วัตถุประสงค์ของโครงการ

1) ศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุปอซโซลานต่อสมบัติของคอนกรีต
2) ศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต
3) ศึกษสมบัติด้านต่างๆของคอนกรีตที่มีการใช้วัสดุปอซโซลานปริมาณสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นในสภาพจริงเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติที่บ่งชี้ด้านความทนทานของคอนกรีต

วิธีดำเนินงานวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.2 เถ้าถ่านหินที่ใช้ได้จากโรงไฟฟ้า อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

1.3 เถ้าชานอ้อย จากอำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ

1.4 เถ้าปาล์มน้ำมัน จากจังหวัดชุมพร

1.5 มวลรวมละเอียด ที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายแม่น้ำที่ผ่านการทำความสะอาด

1.6 มวลรวมหยาบ ที่ใช้ในการทดลองเป็นหินปูนย่อยขนาดใหญ่สุด 20 มิลลิเมตร

1.7 น้ำ ที่ใช้ในการผสมเป็นน้ำประปา

1.8 สารลดน้ำ (Superplasticizer)

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 ชุดเครื่องทดสอบการสึกกร่อน ตามมาตรฐาน ASTM C1138 (Under Water Method) และเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ASTM C 39

2.2 เครื่องทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

2.3 เครื่องบดแบบตกกระทบ

2.4 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน

2.5 ตู้อบ

2.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก

2.7 แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.และแบบหล่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30.2 ซม. สูง 10.2 ซม.

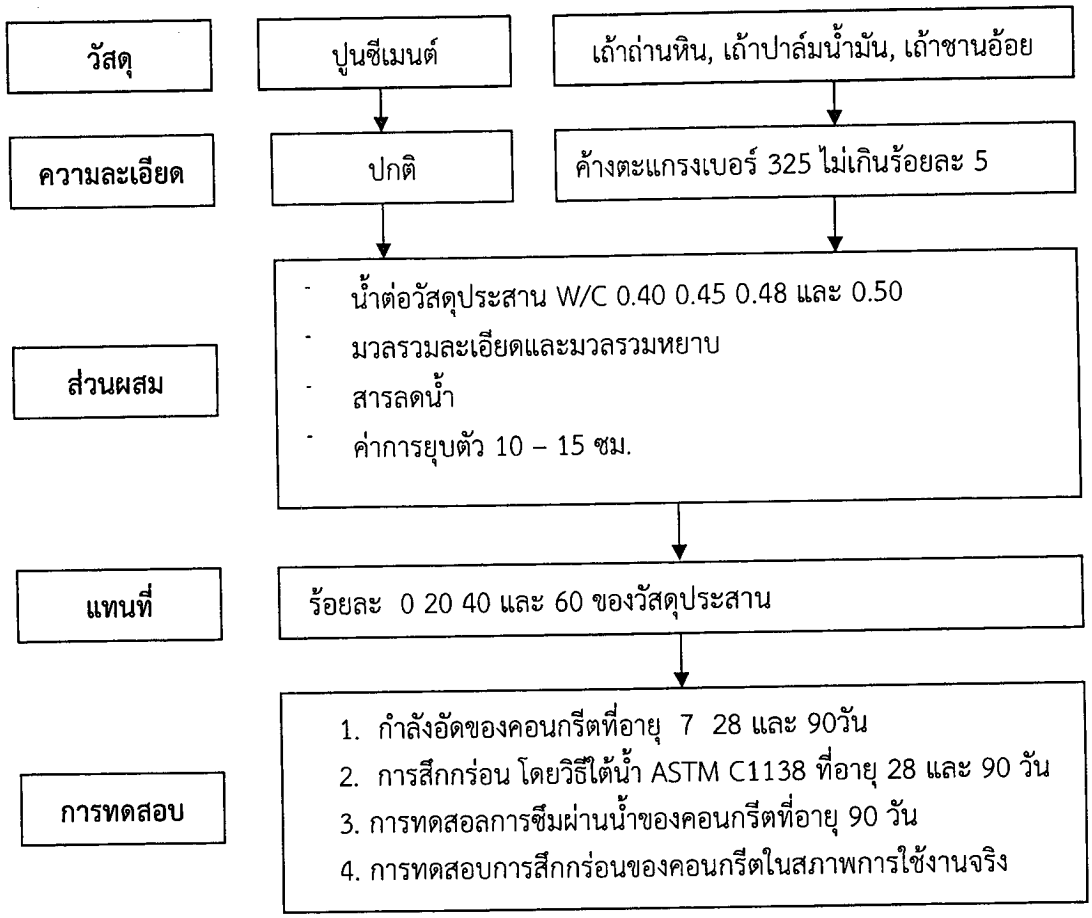
2.8 ชุดทดลองหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

2.9 ชุดทดลองหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานทั้งหมดถูกนำมาบดเพื่อเพิ่มความละเอียด โดยกำหนดให้ปริมาณของอนุภาคค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปอบในอุณหภูมิ 100 ^{0}C ± 5 ^{0}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็นตัวลงแล้วใส่ภาชนะ ปิดมิดชิดเพื่อป้องกันความชื้น แผนการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ได้แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนการดำเนินการวิจัย

3.2 ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีตในการวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1-3 โดยวัสดุปอซโซลานที่ผ่านการปรับปรุงขนาดด้วยการบดจนกระทั่งขนาดอนุภาคของวัสดุปอซโซลานค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 ถูกนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) ของคอนกรีตที่มีค่า 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 10 – 15 ซม. ในบางส่วนผสมอาจมีการใช้สารลดน้ำ เพื่อช่วยปรับให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ในช่วงที่กำหนด เมื่อหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกถอดแบบและนำไปบ่มในน้ำจนกระทั่งถึงอายุการทดสอบต่างๆ ที่กำหนดขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต กำลังรับแรงอัด (CT1) ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 410 กก./ซม^2.

Mix Proportions (kg/m^3)										
Mix	Water	Cement	FA	PA	BA	sand	stone	W/C	SP (g.)	Slump (cm)
CT1	205	512.5	-	-	-	696.45	1023.21	0.40	500	10.5
FA20	205	410.0	102.5	-	-	654.53	1023.21	0.40	750	11.5
FA40	205	307.5	205.0	-	-	612.31	1023.21	0.40	500	11.0
FA60	205	205.0	307.5	-	-	571.1	1023.21	0.40	850	12.0
PA20	205	410.0	-	102.5	-	653.75	1023.21	0.40	750	11.0
PA40	205	307.5	-	205.0	-	611.65	1023.21	0.40	1500	13.0
PA60	205	205.0	-	307.5	-	568.29	1023.21	0.40	2500	14.0
BA20	205	410.0	-	-	102.5	649.64	1023.21	0.40	750	11.5
BA40	205	307.5	-	-	205.0	611.98	1023.21	0.40	1500	13.5
BA60	205	205.0	-	-	307.5	569.7	1023.21	0.40	2500	14.5

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีต กำลังรับแรงอัด (CT2) ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 365 กก./ซม^2.

Mix Proportions (kg/m^3)										
Mix	Water	Cement	FA	PA	BA	sand	stone	W/C	SP (g.)	Slump (cm)
CT2	231.1	512.5	-	-	-	670.45	1023.21	0.45	275	10
FA20	231.1	410.0	102.5	-	-	628.67	1023.21	0.45	375	12
FA40	231.1	307.5	205	-	-	586.86	1023.21	0.45	250	12.5
FA60	231.1	205.0	307.5	-	-	545.09	1023.21	0.45	500	13
PA20	231.1	410.0	-	102.5	-	627.71	1023.21	0.45	375	11
PA40	231.1	307.5	-	205	-	585.02	1023.21	0.45	750	13
PA60	231.1	205.0	-	307.5	-	542.35	1023.21	0.45	1250	14
BA20	231.1	410.0	-	-	102.5	628.19	1023.21	0.45	375	12
BA40	231.1	307.5	-	-	205	585.94	1023.21	0.45	750	14
BA60	231.1	205.0	-	-	307.5	543.72	1023.21	0.45	1250	14.5

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีต กำลังรับแรงอัด (CT3) ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 320 กก./ซม^2.

Mix Proportions (kg/m^3)										
Mix	Water	Cement	FA	PA	BA	sand	stone	W/C	SP (g.)	Slump (cm)
CT3	246	512.5	-	-	-	654.45	1023.21	0.48	87.5	10.0
FA20	246	410.0	102.5	-	-	612.65	1023.21	0.48	262.5	13.0
FA40	246	307.5	205.0	-	-	571.45	1023.21	0.48	175	13.5
FA60	246	205.0	307.5	-	-	529.15	1023.21	0.48	350	14.5
PA20	246	410.0	-	102.5	-	611.73	1023.21	0.48	262.5	11.0
PA40	246	307.5	-	205.0	-	569.6	1023.21	0.48	525	12.0
PA60	246	205.0	-	307.5	-	526.28	1023.21	0.48	875	13.5
BA20	246	410.0	-	-	102.5	612.19	1023.21	0.48	262.5	12.0
BA40	246	307.5	-	-	205.0	570.53	1023.21	0.48	525	13.0
BA60	246	205.0	-	-	307.5	527.71	1023.21	0.48	875	14.0

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของคอนกรีต กำลังรับแรงอัด (CT4) ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 290 กก./ซม^2.

Mix Proportions (kg/m^3)										
Mix	Water	Cement	FA	PA	BA	sand	stone	W/C	SP (g.)	Slump (cm)
CT4	256.25	512.5	-	-	-	644.20	1023.21	0.50	0	14.0
FA20	256.25	410.0	102.5	-	-	602.41	1023.21	0.50	25	14.4
FA40	256.25	307.5	205.0	-	-	560.61	1023.21	0.50	0	12.5
FA60	256.25	205.0	307.5	-	-	518.81	1023.21	0.50	100	13.5
PA20	256.25	410.0	-	102.5	-	601.47	1023.21	0.50	100	13.0
PA40	256.25	307.5	-	205.0	-	558.76	1023.21	0.50	200	13.5
PA60	256.25	205.0	-	307.5	-	516.04	1023.21	0.50	300	13.0
BA20	256.25	410.0	-	-	102.5	601.94	1023.21	0.50	100	12.0
BA40	256.25	307.5	-	-	205.0	559.68	1023.21	0.50	200	12.5
BA60	256.25	205.0	-	-	307.5	517.43	1023.21	0.50	300	13.5

CTi= concrolled concrete ,FA=fly ash ,BA= bagasse ash ,PA= palm oil fuel ash ,SP=superplasticizer

3.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุปอซโซลาน

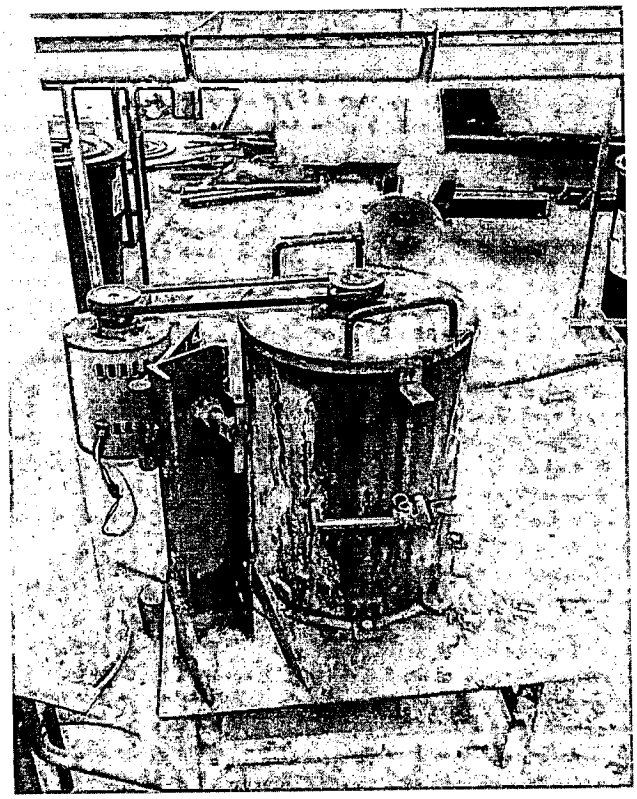
การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอซโซลานทุกชนิด ประกอบไปด้วย ปริมาณความชื้นของวัสดุ ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ และหน่วยน้ำหนัก และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ที่ทดสอบด้วยวิธี XRD (X-ray Diffraction)

3.4 การทดสอบสมบัติคอนกรีต

3.4.1 คุณสมบัติของคอนกรีตสด ค่าการยุบตัวทำตาม ASTM C 143 ทดสอบหาค่า Slump โดย Slump ได้ให้ค่าระหว่าง 10 - 15 ซม.

3.4.2 กำลังอัดของคอนกรีต ทำการทดสอบที่อายุ 7 28 และ 90 วัน โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression machine) ทำการทดสอบตาม ASTM C39

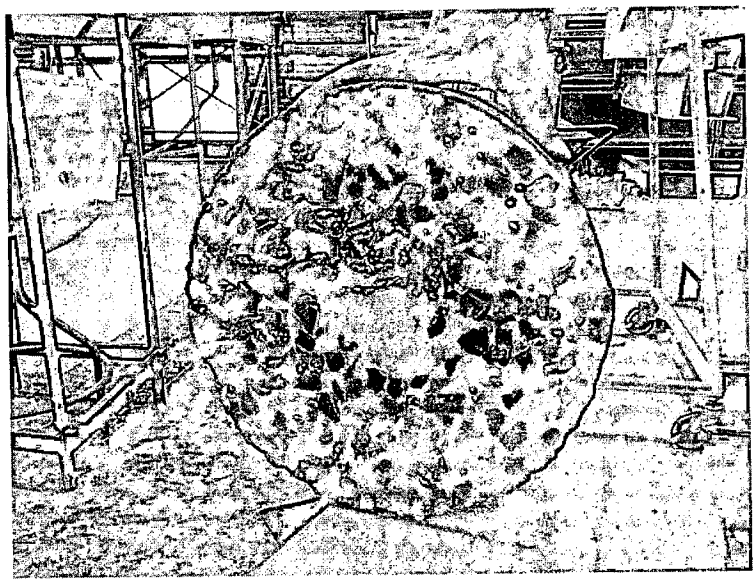
3.4.3 ความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1138 (Under water method) เป็นการทดสอบหาความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตโดยวิธีใต้น้ำ ในการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 302 มม. หนา 102 มม. อายุ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมไว้และมีอายุตามกำหนดไปติดตั้งไว้ในชุดทดสอบการสึกกร่อนดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบการต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion resistance, ASTM C1138)

หลังจากนั้นนำลูกเหล็กทรงกลมสเตนเลส วางไว้บนผิวของตัวอย่าง จำนวน ขนาด และชั้นคุณภาพของลูกเหล็กทรงกลมให้เป็นตามมาตรฐานดังกล่าวกำหนด จากนั้นเติมน้ำให้ได้ระดับ

และทำการเปิดเครื่องและทำการทดสอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างออกมาประเมินและบันทึกผลของการสึกกร่อน เมื่อบันทึกผลเสร็จแล้วก็นำตัวอย่างกลับเข้าไปทำการทดสอบเหมือนเดิม ทำการทดสอบตามขั้นตอนดังกล่าวจำนวน 6 รอบ ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบการต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion resistance, ASTM C1138)

ข้อมูลที่ได้จากการบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการชั่งในน้ำและชั่งในอากาศในแต่ละรอบของการทดสอบ จะถูกนำมาคำนวณหาค่าปริมาตรของตัวอย่างดังสมการ (1) เพื่อนำไปประเมินค่าการสึกกร่อนตามช่วงเวลาต่างๆ

$$V_t = \frac{W_{air} - W_{Water}}{G_W} \qquad (1)$$

เมื่อ

V_t = ปริมาตรของตัวอย่างคอนกรีต ณ เวลาทดสอบต่างๆ (ม.^{3})

W_{air} = น้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตที่ชั่งในอากาศ (กก.)

W_{Water} = น้ำหนักตัวอย่างของคอนกรีตที่ชั่งในน้ำ (กก.)

G_W = น้ำหนักของน้ำ (กก./ม.^{3})

และ

คำนวณค่าการสูญเสียน้ำหนักที่มีค่าเพิ่มขึ้นของตัวอย่างคอนกรีต ทุกๆช่วงเวลาต่างๆ

$$VL_t = V_i - V_t \qquad (2)$$

เมื่อ

VL_t = ปริมาตรการสึกกร่อนของตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าเพิ่มขึ้น (ม.^{3})

V_i = ปริมาตรของตัวอย่างคอนกรีตก่อนการทดสอบ ณ เวลาทดสอบต่างๆ (ม.^{3})

V_t = ปริมาตรของตัวอย่างคอนกรีตหลังการทดสอบ ณ เวลาทดสอบต่างๆ (ม.^{3})

และ

คำนวณค่าความลึกจากการสึกกร่อนของก้อนตัวอย่างที่มีค่าเพิ่มขึ้น ทุกๆช่วงเวลาต่างๆ

$$ADA_t = VL_t/A \qquad (3)$$

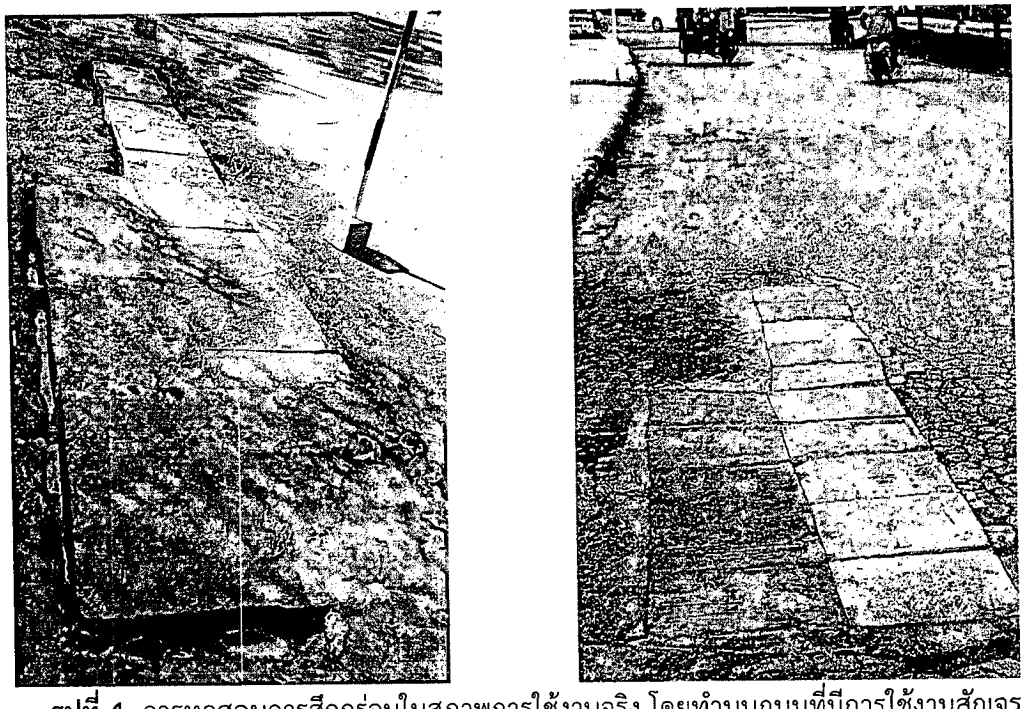
เมื่อ

ADA_t = ค่าความลึกของตัวอย่างจากการสึกกร่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้น ณ เวลาทดสอบต่างๆ (ม.)

