



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาที่ผสมวัสดุผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาลสำหรับ
ประยุกต์ใช้ในอาคารพลังงานต่ำ



โดย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทนงศักดิ์ โนไชยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญชาน์ ต่อกิตติกุล
นางสาวปาณิสรา ดีเสื่อ

สิงหาคม 2563



สำนักหอสมุด

เลขที่สัญญา R2562B061

อภินันทนาการ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาที่ผสมวัสดุผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาลสำหรับ
ประยุกต์ใช้ในอาคารพลังงานต่ำ

คณะผู้วิจัย สังกัด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทงศักดิ์ โนไชยา สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิณูชาน์ ต่อกิตติกุล สังกัดคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

นางสาวปานิสรา ดีเสื่อ สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันลงทะเบียน... 22 มี.ค. 2565

เลขทะเบียน... 1050579

เลขเรียกหนังสือ... 9 TP

884
-15
ท 1155
2563

สนับสนุนงบประมาณการวิจัยจาก

งบประมาณแผ่นดิน (บูรณาการวิจัยและนวัตกรรม) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

เป้าหมายที่ 3

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้โดยได้รับเงินสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน (บูรณาการวิจัยและนวัตกรรม) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 เป้าหมายที่ 3 โครงการวิจัยนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้หากผู้วิจัยไม่ได้รับการสนับสนุนจากทุนดังกล่าว นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือการวิเคราะห์ผลในการวิจัย และสุดท้ายทางผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ทงศักดิ์ โนไชยา

สิงหาคม 2563



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมโฟมอีพีเอสรีไซเคิล (EPS) ร้อยละ 80 โดยปริมาตร ของทราย และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ซึ่งเถ้าขานอ้อยที่นำมาใช้ศึกษาเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาใช้เป็นวัสดุปอซโซ เพื่อศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS ที่ระยะเวลาการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน จากผลการทดลองพบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม และมีค่าอยู่ในช่วง 25-36.9 ksc ซึ่งมีค่ากำลังอัดเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ชนิด C9 ส่วนค่าการดูดซึมน้ำ ค่าความพรุนของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟมอีพีเอสที่ใส่เถ้าขานอ้อยสามารถชะลอการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารได้ดีกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม

คำสำคัญ : คอนกรีตมวลเบา โฟมโพลิสไตรีน เถ้าขานอ้อย การหน่วงเวลา การนำความร้อน

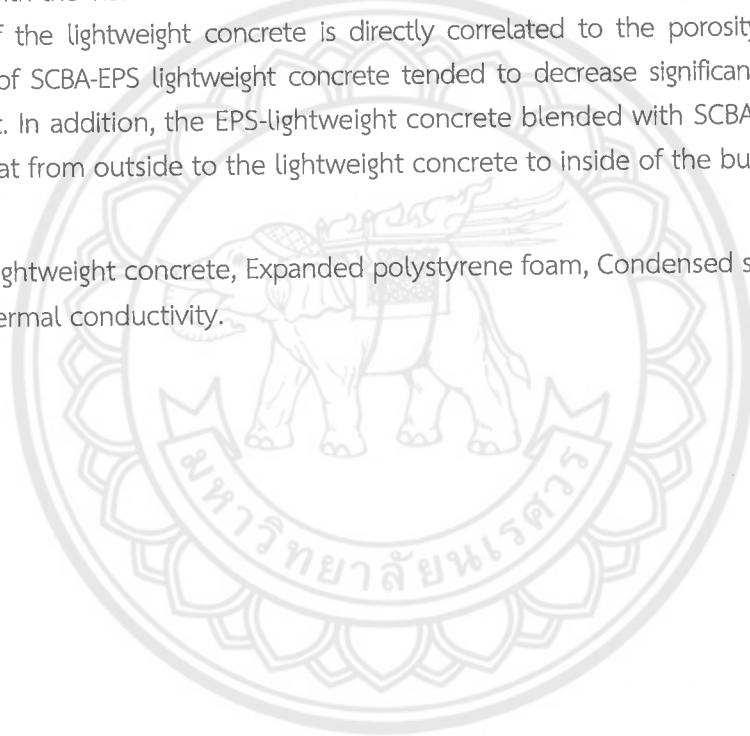


ABSTRACT

This research studied lightweight concrete composite blended with recycle expanded polystyrene foam (EPS) with 80% Vol. of sand replacement. Sugarcane bagasse ash (SCBA), a by-product from the local sugar industry, was used as a cement replacement at the ratio of 0-30 by weight of cement. The mechanical, physical and thermal properties of EPS-lightweight concrete after the curing at 3, 7, 28 and 90 days were investigated.

