บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการเกิดคาร์บอเนชั่นในคอนกรีตในครั้งนี้ ได้พิจารณาผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลในหัวข้อดังต่อไปนี้คือ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน และคุณสมบัติด้านการเกิดคาร์บอเนชั่น

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

สำหรับคุณสมบัติทางด้านกายภาพของวัสดุประสานที่ศึกษาได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน (Blaine fineness) และภาพถ่ายขยายของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM)

4.1.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน

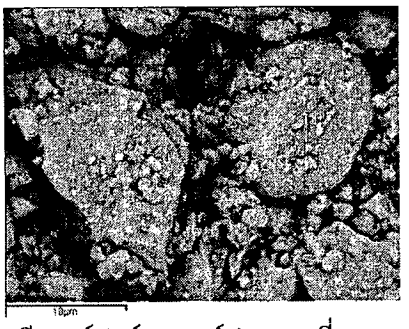
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3.12 ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนนั้นจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.46 2.96 2.32 และ 2.69 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนนั้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (3,250 ซม.^{2}/ก.) และเถ้าลอย (3,550 ซม.^{2}/ก.) มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ส่วนความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือเท่ากับ 4,600 ซม.^{2}/ก. และ 5,210 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

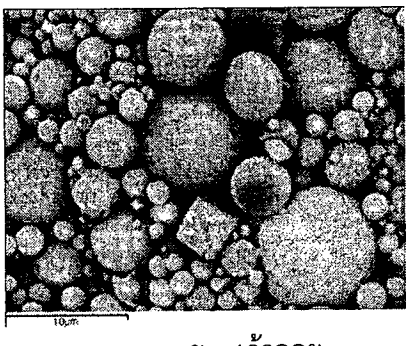
ประเภทของวัสดุประสาน / รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.46	2.96	2.32	2.69
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,250	3,550	4,600	-	5,210
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	17	17	14	-	-

4.1.1.2 ภาพถ่ายขยายของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope: SEM ของวัสดุประสาน

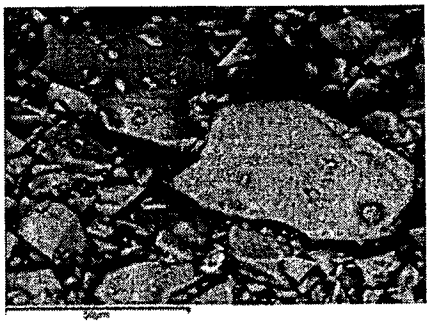
จากการถ่ายภาพขยายของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope: SEM ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่ารูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยมคม ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน ส่วนรูปร่างของอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลมเรียบมีขนาดต่างๆกันกระจายอยู่เห็นได้ชัดเจน ซึ่งคล้ายๆ กับของซิลิกาฟูม แต่ของซิลิกาฟูมจะมีขนาดค่อนข้างเล็กมาก



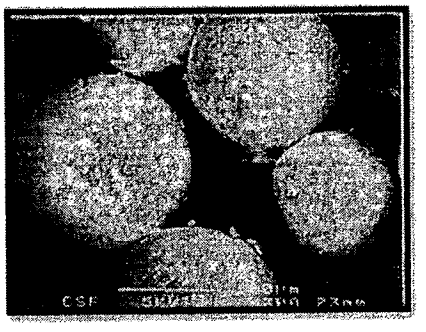
ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



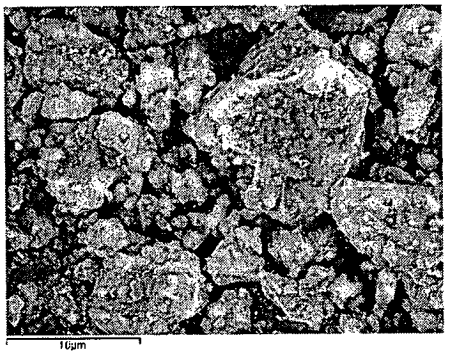
ข. เถ้าลอย



ค. ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ง. ซิลิกาฟูม



จ. ผงหินปูนขนาด 8 ไมโครเมตร

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry : XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า SiO_2 ของเถ้าลอย (ร้อยละ 40.93) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ร้อยละ 34.06) มีค่าค่อนข้างสูง โดยเฉพาะของซิลิกาฟูม (ร้อยละ 92.01) ซึ่งสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.51 ในขณะที่ของผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมาก คือเท่ากับร้อยละ 0.45 ในกรณีของ Al_2O_3 ก็เช่นกันโดยที่ของเถ้าลอยและของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เท่ากับร้อยละ 22.42 และ 16.27 ตามลำดับ ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซิกาฟูมและผงหินปูน เท่ากับร้อยละ 4.97 0.70 และ 0.05 ตามลำดับ และกรณีของ Fe_2O_3 ของเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลกาฟูม และผงหินปูน มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.64 3.78 1.70 1.20 และ 0.03 ตามลำดับ ส่วนในกรณี CaO นั้นพบว่าของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 13.63 (เถ้าลอย) 36.05 (ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด) ร้อยละ 65.38 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) ร้อยละ 64.56 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5) และร้อยละ 55.25 ซึ่งเป็นของผงหินปูน ส่วนของซิลิกาฟูมมีปริมาณ CaO น้อยมากคือร้อยละ 0.22

ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆได้แก่ MgO, Na_2O, K_2O, SO_3, TiO_2, P_2O_3, Free Lime และสารที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue %) นอกเหนือจากออกไซด์หลักที่กล่าวมาแล้วพบว่าของปูนซีเมนต์ รวมทั้งเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ยกเว้นกรณีของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผา (Loss on Ignition; LOI) ของผงหินปูนค่อนข้างสูงคือร้อยละ 43.79 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 2.27, 1.59 และ 0.46 ตามลำดับ และ MgO ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าสูงถึงร้อยละ 7.38

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สารประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน
SiO_2	19.51	40.93	34.06	92.01	0.45
Al_2O_3	4.97	22.42	16.27	0.70	0.05
Fe_2O_3	3.78	13.64	1.70	1.20	0.03
CaO	65.38	13.63	36.05	0.22	55.20
MgO	1.08	2.93	7.38	0.21	0.34
Na_2O	<0.01	0.89	0.21	-	<0.01
K_2O	0.47	2.39	1.09	-	0.01
SO_3	2.16	1.92	2.16	-	<0.01
TiO_2	0.25	0.43	-	-	<0.01
P_2O_3	0.07	0.15	-	-	0.01
Free Lime	1.00	0.22	-	-	-
LOI	2.27	0.46	1.44	-	43.12
Insoluble Residue %	0.28	-	-	-	-

4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (Cementitious properties) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal consistency) ของเพสต์ การก่อตัว (Setting time) ของเพสต์ การไหลแผ่ (Flow) ของมอร์ต้าร์ และ/หรือค่าการยุบตัว (Slump) และค่าการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump loss) ของคอนกรีต และกำลังอัดประลัย (Compressive strength; fc') ของมอร์ต้าร์ และ/หรือของคอนกรีต

4.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

ผลการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (Normal consistency) ของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาครั้งนี้นั้น จำนวน 9 ตัวอย่างสัดส่วนผสม (ผงหินปูนที่ใช้ขนาด 4 ไมโครเมตร) โดยได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.3 และ ภาพที่ 4.3