VL_t = ปริมาตรการสึกกร่อนของตัวอย่างที่มีค่าเพิ่มขึ้น ณ เวลาทดสอบต่างๆ (ม.^{3})

A = พื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวอย่าคอนกรีต (ม.^{2})

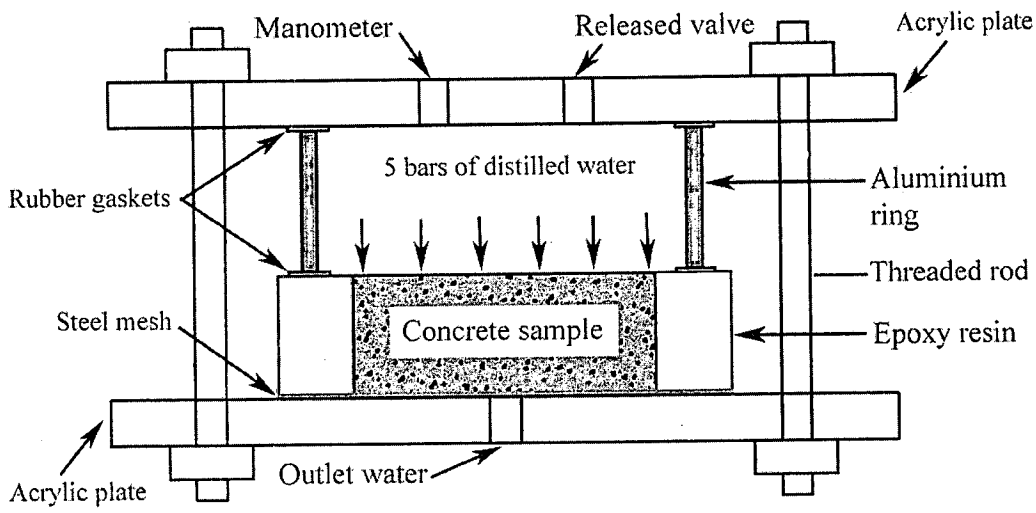
3.4.4 ความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตในสภาพการใช้งานจริง โดยลอกผิวเดิมของถนนออก และทำการขุดเพื่อเพิ่มระดับความลึกอีกสำหรับการรองทรายหยาบหนา 10 ซม. จากนั้นเทคอนกรีตหยาบหนาประมาณ 5 ซม. จากนั้นก็เป็นการเทคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ บนถนนที่มีการสัญจรจริงดังแสดงในรูปที่ 4 ความหนา 15 ซม. ทำการบ่มชื้นเป็นเวลา 28 วัน และปิดกั้นบริเวณดังกล่าว เมื่อครบอายุก็เปิดให้ใช้งานสัญจรตามปกติ ตรวจสอบการสึกกร่อนของผิวพื้นคอนกรีตด้วยสายตาและบันทึกภาพถ่ายในช่วงระยะประมาณ 6 เดือน



รูปที่ 4 การทดสอบการสึกกร่อนในสภาพการใช้งานจริง โดยทำบนถนนที่มีการใช้งานสัญจรภายในมหาวิทยาลัย

3.4.5 การทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

เป็นการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยวิธีการไหลแบบคงที่ (Steady flow method) ตามรูปที่ 5 ถูกเสนอโดย Kantri และ Sirivivatnanon ในปี 1997 ซึ่งอาศัยหลักการตามทฤษฎีของดาร์ซี (Darcy's Law) และสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) โดยการทดสอบเป็นการจำลองการไหลของน้ำในหนึ่งมิติหรือทิศทางเดียวผ่านพื้นที่หน้าตัดคงที่ของตัวอย่างคอนกรีต ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสามารถทำการคำนวณได้ตามสมการที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมน้ำผ่านคอนกรีตขึ้นอยู่กับแรงดันน้ำ ความยาวและขนาดหน้าตัดของคอนกรีตตัวอย่าง อัตราการไหลของน้ำผ่านคอนกรีต หน่วยของวัดที่ได้จากการคำนวณจะเป็นอัตราความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำในคอนกรีตคือ เมตรต่อวินาที สำหรับการเลือกใช้ระดับของแรงดันน้ำนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของคอนกรีต สมาคมคอนกรีตของอเมริกันได้แนะนำให้ใช้ความดันที่ระดับ 5 บาร์ เนื่องจากถ้าใช้แรงดันสูงกว่านี้อาจทำให้โครงสร้างภายในคอนกรีตเกิดความเสียหาย และถ้าใช้แรงดันต่ำกว่านี้ก็จะทำให้ใช้เวลาในการทดสอบนานมากขึ้น



รูปที่ 5 ไดอะแกรมแสดงอุปกรณ์ติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต

$$K = \frac{\rho L g Q}{PA} \tag{4}$$

เมื่อ

K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (ม./วินาที)
ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ (กก./ม.^{3})
g	=	แรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที ^{2})
Q	=	อัตราการไหลแบบคงที่ (ม.^{3}/วินาที)
L	=	ความหนาหรือความสูงของแท่งตัวอย่างคอนกรีต (ม.)

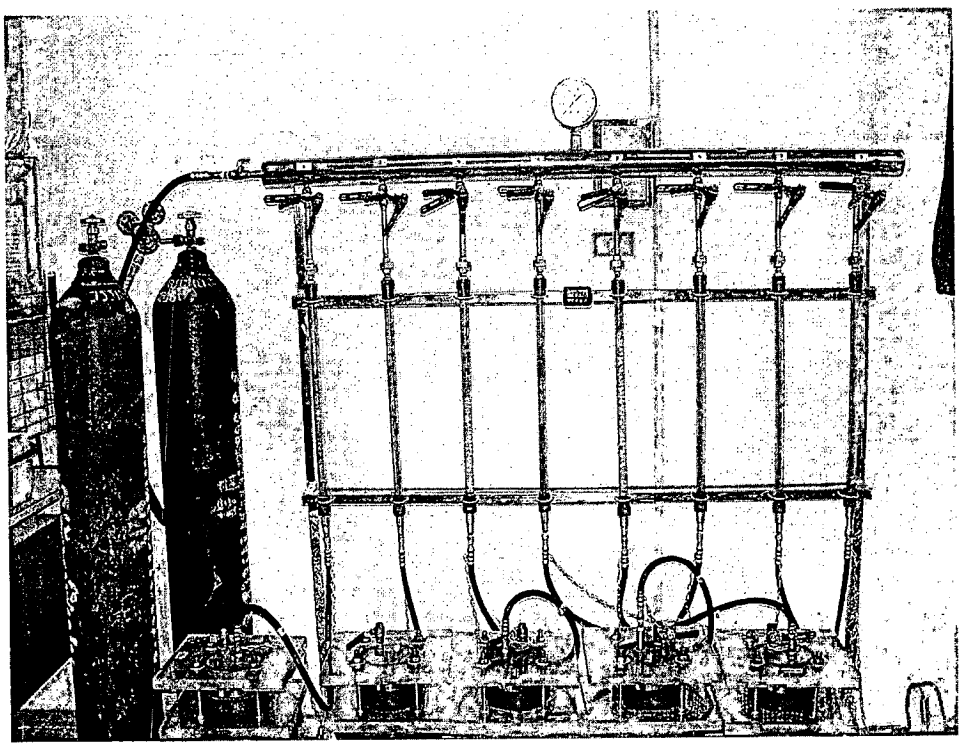
P = แรงดันน้ำที่ไหลผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีต (กก.- ม./วินาที ^{2})/(ม.^{2})

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (ม.^{2})

เครื่องทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ

1. ชุดให้ความดัน เกจวัดและชุดวาล์วสำหรับปรับแรงดันให้คงที่ สามารถให้ความดันกับน้ำได้ไม่น้อยกว่า 5 บาร์ ในการทดสอบนี้ใช้ถังอัดก๊าซออกซิเจน ดังรูปที่ 6
2. โครงทดสอบ มีชุดหลอดแก้วหรืออครีลิคที่สามารถรับแรงดันได้สูง มีความใสเพื่อใช้สังเกตวัดระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดสอบให้ความดันกับตัวอย่าง ส่วนบนของโครงทดสอบจะมีวาล์วเพื่อเติมน้ำและปล่อยอากาศ
3. ชุดติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต เป็นแผ่นอครีลิคใสหนาไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว ประกบด้านบนและล่างของชุดทดสอบแล้วยึดด้วยแท่งเหล็ก โดยส่วนบนของแผ่นจะต่อกับชุดให้ความดันและมีอลูมิเนียมทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12.5 ซม. สำหรับวางบนแหวนยางที่อยู่บนผิวของอิพอคซี่ วงแหวนอลูมิเนียมนี้มีหน้าที่รับน้ำที่มีแรงดัน

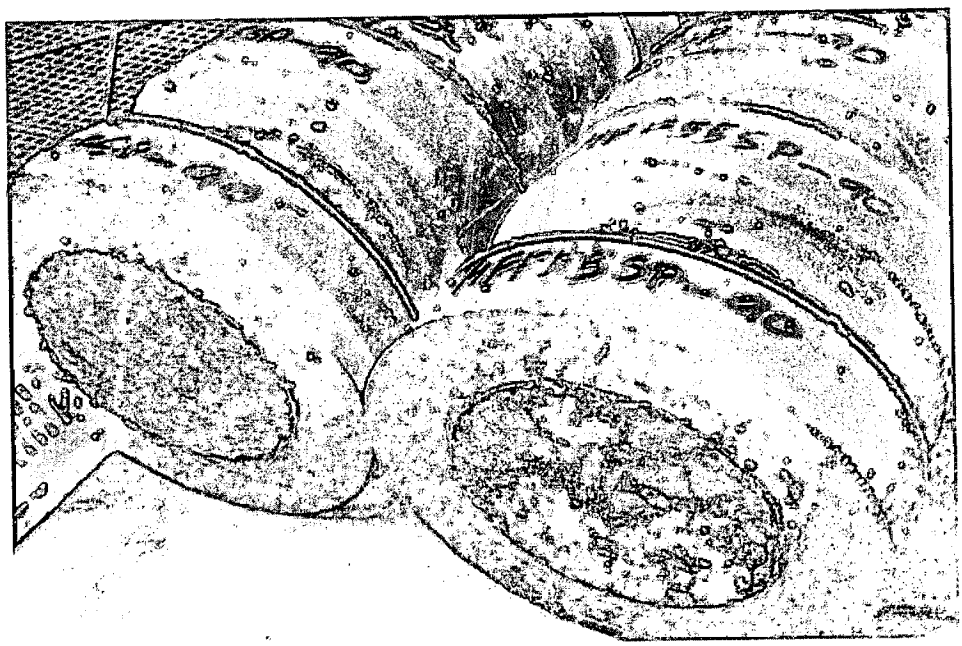


รูปที่ 6 ชุดเครื่องมือทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

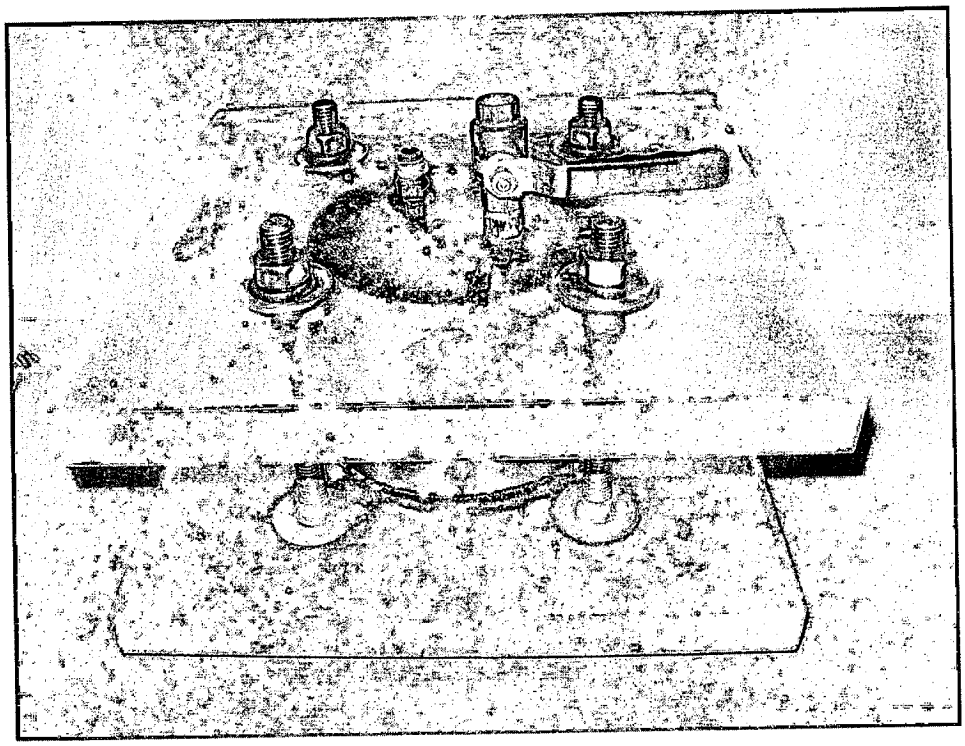
การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการทดสอบ

ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่มีอายุการบ่มครบตามต้องการ ถูกนำมาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางให้มีความหนาประมาณ 4-5 เซนติเมตร

โดยผิวทั้งสองด้านที่ทำการตัดต้องมีความเรียบสม่ำเสมอและตั้งฉากกับแนวทรงกระบอก ทำความสะอาดผิวของแท่งตัวอย่างด้วยการขัดด้วยแปรงลวด ให้ผิวของตัวอย่างสะอาดปราศจากคราบน้ำปูน นำตัวอย่างดังกล่าวไปทำให้ผิวแห้งโดยการนำไปตากแดดหรือเข้าตู้อบเป็นเวลา 20-30 นาที เมื่อผิวตัวอย่างแห้งสนิทแล้ว ให้ทำการหล่ออีพอกซีด้านข้างหนา 2.5 ซม. และความสูงเท่ากับก้อนตัวอย่างคอนกรีต โดอีพอกซีที่ใช้นั้น เมื่อแข็งตัวแล้วต้องไม่มีสี ใส รับน้ำหนักได้สูงและไม่หดตัว เชื่อมประสานกับผิวคอนกรีตได้อย่างดี เมื่อหล่ออีพอกซีครบ 24 ชั่วโมงหรืออีพอกซีแข็งตัวเต็มที่แล้ว นำตัวอย่างมาทำความสะอาดผิวหน้าทั้งสองด้านอีกครั้ง ตัวอย่างที่พร้อมทำการทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตแสดงในรูปที่ 7 แล้วนำไปประกอบการชุดติดตั้งแรงดันน้ำสูง ดังรูปที่ 8 เมื่อทำการติดตั้งตัวอย่างในชุดอุปกรณ์ทดสอบเสร็จแล้ว จะทำการเติมน้ำให้กับระบบและทำการไล่อากาศภายในระบบออกให้หมด แล้วเริ่มให้ความดันที่ประมาณ 5 บาร์ เพื่อดันน้ำให้ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต ทำวัดระดับน้ำที่ลดลงที่ระยะเวลาต่างๆ แล้วนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ ระยะเวลาในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในแต่ละชุดใช้เวลาประมาณ 7-10 วัน ขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ โดยการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงมักจะใช้เวลานานกว่าคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ



รูปที่ 7 ตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการหล่ออิพ๊อกซีเรียบร้อยและพร้อมทำการทดสอบ

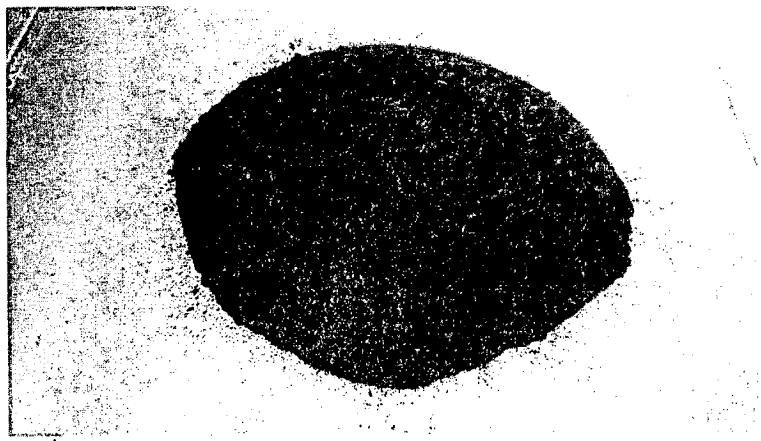


รูปที่ 8 อุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตแล้ว

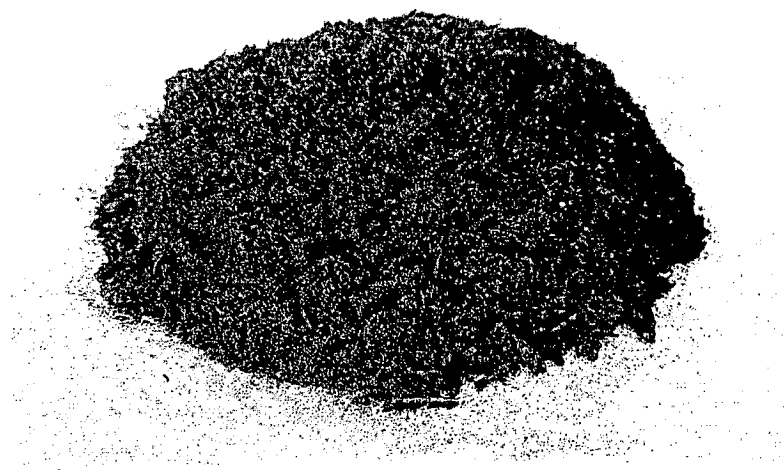
ผลการทดลอง

1. สมบัติของวัสดุปอซโซลาน

ลักษณะของวัสดุปอซโซลานที่นำมาจากแหล่งโดยตรงนั้นแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 8-10 โดยที่เถ้าถ่านหินจะมีความละเอียดที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบกับวัสดุปอซโซลานอีก 2 ชนิด แต่ก็มีบางส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนเนื่องจากมีความชื้น แต่ก็สามารถทำให้แตกหรือย่อยให้ละเอียดได้ง่าย มีสีเทาอ่อนฟุ้งกระจายได้ง่าย ไม่มีเศษวัสดุชนิดอื่นปนเปื้อน ส่วนเถ้าชานอ้อยนั้นมีสีดำและมีความชื้นสูง เนื่องจากแหล่งที่นำเถ้าชานอ้อยมาจากจังหวัดชัยภูมินั้น โรงงานทำการกักเก็บเถ้าชานอ้อยในบ่อขนาดใหญ่และมีน้ำขังอยู่ เถ้าชานอ้อยมีลักษณะค่อนข้างหยาบและมีเศษวัสดุอื่นๆปนอยู่ เช่น เศษดิน เศษวัชพืช ซึ่งต้องทำการแยกออกด้วยการร่อนตะแกรงเบอร์ 16 แล้วนำไปตากแดดเพื่อลดความชื้นก่อนนำไปบด และสำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นถูกนำมาจากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มีลักษณะคล้ายกับเถ้าชานอ้อย กล่าวคือ มีสีดำและค่อนข้างหยาบ แต่ปริมาณวัสดุปลอมปนและความชื้นมีน้อยกว่าเถ้าชานอ้อย แต่ก็ต้องทำการร่อนเอาเศษวัสดุอื่นๆออกเช่นเดียวกัน



รูปที่ 9 เถ้าถ่านหิน



รูปที่ 10 เถ้าชานอ้อย

รูปที่ 11 เถ้าปาล์มน้ำมัน

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอซโซลานทุกชนิด ประกอบไปด้วย ปริมาณความชื้นของวัสดุ ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย และความถ่วงจำเพาะ แสดงในตารางที่ 5 วัสดุปอซโซลานที่ผ่านการบดเพื่อลดขนาดของอนุภาค โดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และให้มีอนุภาคค้างตะแกรงดังกล่าวได้ไม่เกินร้อยละ 5 พบว่ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าของอนุภาคปูนซีเมนต์ ซึ่งเท่ากับ 14.6 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าถ่านหิน (MFA) มีขนาดเล็กที่สุด คือ 5.5 ไมครอน สำหรับเถ้าชานอ้อย (BGA) และ เถ้าปาล์มน้ำมัน (POA) มีขนาดเท่ากับ 7.3 และ 8.1 ไมครอน ตามลำดับ สำหรับเวลาที่ใช้ในการบดวัสดุปอซโซลานนั้น พบว่า เถ้าชานอ้อยนั้นใช้ประมาณ 2 ชม. ซึ่งเป็นเวลาที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ

สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุปอซโซลาน มีค่าเพิ่มสูงสุดเมื่อวัสดุผ่านการบดละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากการบดวัสดุนั้นจะทำให้ช่องว่างในอนุภาควัสดุลดลงหรือหายไป แต่อย่างไรก็ตามความถ่วงจำเพาะของวัสดุปอซโซลานทั้งสามชนิดก็ยังต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ โดยมีค่าเท่ากับ 2.52 2.43 และ 2.25 สำหรับเถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อย ตามลำดับ

ตารางที่ 5 สมบัติด้านกายภาพของวัสดุประสาน

Property	OPC	MFA	POA	BGA
d_{50} (micron)	14.6	5.5	8.1	7.3
Retained on a Sieve No. 325 (%)	N/A	3.8	4.6	3.9
Specific graviity	3.14	2.52	2.43	2.25
Moisture content (%)	-	0.26	1.07	2.74

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ที่ทดสอบด้วยวิธี XRD (X-ray Diffraction) แสดงในตารางที่ 6 พบว่าองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของวัสดุปอซโซลานมีปริมาณรวมกัน

เท่ากับ 75.2 65.7 และ 93.49 สำหรับ เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย ตามลำดับ สำหรับเถ้าถ่านหินนั้นสามารถจัดให้อยู่ใน class F ตามการจำแนกด้วยตามมาตรฐาน ASTM C618 เนื่องจากมีผลรวมขององค์ประกอบหลักทั้งสามชนิดมากกว่าร้อยละ 70 ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อยนั้น ถ้าพิจารณาตามปริมาณขององค์ประกอบหลักทั้งสามชนิด ก็จะจัดให้อยู่ใน class C และ F ตามลำดับ แต่วัสดุทั้งสองชนิดไม่ได้จากการเผาถ่านหิน แต่เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เถ้าทั้งสองจึงจัดให้อยู่ใน class N และเมื่อพิจารณารายละเอียดแล้ว ปริมาณ SiO_2 ของเถ้าชานอ้อยมีปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 91.2 แต่ปริมาณ Al_2O_3 และ Fe_2O_3 กลับมีเพียงร้อยละ 1.02 และ 1.27 ตามลำดับ ซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีต อนึ่ง ปริมาณของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on inigtion, LOI) ของเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อยมีค่าที่ค่อนข้างสูง นั้นแสดงว่าวัสดุทั้งสองชนิดผ่านการเผาที่ไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

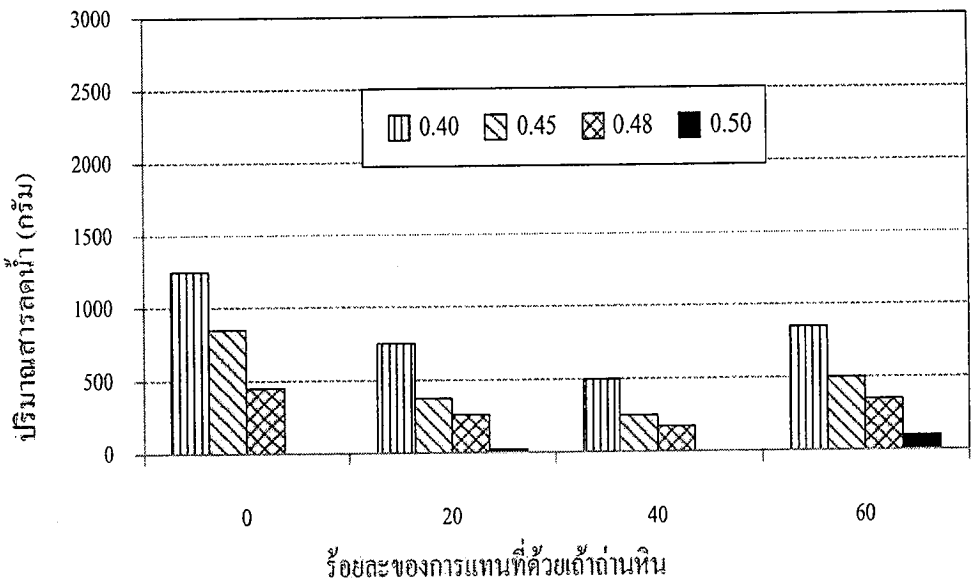
Chemical Composition (%)	OPC	FA	PA	BA
SiO_2 - [1]	20.9	**41.1**	**57.8**	**91.2**
Al_2O_3 - [2]	4.8	**22.5**	**4.6**	**1.02**
Fe_2O_3 - [3]	3.4	**11.6**	**3.3**	**1.27**
CaO	65.4	15.3	6.6	2.4
MgO	1.2	2.8	4.2	0.5
Na_2O	0.2	1.7	0.5	0.5
K_2O	0.3	2.9	8.3	1.53
SO_3	2.7	1.5	0.3	0.89
LOI	0.9	0.2	10.1	13.59
[1]+[2]+[3]	-	**75.2**	**65.7**	**93.49**

2. ความต้องการน้ำและความสามารถในการทำงานได้ของปอซโซลานคอนกรีต

การศึกษานี้ ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต 4 ระดับ กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ และควบคุมค่าการทำงานได้ของคอนกรีตด้วยวิธีวัดค่าการยุบตัว (Slump test) ให้อยู่ในช่วง 100-150 มม. ถ้าค่าการยุบตัวไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด จะใช้สารผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษเติมเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเพิ่มค่าการยุบตัว ความสัมพันธ์ของปริมาณของสารลดน้ำกับร้อยละของการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดได้แสดงในรูปที่ 12-14 ซึ่งปริมาณของการใช้สารผสมเพิ่มนั้นจะส่งผลต่อต้นทุนของคอนกรีต

สำหรับคอนกรีตควบคุมหรือคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.40 ใช้ปริมาณสารลดน้ำเท่ากับ 1250 กรัม และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มค่า w/c ซึ่งเท่ากับ 850 และ 450 กรัม สำหรับคอนกรีตที่ใช้น้ำ w/c เท่ากับ 0.45 และ 0.48 ส่วนคอนกรีตที่ผสมด้วยค่า w/c เท่ากับ 0.50 นั้นค่าการยุบตัวก็อยู่ในช่วงที่กำหนดโดยไม่ต้องเติมสารลดน้ำ

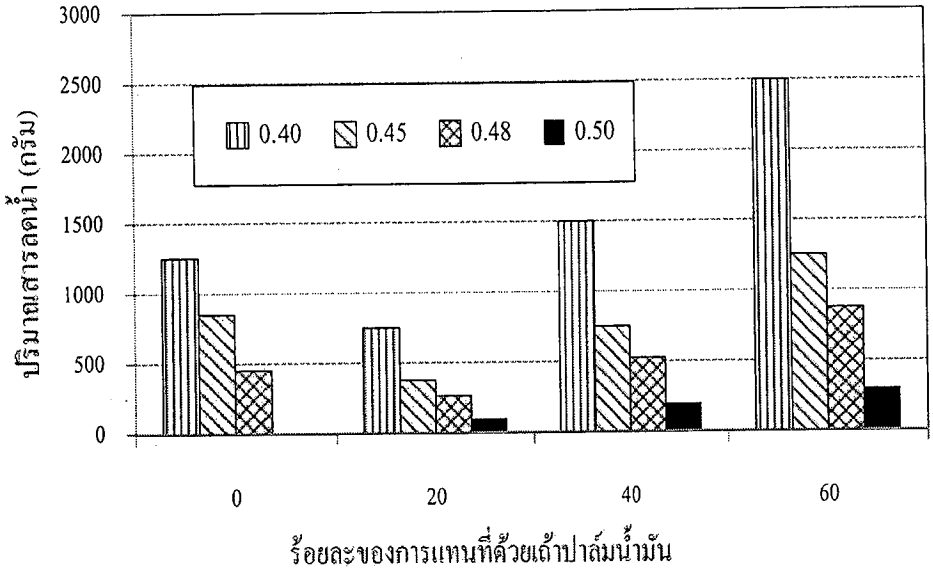
เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินนั้นพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินมีแนวโน้มที่ให้ส่วนผสมของคอนกรีตดีขึ้น ทำให้ปริมาณสารลดน้ำที่ใช้ลดปริมาณลง เนื่องจากมีการศึกษาพบว่าอนุภาคของเถ้าถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะ จังหวัดลำปางนั้นมีลักษณะที่ค่อนนข้างกลม จึงช่วยหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานของส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ปริมาณการใช้สารลดน้ำต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุมทุกค่า w/c การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีแนวโน้มของการใช้สารลดน้ำน้อยที่สุด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ขึ้นเป็นร้อยละ 60



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินกับปริมาณการใช้สารลดน้ำ

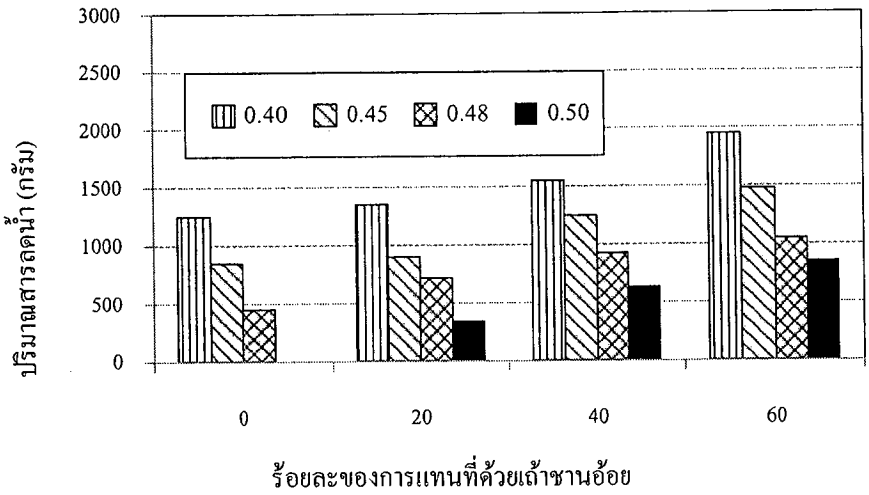
ปริมาณการใช้สารลดน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ที่ดีขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการใช้สารลดน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกค่า w/c แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นร้อยละ 40 พบว่าที่ค่า w/c เท่ากับ 0.40 ทำให้ส่วนผสมคอนกรีตมีค่าการยุบตัวที่ต่ำกว่า ทำให้ต้องใช้สารลดน้ำปริมาณมากและสูงกว่าของคอนกรีตควบคุมอย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มค่า w/c เป็น 0.45 ปริมาณของสารลดน้ำที่ใช้ก็ลดลงและต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันมีผิวที่ขรุขระ และมีรูพรุนบางส่วน เมื่อใช้ค่า w/c ต่ำ ทำให้มีปริมาณน้ำในส่วนผสมน้อย น้ำส่วนหนึ่งจะถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของเถ้า ประกอบกับปริมาณของเถ้าที่มีปริมาณมาก ทำให้เหลือน้ำที่จะเป็นส่วนช่วยหล่อลื่น

ส่วนผสมน้อย จึงต้องใช้สารลดน้ำปริมาณที่ค่อนข้างสูงมาก และลักษณะเดียวกันนี้ก็เกิดขึ้นที่การแทนที่ร้อยละ 60 เช่นเดียวกัน แต่แนวโน้มก็สูงกว่าที่ร้อยละ 40



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันกับปริมาณการใช้สารลดน้ำ

คอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มของการใช้สารลดน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ และสำหรับที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยต่างๆ ปริมาณการใช้สารลดน้ำลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น คล้ายกับคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำ ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าลักษณะของอนุภาคของเถ้าชานอ้อยมีผิวขรุขระและเนื้อวัสดุสามารถดูดซับน้ำได้จำนวนมาก ทำให้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตถูกดูดและส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง ทุกส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยจะต้องการใช้สารลดน้ำปริมาณสูงกว่าของคอนกรีตควบคุม โดยส่วนผสมที่ต้องการใช้สารลดน้ำสูงสุดคือ การแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 60 และที่ w/c เท่ากับ 0.40 ต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำเท่ากับ 1950 กรัม ต่อปริมาณคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยกับปริมาณการใช้สารลดน้ำ

การใช้วัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ แทนที่ปูนซีเมนต์ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต โดยในภาพรวมพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ลดปริมาณการใช้สารลดน้ำและน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ทุกร้อยละของการแทนที่ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 20 เท่านั้นถึงจะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานดีกว่าคอนกรีตควบคุม แต่การใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตทุกส่วนผสม

2. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานได้แสดงในตารางที่ 7-10 ซึ่งใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. บ่มในน้ำจนอายุครบที่ 7 28 และ 90 วัน จึงทำการทดสอบ โดยนำตัวอย่างขึ้นจากบ่อบ่ม เช็ดผิวให้แห้ง ทำการเคลือบด้านที่ไม่เรียบด้วยกำมะถัน จากนั้นก็นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ขนาด 300 ตัน อัตราของการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM

ตารางที่ 7 กำลังรับแรงอัดที่ช่วงอายุต่างๆ ออกแบบกำลังอัดคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 410 ksc ที่ w/c 0.40

อายุ		เถ้าลอย (FA)				เถ้าชานอ้อย (BA)			เถ้าปาล์ม (PA)		
		ร้อยละการแทนที่				ร้อยละการแทนที่			ร้อยละการแทนที่		
		0	20	40	60	20	40	60	20	40	60
		ค่าการยุบตัว (cm)				ค่าการยุบตัว (cm)			ค่าการยุบตัว (cm)		
		10.5	11.5	11	12	11.5	13.5	14.5	11	13	14
วัน	W/C	ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)				ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)			ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)		
		50	150	100	200	150	300	500	150	300	500
		กำลังอัด (ksc)				กำลังอัด (ksc)			กำลังอัด (ksc)		
7	0.40	325.13	294.55	263.73	215.34	262.77	246.60	208.51	251.34	227.67	195.64
		332.89	283.95	270.21	221.53	278.97	242.91	200.21	271.44	233.56	201.22
		336.55	297.33	275.28	235.78	276.40	251.02	209.96	254.73	229.02	193.53
AVG		331.52	291.94	269.74	224.21	272.714	246.84	206.22	259.17	230.08	196.79
28	0.40	395.63	426.18	452.42	358.73	430.46	388.04	323.33	413.46	365.42	329.53
		415.22	425.33	415.25	360.28	412.61	375.92	339.56	411.60	363.88	322.43
		408.53	419.57	440.77	367.28	415.43	389.7	329.41	416.41	375.84	318.78
AVG		406.46	423.69	436.14	362.09	419.50	384.55	330.76	413.82	368.38	323.58
90	0.40	423.688	465.52	480.77	399.44	431.34	400.22	368.44	438.45	387.18	356.73
		436.586	454.55	487.23	412.55	446.65	398.39	376.36	433.69	389.52	352.55
		431.032	450.49	463.77	419.00	443.33	415.54	364.30	440.32	395.71	358.81
AVG		430.43	456.85	477.25	410.33	440.44	404.71	369.70	437.48	390.80	356.03

ตารางที่ 8 กำลังรับแรงอัดที่ช่วงอายุต่างๆ ออกแบบกำลังอัดคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 365 ksc ที่ w/c 0.45

อายุ		เถ้าลอย (FA)				เถ้าชานอ้อย (BA)			เถ้าปาล์ม (PA)		
		ร้อยละการแทนที่				ร้อยละการแทนที่			ร้อยละการแทนที่		
		0	20	40	60	20	40	60	20	40	60
		ค่าการยุบตัว (cm)				ค่าการยุบตัว (cm)			ค่าการยุบตัว (cm)		
		10	12	12.5	13	12	14	14.5	11	13	14
วัน	W/C	ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)				ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)			ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)		
		55	75	50	100	75	150	250	75	150	250
		กำลังอัด (ksc)				กำลังอัด (ksc)			กำลังอัด (ksc)		
7	0.45	285.63	265.62	248.71	187.61	269.58	216.52	198.72	221.92	192.48	169.38
		300.72	273.62	252.93	191.51	250.83	209.27	180.05	241.02	201.26	181.55
		304.82	277.91	235.23	205.8	235.81	207.43	195.99	229.26	201.74	173.28
AVG		297.05	272.38	245.62	194.97	252.07	211.07	191.58	230.73	198.49	174.73
28	0.45	365.37	409.35	419.71	325.72	394.83	342.72	324.39	382.64	325.44	294.39
		369.29	399.92	426.63	330.84	389.3	347.93	323.42	384.38	333.73	299.95
		374.03	411.51	399.94	337.93	398.22	339.04	299.06	395.42	340.27	304.44
AVG		369.56	406.92	415.42	331.49	394.11	343.23	315.62	387.48	333.14	299.59
90	0.45	402.28	445.34	454.66	388.07	408.64	358.22	361.08	413.53	349.45	329.22
		388.12	438.49	461.34	379.54	411.60	365.53	349.50	406.22	354.61	325.94
		385.04	431.25	449.03	372.39	422.85	366.06	347.54	412.03	358.22	336.52
AVG		391.81	438.36	455.01	380.00	414.36	363.27	352.70	410.59	354.09	330.56

ตารางที่ 9 กำลังรับแรงอัดที่ช่วงอายุต่างๆ ออกแบบกำลังอัดคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28วัน เท่ากับ 320 ksc ที่ w/c 0.48

อายุ		เถ้าลอย (FA)				เถ้าชานอ้อย (BA)			เถ้าปาล์ม (PA)		
		ร้อยละการแทนที่				ร้อยละการแทนที่			ร้อยละการแทนที่		
		0	20	40	60	20	40	60	20	40	60
		ค่าการยุบตัว (cm)				ค่าการยุบตัว (cm)			ค่าการยุบตัว (cm)		
		10	13	13.5	14.5	12	13	14	11	12	13.5
วัน	W/C	ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)				ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)			ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)		
		17.5	52.5	35	70	52.5	105	175	52.5	105	175
		กำลังอัด (ksc)				กำลังอัด (ksc)			กำลังอัด (ksc)		
7	0.48	296.73	247.85	210.50	169.86	208.90	195.60	179.94	210.5	192.32	168.31
		282.52	235.82	236.40	187.37	222.50	209.40	162.85	212.40	198.42	149.42
		274.75	259.09	225.60	177.19	225.60	198.20	155.19	195.42	180.29	148.44
AVG		284.66	247.58	224.16	178.14	219.00	201.06	165.99	206.10	190.34	155.39
28	0.48	357.42	374.53	390.54	291.43	387.61	339.32	291.80	372.47	331.44	279.10
		368.52	384.97	399.20	329.49	379.54	349.31	288.54	366.14	325.88	282.13
		350.36	392.84	385.44	312.34	359.09	327.84	313.96	371.85	311.76	280.49
AVG		358.76	384.11	391.72	311.08	375.41	338.82	298.10	370.15	323.02	280.57
90	0.48	385.49	412.95	432.05	361.54	402.95	356.87	332.22	395.78	341.92	309.54
		379.14	421.35	417.25	355.72	381.57	368.64	324.47	399.12	351.89	299.53
		377.22	406.25	440.54	357.63	398.87	349.18	345.92	380.95	332.42	318.35
AVG		380.61	413.51	429.94	358.29	394.46	358.23	334.20	391.95	342.07	309.14

ตารางที่ 10 กำลังรับแรงอัดที่ช่วงอายุต่างๆ ออกแบบกำลังอัดคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28วัน เท่ากับ 290 ksc ที่ w/c 0.50