The results showed that the density of lightweight concrete blended with SCBA at 10%, 20% and 30% by weight was found to increase while the compressive strength of these concrete was found to higher than that of PC control concrete mix (25-36.9 ksc). These values are in accordance with the TIS.2601-2556 standard of the concrete block type C9. Moreover, the water absorption of the lightweight concrete is directly correlated to the porosity results. Thermal conductivity of SCBA-EPS lightweight concrete tended to decrease significantly with increasing SCBA content. In addition, the EPS-lightweight concrete blended with SCBA can increase the time lags-heat from outside to the lightweight concrete to inside of the building.

Keywords: Lightweight concrete, Expanded polystyrene foam, Condensed silica fume, Time lag, Thermal conductivity.



Executive Summary

ถั่วชานอ้อยเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โดยได้จากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าภายในโรงงาน ภายหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลจะมีชานอ้อยเหลือประมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักอ้อย ซึ่งถั่วชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลส่วนใหญ่จะถูกส่งต่อไปยังเกษตรกรเพื่อนำเอาไปบำรุงดิน และทำปุ๋ย แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีถั่วชานอ้อยที่เหลืออีกมากที่ต้องใช้พื้นที่และค่าใช้จ่ายอย่างมากในการจัดการ อีกทั้งถ้าระบบจัดการของโรงงานไม่ดีก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบอีกด้วย ในหลายงานวิจัยได้มีการศึกษาการนำถั่วชานอ้อยมาผสมรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อนำมาใช้เป็นคอนกรีตแบบยั่งยืน ซึ่งคอนกรีตประเภทนี้ถือว่าเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงานอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาถั่วชานอ้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟมอีพีเอสรีไซเคิล เพื่อศึกษาผลของถั่วชานอ้อยต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบา โดยนำถั่วชานอ้อยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานต่อโฟมอีพีเอส เท่ากับ 30:70 ต่อปริมาตร สำหรับพัฒนาให้ได้คอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ชนิด C9

จากผลการทดลองพบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยถั่วชานอ้อย ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม ทั้งนี้เนื่องถั่วชานอ้อยเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ได้เฟสที่ช่วยยึดประสานเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตได้ ซึ่งคอนกรีตมวลเบาที่ผสมถั่วชานอ้อยมีค่ากำลังอัดและความหนาแน่นเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ชนิด C9 นอกจากนี้ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ และความพรุนของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่าค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการผสมถั่วชานอ้อยเข้าไป อย่างไรก็ตามถั่วชานอ้อยที่ผสมในคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟมอีพีเอสสามารถชะลอการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารได้ดีกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม จากผลงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นทำให้เล็งเห็นแนวทางการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ให้เกิดประโยชน์ทั้งการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งและทางด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	3
บทคัดย่อภาษาไทย	4
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	5
Executive Summary	6
สารบัญ	7
บทที่ 1 บทนำ	8
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	55
เอกสารอ้างอิง	56
ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย	59
ภาคผนวก	60



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

คอนกรีตมวลเบาเป็นที่นิยมอย่างมากในงานก่อสร้างผนังอาคารและอิฐบล็อกปูพื้นในอาคารในปัจจุบัน เนื่องจากมีน้ำหนักเบา รับแรงกดได้ดี ส่งผลให้ประหยัดเวลาและค่าก่อสร้างโครงสร้างเสาเข็มได้อย่างมาก โดยไม่จำเป็นต้องตอกเสาเข็มลงลึกมากแต่อาคารยังคงความแข็งแรงเท่าเดิม และสามารถก่อสร้างโดยใช้โครงสร้างที่เล็กลงได้ อีกทั้งคอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติเด่นทางด้านค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งช่วยประหยัดการใช้พลังงานสำหรับอาคารในช่วงฤดูร้อนได้เป็นอย่างดี [1] โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบาสามารถตามกระบวนการผลิตแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตแบบผ่านกระบวนการการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclave Aerated Concrete; AAC) ซึ่งในขบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้ต้องใช้ต้นทุนและเทคโนโลยีในการผลิตสูง และชนิดที่สองเป็นคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตแบบไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Circular Lightweight Concrete; CLC) คอนกรีตประเภทนี้จะใช้ต้นทุนในการผลิตน้อยกว่าและผลิตได้ง่าย [2] อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศภูมิอากาศร้อนชื้น มีฝนตกชุก คอนกรีตมวลเบาที่มีกรรมวิธีการผลิตแบบไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำความดันสูง จึงเหมาะสมกับสภาพอากาศแบบนี้ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี และไม่ก่อให้เกิดเชื้อรา คอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ที่นำมาใช้งาน เป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีองค์ประกอบของวัสดุที่มีน้ำหนักเบาซึ่งเป็นผลพลอยได้ทางการเกษตรและผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาทดแทนปูนซีเมนต์และมวลรวมสำหรับงานคอนกรีตมวลเบา เช่น ภูเขาไฟ แกลบ แกลบ กากมะพร้าว ดินแดง ขี้เลื่อย ขี้เถ้า ซิลิกาฟูม และเม็ดโฟม (Expanded polystyrene foam; EPS) [3] ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมหรือวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติจึงต้องหาวิธีการกำจัดโดยการนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

