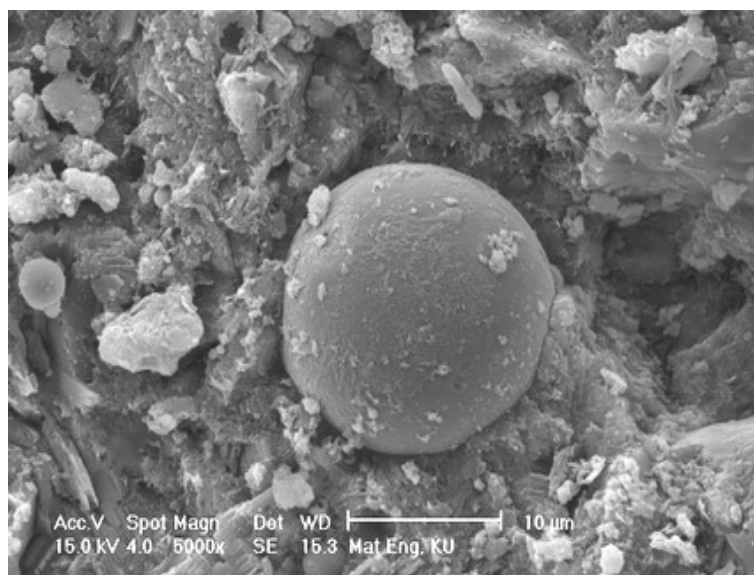
ภาพที่ 7 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 7 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



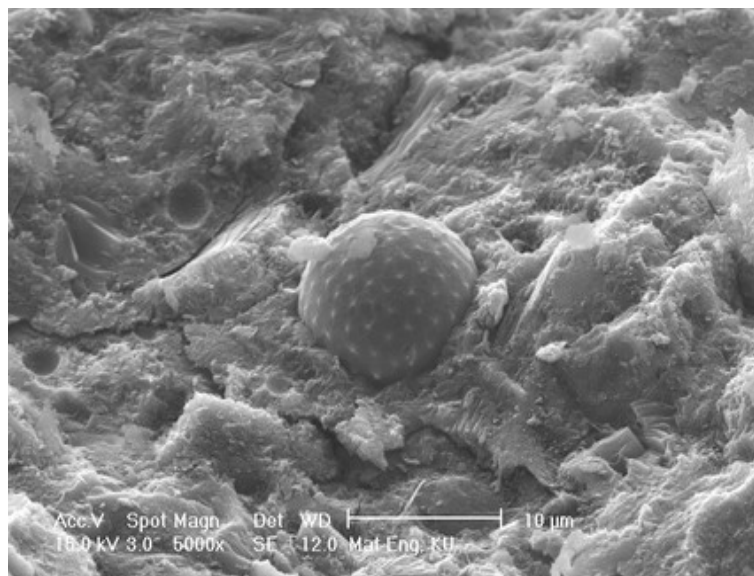
ภาพที่ 8 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 14 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 28 วัน

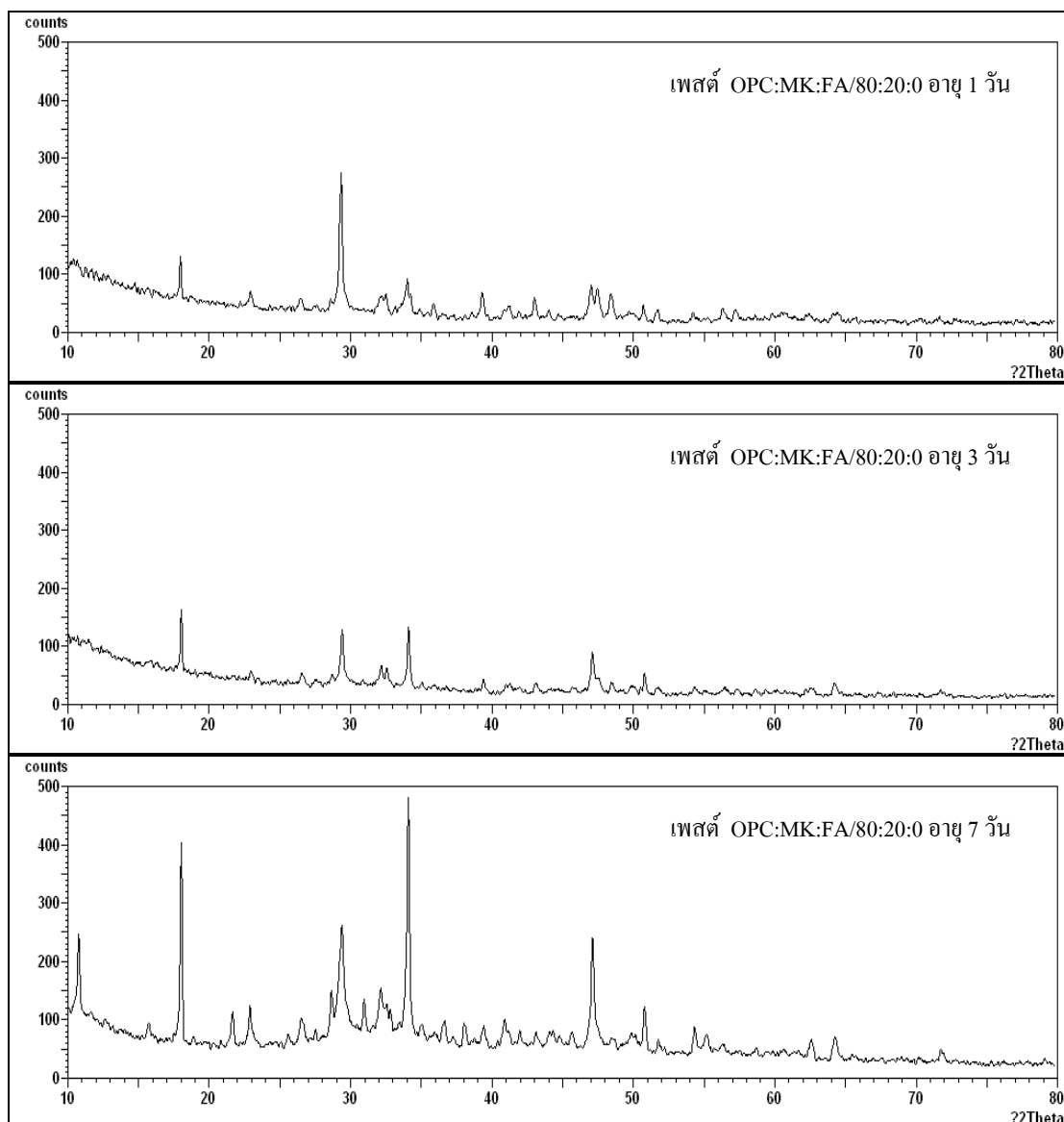
ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 10 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ที่อายุ 91 วัน

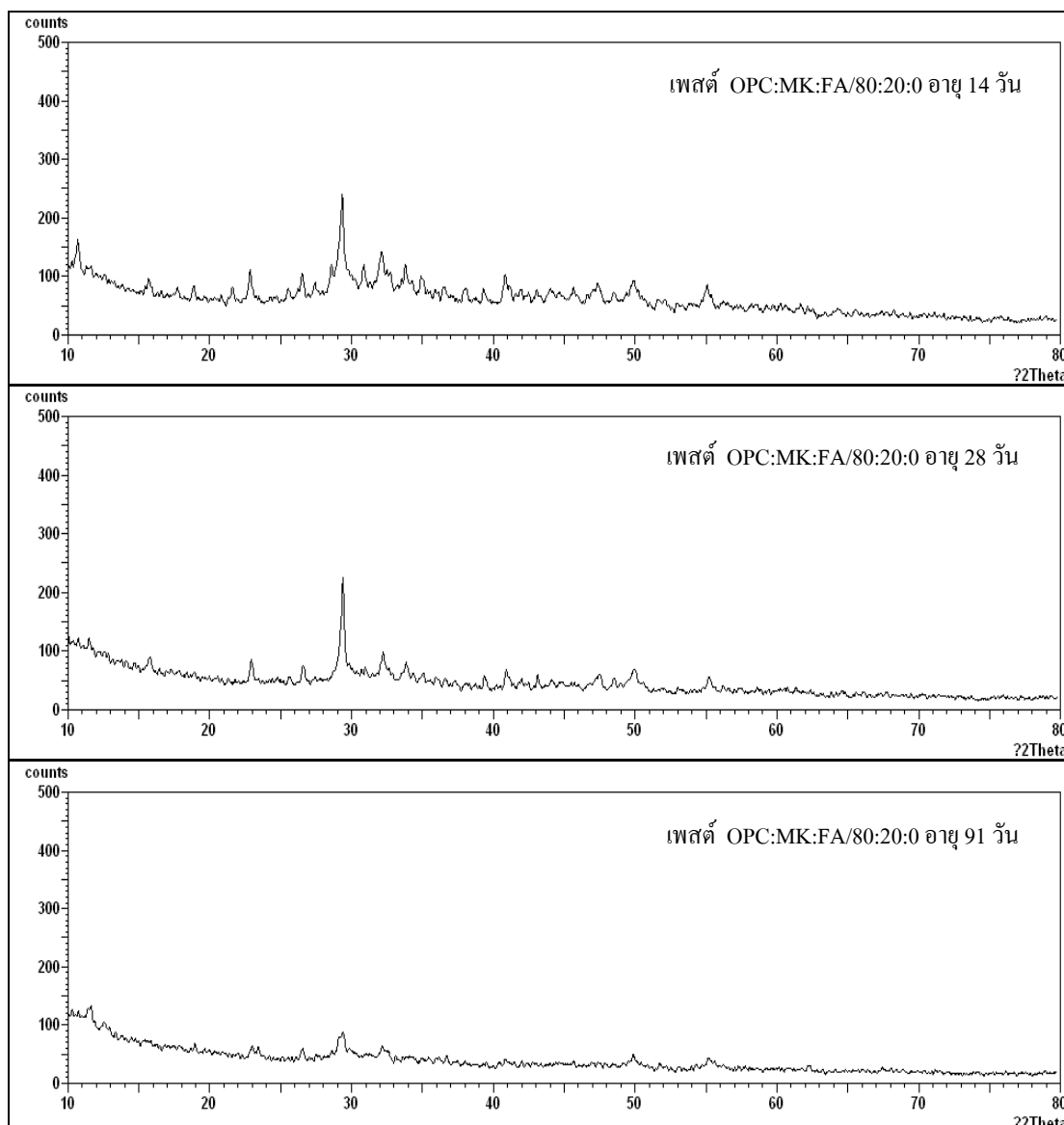
ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

จากการวิเคราะห์สถานะทางผลึกตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยด้วยเครื่อง XRD โดยพิจารณาค่าความเข้ม (Intensity) ของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ตำแหน่งมุม 2 Theta เท่ากับ 18, 34 และ 47 องศา ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) ดังภาพที่ 11 พบว่าในช่วงอายุ 1-7 วัน มีค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นค่าความเข้มจะมีแนวโน้มลดลงโดยมีค่าลดลงอย่างมากที่อายุ 14 วัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าดินขาวในงานวิจัยครั้งนี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูงสามารถดึงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากระบบได้มากที่อายุทดสอบดังกล่าว



ภาพที่ 11 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เฟสค์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0 ที่อายุต่าง ๆ

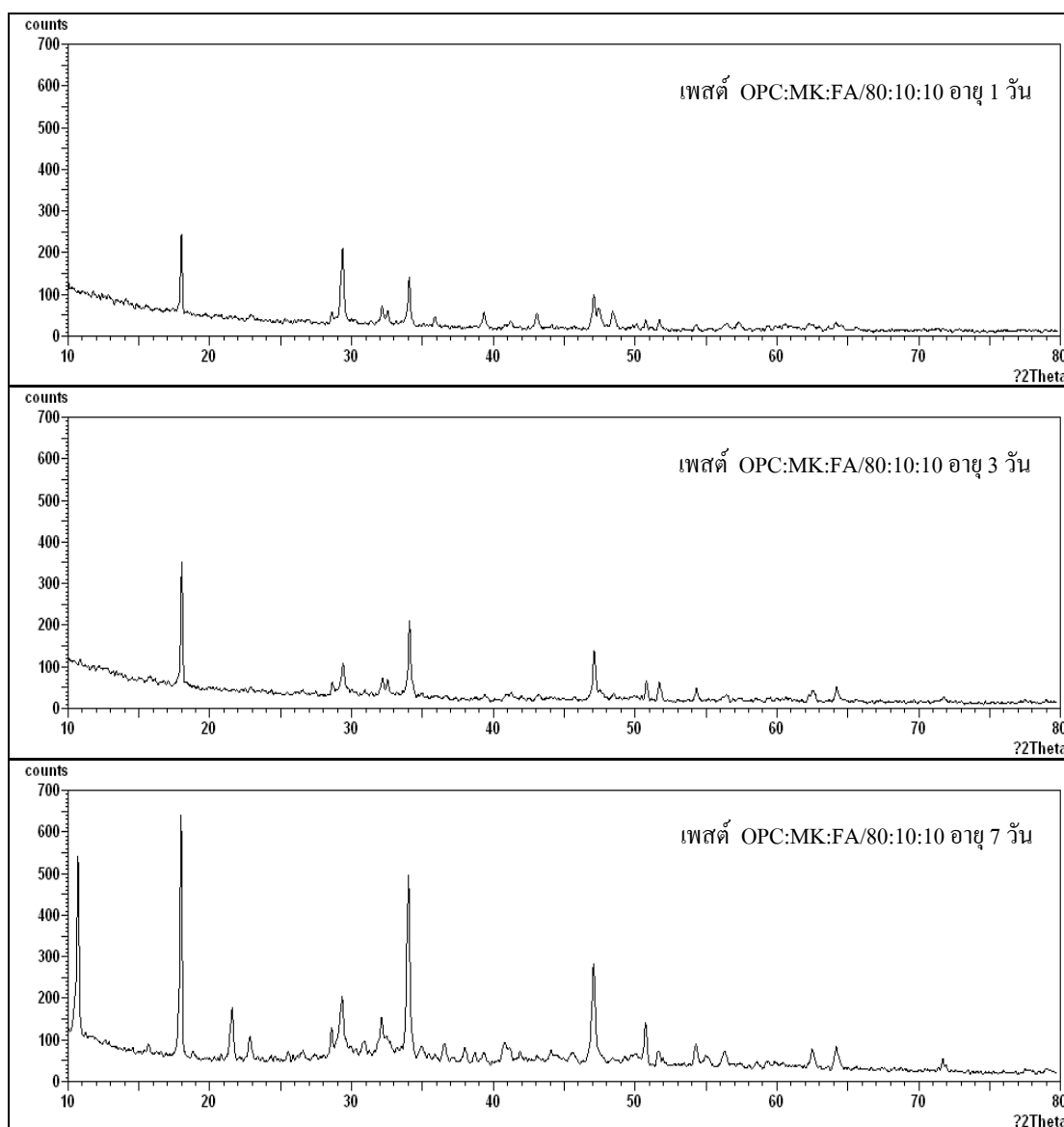
ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 11 (ต่อ)