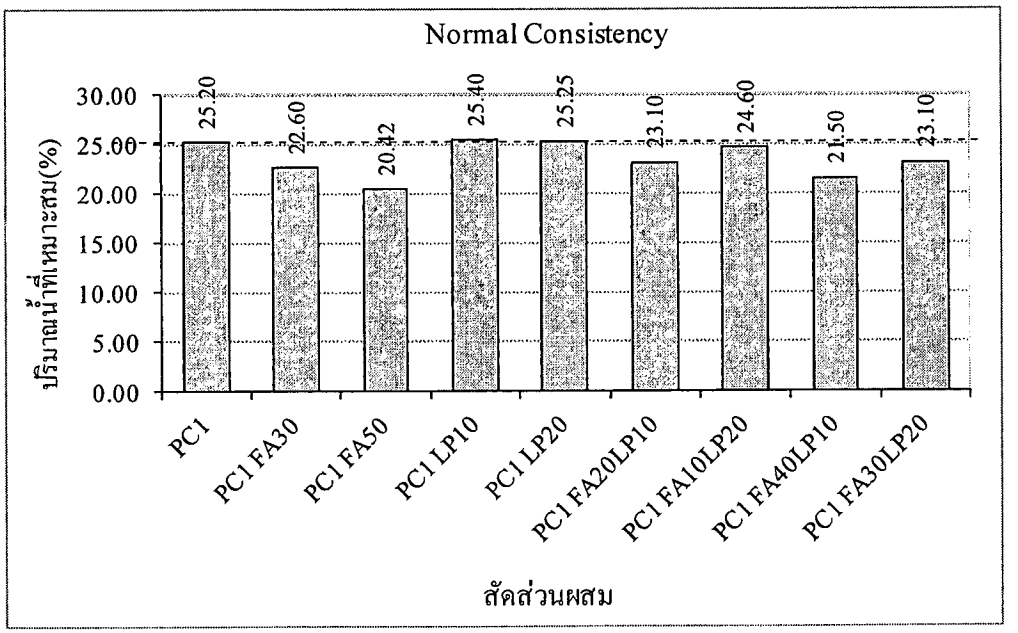
จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 25.20 ส่วนกรณีของเพสต์เมื่อแทนที่เถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่ำกว่ากรณีไม่แทนที่โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้น จะได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมยิ่งต่ำลง ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยในการไหลลื่นจึงทำให้มีความต้องการน้ำน้อย ส่วนกรณีแทนที่ผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าจะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มที่สูงขึ้นทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนที่แทนที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้น สำหรับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนก็จะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่

เถ้าลอย และแทนที่ผงหินปูน กล่าวคือถ้าปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยมากจะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มีค่าต่ำลง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ)
1	PC1	25.20
2	PC1 FA30	22.60
3	PC1 FA50	20.40
4	PC1 LP10	25.40
5	PC1 LP20	25.25
6	PC1 FA20LP10	23.10
7	PC1 FA10LP20	24.60
8	PC1 FA40LP10	21.50
9	PC1 FA30LP20	23.10

หมายเหตุ ผงหินปูนขนาดอนุภาค 4 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

ตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.4 แสดงการก่อตัว (Setting time) ของเพสต์ของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 9 สัดส่วนผสม (ผงหินปูนที่ใช้ขนาด 4 ไมโครเมตร) โดยเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเพสต์ของการแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยศึกษาทั้งการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และการก่อตัวขั้นสุดท้าย (Final setting time)

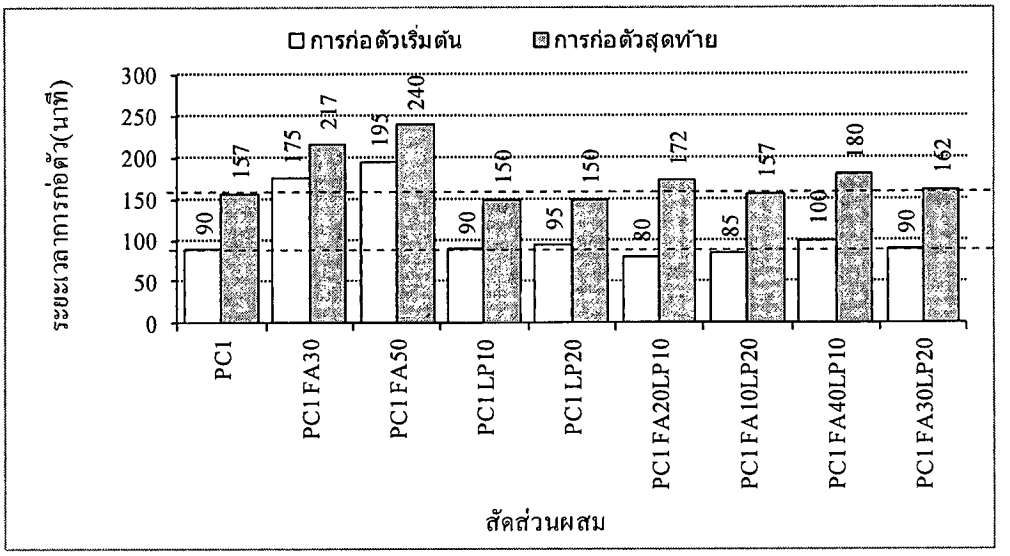
จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เท่ากับ 104 นาที ส่วนการก่อตัวขั้นสุดท้ายเท่ากับ 157 นาที ส่วนกรณีของเพสต์เมื่อแทนที่เถ้า

ลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ระยะเวลาการก่อตัวที่มากกว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวยิ่งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนกรณีแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้นพบว่าจะได้ระยะเวลาการก่อตัวที่มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้มีการกระจายตัวของวัสดุประสานดีขึ้นส่งผลให้มีการทำปฏิกิริยาดีขึ้น สำหรับการก่อตัวของเพสต์แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนจะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่เถ้าลอย และแทนที่ผงหินปูน

ตารางที่ 4.4 การก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
1	PC1	90	157
2	PC1 FA30	175	217
3	PC1 FA50	195	240
4	PC1 LP10	90	150
5	PC1 LP20	95	150
6	PC1 FA20LP10	80	172
7	PC1 FA10LP20	85	157
8	PC1 FA40LP10	100	180
9	PC1 FA30LP20	90	162

หมายเหตุ ผงหินปูนขนาดอนุภาค 4 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.4 การก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

4.2.3 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

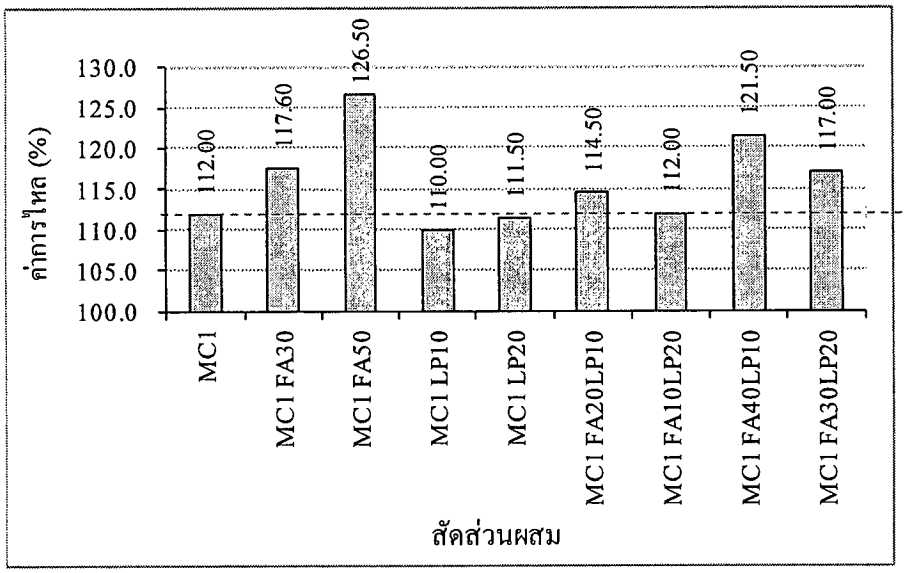
ตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.5 แสดงค่าการไหลแผ่ (Flow value) ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 9 สัดส่วนผสม (ผงหินปุนขนาดความละเอียด 4 ไมโครเมตร) โดยเปรียบเทียบระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ดังกล่าว โดยมอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