อายุ		เถ้าลอย (FA)				เถ้าชานอ้อย (BA)			เถ้าปาล์ม (PA)		
		ร้อยละการแทนที่				ร้อยละการแทนที่			ร้อยละการแทนที่		
		0	20	40	60	20	40	60	20	40	60
		ค่าการยุบตัว (cm)				ค่าการยุบตัว (cm)			ค่าการยุบตัว (cm)		
		11	14.4	12.5	13.5	13	13.5	13	12	12.5	13.5
วัน	W/C	ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)				ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)			ปริมาณการใช้ Supper P Type F (g)		
		0	5	0	20	20	40	60	20	40	60
		กำลังอัด (ksc)				กำลังอัด (ksc)			กำลังอัด (ksc)		
7	0.50	225.60	183.48	174.22	146.87	167.50	135.25	120.04	138.84	131.73	99.64
		237.60	183.88	169.87	158.32	145.80	130.32	112.24	149.32	125.52	102.66
		215.20	199.32	166.98	133.85	151.250	127.22	100.52	135.03	145.71	113.74
AVG		226.13	188.89	170.35	146.34	154.85	130.93	110.93	141.06	134.32	105.34
28	0.50	293.23	324.72	345.38	259.42	301.14	269.11	241.20	304.62	266.25	226.52
		297.43	321.51	341.22	289.72	309.12	267.63	235.24	304.52	258.52	224.13
		304.40	328.4	332.31	285.12	314.88	271.34	238.51	302.33	261.39	237.24
AVG		298.35	324.87	339.63	278.08	308.38	269.36	238.317	303.824	262.05	229.29
90	0.50	327.24	341.85	378.92	315.26	331.73	278.54	267.95	314.12	274.32	258.14
		318.93	352.85	385.41	324.26	319.25	295.25	279.25	336.67	289.26	262.22
		313.63	364.26	366.87	333.29	329.82	287.85	274.19	319.09	277.44	245.97
AVG		319.93	352.98	377.06	324.27	326.93	287.21	273.79	323.29	280.34	255.44

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับ 331.52 297.05 284.66 และ 226.13 กก./ซม^2. และที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 430.43 391.81 380.61 และ 319.93 กก./ซม^2. ที่อัตราน้ำต่อสารซีเมนต์ 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ ในส่วนของการแทนที่วัสดุปอซโซลานด้วยเถ้าถ่านหินที่อัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 291.94 272.38 247.58 และ188.89 กก./ซม^2. ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 456.85 438.36 413.51 และ 352.98 กก./ซม^2. สำหรับการแทนที่ร้อยละ 40 ที่ 7 วันมีค่าเท่ากับ 269.74 245.62 224.16 และ 170.35 กก./ซม^2. ที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 477.25 455.01 429.94 และ 377.06 กก./ซม^2. สำหรับการแทนที่ร้อยละ 60 ที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับ 224.21 194.97 178.14 และ 146.34 กก./ซม^2. และที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 410.33 380.00 358.29 และ 324.27กก./ซม^2.ที่อัตราน้ำต่อสารซีเมนต์ 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ

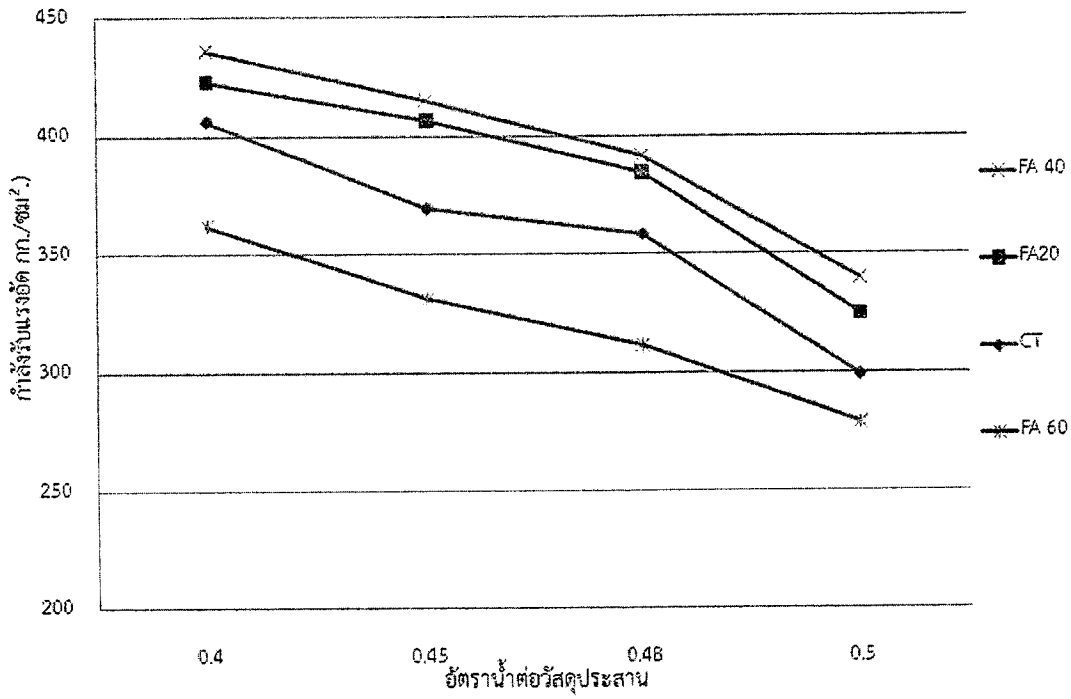
การแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อย ที่ร้อยละ 20 ที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับ 272.71 252.07 219.00 และ 154.85 กก./ซม^2.ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 440.44 414.36 394.46 และ 326.93 กก./ซม^2. สำหรับการแทนที่ร้อยละ 40 ที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับ 246.84 211.07 201.06 และ 130 93 กก./ซม^2. ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 404.71 363.27 358.23 และ 287.21 กก./ซม^2. สำหรับการแทนที่ร้อยละ 60 ที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับ 206.22 191.58 165.99 และ 110.93 กก./ซม^2. ที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 369.70 352.70 334.20 และ 273.79 กก./ซม^2.ที่อัตราน้ำต่อสารซีเมนต์ 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ

การแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 259.17 230.73 206.10 และ 141.06 กก./ซม^2. ที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 437.48 410.59 391.95 และ 323.29 กก./ซม^2. สำหรับการแทนที่ร้อยละ 40 ที่อายุ 7 วัน 230.08 198.49 190.34 และ 134.32 กก./ซม^2. ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 390.80 354.09 342.07 และ 280.34 กก./ซม^2. และสำหรับการแทนที่ ร้อยละ 60 ที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับ 196.79 174.73 155.39 และ 105.34 กก./ซม^2. และที่ร้อยละ 60 ที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 356.03 330.56 309.14 และ 255.44 กก./ซม^2. ที่อัตราน้ำต่อสารซีเมนต์ 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ

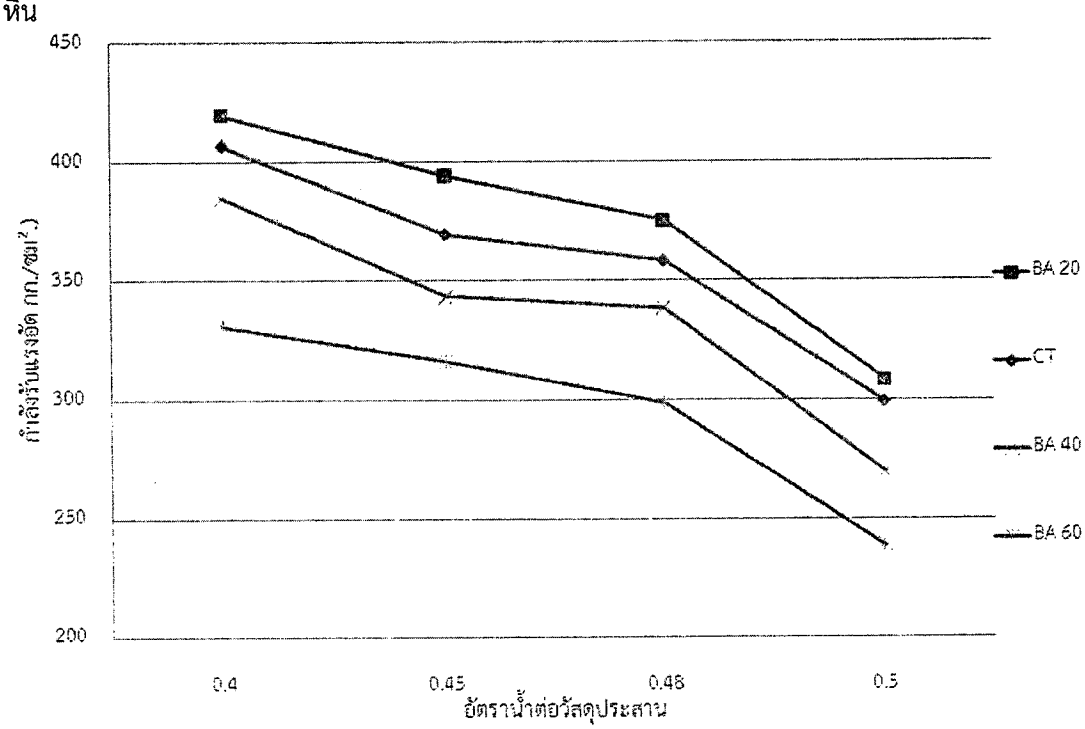
การทดสอบค่าจากผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน ของเถ้าถ่านหิน พบว่าคอนกรีตควบคุม ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 20 40 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมทุกระดับอัตราน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ โดยที่คอนกรีตควบคุมมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 331.524 297.057 284.667 และ 226.134 กก./ซม^2. สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ เถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 423.69 406.92 384.11 และ 324.87 กก./ซม^2. และที่ร้อยละ 40 มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 436.14 415.42 391.72 และ 339.63 กก./ซม^2. แต่เมื่อแทนที่ถึงร้อยละ 60 กำลังรับแรงอัดจะลดลงประมาณร้อยละ 80 ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2536)

ภาพที่ 16 และ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสาน ของเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือเมื่อแทนที่ ที่ร้อยละ 20 จะมีกำลังแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมเทียบกับการแทนที่ทั้งหมด โดยเถ้าชานอ้อยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 419.50 394.11 375.41 และ 308.38 กก./ซม^2. และเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 413.82 387.48 370.15 และ 303.82 กก./

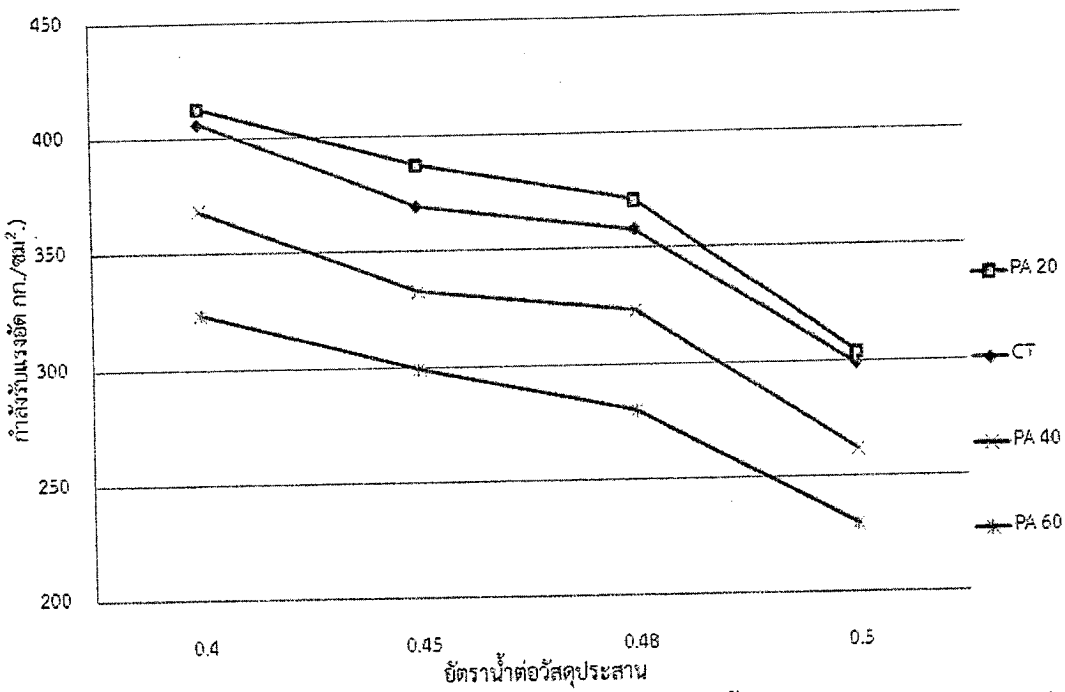
ซม^2. แต่เมื่อแทนที่ ถึงร้อยละ 40 และ 60 กำลังรับแรงอัดกลับลงต่ำลงอย่างรวดเร็วประมาณร้อยละ 60-80 ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Sata et al, 2004) และ (Weerechart et al, 2007)



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสานของเถ้าถ่านหิน



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสานของเถ้าชานอ้อย



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสานของเถ้าปาล์มน้ำมัน

3. ผลการต้านทานการสึกกร่อน

3.1 ผลการทดสอบการต้านทานการสึกกร่อนในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐาน ASTM C1138

ในตารางที่ 11 - 15 เป็นค่าการการสึกกร่อนของคอนกรีตควบคุมและปอซโซลานคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยทำการทดสอบตามมาตรฐานจนครบ 6 รอบหรือ 72 ชั่วโมง พบว่าคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานมีการสึกกร่อนมากกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดไม่เต็มที่ ทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตมาจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เป็นหลัก เมื่อถูกแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน ปริมาณปูนซีเมนต์ก็ลดลง ซึ่งส่งผลให้ส่วนที่เชื่อมประสานในเนื้อคอนกรีตก็ลดลงไปด้วย

ที่ค่า w/c = 0.40 คอนกรีตควบคุมมีอัตราการสึกกร่อนเท่ากับ 0.974157 มม. สำหรับการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20-40 มีแนวโน้มของการสึกกร่อนต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณ 1.0796 มม. แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละ 60 ค่าการสึกกร่อนก็เพิ่มขึ้นตามด้วย โดยคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน FA20 FA40 และ FA60 มีค่าการสึกกร่อนเท่ากับ 1.153019 1.079558 และ 1.303135 มม. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันก็พบว่า เถ้าถ่านหินมีการสึกกร่อนต่ำกว่าเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีอัตราการสึกกร่อนสูงที่สุด ซึ่งอัตราการสึกกร่อนของเถ้าทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าการสึกกร่อนกับอัตราส่วนน้ำต่อสารซีมเมนต์พบว่า เมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ก็จะส่งผลให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีอัตราการสึกกร่อนที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยถ้าเปรียบเทียบในเถ้าแต่ละชนิดก็จะชัดเจนมากขึ้น

ตารางที่ 11 ค่าการสึกกร่อนของปอซโซลานคอนกรีต (w/c=0.40) ที่อายุ 28 วัน

materials	w/c	ระดับการสึกกร่อน (มม.)			
		ร้อยละของการแทนที่			
		0	20	40	60
CON	0.40	0.974157	-	-	-
FA	0.40	-	1.153019	1.079558	1.303135
BA	0.40	-	1.220092	1.315911	1.363820
PA	0.40	-	1.255226	1.335075	1.382984

ตารางที่ 12 ค่าการสึกกร่อนของปอซโซลานคอนกรีต (w/c=0.45) ที่อายุ 28 วัน

materials	w/c	ระดับการสึกกร่อน (มม.)			
		ร้อยละของการแทนที่			
		0	20	40	60
CON	0.45	1.060394	-	-	-
FA	0.45	-	1.210510	1.181765	1.338269
BA	0.45	-	1.357432	1.418117	1.277583
PA	0.45	-	1.386178	1.453251	1.335075

ตารางที่ 13 ค่าการสึกกร่อนของปอซโซลานคอนกรีต (w/c=0.48) ที่อายุ 28 วัน

materials	w/c	ระดับการสึกกร่อน (มม.)			
		ร้อยละของการแทนที่			
		0	20	40	60
CON	0.48	1.069976	-	-	-
FA	0.48	-	1.242450	1.200928	1.398954
BA	0.48	-	1.319105	1.424505	1.475609
PA	0.48	-	1.370208	1.437281	1.533100

ตารางที่ 14 ค่าการสึกกร่อนของปอซโซลานคอนกรีต (w/c=0.50) ที่อายุ 28 วัน

materials	w/c	ระดับการสึกกร่อน (มม.)			
		ร้อยละของการแทนที่			
		0	20	40	60
CON		1.1146915	-	-	-
FA	0.50	-	1.3127169	1.2584196	1.4788027
BA	0.50	-	1.4213115	1.5458758	1.5969792
PA	0.50	-	1.453251	1.5714275	1.6416946

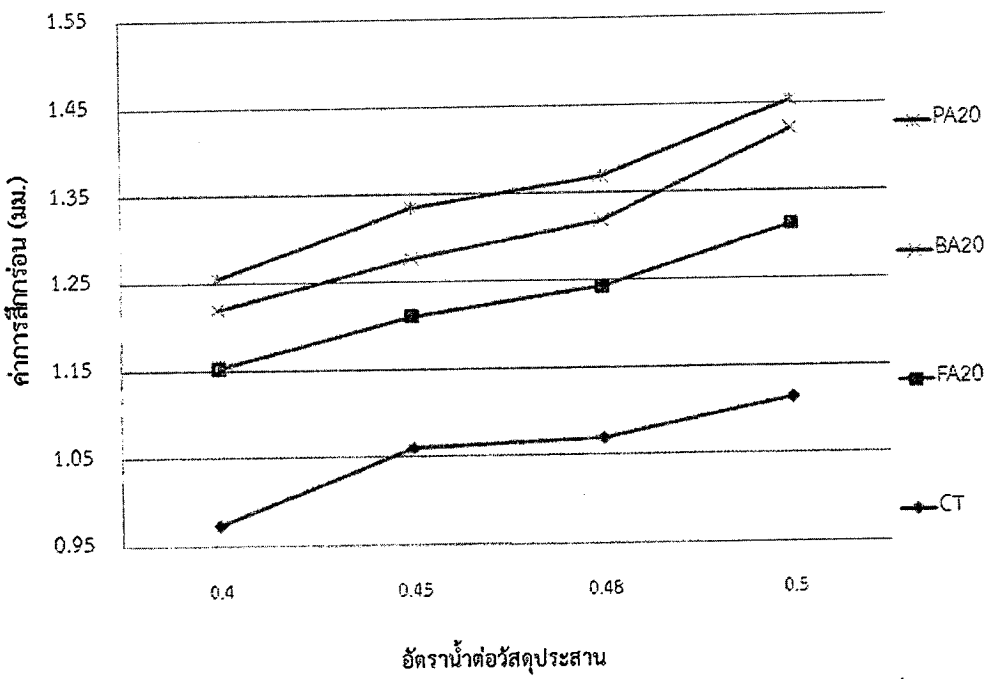
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเถ้าแต่ละชนิดกับอัตราการสึกกร่อนในปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน ดังในภาพที่ 18 เป็นปริมาณการแทนที่วัสดุปอซโซลานที่ร้อยละ 20 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าการสึกกร่อนเท่ากับ 0.974 1.060 1.069 และ 1.114 มิลลิเมตร สำหรับค่าอัตราน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) เท่า กับ 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ ซึ่งอัตราการสึกกร่อน ของคอนกรีตควบคุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า (w/c) และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานก็พบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีความต้านทานการสึกกร่อนดีกว่าคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานทุกชนิด และพบว่าการแทนที่ที่ร้อยละ 20 อัตราการสึกกร่อนจะมีเส้นแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน

ส่วนในรูปที่ 19 เป็นความสัมพันธ์ของอัตราการสึกกร่อนกับปริมาณการแทนที่วัสดุปอซโซลานที่ร้อยละ 40 ซึ่งพบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 40 มีค่าการสึกกร่อนเท่ากับ 1.079 1.181 1.200 และ 1.258 มิลลิเมตร สำหรับค่าอัตราน้ำต่อสารซีเมนต์ (w/c) เท่า กับ 0.40 0.45 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ และให้ค่าการต้านทานการสึกกร่อนที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับ ชนิดและปริมาณการแทนที่ ที่ร้อยละ 40 ทั้งหมด ส่วนเถ้าชานอ้อยและเถ้าปาล์มน้ำมันจะให้ค่าการสึกกร่อนที่มากกว่าเถ้าถ่านหิน แต่ทุกๆระดับการแทนที่ของปอซโซลานก็ยังให้ค่าการสึกกร่อนที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม

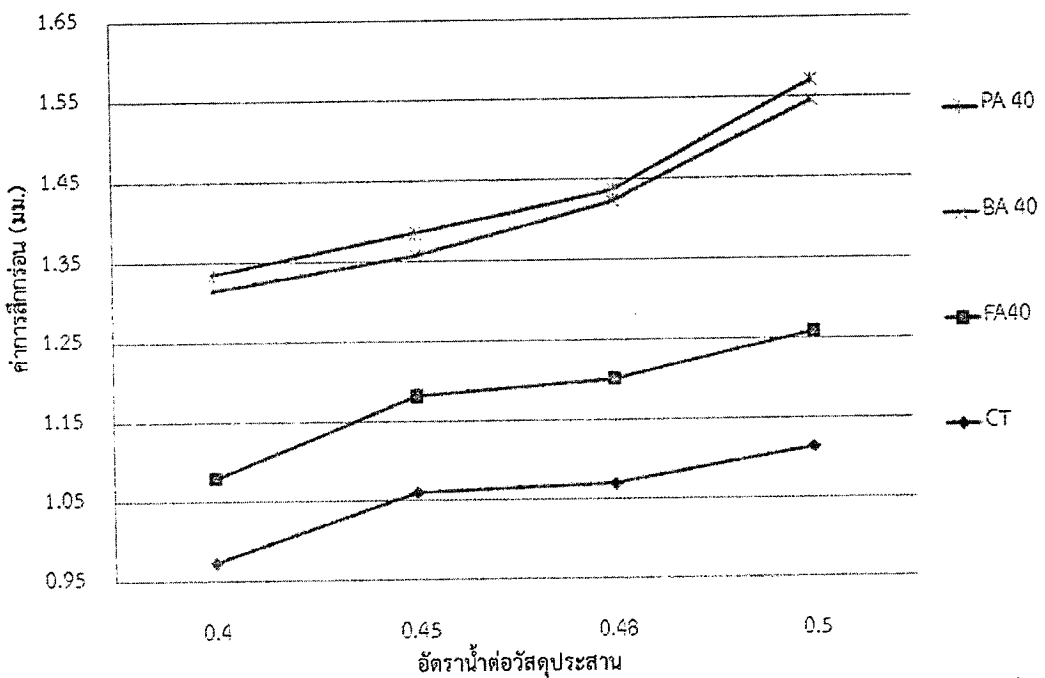
เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 60 การสึกกร่อนก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 20 และอัตราการสึกกร่อนมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน และ ค่าการสึกกร่อนของปอซโซลานคอนกรีต มีค่าแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กล่าวคือเมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดมากขึ้นค่าการสึกกร่อนก็จะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (E. Horszczaruk, 2006) และ (Yu et al, 2005)

รูปที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับค่าการสึกกร่อนที่ส่วนผสมต่างๆ จากการแทนที่ ที่ระดับร้อยละ 20 และ 40 ของวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดพบว่า ปอซโซลานคอนกรีตจากการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 40 จะให้ค่าการสึกกร่อนที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการแทนที่แต่ละชนิดของวัสดุปอซโซลาน แต่ก็ยังมีค่าการสึกกร่อนมากกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนร้อยละ 20 ทั้งสามชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกัน ภาพประกอบ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับค่าการสึกกร่อนที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ของปอซโซลานคอนกรีต พบว่าปอซโซลานคอนกรีต (w/c=0.40) มีค่าความเบี่ยงเบน (R^2) เท่ากับ 0.941 (w/c=0.45) มีค่าความเบี่ยงเบน (R^2) เท่ากับ 0.888 (w/c=0.48) มีค่า

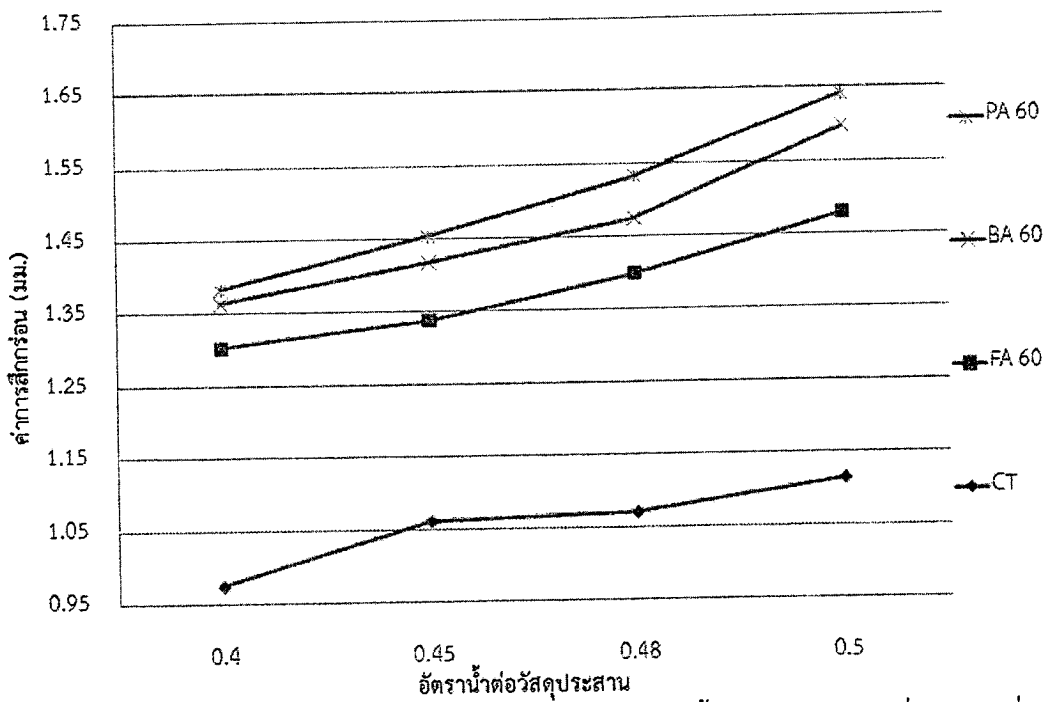
ความเบี่ยงเบน (R^2) เท่ากับ 0.891 และ (w/c=0.50) มีค่าความเบี่ยงเบน (R^2) เท่ากับ 0.873 ตามลำดับ ภาพประกอบ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับค่าการสึกกร่อนที่ของคอนกรีตควบคุมและปอซโซลานคอนกรีต พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าความเบี่ยงเบน (R^2) เท่ากับ 0.999 และปอซโซลานคอนกรีตมีค่าความเบี่ยงเบน (R^2) เท่ากับ 0.883



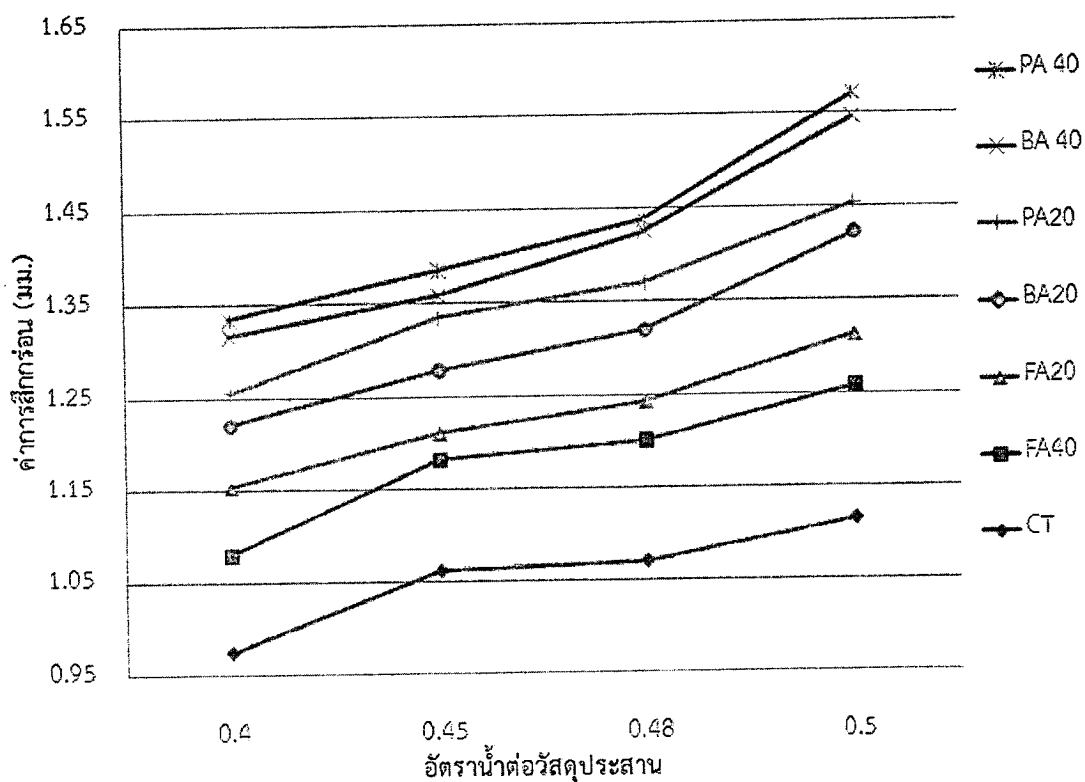
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสึกกร่อนที่ 72 ชั่วโมง กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่การแทนที่วัสดุปอซโซลาน ร้อยละ 20



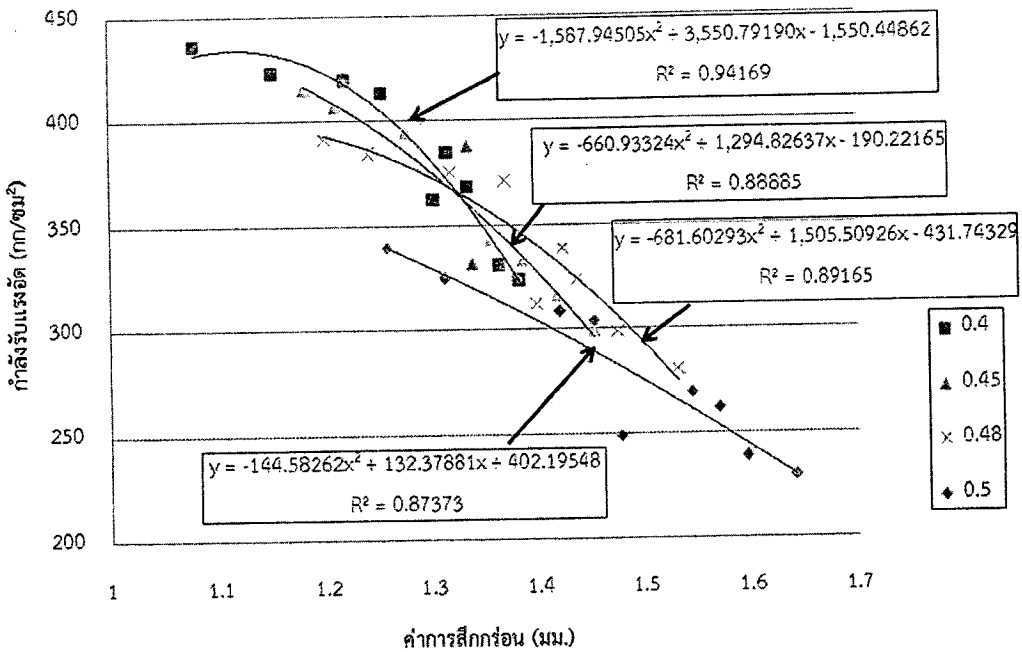
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสึกกร่อนที่ 72 ชั่วโมง กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่การแทนที่วัสดุปอซโซลาน ร้อยละ 40



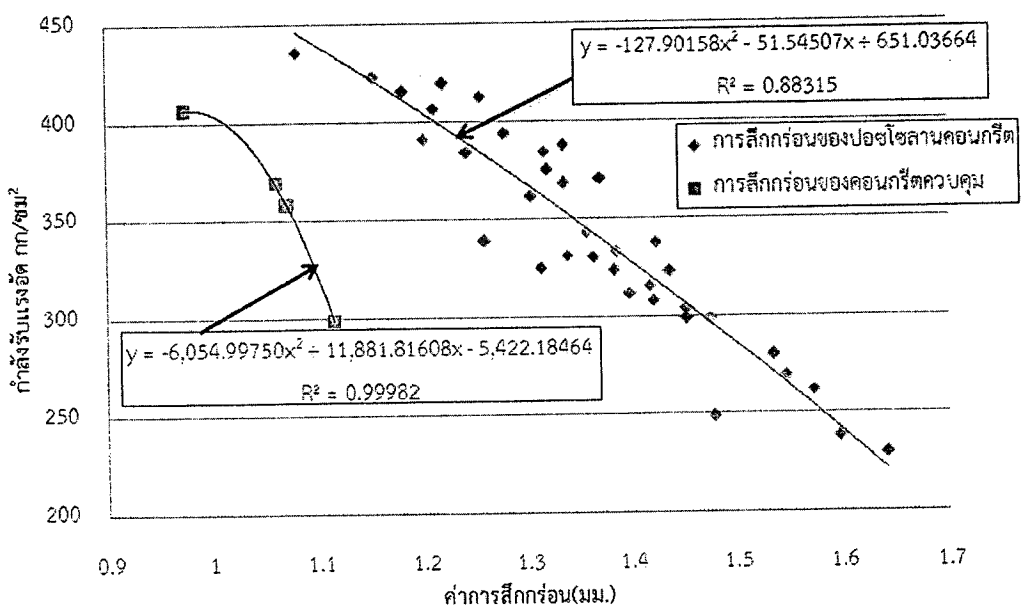
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสึกกร่อนที่ 72 ชั่วโมง กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่การแทนที่วัสดุปอซโซลาน ร้อยละ 60



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสึกกร่อนที่ 72 ชั่วโมง กับอัตราน้ำต่อวัสดุประสานของปอซโซลานคอนกรีตที่การแทนที่ ร้อยละ 20 และ 40



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดกับค่าการสึกกร่อนที่ 72 ชั่วโมงของปอซโซลานคอนกรีต

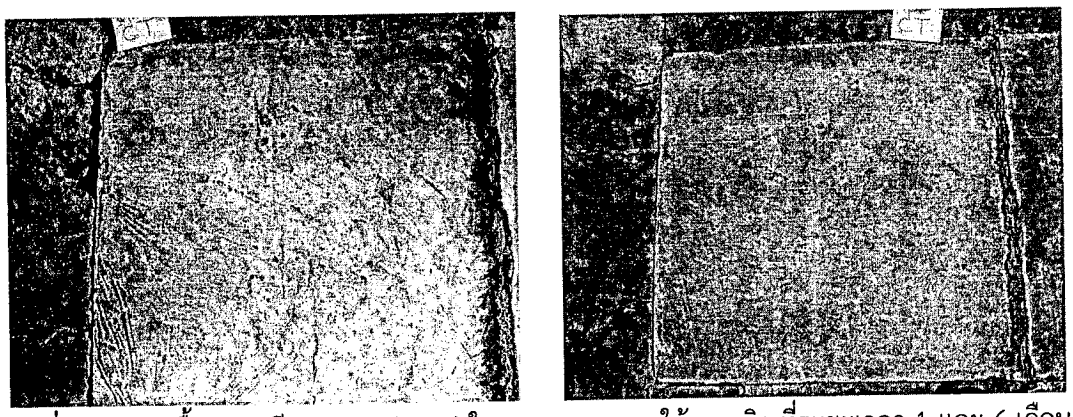


รูปที่ 23 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดกับค่าการสึกกร่อนที่ 72 ชั่วโมง

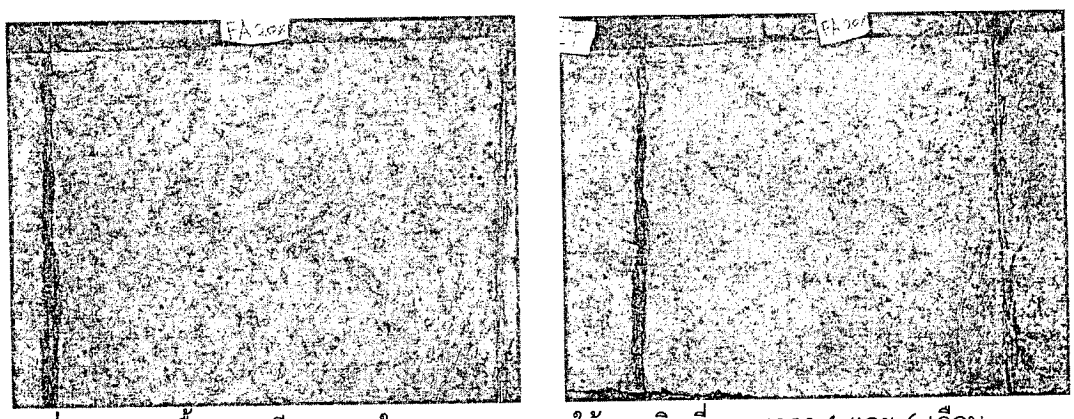
3.2 การทดสอบการต้านทานการสึกกร่อนในสภาพการใช้งานจริง

คอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานได้ถูกนำไปเทในถนนที่มีการใช้สัญจรจริง โดยพิจารณาใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์เท่ากับ 0.50 เมื่อทำการเตรียมพื้นที่และเทคอนกรีตดังกล่าวลงบนพื้นที่ที่เตรียมไว้ จากนั้นทำการบ่มเป็นเวลา 28 วัน ในช่วงเวลาดังกล่าว ทำการปิดกั้นการใช้งานในบริเวณ เมื่อครบกำหนดก็เปิดพื้นที่ให้สามารถใช้งานได้ แต่ผู้ขับขี่ยานพาหนะชนิดต่างๆ พยายามหลบหรือหลีกเลี่ยงพื้นที่ทำการทดสอบ เนื่องจากเกรงว่าสภาพถนนจะไม่เรียบหรือคิดว่าพื้นที่ดังกล่าวยังไม่ได้เปิดใช้ ทำให้ปริมาณยานหนะหรือปริมาณจราจรที่วิ่งผ่านบนผิวคอนกรีตที่ศึกษาน้อยกว่าปกติ และเมื่อทำการประเมินสภาพผิวหน้าคอนกรีตก็พบว่า สภาพผิวของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ผู้วิจัยได้วางแผนที่จะขยายระยะเวลาการทดสอบให้นานมากขึ้น แต่เนื่องจากทางมหาวิทยาลัยได้มีแผนซ่อมแซมถนนดังกล่าว จึงทำให้การทดสอบทำได้ในช่วงระยะเวลา 6 เดือน

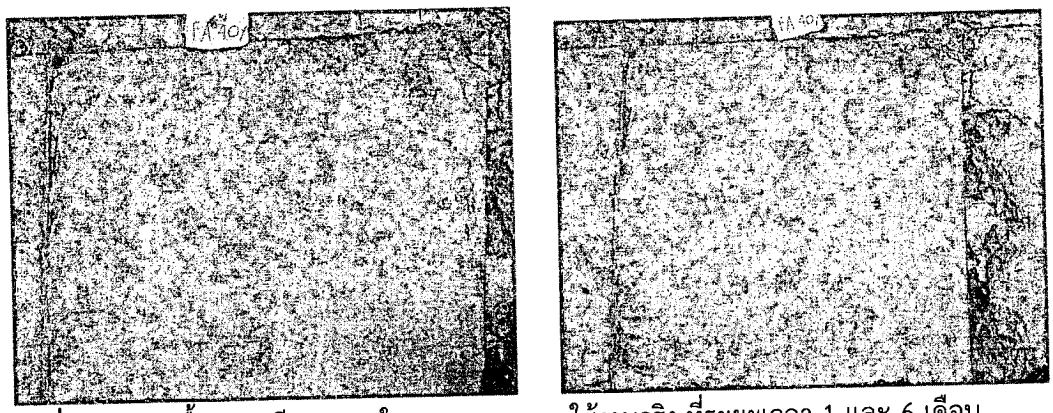
รูปที่ 24-33 แสดงสภาพของผิวคอนกรีตชนิดต่างๆ พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วผิวตัวอย่างคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงสภาพเพียงเล็กน้อยสำหรับคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานที่ปริมาณต่ำ สำหรับตัวอย่างคอนกรีตควบคุมนั้น สภาพผิวยังเหมือนเดิมที่เวลาผ่านไป 180 วัน เช่นเดียวกันกับ FA20 และ FA40 การสึกกร่อนเริ่มสังเกตได้เมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานร้อยละ 60 โดยผิวของตัวอย่างเริ่มมีร่องรอยของการหลุดร่อนและไม่เรียบ