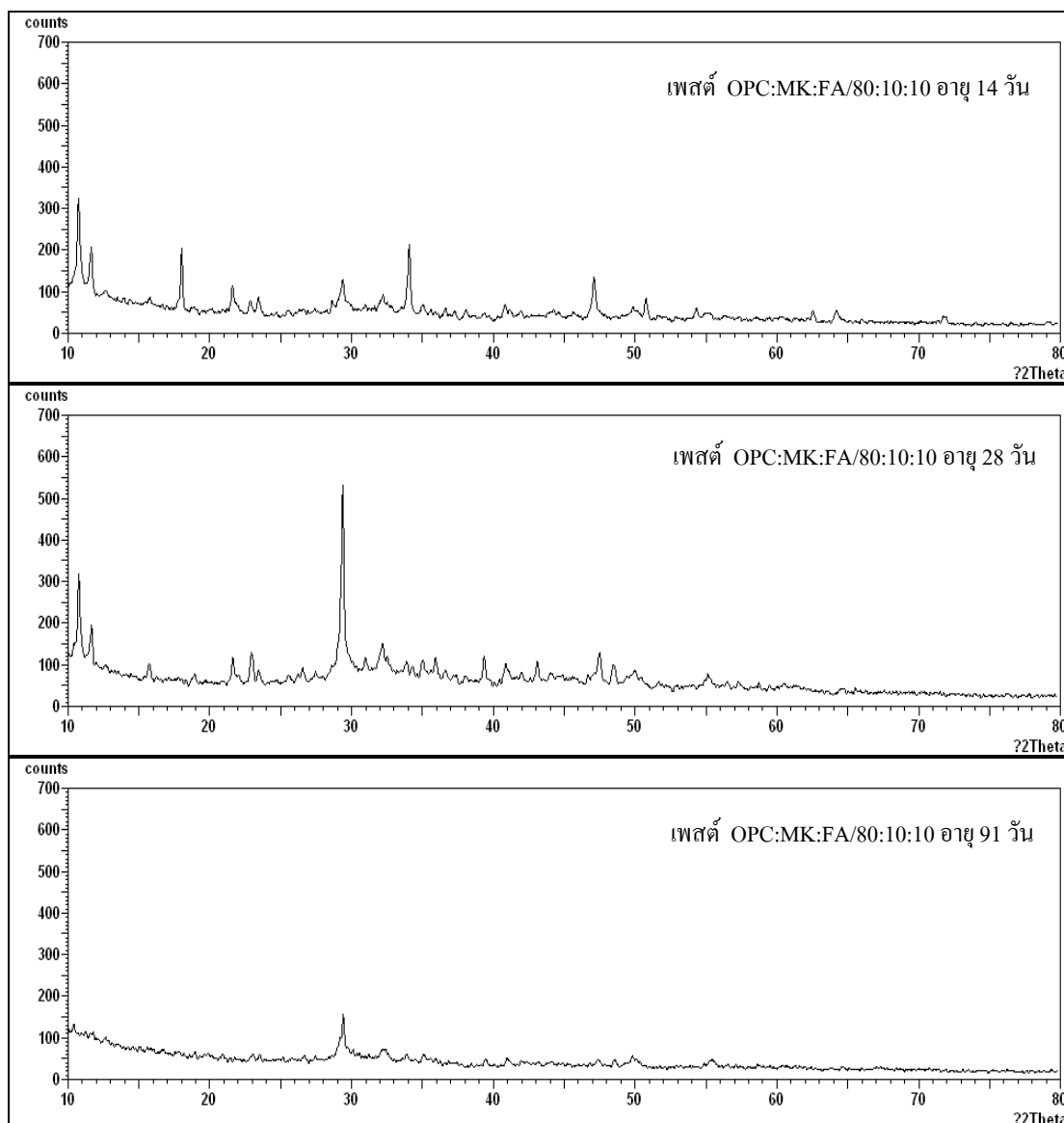
เมื่อพิจารณาตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ดังภาพที่ 12 พบว่าในช่วงอายุ 1-7 วัน ค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ที่อายุทดสอบ 14 วัน ค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เฟสค์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 จะมีค่าสูงกว่าซีเมนต์เฟสค์ผสมดินขาวล้วน ดังในภาพที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสมการเกิดปฏิกิริยา

ปอซโซลานิกเพื่อคั้งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากระบบจะช้าลง เนื่องจากถ่วงดุลหน่วงการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว



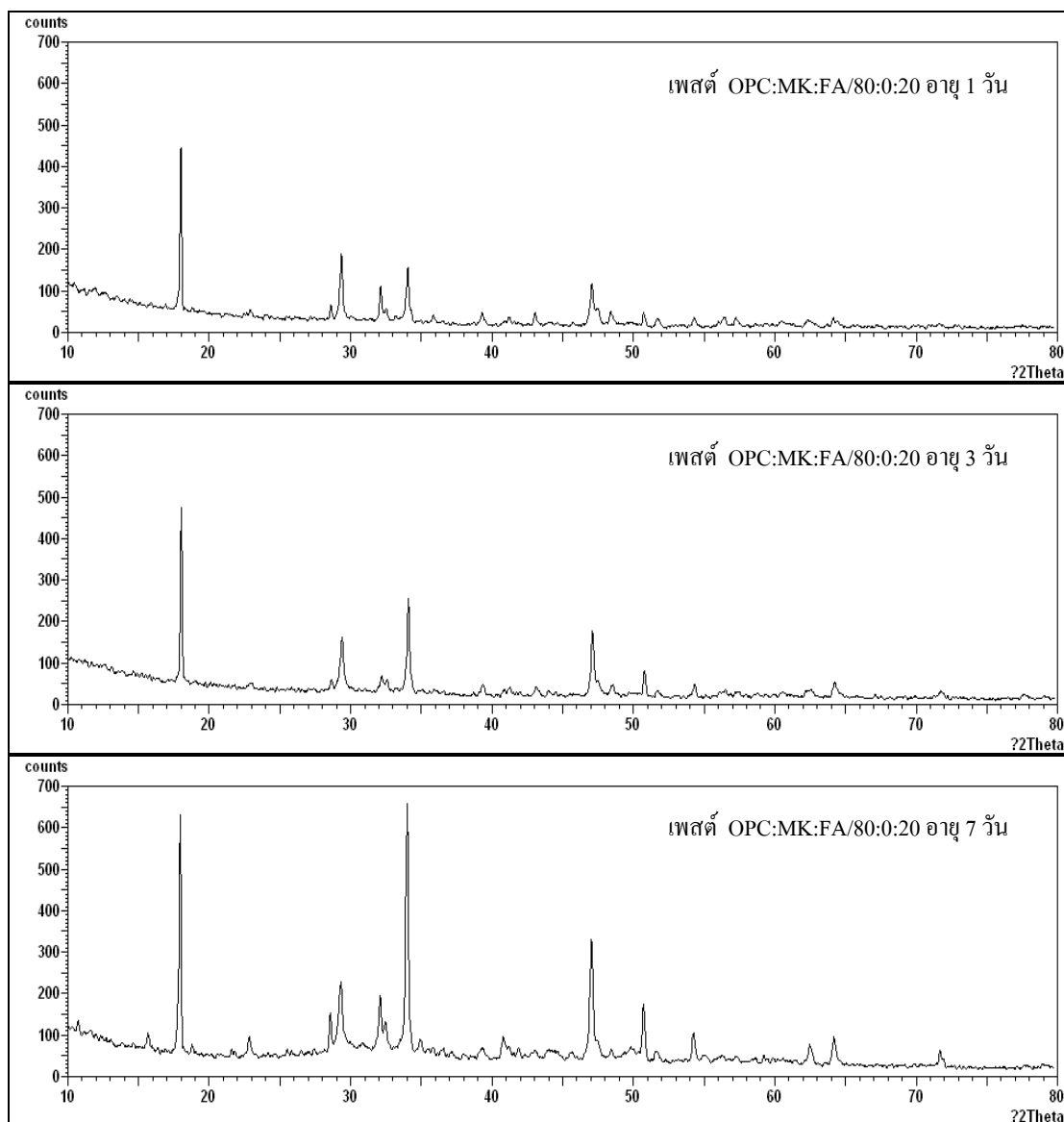
ภาพที่ 12 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เฟสดีผสมดินขาวและถ่วงดุลอัตราส่วนดินขาวต่อถ่วงดุล 10:10 ที่อายุต่าง ๆ

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



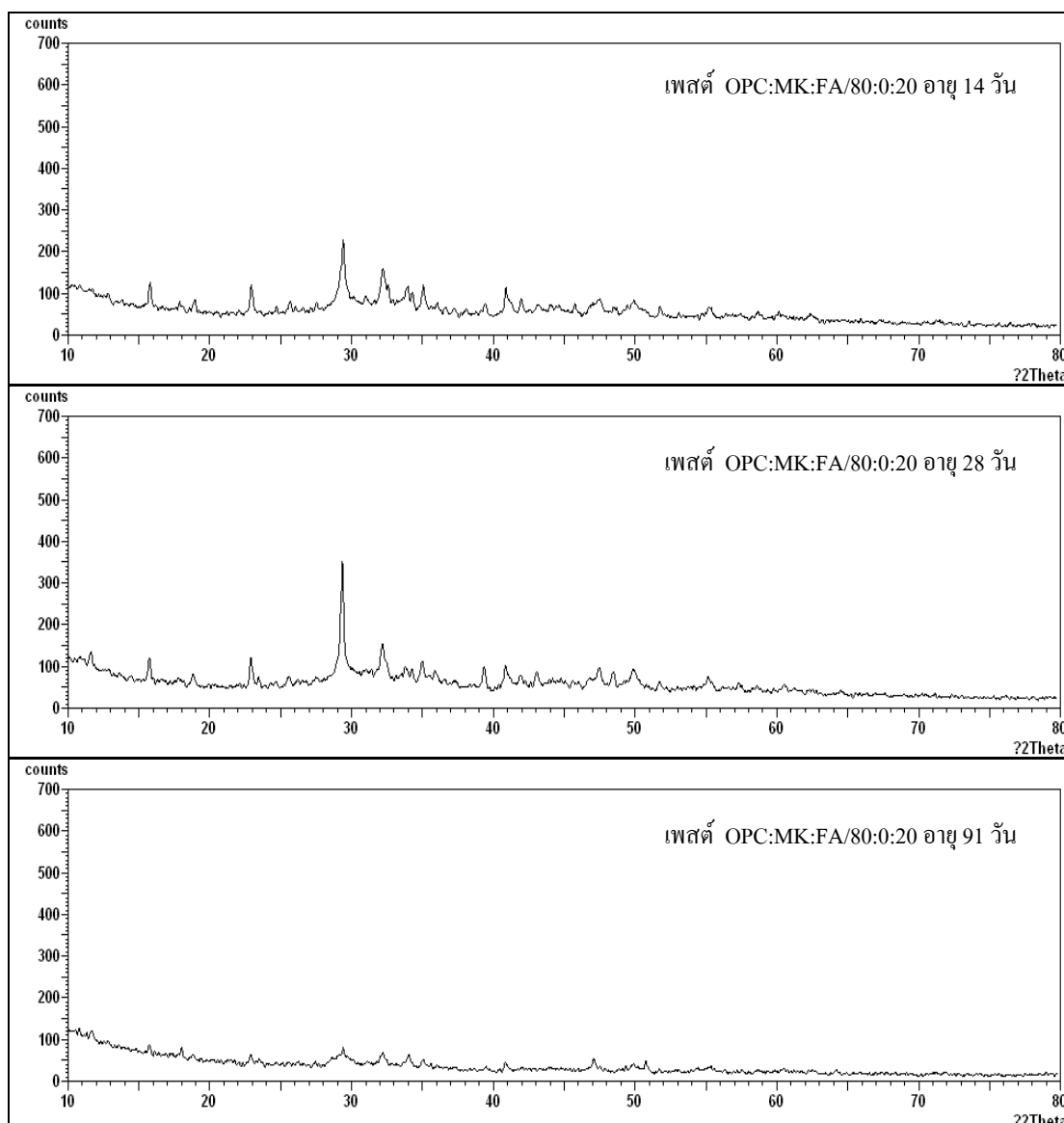
ภาพที่ 12 (ต่อ)

และการวิเคราะห์ XRD ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20) แสดงในภาพที่ 13 พบว่าในช่วง 1-7 วัน ค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่เมื่อพิจารณาที่อายุทดสอบ 14 วัน ค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยล้วนมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยในอัตราส่วน 10:10 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าที่อายุ 14 วัน การใช้เถ้าลอยล้วนในการทดลองนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกดิงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากระบบได้เร็วกว่าการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 10:10



