



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยย่อยที่ 2

“การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายของคอนกรีต”

โดย

นายตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ และคณะ

ตุลาคม 2559

สัญญาเลขที่ RDG5850020

โครงการวิจัยย่อยที่ 2

“การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายของคอนกรีต”

โดย

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1.รศ. ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

2. ผศ.ดร.ศิริกาญจนา ทองมี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ผศ.ดร.นงนุช สังข์อยู่ (ต้นติตนัย)

มหาวิทยาลัยมหิดล

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการ: การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายของคอนกรีต

เป้าหมาย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมการผลิตพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง ยางพารา เป็นต้น ซึ่งพบว่า ข้าวและน้ำตาลที่ผลิตจากอ้อย ได้มีการส่งออกเป็นอันดับต้นๆ ของโลก อ้อย ที่ส่งเข้าโรงงานแปรรูปเป็นในกระบวนการผลิตน้ำตาล อ้อย 1 ตัน จะเหลือกากหรือขานอ้อยออกมาประมาณ 300 กิโลกรัม ไทยผลิตอ้อยทั้งหมด 66.8 ล้านตัน เมื่อนำไปผลิตน้ำตาลจะเหลือเป็นขานอ้อย 20 ล้านตันต่อปี ถ้านำขานอ้อยเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าป้อนให้กับโรงงานผลิตน้ำตาลอีกทีหนึ่ง ซึ่งจะเหลือเถ้าขานอ้อยประมาณ 0.70 ล้านตัน บางส่วนเกษตรกรนำไปทำปุ๋ย และส่วนใหญ่ใช้ถมที่และกองอยู่ จากการศึกษาค้นคว้าประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย พบว่า มีธาตุซิลิกา เป็นหลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารปอซโซลาน ที่ละเอียดมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี ที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตสามารถนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ การผลิตคอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยและขานอ้อย ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถผลิตได้ภายในประเทศ ซึ่งภาคอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลมีวัตถุดิบในการผลิตอย่างมากมาย จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ จึงศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายของคอนกรีต เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ น้ำเกลือ และการต้านทานสารละลายซัลเฟตและการจำลองอายุการใช้งานของซีเมนต์ที่ถูกทดแทนขึ้นอันจะเป็นการสร้างโอกาสในการเพิ่มรายได้และนำไปสู่การพัฒนาอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลให้มีความมั่นคง และยังพบว่าอัตราส่วนของการใช้เถ้าขานอ้อย (เถ้าขาว) และถ่านชาร์ (เถ้าดำ) นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงและสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำเกลือ และการต้านทานสารละลายซัลเฟตได้จึงนำมาทดแทนปูนซีเมนต์และสามารถลดโลกร้อนตลอดจนสามารถลดของเสียที่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

วิธีการ

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เถ้าขานอ้อย (เถ้าขาว) และถ่านชาร์ (เถ้าดำ) มาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างรวมถึงศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของคอนกรีตที่เตรียมได้โดยศึกษาการต้านทานการดูดซับสารละลายน้ำเกลือ และสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลาบ่มแช่ต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตและการตกค้างของสารละลายน้ำเกลือและสารละลายซัลเฟตในเนื้อคอนกรีตที่ระยะบ่มแช่ต่างๆ

ผลที่ได้จากงานวิจัย

ผลจากงานวิจัยแสดงถึงข้อมูลที่ได้ในการผลิตคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย (เถ้าขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (เถ้าดำ) มีการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำในช่วงต้น เนื่องจากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าทั้ง 2 ชนิด ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นลดลง ประกอบกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นช้า ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงต้นนั้นต่ำ แต่เมื่อบ่มคอนกรีตในน้ำผ่านไป 28 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย (เถ้าขาว) ที่ 10% นั้นมีการพัฒนากำลังอัดจนใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ และมีแนวโน้มที่กำลัง

อัตราจะสูงกว่าคอนกรีตปกติในอนาคตและยังพบว่า คอนกรีตปกติมี การเจือปนของคลอไรด์ในคอนกรีต น้อยกว่าคอนกรีตผสมซีเมนต์ขี้เถ้าขี้เถ้าขาว)และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)โดยปริมาณคลอไรด์จะ พบมากที่สุดบริเวณผิวของคอนกรีต และจะลดน้อยลงเมื่อความลึกมากขึ้น โดยเมื่อผสมซีเมนต์ขี้เถ้าขี้เถ้าขาว) ลงไปในคอนกรีตที่ เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10% ปริมาณคลอไรด์ที่ผสมอยู่จะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต ปกติ หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสม ซีเมนต์ขี้เถ้าขี้เถ้าขาว)มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน คอนกรีตมีกำลังสูง ช่องว่างในคอนกรีตต่ำ เป็นเหตุให้คลอไรด์แทรกซึมได้น้อย และยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติเมื่อแช่ซัลเฟตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมซีเมนต์ ขี้เถ้าขี้เถ้าขาว)และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) อย่างชัดเจนในช่วงต้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีต ผสมซีเมนต์ขี้เถ้าขี้เถ้าขาว)และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)ที่ 10 % มีอัตราการพัฒนาสูงขึ้น จนมี กำลังใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ สามารถนำมาใช้เป็นคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง

การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายของคอนกรีต ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ และศิริกาญจนา ทองมี

¹ภาควิชา เทคโนโลยีวิศวกรรมกรรมการเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง โดยศึกษากำลังของคอนกรีตการต้านทานการและการตกค้างของสารละลายน้ำเกลือและสารละลายซัลเฟตในเนื้อ คอนกรีตที่ระยะบ่มแช่ ทำการทดสอบที่อายุ 7, 14, 28 วัน คอนกรีตที่ใช้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.60 แทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ด้วยซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) บดละเอียดในอัตราร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ที่ 10-30 % แต่เมื่อบ่มคอนกรีตในน้ำผ่านไป 28 วัน มีการพัฒนากำลังอัดจนใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ และมีแนวโน้มที่กำลังอัดอาจจะสูงกว่าคอนกรีตปกติในอนาคต โดยมีการทดสอบของโซเดียมคลอไรด์ในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตปกติมี การเจือปนของคลอไรด์ในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) โดยปริมาณคลอไรด์จะพบมากที่สุดบริเวณผิวของคอนกรีตเมื่อผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ลงไปในคอนกรีตที่ เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10% ปริมาณคลอไรด์ที่ผสมอยู่จะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เพราะคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน เป็นเหตุให้คลอไรด์แทรกซึมได้น้อย นอกจากนี้ ยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติเมื่อแช่ซัลเฟตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) อย่างชัดเจนในช่วงต้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ที่ 10 % มีอัตราการพัฒนาสูงขึ้น จนมีกำลังใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ สามารถนำมาใช้เป็นคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง

Abstract

This project is to study the effect of ground bagasse ash and charcoal as a supplementary cementitious material in concrete on compressive strength of concrete curing in sodium chloride solution and sulfate solution. The compressive strength was tested at the age of 7, 14 and 28 days. The water to binder ratio of 0.6 was used. The Portland cement was replaced with ground bagasse ash and charcoal at the dosage of 10, 20, 30, 40 and 50% by weight of binder. The results investigated that the compressive strength of 10 -30% at 28 days in the water showed a good compressive strength which is similar to the normal concrete. Moreover, compressive strength 10 -30% curing in sodium chloride solution determined that plain concrete has the impurity of chloride less than the ground bagasse ash and charcoal mixed with concrete. Most of the chloride will be on the surface of concrete. When the compressive strength of concrete containing ground bagasse ash 10% the quantity of chloride was nearly the same as plain concrete. This is because plain concrete and the compressive strength of concrete containing ground bagasse ash have similar compressive strength. Therefore, the infiltration of chloride was so little. The compressive strength of plain concrete curing in sulfate was higher compressive strength than that of compressive strength of concrete containing ground bagasse ash and charcoal in the initial state. When the time of curing in sulfate was longer the compressive strength of concrete containing ground bagasse ash and charcoal at 10% showed the highest the compressive strength. This means that the compressive strength of concrete containing ground bagasse ash and charcoal can be used as plain concrete.

สารบัญ

หน้าที่

บทสรุปผู้บริหาร	
บทคัดย่อ (ไทย-อังกฤษ)	
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)	3
2.2 ปอซโซลาน (Pozzolan)	5
2.3 คุณสมบัติของเถ้าขานอ้อย	6
2.4 กระบวนการกีดร้อนของซัลเฟต	7
2.5 น้ำ เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตคอนกรีตอย่างหนึ่ง หากแบ่งตามสภาพการใช้งาน	9
2.6 วัสดุผสม (aggregates)	9
2.7 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ	10
2.8 เถ้าขานอ้อย(Bagasse Ash)	11
2.9 การบ่มคอนกรีต	12
2.10 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	18
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	18
3.2 วิธีการทดลอง	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	37
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	37
4.2 บันทึกผลและเปรียบเทียบกำลังอัดตามเวลาเพื่อผลิตคอนกรีตซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างส่วนผสมที่ใช้ต่อโมลทดสอบทรงกระบอก ขนาด 15*30 cm	57
4.3 บันทึกผลและเปรียบเทียบกำลังอัดตามเวลาเพื่อผลิตคอนกรีตถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างส่วนผสมที่ใช้ต่อโมลทดสอบทรงกระบอก ขนาด 15*30 cm	58
4.4 การทดสอบคลอไรด์ในคอนกรีตทำจากซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 มาตรฐาน การทดสอบ : ASTM C144-81 “Standard Test Method for Acid-Soluble and Water-Soluble Chloride content in Concrete”	59
4.5 การทดสอบคุณสมบัติของมอดาร์ซีเมนต์ต่อการต้านทานซัลเฟต ของคอนกรีต ที่ทำจากซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ต่อซัลเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 5	63
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	68
5.1 การทดสอบอัตราการไหลผ่านที่ซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว)	68
5.2 คอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	68
5.3 การทดสอบคลอไรด์ในคอนกรีตทำจากซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	68
5.4 การทดสอบคุณสมบัติของมอดาร์ซีเมนต์ต่อการต้านทานซัลเฟต ของคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ต่อซัลเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 5	69
บรรณานุกรม	70

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 1 แสดงปริมาณสัดส่วนออกไซด์หลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าขานอ้อย (Nuntachai, 2552)	7
ตารางที่ 3 ข้อกำหนดส่วนขนาดการคละตัวของวัสดุผสม (ASTM C33) ขนาดตะแกรงร้อยละ สะสมบนตะแกรง	10
ตารางที่ 4 แสดงปริมาณธาตุต่างๆ และ Atomic percent ของซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว)ที่ได้จาก การเผาที่อุณหภูมิ 800-1000°C	39
ตารางที่ 5 แสดงปริมาณธาตุต่างๆ และ Atomic percent ของขานอ้อยที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 - 600°C ที่ได้เป็นถ่านชาร์(ซีเถ้าดำ)	41
ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบอัตราการไหลแม่แทนที่ซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว)	42
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าซีเมนต์ที่ 3 วัน แทนที่ซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว)	43
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าซีเมนต์ที่ 7 วัน แทนที่ซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว) 10%	45
ตารางที่ 9 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าซีเมนต์ที่ 28 วัน แทนที่ซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว) 10%	47
ตารางที่ 10 แสดงผลการทดสอบอัตราการไหลแม่แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ)	50
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าซีเมนต์ ที่ 3 วัน แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10%	51
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าซีเมนต์ ที่ 7 วัน แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10%	52
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าซีเมนต์ที่ 28 วัน แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10%	54
ตารางที่ 14 คอนกรีตผสมซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว) 30 วัน	59
ตารางที่ 15 คอนกรีตผสมซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว) 60 วัน	59
ตารางที่ 16 คอนกรีตผสมถ่านชาร์ (เถ้าดำ) 30 วัน	60
ตารางที่ 17 คอนกรีตผสมถ่านชาร์ (เถ้าดำ) 60 วัน	60
ตารางที่ 18 คอนกรีตคอนกรีตเถ้าขานอ้อย ระหว่างแช่ซิลเฟต และไม่แช่ซิลเฟต	63
ตารางที่ 19 คอนกรีตถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) ระหว่างแช่ซิลเฟต และไม่แช่ซิลเฟต	64

สารบัญภาพ

หน้าที่

ภาพที่ 2.1	คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	8
ภาพที่ 2.2	กระบวนการกัดกร่อนของซัลเฟต	8
ภาพที่ 2.3	คอนกรีตที่แช่อยู่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	8
ภาพที่ 3.1	เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM FEI QUANTA 450)	19
ภาพที่ 3.2	เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (micromeritics, ASAP 2010)	20
ภาพที่ 3.3	การทดสอบบนกึ่งกลางโต๊ะทดสอบ	20
ภาพที่ 3.4	เครื่องทดสอบกำลังอัด	20
ภาพที่ 3.5	เครื่องผสมและปาดมอดาร์ที่ติดขอบหม้อ	22
ภาพที่ 3.6	การทดสอบบนกึ่งกลางโต๊ะทดสอบ	22
ภาพที่ 3.7	การหล่อเข้าแบบหล่อมอดาร์ขนาด 5*5 cm	24
ภาพที่ 3.8	การทดสอบด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก	25
ภาพที่ 3.9	โมลทดสอบขนาด $\varnothing 15 \times 30$ cm	26
ภาพที่ 3.10	ซีเมนต์ขี้เถ้าขุ่น (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	27
ภาพที่ 3.11	การผสมคอนกรีตในเครื่องผสม	27
ภาพที่ 3.12	เทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ	28
ภาพที่ 3.13	แกะแบบซีเมนต์ขี้เถ้าขุ่น (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	28
ภาพที่ 3.14	คอนกรีตหลังจากแกะแบบและบ่มน้ำ	29
ภาพที่ 3.15	แสดงวิธีการกดคอนกรีต และการวัดของคอนกรีต	29
ภาพที่ 3.16	แสดงการเปรียบเทียบซีเมนต์ขี้เถ้าขุ่น (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	30
ภาพที่ 3.17	ขึ้นทดสอบทรงกระบอก	31
ภาพที่ 3.18	ขึ้นทดสอบด้วยกาวอีพ็อกซี	31
ภาพที่ 3.19	ทำการชั่งผงคอนกรีตของแต่ละความลึกผสมลงในสารเคมี	32
ภาพที่ 3.20	เครื่องมือทดสอบเพื่อหาปริมาณ Chloride	33
ภาพที่ 3.21	มอดาร์ที่นำขึ้นจากสารละลาย	33
ภาพที่ 3.22	เมื่อล้างก้อนทดสอบเพื่อเอาคราบออก	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
ภาพที่ 3.23 งานวิจัยอ้อยและน้ำตาล (Thailand Cane and Sugar Research 2015) เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม 2015 ณ โรงแรมรามการันต์	35
ภาพที่ 3.24 ผลผลิตคอนกรีตที่ผลิตจากซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ที่ได้จากการทดลอง	36
ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม (Spectrum) ของซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	37
ภาพที่ 4.2 ภาพ SEM ของซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) ทำการเผาในสภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิ: 800-1000 °C	41
ภาพที่ 4.3 Spectrum ของซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) ที่ได้จากการทำ EDX	38
ภาพที่ 4.4 ภาพ SEM ของถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ทำการเผาในสภาวะบรรยากาศหรือคาร์บอนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ: (a) 400 °C; (b) 500 °C และ (c) 600 °C เป็นเวลา 60 นาที	40
ภาพที่ 4.5 Spectrum ของถ่านชาร์อ้อยที่ได้จากการทำ EDX	41
ภาพที่ 4.6 ค่าการทดสอบอัตราการไหลแผ่นแทนที่ซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว)	42
ภาพที่ 4.7 ค่าผลการทดสอบกำลังอัดของแทนที่ซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว)	49
ภาพที่ 4.8 ค่าการทดสอบอัตราการไหลแผ่นแทนที่ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	50
ภาพที่ 4.9 ค่าผลการทดสอบกำลังอัดของแทนที่ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)	56
ภาพที่ 4.10 คอนกรีตซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) ที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง	57
ภาพที่ 4.11 คอนกรีตถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง	58
ภาพที่ 4.12 คอนกรีตผสมซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) 30 วัน	61
ภาพที่ 4.13 คอนกรีตผสมซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) 60 วัน	61
ภาพที่ 4.14 คอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) 30 วัน	62
ภาพที่ 4.15 คอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) 60 วัน	62
ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบกำลังอัดของมอดาร์ซีเมนต์ผสมอ้อย บ่มในน้ำและแช่ในซิลิเกต	64
ภาพที่ 4.17 แสดงแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดตามเวลาของมอดาร์ซีเมนต์ผสมซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) แช่บ่มในน้ำและแช่ในซิลิเกต	65
ภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบกำลังอัดของมอดาร์ซีเมนต์ผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) บ่มในน้ำและแช่ในซิลิเกต	66
ภาพที่ 4.19 แสดงแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดตามเวลาของมอดาร์ซีเมนต์ผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) แช่บ่มในน้ำและแช่ในซิลิเกต	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการผลิตพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง ยางพารา เป็นต้น ซึ่งพบว่า ข้าวและน้ำตาลที่ผลิตจากอ้อย ได้มีการส่งออกเป็นอันดับต้นๆ ของโลก อ้อย ที่ส่งเข้าโรงงานแปรรูปเป็นในกระบวนการผลิตน้ำตาล อ้อย 1 ตัน จะเหลือกากหรือขานอ้อยออกมาประมาณ 300 กิโลกรัม ในปี 2552 ไทยผลิตอ้อยทั้งหมด 66.8 ล้านตัน เมื่อนำไปผลิตน้ำตาลจะเหลือเป็นขานอ้อย 20 ล้านตันต่อปี ถ้านำขานอ้อยเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าป้อนให้กับโรงงานผลิตน้ำตาลอีกทีหนึ่ง ซึ่งจะเหลือเถ้าขานอ้อยประมาณ 0.70 ล้านตัน บางส่วนเกษตรกรนำไปทำปุ๋ย และส่วนใหญ่ใช้ถมที่และกองอยู่ จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย พบว่า มีธาตุซิลิกา เป็นหลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารพอสโซลาน ที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตและใช้ในซีเมนต์ สำหรับข้าวเปลือกประเทศไทยได้มีการผลิตประมาณ 31.3 ล้านตัน ในปี 2552 [1]. เมื่อนำข้าว 1 ตันไปสีจะได้แกลบ 200 กิโลกรัม และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบร้อยละ 20 ของแกลบที่นำมาเผาทั้งหมด จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ พบว่า มีธาตุซิลิกาสูงถึงร้อยละ 90 [2]. เถ้าแกลบเมื่อบดละเอียดสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุพอสโซลานเพื่อใช้ในคอนกรีตหรือซีเมนต์ได้ [3]. เถ้าขานอ้อยเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลที่ได้จากการเผาขานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงาน โดยประเทศไทยผลิตอ้อยในปี 2552 ได้เป็นจำนวนทั้งหมด 68.5 ล้านตัน [4]. เมื่อคำนวณโดยวิธีของ Cordeiro และคณะ [5]. จะได้เถ้าขานอ้อยหลังจากการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 427,700 ตันต่อปี โดยเถ้าขานอ้อยดังกล่าวนำมาใช้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้พื้นที่ในการจัดทิ้งเป็นบริเวณกว้าง และรอบๆ บริเวณพื้นที่จัดทิ้งยังได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองของเถ้าขานอ้อยอีกด้วย ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาคุณสมบัติของเถ้าขานอ้อยเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตในซีเมนต์ โดยพบว่าเถ้าขานอ้อยที่ละเอียดมีความเป็นวัสดุพอสโซลานที่ดี [6-10]. และการทำปฏิกิริยาของเถ้าขานอ้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกอนออกไซด์ที่ไม่เป็นผลึก สิ่งเจือปน ขนาดอนุภาค และความละเอียด [6, 9] นอกจากนี้ Chusilp และคณะ [11, 12] ยังพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมของเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และยังพบอีกว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและลดการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตได้อีกด้วย

จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ จึงศึกษาการการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายของคอนกรีต เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการซึมผ่านของน้ำเกลือ และการต้านทานสารละลายซัลเฟตและการจำลองอายุการใช้งานของซีเมนต์ที่ถูกทดแทนขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของคอนกรีตที่เตรียมได้โดยศึกษาการต้านทานการดูดซับสารละลายน้ำเกลือ และสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลาบ่มแช่ต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตและการตกค้างของสารละลายน้ำเกลือและสารละลายซัลเฟตในเนื้อคอนกรีตที่ระยะบ่มแช่ต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการซึมผ่านของน้ำเกลือ และสารละลายซัลเฟต
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น การแทรกซึมของน้ำเกลือ และสารละลายซัลเฟต เป็นต้น
3. ศึกษาการจำลองอายุการใช้งาน (หน่วยเป็นวัน) ที่มีผลต่อการนำไปใช้แทนซีเมนต์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง
2. สามารถนำซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 มาแปรรูปให้เกิดมูลค่าทางการค้า

บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) เมื่อผสมกับน้ำจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ พร้อมกับมีความร้อนเกิดขึ้น โดยที่ระยะเวลาการก่อตัวและปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของ ปูนซีเมนต์ เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะได้ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) เมื่อน้ำทรายผสมเข้ากับซีเมนต์เพสต์ จะได้มอร์ตาร์ (Mortar) เมื่อน้ำหินผสมกับมอร์ตาร์จะได้คอนกรีต (Concrete) ปูนซีเมนต์ปอร์ต 2 เกรดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการผสมส่วนต่างๆ เช่น หินปูน (Lime Stone) หรือดินปูนขาว (Marl) กับดินเหนียว (Clay) หรือหินดินดาน (shale) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบหลัก 4 ส่วนคือ

- 1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)
- 2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)
- 3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
- 4) เทตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetrecalcium aluminoferrite) $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

สารประกอบแต่ละชนิดสามารถปรับปริมาณเพื่อทำให้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ ได้ตามความต้องการใช้งาน

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จำแนกตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 15 ได้ 5 ประเภท คือ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาจัดเป็นปูนซีเมนต์มาตรฐาน เหมาะกับงานก่อสร้างทั่วไป ที่ไม่ต้องการสมบัติทนออกเหนือไปกว่าปกติ ส่วนใหญ่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ปูนซีเมนต์ประเภนี้น้ำ เหมาะสมกับงานที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูงหรืองานที่ไม่ต้องการให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำมากจนเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตเสียหาย

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สองเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงจัดเป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลงเพื่อให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตปานกลางเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำต่ำ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นในอัตราช้ากว่าปูนประเภทที่หนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถช่วยลดอุณหภูมิของคอนกรีตในอากาศร้อนได้ดี ปูนซีเมนต์ประเภนี้ เหมาะกับงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ เขื่อนหรือกำแพงกันดิน รวมทั้งในบริเวณที่สัมผัสกับน้ำ เค็มหรือน้ำทะเลเป็นครั้งคราว

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สามเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็วปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะมีเนื้อปูนละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง เป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งโดยปกติจะสามารถรับแรงที่อายุ 7 วันเท่ากับที่อายุ 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่หนึ่งนอกจากนี้ยังนิยมนำไปใช้กับงานที่ต้องถอดแบบเร็วๆ เช่น คอนกรีตสำเร็จรูปหรืองานซ่อมแซมถนนหรืออาคารต่างๆเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็ว

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สี่เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีสมบัติเหมาะกับการใช้งานซึ่งต้องการควบคุมทั้งปริมาณและอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตให้น้อยที่สุด ดังนั้นการพัฒนาองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะเป็นไปอย่างช้าๆ ดังนั้นจึงนิยมใช้กับงานคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตถ้ามากเกินไปจะเป็นอันตรายกับตัวโครงสร้างเขื่อน เนื่องจากจะทำให้เกิดขยายตัว และความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้นได้

5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้าเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟตได้สูงเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟตสูงจึงเหมาะกับการก่อสร้างในบริเวณดินหรือน้ำที่มีส่วนประกอบของซัลเฟตเข้มข้นสูง

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณสัดส่วนออกไซด์หลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทออกไซด์	สารประกอบออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	CaO	60-67
	SiO ₂	17-25
	Al ₂ O ₃	3-8
	Fe ₂ O ₃	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	MgO	0.5-4.0
	Na ₂ O	0.3-1.2
	TiO ₂	0.1 – 0.4
	P ₂ O ₅	0.1 – 0.2
	SO ₃	1 – 3

ที่มา : (Neville, 1995)

2.1.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามที่กำหนดโดยสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุอเมริกัน ASTM.13 C 150 และกระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1 แบ่งออกเป็น 2 อย่างคือ

คุณสมบัติทางเคมีซึ่งได้แก่ ข้อกำหนดปริมาณออกไซด์และสารประกอบต่างๆ และคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติที่ต้องการของปูนซีเมนต์คือ จะต้องเป็นปูนซีเมนต์ที่มีความสดและใหม่ ปูนซีเมนต์ที่ดีจะต้องไม่จับตัวกันเป็นก้อน มีความละเอียด บางครั้งการจับตัวกันเป็นก้อนอาจมีสาเหตุมาจากการจัดเก็บที่ไม่ถูกต้องเช่น เก็บกองไว้สูงเกินไปและอากาศไม่ถ่ายเท

1. การแข็งตัวและการก่อตัว (Hardening and Setting) เมื่อปูนซีเมนต์ผสมรวมตัวกับน้ำจะได้ซีเมนต์เพสต์ (Cementpaste) ถ้าปล่อยให้แห้งโดยไม่รบกวน ซีเมนต์เพสต์จะสูญเสียความชื้นตัวและถึงสถานะที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยปราศจากการแตกหัก การเปลี่ยนแปลงสภาวะนี้เรียกว่า การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ในการทำงานคอนกรีต แล้วต้องอาศัยระยะเวลาหนึ่งเพื่อจะนำคอนกรีตเทหล่อแบบและการปรับแต่งก่อนที่ปูนซีเมนต์จะก่อตัว ดังนั้นปูนซีเมนต์จะต้องไม่ก่อตัวเร็วเกินไป และไม่แข็งตัวช้าเกินไป ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็น 2 ค่า คือ ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวปลาย (Final Setting Time) ซึ่งในระยะเวลาการก่อตัวทั้งสองนี้ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานในการกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เท่านั้น ในการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นมาตรฐานมีอยู่ 2 วิธี คือการทดสอบไวแคต (Vicat Test) และการทดสอบการก่อตัวในการวิจัยคอนกรีตมวลเบา โดยวิธีการผสมลูเมนียะใช้ในการทดสอบไวแคต (วินิต ซ่อวิเชียร . 2529 : หน้า 20)

2. ความละเอียด (Fineness) ความละเอียดของผงปูนซีเมนต์ มีผลต่อความเร็วของปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งผลต่อการเกิดความเร็วในการเกิดกำลังของปูนซีเมนต์ ผงปูนซีเมนต์ที่ละเอียดมาก น้ำสามารถที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับเนื้อปูนซีเมนต์ได้รวดเร็วและทั่วถึง ข้อควรระวังปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความชื้นในอากาศได้ง่าย ซึ่งเป็นผลทำให้ปูนซีเมนต์ขาดคุณภาพ ดังนั้นการเก็บรักษาปูนซีเมนต์ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก ปูนซีเมนต์ที่มีเม็ดหยาบเกินไปจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้า และอาจเกิดไม่หมดก็ได้ (วินิต ซ่อวิเชียร. 2529 : หน้า 18)

3. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 3.15 ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กากเตาถลุง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.90 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์บ่งบอกถึงส่วนประกอบของเนื้อซีเมนต์ และความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากจะมีความถ่วงจำเพาะสูง 2.3.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portlandcement) เป็นปูนซีเมนต์

2.2 ปอซโซลาน (Pozzolan)

ปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินา มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดและมีความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยา กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติแล้วเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีสมบัติในการยึดประสานแบบเดียวกับปูนซีเมนต์ได้ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างมาตั้งแต่สมัยโบราณกว่า 2000 ปีแล้ว และในปัจจุบันก็ยังเป็นที่นิยมนำมาอยู่ในสมัยโบราณได้นำเอาวัสดุพวกปอซโซลาน เช่น ถ้ำจากภูเขาไฟมาผสมกับปูนขาวเพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) มีรายงานว่าได้มีการใช้ส่วนผสมของปอซโซลาน 2 ส่วนต่อปูนขาว 1 ส่วนมาใช้ในการก่อสร้าง โดยมีไขมัน นมและเลือดจากสัตว์เป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้งานและสิ่งก่อสร้างที่ทำจากปอซโซลานนั้นก็ยังมีความคงทนมาจนถึงทุกวันนี้วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่งได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานที่ได้ จากขบวนการผลิต (Artificial Pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติได้แก่ ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ (Diatomaceous Earth) ถ้ำภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟวัสดุเหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านขบวนการต่างๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้เช่น การเผา การบด และการทำให้แห้งเป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอา ปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพานเพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่าง ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟตช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างต่างอับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ในการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

2.3 คุณสมบัติของเถ้าขานอ้อย

จากฐานข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรมประเทศไทยมีโรงงานผลิตน้ำตาลจำนวน 192 โรงงาน ซึ่งจากการประมาณการพบว่า มีปริมาณขานอ้อยสูงถึง 20 ล้านตันต่อปีในกระบวนการผลิตน้ำตาล อ้อย 1 ตันที่ป้อนเข้าสู่โรงงานน้ำตาลจะเป็นกากของเหลือจากกระบวนการการผลิตคือ ขานอ้อยที่มีปริมาณสูงถึง 300 กิโลกรัมและจะเหลือจากการเผาไหม้ 1.43 เปอร์เซ็นต์ (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวภาพ มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม) องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2

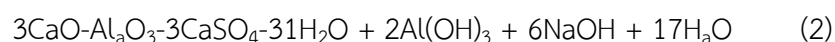
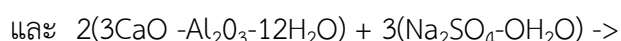
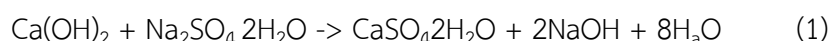
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าขานอ้อย (Nuntachai, 2552)

Chemical compositions of Type 1 Portland cement and ground bagasse ash (BA).		
Chemical composition (96)	Type of sample	
	Cement	BA
Silicon dioxide. SiO ₂	20.90	64.88
Aluminum oxide. Al ₂ O ₃	4.76	6.40
Iron oxide. Fe ₂ O ₃	3.41	2.63
Calcium oxide. CaO	65.41	10.69
Magnesium oxide. MgO	1.25	1.55
Sulfur trioxide. SO ₃	2.71	1.56
Loss on ignition. LOI	0.96	8.16
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	-	73.91

2.4 กระบวนการกักกร่อนของซัลเฟต

การกักกร่อนของซัลเฟตเกิดได้จากสารประกอบซัลเฟตของธาตุหลายชนิดโดยทั่วไปคือ โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และ แคลเซียม ซึ่งมีอยู่แล้วในดินหรือน้ำใต้ดินกระบวนการกักกร่อนจะต่างกันไปตาม ชนิดของสารประกอบซัลเฟต

สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) จะทำปฏิกิริยากับต่าง (Ca(OH)₂) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตได้เป็นยิปซัม (Ca SO₄-2H₂O) ดังสมการที่ 1 และ Na₂SO₄ ยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียม อลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (3CaO-Al₂O₃-3CaSO₄-32H₂O) หรือที่รู้จักกันในชื่อ เอททริงไกท์ (Ettringite) ดังสมการที่ 2 ทั้งยิปซัมและเอททริงไกท์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากสารตั้งต้นมีผลทำให้คอนกรีตขยายตัวและแตกร้าว



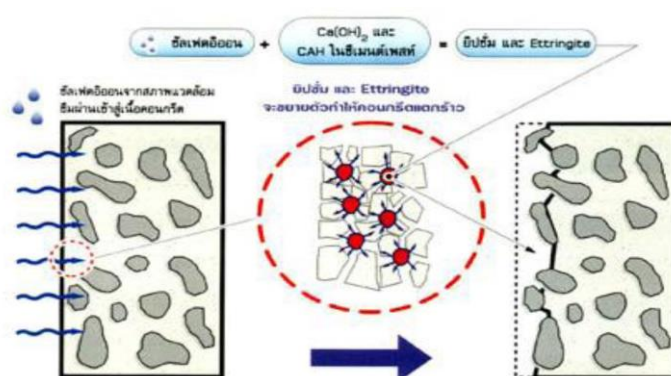
เลขโมเลกุลของน้ำอาจเป็น 31 หรือ 32 ก็ได้ขึ้นอยู่กับความดันไอของอากาศ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) จะกักกร่อนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้ดีพอๆกับ Ca(OH)₂ และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ดังสมการที่ 3



แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และซิลิกาเจล (SiO_2 -aq) ที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 3 เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่าสารตั้งต้น มีผลทำให้คอนกรีตมีกำลังลดลง (Neville, 1995) รูปที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดจากสารซัลเฟต



ภาพที่ 2.1 คอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Lee et al, 2003)



ภาพที่ 2.2 กระบวนการกัดกร่อนของซัลเฟต (ชัชวาลย์ และคณะ, 2543)



ภาพที่ 2.3 คอนกรีตที่แช่อยู่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Lee et al, 2003)

2.5 น้ำ เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตคอนกรีตอย่างหนึ่ง หากแบ่งตามสภาพการใช้งาน

ได้แก่ การใช้น้ำในการผสมคอนกรีต การใช้น้ำในการบ่มคอนกรีต การใช้น้ำในการล้างวัสดุผสมให้สะอาดก่อนที่จะผสม น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องมีความสะอาดมีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ไม่มีสารที่เป็นอันตรายต่อปูนซีเมนต์ เช่น ฟลูออไรด์ สารอินทรีย์และสิ่งปนเปื้อน หรือมีความเป็นกรด ต่าง หรือมีเกลือแรมมากเกินไป วิธีสังเกตว่าน้ำใช้ผสมคอนกรีตได้หรือไม่ ประกอบไปด้วย

2.5.1 ความสะอาด น้ำจะต้องไม่มีสารเน่าเปื่อย

2.5.2 สีน้ำจะต้องใส ถ้ามีสีแสดงว่าน้ำจะต้องมีสารแขวนลอยต่างๆ

2.5.3 กลิ่นน้ำจะต้องไม่มีกลิ่นเหม็นถ้ามีกลิ่นแสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก

2.5.4 รสน้ำจะต้องไม่มีรส ถ้ามีรสกร่อยหรือเค็มแสดงว่ามีเกลือแรมอยู่มาก น้ำที่หลักของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต คือ 2 ประการ

1) ทำหน้าที่ผสมเข้ากับปูนซีเมนต์และทำปฏิกิริยาทางเคมีแล้วเกิดความร้อนที่เรียกว่า heat of hydration ทำให้ผงซีเมนต์นั้นกลายเป็นปูน และเป็นซีเมนต์เหนียวซึ่งเป็นตัวประสานผิวระหว่างเม็ดของวัสดุผสม เกาะยึดกันแน่นเมื่อแข็งตัว ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียก เพื่อให้ปูนซีเมนต์เข้าเกาะโดยรอบและแข็งตัวยึดติดกันแน่น

2) ทำหน้าที่หล่อลื่นให้วัสดุทั้ง 3 อย่างนี้เกิดความเหลว สามารถเทและกระทุ้งหรือเขย่าเข้าแบบหล่อให้เป็นรูปต่างๆ ได้

2.6 วัสดุผสม (aggregates)

หมายถึง แร่ธาตุเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ เมื่อได้รับความชื้นอาจได้จากธรรมชาติ เช่น หิน ทราย หรือเป็นวัสดุที่มนุษย์ผลิตขึ้น เช่น ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก เพื่อใช้เป็นส่วนผสมใหญ่ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งมีค่าประมาณ 75 – 80 % ของเนื้อคอนกรีต ช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตเนื่องจากราคาของวัสดุมีค่าน้อยกว่าซีเมนต์พอสมควรประเภทของวัสดุผสม โดยทั่วไปแล้วจะแบ่งประเภทของวัสดุผสมตามขนาดของวัสดุผสมในการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกันเบอร์ 4 เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. วัสดุผสมละเอียด (fine aggregate) คือวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 mm. สามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกันเบอร์ 4 ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 mm. 16 เพราะถ้าเล็กกว่าจำนวนดังกล่าวถือว่าเป็นดินเหนียว (clay) หรือฝุ่น (silt) วัสดุผสมละเอียดนี้ได้แก่ ทราย (sand) ซึ่งมีทั้งทรายน้ำจืดและทรายน้ำเค็ม

2. วัสดุผสมหยาบ (coarse aggregate) คือวัสดุที่มีขนาดใหญ่ตั้งแต่ 4.5 mm. ขึ้นไป นั่นคือไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงตามมาตรฐานอเมริกันเบอร์ 4 ได้ วัสดุผสมหยาบนี้ได้แก่ กรวด (gravel) และ หิน (stone) การทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติของหินและทรายนี้ โดยทั่วไปจะใช้การทดสอบวิธีการวิเคราะห์ส่วนและโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (gradation test by sieves analysis) อาศัยชุดตะแกรงมาตรฐานแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (aggregate shaker) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์

ในกราฟแบบ semi – log จะทำให้ทราบขนาดการคละตัวของหินและทรายว่ามีความคละตัวดีเพียงโดยจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดส่วนขนาดการคละตัวของวัสดุผสม (ASTM C33) ขนาดตะแกรงร้อยละเอียดผสมบนตะแกรง

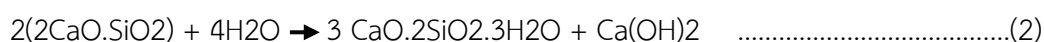
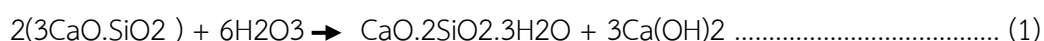
ทราย			หิน		
No. 4-3/4 นิ้ว	No. 4-1 นิ้ว		No. 4-1 ½ นิ้ว	No. 4-2 นิ้ว	
2 นิ้ว	-	-	-	0	0-5
1 ½ นิ้ว	-	-	0	0-5	-
1 นิ้ว	-	0	0-5	-	30-65
¾ นิ้ว	-	0-10	-	30-65	-
½ นิ้ว	-	-	40-75	-	70-90
3/8 นิ้ว	0	45-80	-	70-90	-
No. 4	0-50	90-100	90-100	95-100	95-100
No. 8	0-20	95-100	95-100	-	-
No. 18	15-50	-	-	-	-
No. 30	40-75	-	-	-	-
No. 50	70-90	-	-	-	-
No. 100	90-98	-	-	-	-

ที่มา : อดมวิทย์ กาจนวงศ์ (2543 : หน้า 19) 17

2.7 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำจะเริ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ผลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

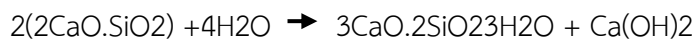
(3 CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ C-S-H) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca(OH)₂] ดังสมการ



ปฏิกิริยาตามสมการ ที่ (1) และ (2) ยังไม่มีสิ้นสุด หากส่วนผสมของปูนซีเมนต์มีสารปอซโซลานผสมอยู่โดยสารปอซโซลานมีองค์ประกอบทางเคมี คือ ซิลิกา (SiO₂) และ อลูมินา (Al₂O₃) ซึ่งจะเข้าไปทำ

ปฏิกิริยากับต่าง คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ ดังสมการที่ (3) และ (4) ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสารปอซโซลาน มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)



ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)



ผลที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (3) คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (4) คือ แคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) โดยทั้ง C-S-H และ C-A-H จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์สูงขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง (วิจิตรอัจฉรา,2545)

2.8 เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash)

เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash) คือ ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ มีสีเทา เทาดำ หรือสีน้ำตาล รูปร่างค่อนข้างกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน มีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้ เป็นสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture) สำหรับงานคอนกรีตที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างขนาดใหญ่หลายประเภท เนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีราคาถูกช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลง เมื่อนำเถ้าขานอ้อยมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตในด้านต่างๆ ให้ดีขึ้นเถ้าขานอ้อยมีคุณสมบัติดังนี้

1. เถ้าขานอ้อยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ทำให้เกิดตัวเชื่อมประสาน หรือ Calcium Silicate Hydrate เพิ่มขึ้น ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารเคมีสูงขึ้น
2. เพิ่มความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ขาดซีเมนต์
3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้า ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ซึ่งลดโอกาสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าขานอ้อยมีรูปร่างกลมปรับปรุงความสามารถไหลได้ของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตลื่นไหลเข้าแบบได้ดี
4. ลดการเยิ้ม (Bleeding) และแนวโน้มการแยกตัวของคอนกรีตสด
5. เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน
6. ปฏิกิริยาระหว่างเถ้าขานอ้อยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลงเพิ่มความทนทานของคอนกรีต

2.9 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) หมายถึง การควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วยทั้งนี้เพราะ อุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจก่อผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว

2.9.1 วิธีการบ่มคอนกรีตสามารถแบ่งวิธีการบ่มออกเป็น 2 ชนิดตามสภาพอุณหภูมิที่ใช้บ่มคือ

- 1) การบ่มที่อุณหภูมิปกติ
- 2) การบ่มที่อุณหภูมิ และความกดดันสูง

2.9.2 อิทธิพลของการบ่มต่อกำลังของคอนกรีต สรุปได้ดังนี้

- 1) กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันแรกๆ ถ้าได้รับการบ่ม ซึ่งชี้ถึงความสำคัญของการบ่มระยะแรก
- 2) กำลังของคอนกรีตมีโอกาสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจาก 28 วัน โดยอัตราการเพิ่มของกำลังจะช้าลง แต่ก็ยังเพิ่มขึ้นตลอดเวลา หากได้รับการบ่มที่ดี
- 3) หากขาดความชื้น กำลังคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นสักระยะหนึ่ง เพราะความชื้นที่เหลืออยู่ แต่หลังจากนั้นกำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก เช่น กำลังของคอนกรีตที่ได้รับการบ่ม 3 วัน จะมีกำลังเพียง 75 – 80% ของกำลังคอนกรีตที่บ่มขึ้นครบ 28 วัน

2.10 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

รูปทรงของคอนกรีตที่นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อหาลำดับกำลังอัดของคอนกรีตมี 2 แบบ คือ รูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก การใช้คอนกรีตรูปลูกบาศก์ในการหาลำดับกำลังอัดเป็นที่นิยมในอังกฤษ เยอรมันและประเทศในกลุ่มยุโรปเป็นส่วนใหญ่ ส่วนรูปทรงกระบอกนั้นนิยมใช้ในสหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส แคนาดา ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ สำหรับประเทศไทยนั้นในช่วงแรกนิยมใช้รูปลูกบาศก์ แต่ปัจจุบันใช้ทั้ง 2 แบบ เนื่องจากการที่คนไทยได้ไปศึกษาเล่าเรียนการทดสอบทั้ง 2 แบบ จากประเทศดังกล่าว

1) คอนกรีตรูปลูกบาศก์

แบบหล่อคอนกรีตรูปลูกบาศก์เป็นแบบเหล็กขนาด 15 ซม. ทำจากเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียวผิวเรียบ และสามารถป้องกันไม่ให้น้ำปูนรั่วออกจากแบบในระหว่างที่เทหรือมีคอนกรีตอยู่ในแบบ ก่อนการหล่อคอนกรีตจะใช้น้ำมันทาบางๆ ที่ด้านในของแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น การที่น้ำมันมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตผสมกับน้ำมันส่วนเกินทำให้มีปัญหาเรื่องการแข็งตัวและลดกำลังของคอนกรีต

การหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้มาตรฐาน BS 1881 Part 108 โดยใส่คอนกรีตสด การหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้มาตรฐาน BS 1881 Part 108 โดยใส่คอนกรีตสดลดลงในแบบมาตรฐานขนาด 15* 15* 15 ซม.³ จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นให้เขย่าแบบด้วยเครื่องเขย่าแบบโต๊ะหรือ

กระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งคอนกรีตอย่างเต็มที่เพื่อให้เป็นอย่างน้อย 35 ครั้ง เหล็กกระทุ้งมีน้ำหนัก 1.8 กก. ยาว 38 ซม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5 ซม. กระทุ้งตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อในอาคารต่างๆ ซึ่งได้รับการกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่นอย่างเต็มที่เช่นเดียวกัน แต่การกระทุ้งจะต้องไม่มากจนทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว ภายหลังจากกระทุ้งเรียบร้อยแล้วจึงปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ ทั้งคอนกรีตไว้ 24 + 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 15 ถึง 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 จากนั้นถอดแบบออก และนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 18 ถึง 22 องศาเซลเซียส การทดสอบนิยมทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน

การทดสอบกำลังอัดใช้คอนกรีตที่ผ่านการบ่ม และอยู่ในสภาพเปียก โดยใช้หน้าที่เรียบของคอนกรีต 2 ด้านตรงกันข้ามเป็นด้านรับแรง ดังนั้นผิวหน้าด้านที่ปาดให้เรียบจะตั้งฉากกับแกนของแรงกด การให้น้ำหนักกระทำแก่คอนกรีตใช้อัตราคงที่ที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ 0.4 เมกะปาสกาลต่อวินาที จนกระทั่งคอนกรีตวิบัติ และไม่สามารถรับแรงที่สูงกว่าความเป็นจริง และในทางกลับกัน การให้อัตราคงที่ช้ามากจะทำให้กำลังที่ทดสอบได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

2) คอนกรีตรูปทรงกระบอก

แบบหล่อมาตรฐานสำหรับเตรียมตัวอย่างคอนกรีต รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ทำจากเหล็กมีความแข็งแรงผิวด้านในเรียบ สามารถคงรูปทรงกระบอกและสามารถป้องกันน้ำปูนไม่ให้รั่วออกมาจากแบบหล่อได้

นอกจากนี้ชุมพล (2528) ได้ทำการศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ และเถ้าลอยโดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด, ความชื้นเหลือปกติ, ระยะเวลาก่อตัว, การคายน้ำ กำลังรับแรงดึง, การต้านทานสารเคมี, การขยายตัวและการหดตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอยในอัตราส่วนที่ต่างกัน จากการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสม ถ้ามีเถ้าแกลบมากจะทำให้กำลังสูงในช่วงแรกแต่ส่วนผสมต้องการน้ำมากขึ้น ส่วนผสมที่มีเถ้าลอยมากจะมีกำลังสูงในช่วงปลายและคอนกรีตมีความสามารถทำงานได้มากขึ้น โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยต้องเพิ่มน้ำสำหรับความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาก่อตัว การคายน้ำจะลดลง เพิ่มการต้านทานสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรด

นอกจากนี้ สหลาก (2543) ได้กล่าวถึง สมบัติด้านการรับกำลังอัด และค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะและกาญจนบุรี , เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้โดยบดวัสดุปอซโซลานค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0-70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานคอนกรีตให้มีค่าอยู่ระหว่าง 50-100 มม. โดยการปรับปริมาณน้ำ คอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลาน ร้อยละ 55 และ 70 ได้ผสมสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1 ของวัสดุประสาน ทดสอบที่อายุ 7, 28, 90, 180 และ 365 วัน จากการศึกษาพบว่า เถ้าถ่านหินแม่เมาะให้ผลทดสอบที่ดี ใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้

ในปริมาณสูง คอนกรีตที่ผสมแล้วผ่านหินจากจังหวัดกาญจนบุรีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ให้ผลด้านกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำเทียบเท่าหรือต่ำกว่าคอนกรีตปกติเล็กน้อย ถ้าปาล์มน้ำมัน บดละเอียดและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดสามารถพัฒนาทั้งกำลังรับแรงอัดและการลดค่าการซึมของ น้ำผ่านคอนกรีตได้ดี

ในส่วนของ สมศักดิ์ (2544) ได้ศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ ต่อเถ้าลอย หรือเถ้าแกลบเท่ากับ 80 : 20 และ 60 : 40 แล้วแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปรับสภาวะ ให้มีความเป็นกรดที่ระดับ pH 3 และ pH 7 และนำตัวอย่าง มอร์ต้ารมาทากำลังรับแรงอัด การเปลี่ยนแปลงความยาวและน้ำหนักของมอร์ต้าร์ จากการศึกษาพบว่า มอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบมีการขยายตัวน้อยที่สุด ส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบร้อยละ 20 ที่สภาวะ pH 3 มีการสูญเสียน้ำหนักบางส่วนจากการกัดกร่อนที่บริเวณผิวของแท่งมอร์ต้าร์

นอกจากนี้ อาภา (2544) ได้ทำการศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ เถ้าลอยจากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะหรือเถ้าแกลบบดละเอียดจากการเผาเถ้าในโรง ในอัตราส่วน 80 : 20 และ 60 : 40 นำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 จากการศึกษาพบว่า ยิ่งใช้เถ้าลอยมากก็จะลดการขยายตัวของคอนกรีตได้มาก มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบมีการขยายตัว ลดลงมาก โดยเฉพาะส่วนผสมที่มีเถ้าแกลบร้อยละ 40 เกิดการหดตัวเล็กน้อยแทนที่จะขยายตัว และมีน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

Tam และคณะ ได้ศึกษาวิธีที่สามารถช่วยปรับปรุงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมเดิม และมอร์ต้าร์ที่ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยใช้ซีเมนต์เพสต์ที่เหลวขึ้น จะแทรกเข้าไปในรอยร้าวและช่องว่างเพื่ออุดรอยร้าวและช่องว่างในมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตเก่าให้มีความแน่นขึ้น สำหรับวิธีการผสมแบบ Two-stage mixing approach แบ่งออกเป็นสอง ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรก เป็นขั้นตอนที่นำมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตเก่ามาผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา 60 วินาที จากนั้นทำการเติมน้ำครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำ ที่ต้องการและทำการผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นใส่ปูนซีเมนต์แล้วผสมต่ออีก 30 วินาที สำหรับขั้นตอนที่สองเป็นการนำน้ำที่เหลืออีกครั้งเติมเข้าไปแล้วผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม เท่ากับ 120 วินาที ก็จะได้คอนกรีตสด เพื่อทดสอบค่าการยุบตัวและหล่อตัวอย่างคอนกรีต

นันทชัย และคณะ ได้ศึกษาผลกระทบของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของเถ้าขานอ้อยต่อกำลังอัดและการต้านทานต่อซัลเฟตในมอร์ต้าร์ โดยใช้เถ้าขานอ้อยที่มี ค่า 5, 10, 15 และ 20% แทนหุ้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าขานอ้อยในปริมาณ 10-20% (ค่า LOI 5-20%)

เกิดการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อยเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% ที่อายุ 360 วัน และพบว่าค่า LOI ที่ไม่เกิน 10% ของเก้าชานอ้อยเหมาะแก่การทำให้เป็นวัสดุปอชโซลาน

Chatveera, B. and Lertwattanaruk, P. ได้ศึกษาผลกระทบของซัลเฟตที่มีต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบดำ โดยนำเถ้าแกลบดำแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนต่อวัสดุประสานที่ 0.55 และ 0.65 แล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 5% พบว่าการใช้อัตราส่วนต่อวัสดุที่ประสานน้อยลงมีผลดีต่อการต้านทานสารซัลเฟต และการใช้เถ้าแกลบดำสามารถต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานซัลเฟตจะลดลงมากเมื่อแช่แมกนีเซียมซัลเฟต อัตราส่วนน้ำต่อประสานน้อยลงมีผลดีต่อการต้านทาน 6 ซัลเฟต และการใช้เถ้าแกลบดำสามารถต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานซัลเฟตจะลดลงมาก เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

Martirena Hernandez et al. (1998) ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยในลักษณะ สารปอชโซลานผสมปูนขาว โดยศึกษาความแตกต่างระหว่างเถ้าชานอ้อยจากโรงงานและเถ้าชานอ้อยที่ได้จากการเผาโดยทั่วไป พบว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิด ใช้เป็นวัสดุปอชโซลานได้และปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ ของเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลใกล้เคียงกับเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาในที่โล่ง ส่วนเถ้าชานอ้อยที่เกิดจากการเผาโดยทั่วไปจะมีค่าซิลิกอนไดออกไซด์ต่ำกว่าเถ้าแกลบ ผลการทดสอบ X-Ray Diffractometer (XRD) แสดงว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เกิดในช่วง 7 วัน โดยที่ปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้นเมื่อใช้เถ้าชานอ้อยจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าชานอ้อยเผาในที่เปิด

ทวีศักดิ์ คงศรี และพีรเกียรติ เลิศพูนศรี (2542) ศึกษา กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ โดยการใช้เถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณต่างๆกัน พบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดจะลดลง

ษณูรักษ์ เทียมวีรสกุล และ นที อธิกคุณการ (2543) ศึกษาผลกระทบจากความละเอียดของเถ้าชานอ้อยที่นำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่อัตราร้อยละ 20 โดยอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้เถ้าชานอ้อยที่มีความละเอียดเท่ากัน กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุของมอร์ตาร์ และค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียวเมื่อมีอายุ 28 วัน

จิรศักดิ์ ภูริพันธุ์วิชัย และคณะ (2544) ศึกษาคอนกรีตบล็อกจากเถ้าขานอ้อยโดยศึกษาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าขานอ้อยบดด้วยเวลาต่างกันต่อการไหล เพื่อหาอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสมเพื่อนำไปทำคอนกรีตบล็อกจากเถ้าขานอ้อย โดยการนำเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบด 1 ชั่วโมง ซึ่งมีส่วนค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 18 แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยใช้วัสดุประสาน $250 - 300 \text{ kg/m}^3$ หล่อตัวอย่างโดยการใส่แบบหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น สั้นแต่ละชั้นเป็นเวลา 20 วินาที และบ่มขึ้นต่อเนื่องหลังถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง พบว่าเถ้าขานอ้อยที่ละเอียดมากขึ้นและการบดเถ้าขานอ้อยที่เวลา 1 ชั่วโมงและแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 เป็นค่าที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 ของวัสดุประสาน 250 kg/m^3 ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 160 ksc ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

วิจักขณ์ เมธชนัน และอนุชา เลิศอดิพัฒน์ (2546) ศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าขานอ้อยโดยศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่เปลี่ยนไปเมื่อผสมกับเถ้าขานอ้อย พบว่าเมื่อผสมเถ้าขานอ้อยลงไปทำให้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีรูพรุนลดน้อยลง ซึ่งเป็นการยืนยันผลของโครงสร้างจากเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแสดงให้เห็นว่าไม่มีผลต่อองค์ประกอบของโครงสร้างหลักของปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถคงคุณสมบัติการก่อตัวของคอนกรีต และมีความแข็งแรงในระยะยาวใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติ

สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ และ ชูชัย สุจิรวกุล (2548) ศึกษาผลกระทบของเถ้าขานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยการนำเอาเถ้าขานอ้อยจากโรงน้ำตาลขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น อบที่อุณหภูมิ 110°C บดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีส่วนที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 2 ทำการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย การหดตัวเมื่อแห้งและการต้านทานต่อการดซัลฟูริก โดยการใช้อัตราส่วนการแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ทดสอบตัวอย่างที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน พบว่าคุณสมบัติที่ต่างๆ ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ของเถ้าขานอ้อย เช่น การแทนที่ร้อยละ 10 กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วันมีค่าเท่ากับใกล้เคียงกับมอร์ตาร์มาตรฐาน แต่การแทนที่ร้อยละ 50 มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานมาก การสูญเสียกำลังอัดและน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกมากขึ้นตามอายุของการแช่ แต่การเพิ่มการแทนที่เถ้าขานอ้อยมากขึ้น ทำให้สูญเสียกำลังอัดและน้ำหนักน้อยลง การหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น

อาทิมาดวงจันทร์และสุวิมล สัจจาณิษฐ์ (2548) ได้นำเถ้าขานอ้อยมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก โดยศึกษาผลกระทบจากการบดต่อน้ำที่ซึมผ่าน ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0 - 40 พบว่าเมื่อปริมาณ

การแทนที่เพิ่มขึ้นต้องใช้น้ำในการผสมมากขึ้น เมื่อความละเอียดของเถ้าซันอ้อยเพิ่มขึ้นช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมลดลงร้อยละ 2 ถึง 3 การแทนที่ร้อยละ 20 ให้ผลการพัฒนากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์มาตรฐานและมีค่าสูงกว่าร้อยละ 1 - 8 สำหรับเถ้าที่มีความละเอียดมาก การแทนที่ร้อยละ 30 ให้ผลการพัฒนาในช่วงปลายใกล้เคียงกับมอร์ตาร์มาตรฐานและสรุปว่าเถ้าซันอ้อยมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับผลิตคอนกรีตบดอัดได้ โดยสามารถ ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 โดยยังคงคุณสมบัติทางกลตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายของคอนกรีตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) มาแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง โดยเน้นศึกษาในส่วนของการขั้นตอนการด้านทานการดูดซับสารละลายน้ำเกลือ และสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลาบ่มแช่ต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตและการตกค้างของสารละลายน้ำเกลือและสารละลายซัลเฟตในเนื้อคอนกรีตที่ระยะบ่มแช่ต่างๆ

จากการค้นหาข้อมูลในการผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง โดยพบว่าส่วนใหญ่ใช้ซีเมนต์ขาวที่มี ค่า 5, 10, 15 และ 20% แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ามอดาร์ผสมซีเมนต์ขาวในปริมาณ 10-20% (ค่า LOI 5-20%) เกิดการกัดกร่อน เพียงเล็กน้อยเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% ที่อายุ 360 วัน และพบว่าค่า LOI ที่ไม่เกิน 10% ของซีเมนต์ขาวเหมาะแก่การทำให้เป็นวัสดุปอซโซลาน

นอกจากนี้ Martirena Hernandez et al. (1998) พบว่าซีเมนต์ขาวจากแหล่ง ในลักษณะสารปอซโซลาน โดยศึกษาความแตกต่างระหว่างซีเมนต์ขาวจากโรงงานและซีเมนต์ขาวที่ได้จากการเผาโดยทั่วไป พบว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิด ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้และปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ ของซีเมนต์ขาวจากโรงงานน้ำตาลใกล้เคียงกับซีเมนต์ขาวที่ได้จากการเผาในท้องถิ่น ส่วนซีเมนต์ขาวที่เกิดจากการเผาโดยทั่วไปจะมีค่าซิลิกอนไดออกไซด์ต่ำกว่าซีเมนต์ขาว ผลการทดสอบ X-Ray Diffractometer (XRD) แสดงว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) เกิดในช่วง 7 วัน โดยที่ปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ซีเมนต์ขาวจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้ซีเมนต์ขาวเผาในที่เปิด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) มาแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง โดยจำแนกอุปกรณ์และเครื่องมือในขั้นการเตรียมและการวิเคราะห์หลักๆ ดังนี้

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการแบ่งขั้นตอนการทดสอบออกเป็นดังนี้

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างที่ใช้ซีเมนต์ขาว

(ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) มาแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1

- ซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) จากโรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง

จังหวัดราชบุรี

- ชุดตะแกรงล่อน
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง งานโครงสร้าง
- หิน ปูน ทราย
- หม้อผสม
- โตะทดสอบ เทมอตาร์
- เครื่องผสมและปาดมอตาร์ที่ติดขอบหม้อ
- เครื่องผสมให้หมุนด้วยความเร็วต่ำ
- เหล็กกระทุ้ง
- แบบหล่อมอตาร์ขนาด 5*5 ซม.
- โมลทดสอบขนาด $\varnothing 15 \times 30$ cm
- เครื่องทดสอบกำลังอัด
- เครื่องทดสอบบดกึ่งกลางโตะทดสอบ
- เตาอบสำหรับอบคลายเครียดที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope, SEM (SEM FEI QUANTA 450)
- เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (micromeritics, ASAP 2010)



ภาพที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(SEM FEI QUANTA 450)



ภาพที่ 3.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (micromeritics, ASAP 2010)



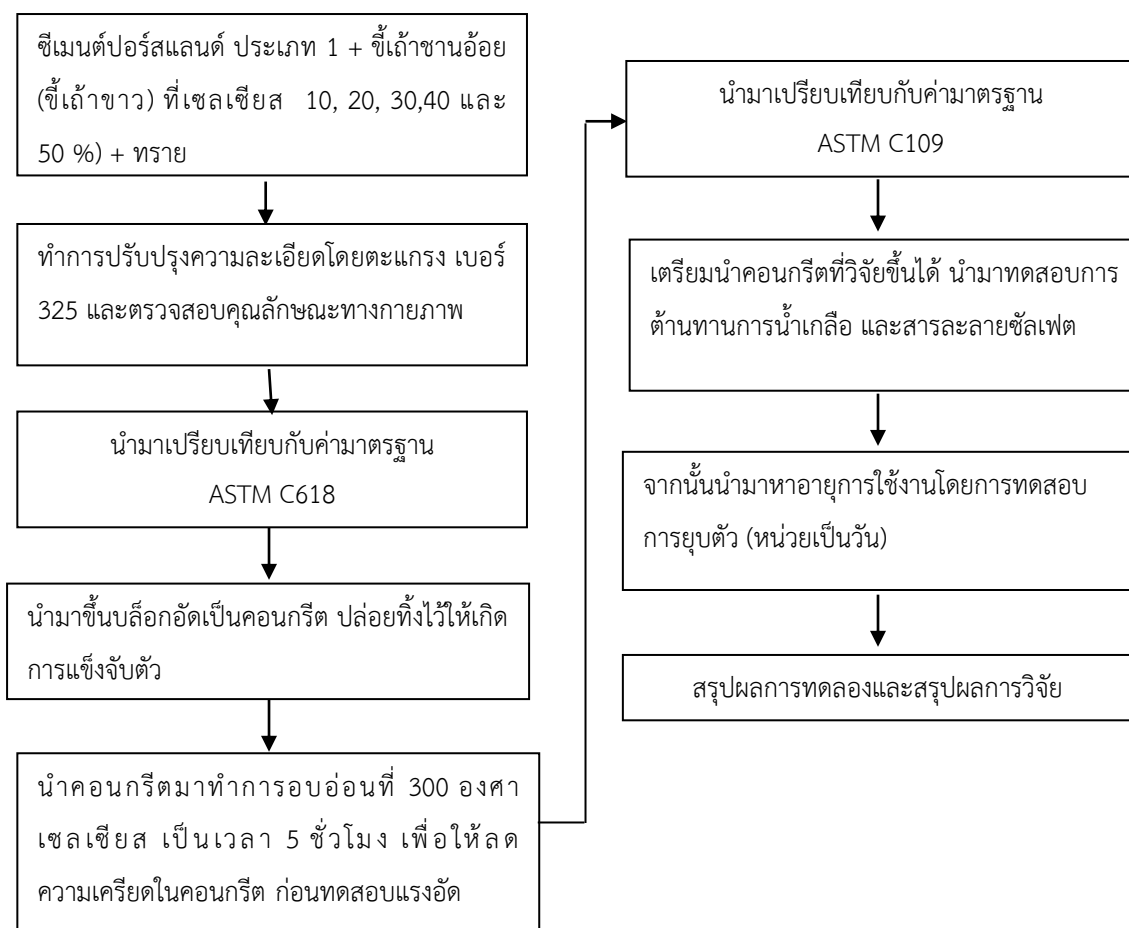
ภาพที่ 3.3 การทดสอบบนกึ่งกลางโต๊ะทดสอบ



ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังอัด

3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) มาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง โดยกระบวนการและในขั้นการเตรียมและการวิเคราะห์หลักๆ ดังนี้



3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (มอก. 15-2547)
2. นำซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) หาความละเอียดของอนุภาคต่าง ตะแกรง เบอร์ 325 จากโรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี
3. ทราย เป็นทรายแม่น้ำ นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค่าการดูดซึ่มของทรายทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128-01 : Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate
4. หิน เป็นหินปูนย่อยขนาดใหญ่ที่สุด 20 มม ค่าทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127-01 : Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate

5. น้ำ น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตใช้น้ำประปา และใช้น้ำกลั่นในการผสมสารละลาย
6. นำซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับทรายและน้ำ โดยอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 ทดลองแปรผันปริมาณน้ำเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม
7. นำถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับทรายและน้ำ โดยอัตราส่วนปูนต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 ทดลองแปรผันปริมาณน้ำ เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม
8. ผสมส่วนผสมทั้งหมดลงไปในห้องผสม เปิดเครื่องผสมให้หมุนด้วยความเร็วต่ำเป็นเวลา 30 วินาที ปรับความเร็วเป็นระดับปานกลาง 30 วินาที หลังจากนั้นปิดเครื่องผสมและปาดมอดาร์ที่ติดขอบหม้อ และเปิดเครื่องผสมโดยใช้ความเร็วปานกลางอีกเป็นเวลา 1 วินาที



ภาพที่ 3.5 เครื่องผสมและปาดมอดาร์ที่ติดขอบหม้อ

9. วางแบบทดสอบบนกึ่งกลางโต๊ะทดสอบ เทมอดาร์ลงในแบบและใช้เหล็กกระทุ้งในแบบ 20 ครั้ง
10. ใส่ซีเมนต์มอดาร์อีกจนล้นและกระทุ้ง 20 ครั้ง ปาดซีเมนต์ให้เสมอบนแบบ
11. ยกแบบขึ้นแล้วหมุนแท่นตกกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง ใน 15 วินาที



ภาพที่ 3.6 การทดสอบบนกึ่งกลางโต๊ะทดสอบ

12. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของซีเมนต์มอดาร์ที่แผ่กระจายบนแท่นทดสอบจำนวน 4 จุด เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย จากนั้นคำนวณค่าการไหลแผ่จากสมการ

$$\text{การไหลแผ่ (\%)} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \times 100$$

D_0

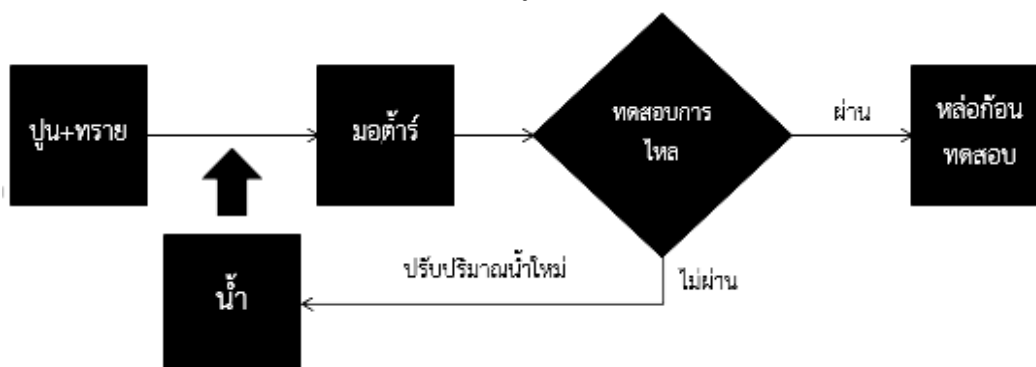
D_0 = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบ (10.10 ซม.)