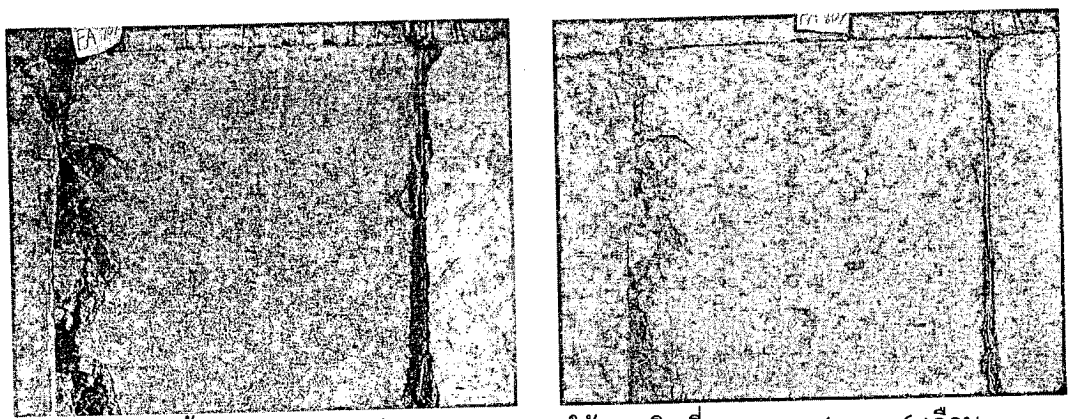
รูปที่ 24 สภาพพื้นคอนกรีตควบคุม (CON) ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน



รูปที่ 25 สภาพพื้นคอนกรีต FA20 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน

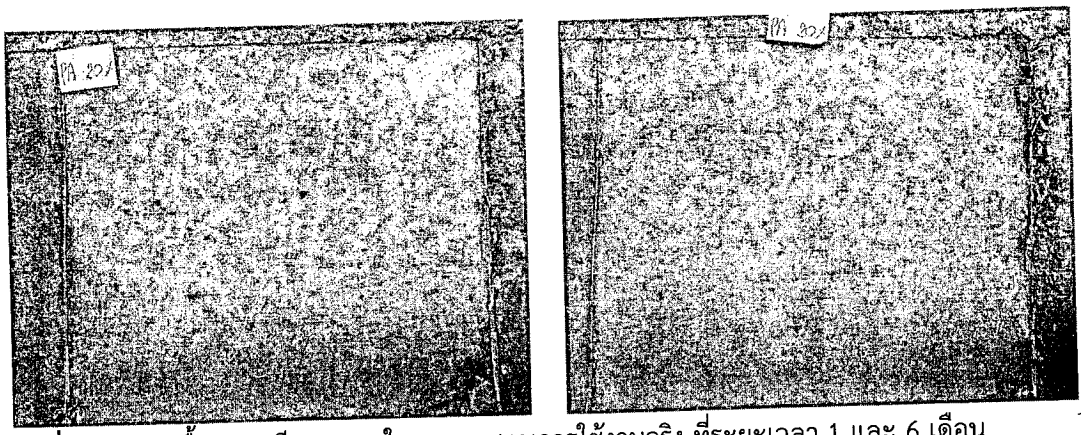


รูปที่ 26 สภาพพื้นคอนกรีต FA40 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน

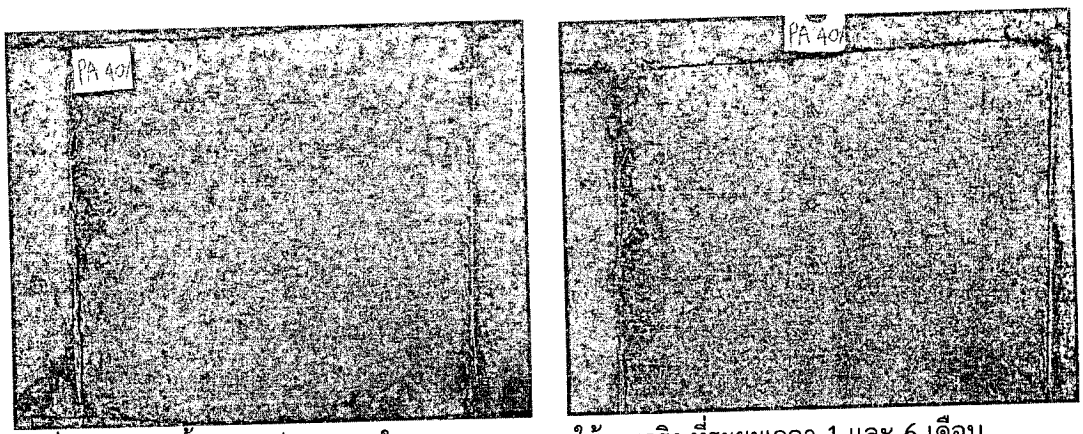


รูปที่ 27 สภาพพื้นคอนกรีต FA60 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน

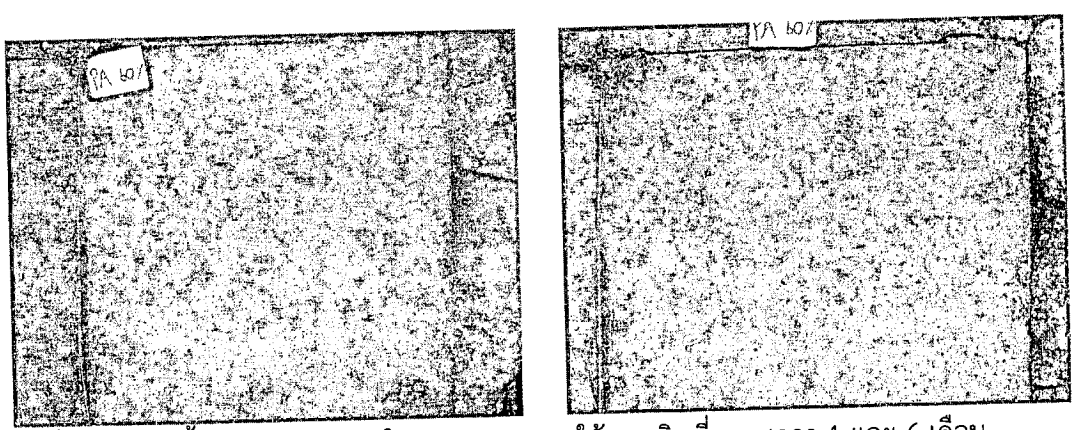
สำหรับตัวอย่างที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์นั้นพบว่า ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 20 ไม่สังเกตเห็นการสึกกร่อนของผิวตัวอย่าง สภาพตัวอย่างทั้งก่อนและเมื่ออายุทดสอบผ่านไปประมาณ 6 เดือนยังเหมือนเดิม ไม่มีการหลุดร่อนที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อลองใช้แปรงลวดขัดที่ผิวตัวอย่างก็มีการหลุดร่อนของผิวออกมาเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มระดับการแทนที่เป็นร้อยละ 40 ก็พบว่ามีการสึกกร่อนที่ผิวของตัวอย่างเล็กน้อย ผิวตัวอย่างเริ่มมีความขรุขระ และปริมาณการหลุดร่อนเมื่อใช้แปรงลวดขัดมีมากขึ้น แต่ระดับความลึกเพียงเล็กน้อย การหลุดร่อนเนื่องจากการขัดสีก็ลดลงปริมาณการสึกกร่อนเริ่มสังเกตได้ชัดเจนมากขึ้นสำหรับตัวอย่าง PA60 และเริ่มมีการหลุดร่อนที่ขอบของผิวตัวอย่างและเมื่อมือสัมผัสที่ผิว ก็จะมีส่วนของคอนกรีตหลุดร่อนออกมาได้บางส่วน และเมื่อใช้แปรงลวดขัดสีก็มีการหลุดร่อนมากขึ้นกว่าการแทนที่ที่ระดับร้อยละ 40



รูปที่ 28 สภาพพื้นคอนกรีต PA20 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน

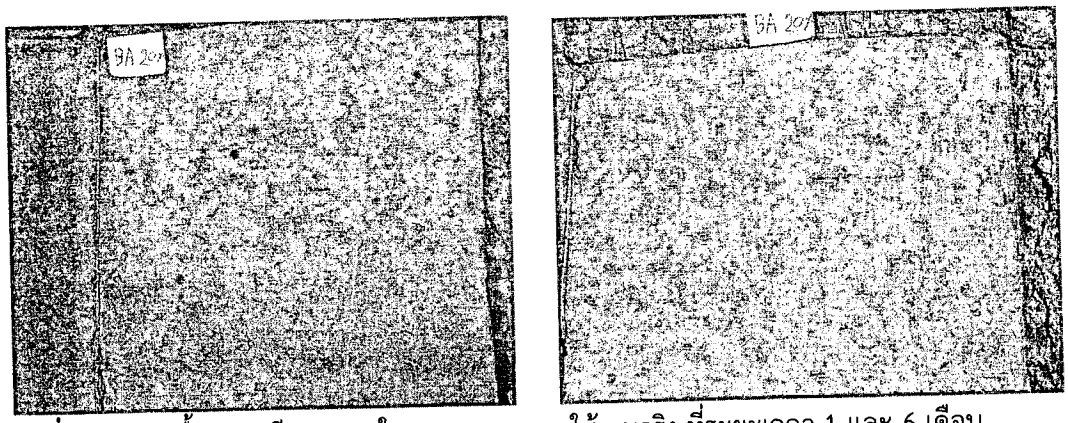


รูปที่ 29 สภาพพื้นคอนกรีต PA40 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน

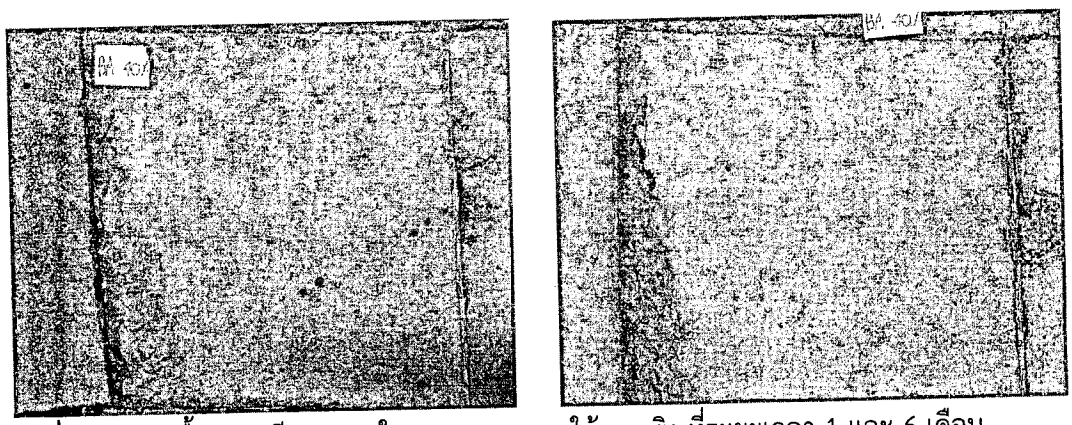


รูปที่ 30 สภาพพื้นคอนกรีต PA60 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน

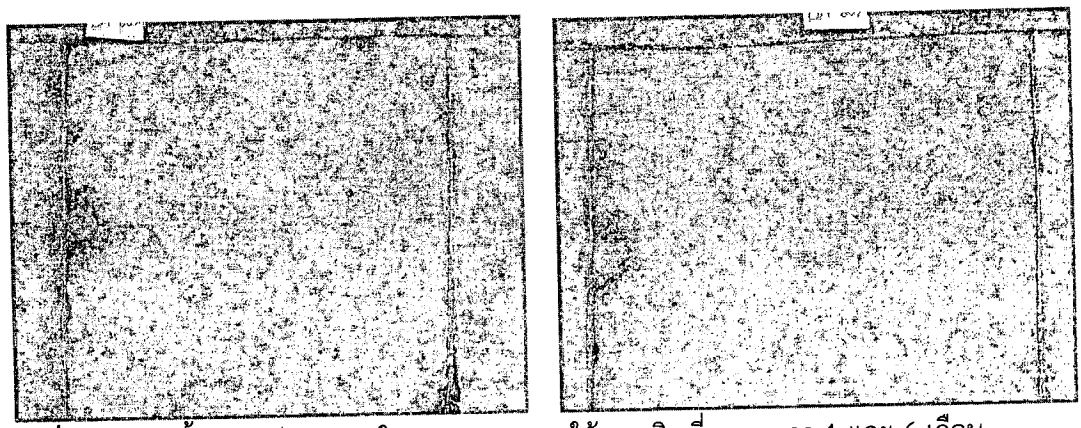
ลักษณะและปริมาณการสึกกร่อนของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับเถ้าปาล์มน้ำมัน กล่าวคือ สำหรับ BA20 มีร่องรอยการสึกกร่อนน้อยมาก แต่เมื่อพิจารณาตัวอย่างของ BA40 และ BA60 แล้วพบว่า การสึกกร่อนเริ่มปรากฏบนผิวของพื้นคอนกรีตตัวอย่าง และที่ขอบเริ่มมีการหลุดร่อนเล็กน้อยที่ BA60 และผิวก็ขรุขระมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อย เมื่อเปรียบเทียบในระดับเดียวกันของการแทนที่ปูนซีเมนต์



รูปที่ 31 สภาพพื้นคอนกรีต BA20 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน



รูปที่ 32 สภาพพื้นคอนกรีต BA40 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน



รูปที่ 33 สภาพพื้นคอนกรีต BA60 ในการทดสอบการใช้งานจริง ที่ระยะเวลา 1 และ 6 เดือน

อนึ่ง ในการทดสอบครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 40 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อย เริ่มมีความเสียหายที่บริเวณขอบของตัวอย่างคอนกรีต โดยมีลักษณะเป็นการแตกหักหรือรอยร้าวขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งลักษณะดังกล่าวคาดว่าไม่ได้เกิดจากผลของการขัดสีของยวดยานพาหนะ แต่น่าจะเป็นผลมาจากความแข็งแรงหรือความสามารถในการรับกำลังแรงอัดของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานดังกล่าวมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้เนื้อคอนกรีตเกิดการวิบัติจากการรับน้ำหนักและการสั่นสะเทือน ซึ่งผลของปรากฏการณ์นี้น่าจะเป็นข้อจำกัดในการใช้คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานปริมาณสูงมาเป็นส่วนของโครงสร้างพื้นผิวทางจราจร หรือถ้ามีความจำเป็นต้องใช้คอนกรีตผสมวัสดุ

ปอซโซลานในปริมาณสูง อาจจะต้องมีการป้องกันบริเวณขอบหรือรอยต่อของผิวคอนกรีต เพื่อป้องกันหรือลดความเสียหายจากการแตกร้าวให้น้อยลง

4. ค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต

ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (k) และอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านปอซโซลานคอนกรีตต่อค่าการซึมผ่านของคอนกรีตควบคุม (k/k_{con}) แสดงในตารางที่ 15 -18 โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างคอนกรีตที่อายุครบ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุมากค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุม ที่ค่า w/c = 0.40 มีค่าเท่ากับ 1.78×10^{-12} เมตรต่อวินาที ที่อายุ 28 วัน และลดลงเท่ากับ 1.63×10^{-12} เมตรต่อวินาที ที่อายุ 90 วัน สำหรับคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีอัตราการลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุมากขึ้นค่อนข้างมากกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้โพรงหรือช่องว่างลดลง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ที่เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจึงเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุพอสมควร และผลอีกส่วนหนึ่งมาจากอนุภาคของวัสดุปอซโซลานที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา แต่ก็ไปอุดหรือไปเติมเต็มในโพรงหรือช่องว่างขนาดเล็ก เรียกว่าผลจากการอัดตัว (Packing or filler effect) โดยผลของสองประการนี้ ทำให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุมากจะมีอัตราการลดลงที่ต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุม

เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำหรือเพิ่มค่า w/c ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านสูงขึ้น โดยที่ค่าการซึมผ่านที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 1.63×10^{-12}, 1.88×10^{-12}, 2.16×10^{-12} และ 2.57×10^{-12} เมตรต่อวินาที ของคอนกรีตควบคุมที่ w/c เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.48 และ 0.50 ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน ก็มีแนวโน้มเหมือนกับคอนกรีตควบคุม กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตก็จะสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยที่เมื่อปริมาณน้ำที่มากกว่าส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีโพรงหรือความพรุนมากขึ้น และเมื่อโพรงเหล่านี้เชื่อมติดกัน ของเหลวหรือน้ำสามารถเคลื่อนที่หรือไหลผ่านได้ง่าย

ค่าการซึมของน้ำผ่านคอกนกรีตที่ต่ำที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ประเมินได้จากคอนกรีต FA40 ที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 0.31×10^{-12} เมตรต่อวินาที หรือประมาณ 0.19 เท่าของคอนกรีตควบคุม เมื่อพิจารณาค่า k_{28}/k_{con} หรือ k_{90}/k_{con} ก็จะประเมินได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานนั้น มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าของคอนกรีตควบคุม กล่าวคือ ถ้าค่า k_{28}/k_{con} หรือ k_{90}/k_{con} น้อยกว่า 1.0 แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตนั้นต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุม และหมายถึงคอนกรีตชนิดนั้นมีความทึบน้ำมากกว่า แต่ถ้าค่าดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.0 แล้ว นั่นแสดงว่า คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานดังกล่าวมีค่าการซึมที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมและมีความพรุนหรือปริมาณโพรงในเนื้อคอนกรีตมากกว่า จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีต BA60 ที่อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ w/c เท่ากับ 0.50 ที่อายุ 28 วัน มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงที่สุดเท่ากับ 5.75×10^{-12} เมตรต่อวินาที หรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ 2.17 เท่า

ตารางที่ 15 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (w/c = 0.40)

Mixtures	Permeability ,k x 10^{-12} (m/s)			
	28 days	k_{28}/k_{con}	90 days	k_{90}/k_{con}
CT1	1.78	1.00	1.63	1.00
FA20	0.63	0.35	0.58	0.36
FA40	0.38	0.21	0.31	0.19
FA60	1.37	0.77	1.20	0.07
PA20	0.39	0.22	0.25	0.15
PA40	0.58	0.33	0.35	0.21
PA60	2.35	1.32	2.11	1.29
BA20	1.99	1.12	1.9	1.17
BA40	2.67	1.50	2.65	1.63
BA60	3.21	1.80	3.14	1.93

ตารางที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (w/c = 0.45)

Mixtures	Permeability ,k x 10^{-12} (m/s)			
	28 days	k_{28}/k_{con}	90 days	k_{90}/k_{con}
CT1	1.92	1.00	1.88	1.00
FA20	0.77	0.40	0.63	0.34
FA40	0.42	0.22	0.4	0.21
FA60	1.55	0.81	1.36	0.72
PA20	0.51	0.27	0.42	0.22
PA40	0.68	0.35	0.56	0.30
PA60	2.85	1.48	2.53	1.35
BA20	2.25	1.17	2.24	1.19
BA40	3.24	1.69	3.33	1.77
BA60	3.97	2.07	4.01	2.13

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (w/c = 0.48)