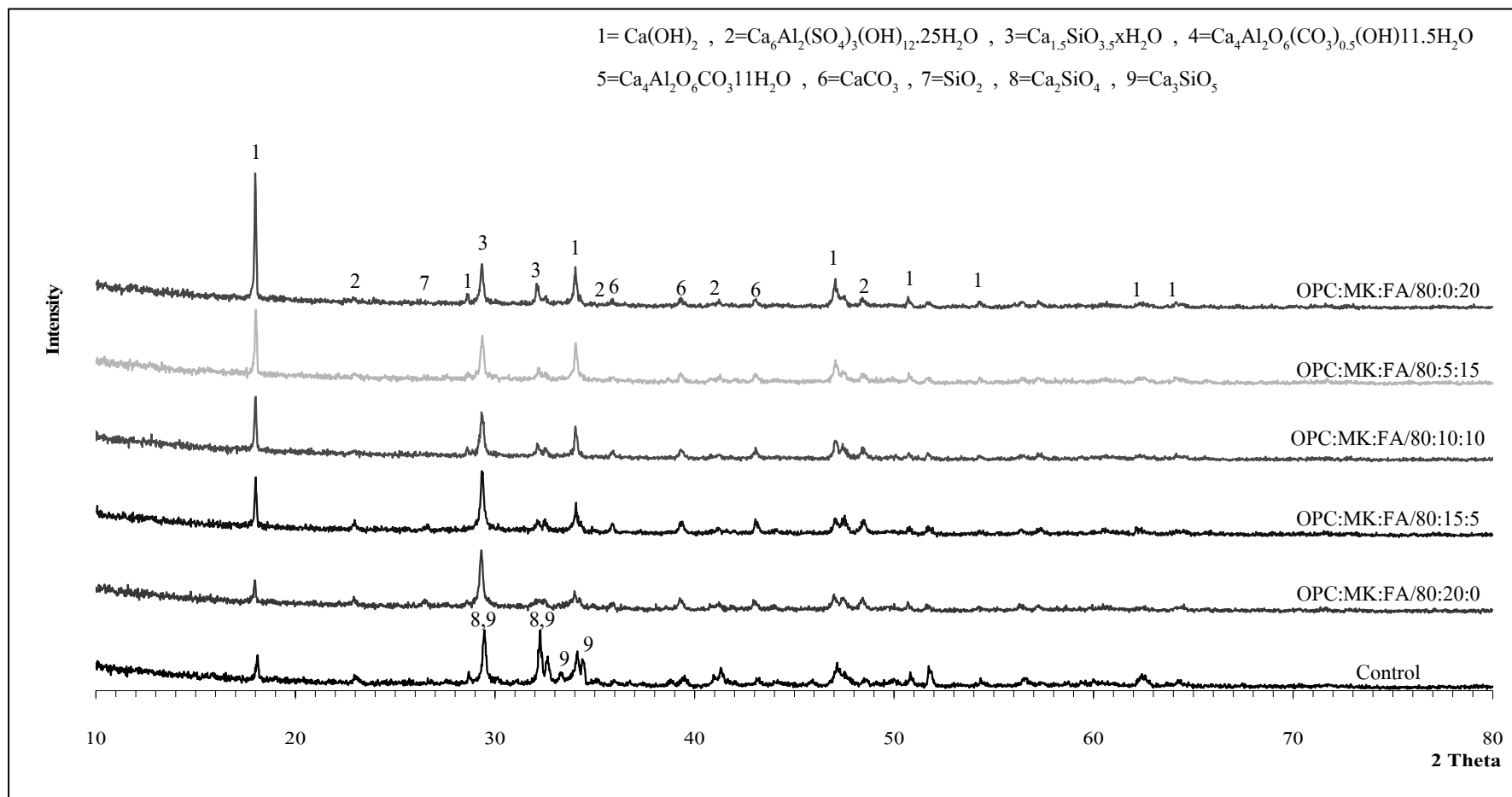
ภาพที่ 13 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20 ที่อายุต่าง ๆ

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



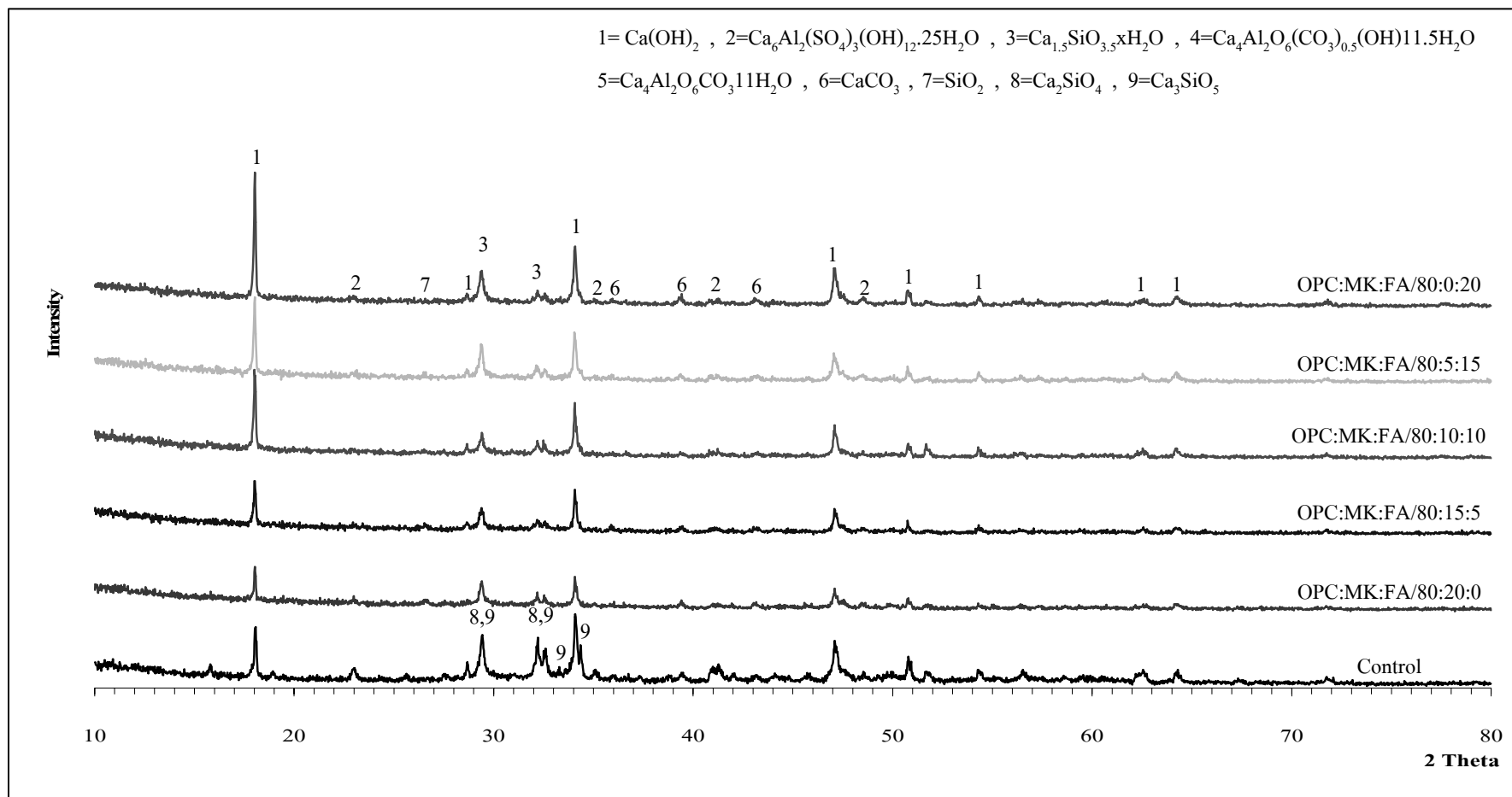
ภาพที่ 13 (ต่อ)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยต่าง ๆ ที่อายุทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28 และ 91 วัน โดยพิจารณาค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในภาพที่ 14-19 พบว่าในช่วง 1-3 วัน ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยล้วนมีความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงสุด เมื่ออายุทดสอบ 7 วัน อัตราส่วนอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15 มีค่าความเข้มสูงสุดดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นอัตราส่วนที่ดินขาวต่อเถ้าลอยที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในช่วงอายุ 7 วัน ได้ช้าที่สุดและที่อายุทดสอบดังกล่าวซีเมนต์เพสต์ที่มีดินขาวในส่วนผสมจะพบว่า มีสารประกอบแคลเซียมอูมิเนียมออก



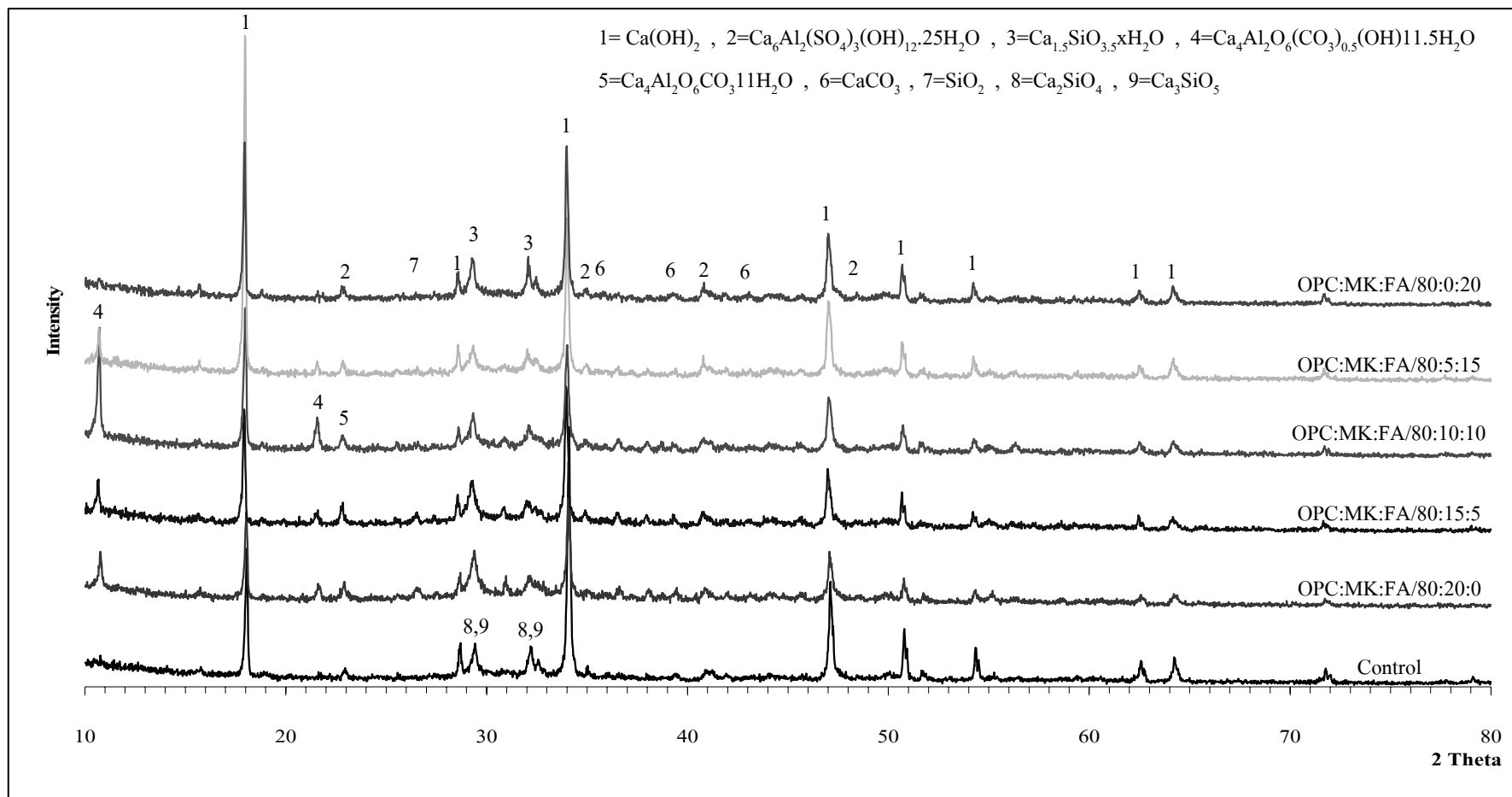
ภาพที่ 14 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 1 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