ถ้าขานอ้อยเป็นหนึ่งในวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม โดยในปัจจุบันมีการปลูกอ้อย ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกกันมากในแถบภาคกลางตอนบน และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย และอ้อยยังเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตน้ำตาลทราย จากกระบวนการผลิตน้ำตาลจะได้ขานอ้อย ซึ่งขานอ้อยจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนสำหรับการต้ม เคี้ยวน้ำตาลในกระบวนการผลิต และเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าภายในโรงงาน ขานอ้อยถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีเพราะสร้างปัญหาต่อสภาพแวดล้อมน้อย ประเทศไทยมีกำลังผลิตอ้อยทั้งหมดประมาณ 73.31 ล้านตัน และหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลมีขานอ้อยเหลือประมาณ 19 ล้านตัน และหลังจากเผาจะเหลือถ้าขานอ้อยประมาณ 4.5 ล้านตันต่อปี ซึ่งถ้าขานอ้อยเหล่านี้ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง หรือใช้ทำปุ๋ยในภาคการเกษตรแต่ก็ถือว่ามีการใช้ประโยชน์น้อยมาก ในปัจจุบันมีแนวโน้มการเพิ่มของถ้าขานอ้อยมากขึ้นเนื่องจากการส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลและผลิตเอทานอลจากภาครัฐเพิ่มมากขึ้น [4] จากปัญหาของวัสดุพลอยได้จากโรงงานน้ำตาล (ถ้าขานอ้อย) ที่เพิ่มสูงมากขึ้น จึงได้มีนักวิชาการพยายามศึกษาวิจัยเพื่อนำถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล มาใช้ให้เกิด

ประโยชน์ทางด้านอื่น ๆ เช่นในงานก่อสร้าง โดยพบว่าแก้วชานอ้อยมีสารประกอบซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นส่วนประกอบอยู่มาก เป็นคุณสมบัติทางด้านเคมีของวัสดุพอลิซิลานซึ่งมีคุณสมบัติช่วยยึดประสานเมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ [5] ดังนั้นจึงมีการนำเอาแก้วชานอ้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาต่อยอดการใช้แก้วชานอ้อยในงานคอนกรีตจนสามารถนำไปใช้งานได้ต้องมีคุณภาพนั้นยังมีมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องจากแก้วชานอ้อยที่ได้มาจากโรงงานยังมีขนาดใหญ่ ก่อนที่จะนำมาใช้งานจึงต้องนำมาบดให้มีความละเอียดสูง จึงจะมีศักยภาพที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตมวลเบาได้

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาคอนกรีตมวลเบาโดยมีจุดมุ่งหมายที่จะนำแก้วชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมการเกษตรในจังหวัดแถบภาคเหนือตอนล่าง ซึ่งจัดว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอลิซิลานนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบผสมเม็ดโฟม EPS ทดแทนมวลรวมเพื่อต้องการให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติทางกลที่ดี และคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำ ให้เหมาะสมที่จะใช้งานได้อย่างมีคุณภาพในงานโครงสร้างอาคาร เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง อีกทั้งยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำวัสดุผลพลอยได้จากเกษตรกรรมและโรงงานอุตสาหกรรมมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบา โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของโฟม EPS ที่ผสมแก้วชานอ้อย
- 2) เพื่อพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS ที่ผสมแก้วชานอ้อย
- 3) เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทางความร้อน ของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS ที่ผสมแก้วชานอ้อย
- 4) สามารถนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาพัฒนางานคอนกรีตมวลเบาเพื่อนำไปใช้ในงานโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 5) สามารถพัฒนาศักยภาพของบุคลากรด้านวิจัยให้มีทักษะ และองค์ความรู้เพิ่มมากขึ้น