D_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมอดาร์ที่กระจายบนแท่น

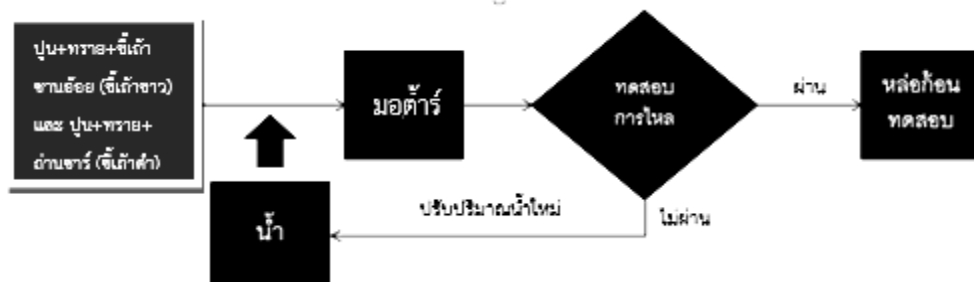
13. ถ้าค่าการไหลแผ่ไม่เป็นไปตามที่กำหนด ต้องปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและทำซ้ำตามขั้นตอน 1-6 จนกว่าค่าการไหลแผ่จะได้ตามมาตรฐานคือ $110 \pm 5\%$ และคำนวณความต้องการน้ำจากสมการ

$$\text{ความต้องการน้ำ (\%)} = \frac{100}{\frac{w}{B} \text{ (ควบคุม)}} \times \frac{w}{B} \text{ (ที่ต้องการคำนวณ)}$$

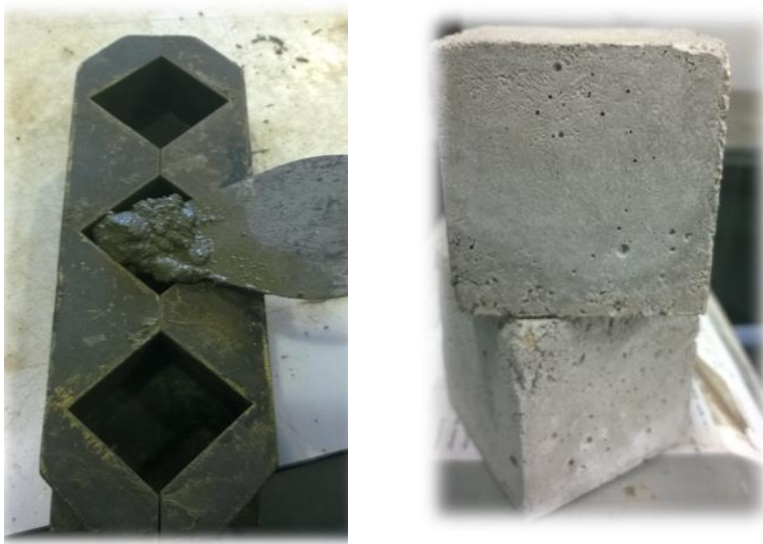
14. หากการทดสอบการไหลในข้างต้นไม่ผ่าน ต้องเปลี่ยนปริมาณน้ำและทำการผสมใหม่ ก่อนนำมาทดสอบการไหลอีกครั้งจนผ่านมาตรฐาน หลังจากทดสอบผ่านตามมาตรฐานแล้วจะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ทำให้ส่วนผสมอยู่ ณ สภาวะเหลว (Plastic Consistency)



15. ทดลองแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภท 1 ด้วยเถ้าขาน้อย 10-50% ตามลำดับผสมกับทราย และนำไปทดสอบการไหล ตามขั้นตอนที่ทำมาแล้วในตอนต้น เมื่อทดสอบการไหลผ่านแล้วจึงหล่อมอดาร์เพื่อนำไปทดสอบกำลังอัดเปรียบเทียบกับมอดาร์ซีเมนต์ควบคุมที่ทำมาแล้วในข้างต้นตามมาตรฐาน ASTM C-109 และทดสอบตามขั้นตอนข้างต้นอีกครั้งเพื่อนำมาเทียบกับ OPC



16. การทดสอบกำลังอัดจะใช้การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด เพื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมอดาร์ซีเมนต์ ที่ระยะเวลา 3, 7, 28 วัน และศึกษาแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัด เมื่อเวลาผ่านไปผสมส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานการไหลแผ่น ASTM C-230 และหล่อเข้าแบบหล่อมอดาร์ขนาด 5*5 ซม. หลังจากนั้นรอรเวลาและแกะแบบใน 24 ชม. หลังจากนั้นบ่มน้ำ 3, 7, 28 วัน ก่อนจะนำไปทดสอบกำลังอัด



ภาพที่ 3.7 การหล่อเข้าแบบหล่อมอดาร์ขนาด 5*5 cm

17. ทดสอบด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยเลือกด้านที่เรียบที่สุดวัดพื้นที่ของลูกมอดาร์ด้านที่รับแรง กดจนชิ้นงานเกิดการวิบัติ และบันทึกค่าแรงที่วัดได้ตอนวิบัติ



ภาพที่ 3.8 การทดสอบด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

18. ค่าแรงกดเฉลี่ยที่มอดาร์สามารถรับได้จากเครื่องกดต่อพื้นที่หน้าตัดที่ใช้รับแรงกดของก้อนมอดาร์จะทำให้ทราบกำลังอัดของมอดาร์ซีเมนต์

19. การพัฒนาซีเมนต์ขี้เถ้าขานอ้อย (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างส่วนผสมที่ใช้ต่อลูกบาศก์เมตร

ชุดทดสอบ	หิน (kg)	ทราย (kg)	น้ำ (kg)	ปูนซีเมนต์ (kg)	เถ้าขานอ้อย (kg)
คอนกรีตควบคุม	1040	742	200	349	-
แทนที่ 10%	1040	742	200	314.1	34.9
แทนที่ 20%	1040	742	200	279.2	69.8
แทนที่ 30%	1040	742	200	244.3	104.7
แทนที่ 40%	1040	742	200	209.4	139.6
แทนที่ 50%	1040	742	200	174.5	174.5

20. การพัฒนาซีเมนต์ขี้เถ้าขานอ้อย (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างส่วนผสมที่ใช้ต่อโมลทดสอบ ทรงกระบอก ขนาด 15*30 cm

ชุดทดสอบ	หิน (kg)	ทราย (kg)	น้ำ (kg)	ปูนซีเมนต์ (kg)	ซีเมนต์ขี้เถ้า (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) (kg)
คอนกรีตควบคุม	5.51	3.93	1.06	1.85	-
แทนที่ 10%	5.51	3.93	1.06	0.166	0.185
แทนที่ 20%	5.51	3.93	1.06	1.48	0.37
แทนที่ 30%	5.51	3.93	1.06	1.30	0.555
แทนที่ 40%	5.51	3.93	1.06	1.11	0.74
แทนที่ 50%	5.51	3.93	1.06	0.925	0.925

21. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างส่วนผสมที่ใช้ต่อโมลทดสอบ ทรงกระบอกขนาด 15*30 cm

1. ปูนซีเมนต์ประเภท 1 ทราย ขาง งานโครงสร้าง
2. หิน ปูน ทราย
3. ซีเมนต์ขี้เถ้า (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ตามมาตรฐานการเป็นวัสดุทดแทน
4. เครื่องผสมปูน
5. เครื่องทดสอบกำลังอัด
6. แบบหล่อลูกปูนทรงกระบอก $\varnothing 15 \times 30$ cm



ภาพที่ 3.9 โมลทดสอบขนาด $\varnothing 15 \times 30$ cm

7. วิธีการทดสอบ
 1. ล้างหินให้สะอาดด้วยน้ำเปล่าหลังจากนั้นทิ้งให้แห้งในอากาศ
 2. ชั่งส่วนผสม ปูน หิน ทราย และน้ำ ตามส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้แล้ว
 3. นำส่วนผสมที่ชั่งไว้แล้วลงผสมในเครื่องผสมปูน และเดินเครื่องผสม



ภาพที่ 3.10 ขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) และถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ)



ภาพที่ 3.11 การผสมคอนกรีตในเครื่องผสม

8. ตักคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วเทลงในแบบหล่อทรงกระบอก โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นใช้แท่งเหล็กตบเป็นจำนวน 25 ครั้ง หลังจากนั้นปาดให้เรียบ



ภาพที่ 3.12 เทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ

9. แกะแบบซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) แล้วบ่มคอนกรีตในน้ำ สะอาดก่อนนำมาทดสอบตามระยะเวลา 7 , 14 และ 28 วันตามลำดับ



ภาพที่ 3.13 แกะแบบซีเมนต์อ้อย (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)



ภาพที่ 3.14 คอนกรีตหลังจากแกะแบบและปัมน้ำ

10. เมื่อถึงระยะเวลาดทดสอบนำคอนกรีตขึ้นจากน้ำ หลังจากนั้นนำคอนกรีตเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด กดจนคอนกรีตเกิดการวิบัติและบันทึกค่ากำลังสูงสุดที่กดได้



ภาพที่ 3.15 แสดงวิธีการกดคอนกรีต และการวิบัติของคอนกรีต

11. แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) 10%-50% โดยน้ำหนักตามสูตรผสม และผสมคอนกรีต บ่มน้ำ และทดสอบตามวิธีที่กล่าวมาข้างต้น



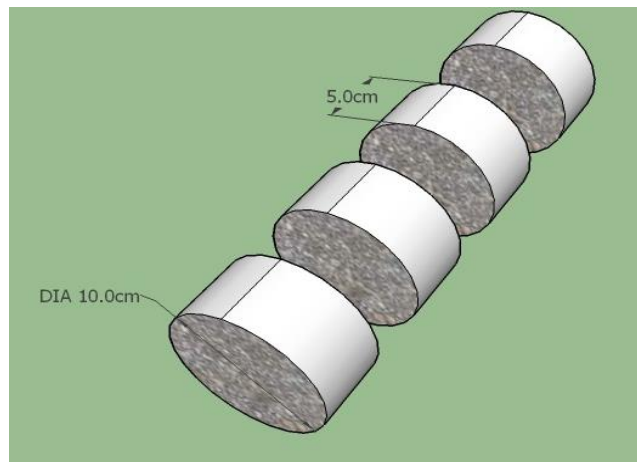
ภาพที่ 3.16 แสดงการเปรียบเทียบซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)

3.2.2 การทดสอบการต้านทานของคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ต่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายซัลเฟตในเนื้อคอนกรีตที่ระยะบ่มแช่ต่างๆ

1) การทดสอบคลอไรด์ในคอนกรีตใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3
มาตรฐานการทดสอบ : ASTM C144-81 “Standard Test Method for Acid-Soluble and Water-Soluble Chloride content in Concrete”

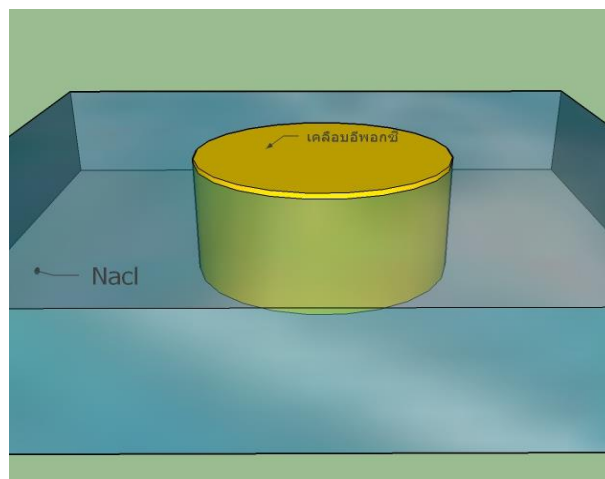
1. ชุดเครื่องมือทดสอบคลอไรด์
2. เครื่องชั่งละเอียด
3. สว่านไฟฟ้า
4. เครื่องผสมคอนกรีต
5. โมลทรงกระบอกขนาด 10 x 20 cm
6. สารละลายโซเดียมคลอไรด์
7. กาวอีพอกซี
8. วิธีการทดสอบ

1. ผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมคอนกรีต หล่อเป็นชิ้นทดสอบทรงกระบอก Dia 10 สูง 20 เซนติเมตร หลังจากถอดแบบแล้ว จากนั้นตัดแบ่งเป็น 4 ท่อนเท่า ๆ กัน



ภาพที่ 3.17 ชิ้นทดสอบทรงกระบอก

2. เคลือบด้านข้างและด้านบนชิ้นทดสอบด้วย กาวอีพ็อกซี เพื่อให้คลอไรด์ซึมเข้า ชิ้นงานเพียงด้านเดียวคือด้านล่างของชิ้นงาน หลังจากนั้น 7 วัน นำชิ้นงานแช่ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3



ภาพที่ 3.18 ชิ้นทดสอบด้วยกาวอีพ็อกซี

3. ทดสอบการซึมลึกของคลอไรด์โดยใช้เครื่องทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต เมื่อแช่ในน้ำได้ 30 และ 60 วัน ตามลำดับ

4. เจาะผิวคอนกรีตด้านที่ไม่ได้เคลือบอีพ็อกซีด้วยแบ่งความลึกเป็น 3 ช่วง โดยแบ่ง ผงคอนกรีตในแต่ละช่วงความลึกให้ชัดเจน



ภาพที่ 3.19 ทำการชั่งผงคอนกรีตของแต่ละความลึกผสมลงในสารเคมี

5. ทดสอบด้วยเครื่องมือ เพื่อหาปริมาณ Chloride ของผงตัวอย่าง



ภาพที่ 3.20 เครื่องมือทดสอบเพื่อหาปริมาณ Chloride

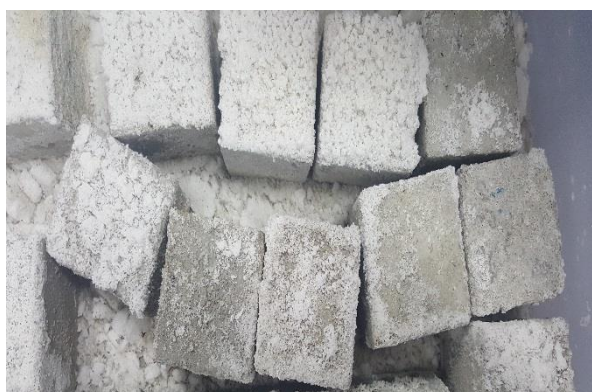
6. บันทึกผลการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ต่อการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ต่อสารละลายน้ำเกลือและสารละลายซัลเฟตในเนื้อคอนกรีตที่ระยะบ่มแช่ต่างๆ

1. ผสมมอร์ตาร์ซีเมนต์ตามส่วนผสมที่ได้ทดสอบการไหลด้วยโต๊ะแผ่ ตามที่เคยทดลองแล้วในการทดสอบกำลังอัด โดยแบ่งเป็นมอร์ตาร์ปกติที่ผสมปูนซีเมนต์ประเภท 1 และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนประเภท 1 ด้วยซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)

2. แกะแบบและนำมอร์ตาร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 5

3. นำก้อนมอร์ตาร์ขึ้นจากสารละลาย ชั่งน้ำหนักและทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก



ภาพที่ 3.21 มอร์ตาร์ที่นำขึ้นจากสารละลาย



ภาพที่ 3.22 เมื่อดำรงก้อนทดสอบเพื่อเอาคราบออก

4.ประเมินผลการทดสอบจากกำลังอัดของก้อนมอดาร์

[illegible]

Page 35

ส่วนรูปที่ 3.24 คือผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยที่นำเสนอใน งานวิจัยอ้อยและน้ำตาล (Thailand Cane and Sugar Research 2015) เมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม 2015 ณ โรงแรมรามการ์เด้นส์ โดยการนำผลผลิตคอนกรีตที่ผลิตจากขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) และถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) ซึ่งผลการทดลองที่ได้ เป็นที่น่าพอใจ



ภาพที่ 3.24 ผลผลิตคอนกรีตที่ผลิตจากขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) และถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) ที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) และถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) มาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เพื่อผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างโดยมุ่งการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของคอนกรีตที่เตรียมได้โดยศึกษาการต้านทานการดูดซับสารละลาย น้ำเกลือ และสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลาบ่มแช่ต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตและการตกค้างของสารละลายน้ำเกลือและสารละลายซัลเฟตในเนื้อคอนกรีตที่ระยะบ่มแช่ต่างๆ

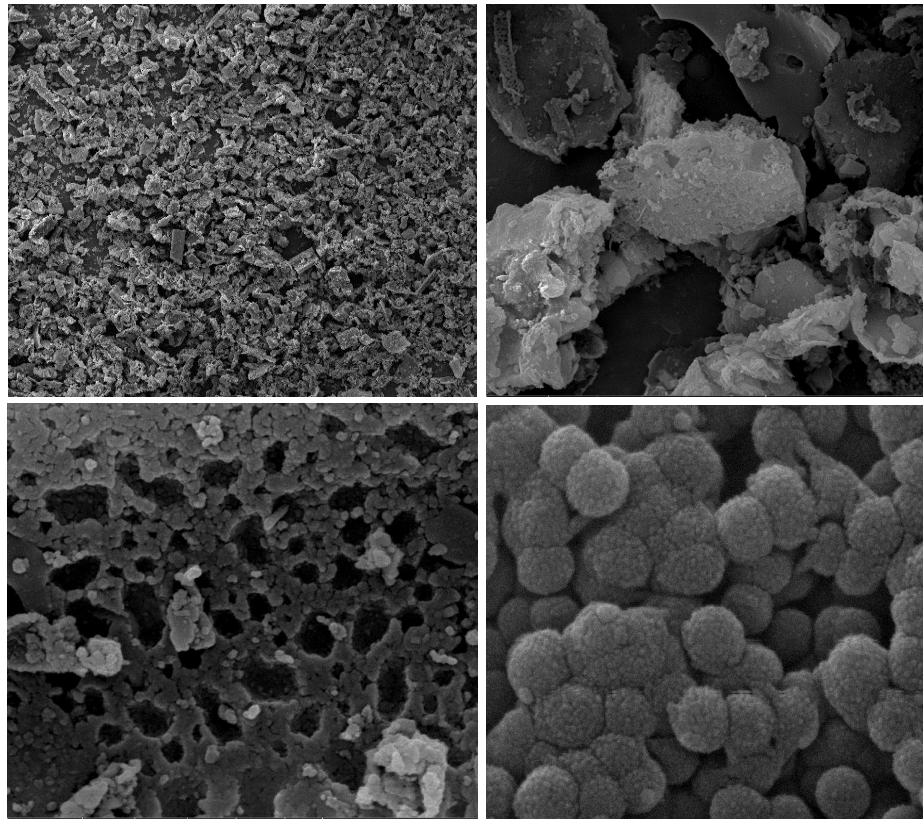
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) และ ถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ)

นำขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) และ ถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) โรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง จ.ราชบุรี ขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) เเผที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียสนำมาปรับความละเอียดโดยตะแกรงเบอร์ 325 และ ถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) เเผที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียสความละเอียดของอนุภาคังตะแกรงเบอร์ 325 มาศึกษาปริมาณคาร์บอนและซิลิกา โดยใช้เครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) แสดงดังภาพที่ 4.1

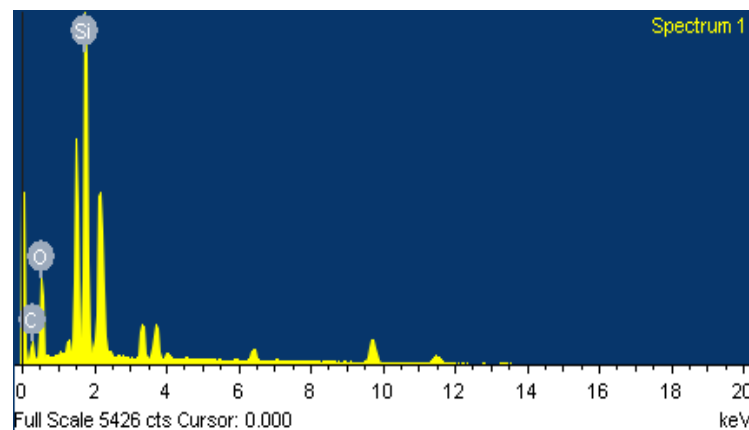


ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม (Spectrum) ของขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) และ ถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ)

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว)



ภาพที่ 4.2 ภาพ SEM ของขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) ทำการเผาในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิ:
800-1000 °C



ภาพที่ 4.3 Spectrum ของขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) ที่ได้จากการทำ EDX