จากการศึกษาพบว่าค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ค่าเท่ากับร้อยละ 112 ส่วนกรณีค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่มากกว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยในการไหลลื่นทำให้การยุบตัวเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั้น พบว่า จะให้ค่าใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนที่แทนที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นมอร์ต้าร์จึงมีสภาพเหนียว สำหรับค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนจะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่เถ้าลอย และแทนที่ผงหินปูน

ตารางที่ 4.5 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ (ร้อยละ)
1	MC1	112.0
2	MC1 FA30	117.6
3	MC1 FA50	126.5
4	MC1 LP10	110.0
5	MC1 LP20	111.5
6	MC1 FA20LP10	114.5
7	MC1 FA10LP20	112.0
8	MC1 FA40LP10	121.5
9	MC1 FA30LP20	117.0

หมายเหตุ ผงหินปูนขนาดอนุภาค 4 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.5 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.2.4 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

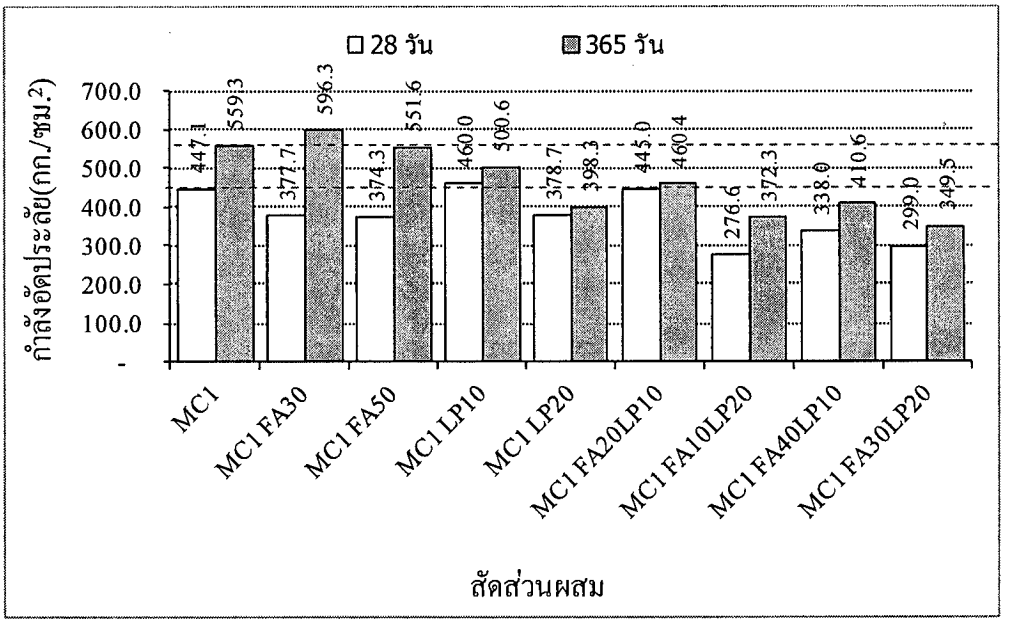
ตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.6 แสดงค่ากำลังอัดประลัย (Compressive strength) ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้ (ผงหินปุนขนาดความละเอียด 4 ไมโครเมตร) โดยศึกษากำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และการแทนที่เถ้าลอย และผงหินปูนในปูนซีเมนต์ดังกล่าว ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยศึกษาที่อายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ 28 วัน และ 365 วัน

จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่อายุ 28 วัน มีค่า 447 กก./ซม.^{2} ส่วนกรณีของตัวอย่างมอร์ต้าร์เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ค่ากำลังอัดที่น้อยกว่ากรณีไม่แทนที่โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้นค่ากำลังอัดยิ่งลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ส่วนกรณีแทนที่ผงหินปูนพบว่า ให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย สำหรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์แทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนจะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่เถ้าลอย และแทนที่ผงหินปูน ในขณะที่กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 365 วัน ทุกสัดส่วนผสมมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันและมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่สูงขึ้นในทุกสัดส่วนผสม โดยเฉพาะในตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่ามีแนวโน้มให้ค่าการพัฒนากำลังอัดประลัยในอัตราส่วนสูงขึ้นทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นมาก

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วันและ 365 วัน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	
		28 วัน	365 วัน
1	MC1	447	559
2	MC1 FA30	378	596
3	MC1 FA50	374	552
4	MC1 LP10	460	501
5	MC1 LP20	379	398
6	MC1 FA20LP10	445	460
7	MC1 FA10LP20	277	372
8	MC1 FA40LP10	338	411
9	MC1 FA30LP20	299	350

หมายเหตุ ผงหินปูนขนาดอนุภาค 4 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365วัน

4.2.5 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

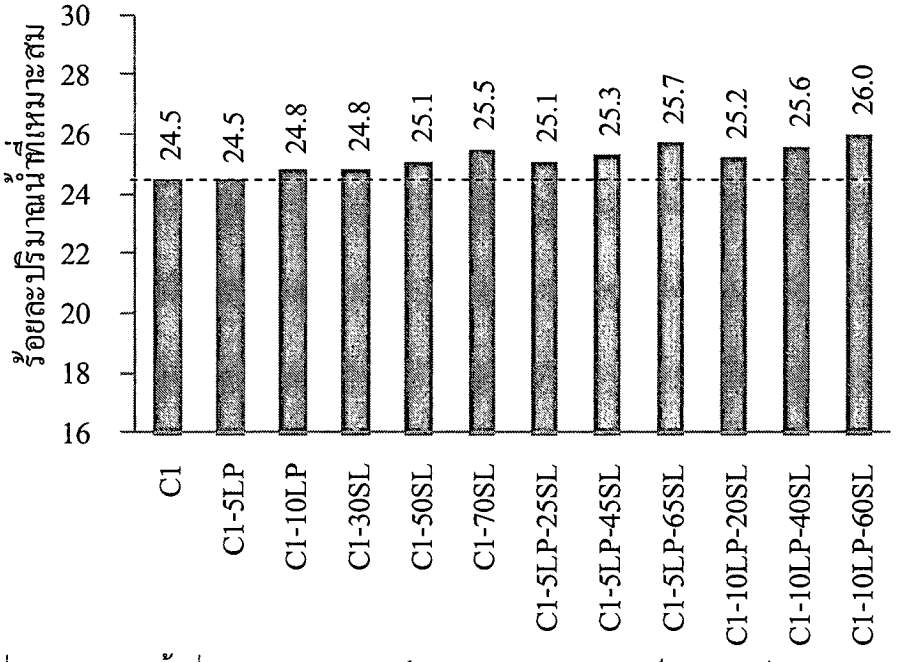
สำหรับผงหินปูนที่ใช้มีความละเอียดของขนาดอนุภาคเท่ากับ 8 ไมโครเมตร โดยผลการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (normal consistency) แสดงดังตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.2 ซึ่งพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 มีค่าเท่ากับร้อยละ 24.8 ซึ่งใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (ร้อยละ 24.5) ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นคือ ร้อยละ 50 และ 70 พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 25.1 และ 25.5 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากกว่า มีพื้นที่ผิวที่มากกว่า ส่งผลให้มีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น สำหรับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ผงหินปูน ร้อยละ 5 และ10 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 24.5 และ 24.8 ตามลำดับ