1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1) ศึกษาค้นคว้าเอกสาร หนังสืออ้างอิง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูล
- 2) วางแผนการดำเนินงาน ศึกษาและเตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย
- 3) หาอัตราส่วนที่เหมาะสมคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดโฟม EPS ในการทดแทนทราย และอัตราส่วนของแก้วชานอ้อยที่ทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก
- 4) ทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS
- 5) วิเคราะห์ผล
- 6) สรุป และนำเสนอผลงาน

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมบัติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

คอนกรีตมวลเบาถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับงานก่อสร้างผนังและพื้น โดยเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตมวลเบาทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยใช้เทคนิคเติมสารเคมี หรือวัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่าทดแทนมวลรวม และส่งผลให้คอนกรีตพองฟู มีรูพรุนเล็กๆ เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตซึ่งเหมาะกับการก่อสร้างที่ไม่ต้องรับน้ำหนักและรับความต้านการอัดมาก คอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปอาจแบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclaved System) โดยมีชนิดที่ใช้ปูนขาว (Lime base) และชนิดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Cement base) อีกประเภทหนึ่งเป็นคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตด้วยระบบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non-Autoclaved System) โดยใช้วัสดุเบากว่ามาทดแทน เช่น ขี้เลื่อย ขี้เถ้า ชานอ้อย หรือเม็ดโฟม หรือเป็นประเภทที่ใช้สารเคมี (Circular Lightweight Concrete) เพื่อให้เนื้อคอนกรีตฟู และทิ้งให้แข็งตัว คอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวมากกว่า โดยทั่วไปคอนกรีตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงนี้ส่วนใหญ่เนื้อผลิตภัณฑ์มักจะมีสีเหมือนปูนซีเมนต์ ซึ่งต่างจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงซึ่งจะมีเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นผลึกสีขาว

การผลิตคอนกรีตมวลเบาจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักเพื่อยึดประสานมวลรวมเข้าด้วยกัน และเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีตมวลเบา ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นต้องใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน ดินขาว และศิลาแลง มาเผาพร้อมกันในเตาหลอมแบบหมุน (Rotary kiln) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1,450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วแล้วจึงบดผสมรวมกับยิปซัมเพื่อให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติเหมาะกับการใช้งานก่อนสร้าง ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นจำนวนมาก และยังใช้พลังงานในกระบวนการผลิตที่สูง ($1,757\text{ kJ}$ ต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 kg) [6] ดังนั้นจึงมีหลากหลายงานวิจัยที่มีแนวคิดที่จะพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตแบบยั่งยืนขึ้น โดยการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงและใช้วัสดุพอซโซลานมาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งจำกัดความของวัสดุพอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 [7] เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 สามารถทำปฏิกิริยากับเบส แล้วมีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยยึดประสานเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์โดยทั่วไปในคอนกรีต ซึ่งวัสดุพอซโซลานที่ใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน คือเถ้าลอย ที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนวัสดุพอซโซลานจากภาคการเกษตรได้แก่เถ้าแกลบ (Rice husk ash) และเถ้าชานอ้อย (Sugar cane bagasse ash) ยังมีการนำเอามาใช้งานในงานก่อสร้างค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับเถ้าลอย อันเนื่องมาจากการศึกษาวิจัยยังมีไม่มากนัก อีกทั้งวัสดุพอซโซลาน

ดังกล่าวต้องมีปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งเจ้าชานอ้อยก็เป็นหนึ่งในเป้าหมายของผู้วิจัยที่ต้องการจะพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในงานในภาคอุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบยั่งยืน