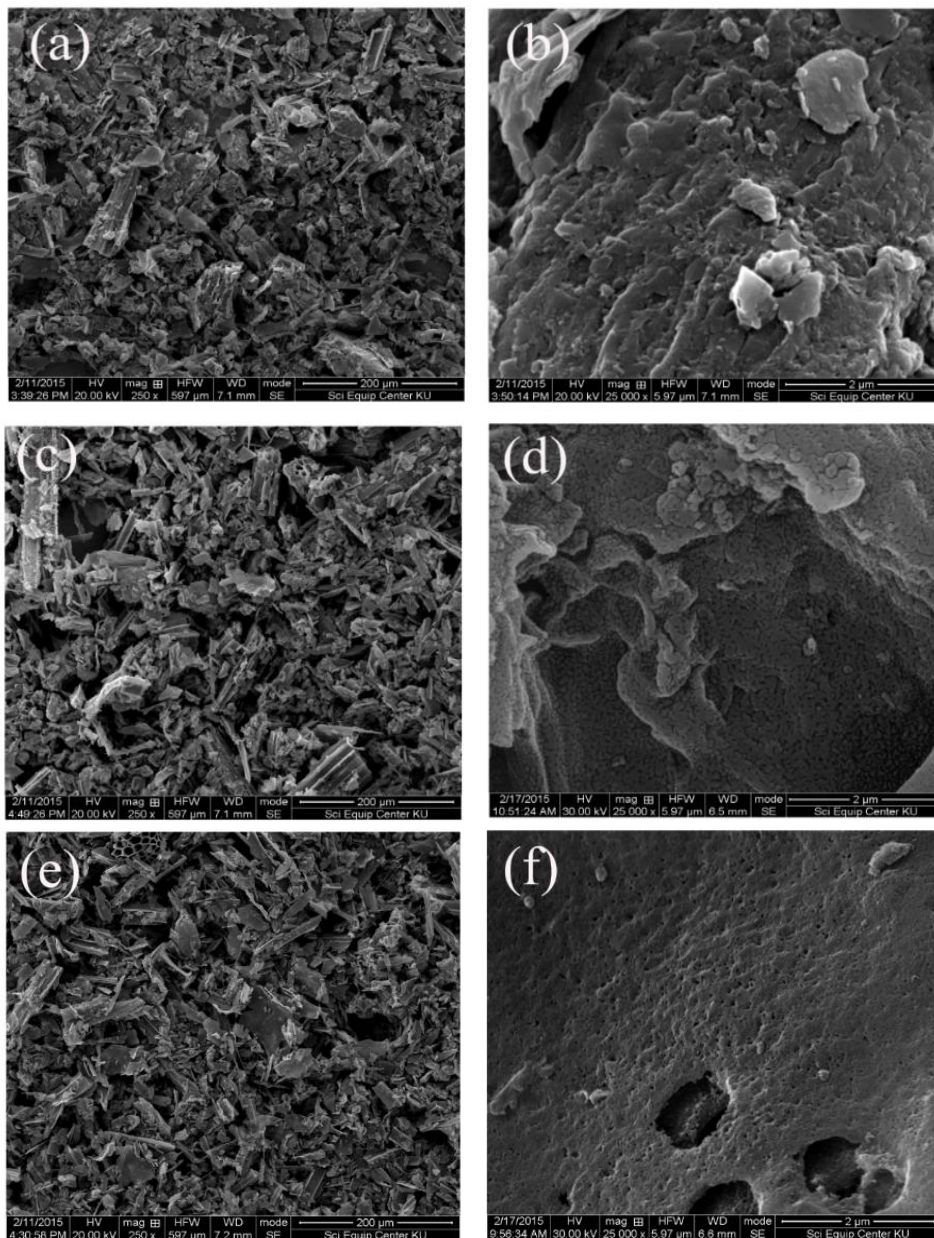
จากรูปที่ 4.3 SEM ขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) ทำการเผาในสภาวะอับอากาศอุณหภูมิ: 800-1000°C แสดงได้ ดังรูปที่ 4.2 จากรูปจะพบว่า ขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) มีลักษณะคล้ายๆ กัน แต่เมื่อเพิ่ม กำลังขยายจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 800-1000°C ขี้เถ้าขานอ้อย (ขี้เถ้าขาว) มีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยกว่าถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) ดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณธาตุต่างๆ และ Atomic percent ของซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 800-1000°C

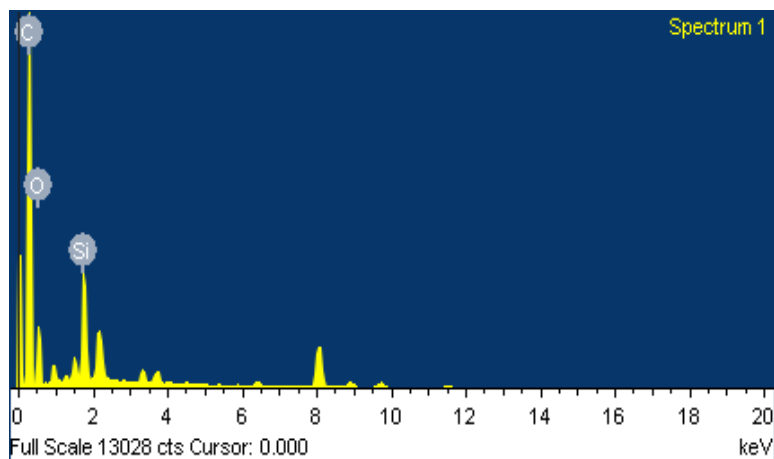
Temperature	800-1000°C
Element	Atomic %
C K	24.61
O K	33.48
Si K	41.91
Totals	100

ผลของ EDX นั้น จะพบว่า spectrum ของซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) ที่อุณหภูมิ (800-1000°C) มีลักษณะเหมือนกัน ดังรูปที่ 2 ส่วน Atomic % ของคาร์บอนในซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) เผาที่อุณหภูมิ 800-1000°C จะมีค่า 24.61% น้อยกว่าถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) คือ 87.98% มีปริมาณของออกซิเจนมากกว่า ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 33.48% และซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) 9.13 % และปริมาณของซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) มีซิลิกอน 41.91% มากกว่าถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) อยู่ที่ 2.88% แสดงดังตารางที่ 5

4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ)



ภาพที่ 4.4 ภาพ SEM ของถ่านชาร์(ขี้เถ้าดำ) ทำการเผาในสภาวะอับอากาศหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ: (a) 400 °C; (b) 500 °C และ (c) 600 °C เป็นเวลา 60 นาที



ภาพที่ 4.5 Spectrum ของถ่านชาร์ซานอ้อยที่ได้จากการทำ EDX

จากรูปที่ 4.5 SEM ของถ่านชาร์(ชี้เถ้าดำ) ทำการเผาในสภาวะอัดอากาศหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ: (a) 400 °C; (b) 500 °C และ (c) 600°C เป็นเวลา 60 นาที แสดงได้ดังภาพที่ 4.4 จากภาพจะพบว่า ถ่านชาร์(ชี้เถ้าดำ) เผาที่อุณหภูมิ 400 - 600°C ในภาพที่ 4.4 (a), (b) และ (c) นั้น มีลักษณะคล้ายๆ กัน แต่เมื่อเพิ่มกำลังขยายจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 400 °C ชานอ้อย เริ่มจะมีรูพรุนหรือมีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยมากแสดงดังภาพที่ 4.4 (b) แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 500 °C และ 600 °C ถ่านชาร์(ชี้เถ้าดำ) มีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (d) และ (f)

ตารางที่ 5 แสดงปริมาณธาตุต่างๆ และ Atomic percent ของชานอ้อยที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 - 600°C ที่ได้เป็นถ่านชาร์(ชี้เถ้าดำ)

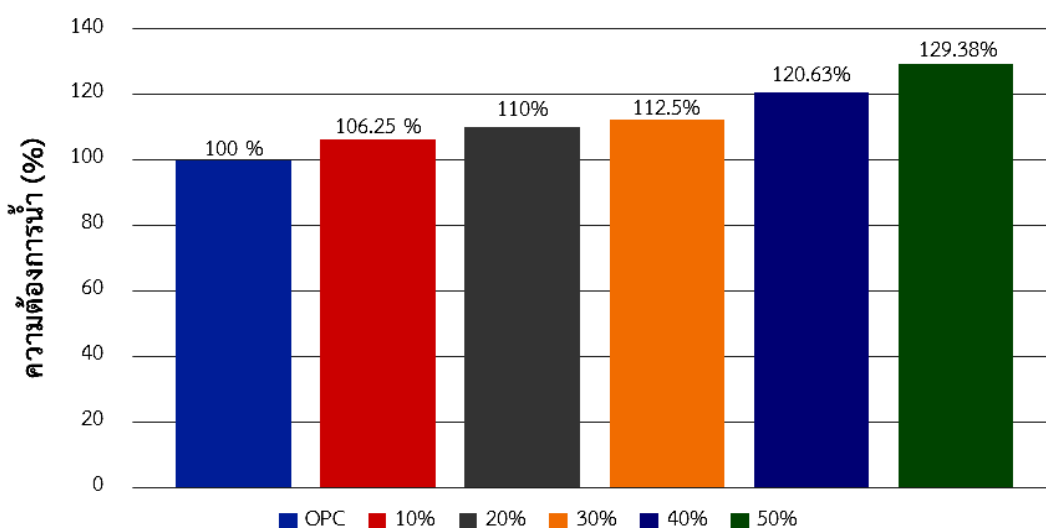
Temperature	400 °C	500 °C	600 °C
Element	Atomic %	Atomic %	Atomic %
C K	79.27	82.20	87.98
O K	17.25	13.95	9.13
Si K	3.47	3.85	2.88
Totals	100	100	100

ผลของ EDX นั้น จะพบว่า spectrum ของถ่านชาร์(ชี้เถ้าดำ) วัดในทุกอุณหภูมิ (400 - 600°C) มีลักษณะเหมือนกัน ดังรูปที่ 2 ส่วน Atomic % ของคาร์บอนในชานอ้อยเผาที่อุณหภูมิ 600°C จะมีค่าสูงสุด คือ 87.98% มีปริมาณของออกซิเจน 9.13 % และปริมาณของ ซิลิกอน 2.88% แสดงดังตารางที่ 5 ส่วน ปริมาณคาร์บอนในถ่านชาร์(ชี้เถ้าดำ) เผาที่อุณหภูมิ 400°C นั้น จะมีปริมาณน้อยกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 500°C และ 600°C จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การนำชานอ้อยมาอัดเป็นแท่งและเผาที่อุณหภูมิ 600°C นั้น จะได้ถ่านชาร์(ชี้เถ้าดำ) จะให้ผลดีที่สุด

จากผลการทดลอง เมื่อแทนที่ซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) ลงไปในมอร์ตาร์ซีเมนต์ ส่งผลให้การไหลลดน้อยลง และการไหลลดลงมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อผสมมากขึ้น ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณน้ำ เพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะไหลได้ตามมาตรฐาน ASTM C109 และพบว่ามอร์ตาร์ปกติ (opc) เมื่อถูกแทนที่ด้วยซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) 10-20% จะทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้นที่จะทำให้การไหลเป็นไปตามมาตรฐาน โดยการแทนที่ 10% จะทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์ต้องการน้ำเพิ่มขึ้นน้อยสุด คือ 106.25 % ตามตารางที่ 6 และหากแทนที่ซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) ไปจนถึง 50% ซีเมนต์ มอร์ตาร์จะมีความต้องการน้ำมากถึง 129.38 % ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการที่ซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว) มีความพรุนทำให้เมื่อแทนที่จึงมีความต้องการน้ำมากกว่าปกติ

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบอัตราการไหลแม่แทนที่ซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว)

ชนิด	ส่วนผสม		W/B	Flow (%)	ความต้องการน้ำ (%)
	น้ำ(g)	B			
OPC	160	260	0.615	110±5	100
10%	170	260	0.654	110±5	106.25
20%	176	260	0.677	110±5	110
30%	180	260	0.692	110±5	112.5
40%	193	260	0.742	110±5	120.625
50%	207	260	0.796	110±5	129.375



ภาพที่ 4.6 ค่าการทดสอบอัตราการไหลแม่แทนที่ซีเถ้าซานอ้อย (ซีเถ้าขาว)

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอดาร์ซีเมนต์ที่ 3 วัน

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 10%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	41.68	24.5	173.42
2	266	42.53	24.5	176.95
3	265	41.56	25	169.46
4	265	43.25	25	176.35
5	266	41.92	24.5	174.42
			เฉลี่ย	174.12

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 20%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	261	39.87	24.5	165.89
2	264	40.21	25	163.96
3	262	39.56	24.5	164.60
4	265	40.89	25	166.73
5	265	41.23	25	168.11
			เฉลี่ย	165.86

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 30%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	264	33.94	24.5	141.21
2	261	35.54	25	144.91
3	264	35.22	25	143.61
4	262	34.75	25	141.69
5	260	32.45	24.5	135.01
			เฉลี่ย	141.29

แทนที่ซี้เถ้าขานอ้อย (ซี้เถ้าขาว) 40%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	25.4	25	103.57
2	266	26.21	25	106.87
3	265	26.59	25	108.42
4	265	24.33	24.5	101.23
5	266	24.89	24.5	103.56
			เฉลี่ย	104.73

แทนที่ซี้เถ้าขานอ้อย (ซี้เถ้าขาว) 50%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	19.25	24.5	80.09
2	266	21.22	24.5	88.29
3	265	18.95	25	77.27
4	265	19.53	25	79.63
5	266	19.89	24.5	82.76
			เฉลี่ย	81.61

มอดาร์ควบคุม

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	264	52.54	24	223.16
2	266	54.13	25	220.71
3	263	52.69	24.5	219.23
4	266	53.62	25	218.63
5	265	53.89	24.5	224.22
			เฉลี่ย	221.19

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอดาร์ซีเมนต์ที่ 7 วัน

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 10%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	263	47.1	24.5	195.97
2	266	48.51	24.5	201.83
3	264	48.98	25	199.71
4	267	49.51	25	201.88
5	265	48.53	24.5	201.92
			เฉลี่ย	200.26

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 20%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	45.65	25	186.14
2	262	44.31	24.5	184.36
3	267	46.51	25	189.64
4	265	45.14	24.5	187.81
5	266	46.42	25	189.28
			เฉลี่ย	187.45

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 30%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	266	42.57	25	173.58
2	265	40.12	25	163.59
3	261	39.89	24.5	165.97
4	264	41.51	25	169.26
5	260	39.54	24.5	164.51
			เฉลี่ย	167.38

แท่นที่ขี้น้ำหนักอ้อย (ขี้น้ำหนัก) 40%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	266	37.91	25	154.58
2	262	36.91	24.5	153.57
3	262	37.55	25	153.11
4	266	38.52	25	157.06
5	265	36.52	24.5	151.95
			เฉลี่ย	154.05

แท่นที่ขี้น้ำหนักอ้อย (ขี้น้ำหนัก) 50%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	32.36	25	131.95
2	261	31.45	24.5	130.85
3	265	32.89	25	134.11
4	260	31.79	24.5	132.27
5	266	33.75	25	137.61
			เฉลี่ย	133.36

มอดาร์ควบคุม

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	264	65.5	24	278.20
2	266	71.23	25	290.44
3	263	69.35	24.5	288.54
4	266	70.41	25	287.09
5	265	69.83	24.5	290.54
			เฉลี่ย	286.96

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอดาร์ซีเมนต์ที่ 28 วัน

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 10%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	88.83	24.5	369.59
2	266	90.02	24.5	374.54
3	267	90.23	25	367.91
4	266	91.22	25	371.95
5	264	89.95	24.5	374.25
			เฉลี่ย	371.65

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 20%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	266	69.78	24.5	290.33
2	268	70.12	25	285.91
3	267	69.23	24.5	288.04
4	266	71.45	25	291.34
5	267	73.21	25	298.51
			เฉลี่ย	290.83

แทนที่ซีเถ้าขาน้อย (ซีเถ้าขาว) 30%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	263	62.24	24.5	258.96
2	266	63.28	25	258.02
3	264	64.35	25	262.39
4	264	61.79	24.5	257.09
5	265	62.86	24.5	261.54
			เฉลี่ย	259.60

แทนที่ซี่เถ้าซานอ้อย (ซี่เถ้าขาว) 40%

ชั้นทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	57.22	25	233.31
2	266	56.21	24.5	233.87
3	265	57.59	25	234.82
4	265	57.44	25	234.21
5	266	58.01	25	236.53
			เฉลี่ย	234.55

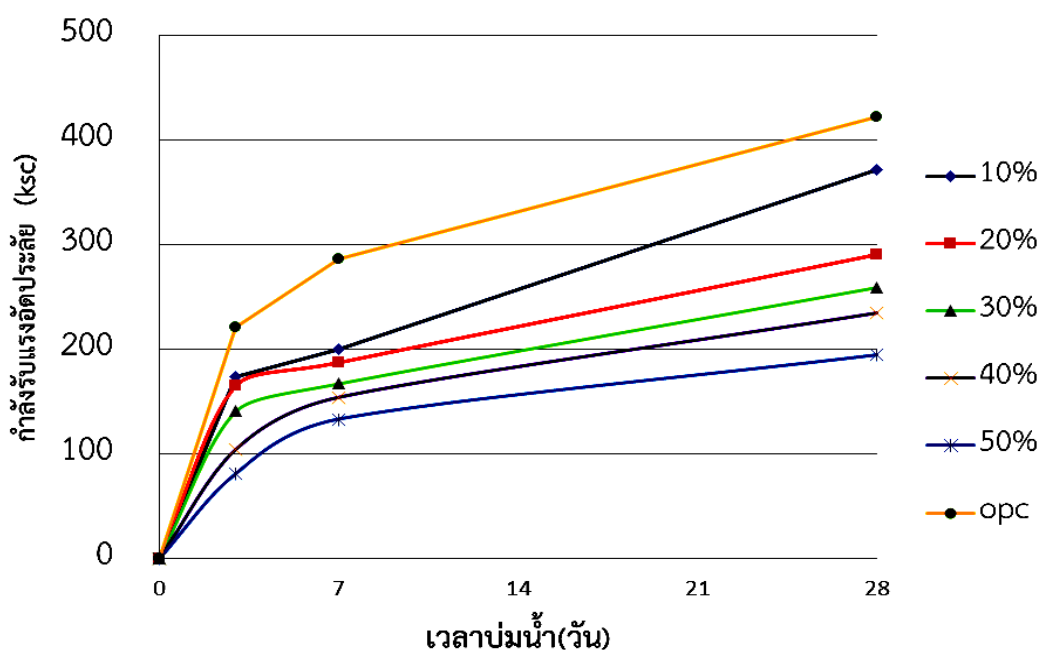
แทนที่ซี่เถ้าซานอ้อย (ซี่เถ้าขาว) 50%

ชั้นทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	260	45.66	24.5	189.98
2	261	50.23	25	204.81
3	264	46.78	25	190.74
4	263	46.23	24.5	192.35
5	261	46.97	24.5	195.43
			เฉลี่ย	194.66

มอดาร์ควคุม

ชั้นทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	264	100.56	24	427.12
2	266	101.35	25	413.25
3	263	102.89	24.5	428.09
4	266	103.56	25	422.26
5	265	100.76	24.5	419.23
			เฉลี่ย	421.99

จากผลการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว) ลงในมอดาร์ (ปูนซีเมนต์+ทราย+น้ำ) ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10-50% เทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ และนำไปทดสอบการไหลบนโต๊ะแม่โดยทดลองแปรผันปริมาณน้ำเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้การไหลของมอดาร์เป็นไปตามมาตรฐาน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว) มากขึ้น มอดาร์ยังมีความต้องการน้ำมากขึ้น เพื่อให้การไหลเป็นไปตามมาตรฐาน หลังจากได้ส่วนผสมมอดาร์ที่ผ่านการทดสอบการไหลแล้ว นำส่วนผสมนั้นมาผสมใหม่เพื่อหล่อเข้าแบบขนาด 5*5*5 cm และนำไปบ่มน้ำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ 3,7,28 วัน โดยผลการทดสอบพบว่า เมื่อแทนที่ซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว) ที่ 10 % ก้อนทดสอบจะมีความสามารถในการรับกำลังอัดในช่วงต้นที่ต่ำเมื่อเทียบกับมอดาร์ควบคุม แต่เมื่อเวลาผ่านไป ก้อนทดสอบมีการพัฒนากำลังอัดตามเวลาที่ดี โดยที่ 28 วัน มอดาร์ที่ถูกแทนที่ 10% มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอดาร์ควบคุมและมีแนวโน้มที่กำลังอัดจะเทียบเท่า หรือสูงกว่ามอดาร์ควบคุมได้ในอนาคต แต่หากแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว) มากขึ้นเป็น 20-50% ดังภาพที่ 4.7 กำลังอัดของก้อนทดสอบนั้นลดต่ำลงมาก และมีการพัฒนากำลังอัดตามเวลาที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับมอดาร์ควบคุม และมอดาร์ที่แทนที่ 10 %

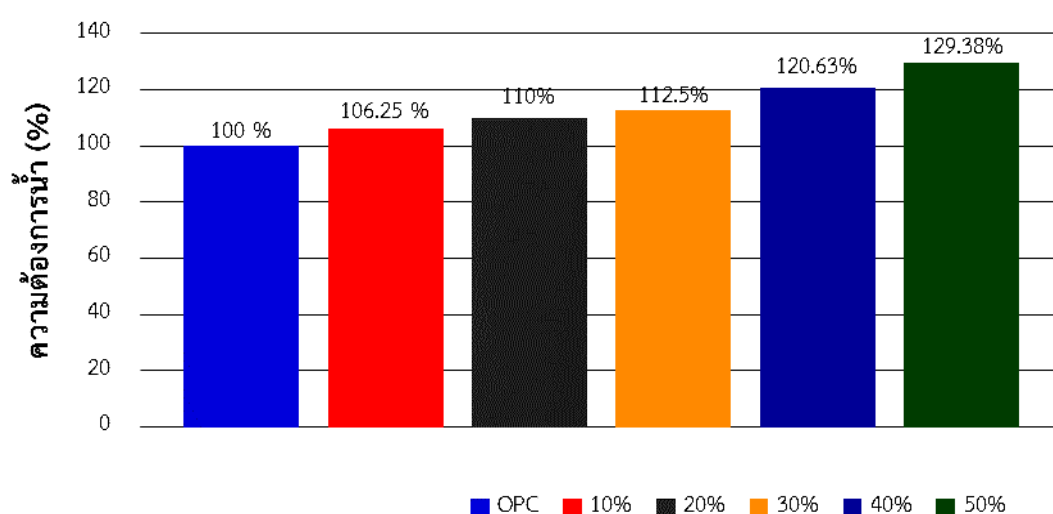


ภาพที่ 4.7 ค่าผลการทดสอบกำลังอัดของแทนที่ซีเถ้าขานอ้อย (ซีเถ้าขาว)

จากการทดลอง เมื่อแทนที่ถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ) ลงไปในมอร์ตาร์ซีเมนต์ ส่งผลให้การไหลน้อยขึ้น และการไหลน้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อผสมถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ) มากขึ้น ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณน้ำ เพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะไหลได้ตามมาตรฐาน ASTM C109 แต่ในการแทนที่ถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ) ทำให้ค่าการไหลแผ่จนเกินตามมาตรฐานคือ $110 \pm 5\%$ เพราะถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ) ต้องการน้ำมากตั้งแต่ 10-50% และมอร์ตาร์ปกติ (opc) เมื่อถูกแทนที่ด้วยถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ) 10-20% จะทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้นที่จะทำให้การไหลเป็นไปตามมาตรฐาน โดยการแทนที่ 10% จะทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์ต้องการน้ำเพิ่มขึ้นน้อยสุด คือ 106.25 % และหากแทนที่ถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ) ไปจนถึง 50% ซีเมนต์มอร์ตาร์จะมีความต้องการน้ำมากถึง 239.38% ดังตารางที่ 10 ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการที่ถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ) มีความพรุนทำให้เมื่อแทนที่จึงมีความต้องการน้ำมากกว่าปกติ