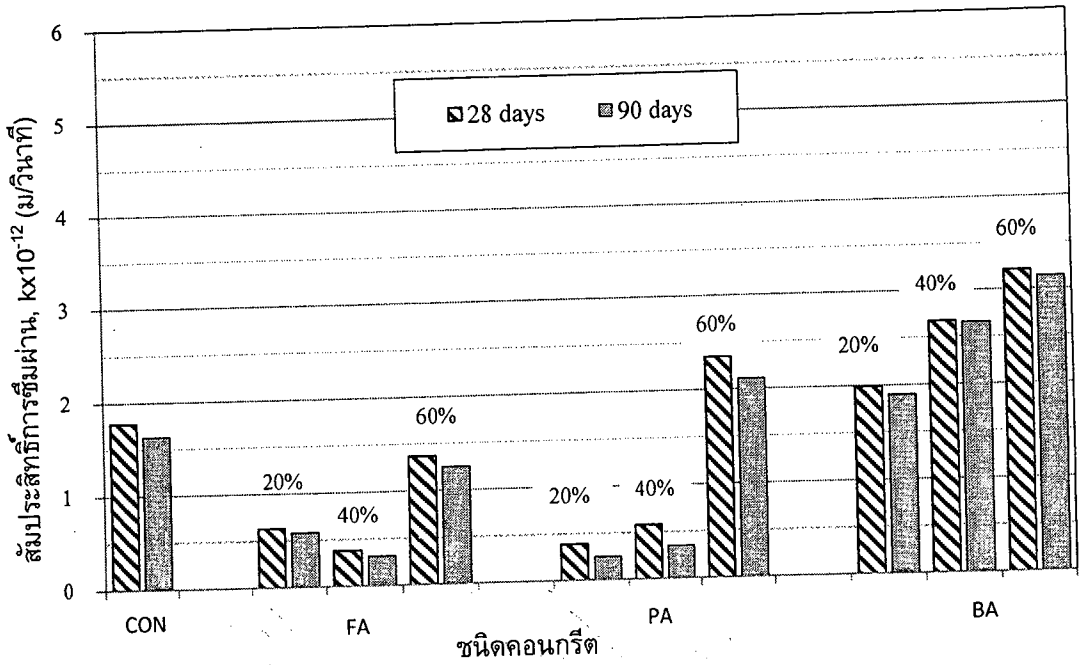
Mixtures	Permeability ,k x 10^{-12} (m/s)			
	28 days	k_{28}/k_{con}	90 days	k_{90}/k_{con}
CT1	2.35	1.00	2.16	1.00
FA20	0.82	0.35	0.72	0.33
FA40	0.78	0.33	0.64	0.30
FA60	1.84	0.78	2.22	1.03
PA20	0.54	0.23	0.45	0.21
PA40	0.85	0.36	0.88	0.41
PA60	3.25	1.38	3.01	1.39
BA20	2.89	1.23	2.78	1.29
BA40	3.93	1.67	3.82	1.77
BA60	4.98	2.12	4.56	2.11

ตารางที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (w/c = 0.50)

Mixtures	Permeability ,k x 10^{-12} (m/s)			
	28 days	k_{28}/k_{con}	90 days	k_{90}/k_{con}
CT1	2.64	1.00	2.57	1.00
FA20	1.28	0.48	0.98	0.38
FA40	1.35	0.51	0.93	0.36
FA60	2.50	0.95	2.22	0.86
PA20	1.85	0.70	1.74	0.68
PA40	2.42	0.92	2.30	0.89
PA60	3.53	1.34	3.23	1.26
BA20	3.23	1.22	3.08	1.20
BA40	4.23	1.60	4.02	1.56
BA60	5.75	2.18	4.87	1.89

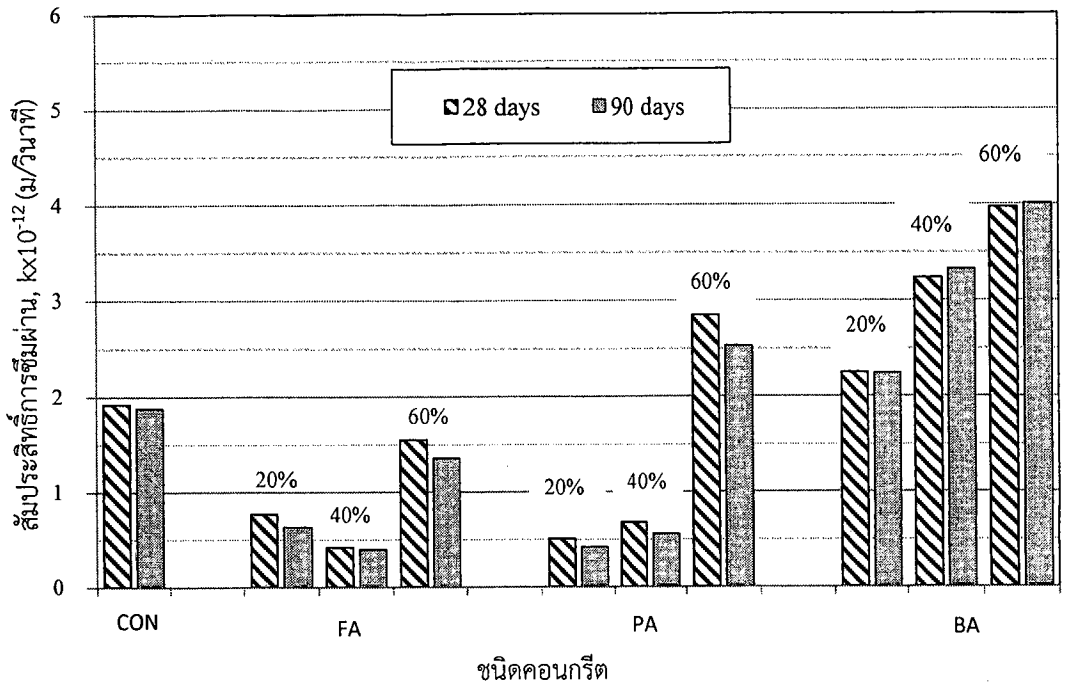
เมื่อพิจารณารูปที่ 34 แสดงค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ค่า w/c = 0.40 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินทุกร้อยละของการแทนที่ และที่การแทนที่ร้อยละ 60 ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูง แต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 40 ซึ่งค่าก็ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่

ผสมเถ้าถ่านหิน และค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 60 ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมด้วย ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยนั้นพบว่า ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 นั้น ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มร้อยละของการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยที่ BA60 มีค่าการซึมผ่านน้ำสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ 1.93 เท่า ที่อายุ 90 วัน

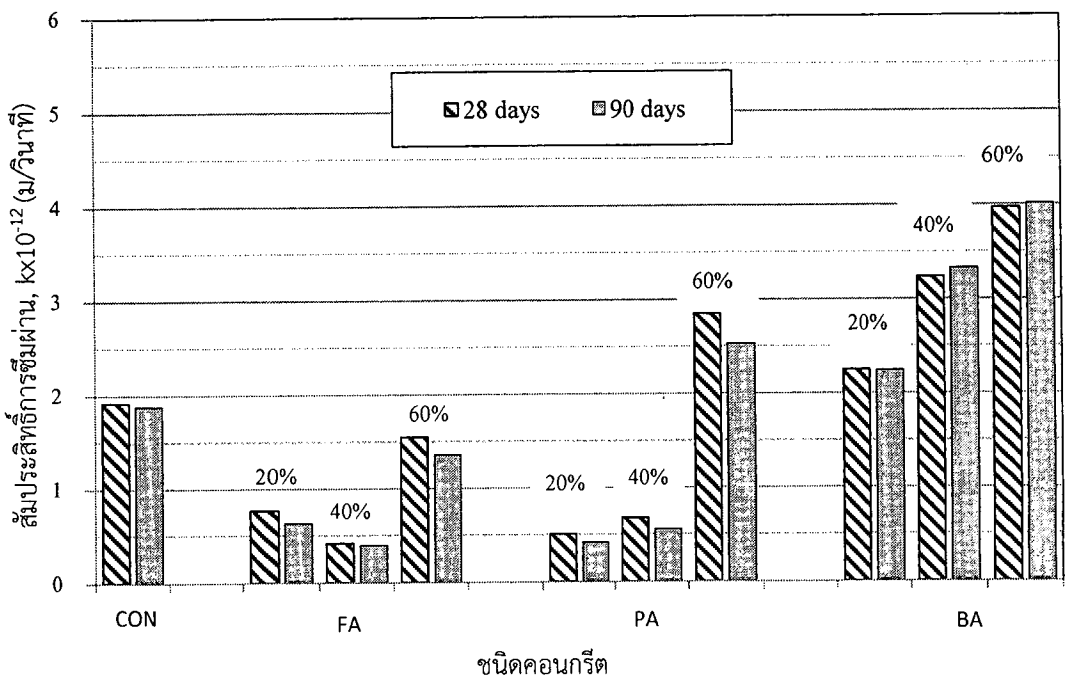


รูปที่ 34 สัมประสิทธิ์ค่าการซึมของคอนกรีตควบคุมและที่ผสมวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่ค่า w/c = 0.40

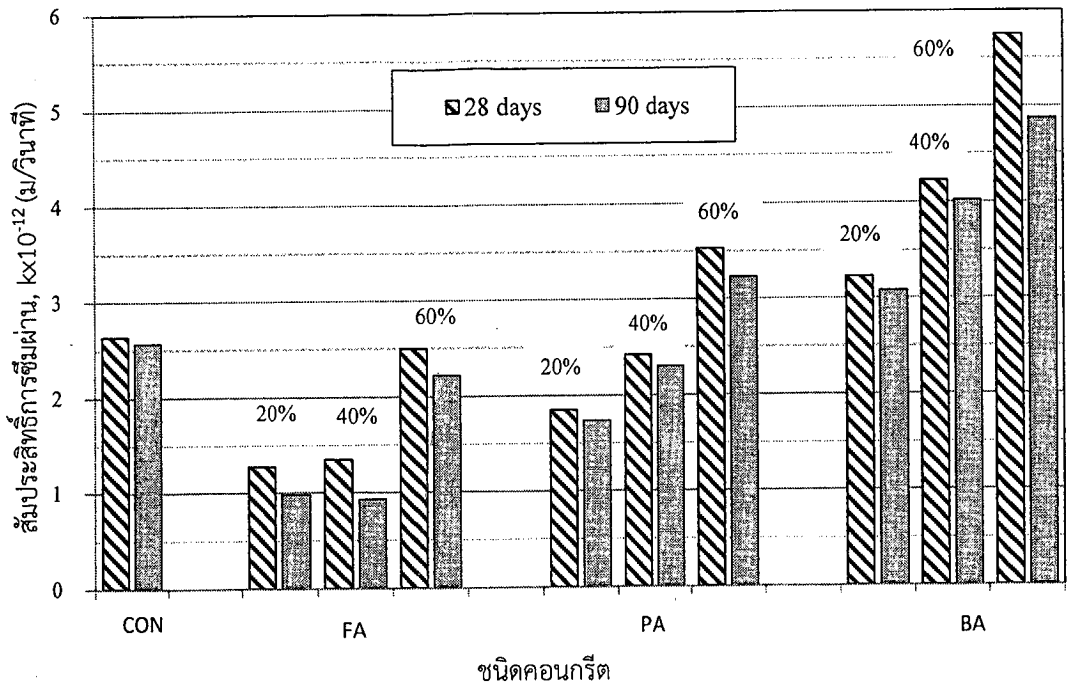
เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเป็น w/c = 0.45, 0.48 และ 0.50 แนวโน้มของค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตคล้ายกันกับของคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานที่ใช้ปริมาณน้ำ w/c = 0.40 กล่าวคือ ทุกการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินก็ยังคงให้ค่าการซึมของน้ำต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุมเสมอ แต่การเพิ่มปริมาณน้ำก็ทำให้ผลต่างของค่าการซึมผ่านระหว่างคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานกับคอนกรีตควบคุมน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่า w/c = 0.50 พบว่า FA60 มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ไม่ต่างจากคอนกรีตควบคุม



รูปที่ 35 สัมประสิทธิ์ค่าการซึมของคอนกรีตควบคุมและที่ผสมวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่ค่า w/c = 0.45



รูปที่ 36 สัมประสิทธิ์ค่าการซึมของคอนกรีตควบคุมและที่ผสมวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่ค่า w/c = 0.48



รูปที่ 37 สัมประสิทธิ์ค่าการซึมของคอนกรีตควบคุมและที่ผสมวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ ที่ค่า w/c = 0.50

5. การทดลองสร้างแบบจำลองของ ทำนายค่าต้านทานการสึกกร่อนด้วยวิธี Regressions

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาการสังเคราะห์แบบจำลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธี Regressions ได้รับความนิยมอย่างมากในอดีต และได้ประยุกต์สมการโพลิโนเมียลกำลังสองชนิดหลายตัวแปรเพื่อใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าการสึกร่อน ซึ่งรูปแบบของสมการที่ใช้แสดงดังสมการ 4.1

$$AB = a_0 + a_1(W/C) + a_2(RP) + a_3(CS) + a_{11}(W/C)^2 + a_{22}(RP)^2 + a_{33}(CS)^2 + a_{12}(W/C)*(RP) + a_{13}(W/C)*(CS) + a_{23}(RP)*(CS) \quad (4.1)$$

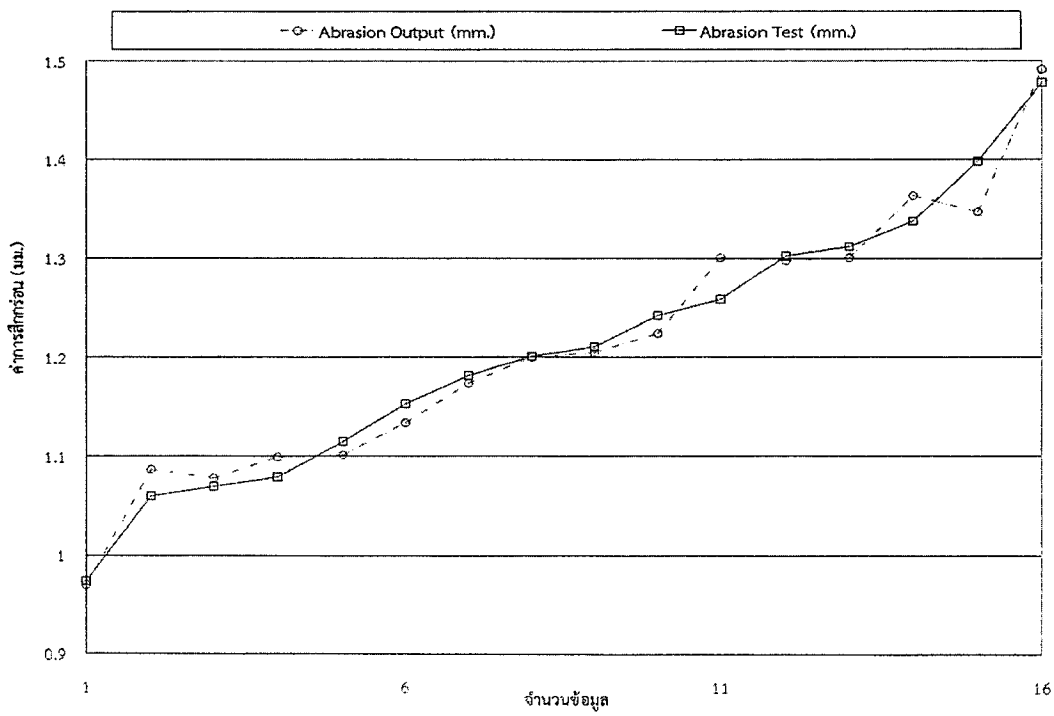
จากนั้นนำข้อมูลอัตราส่วนผสมและผลการทดสอบค่าการต้านทานการสึกกร่อนจำนวน 16 ตัวอย่างโดยแยกตามชนิดของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งแสดงในภาคผนวก ค ป้อนเข้าสู่โปรแกรม SPSS 17 เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ โดยใช้วิธี Multiple Nonlinear Regressions ซึ่งผลการวิเคราะห์จะทำให้ได้แบบจำลองโพลิโนเมียลกำลังสองแบบหลายตัวแปรแสดงดังสมการที่ (4.2)

5.1 เถ้าถ่านหิน

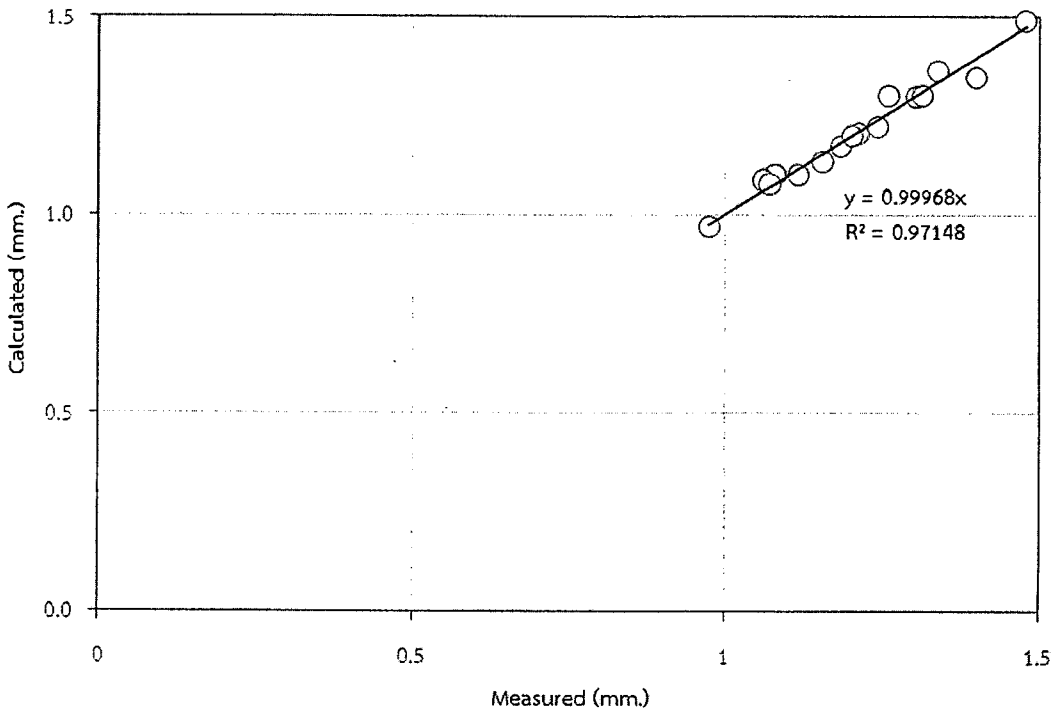
$$AB = -1.502985 + 15.468067(W/C) + 0.0495277(RP) - 0.0030090(CS) - 20.3664554(W/C)^2 - 0.0002247(RP)^2 - 0.0000002(CS)^2 - 0.0360133(W/C)*(RP) + 0.007297(W/C)*(CS) - 0.0000487(RP)*(CS) \quad (4.2)$$

ได้รูปแบบสมการของแบบจำลองโดยใช้วิธีการ Regressions ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนของแบบจำลองทำได้โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งแสดง

ในภาคผนวก ค ลงในสมการเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง รูปที่ 38 แสดงผลการทดสอบค่าการต้านทานการสึกกร่อนจากสมการทางคณิตศาสตร์และค่าจากการทดลองโดยเรียงตามระดับการสึกกร่อน พบว่าค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของเถ้าถ่านหินมีค่าการสึกกร่อนบางช่วงที่ยังมากและน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง แต่ก็ยังให้ผลการทำนายการต้านทานสึกกร่อนอยู่ในระดับที่ดี และรูปที่ 39 พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงโดยกำหนดให้เริ่มจากจุดตัดเริ่มต้นที่ (0,0) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9714 และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD, RMSD และ R^2 ซึ่งแสดงในตารางที่ 19 พบว่า ผลการทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนของข้อมูลที่มีค่า MBD เท่ากับร้อยละ 1.4115 มีค่า RMSD เท่ากับร้อยละ 1.8022 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9860 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ทั่วไปพบว่าเป็นค่าอยู่เกณฑ์ระดับที่ดี คือ มีค่า MBD น้อยกว่าร้อยละ 10 และมีค่า R^2 สูงกว่า 0.95 และเมื่อพิจารณาจากค่าสถิติต่าง ๆ แล้วพบว่า แบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions โดยใช้ฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสองแบบหลายตัวแปรเป็นสมการในการคำนวณ ซึ่งใช้วิธี Multiple Nonlinear Regressions ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนของปอซโซลาน
คอนกรีตได้ดี