ซึ่งไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มีแนวโน้มว่าเมื่อปริมาณผงหินปูนมากขึ้น จะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่านั่นเอง ส่วนเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมกับผงหินปูน ก็จะให้ผลในทิศทางเดียวกันคือถ้าปริมาณการแทนที่ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมากขึ้น ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ก็จะสูงขึ้นตาม

ตารางที่ 4.7 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ)
1	C1	24.5
2	C1-5LP	24.5
3	C1-10LP	24.8
4	C1-30SL	24.8
5	C1-50SL	25.1
6	C1-70SL	25.5
7	C1-5LP-25SL	25.1
8	C1-5LP-45SL	25.3
9	C1-5LP-65SL	25.7
10	C1-10LP-20SL	25.2
11	C1-10LP-40SL	25.6
12	C1-10LP-60SL	26

หมายเหตุ ผงหินปูนขนาดอนุภาค 8 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.7 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

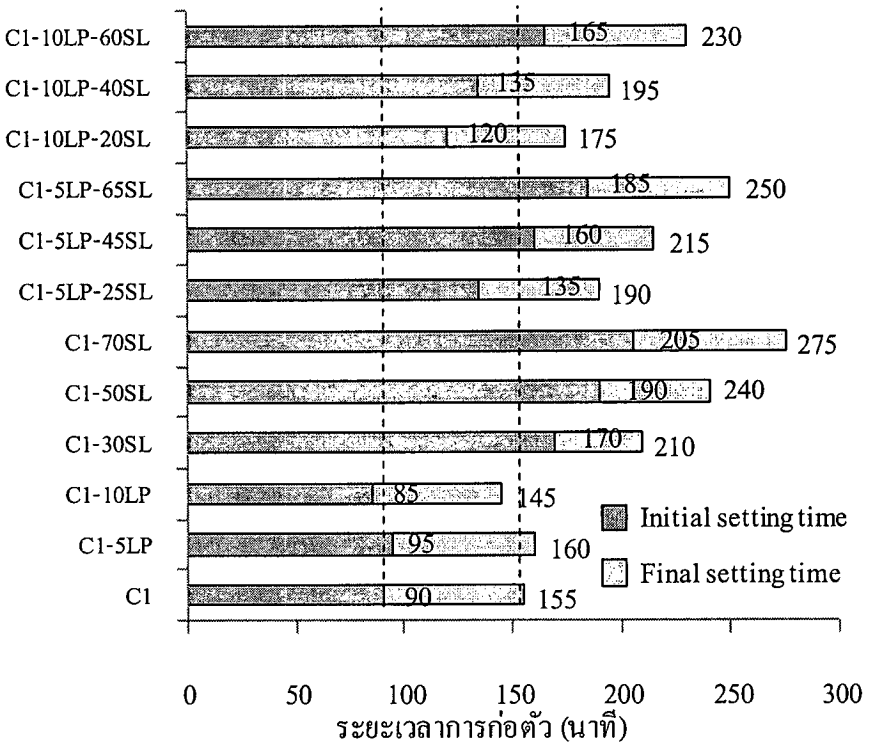
4.2.6 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

สำหรับผงหินปูนที่ใช้มีความละเอียดของขนาดอนุภาคเท่ากับ 8 ไมโครเมตร โดยตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.8 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน (ผงหินปูนมีความละเอียดของขนาดอนุภาคเท่ากับ 8 ไมโครเมตร) พบว่าระยะเวลาการก่อตัวระยะต้น (initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวระยะปลาย (final setting time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าเท่ากับ 90 นาทีและ 115 นาทีตามลำดับ ส่วนการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 95 นาทีและ 160 นาทีตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มว่ามากกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 การก่อตัวของเพสต์มีแนวโน้มเร็วกว่า ทั้งที่เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งมีผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูน (8 ไมโครเมตร) ซึ่งมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (16 ไมโครเมตร) สามารถไปแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์เป็นผลให้พื้นที่ผิวของอนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำมากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้มากขึ้น การก่อตัวจึงมีแนวโน้มว่าจะเร็วขึ้น(ปริมาณร้อยละ 10 อาจเป็นปริมาณที่มากเพียงพอ) ส่วนระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง รวมทั้งตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่า โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวก็จะช้ามากขึ้น และเมื่อมีการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งเป็นไปตามการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากขึ้น จะมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวช้ายิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.8 การก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	การก่อตัวระยะต้น (นาที)	การก่อตัวระยะปลาย (นาที)
1	C1	90	155
2	C1-5LP	95	160
3	C1-10LP	85	145
4	C1-30SL	170	210
5	C1-50SL	190	240
6	C1-70SL	205	275
7	C1-5LP-25SL	135	190
8	C1-5LP-45SL	160	215
9	C1-5LP-65SL	185	250
10	C1-10LP-20SL	120	175
11	C1-10LP-40SL	135	195
12	C1-10LP-60SL	165	230

หมายเหตุ ผงหินปูนขนาดอนุภาค 8 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.8 ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

4.2.7 ค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

สำหรับผงหินปูนที่ใช้มีความละเอียดของขนาดอนุภาคเท่ากับ 8 ไมโครเมตร โดยตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.9 แสดงค่าการยุบตัว (slump) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (18 ซม.) และโดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากขึ้น จะมีผลให้ค่าการยุบตัวมีแนวโน้มต่ำลง (คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30,50 และ 70 มีค่าเท่ากับ 17,15 และ 13 ซม. ตามลำดับ) ส่วนในกรณีของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ค่าการยุบตัวจะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีแนวโน้มต่ำลง เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะมีค่าแปรผกผันตาม ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อย

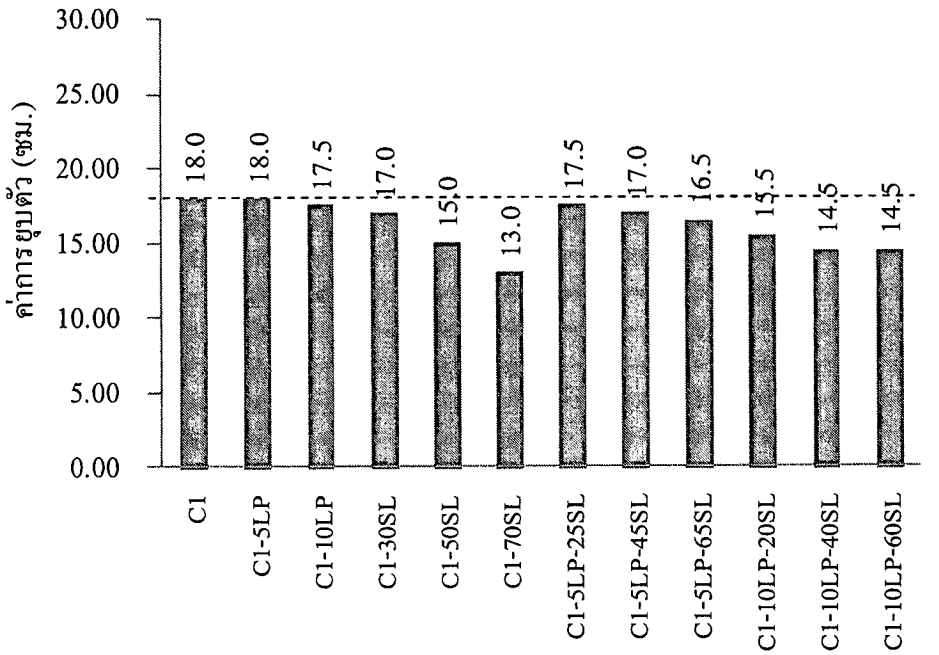
ตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.10 แสดงค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที พบว่าค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนในปริมาณร้อยละ10 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าของปูนซีเมนต์ เข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์กระจายตัวและทำปฏิกิริยาไฮรเดรชันได้ดีกว่า การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตจึงเกิดขึ้นมากกว่า ในขณะที่การแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนในปริมาณมากๆ (ร้อยละ 70) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาไฮรเดรชันเกิดได้น้อยกว่า และโดยเฉพาะเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยาไฮรเดรชันยิ่งเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อยลง สำหรับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คือเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มมากขึ้น ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าลดลง ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.11 แสดงค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที พบว่าค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้ม เป็นเช่นเดียวกับกรณีเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที

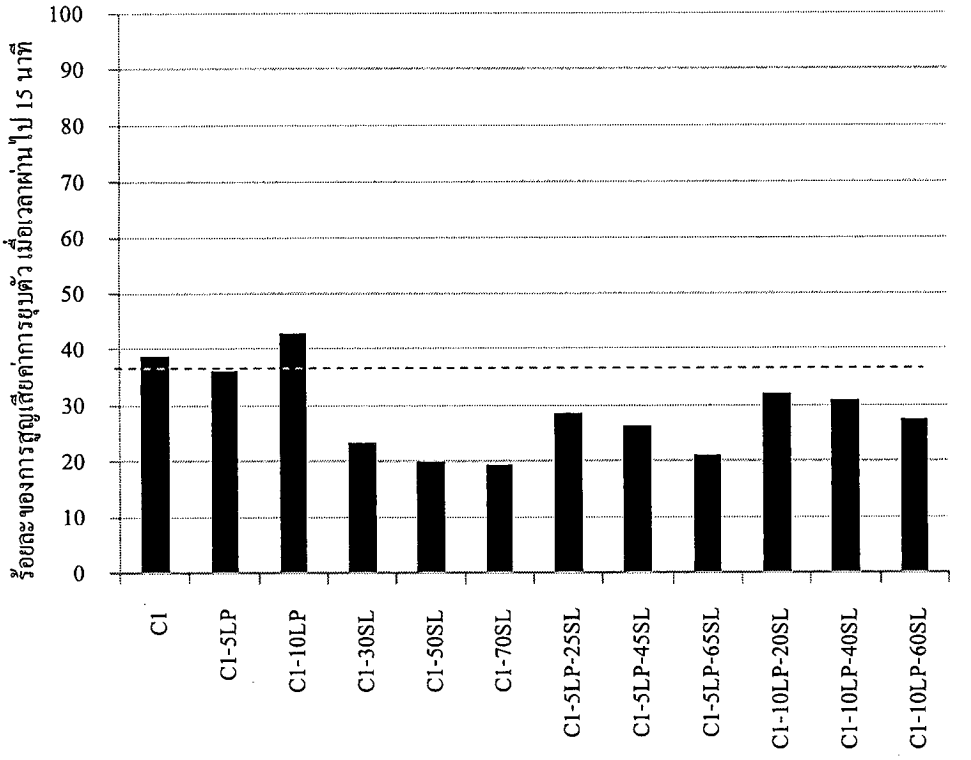
ตารางที่ 4.9 ค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ค่าการยุบตัว (ซม.)		
		เมื่อเวลาเริ่มแรก	เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที	เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที
1	C1	18.0	11.0	6.0
2	C1 – 5LP	18.0	11.5	7.5
3	C1 – 10LP	17.5	10.0	5.0
4	C1 – 30SL	17.0	13.0	9.0
5	C1 – 50SL	15.0	12.0	8.5
6	C1 – 70SL	13.0	10.5	8.0
7	C1 – 5LP – 25SL	17.5	12.5	8.5
8	C1 – 5LP – 45SL	17.0	12.5	9.0
9	C1 – 5LP – 65SL	16.5	13.0	9.0
10	C1 – 10LP – 20SL	15.5	10.5	7.0
11	C1 – 10LP – 40SL	14.5	10.0	7.0
12	C1 – 10LP – 60SL	14.5	10.5	7.5

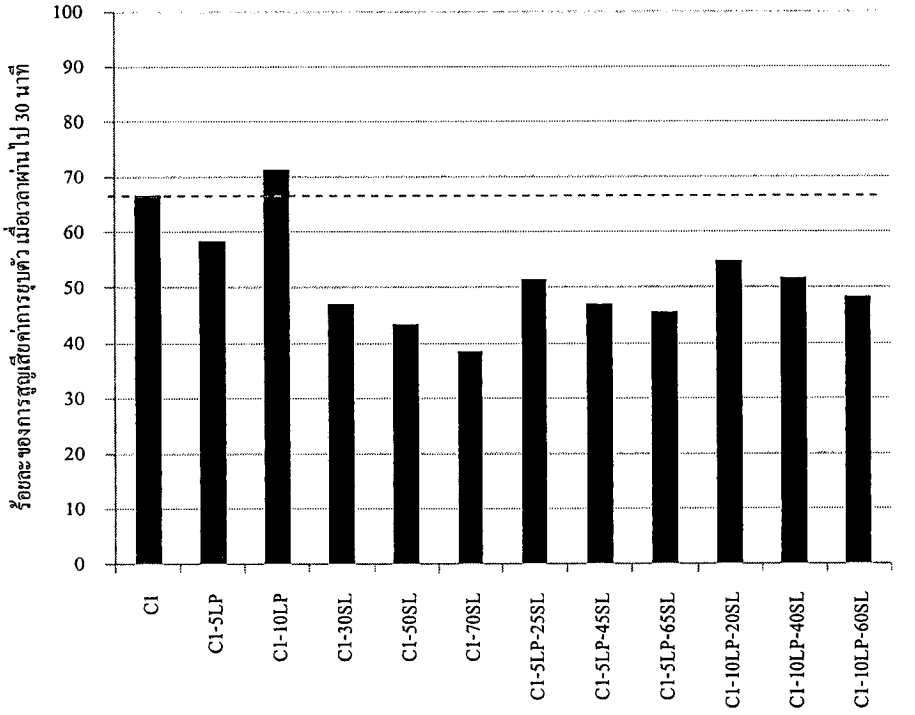
หมายเหตุ ผงหินปูนขนาดอนุภาค 8 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.9 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน



ภาพที่ 4.10 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที



ภาพที่ 4.11 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

4.2.8 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

สำหรับผงหินปูนที่ใช้มีความละเอียดของขนาดอนุภาคเท่ากับ 8 ไมโครเมตร โดยตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.12 ถึง 4.15 แสดงค่ากำลังอัดประลัย (compressive strength) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยศึกษาตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 3 14 28 และ 56วัน