ตารางที่ 10 แสดงผลการทดสอบอัตราการไหลแผ่แทนที่ถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ)

ชนิด	ส่วนผสม		W/B	Flow (%)	ความต้องการน้ำ (%)
	น้ำ(g)	B			
OPC	160	260	0.615	110 ± 5	100
10%	170	260	0.654	110 ± 5	106.25
20%	191	260	0.735	110 ± 5	119
30%	265	260	1.019	110 ± 5	165.63
40%	350	260	1.346	110 ± 5	218.75
50%	383	260	1.473	110 ± 5	239.38



ภาพที่ 4.8 ค่าการทดสอบอัตราการไหลแผ่แทนที่ถ่านชาร์ (ซีไถ้ดำ)

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ 3 วัน

แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	260	39.80	24	169.22
2	265	41	24.5	170.76
3	264	40.5	25	165.31
4	258	41.85	24	177.93
5	261	44	25	179.59
			เฉลี่ย	172.56

แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 20%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	266	25.00	25	102.04
2	265	26.7	24	113.52
3	268	21.8	24.5	90.80
4	260	27.95	25	114.08
5	261	28	25	114.29
			เฉลี่ย	106.94

แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 30%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	267	15.00	24.5	62.47
2	260	18.5	25	75.51
3	261	17.53	24.5	73.01
4	264	18.69	25	76.29
5	258	13.1	24.5	54.56
			เฉลี่ย	68.37

แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 40%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	261	10.00	24.5	41.65
2	260	9	25	36.73
3	258	10	24.5	41.65
4	255	8	25	32.65
5	259	9	24.5	37.48
			เฉลี่ย	38.03

มอร์ต้าควบคุม

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	264	52.54	24	223.16
2	266	54.13	25	220.71
3	263	52.69	24.5	219.23
4	266	53.62	25	218.63
5	265	53.89	24.5	224.22
			เฉลี่ย	221.19

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าซีเมนต์ที่ 7 วัน

แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	266	50.48	24.5	210.25
2	261	49.75	25	203.06
3	263	43.25	25	176.53
4	266	54.86	24	233.25
5	265	47.85	24.5	199.29
			เฉลี่ย	204.48

แท่นที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 20%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	266	39.10	25	159.59
2	261	41.5	24	176.45
3	263	44.5	24.5	185.34
4	266	43.95	24	186.86
5	265	43.5	24.5	181.17
			เฉลี่ย	177.88

แท่นที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 30%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	21.50	25	87.76
2	268	22.8	24.5	94.96
3	264	19.5	25	79.59
4	265	23.45	25	95.71
5	260	18.5	24.5	77.05
			เฉลี่ย	87.01

แท่นที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 40%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	265	15.00	25	61.22
2	268	14.59	24.5	60.77
3	264	12.75	25	52.04
4	265	11.58	25	47.27
5	260	14.15	24.5	58.93
			เฉลี่ย	56.05

มอร์ตาร์ควบคุม

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	264	65.5	24	278.2
2	266	71.23	25	290.44
3	263	69.35	24.5	288.54
4	266	70.41	25	287.09
5	265	69.83	24.5	290.54
			เฉลี่ย	286.96

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่ 28 วัน

แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	260	77.80	25	317.55
2	265	75.46	24.5	314.29
3	264	79.54	25	324.65
4	258	81.43	24	346.22
5	261	85.12	24.5	354.52
			เฉลี่ย	331.44

แทนที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 20%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	260	65.45	24.5	272.59
2	265	70.15	25	286.33
3	264	68.7	25	280.41
4	258	67.58	24	287.33
5	261	71.54	25	292.00
			เฉลี่ย	283.73

แท่นที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 30%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	261	45.58	25	186.04
2	265	49.5	25	202.04
3	265	48.75	25	198.98
4	267	41.45	24	176.23
5	266	51.86	25	211.67
			เฉลี่ย	194.99

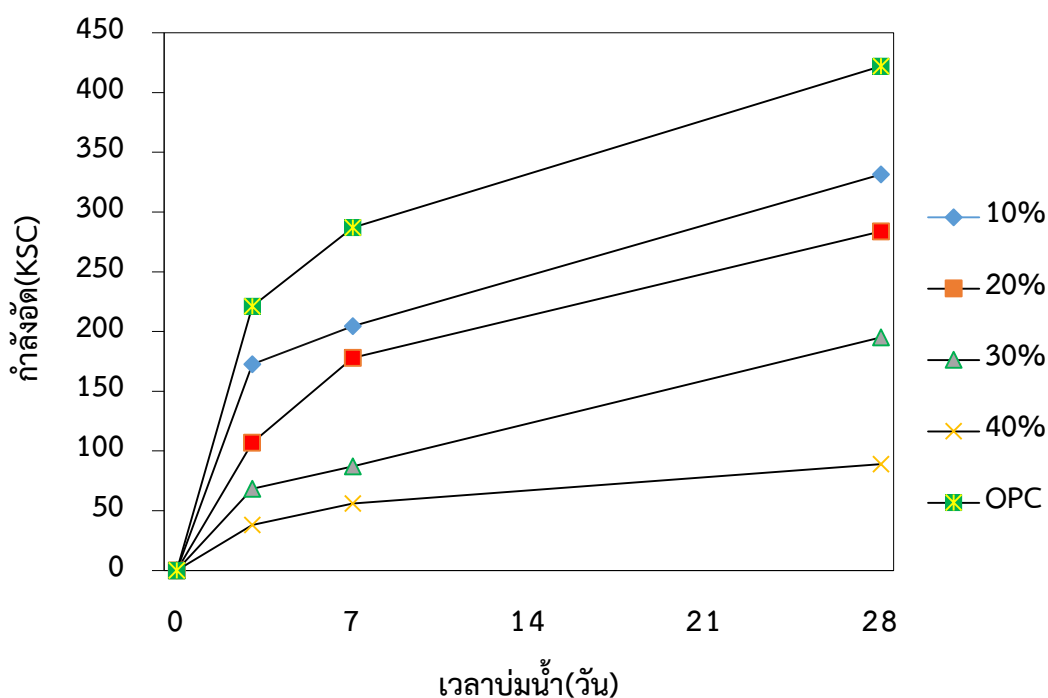
แท่นที่ถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 40%

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	260	19.50	24	82.91
2	259	20.14	25	82.20
3	265	23.78	25	97.06
4	260	21.5	24	91.41
5	264	22.45	25	91.63
			เฉลี่ย	89.04

มอร์ตาร์ควบคุม

ขั้นตอนทดสอบ	น้ำหนัก(g)	แรงกด(KN)	พื้นที่(cm ²)	กำลัง(ksc)
1	264	100.56	24	427.12
2	266	101.35	25	413.25
3	263	102.89	24.5	428.09
4	266	103.56	25	422.26
5	265	100.76	24.5	419.23
			เฉลี่ย	421.99

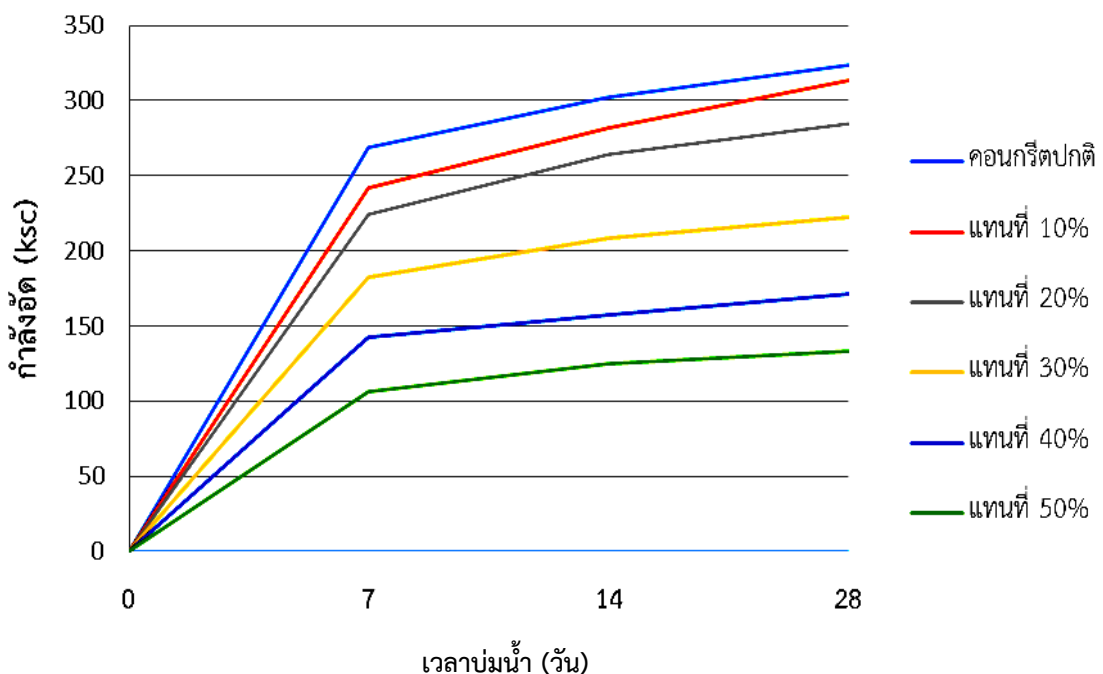
จากผลการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) ลงในมอร์ตาร์ (ปูนซีเมนต์+ทราย+น้ำ) ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10-50% เทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ และนำไปทดสอบการไหลบนโต๊ะแผ่โดยทดลองแปรผันปริมาณน้ำเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้การไหลของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) มากขึ้น มอร์ตาร์ยังมีความต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อให้การไหลเป็นไปตามมาตรฐาน หลังจากได้ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ผ่านการทดสอบการไหลแล้ว นำส่วนผสมนั้นมาผสมใหม่เพื่อหล่อเข้าแบบขนาด 5*5*5 cm และนำไปบ่มน้ำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ 3,7 วันโดยผลการทดสอบพบว่า เมื่อแทนที่ถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) ที่ 10 % ก่อนทดสอบจะมีความสามารถในการรับกำลังอัดในช่วงต้นที่ต่ำเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม แต่เมื่อเวลาผ่านไป ก่อนทดสอบมีการพัฒนากำลังอัดตามเวลาที่ดี โดยที่ 7 วัน มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ 10% ดังภาพที่ 4.9 มีค่ากำลังอัดต่ำมาก แต่หากแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) มากขึ้นเป็น 20-30% กำลังอัดของก้อนทดสอบนั้นลดต่ำลงมาก



ภาพที่ 4.9 ค่าผลการทดสอบกำลังอัดของแทนที่ถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ)

4.2. บันทึกผลและเปรียบเทียบกำลังอัดตามเวลาเพื่อผลิตคอนกรีตซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้างส่วนผสมที่ใช้ต่อโมลทดสอบทรงกระบอกขนาด 15*30 cm

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) คอนกรีตจะมีกำลังลดต่ำลงจากคอนกรีตปกติ โดยหากแทนที่ 10-20 % กำลังอัดจะลดลงจากคอนกรีตปกติเล็กน้อย มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดตามเวลาใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) เพิ่มขึ้น 30-50% กำลังอัดของคอนกรีตจะลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และมีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดตามเวลาที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ดังแสดงในภาพที่ 4.10

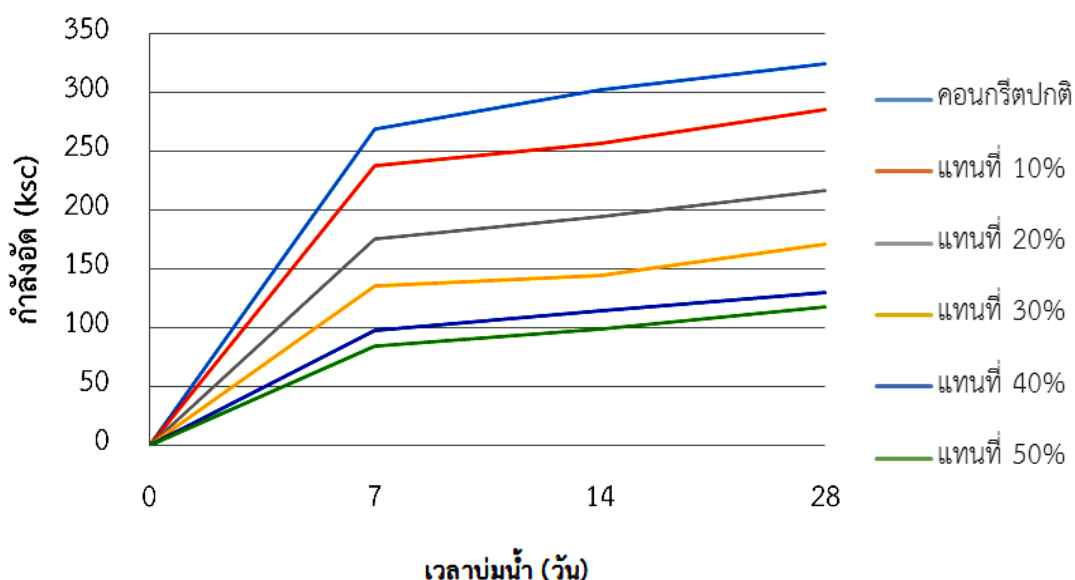


ภาพที่ 4.10 คอนกรีตซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง

4.3 บันทึกผลและเปรียบเทียบกำลังอัดตามเวลาเพื่อผลิตคอนกรีตถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) ที่ไม่ใช่คอนกรีต โครงสร้างส่วนผสมที่ใช้ต่อโมลทดสอบทรงกระบอกขนาด 15*30 cm

จากรูปที่ 4.11 เมื่อทดลองผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านชาร์ (เถ้าดำ) กำลังอัดตามเวลามีค่าลดลงจากคอนกรีตปกติ และต่ำกว่าคอนกรีตผสมซีเถ้าขาวอ้อย (เถ้าขาว) เล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็น 20-50% ค่ากำลังอัดที่ได้จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และมีแนวโน้มการพัฒนากำลังที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซีเถ้าขาวอ้อย (เถ้าขาว)

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 สรุปผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตผสมซีเถ้าขาวอ้อย (ซีเถ้าขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (เถ้าดำ) มีการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำในช่วงต้น เนื่องจากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าทั้ง 2 ชนิด ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นลดลง ประกอบกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นช้า ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงต้นนั้นต่ำ แต่เมื่อบ่มคอนกรีตในน้ำผ่านไป 28 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมซีเถ้าขาวอ้อย (ซีเถ้าขาว) ที่ 10% นั้นมีการพัฒนากำลังอัดจนใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ และมีแนวโน้มที่กำลังอัดอาจจะสูงกว่าคอนกรีตปกติในอนาคต ส่วนคอนกรีตผสมถ่านชาร์(เถ้าดำ)มีการพัฒนากำลังอัดตามเวลาที่ต่ำกว่าคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซีเถ้าขาวอ้อย (ซีเถ้าขาว) เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าขาวอ้อยทั้ง 2 ชนิด นั้นเกิดขึ้นสมบูรณ์แล้ว เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน แต่หากแทนที่ในสัดส่วนที่มากเกินไปจะส่งผลเสียกับคอนกรีต คือทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังที่ต่ำ และรับกำลังอัดได้น้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์เพราะมีวัสดุทดแทนมากเกินไป



ภาพที่ 4.11 คอนกรีตถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) ที่ไม่ใช่คอนกรีตโครงสร้าง

4.4 การทดสอบคลอไรด์ในคอนกรีตทำจากซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 มาตรฐานการทดสอบ : ASTM C144-81 “Standard Test Method for Acid-Soluble and Water-Soluble Chloride content in Concrete”

ตารางที่ 14 คอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) 30 วัน

ชนิดตัวอย่าง	ระยะจากผิว(เซนติเมตร)		
	0 - 2	3- 4	5
OPC	0.01	0.008	0.008
แทนที่ 10	0.011	0.009	0.008
แทนที่ 20	0.013	0.01	0.009
แทนที่ 30	0.015	0.012	0.009
แทนที่ 40	0.016	0.013	0.01
แทนที่ 50	0.017	0.014	0.01

ตารางที่ 15 คอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) 60 วัน

ชนิดตัวอย่าง	ระยะจากผิว(เซนติเมตร)		
	0-2	3-เม.ย.	5
OPC	0.024	0.011	0.01
แทนที่ 10	0.025	0.012	0.01
แทนที่ 20	0.026	0.013	0.012
แทนที่ 30	0.029	0.015	0.013
แทนที่ 40	0.029	0.017	0.014
แทนที่ 50	0.03	0.018	0.016

ตารางที่ 16 คอนกรีตผสมถ่านชาร์ (เถ้าดำ) 30 วัน

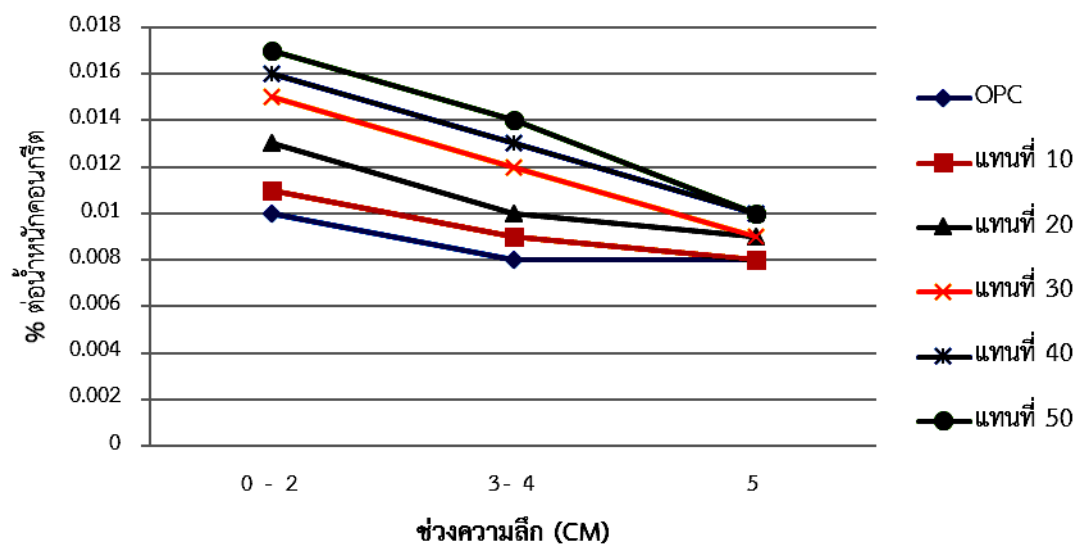
ชนิดตัวอย่าง	ระยะจากผิว(เซนติเมตร)		
	0-2	3-เม.ย.	5
OPC	0.01	0.008	0.008
แทนที่ 10	0.012	0.01	0.009
แทนที่ 20	0.014	0.012	0.01
แทนที่ 30	0.016	0.014	0.011
แทนที่ 40	0.018	0.015	0.012
แทนที่ 50	0.019	0.017	0.013

ตารางที่ 17 คอนกรีตผสมถ่านชาร์ (เถ้าดำ) 60 วัน

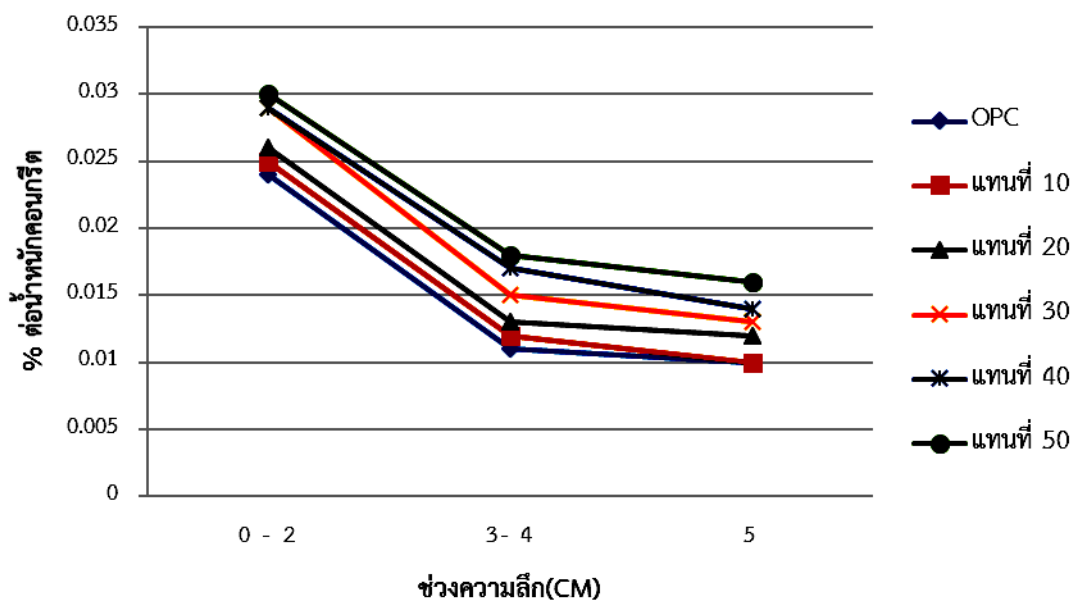
ชนิดตัวอย่าง	ระยะจากผิว(เซนติเมตร)		
	0-2	3-เม.ย.	5
OPC	0.024	0.011	0.01
แทนที่ 10	0.027	0.013	0.012
แทนที่ 20	0.028	0.014	0.013
แทนที่ 30	0.03	0.017	0.014
แทนที่ 40	0.032	0.018	0.016
แทนที่ 50	0.033	0.019	0.017

จากการทดลองพบว่า คอนกรีตปกติมี การเจือปนของคลอไรด์ในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตผสมซีเมนต์ขี้เถ้า (ซีเมนต์ขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) โดยปริมาณคลอไรด์จะพบมากที่สุดบริเวณผิวของคอนกรีต และจะลดน้อยลงเมื่อความลึกมากขึ้น โดยเมื่อผสมซีเมนต์ขี้เถ้า (ซีเมนต์ขาว) ลงไปในคอนกรีตที่ เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10% ปริมาณคลอไรด์ที่ผสมอยู่จะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะ คอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซีเมนต์ขี้เถ้า (ซีเมนต์ขาว) มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน คอนกรีตมีกำลังสูง ช่องว่างในคอนกรีตต่ำ เป็นเหตุให้คลอ