รูปที่ 38 ประสิทธิภาพการทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนของเถ้าถ่านหินโดยแบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 39 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลองของข้อมูล

ตารางที่ 19 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD, RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions

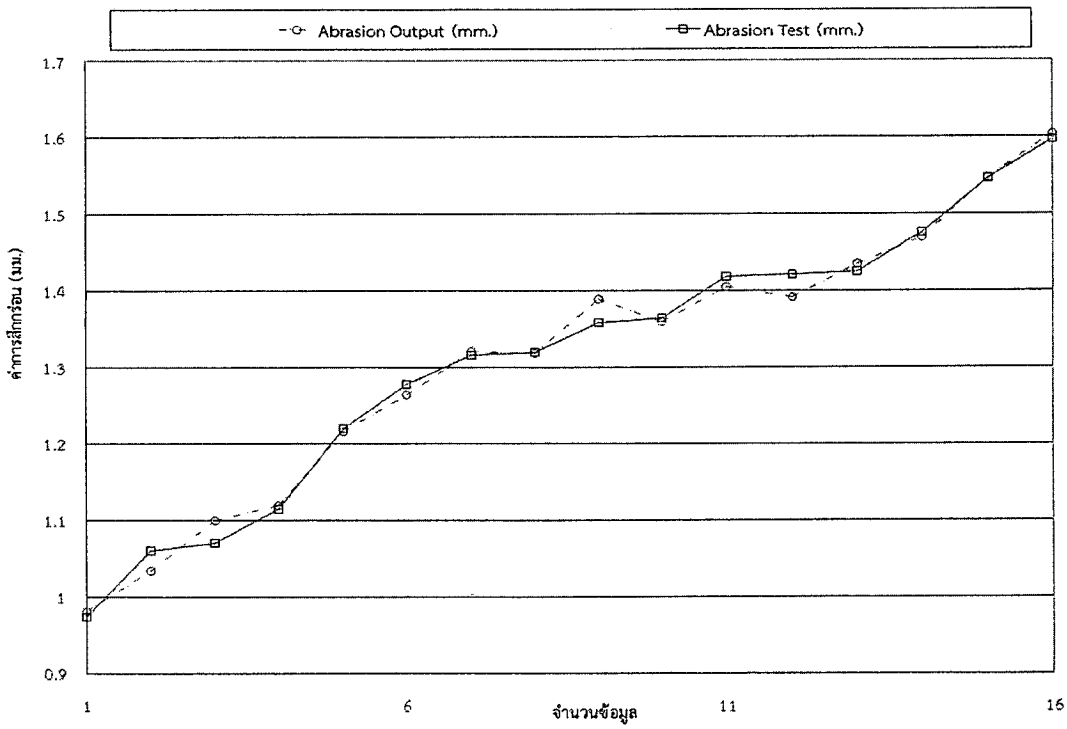
Statistic Analysis	Data used in Testing the Models
	Testing Data
MBD (%)	1.4115
RMSD (%)	1.8022
R^2	0.9860

5.2 เถ้าชานอ้อย

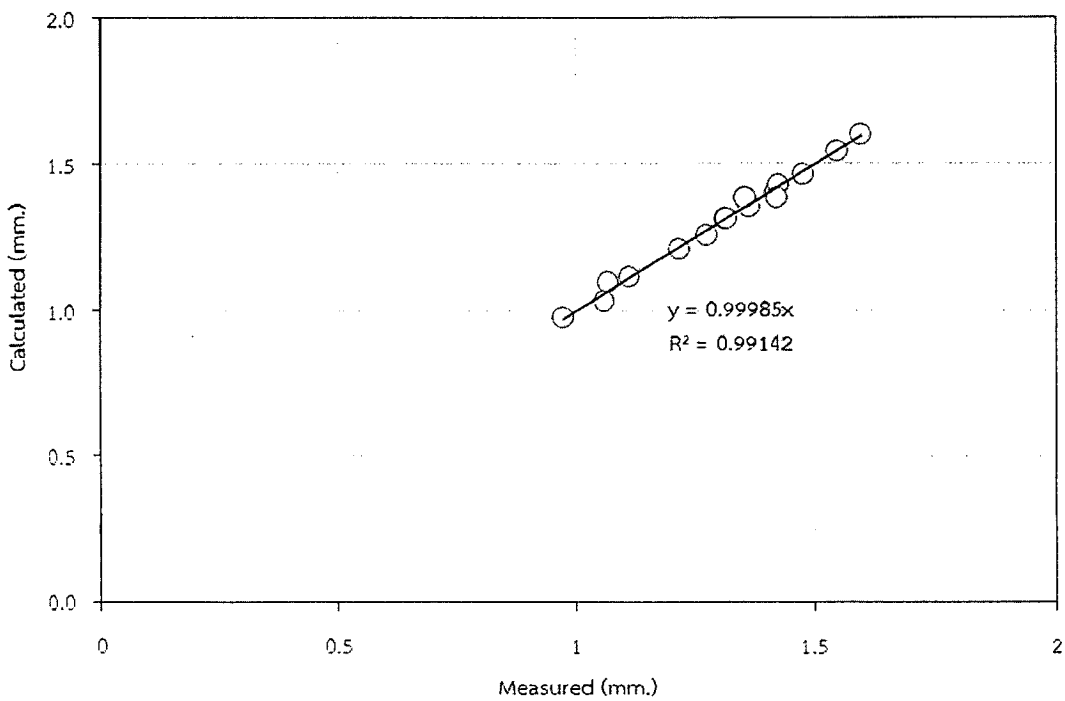
$$AB = -2.0598794 + 2.4511189(W/C) + 0.0492835(RP) + 0.01025082(CS) + 4.9313880(W/C)^2 - 0.0001842(RP)^2 - 0.0000006(CS)^2 - 0.0342751(W/C)*(RP) - 0.0126206(W/C)*(CS) - 0.0000495(RP)*(CS) \quad (4.3)$$

สมการสำหรับการวิเคราะห์การต้านทานการสึกกร่อนของเถ้าชานอ้อย รูปที่ 40 พบว่า ผลการทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก เนื่องจากค่าคงที่ที่ได้จากสมการโพลิโนเมียลกำลังสองหลายตัวแปรมีรูปสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับผลการทดลอง ซึ่งจากภาพประกอบแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากสมการมีเส้นแนวโน้มไปแนวเดียวกันและใกล้เคียงกันมากโดยเรียงตามระดับการสึกกร่อน และรูปที่ 41 พบว่า เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงโดยกำหนดให้เริ่มจากจุดตัดเริ่มต้นที่ (0,0) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9914 และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ

MBD, RMSD และ R^2 ซึ่งแสดงในตารางที่ 20 พบว่า ผลการทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนของข้อมูลมีค่า MBD เท่ากับร้อยละ 0.9320 มีค่า RMSD เท่ากับร้อยละ 1.2297 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9957



รูปที่ 40 ประสิทธิภาพการทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนของเถ้าชานอ้อยโดยแบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 41 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลองของข้อมูล

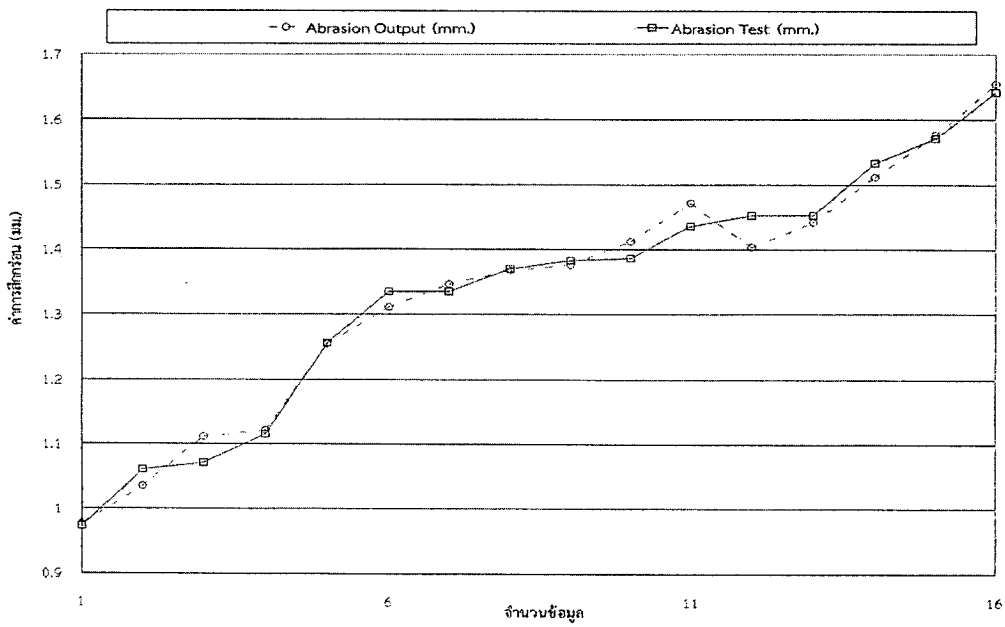
ตารางที่ 20 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD, RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions

Statistic Analysis	Data used in Testing the Models
	Testing Data
MBD (%)	0.9320
RMSD (%)	1.2297
R^2	0.9957

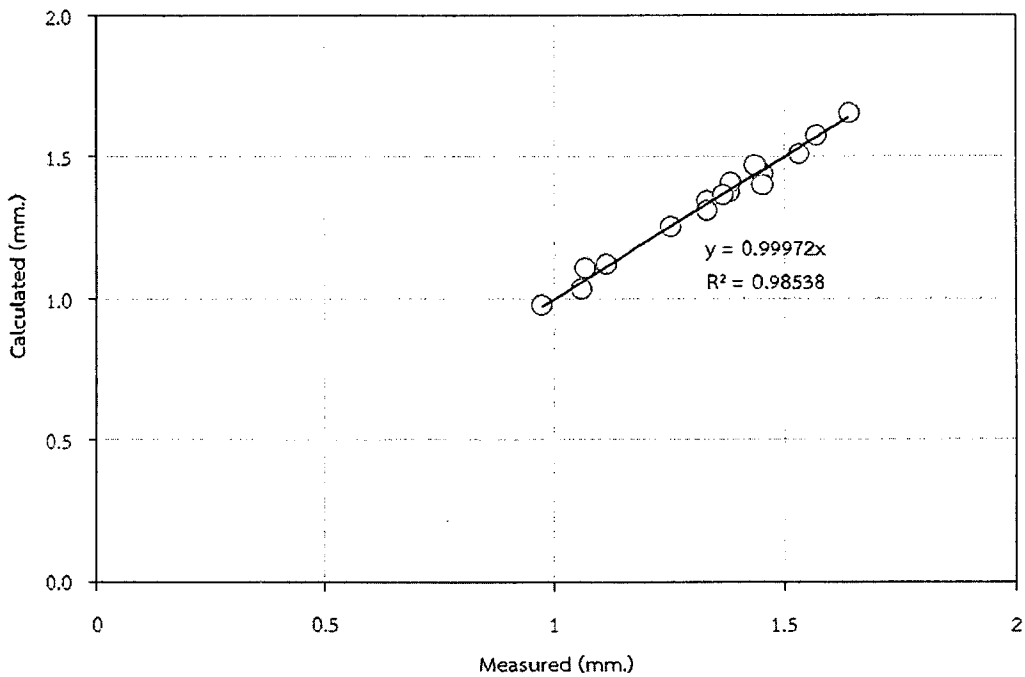
5.3 เถ้าปาล์มน้ำมัน

$$AB = 0.3276975 - 0.8281741(W/C) + 0.0482240(RP) - 0.0002088(CS) + 5.7573052(W/C)^2 - 0.0001937(RP)^2 + 0.0000004(CS)^2 - 0.0358826(W/C)*(RP) - 0.0040452(W/C)*(CS) - 0.0000408(RP)*(CS) \quad (4.4)$$

ได้สมการสำหรับการวิเคราะห์การต้านทานการสึกกร่อนของเถ้าปาล์มน้ำมัน รูปที่ 42 พบว่าค่าจากสมการทางคณิตศาสตร์ มีบางช่วงที่มากกว่าและน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงจะมีความคล้ายคลึงกับสมการของเถ้าถ่านหิน และรูปที่ 43 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงโดยกำหนดให้เริ่มจากจุดตัดเริ่มต้นที่ (0,0) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9853 และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD, RMSD และ R^2 ซึ่งแสดงในตารางที่ 21 พบว่า MBD เท่ากับร้อยละ 1.3151 มีค่า RMSD เท่ากับร้อยละ 1.6881 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9927



รูปที่ 42 ประสิทธิภาพการทำนายค่าการต้านทานการสึกกร่อนของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยแบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 43 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลองของข้อมูล

ตารางที่ 21 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD, RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions

Statistic Analysis	Data used in Testing the Models
	Testing Data
MBD (%)	1.3151
RMSD (%)	1.6881
R^2	0.9927

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานสามชนิดในปริมาณสูง ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลานวห้สามารถจัดกลุ่มได้ดังนี้ คือเถ้าถ่านหินอยู่ใน class F ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อยจัดอยู่ใน class N ของวัสดุปอซโซลาน ตามลำดับ เถ้าเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อยมีค่า LOI ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงถึงการเผาไหม้ที่ยังไม่สมบูรณ์ของเถ้าทั้งสองชนิด และอาจมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

2. เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่งผลต่อการทำงานได้ของคอนกรีตสด โดยที่เถ้าถ่านหินจะทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความข้นเหลวมากขึ้น ลดปริมาณของสารลดน้ำที่ใช้ แต่เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อยลดความสามารถในการทำงานได้ และต้องใช้สารลดน้ำมากขึ้นเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวอยู่ในช่วงที่กำหนด

3. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 สูงกว่าคอนกรีตควบคุม และที่ร้อยละ 40 มีกำลังใหล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม แต่สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อยนั้นให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าเถ้าถ่านหิน โดยเถ้าทั้งสองสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ประมาณเร้อยละ 20 กำลังรับแรงอัดถึงจะเทียบเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ดังนั้นเถ้าถ่านหินน่าจะเป็นวัสดุปอซโซลานเพียงชนิดเดียวในการวิจัยครั้งนี้ ที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงได้

4. ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตและอายุของคอนกรีตมีผลต่อความต้านทานการสึกกร่อน โดยที่คอนกรีตที่มีค่า w/c ต่ำ จะมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนสูง ซึ่งคอนกรีตที่ทำการทดสอบในครั้งนี้มีค่า w/c อยู่ในช่วง 0.40-0.50 ซึ่งในบางส่วนผสมที่มีค่า w/c ต่ำ อาจจะต้องใช้สารลดน้ำ ซึ่งการใช้สารลดน้ำไม่น่าจะมีผลต่อความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีต

5. ความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุมในอายุต้น (28 วัน) และพัฒนาดีขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานการสึกกร่อนจากที่ดีที่สุด ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย ตามลำดับ ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานมีผลต่อความต้านทานการสึกกร่อน โดยมีแนวโน้มว่าการสึกกร่อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุปอซโซลาน

6. การทดสอบค่าความต้านทานการสึกกร่อนจริงบนผิวจราจรระยะเวลา 6 เดือน ได้ผลที่ไม่ชัดเจน เนื่องจากยานพาหนะหลีกเลี่ยงบริเวณที่เทคอนกรีตชนิดต่างๆ แต่ก็สามารถสังเกตได้ว่า เริ่มมีร่องรอยของการสึกกร่อนสำหรับคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณสูง และยังพบร่องรอยของการแตกร้าวหรือรอยแยกขนาดเล็ก ที่บริเวณขอบของตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งน่าจะเกิดจากคอนกรีตตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดที่ค่อนข้างต่ำ นั่นแสดงว่านอกจากความต้านทานต่อการสึกกร่อนแล้ว ความแข็งแรงหรือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตน่าจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการเลือกใช้คอนกรีตสำหรับโครงสร้างถนนหรือผิวพื้นทาง

7. ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุมากขึ้น สำหรับคอนกรีตควบคุมนั้นมีอัตราการลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเป็นผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพียงอย่างเดียว ส่วนคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานมีอัตราการลดลงค่อนข้างมาก เป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการอัดแน่นของอนุภาค

8. การใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตทำให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลง แต่มีค่าต่ำสุดเมื่อใช้แทนที่ประมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นจะช่วยลดค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเมื่อใช้แทนที่ในช่วงร้อยละ 0-40 แต่ถ้าเพิ่มปริมาณการแทนที่มากกว่าร้อยละ 40 ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตก็จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงกว่าค่าของคอนกรีตควบคุม สำหรับเถ้าชานอ้อยนั้นเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมทำให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าของคอนกรีตควบคุมทุกส่วนอัตราส่วนการแทนที่ และค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยที่ร้อยละ 60 มีค่าสูงสุดที่อายุ 28 วัน ดังนั้นการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลาน อาจจะต้องคำนึงถึงปัจจัยค่าการซึมผ่าน เพราะมันหมายถึงคอนกรีตมีความพรุนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยอาจจะต้องเพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering) ให้มากกว่าปกติ เพื่อป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเมื่อระยะเวลาผ่านไป

9. การลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงด้วย เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณน้ำส่วนเกินหรือน้ำที่ใช้หล่อลื่นส่วนผสมน้อย ส่งผลให้เกิดโพรงและช่องว่าง ทั้งขนาดปริมาณน้อย ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการใช้คอนกรีตในงานที่เกี่ยวข้องกับความทึบน้ำ เป็นโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำหรือของเหลว เช่น ฐานรากในระดับที่น้ำใต้ดินสูง ท่าเรือ โครงสร้างริมทะเล ก็ควรใช้คอนกรีตที่มีค่า w/c ต่ำ ซึ่งถ้าคอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ต่ำก็สามารถใช้สารลดน้ำเพื่อให้ทำงานได้ง่าย

10. การทำสมการประเมินการสึกกร่อนของคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานด้วยวิธีการ สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regressions) ในเบื้องต้น ให้ค่าที่ค่อนข้างแม่นยำ แต่ทั้งนี้ข้อมูลตัวอย่างยังมีจำนวนน้อย อาจต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม

11.วัสดุปอซโซลานทั้งสามชนิดสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตได้ ซึ่งการใช้แทนที่ในปริมาณสูงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติอื่นๆประกอบ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต หรือมีวิธีการป้องกันความเสียหายของคอนกรีตเมื่อมีการใช้งาน

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการศึกษาลักษณะการเผา อุณหภูของการเผาวัสดุที่เป็นชีวมวล ซึ่งจะทำให้ทราบว่าลักษณะการเผาและอุณหภูมิเท่าใดที่ทำให้ได้เถ้าชีวมวลที่มีความเหมาะสมและสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ดี และศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมี โดยเฉพาะค่า LOI ว่ามีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างไร

2. ควรมีการศึกษาใช้คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานปริมาณสูงในส่วนของโครงสร้างชนิดอื่นซึ่งอาจเป็นคอนกรีตที่มีกำลังไม่สูงมาก เช่น โครงสร้างของอาคานขนาดเล็ก หรือชิ้นส่วนของวัสดุในการก่อสร้างที่ไม่ได้รับกำลังมากนัก เช่น วัสดุก่อผนัง แผ่นคอนกรีตทางเดินเท้า แผ่นคอนกรีตป้องกันเสียง ฯลฯ โดยอาจศึกษา

3. ผลการการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตทีผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่มีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุม ควรที่จะนำมาศึกษาพัฒนาต่อไปให้เป็นคอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูง โดยมุ่งเน้นให้เป็นคอนกรีตที่ใช้งานเฉพาะกิจ โดยอาจต้องพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์หรือต้นทุนการผลิตด้วย

4. ควรศึกษาเพิ่มเติมในคุณสมบัติอื่นๆ เช่น การส่งผ่านความร้อน การสะท้อนและการซับเสียง ความคงทนต่อสภาพอากาศ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้พัฒนาเป็นวัสดุชนิดต่างๆ ได้