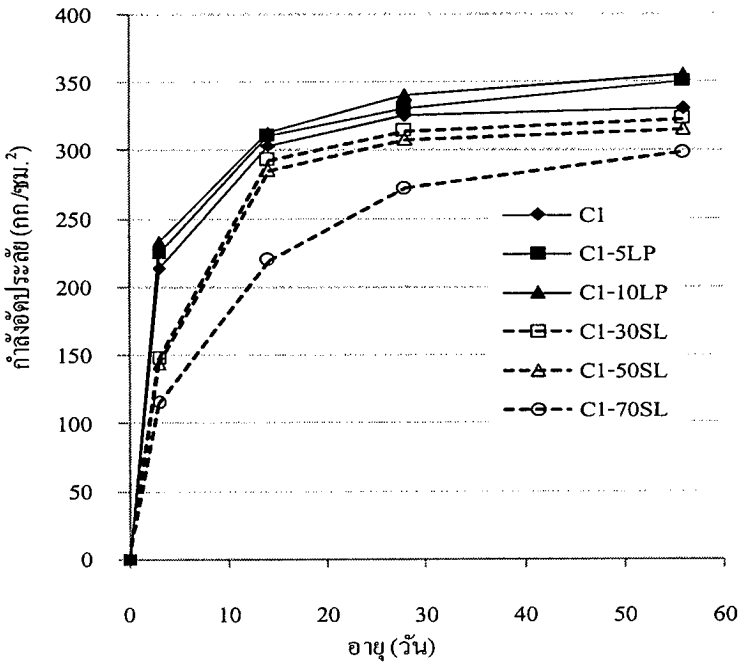
จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ10 มีค่าสูงกว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้แม้ว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ลดลง แต่อาจเพราะผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ค่อนข้างละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนเท่ากับ 16 และ 8 ไมโครเมตร ตามลำดับ) จึงสามารถเข้าไปเติมเต็ม (filler) ช่องว่างของเพสต์ เป็นการลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น คอนกรีตจึงมีกำลังอัดประลัยสูงขึ้น และพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 5 แสดงว่าการแทนที่ผงหินปูนในปริมาณร้อยละ 10 ซึ่งน่าจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมกว่า

ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้น กลับให้ค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่ากำลังอัดประลัยยิ่งต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดประลัยลดลง โดยเฉพาะในช่วงอายุต้นๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีอัตราการพัฒนาเพิ่มที่สูงขึ้น ในกรณีของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน (ภาพที่ 4.13 และ 4.14) พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตดังกล่าวจะให้ผลมีแนวโน้มเหมือนกับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและการแทนที่ด้วยผงหินปูน กล่าวคือเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังอัดประลัยจะมีแนวโน้มลดลง

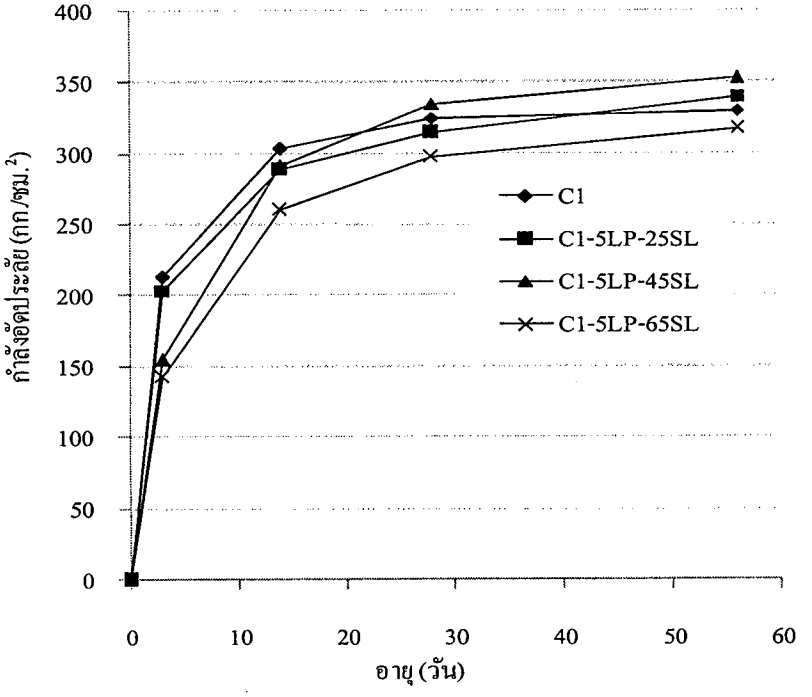
ตารางที่ 4.10 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (กก./ซม^2)			
		3 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
1	C1	213.50	303.67	325.00	330.00
2	C1 – 5LP	224.50	310.33	330.00	350.00
3	C1 – 10LP	234.00	313.50	340.00	355.00
4	C1 – 30SL	147.50	293.00	314.00	322.50
5	C1 – 50SL	143.50	285.67	308.00	315.00
6	C1 – 70SL	114.67	219.33	272.00	298.33
7	C1 – 5LP – 25SL	204.00	288.50	315.00	340.00
8	C1 – 5LP – 45SL	155.00	291.50	335.00	353.33
9	C1 – 5LP – 65SL	143.00	260.00	297.50	317.50
10	C1 – 10LP – 20SL	184.67	284.33	340.00	350.00
11	C1 – 10LP – 40SL	146.67	273.00	348.33	357.50
12	C1 – 10LP – 60SL	159.00	277.00	315.00	325.00