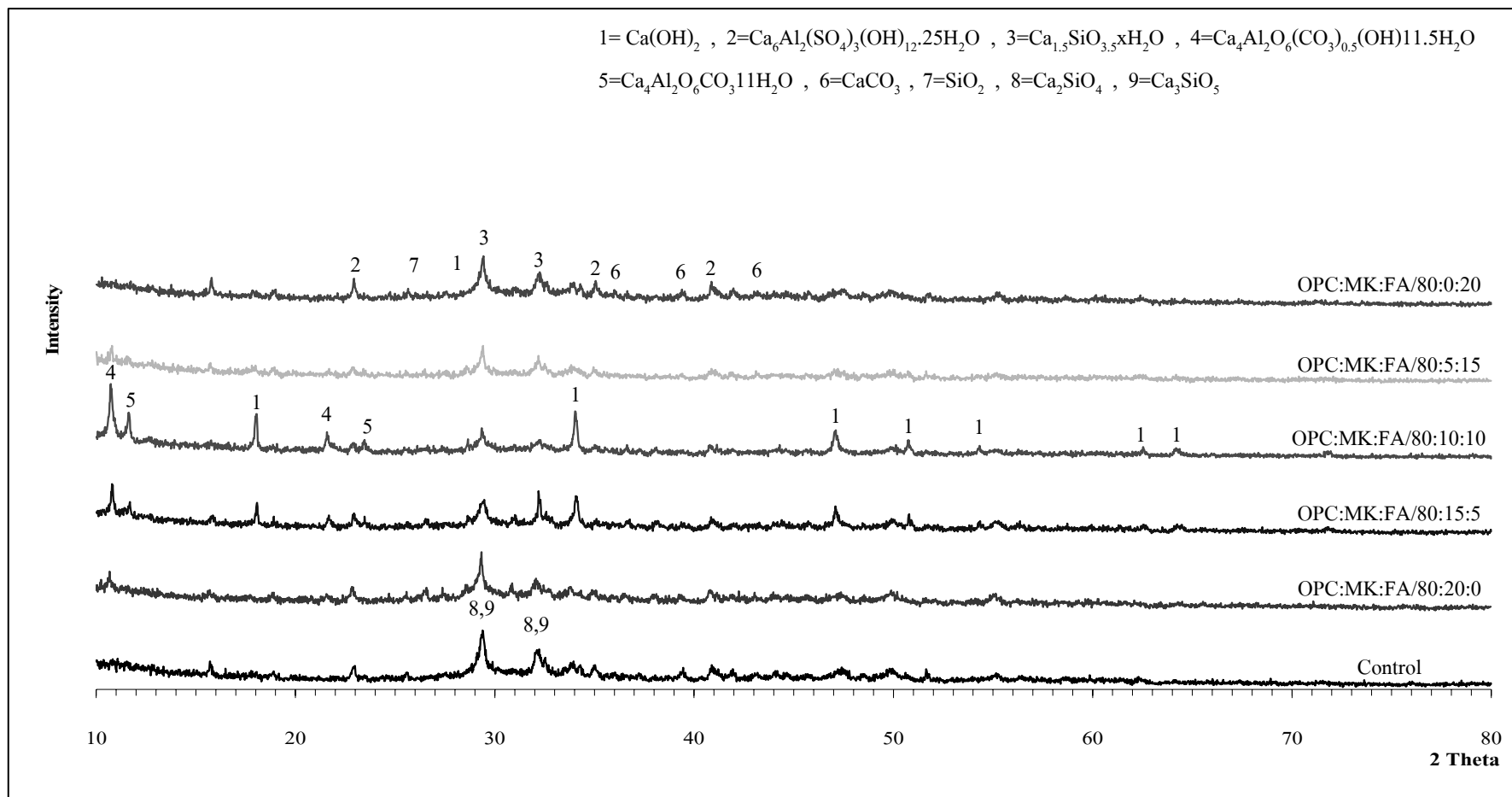
ภาพที่ 15 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 3 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



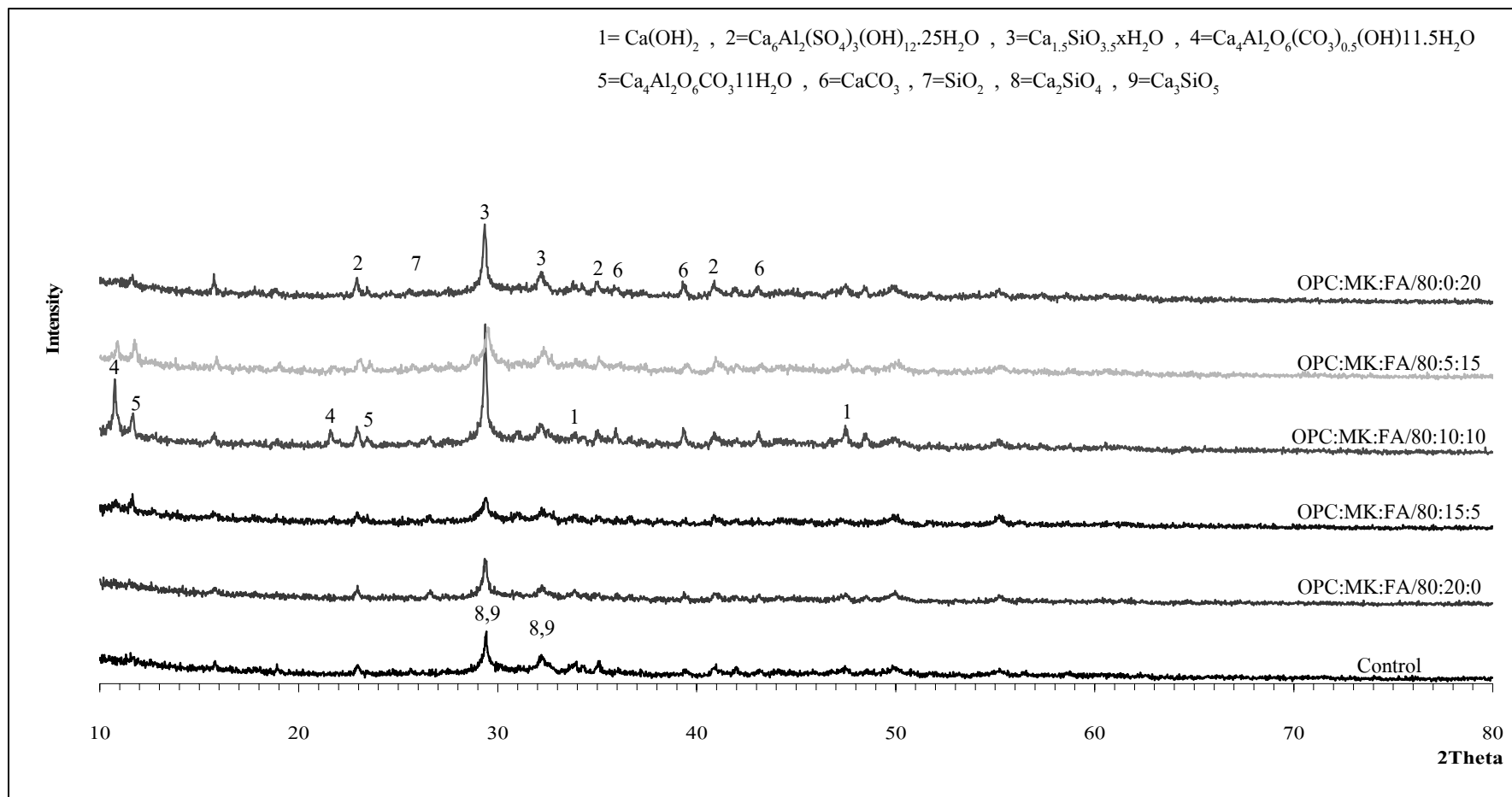
ภาพที่ 16 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 7 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



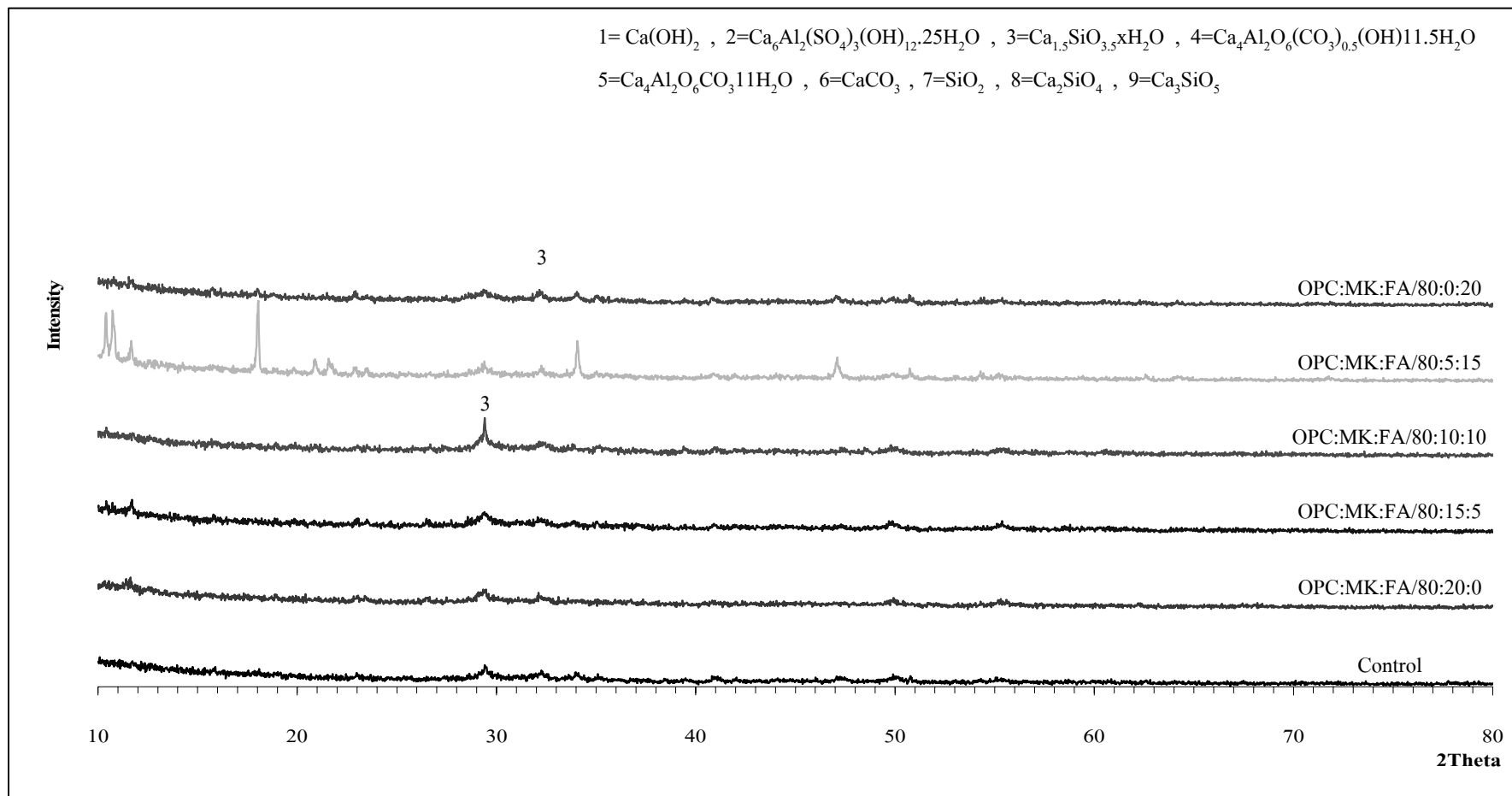
ภาพที่ 17 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 14 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 18 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เฟสผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 28 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 19 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 91 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

คุณสมบัติของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ ค่าการไหล และลักษณะการบดวัสดุ

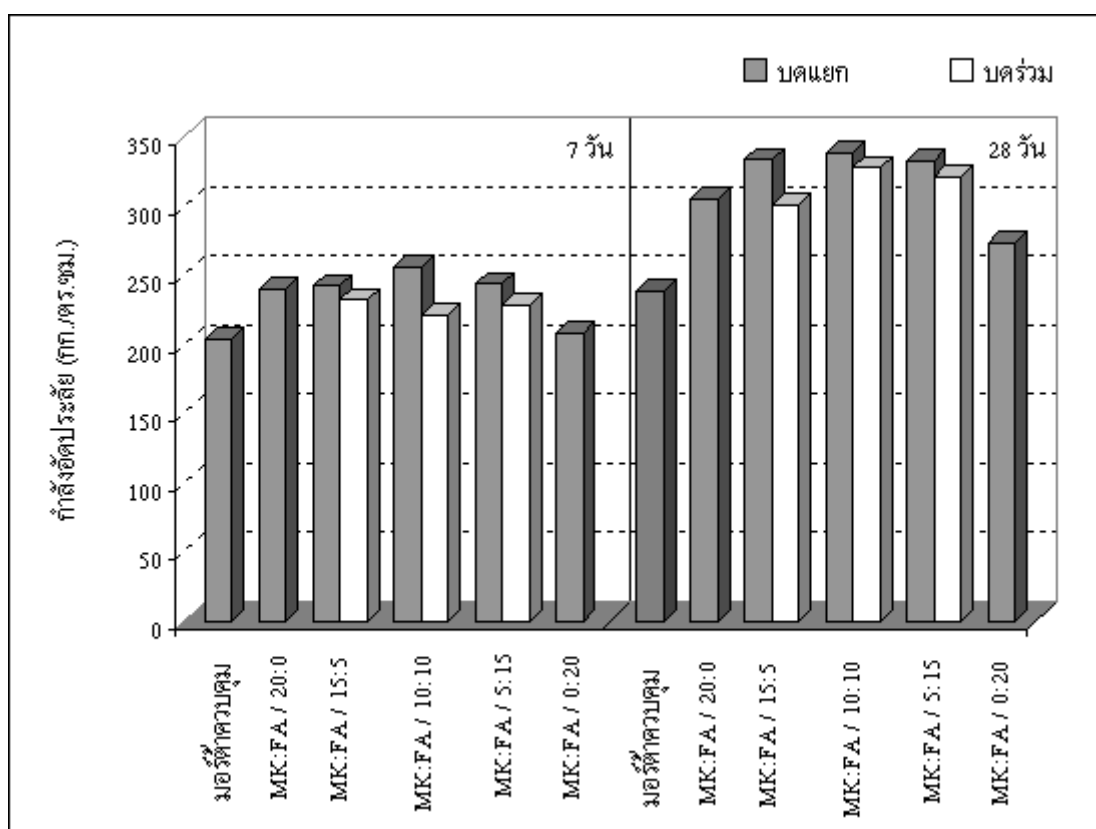
การศึกษาผลกระทบของการบดวัสดุปอซโซลานทั้งสองลักษณะคือ บดแยกกันและบดร่วมกัน พบว่าในการศึกษานี้ลักษณะการบดวัสดุที่แตกต่างกันไม่มีผลกระทบต่อความต้องการน้ำและค่าการไหลของมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าควบคุม ซึ่งแสดงในตารางผนวกที่ ก1 พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 ซึ่งสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม (0.6) เพื่อให้ได้ค่าการไหลเดียวกัน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของดินขาวที่มีรูปร่างไม่แน่นอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมีการดูดซึมน้ำสูง และเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสมมีผลทำให้ความต้องการน้ำลดลง โดยพิจารณาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5, 10:10, 5:15 และ 0:20 ใช้ W/B เท่ากับ 0.68, 0.65, 0.62 และ 0.58 ตามลำดับ) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของอนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กและกลมเถ้าลอยจึงทำหน้าที่เหมือน Bearing Ball ช่วยลดความฝืดระหว่างอนุภาคทำให้การไหลดีขึ้นและความต้องการน้ำของมอร์ต้าลดลง