เจ้าชานอ้อยเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โดยได้จากการนำชานอ้อยมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าภายในโรงงาน ชานอ้อยถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีเพราะสร้างปัญหาต่อสภาพแวดล้อมน้อยเพราะมีปริมาณกำมะถันต่ำจึงไม่ก่อให้เกิดฝนกรดในสิ่งแวดล้อม [8] ภายหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลจะมีชานอ้อยเหลือประมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักอ้อย และภายหลังจากการเผาชานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะเหลือเป็นเจ้าชานอ้อยร้อยละ 0.60 ของน้ำหนักอ้อย [9] หรือประมาณ 4.5 แสนตันต่อปี ซึ่งเจ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลส่วนใหญ่จะถูกส่งต่อให้กับเกษตรกรเพื่อนำเอาไปบำรุงดิน และทำปุ๋ย แม้กระนั้นก็ยังมียุทธศาสตร์เจ้าชานอ้อยที่เหลืออีกมากที่ต้องใช้พื้นที่และค่าใช้จ่ายอย่างมากในการจัดการ อีกทั้งถ้าระบบจัดการของโรงงานไม่ดีก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบอีกด้วย ในหลายงานวิจัยได้มีการศึกษาการนำเจ้าชานอ้อยมาผสมรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อนำมาใช้เป็นคอนกรีตแบบยั่งยืน ซึ่งคอนกรีตประเภทนี้ถือว่าเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงานอีกด้วย

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาหาอัตราส่วนเจ้าชานอ้อยที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS โดยจะทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน เพื่อที่จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เจ้าชานอ้อยในงานคอนกรีตที่หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

วัตถุดิบนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์แลนด์ประกอบด้วยหินปูน (Limestone) และดินเหนียว (clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโคโคไลต์ ($MgCO_3$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในบ้านเราที่ใช้กันทั่วไป (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง, ตราพยานาคเขียว, TPI (แดง) ฯลฯ) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ฟุต³ เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และ เหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมี และรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

C_3S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็วภายใน 14 วัน C_2S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า ความร้อนเกิดขึ้นน้อย C_3A ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาเริ่มแข็งตัวเกิดความร้อนสูง มีกำลังรับแรงเร็ว C_4AF มีผลให้ความแข็งแรงเล็กน้อยเติมเข้าไปเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น

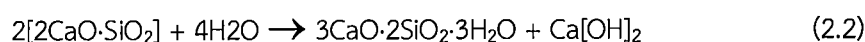
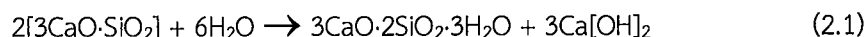
2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของคอนกรีตคือปฏิกิริยาที่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C_3S และ C_2S) ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้ซีเมนต์เพสต์ เกิดเป็นวุ้น (Gel) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งวุ้น (Gel) เป็นตัวประสาน มีความเหนียวคล้ายกาว ก่อตัว แข็งตัว และ ยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสมปูนซีเมนต์ธรรมดาให้ความร้อนประมาณ 85 - 100 แคลอรีต่อกรัม ตามระยะเวลาภายหลังการผสม ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้บางส่วนจะหนีผ่านเนื้อคอนกรีตออกมา แต่บางส่วนจะอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูง คอนกรีตอาจเสียความแข็งแรงได้ และ ความร้อนนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงต่าง ๆ ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว ในโครงสร้างคอนกรีตที่บาง ความร้อนสามารถถ่ายเทออกไปได้ แต่ในโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ และ หนา เช่น เขื่อน จะต้องมีการออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต วิธีหนึ่งอาจทำได้โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทสี่ ที่ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ (60 - 70 แคลอรี ต่อ กรัม) การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะหยุดเมื่อน้ำระเหยหนีออกจากเพสต์หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มซึ่งเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับกาให้น้ำจากภายนอกด้วย ถ้าบ่มคอนกรีตที่ใช้กันตามธรรมดาเป็นเวลา 1 เดือน โดยให้อยู่ในสภาวะมาตรฐานของห้องทดลอง จะพบว่าปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำกว่าร้อยละ 80 อย่างไรก็ตามสภาพในสนาม คอนกรีตจะแห้งภายในเวลาไม่กี่วัน หลังจากนั้นปูนซีเมนต์ยังคงทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไปได้โดยอาศัยน้ำที่ซึมจากใต้ดินหรือจากความชื้นในขณะฝนตก หรือ

ในขณะที่ความชื้นในอากาศสูง ดังนั้นภายใต้ภาวะแวดล้อมธรรมดาการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำจะยังคงมีต่อไปอีกหลายปี

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น ระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) สารประกอบ C_3S และ C_2S ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ C-S-H) ดังสมการ (2.1) และ (2.2)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน