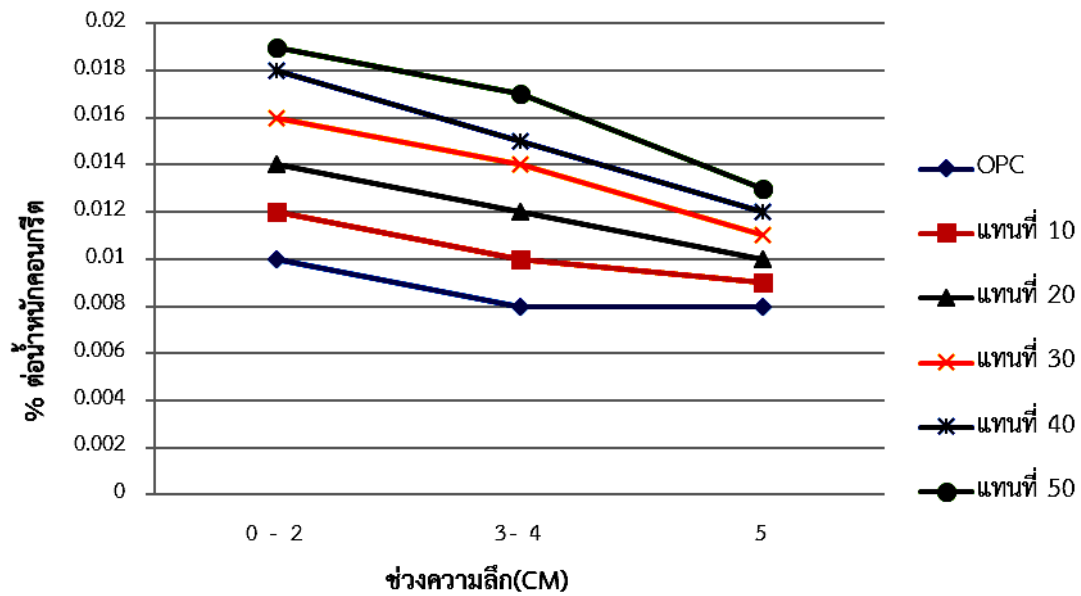
ไรต์แซกซิมได้น้อย แตกต่างกับคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าขี้เถ้า (ซีเมนต์ขาว) และเถ้าขี้เถ้า (ซีเมนต์ดำ) ตั้งแต่ 20% มีกำลังอัดในช่วงต้นต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังเกิดไม่สมบูรณ์ ทำให้อาจยังมีช่องว่างขนาดเล็กภายในแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้มากกว่าคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมเถ้าขี้เถ้า 10 % ดังภาพที่ 4.12 - 4.15



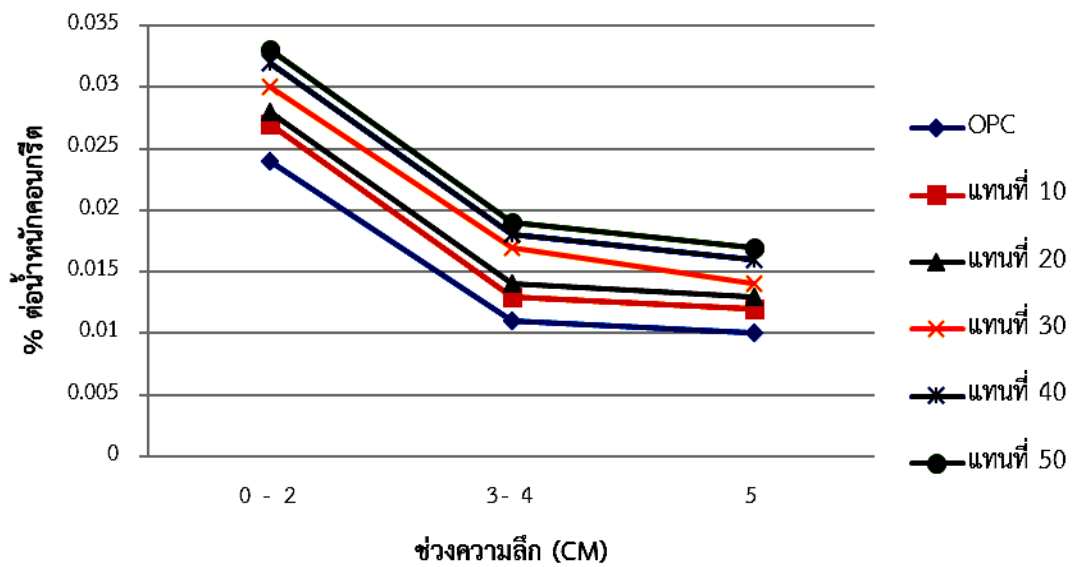
ภาพที่ 4.12 คอนกรีตผสมซีเมนต์เถ้าขี้เถ้า (ซีเมนต์ขาว) 30 วัน



ภาพที่ 4.13 คอนกรีตผสมซีเมนต์เถ้าขี้เถ้า (ซีเมนต์ขาว) 60 วัน



ภาพที่ 4.14 คอนกรีตผสมถ่านชาร์ (เถ้าดำ) 30 วัน



ภาพที่ 4.15 คอนกรีตผสมถ่านชาร์ (เถ้าดำ) 60 วัน

4.5 การทดสอบคุณสมบัติของมอดาร์ซีเมนต์ต่อการต้านทานซัลเฟต ของคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์
อ้อย (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ต่อซัลเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 5

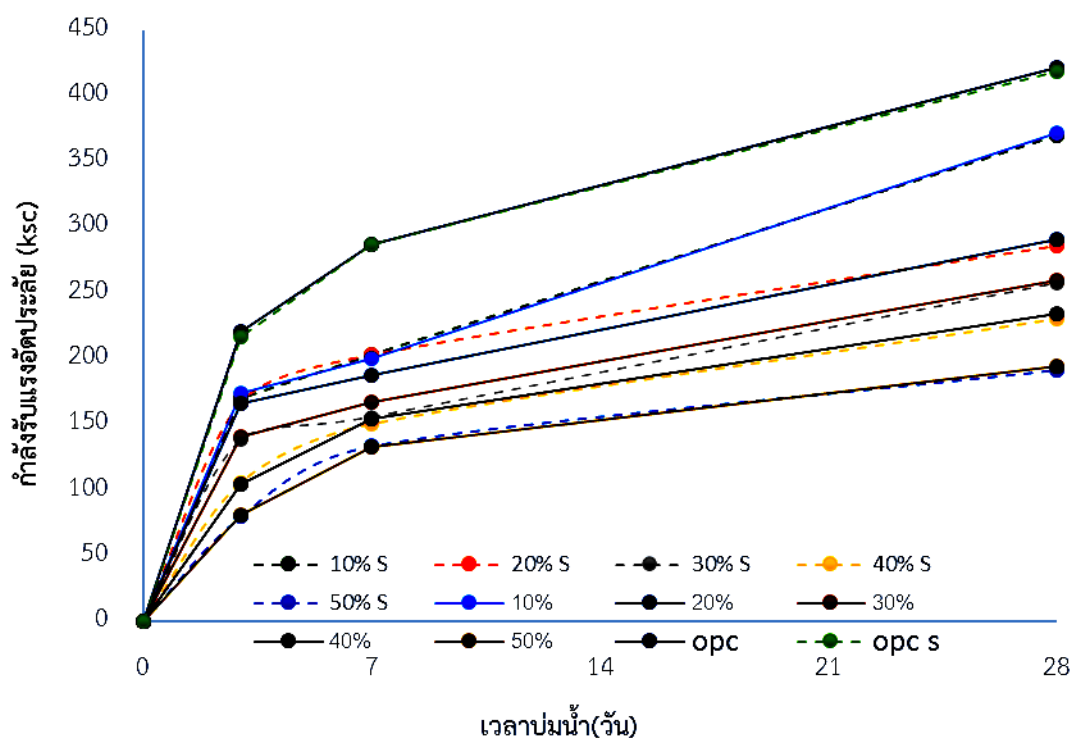
ตารางที่ 18 คอนกรีตคอนกรีตเถ้าขานอ้อย ระหว่างแซซัลเฟต และไม่แซซัลเฟต

แทนที่	คอนกรีตคอนกรีตเถ้าขานอ้อย ระหว่างแซซัลเฟต และไม่แซซัลเฟต					
	ไม่แซ (วันบ่ม)			แซซัลเฟต (วันบ่ม)		
	3	7	28	3	7	28
opc	221.19	286.96	421.99	217.01	287.00	418.65
10%	174.12	200.26	371.65	169.89	202.79	370.46
20%	165.86	187.45	290.83	167.58	203.35	286.55
30%	141.29	167.38	259.60	138.77	155.85	257.79
40%	104.73	154.05	234.55	106.17	150.53	230.74
50%	81.61	133.36	194.66	79.87	133.71	191.83

ตารางที่ 19 คอนกรีตถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ระหว่างแซซัลเฟต และไม่แซซัลเฟต

แทนที่	คอนกรีตถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ระหว่างแซซัลเฟต และไม่แซซัลเฟต					
	ไม่แซ (วันบ่ม)			แซซัลเฟต (วันบ่ม)		
	3	7	28	3	7	28
opc	221.19	286.96	421.99	217.01	287.00	418.65
10%	172.56	204.48	331.44	167.51	202.45	323.51
20%	106.94	177.88	283.73	104.73	150.22	279.61
30%	68.37	87.01	194.99	66.16	85.97	191.64
40%	38.03	56.05	89.04	37.44	51.69	85.93

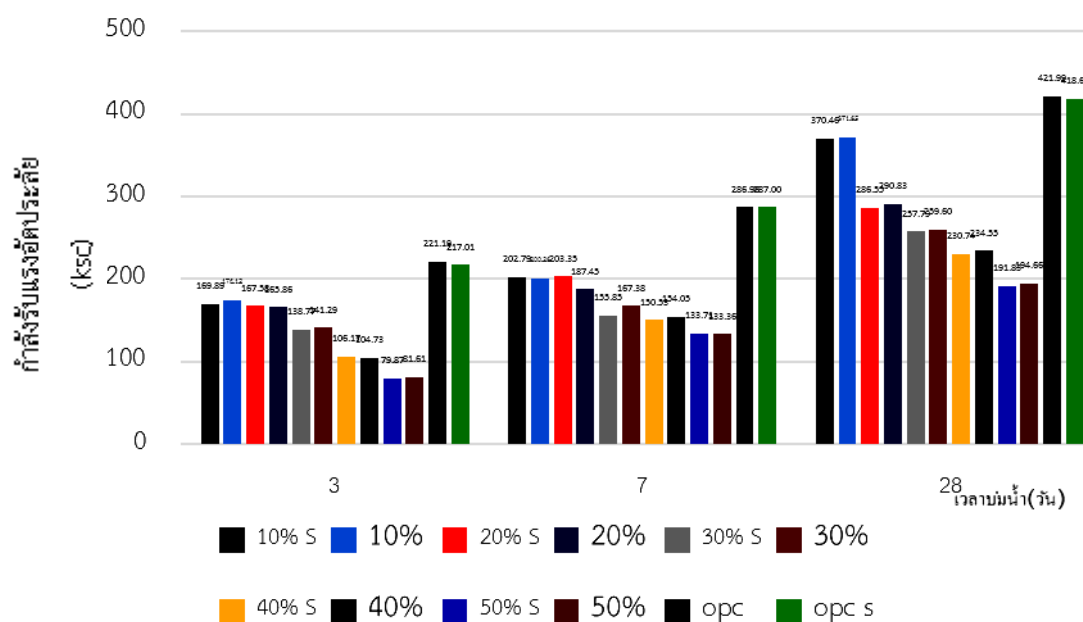
จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของก้อนมอตาซีเมนต์เมื่อนำไปแช่สารละลายซัลเฟตโดยมอตาควบคุม (ไม่ผสมซันอ้อย) มีกำลังอัดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการบ่มในน้ำ และเมื่อแทนที่ด้วยซีเถ้าซันอ้อย (ซีเถ้าขาว) 10% และนำไปแช่ในสารละลายซัลเฟตพบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นกันเมื่อเทียบกับการบ่มในน้ำ และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็น 20-50% กำลังอัดของก้อนมอตาซีเมนต์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเทียบกับการบ่มแช่ในน้ำปกติ มอตาซีเมนต์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับการบ่มแช่ในน้ำปกติเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.16



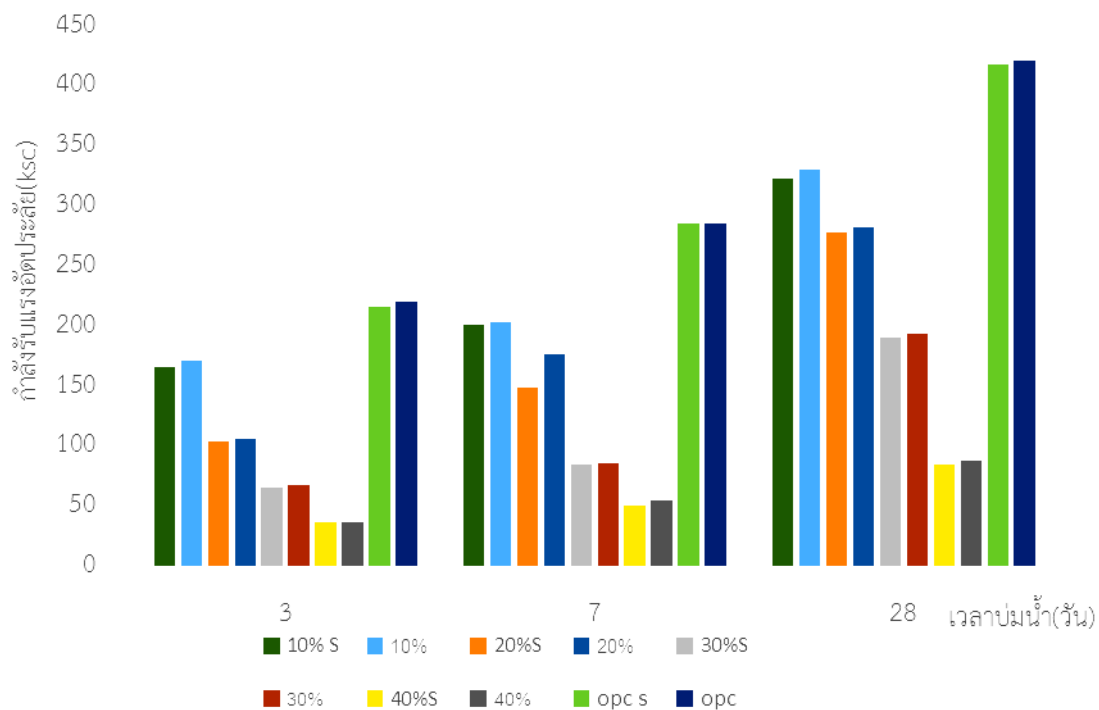
ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบกำลังอัดของมอตาซีเมนต์ผสมเถ้าซันอ้อย บ่มในน้ำและแช่ในซัลเฟต

เมื่อพิจารณาในด้านการพัฒนากำลังอัดตามเวลา มอเตอร์ควบคุม(OPC) เมื่อแช่ในซิลิเกตมีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัด เมื่อเวลาผ่านไปลดต่ำลงโดยสังเกตได้จากแนวโน้มใน รูปที่ 4.17 และเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ซีเฝ้าชานอ้อย (ซีเฝ้าขาว) 10% พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนากำลังระหว่างแช่ในสารละลายซิลิเกต และบ่มในน้ำใกล้เคียงกัน แต่หากเพิ่มปริมาณการแทนที่ 20-50% มอเตอร์ซีเมนต์ที่แช่ในสารละลายมีแนวโน้มการพัฒนากำลังลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

หากพิจารณาระหว่างแนวโน้มของมอเตอร์ปกติแช่ซิลิเกต(OPCS) และมอเตอร์ซีเมนต์ผสมซีเฝ้าชานอ้อย (ซีเฝ้าขาว) 10% แช่ในซิลิเกต (10% S) จะเห็นได้ว่า OPCS มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังที่ต่ำลงจากมอเตอร์ปกติ(OPC) แต่มอเตอร์ซีเมนต์ผสมซีเฝ้าชานอ้อย 10% แช่ในซิลิเกต (10% S) มีกำลังอัดใกล้เคียงกับ มอเตอร์ซีเมนต์ซีเฝ้าชานอ้อย (ซีเฝ้าขาว) 10% แช่บ่มในน้ำ(10%)หากทดสอบต่อไปมีความเป็นไปได้ว่ากำลังอัดของ OPCS กับ 10%S จะมีกำลังอัดใกล้เคียงกันดังแสดงในภาพที่ 4.17-4.18



ภาพที่ 4.17 แสดงแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดตามเวลาของมอเตอร์ซีเมนต์ผสมซีเฝ้าชานอ้อย (ซีเฝ้าขาว) แช่บ่มในน้ำและแช่ในซิลิเกต

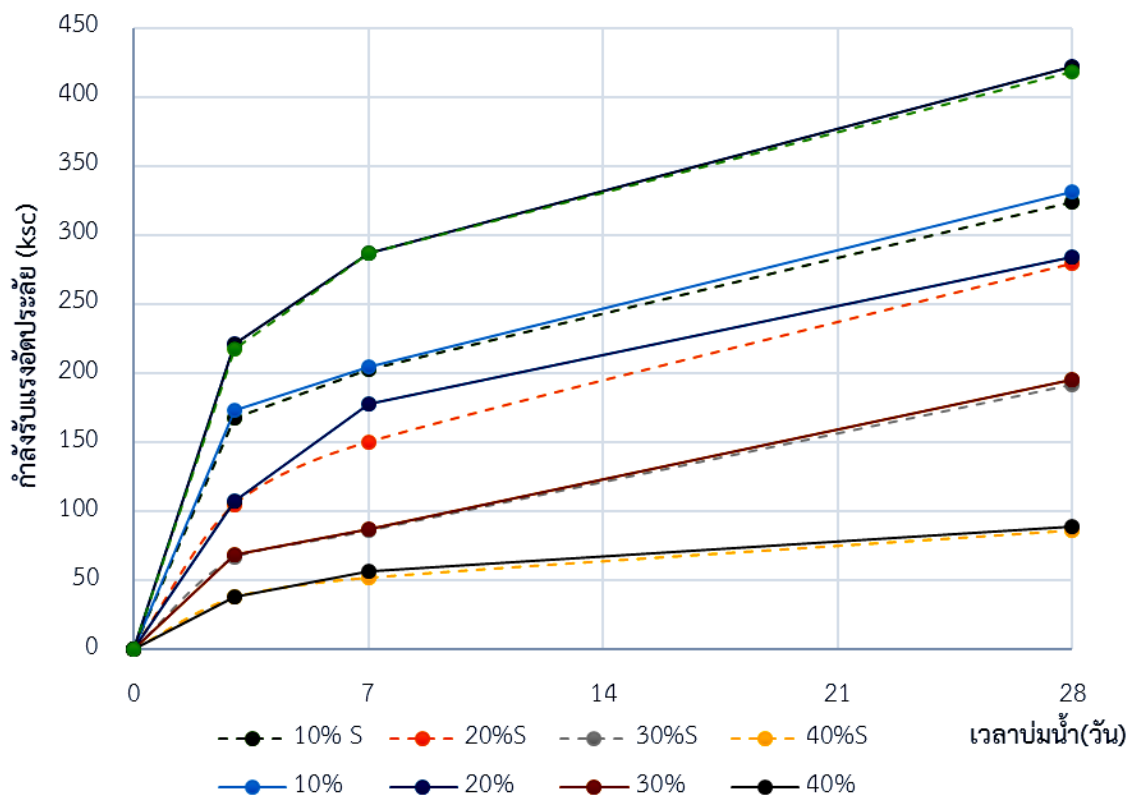


ภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) บ่มในน้ำ และแช่ในซัลเฟต

จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของก้อนมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) เมื่อนำไปแช่ในซัลเฟตพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับแช่ในน้ำ โดยกำลังอัดตามเวลาต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.18

เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10% พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนากำลังระหว่างแช่ในสารละลายซัลเฟต และบ่มในน้ำมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ 20-40% มอร์ตาร์ซีเมนต์ที่แช่ในสารละลายและแช่ในน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน

หากพิจารณาระหว่างแนวโน้มของมอร์ตาร์ปกติแช่ซัลเฟต(OPCS) และมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10% แช่ในซัลเฟต (10% S) จะเห็นได้ว่า OPCS มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังที่ต่ำลงจากมอร์ตาร์ปกติ(OPC) และมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10% แช่ในซัลเฟต (10% S) มีกำลังอัดลดต่ำลงจาก มอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมถ่านชาร์ (ซีเถ้าดำ) 10% เช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 แสดงแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดตามเวลาของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมถ่านชาร์ (ขี้เถ้าดำ) แช่บ่มในน้ำและแซในซิลเฟต

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 การทดสอบอัตราการไหลแผ่นแทนที่ซีเมนต์ (ซีเมนต์ขาว)

สรุปผลการทดลอง เมื่อแทนที่ซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ลงไปในมอร์ตาร์ซีเมนต์ ส่งผลให้การไหลลดน้อยลง และการไหลลดลงมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อผสมมากขึ้น ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณน้ำ เพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะไหลได้ตามมาตรฐาน ASTM C109 และพบว่ามอร์ตาร์ปกติ (opc) เมื่อถูกแทนที่ด้วยซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) 10-20% จะทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้นที่จะทำให้การไหลเป็นไปตามมาตรฐาน โดยการแทนที่ 10% จะทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์ต้องการน้ำเพิ่มขึ้นน้อยสุด คือ 106.25 % และหากแทนที่ซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ไปจนถึง 50% ซีเมนต์ มอร์ตาร์จะมีความต้องการน้ำมากถึง 129.38 % ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการที่ซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) มีความพรุนทำให้เมื่อแทนที่จึงมีความต้องการน้ำมากกว่าปกติ

5.2 คอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ถ่านดำ)

สรุปผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ถ่านดำ) มีการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำในช่วงต้น เนื่องจากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ่านทั้ง 2 ชนิด ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นลดลง ประกอบกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นช้า ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงต้นนั้นต่ำ แต่เมื่อบ่มคอนกรีตในน้ำผ่านไป 28 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ที่ 10% นั้นมีการพัฒนากำลังอัดจนใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ และมีแนวโน้มที่ กำลังอัดอาจจะสูงกว่าคอนกรีตปกติในอนาคต ส่วนคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ถ่านดำ) มีการพัฒนากำลังอัดตามเวลาที่ต่ำกว่า คอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของถ่านขาวทั้ง 2 ชนิด นั้นเกิดขึ้นสมบูรณ์แล้ว เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน แต่หากแทนที่ในสัดส่วนที่มากเกินไปจะส่งผลเสียกับคอนกรีต คือทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังที่ต่ำ และรับกำลังอัดได้น้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์เพราะมีวัสดุทดแทนมากเกินไป

5.3 การทดสอบคลอไรด์ในคอนกรีตทำจากซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)

สรุปผลการทดสอบคอนกรีตปกติมี การเจือปนของคลอไรด์ในคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) และคอนกรีตผสมถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) โดยปริมาณคลอไรด์จะพบมากที่สุดบริเวณผิวของคอนกรีต และจะลดน้อยลงเมื่อความลึกมากขึ้น โดยเมื่อผสมซีเมนต์ขาว (ซีเมนต์ขาว) ลงไปในคอนกรีตที่ เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10% ปริมาณคลอไรด์ที่ผสมอยู่จะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ หรือ

อาจกล่าวได้ว่ามีความต้านทานคลอไรด์ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซีเมนต์
ขานอ้อย (ซีเมนต์ขาว) มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน คอนกรีตมีกำลังสูง ช่องว่างในคอนกรีตต่ำ เป็นเหตุให้คลอ
ไรด์แทรกซึมได้น้อย แตกต่างกับคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ขานอ้อย (ซีเมนต์ขาว) และถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ)
ตั้งแต่ 20% มีกำลังอัดในช่วงต้นต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังเกิดไม่สมบูรณ์ ทำให้อาจยังมีช่องว่าง
ขนาดเล็กภายในแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้มากกว่าคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมซีเมนต์ขานอ้อย 10 %

5.4 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ต่อการต้านทานซัลเฟต ของคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์ ขานอ้อย (ซีเมนต์ขาว) และ ถ่านชาร์ (ซีเมนต์ดำ) ต่อซัลเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 5

สรุปผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่แช่ในน้ำ และแช่ใน
สารละลายซัลเฟต กำลังอัดที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยก่อนมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตมีค่าลดลง
จากที่แช่ในน้ำเล็กน้อย เนื่องด้วยระยะเวลาการทดสอบเพียงระยะสั้น แต่หากทำการทดสอบต่อไป
แนวโน้มการลดลงของกำลังอัดก่อนมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตจะมีมากขึ้น เนื่องมาจากผล
ของซัลเฟต ทำให้เกิด Ettringite (เกลือของ Sodium sulfate) ที่มีปริมาณสูงทำให้เกิดแรงดันภายใน
ทำให้เกิดการกระเทาะออกและสูญเสียกำลังอัด

หากพิจารณาระหว่าง มอร์ตาร์ทดสอบแช่ในซัลเฟต(OPCS) เทียบกับมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ขานอ้อย 10 %
แช่ในสารละลายซัลเฟต พบว่า OPCS มีกำลังอัดตามเวลาต่ำลงเมื่อเทียบกับ OPC และมีแนวโน้มการ
พัฒนากำลังอัดตามเวลาลดลงด้วย แต่มอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ขานอ้อย 10 % แช่ในสารละลายซัลเฟต มีแนวโน้ม
เดียวกันกับที่แช่ในน้ำปกติ และมีความเป็นไปได้ว่าหากทำการทดสอบในระยะยาว มอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์
ขานอ้อย 10 % แช่ในสารละลายซัลเฟต จะมีกำลังอัดมากกว่า มอร์ตาร์ทดสอบแช่ในซัลเฟต(OPCS) เพราะ
ซีเมนต์ขานอ้อยที่แทนที่ในมอร์ตาร์ซีเมนต์เพียงเล็กน้อย สามารถลดการเกิด Ettringite ในก่อนทดสอบได้ ทำให้
ส่งผลดีต่อกำลังอัดในระยะยาว

1. นอกจากนี้ เราได้คำนวณต้นทุนการผลิตคอนกรีตจากซีเมนต์ขานอ้อยและแสดงความเป็นไปได้ต่อ
การเพิ่มปริมาณการผลิตในเชิงการค้า

ต้นทุนการผลิตคอนกรีตหยาบ 1 คิว ใช้หิน 1.13 ตัน/คิว

ใช้หิน 1.13 ตัน เป็นเงิน 293.80 บาท

(หินราคา 260 บาท/ตัน)

ใช้ทรายหยาบในการผลิตคอนกรีต 1 คิว เท่ากับ 0.94 ตัน/คิว

ใช้ทรายหยาบ 0.94 ตัน เป็นเงิน 225.60 บาท

(ทรายราคา 240 บาท/ตัน)

ใช้น้ำยาหน่วงในผลิตคอนกรีต 1 คิว เท่ากับ 0.75 ลิตร/คิว

ใช้น้ำยาหน่วง 0.75 ลิตร เป็นเงิน 12.38 บาท

(น้ำยาราคา 16.50 บาท/ลิตร)

ใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต 1 คิว เท่ากับ 0.132ตัน/คิว

ใช้ปูนซีเมนต์ 0.132 ตัน เป็นเงิน 239.45 บาท

(ปูนซีเมนต์ราคา 1814 บาท/ตัน)

ค่าผสมคอนกรีต 1 คิว เท่ากับ 200 บาท/คิว

ค่าขนส่ง 1 เที่ยว เท่ากับ 27.66 บาท/เที่ยว

รวมต้นทุนการผลิต 998.89 บาท

พิจารณาต้นทุนด้านส่วนผสมที่ไม่เกี่ยวข้องกับปูนซีเมนต์ 759.44 บาท/คิว

ดังนั้นถ้าทำการผลิตโดยใช้

เถ้าขาน้อยในการผลิตคอนกรีต 1 คิว เท่ากับ $0.132 \times (\text{เปอร์เซ็นต์การแทนที่}/100)$ ตัน/คิว

ใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต 1 คิว เท่ากับ $0.132 - 0.132 \times (\text{เปอร์เซ็นต์การแทนที่}/100)$ ตัน

(เถ้าขาน้อยราคา 700 บาท/ตัน)

แทนที่ 10% ใช้เถ้าขาน้อย 0.013 ตัน เป็นเงิน 9.10 บาท

ใช้ปูนซีเมนต์ 0.119 ตัน เป็นเงิน 215.87 บาท

ราคาขาน้อยและซีเมนต์รวมกับส่วนผสมอื่น 984.4 บาท

แทนที่ 20% ใช้เถ้าขาน้อย 0.026 ตัน เป็นเงิน 18.20 บาท

ใช้ปูนซีเมนต์ 0.106 ตัน เป็นเงิน 192.28 บาท

ราคาขาน้อยและซีเมนต์รวมกับส่วนผสมอื่น 969.92 บาท

แทนที่ 30% ใช้เถ้าขาน้อย 0.039 ตัน เป็นเงิน 27.30 บาท

ใช้ปูนซีเมนต์ 0.092 ตัน เป็นเงิน 166.89 บาท

ราคาขาน้อยและซีเมนต์รวมกับส่วนผสมอื่น 953.62 บาท

แทนที่ 40% ใช้เถ้าขาน้อย 0.053 ตัน เป็นเงิน 37.10 บาท

ใช้ปูนซีเมนต์ 0.079 ตัน เป็นเงิน 143.31 บาท

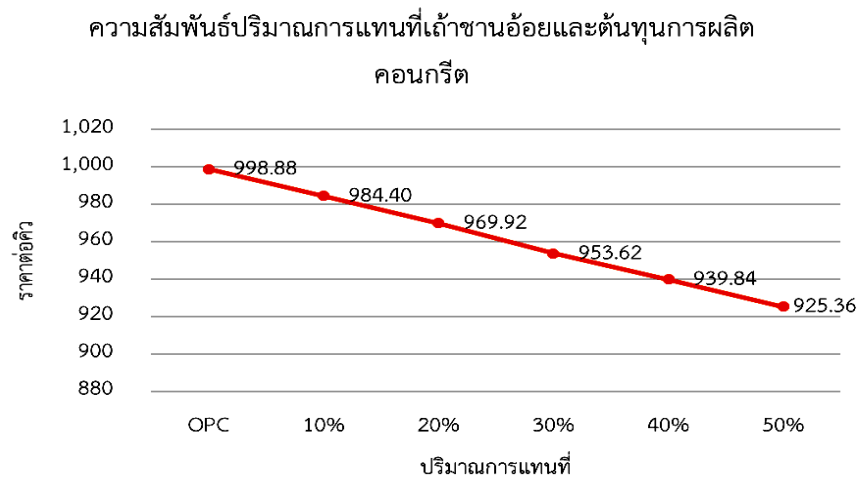
ราคาขาน้อยและซีเมนต์รวมกับส่วนผสมอื่น 939.84 บาท

แทนที่ 50% ใช้เถ้าขาน้อย 0.066 ตัน เป็นเงิน 46.20 บาท

ใช้ปูนซีเมนต์ 0.066 ตัน เป็นเงิน 119.72 บาท

ราคาขาน้อยและซีเมนต์รวมกับส่วนผสมอื่น 925.36 บาท

จากผลการคำนวณความสัมพันธ์ปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยและต้นทุนการผลิตคอนกรีต



2. รายละเอียดที่มาของขานอ้อยและชี้เถ้าขานอ้อยที่นำขานอ้อยไปเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อทราบถึงปริมาณวัสดุที่จะนำไปใช้

โดยมีโรงงานน้ำตาลที่ผลิตปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้

- 1) บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)
ปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้กระแสไฟฟ้า 53,000 ตัน/เดือน คิดเป็นชี้เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าขาว) ถ่านชาร์ (ชี้เถ้าดำ) คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่เหลือทิ้ง อยู่ที่ 5,300 กิโลกรัม/เดือน
- 2) บริษัท ไทยเพิ่มพูนอุตสาหกรรม จำกัด
ปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้กระแสไฟฟ้า 15,500 ตัน/เดือน คิดเป็นชี้เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าขาว) ถ่านชาร์ (ชี้เถ้าดำ) คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่เหลือทิ้ง อยู่ที่ 1,550 กิโลกรัม/เดือน
- 3) บริษัท ไทยอุตสาหกรรมน้ำตาล จำกัด
ปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้กระแสไฟฟ้า 15,500 ตัน/เดือน คิดเป็นชี้เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าขาว) ถ่านชาร์ (ชี้เถ้าดำ) คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่เหลือทิ้งอยู่ที่ 1,550 กิโลกรัม/เดือน
- 4) บริษัท น้ำตาลบ้านโป่ง จำกัด
ปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้กระแสไฟฟ้า 9,000 ตัน/เดือน คิดเป็น ชี้เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าขาว) ถ่านชาร์ (ชี้เถ้าดำ) คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่เหลือทิ้ง อยู่ที่ 900 กิโลกรัม/เดือน

- 5) บริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด
ปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้กระแสไฟฟ้า 35,000 ตัน/เดือน คิดเป็น
ชี้เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าขาว) ถ่านชาร์ (ชี้เถ้าดำ) คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่
เหลือทิ้งอยู่ที่ 3,500 กิโลกรัม/เดือน
- 6) บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) สาขา 3
รวมผล ปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้กระแสไฟฟ้า 25,000 ตัน/เดือน
คิดเป็น ชี้เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าขาว) ถ่านชาร์ (ชี้เถ้าดำ) คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของ
วัสดุที่ เหลือทิ้งอยู่ที่ 2,500 กิโลกรัม/เดือน
- 7) บริษัท มิตรเกษตร อุทัยธานี จำกัด
ปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้กระแสไฟฟ้า 18,000 ตัน/เดือน คิดเป็น
ชี้เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าขาว) ถ่านชาร์ (ชี้เถ้าดำ) คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่
เหลือทิ้งอยู่ที่ 1,800 กิโลกรัม/เดือน
- 8) บริษัท น้ำตาลสิงห์บุรี จำกัด
ปริมาณวัตถุดิบขานอ้อยที่จะนำไปใช้กระแสไฟฟ้า 15,500 ตัน/เดือน
คิดเป็น ชี้เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าขาว) ถ่านชาร์ (ชี้เถ้าดำ) คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของ
วัสดุที่ เหลือทิ้งอยู่ที่ 1,550 กิโลกรัม/เดือน

3. การวิเคราะห์เถ้าดำและเถ้าขาวเพื่อทราบถึงองค์ประกอบที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่าจากขานอ้อยที่ผ่านการทำการเผาในสภาวะอับอากาศหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ: (a) 400 °C; (b) 500 °C และ (c) 600°C SEM ของขานอ้อย ทำการเผาในสภาวะอับอากาศหรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ:(a)400 °C; (b) 500 °C และ (c) 600°C เป็นเวลา 60 นาที แสดงได้ดังตาราง

Temperature	400 °C	500 °C	600 °C
Element	Atomic %	Atomic %	Atomic %
C K	79.27	82.20	87.98
O K	17.25	13.95	9.13
Si K	3.47	3.85	2.88
Totals	100	100	100

ส่วนปริมาณคาร์บอนในขานอ้อยเผาที่อุณหภูมิ 600°C จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการนำขานอ้อยมาเผาที่อุณหภูมิ 600°C นั้น จะให้ผลดีที่สุดที่ผ่านการเผาไหม้นั้นอุดมไปด้วยคาร์บอน (Carbon; C) แต่คาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักนั้นยังไม่ถูกนำมาใช้ให้เกิดอรรถประโยชน์สูงสุด ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีแนวความคิดที่จะแปรรูป เถ้าขานอ้อย (ชี้เถ้าดำ) ให้เป็นคาร์บอน

นำมาในทางารชุบแข็งผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงโดยใช้คาร์บอนจากถ่านชาณอ้อย(ชี้ถ่านดำ) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบเชิงพาณิชย์และเพิ่มมูลค่าให้กับถ่านชาณอ้อย(ชี้ถ่านดำ) ทดแทนการใช้คาร์บอนจากแหล่งปิโตรเคมี

การนำชี้ถ่านชาณอ้อย (ชี้ถ่านขาว) เเผาที่อุณหภูมิ 800-1000 องศา มาศึกษาปริมาณคาร์บอนและซิลิกามีรุกรุนเกิดขึ้นน้อยกว่าถ่านชาร์ (ชี้ถ่านดำ) แสดงปริมาณธาตุต่างๆ และ Atomic percent ของชี้ถ่านชาณอ้อย (ชี้ถ่านขาว) ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 800-1000°C และซิลิกา (SiO₂) แสดงได้ดังตาราง

Temperature	800-1000°C
Element	Atomic %
C K	24.61
O K	33.48
Si K	41.91
Totals	100

ผลของ EDX นั้น จะพบว่า spectrum ของชี้ถ่านชาณอ้อย (ชี้ถ่านขาว)ที่อุณหภูมิ (800-1000°C) ส่วน Atomic % ของคาร์บอนในชี้ถ่านชาณอ้อย (ชี้ถ่านขาว)เเผาที่อุณหภูมิ 800-1000°C จะมีค่าซิลิกามากกว่าคาร์บอนน้อยกว่าถ่านชาร์ (ชี้ถ่านดำ) จึงสามารถนำชี้ถ่านชาณอ้อย (ชี้ถ่านขาว) มาพัฒนาการผลิตคอนกรีตที่ไม่ใช่โครงสร้าง หรือมาผลิตอิฐมวลเบา

บรรณานุกรม

1. กรมศุลกากร. (2545). สถิติการนำเข้าส่งออก [ออนไลน์]. จาก http://www.oie.go.th/industrystatus_th.asp
2. กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2543). การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุชีวมวล [ออนไลน์]. จาก http://www.dedp.go.th/renew/bio_p.htm
3. วชิร ชาทิตติวงศ์. (2542). การควบคุมมลพิษในสิ่งแวดล้อม Environment Pollution Control (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง
4. ปรียญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2553. ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และ คอนกรีต . พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.).
5. สาธร สาธภาค. 2544. การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเถ้าแกลบ ไมโครซิลิกา และสารลดน้ำ พิเศษโดยวิธีบ่มแบบออโตเคิลฟ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
6. สหลาภ หอมวุฒินวงศ์ .2543. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรและการต้านทานสารเคมีของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยตัดขนาด . วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต . สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
7. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, สำนักงานวิจัยเศรษฐกิจ และ สำนักนโยบายและแผนพัฒนาการเกษตร . 2552. ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร . [http://www.oae.go.th/main.php?filename=journal_all]. 9 กันยายน 2553.
8. อรรคเดช ฤกษ์พิบูลย์ นันทชัย ชูศิลป์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2552. ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้า ขานอ้อยบดละเอียด . รายงานโครงการ ปริญญาตรี . สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
9. อาภา สธนเสาวภาคย์. 2544. การศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต . สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
10. วินิต ช่อวิเชียร .2529. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2529.
11. สมศักดิ์ พันชมภู .(2545). การศึกษาความต้านทานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและผสมเถ้าแกลบต่อการกัดกร่อนของสารซัลเฟตในสภาวะกรด. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรม

12. ชุมพล จันทรสม. 2528. การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบและซีเถ้าลอย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
13. อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์.การทดสอบวัสดุ (แบบทำลาย). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สยามสปอร์ต ซินดิเคท, 2543.
14. ทวีศักดิ์ คงศรี และ ไพโรเกียรติ เลิศพูนศรี. 2542. การศึกษาผลกระทบตอกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าขานออย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
15. ชณูรักษ์ เทียมวีรสกุล และ นที อธิกคุณากร. 2543. การศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานออย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
16. วิจักขณ เมธชนัน และ อนุชา เลิศอดิพัฒน์. 2546. การศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าขานออย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
17. จิรศักดิ์ ภูริพันธุ์ชัย และคณะ. 2544. การศึกษาคอนกรีตบล็อกจากเถ้าขานออย. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
18. สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ และ ชูชัย สุจิวิกุล. 2548. “ผลกระทบของเถ้าขานออยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์”. ในเอกสารการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ชลบุรี. หน้า 67-72.
19. อาทิตมา ดวงจันทร์. และ สุวิมล สัจจาณชัย. 2548. “คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าขานออย”. ในเอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 2. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ชลบุรี. หน้า 6-10.
20. นันทชัย ชูศิลป์ อรรถเดช ฤกษ์พิบูลย์ และชัย จาตุรพิทักษ์ กุล. (2552). ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าขานออยบดละเอียด. รายงานโครงการ ปริญญาตรี. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
21. Tam, W.Y.V., Gao, X.F., and Tam, C.M., 2005, “Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach”, Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 6, pp. 1195-1203
22. Martirena Hernandez, J.F., Middendorf, B., Gehrke, M. and Budelmann, H. 1998. Use of wastes of sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders : study of the reaction, Universidad Central de las Villas, Santa Clara, Cuba Department of Structural Materials, University of Kassel, D-34109 Kassel, Germany.
23. Valix, M., Siliezar, J. and Zhang, K. The influence of the properties of activated bagacillo on Cr (VI) adsorption. Dev. Chem. Eng. Mineral Process., 7(5/6) (1999) 537-549.

24. Castro, J., Bonelli, R., Cerrella, G. and Cukierman, L. Phosphoric acid activation of agricultural residues and bagasse from sugar cane: Influence of the experiment conditions on adsorption characteristics to activated carbons. *Ind. Eng. Chem. Res.* 39(4) (2000) 166 – 172.
25. Selvi, K., Pattabhi, S. and Kadirvelu, K. Removal by a adsorption onto activated carbon. *Bioresource Technology*, 80 (2001) 87-89.
26. Girgis, S., Yunis, S. and Soliman, M. Characteristics of activated carbon from peanut hulls in relation to conditions of preparation. *Materials Letters*, 57 (2002) 164 - 172.
27. Kobya, M. Adsorption, kinetics and equilibrium studies of Cr (VI) by hazelnut shell activated carbon. *Absorption Science & Technology*, 22(1) (2004) 51- 64.
28. Gupta, V.K., & Ali, I. (2000). Utilisation of bagasse fly ash (a sugar industry waste) for the removal of copper and zinc from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 18(2) (2000) 131-140.
29. Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Chandra, S., & Agarwal, S. Removal of lindane and malathion from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste. *Water Research*, 36(10) (2002) 2483-2490.
30. Roa, M., Parwate, A.V., & Bhole, A.G. Removal of Cr⁶⁺ and Ni²⁺ from aqueous solution using bagasse and fly ash. *Waste Management*, 22(7): 821-830.
31. Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Sharma, M., & Saini, V. K. (2003). Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste. *Water Research*, 37(16) (2002) 4038 - 4044.
32. Gupta, V. K., & Ali, I. Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste. *Journal of Colloid and Interface Science*, 271(2) (2004) 321 - 328.
33. Ouki, S.K. and Neufeld, R.D. Use activated carbon for the recovery of chromium from industrial wastewater. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 70 (1997) 3 – 8.
34. Selomulya, C., Meeyoo, V. and Amal, R. Mechanisms of Cr (VI) removal from water by various types of activated carbon. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 74 (1999) 111 – 122.

35. ACI Committee 211. 2000. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1 - 91). ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA.
36. A.M. Neville. 1995. Properties of Concrete. 4 th Ed. Harlow Essex. Longman Group Limited.
37. A.M. Neville. And JJ. Books. 1990. Concrete Technology. 1 St Ed. Harlow Essex. Longman Scientific and technical.
38. ASTM Standards. 2003. ASTM C29/C29M-97: Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight), and Voids in Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, 1-4.
39. ASTM Standards. 2003. ASTM 027-01: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregates. Annual Book of ASTM Standards, 68-73.
40. ASTM Standards. 2003. ASTM 028-01: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, 7479.
41. ASTM Standards. 2003. ASTM 0 36-01: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, 84-87.
42. ASTM Standards. 2003. ASTM C143/C143M-00: Standard Test Method for Slump of Hydraulic- Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards, 95-97.
43. ASTM Standards. 2003. ASTM C192/CC192M-02: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Annual Book of ASTM Standards, 125-132.
44. ASTM Standards. 2003. ASTM C260-06: Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete. Annual Book of ASTM standard, 104-107.
45. Chatveera, B. and P. Lertwattanakur. (2008). Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash. [www.sciencedirect.com]. 4 September 2010