ตารางที่ 7 กำลังอัดและดัชนีกำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยกรณีบดแยกและบดรวม

ประเภท ส่วนผสม	ลักษณะ การบด	W/B	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)		ดัชนีกำลังอัด (%)	
			7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
มอร์ต้าควบคุม	-	0.60	204	239	100	100
MK:FA/20:0	-	0.70	240	305	118	128
MK:FA/15:5	บดแยก	0.68	242	334	119	140
	<u>บดรวม</u>		<u>232</u>	<u>301</u>	<u>114</u>	<u>126</u>
MK:FA/10:10	บดแยก	0.65	256	339	126	142
	<u>บดรวม</u>		<u>221</u>	<u>328</u>	<u>108</u>	<u>137</u>
MK:FA/5:15	บดแยก	0.62	244	333	120	139
	<u>บดรวม</u>		<u>228</u>	<u>321</u>	<u>112</u>	<u>134</u>
MK:FA/0:20	-	0.58	208	274	102	115

กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าดังในตารางที่ 7 และภาพที่ 20 แสดงให้เห็นว่าที่อายุทดสอบ 7 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 2-26 และที่อายุทดสอบ 28 วัน กำลังอัดจะสูงกว่าประมาณร้อยละ 15-42 โดยกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากดินขาวและเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กไปอุดแทรกช่องว่าง และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคทำให้มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยมีความแข็งแรงมากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น โดยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด คือ 10:10 และเมื่อพิจารณาจากลักษณะการบดพบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดรวมจะมีกำลังอัดต่ำกว่าการบดแยก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะดินขาวผสมเถ้าลอยที่ผ่านการบดรวมมีความละเอียดต่ำกว่ากรณีที่แยกบดเฉพาะดินขาวหรือเถ้าลอยล้วน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดแทรกไม่ดีเท่าที่ควร



ภาพที่ 20 กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่างๆที่อายุ 7 และ 28 วัน

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพสด

ปริมาณอากาศในคอนกรีต

ตารางที่ 8 ปริมาณอากาศของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

ปริมาณอากาศในคอนกรีต (%)					
ประเภทส่วนผสม					
คอนกรีตควบคุม	MK:FA/20:0	MK:FA/15:5	MK:FA/10:10	MK:FA/5:15	MK:FA/0:20
2.8	1.7	1.6	1.6	1.5	1.8

จากการทดสอบการวัดปริมาณอากาศในคอนกรีตสด ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยมีปริมาณอากาศต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยและในงานวิจัยนี้อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าการใช้ดินขาวและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ปริมาณอากาศในคอนกรีตลดลงเนื่องจากอนุภาคของดินขาวและเถ้าลอยทำหน้าที่อุดแทรกช่องว่างในคอนกรีตทันทีหลังการผสมทำ โดยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ต่างกันไม่ส่งผลชัดเจนต่อความแตกต่างของปริมาณอากาศที่วัดได้

ค่ายุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัว



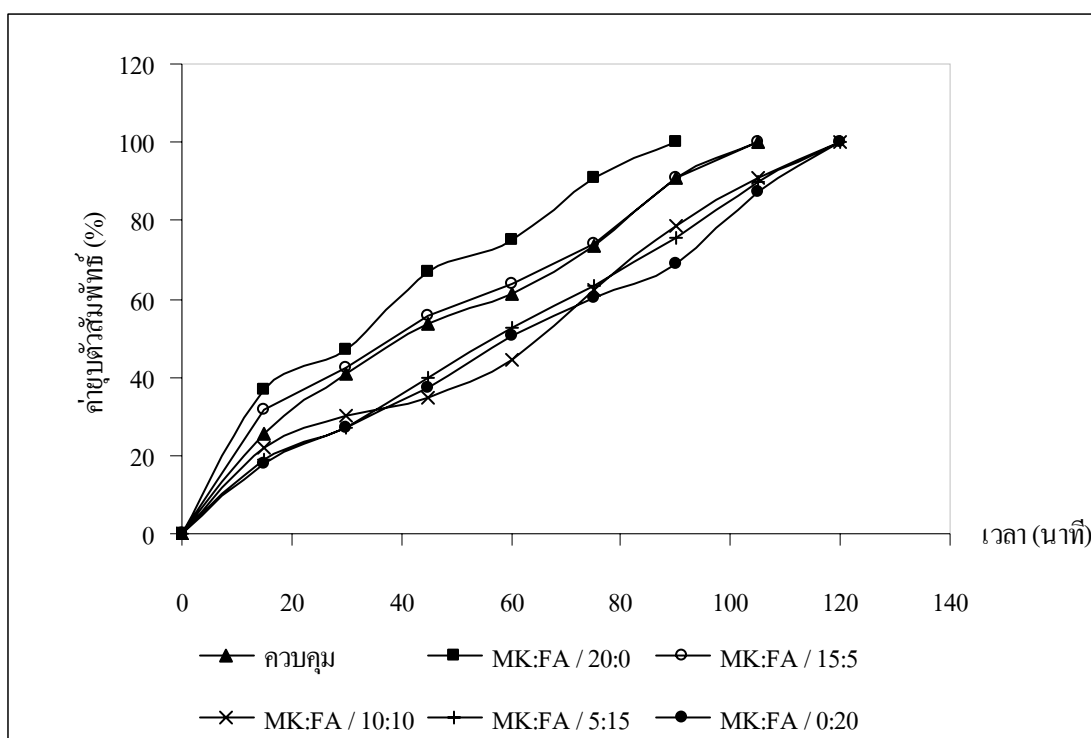
ภาพที่ 21 การทดสอบค่าการยุบตัวโดยควบคุมค่ายุบตัวที่ 7.5 ± 2.5 ซม.

จากการทดสอบความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยต่างๆเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมโดยการวัดค่ายุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัว ซึ่งคอนกรีตทุกส่วนผสมจะควบคุมค่ายุบตัวเริ่มต้นในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม. ดังในภาพที่ 21 โดยแปรผันปริมาณน้ำที่เติมลงในส่วนผสมเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวดังกล่าว ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 9 พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาว มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และเมื่อใช้เถ้าลอยร่วมกับดินขาวจะช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต โดยพิจารณาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0 และ 15:5 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.52 และ 0.51 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 จะมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับคอนกรีตควบคุมคือ 0.48 และอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15 และ 0:20 จะมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.46 และ 0.44 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ดังนั้นอาจกล่าวโดยสรุปว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาว และลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบค่าการไหลของมอร์ต้า

ตารางที่ 9 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ

เวลา (นาทีก)	ค่าการยุบตัว (ควบคุมค่ายุบตัวเริ่มต้นในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม.)					
	ประเภทส่วนผสม					
	ควบคุม	MK:FA 20:0	MK:FA 15:5	MK:FA 10:10	MK:FA 5:15	MK:FA 0:20
W/B	0.48	0.52	0.51	0.48	0.46	0.44
0	8.2	8.1	8.1	8.3	8.2	8.4
15	6.1	5.1	5.6	6.5	6.7	6.9
30	4.8	4.3	4.7	5.8	6.0	6.1
45	3.8	2.7	3.6	5.4	5.0	5.3
60	3.2	2.0	3.0	4.6	3.9	4.2
75	2.2	0.8	2.1	3.1	3.0	3.3
90	0.8	0.0	0.8	1.8	2.0	2.6
105	0.0		0.0	0.8	0.9	1.1
120				0.0	0.0	0.0

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวสัมพันธ์กับเวลาดังภาพที่ 22 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวล้วนสูญเสียค่ายุบเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม และใช้เวลาในการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วที่สุดตามด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 ซึ่งใช้เวลาในการสูญเสียค่ายุบตัวจะใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และในกลุ่มอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10, 5:15 และ 0:20 จะใช้เวลาสูญเสียค่ายุบตัวใกล้เคียงกันและจากตารางที่ 9 ยังพบว่าการใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 ถึง 20 ในส่วนผสมมีผลต่อการยืดเวลาการสูญเสียค่ายุบตัวออกไปประมาณ 15-30 นาที ซึ่งการที่เถ้าลอยช่วยลดการสูญเสียค่ายุบตัว เป็นผลเนื่องมาจากเถ้าลอยช่วยคงสภาพความเป็นพลาสติกให้กับคอนกรีตและยังช่วยหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกด้วย (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2544)



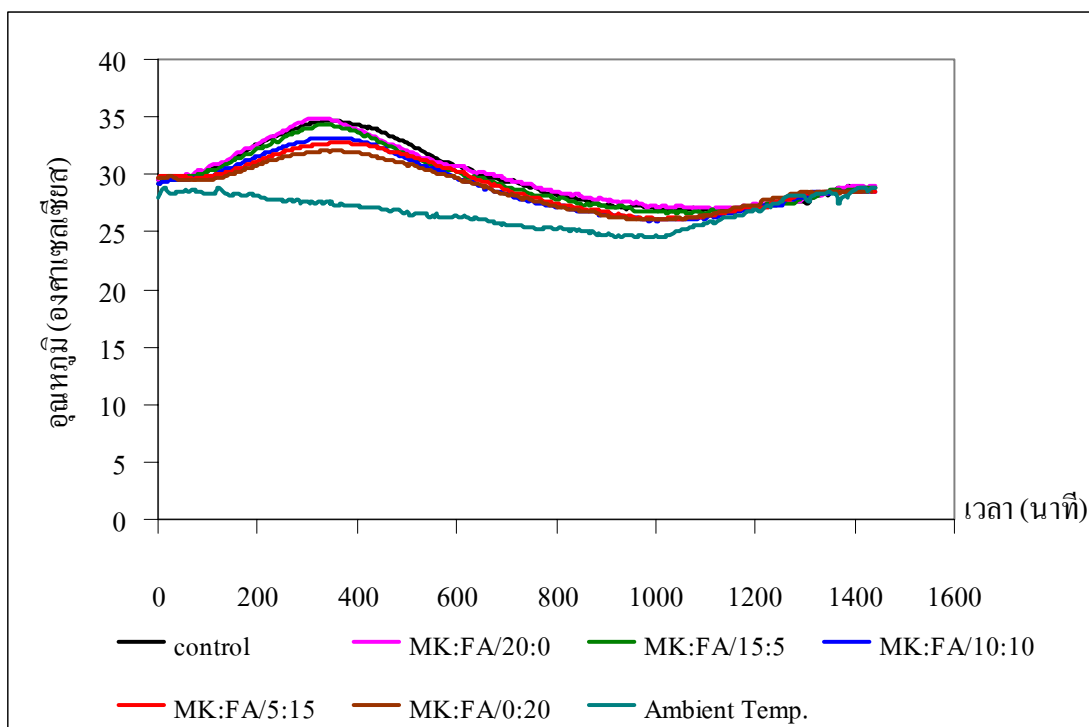
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวสัมพันธ์กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในคอนกรีต

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมดังแสดงในภาพที่ 23 โดยผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 24 และตารางที่ 10 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอนกรีตทุกส่วนผสมจะมีกราฟเป็นรูปประฆังคว่ำ โดยอุณหภูมิของคอนกรีตควบคุมจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ 34.8 องศาเซลเซียส และคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0, 15:5, 10:10, 5:15 และ 0:20 มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 34.9, 34.4, 33.2, 32.9 และ 32.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่อุณหภูมิของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดพบว่า คอนกรีตที่ผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) ใช้เวลาสั้นที่สุดหลังจากผสมคือ 5.15 ชม. ตามด้วยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 เมื่อระยะเวลาผ่านไป 5.40 ชม. ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 และคอนกรีตควบคุมใช้เวลาเท่ากันคือ 5.50 ชม. และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20) อุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป 5.55 ชม. ลำดับสุดท้ายคืออัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดเมื่อระยะเวลาผ่านไป 6.10 ชม. หลังจากผสม จากผลการทดสอบอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า เมื่อใช้ดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตจะทำให้ช่วงเวลาการเกิดอุณหภูมิสูงสุดสั้นลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากดินขาวช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่เมื่อมีเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสมระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจุดสูงสุดจะยืดออกไป ทั้งนี้เนื่องจากผลของการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยนั่นเอง



ภาพที่ 23 เครื่องมือสำหรับบันทึกอุณหภูมิและการติดตั้งเทอร์โมคอปเปิ้ลในตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยกับเวลา

ตารางที่ 10 อุณหภูมิสูงสุดที่เวลาต่าง ๆ หลังการผสมของคอนกรีต

ประเภท ส่วนผสม	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาที่เกิด อุณหภูมิสูงสุด (ชั่วโมง)
มอร์ต้าควบคุม	34.8	27.6	7.2	5.50
MK:FA/20:0	34.9	27.6	7.4	5.15
MK:FA/15:5	34.4	27.6	6.8	5.40
MK:FA/10:10	33.2	27.6	5.6	5.50
MK:FA/5:15	32.9	27.5	5.4	6.10
MK:FA/0:20	32.1	27.3	4.8	5.55

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพแข็งตัว

กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

จากการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย และคอนกรีตควบคุม ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. ได้ค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 11 และเมื่อคูณด้วยค่าปรับแก้ในตารางที่ 12 ซึ่งได้จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมทรงกระบอกเทียบกับทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. ที่อายุต่างๆ เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเทียบเท่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. แสดงในตารางที่ 13 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและอายุทดสอบได้ดังภาพที่ 25

ตารางที่ 11 กำลังอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. ที่อายุทดสอบต่าง ๆ

ประเภทส่วนผสม	W/B	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)				
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	256	370	478	490	507
MK:FA/20:0	0.52	257	418	537	549	553
MK:FA/15:5	0.51	232	414	491	513	520
MK:FA/10:10	0.48	227	393	496	565	627
MK:FA/5:15	0.46	253	337	462	510	533
MK:FA/0:20	0.44	245	355	447	577	579