2.4 วัสดุปอซโซลาน

ในปัจจุบันมีการนำวัสดุประเภทปอซโซลานมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมซีเมนต์และอุตสาหกรรมก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายโดยวัสดุประเภทปอซโซลานนี้ถือว่าเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Material) ชนิดหนึ่ง คำว่าวัสดุเชื่อมประสานนี้หมายถึงวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานองค์ประกอบต่างๆหรือวัสดุอื่นเข้าด้วยกันซึ่งในอดีตวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้างมีเพียงอย่างเดียวคือซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมาตรฐาน ASTM C618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน วัสดุจำพวกนี้ได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม เป็นต้น ซึ่งเป็นของเหลือใช้ (Waste) จากโรงงานอุตสาหกรรม

2.4.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

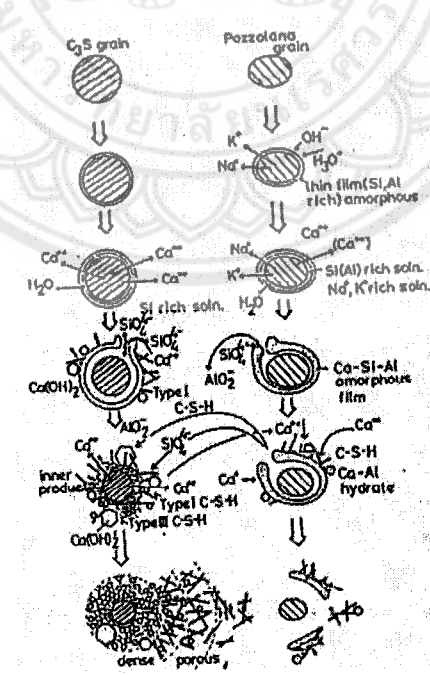
เกิดจากปฏิกิริยาที่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้ซีเมนต์เฟสเกิดเป็นวุ้น (Gel) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซีเมนต์เฟสที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง (ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม) แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปอีกกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอะลูมินาผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction)



สำหรับการใช้งานแก้ลอยซึ่งถือเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานจะเป็นไปตามสมการ (2.3) และ (2.4) สำหรับค่า x, y เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับซิลิกาและอลูมินา [11]

2.4.2 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีสารปอซโซลาน

จากรูปที่ 2.1 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S) และสารปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca²⁺) จะละลายออกจากสารประกอบ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S) อย่างอิสระลงไปของเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากสารปอซโซลานโดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับไว้ที่ผิวของอนุภาค ปอซโซลาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ (CaO/SiO₂) สูง ในขณะที่บนผิวของสารปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ต่ำและมีความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัสกับน้ำผิวของสารปอซโซลานจะมีคุณสมบัติเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H₃O⁺) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้ และจะทำให้มีการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na⁺) และโพแทสเซียมไอออน (K⁺) และไอออนอื่นๆ ที่ละลายตามมา เป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO₄⁴⁻) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO₂⁻) ด้วยและเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด



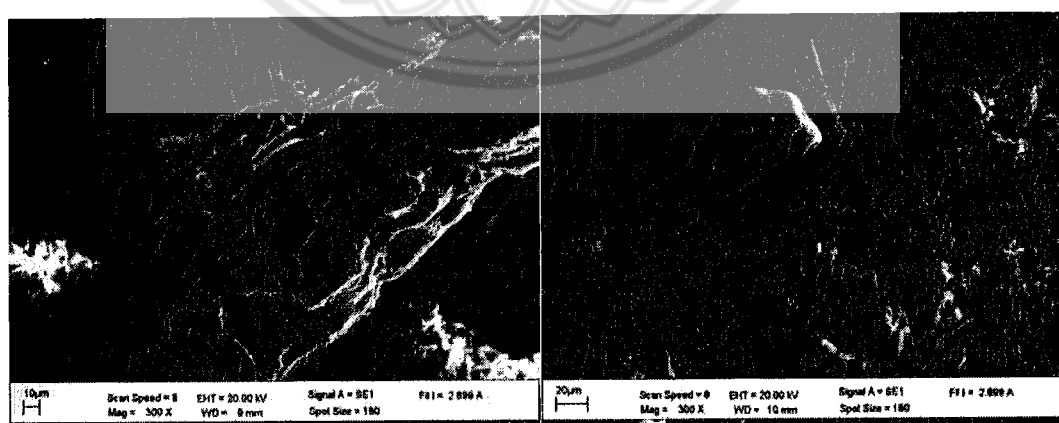
รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก [12]