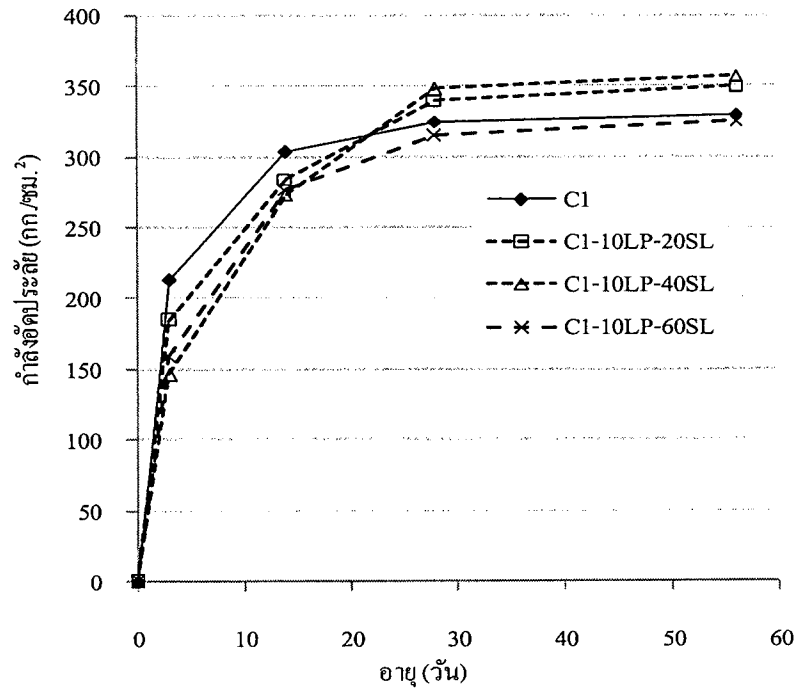
หมายเหตุ ผงหินปูนขนาดอนุภาค 8 ไมโครเมตร



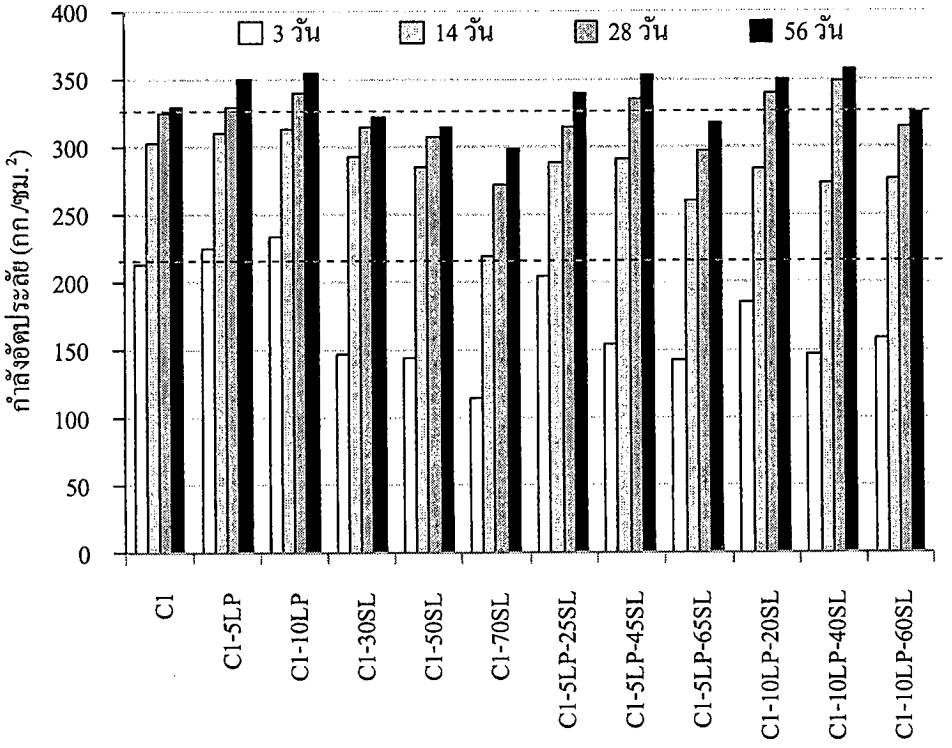
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



ภาพที่ 4.15 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 3 14 28 และ 56 วัน

4.3 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

4.3.1 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

การศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่น ที่อายุ 28 วันและ 56 วัน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเท่ากับ 0.65 สำหรับการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตดังกล่าวได้แสดงดังตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.17 พบว่าค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนทั้งร้อยละ 5 และ 10 มีค่าใกล้เคียง หรือไม่แตกต่างจากของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยที่เมื่อแทนที่ร้อยละ 5 ของผงหินปูนมีค่าความลึกคาร์บอเนชั่นใกล้เคียงกับของปูนซีเมต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ในสัดส่วนร้อยละ 5 เป็นการลดปูนซีเมนต์ไม่มาก จึงลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ไม่มากเช่นกัน จึงทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นเกิดได้ช้า เนื่องจากมีปริมาณ $Ca(OH)_2$ มากในการที่จะได้ทำปฏิกิริยากับก๊าซ CO_2 รวมทั้งการช่วยในการเติมเต็มของผงหินปูน ส่งผลให้ก๊าซ CO_2 เข้าทำลายได้ยากขึ้น แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 นั้นทำให้ความลึกคาร์บอเนชั่นเกิดมากขึ้น ทั้งนี้เพราะลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ได้มากกว่า ผลให้เกิดคาร์บอเนชั่นได้เร็วขึ้น

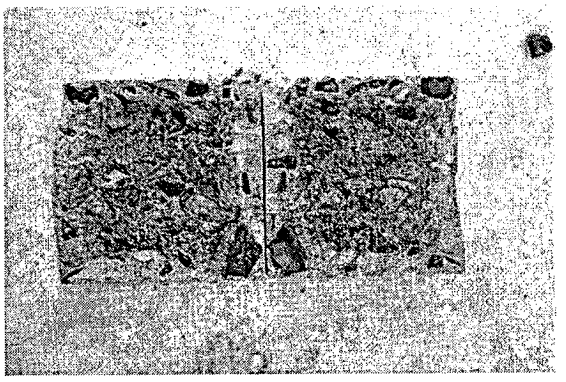
ส่วนการเกิดคาร์บอร์เนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้น พบว่ามีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่ที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ในปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นการไปลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ แล้ว ปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดซึ่งเป็นสารปอซโซลานยังช่วยลด $Ca(OH)_2$ อีก จึงส่งผลให้เป็นการเร่งการเกิดคาร์บอเนชั่นเร็วขึ้น โดยเฉพาะในการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น สุดท้ายในกรณีที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ก็ให้ผลที่สอดคล้องกัน กล่าวคือถ้ามีตะกรันเตาถลุงเหล็กในปริมาณที่มากจะเกิดคาร์บอเนชั่นที่มาก เพราะผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่มาก รวมทั้งถ้าผลรวมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับผงหินปูนได้ปริมาณที่มาก ทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นได้เร็ว เพราะเนื่องจากการแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มาก ดังที่กล่าวแล้ว

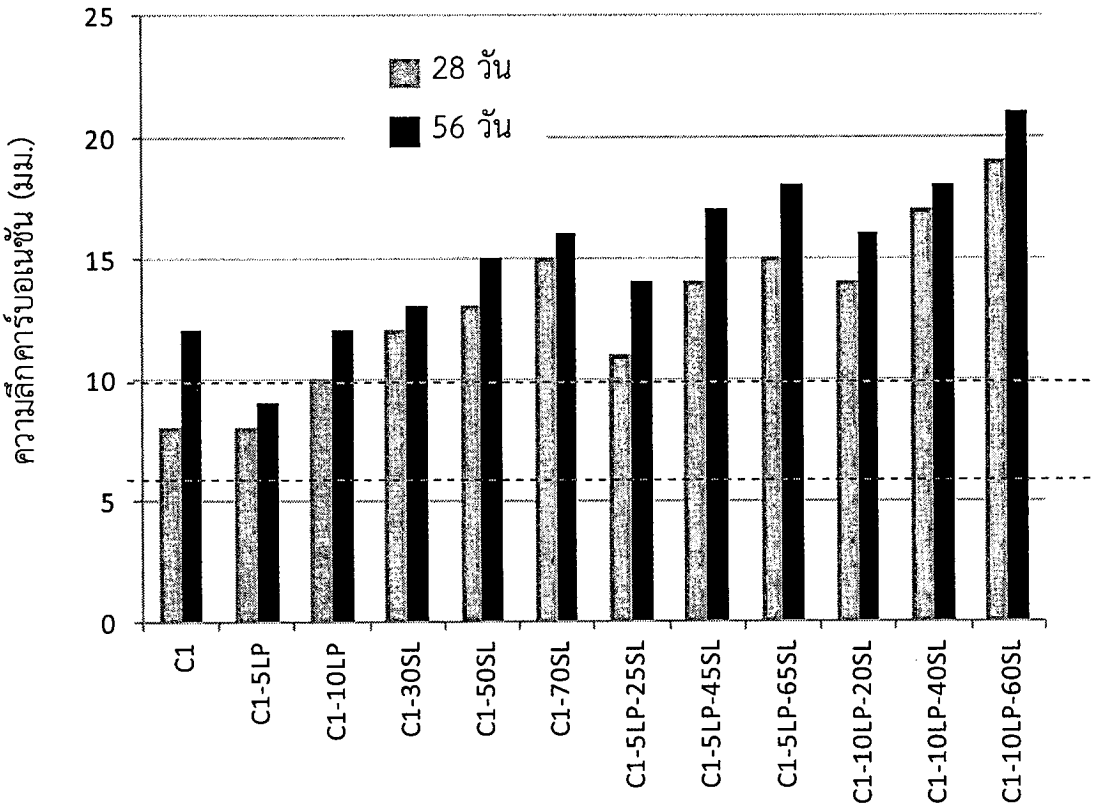
ภาพที่ 4.16 ได้แสดงลักษณะของตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่าซีกหลังจากแช่ในตู้อบคาร์บอเนชั่นเพื่อนำมาวัดค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่น