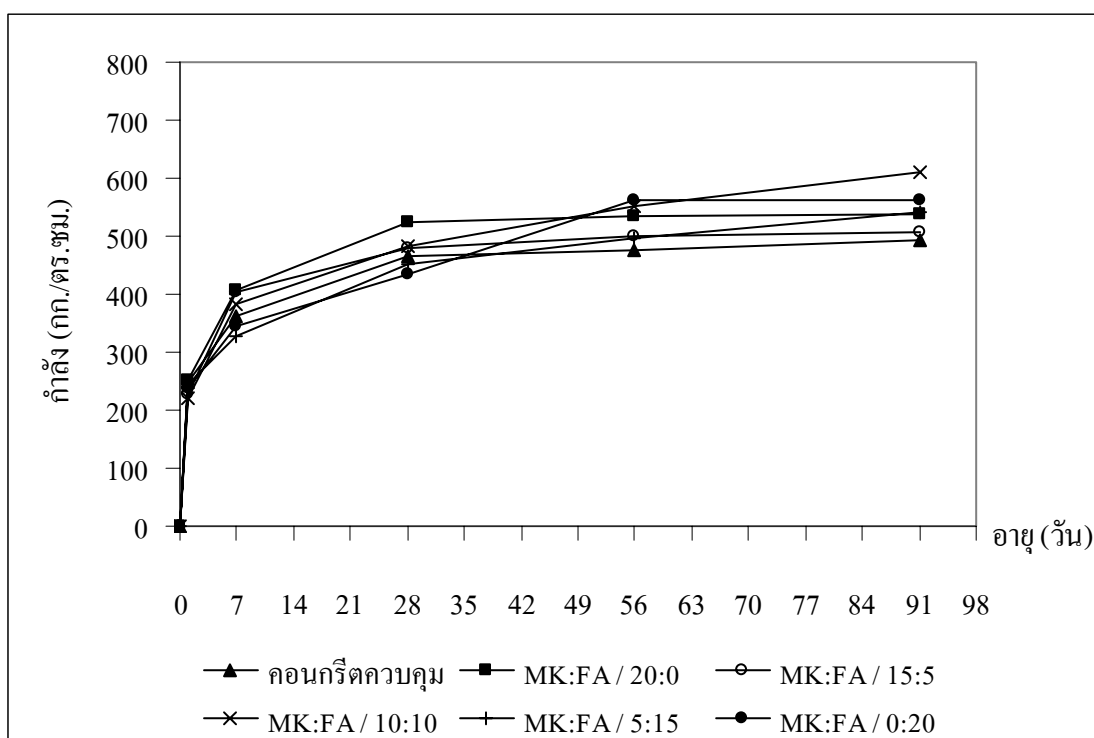
ตารางที่ 12 ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตรูปทรงกระบอก

อายุ (วัน)	กำลังอัดเฉลี่ย ทรงกระบอก	กำลังอัดเฉลี่ย รูปลูกบาศก์	อัตราส่วนกำลังอัดทรง กระบอกต่อทรงลูกบาศก์	ตัวคูณปรับแก้
1	206	256	0.804	
7	400	370	1.080	
28	448	478	0.937	0.974
56	488	490	0.997	
91	531	507	1.049	

พบว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) จะสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตลอดช่วงอายุทดสอบ 1-91 วัน ซึ่งการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุเริ่มต้น 1-7 วัน ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมีส่วนหนึ่งจากอนุภาคขนาดเล็กของดินขาว ทำหน้าที่อุดแทรกช่องว่างขนาดเล็กในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น และจากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เร็วขึ้น และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Wild, 1996) ทำให้คอนกรีตผสมดินขาล้วนมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุทดสอบการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมมีผลต่อกำลังอัดคอนกรีตในช่วงต้น โดยคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 และ 10:10 มีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเฉพาะที่อายุทดสอบ 1 วัน แต่ที่อายุทดสอบหลังจากนั้นจะมีกำลังอัดสูงกว่า เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยซึ่งมีเถ้าลอยร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนักในส่วนผสมจะมีกำลังอัดในช่วงอายุ 1-28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่ในช่วงอายุ 56-91 วัน จะพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งการพัฒนา กำลังอัดเป็นผลจากการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย และจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ของเถ้าลอยในช่วงอายุหลังจาก 28 วัน และพบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุทดสอบ 91 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกหลังจากอายุทดสอบดังกล่าว

ตารางที่ 13 กำลังอัดเทียบเท่าทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุทดสอบต่าง ๆ

ประเภทส่วนผสม	W/B	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)				
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	249	360	466	477	493
MK:FA/20:0	0.52	250	407	523	535	538
MK:FA/15:5	0.51	226	403	478	499	507
MK:FA/10:10	0.48	221	383	483	550	610
MK:FA/5:15	0.46	246	328	450	496	542
MK:FA/0:20	0.44	239	346	435	562	563



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างก้างอัดประลัยกับอายุทดสอบของคอนกรีตส่วนผสมต่าง ๆ

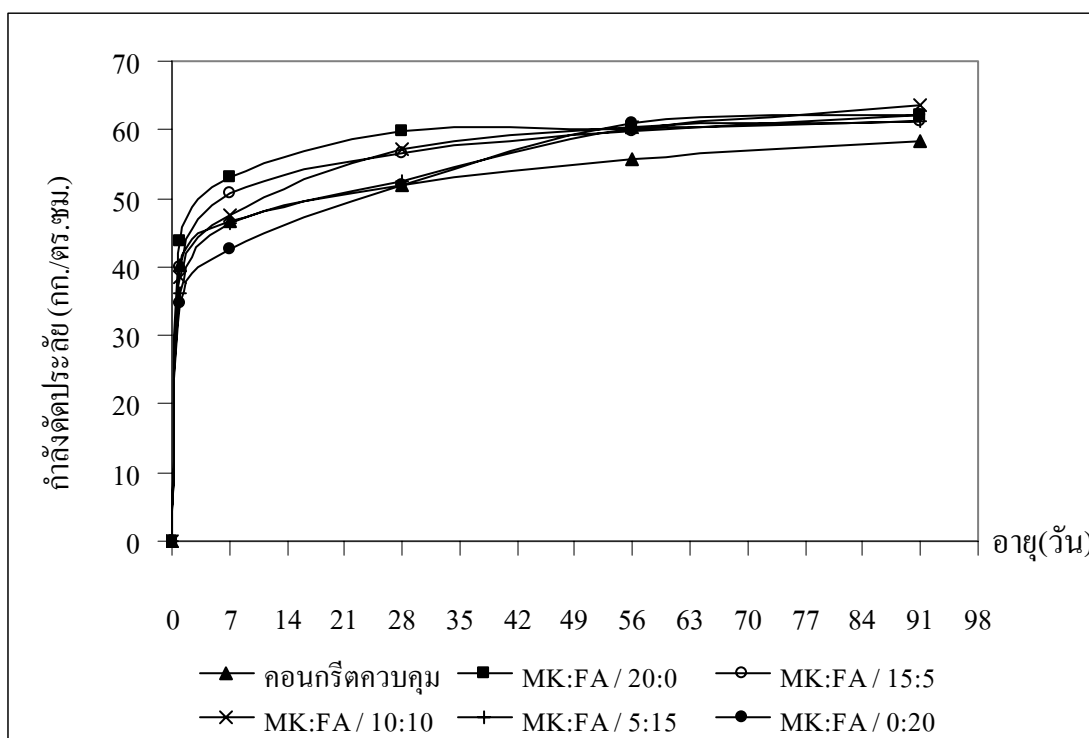
ก้างอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

ก้างอัดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมแสดงในตารางที่ 14 และภาพที่ 26 พบว่าดินขาวและเถ้าลอยมีผลต่อก้างอัดของคอนกรีต โดยมีผลไปในลักษณะเช่นเดียวกันกับก้างอัดของคอนกรีตซึ่งคอนกรีตผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) จะมีก้างอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตลอดช่วงอายุทดสอบ 1-91 วัน และที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 และ 10:10 ที่อายุทดสอบ 1 วัน ก้างอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่หลังจากอายุทดสอบ 7 วัน การพัฒนาก้างอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดังกล่าวจะสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15 และ 0:20 จะพบว่าก้างอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในช่วงอายุทดสอบ 1-7 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และจะเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่ 28 วัน หลังจากนั้นก้างอัดที่ทดสอบได้จะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม จากผลการทดสอบอาจกล่าวได้ว่าเมื่อใช้ดินขาวและเถ้าลอยผสมในคอนกรีต โดยมีดินขาวร้อยละ 15-20 มีผลดีต่อการพัฒนาก้างอัดในช่วงต้น 1-7 วัน และเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15-20 ในส่วนผสมมีผลให้ก้างอัดในช่วงต้นลดลงแต่ในช่วงปลายก้างอัดของ

คอนกรีตจะเพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ให้ค่ากำลังค้ำสูงที่อายุทดสอบ 91 วัน เช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 14 กำลังค้ำของคอนกรีตที่อายุทดสอบต่าง ๆ

ประเภทส่วนผสม	W/B	กำลังค้ำประลัย (กก./ตร.ซม.)				
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	40.2	46.9	52.0	55.7	58.4
MK:FA/20:0	0.52	43.6	53.0	59.7	60.0	62.1
MK:FA/15:5	0.51	40.1	50.8	56.5	59.8	61.1
MK:FA/10:10	0.48	38.5	47.5	57.1	60.4	63.7
MK:FA/5:15	0.46	36.1	46.4	52.4	60.0	61.3
MK:FA/0:20	0.44	34.8	42.6	51.8	60.9	62.1



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังค้ำประลัยกับอายุทดสอบของคอนกรีตส่วนผสมต่าง ๆ

ความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

จากการทดสอบความต้านทานการกัดสีโดยใช้เครื่องมือทดสอบเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C944-90a ที่ดัดแปลงจากเครื่องเจาะดังแสดงภาพผนวกที่ ข8 โดยพิจารณาความต้านทานการกัดสีจากน้ำหนักที่หายไปของก้อนตัวอย่างต่อพื้นที่การกัด ผลการทดสอบการกัดสีแสดงดังตารางที่ 15 พบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกส่วนผสมมีค่าน้ำหนักที่หายไปต่อพื้นที่การกัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม แสดงว่าคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วน มีความต้านทานการกัดสีสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ โดยที่อายุ 28 วัน ความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 28-34 ส่วนที่อายุทดสอบ 56 วัน ความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 39-54 และพบว่าแต่ละอัตราส่วนมีค่าไม่แตกต่างกันชัดเจน แต่คอนกรีตที่ผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) มีค่าความต้านทานการกัดสีสูงสุดทั้งอายุทดสอบ 28 และ 56 วัน และเมื่อพิจารณาถึงสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม พบว่าค่าความต้านทานการกัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดและอายุการบ่มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการอัดไม่ได้เป็นปัจจัยโดยตรงต่อความต้านทานการกัดสี แต่เป็นผลชัดเจนจากคุณลักษณะของเพสต์ที่ทึบแน่นและมีช่องว่างขนาดเล็กมากขึ้น (Frias and Cabrera, 2000) ดังจะเห็นได้จากความต้านทานการกัดสีที่อายุทดสอบ 28 วัน ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยล้วนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมแม้ว่ากำลังอัดจะต่ำกว่าก็ตาม และยังพบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานไม่มีผลกระทบต่อค่าต้านทานการกัดสี

ตารางที่ 15 น้ำหนักที่หายไปจากการกัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม

ประเภทส่วนผสม	W/B	น้ำหนักที่หายไป / พื้นที่การกัด (ก./ตร.ซม.)	
		28 วัน	56 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	0.0776	0.0755
MK:FA/20:0	0.52	0.0511	0.0344
MK:FA/15:5	0.51	0.0516	0.0405
MK:FA/10:10	0.48	0.0551	0.0463
MK:FA/5:15	0.46	0.0556	0.0450
MK:FA/0:20	0.44	0.0541	0.0362

ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

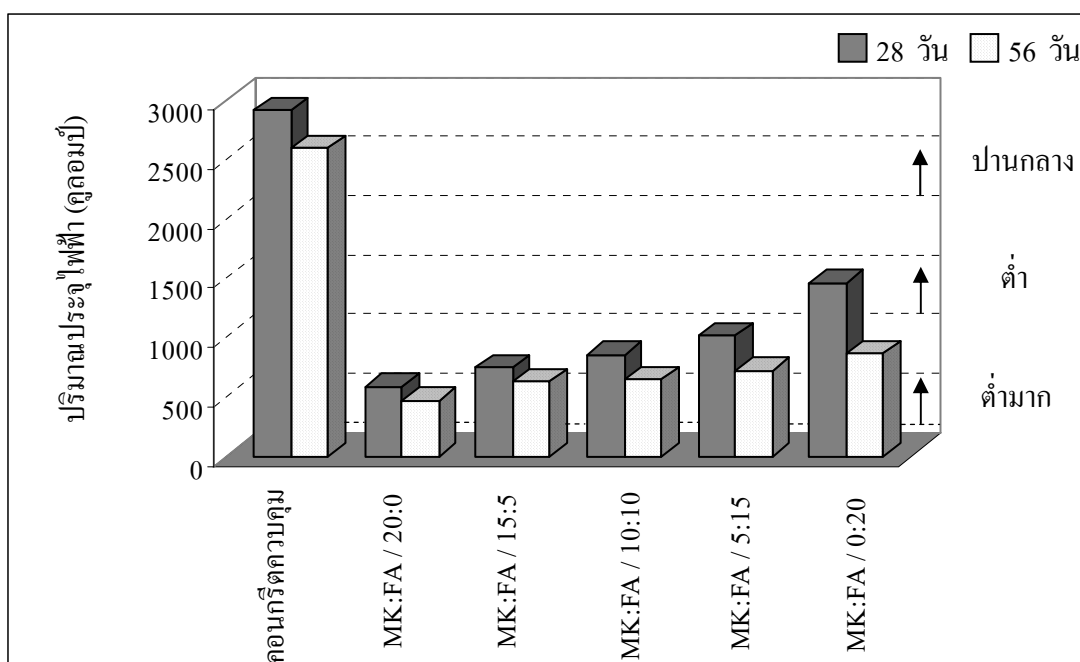
จากการทดสอบหาการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยวิธี Rapid Chloride Permeability Test ดังแสดงในตารางที่ 16 พบว่าคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนมีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างชัดเจน หากพิจารณาเปรียบเทียบในกลุ่มคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย คอนกรีตผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) จะมีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านต่ำสุด โดยปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยพร้อมกับลดปริมาณดินขาว

ตารางที่ 16 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่าง ๆ ที่อายุทดสอบ 28 และ 56 วัน

ประเภท ส่วนผสม	W/B	ปริมาณดินขาว (%)	ปริมาณเถ้าลอย (%)	ปริมาณประจุ (คูลอมป์)	
				28 วัน	56 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	0	0	2916	2595
MK:FA / 20:0	0.55	20	0	585	467
MK:FA / 15:5	0.52	15	5	743	626
MK:FA / 10:10	0.49	10	10	851	644
MK:FA / 5:15	0.46	5	15	1015	720
MK:FA / 0:20	0.43	0	20	1453	859

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับระดับความซึมผ่านของคลอไรด์กับมาตรฐาน ASTM C1202 ในตารางที่ 17 ซึ่งแสดงผลดังภาพที่ 27 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีระดับความซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับปานกลางทุกอายุทดสอบ และคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยตั้งแต่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0 จนถึง 5:15 มีระดับความซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับต่ำมากทุกอายุทดสอบเช่นกัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเฉพาะเถ้าลอย (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20) จะมีระดับความซึมผ่านของคลอไรด์ที่อายุทดสอบ 28 วัน อยู่ในระดับต่ำ และเมื่ออายุทดสอบ 56 วัน ระดับความซึมผ่านของคลอไรด์จะลดลงมาที่ระดับต่ำมาก โดยระดับ

การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่าลดลงอย่างมากเป็นผลเนื่องจาก อนุภาคดินขาว และเถ้าลอยทำหน้าที่อุดแทรกช่องว่างทันทีหลังการผสม และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น โดยในช่วงก่อนอายุทดสอบ 28 วัน จะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาวเป็นส่วนใหญ่ และหลังจากนั้นจะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย



ภาพที่ 27 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่อายุ 28 และ 56 วัน

ตารางที่ 17 ปริมาณประจุไฟฟ้าและระดับความซึมผ่านของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202

ปริมาณประจุ (คูลอมป์)	ความซึมผ่านของคลอไรด์
> 4,000	สูง
2,000-4,000	ปานกลาง
1,000-2,000	ต่ำ
100-1,000	ต่ำมาก
< 100	ไม่มีการซึมผ่าน

การทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test)

งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากก้อนตัวอย่างที่ผ่านการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าให้เหล็กเสริมที่ฝังในตัวอย่างคอนกรีตเกิดสนิมซึ่งเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากรายงานอื่น (สุวิมล และ ประเสริฐ, 2545) แม้ว่าได้กำหนดระยะเวลาการทดสอบไว้ที่ 91 วัน แต่ในการทดสอบจริงได้ดำเนินการต่อเนื่องจนถึง 140 วัน โดยนำค่าความต่างศักย์ที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แสดงถึงความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนจากสนิมของเหล็กเสริม ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C876 ในตารางที่ 18 ซึ่งผลการทดสอบแสดงในลักษณะความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาทดสอบในภาพที่ 28 แสดงว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงจนมีค่าติดลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ ที่ระยะเวลาทดสอบ 8 วัน ซึ่งแสดงว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตควบคุมมีค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมมากกว่าร้อยละ 90 และเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงตามเวลาจนมีค่าประมาณ -600 ถึง -700 มิลลิโวลต์ ตัวอย่างทดสอบจะเริ่มแตกตามแนวร้าวที่ ระยะเวลาทดสอบ 69 วัน ดังแสดงในตารางสรุปที่ 19

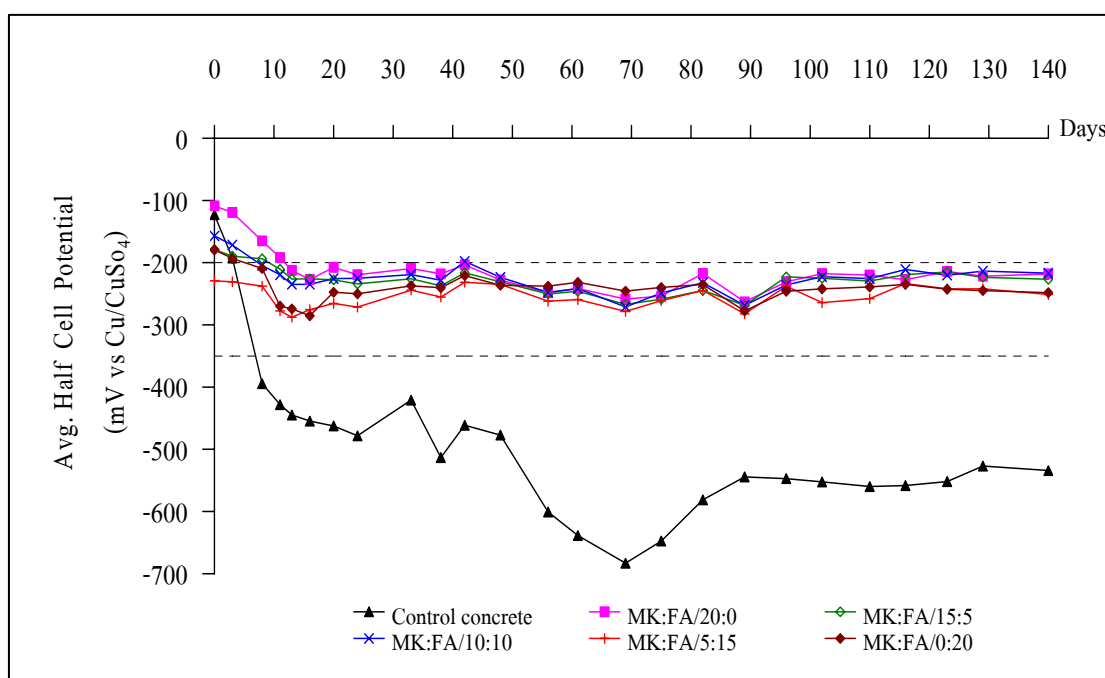
โดยการแตกร้าวของคอนกรีตควบคุมเป็นผลจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมอย่างรุนแรงทำให้ปริมาตรของเหล็กเพิ่มมากขึ้นจนเกิดแรงดันภายในเพียงพอที่จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว โดยรอยแตกจะกว้างมากขึ้นและมีน้ำสนิมไหลเยิ้มตามรอยแตกเมื่อระยะทดสอบนานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 29 เมื่อพิจารณาในกลุ่มของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยพบว่าแนวโน้มของการลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นไปในทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง -200 ถึง -300 มิลลิโวลต์ ตลอดช่วงระยะเวลาการทดสอบ 140 วัน และไม่ปรากฏการแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบ มีเพียงน้ำสนิมเกิดขึ้นด้านบนของตัวอย่างทดสอบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 30 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับตารางที่ 18 พบว่าตั้งแต่ช่วงอายุทดสอบ 10-140 วัน คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยมีค่าความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนจากสนิมที่ไม่แน่นอนแม้ว่าอาจมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนได้ และพบว่าอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ต่างกัน ไม่แสดงผลกระทบต่อความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ชัดเจน

แม้ว่าข้อมูลจากผลการทดสอบวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าแปรผันขึ้นลงในบางช่วงเนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่วัดด้วยวิธี Half Cell Potential ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น แต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้อย่างหนึ่งถึงความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าดิน

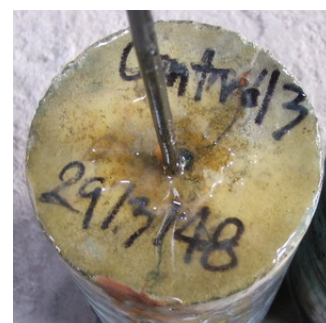
ขาวและเถ้าลอยสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้านความต้านทานการกัดกร่อนให้ดีขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของดินขาวและเถ้าลอยที่ช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตให้มีความพรุนลดลง ความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้ออกซิเจน ความชื้น และคลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าไปสู่เหล็กเสริมได้ยากขึ้นนอกจากนี้เถ้าลอยยังทำหน้าที่ยึดจับคลอไรด์ที่อาจซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจึงช่วยลดโอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนของสนิมในเหล็กเสริมได้ด้วย

ตารางที่ 18 การเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์และความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนจากสนิมตามมาตรฐาน ASTM C876

ค่าความต่างศักย์ (mV)	ความน่าจะเป็นของการเกิดการกัดกร่อน
ติดลบมากกว่า -350	ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมมากกว่า 90%
ระหว่าง -200 ถึง -350	ไม่แน่นอน (มีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนได้)
ติดลบน้อยกว่า -200	ค่าความน่าจะเป็นของการไม่เกิดสนิมมากกว่า 90%



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาทดสอบ



เร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 75 วัน



เร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 91 วัน

ภาพที่ 29 การเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตควบคุมที่อายุต่าง ๆ



เร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 120 วัน



เร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 140 วัน



ภาพที่ 29 (ต่อ)

ตารางที่ 19 ระยะเวลาทดสอบที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมากกว่าร้อยละ 90 และเริ่มเห็นรอยแตกร้าว

ประเภทส่วนผสม	ระยะเวลาที่ค่าความต่างศักย์ถึง -350 mV (วัน)	ระยะเวลาที่คอนกรีตเริ่มเห็นรอยแตก (วัน)	ความต่างศักย์ที่เริ่มเห็นรอยแตก (mV)
คอนกรีตควบคุม	8	69	-600 ถึง -700
MK:FA / 20:0	NA*	NA*	NA*
MK:FA / 15:5	NA*	NA*	NA*
MK:FA / 10:10	NA*	NA*	NA*
MK:FA / 5:15	NA*	NA*	NA*
MK:FA / 0:20	NA*	NA*	NA*

หมายเหตุ NA* : ไม่สามารถวัดค่าได้หรือยังไม่ปรากฏค่าในช่วงระยะเวลาทดสอบ 140 วัน



คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 91 วัน



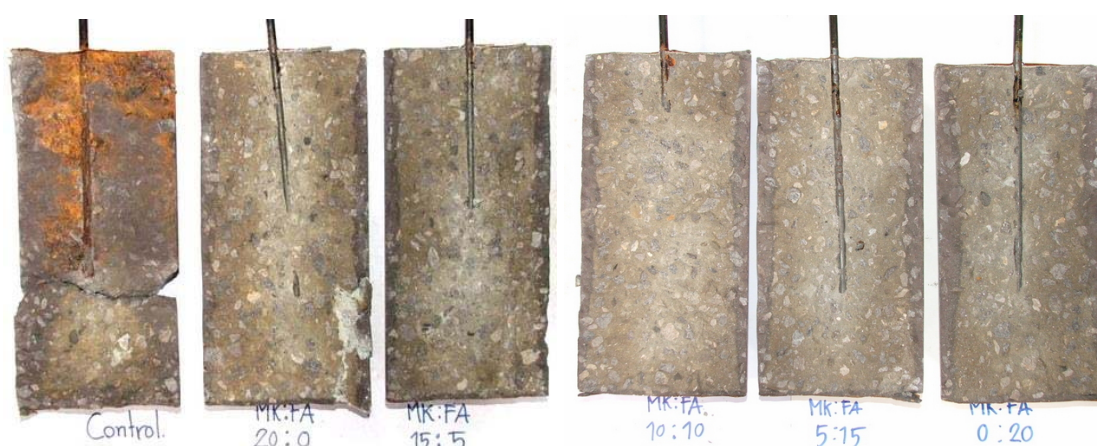
คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 140 วัน

ภาพที่ 30 ตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆที่อายุ 91 และ 140 วัน

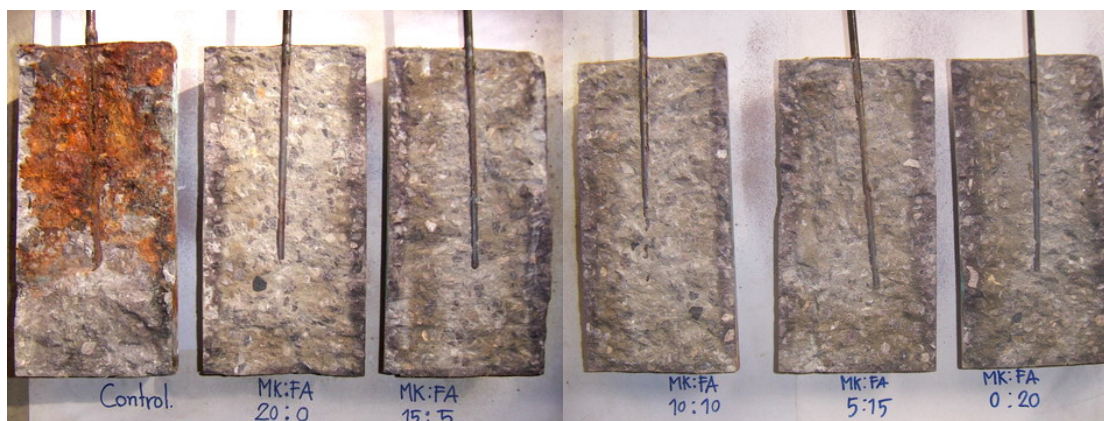
สภาพการเกิดสนิมเหล็กและการวัดระดับความลึกของคลอไรด์โดยการฟั่นสารละลาย

ซิลเวอร์ไนเตรด (Silver Nitrate; AgNO_3)