ตารางที่ 4.11 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

ลำดับที่	ตัวอย่างคอนกรีต	การเกิดคาร์บอเนชั่น (มม.)	
		28 วัน	56 วัน
1	C1	8	12
2	C1 – 5LP	8	9
3	C1 – 10LP	10	12
4	C1 – 30SL	12	13
5	C1 – 50SL	13	15
6	C1 – 70SL	15	16
7	C1 – 5LP – 25SL	11	14
8	C1 – 5LP – 45SL	14	17
9	C1 – 5LP – 65SL	15	18
10	C1 – 10LP – 20SL	14	16
11	C1 – 10LP – 40SL	17	18
12	C1 – 10LP – 60SL	19	21



ภาพที่ 4.16 แสดงตัวอย่างของคอนกรีตที่ผ่าซีกหลังจากแช่ในตู้อบคาร์บอเนชั่น



ภาพที่ 4.17 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเท่ากับ 0.65

4.3.2 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

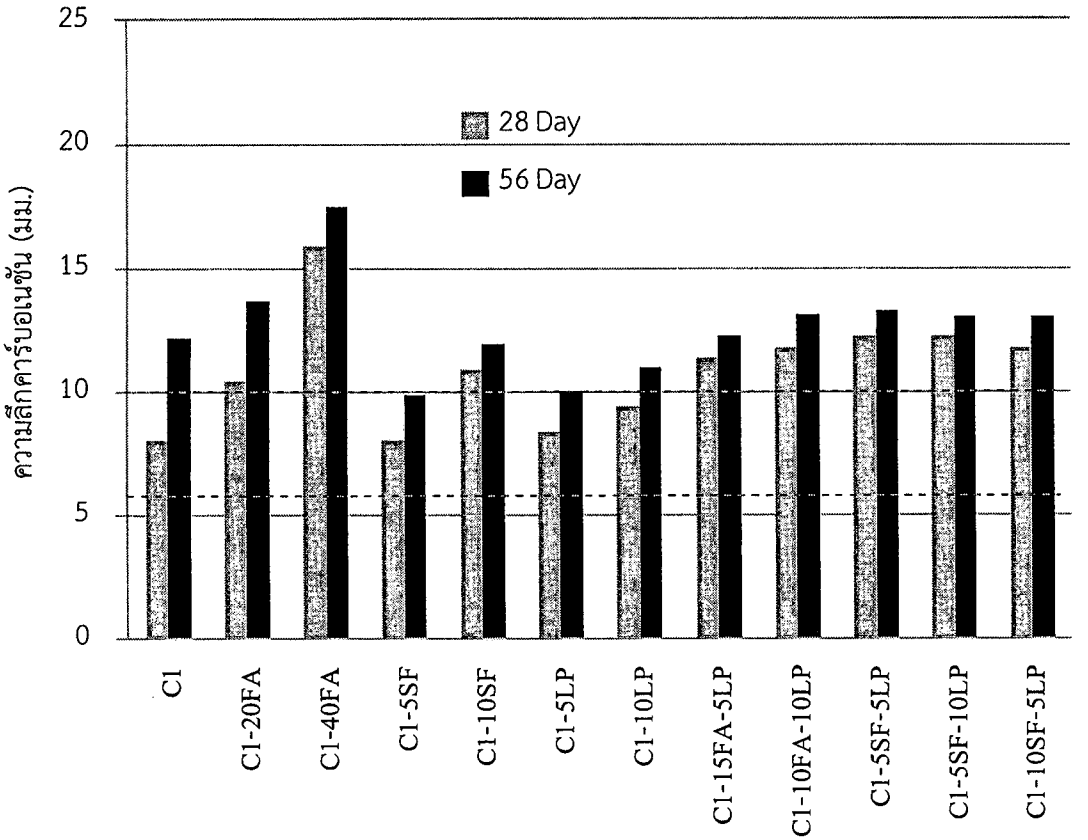
ตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.18 แสดงค่าการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยซิลิกาฟูม แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 28 วันและ 56 วัน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเท่ากับ 0.55 พบว่าการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนทั้งร้อยละ 5 และ 10 มีค่าไม่แตกต่างจากของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งที่การแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นการไปลดปูนซีเมนต์ลง ซึ่งผลส่งให้ลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ลงก็ตาม แต่ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเติมเต็ม รวมทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (0.55) น้อยกว่ากรณีของคอนกรีตตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (w/b เท่ากับ 0.65) จึงเป็นการทำให้ก๊าซ CO_2 เข้าสู่ตัวอย่างคอนกรีตได้ยากขึ้น ส่วนในกรณีแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 10 ยังพบว่าการเกิดคาร์บอเนชั่นไม่แตกต่างจากของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งที่เป็นการลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ เนื่องจากลดปริมาณปูนซีเมนต์และจากปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกาฟูมเอง แต่การเกิดคาร์บอเนชั่นกลับไม่แตกต่าง (มีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่า) จากของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที 1 ล้วน นั่นอาจเป็นเพราะซิลิกาฟูมมีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียดมาก เมื่อเทียบกับ

ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ช่วยในการเติมเต็มจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดได้ดี และการเป็นวัสดุเติมเต็มจากขนาดอนุภาคที่ละเอียดมาก จึงทำให้ก๊าซ CO_2 เข้าสู่คอนกรีตได้ยากขึ้น

สำหรับตัอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยนั้น พบว่าการเกิดคาร์บอเนชั่นได้มากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยณฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณเถ้าลอยที่สูงขึ้น ทั้งนี้ดังที่กล่าวแล้ว คือการแทนที่ในปูนซีเมนต์เป็นการลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานก็ยิ่งช่วยในการลดปริมาณ ของ $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เป็นการเร่งให้เกิดคาร์บอเนชั่นเร็วขึ้น ส่วนเมื่อเป็นการแทนที่ 3 วัสดุประสาน ทั้งแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และแทนที่ซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน (โดยที่เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับการใช้ปอซโซลานอย่างเดียว) กลับพบว่า ให้ค่าการเกิดคาร์บอเนชั่นที่ใกล้เคียง (โดยสูงกว่าเล็กน้อยที่อายุการอบแช่ 28 วัน และไม่แตกต่างเมื่ออายุการอบแช่ที่ 56 วัน) กับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที 1 ล้วน นั่นแสดงว่าการเป็นวัสดุเติมเต็มของผงหินปูน รวมทั้งของซิลิกาฟูม จึงเป็นการช่วยต้านทานการเกิดคาร์บอเนชั่นได้

ตารางที่ 4.12 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

ลำดับที่	ตัวอย่างคอนกรีต	การเกิดคาร์บอเนชั่น (มม.)	
		28 วัน	56 วัน
1	CC1	8	12
2	CC1- 20FA	10	14
3	CC1- 40FA	16	18
4	CC1- 5SF	8	10
5	CC1- 10SF	11	12
6	CC1- 5LP	8	10
7	CC1- 10LP	9	11
8	CC1- 15FA – 5LP	11	12
9	CC1- 10FA – 10LP	12	13
10	CC1- 5SF – 5LP	12	13
11	CC1- 5SF – 10LP	12	13
12	CC1- 10SF – 5LP	12	13



ภาพที่ 4.18 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเท่ากับ 0.55