การวัดระดับความลึกของคลอไรด์ด้วยการฟั่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดและวัดระดับความลึกของขอบเขตสีที่แตกต่างกัน โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการเร่งการเกิดสนิมและวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะเวลา 91 และ 140 วัน กดให้แตกตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางออกเป็นสองส่วน และฉีดฟั่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดบนผิวด้านในของตัวอย่างคอนกรีต สารละลายซิลเวอร์ไนเตรดสามารถทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ให้สีม่วงดำจึงทำให้มองเห็นแถบสีม่วงดำในเนื้อคอนกรีต ซึ่งแสดงถึงการซึมผ่านเนื้อคอนกรีตของคลอไรด์ ดังภาพที่ 31-32 ระยะความลึกของคลอไรด์ที่วัดได้สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่มองเห็นด้วยตาได้ โดยระยะซึมลึกเฉลี่ยของคลอไรด์ที่วัดได้แสดงในภาพที่ 33-34 และสรุปผลในตารางที่ 20 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีระยะซึมลึกเฉลี่ยที่ระยะเวลาทดสอบ 91 และ 140 วัน มากกว่า 7 ซม. ทำให้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตควบคุมไปถึงเหล็กเสริม จนเกิดการกัดกร่อนของสนิมอย่างรุนแรง ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยจะมีระยะซึมลึกเฉลี่ยไม่เกิน 1.9 และ 2.3 ซม. สำหรับระยะเวลาทดสอบ 91 และ 140 วัน ตามลำดับ และพบว่าอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกันไม่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของระยะซึมลึกเฉลี่ยที่ชัดเจนมากนัก



ภาพที่ 31 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่พ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 91 วัน

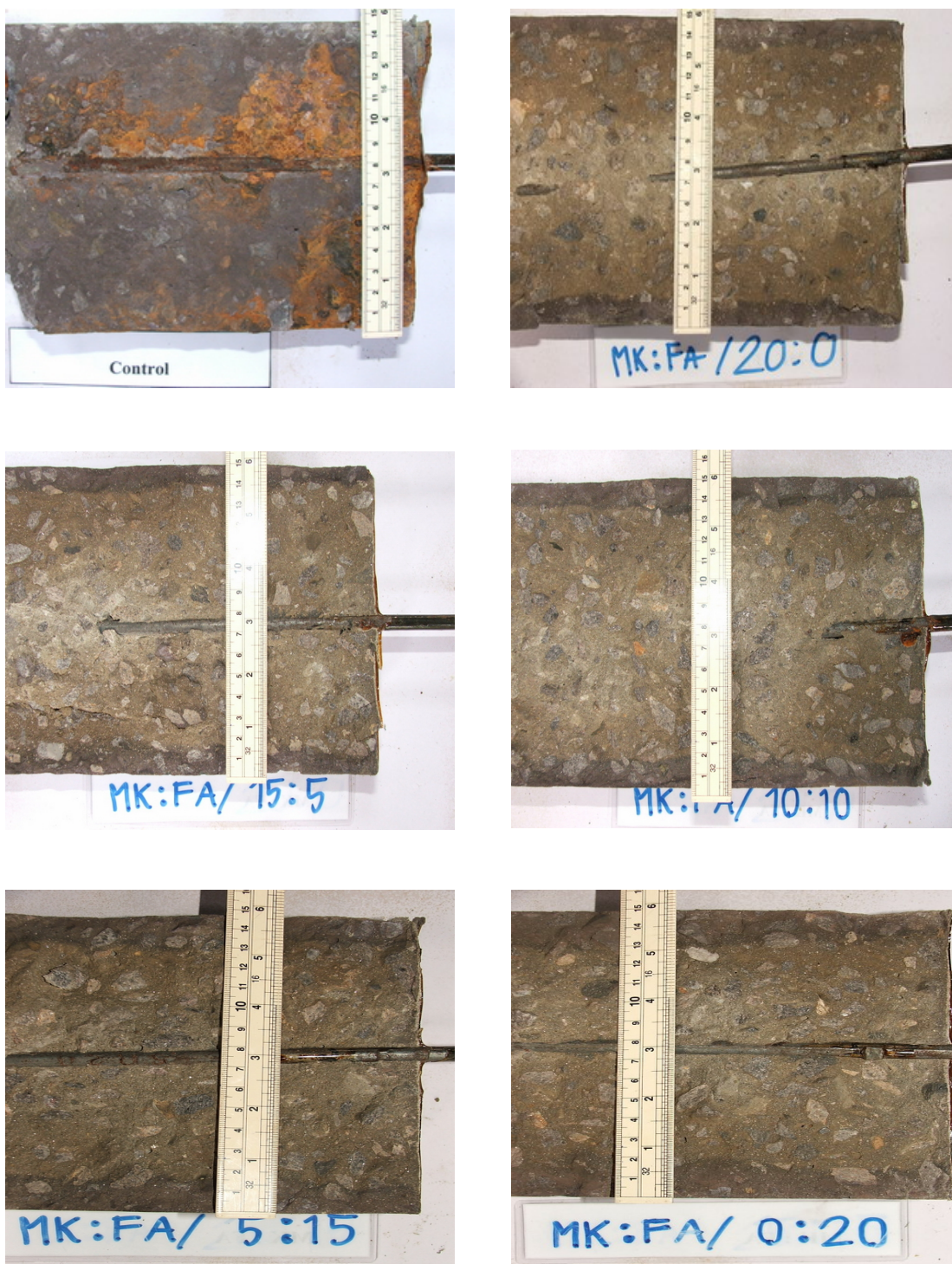


ภาพที่ 32 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่พ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ในเตรด ที่อายุ 140 วัน

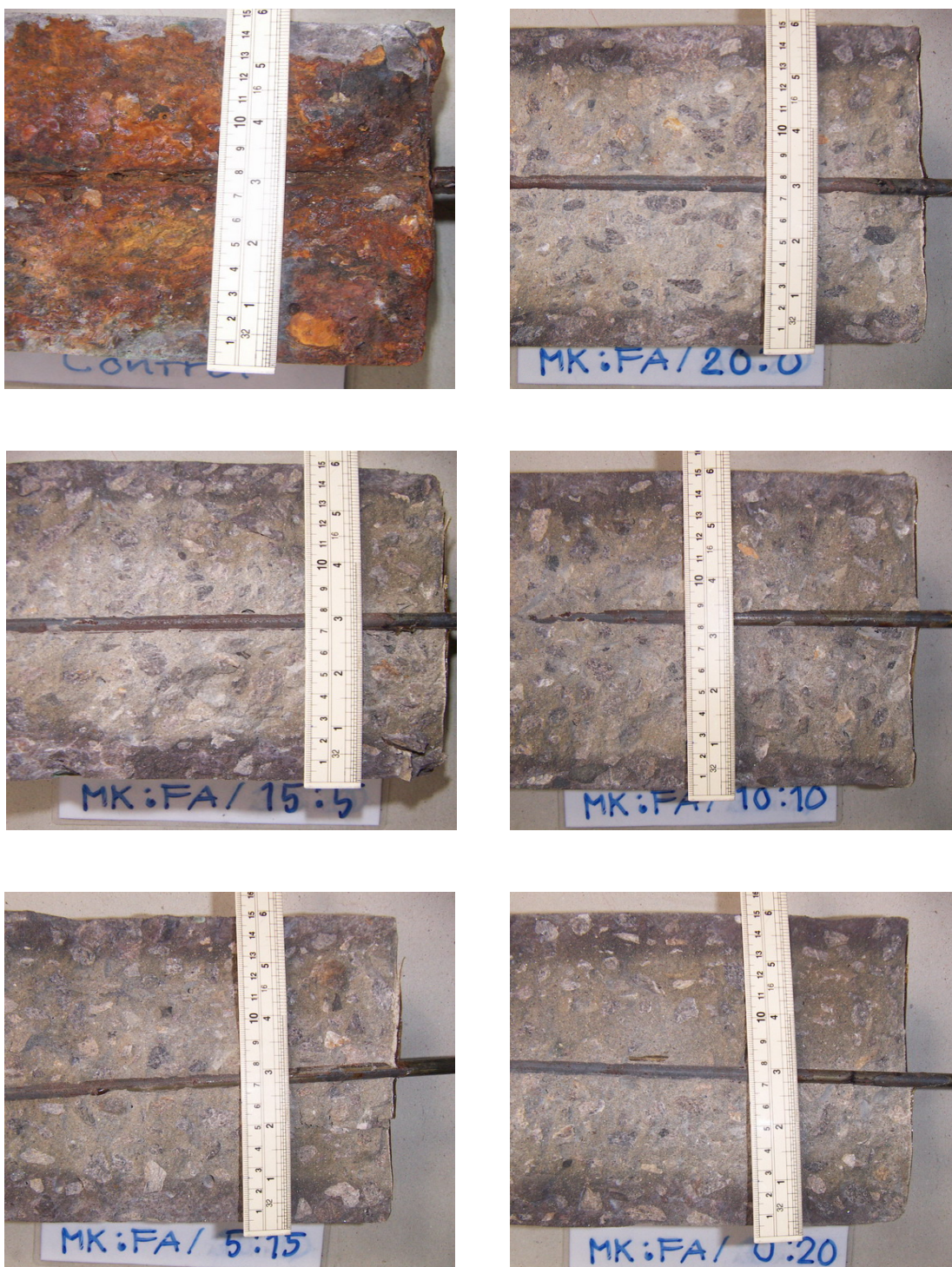
ผลการทดสอบการวัดระดับความลึกของคลอไรด์ด้วยการพ่นสารละลายซิลเวอร์ในเตรดมีความสอดคล้องกับการทดสอบวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและสามารถสรุปได้ว่าดินขาวและเถ้าลอยช่วยปรับปรุงคุณลักษณะของเพสต์และเนื้อคอนกรีตให้ทึบแน่นขึ้น ทำให้คุณสมบัติด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์และความต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมดีขึ้น

ตารางที่ 20 ระยะซึมลึกเฉลี่ยของคลอไรด์จากการพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ในเตรด ที่อายุทดสอบ 91 และ 140 วัน

ประเภทส่วนผสม	ระดับความลึกเฉลี่ยของคลอไรด์ (ซ.ม.)	
	91 วัน	140 วัน
คอนกรีตควบคุม	> 7	> 7
MK:FA / 20:0	1.2	1.9
MK:FA / 15:5	1.1	1.8
MK:FA / 10:10	1.2	1.7
MK:FA / 5:15	1.3	2.1
MK:FA / 0:20	1.9	2.3



ภาพที่ 33 การวัดระดับความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 91 วัน



ภาพที่ 34 การวัดระดับความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 140 วัน

จากการประเมินความเสียหายของเหล็กเสริมหลังจากกดก้อนตัวอย่างทดสอบให้แตกออก แล้วแยกเหล็กเสริมออกจากคอนกรีตนำมาประเมินความเสียหายโดยเปรียบเทียบระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมตามแนวทางการวิจัยก่อนหน้านี้ (สุวิมล และ ประเสริฐ, 2545) ดังแสดงในตารางที่ 21 ซึ่งจะแบ่งความเสียหายออกเป็น 5 ระดับ และผลการประเมินในการทดลองนี้สรุปได้ดังตารางที่ 22 พบว่าที่ระยะเวลาทดสอบ 91 วัน ระดับความเสียหายของเหล็กเสริมในคอนกรีตควบคุมอยู่ในช่วงเสียหายรุนแรงปานกลาง ถึง รุนแรงมาก โดยเหล็กเสริมจะถูกกัดกร่อนจากสนิมจนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหายไปประมาณร้อยละ 20-80 ในขณะที่ระดับความเสียหายของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยจัดอยู่ในช่วงรุนแรงน้อยมาก หรือไม่ปรากฏโดยลักษณะผิวของเหล็กยังอยู่ในสภาพดีหรือปรากฏร่องรอยสนิมเพียงเล็กน้อย พื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลงประมาณร้อยละ 0-5 สำหรับที่ระยะเวลาทดสอบ 140 วัน ระดับความเสียหายของเหล็กเสริมในคอนกรีตควบคุมจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับเสียหายรุนแรงมากที่สุด โดยเนื้อเหล็กจะเสียหายมากกว่าร้อยละ 80 ส่วนในคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยจะมีระดับความเสียหายเพิ่มขึ้นเป็นระดับ 4 ถึง 5 คือรุนแรงน้อยถึงรุนแรงน้อยมากหรือไม่ปรากฏความเสียหายเลย

ตารางที่ 21 การจำแนกระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

ระดับ	ความรุนแรง	ลักษณะที่ปรากฏ	ลักษณะ
1	รุนแรงมากที่สุด	สนิมกัดกร่อนจนเนื้อเหล็ก หายมากกว่า 80%	
2	รุนแรงมาก	สนิมกัดกร่อนอย่างรุนแรง จนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม หายไปประมาณ 40-80%	
3	รุนแรงปานกลาง	สนิมกัดกร่อนจน พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม หายไปประมาณ 20-40% หรือน้อยกว่า	
4	รุนแรงน้อย	ปรากฏร่องรอยของสนิม ชัด การกัดกร่อนอาจทำให้ พื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลง ประมาณ 5-20%	
5	รุนแรงน้อยมาก หรือไม่ปรากฏ	ผิวเหล็กยังอยู่ในสภาพดี หรือไม่ปรากฏร่องรอยสนิม เพียงเล็กน้อย พื้นที่หน้าตัด เหล็กลดลงประมาณ 0-5%	

ที่มา : สุวิมล และ ประเสริฐ (2545)

ตารางที่ 22 การจำแนกระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่ระยะเวลาทดสอบ 91 และ 140 วัน

ประเภทส่วนผสม		ระยะเวลาทดสอบ (วัน) / ระดับความรุนแรง
คอนกรีตควบคุม	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 2-3 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 1 
MK:FA / 20:0	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 
MK:FA / 15:5	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 
MK:FA / 10:10	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 
MK:FA / 5:15	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 
MK:FA / 0:20	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 