2.4.3 เถ้าขานอ้อย

เถ้าขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โดยได้จากการนำ ขานอ้อยไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงาน เถ้าขานอ้อยที่ได้จากโรงงานโดยตรงจะมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ไม่นำเนียน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมโครเมตรขึ้นไปแสดงดังรูปที่ 2.2(ก) หากนำไปทดแทนปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต พบว่าจะทำให้ส่วนผสมคอนกรีตต้องการน้ำมากขึ้น มีการสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็ว และกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าขานอ้อยอย่างมาก เพราะฉะนั้น เถ้าขานอ้อยที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะที่จะใช้ในส่วนผสมคอนกรีต แต่เมื่อทำการบดเถ้าขานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคจะมีขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 2.2(ข) และความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าขานอ้อยก่อนบด สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยพบว่าเถ้าขานอ้อยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักแสดงดังตาราง 2.2 [13-14]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (ร้อยละ)
Silicon Dioxide (SiO_2)	55.0
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	5.1
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	4.1
Calcium Oxide (CaO)	11.0
Magnesium Oxide (MgO)	0.9
Sodium Oxide (Na_2O)	0.2
Potassium Oxide (K_2O)	1.2
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.2
Loss on Ignition (LOI)	19.6



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าขานอ้อยที่ (ก) ไม่ผ่านการบด และ (ข) ผ่านการบด [15]

แม้ว่าเถ้าขานอ้อยจากโรงงานโดยตรงจะไม่ใช่วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ที่ดี แต่สามารถพัฒนาคุณภาพของเถ้าขานอ้อยให้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีได้ โดยการบดให้มี ความละเอียดสูง ซึ่งพบว่าเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น และหากมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จะสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้เช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ

ดังนั้นจุดมุ่งหมายของการทำวิจัยก็เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางกลและทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบา โดยการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ และใส่สารเติมแต่งซิลิกาฟุ้ง พร้อมทั้งศึกษาทดสอบการต้านแรงอัด ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ ความพรุน และค่าการนำความร้อน

2.4.4 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิถึง 2000 °C ทำให้เกิดไอของ SiO₂ ซึ่งต่อมาจะออกซิไดซ์ และกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิเมตร เป็นขนาดที่เล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึง 100 เท่า

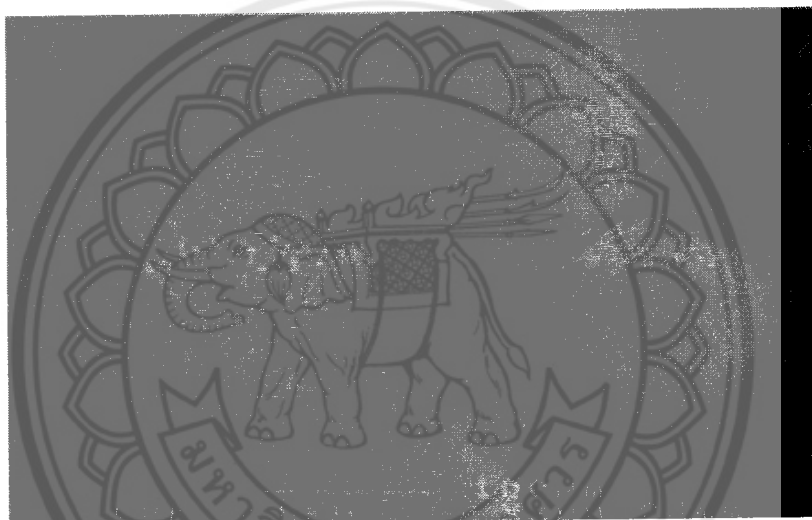
องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO₂ ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักมี SiO₂ ที่สูงมากคือ มักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO₂ ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้ง มาเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน จะพบว่ามียังองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน, และซิลิกาฟุ้ง [16]

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)				
ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน	ซิลิกาฟุ้ง	
SiO ₂	20	48	92	
Al ₂ O ₃	5	26	0.7	
Fe ₂ O ₃	3	10	1.2	
CaO	60	5	0.2	
MgO	1.1	2	0.2	
SO ₃	2.4	0.7	-	
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.6	
LOI	2	3	-	

คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของซีลีกาฟุ่มที่เห็นชัดเจนคือ เป็นฝุ่นผงสีค่อนข้างดำ หรือเทา ที่ละเอียดมาก แต่ถ้าเป็นคอนเด้นซีลีกาฟุ่มจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของซีลีกาฟุ่มหลายๆ เม็ดเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซีลีกาฟุ่มมีค่าประมาณ 2.2 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 150,000 ซม²/ก ขณะที่ปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3,400 ซม²/ก ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ขณะที่ของปูนซีเมนต์แลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 15 มิลลิเมตร เนื่องจากมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย ดังนั้นจึงนิยมนำซีลีกาฟุ่มมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า “คอนเด้นซีลีกาฟุ่ม หรือซีลีกาฟุ่มควบแน่น” ซึ่งแสดง ดังรูปที่ 2.3 และสมบัติทางกายภาพของซีลีกาฟุ่ม, เถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แสดงในตารางที่ 2.4 [17]



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซีลีกาฟุ่มควบแน่น

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของซีลีกาฟุ่ม, เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 [17]

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ซีลีกาฟุ่ม
ความละเอียดของเบลน (ซม ² /ก)	3400	3800	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.4	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือ สีนํ้าตาล	เทาดำ, เทาอมขาว

2.5 เม็ดโฟมอีพีเอส

Expanded Polystyrene Foam (EPS) คือ โฟม PS ที่ใช้ก๊าซ Pentane (C_5H_{12}) ซึ่งเป็นตระกูลเดียวกับ ก๊าซหุงต้ม เป็นสารที่ทำให้เกิดการขยายตัว (Blowing Agent) ในระหว่าง กระบวนการผลิต วัตถุดิบที่เรียกว่า Polymerization เนื้อพลาสติก PS จะทำปฏิกิริยากับก๊าซ Pentane โฟมอีพีเอส วัตถุดิบจะขยายตัว และเมื่อ ได้รับความร้อนจาก ไอน้ำ (Steam) ก็จะกลายเป็นเม็ดโฟมขาวๆ จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป (Molding) พลาสติก หรือ Expanded Polystyrene Foam ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. และ 5 มม. ภายในของเม็ดโฟมพลาสติกจะ ประกอบไปด้วยอากาศประมาณ 98% และ มีพลาสติกอยู่ 2% จึงทำให้เม็ดโฟมพลาสติกนั้นมีน้ำหนักเบาและมี คุณสมบัติในการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนได้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ เม็ดโฟมพลาสติกของคอนกรีตโฟม ยัง ผ่านกระบวนการเคลือบสารพิเศษ เพื่อทำให้เม็ดโฟมผสมกับปูนซีเมนต์ในขณะที่ทำการผสมได้อย่างมี ประสิทธิภาพและช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับซีเมนต์เมื่อแห้งตัวแล้ว [18]

Expanded polystyrene Foam (EPS) มีคุณสมบัติเด่น คือ

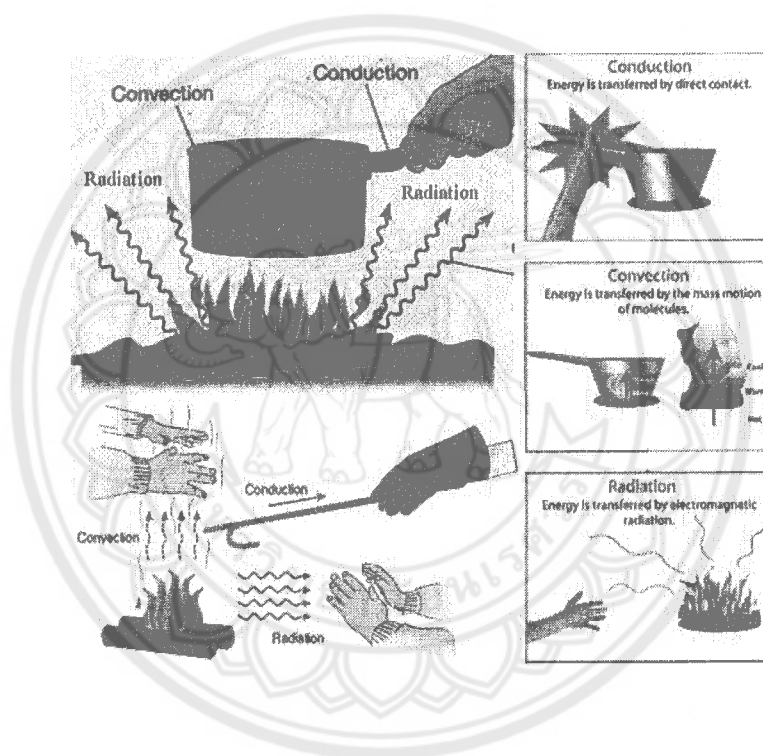
1. โฟมอีพีเอสมีน้ำหนักเบา
2. โฟมอีพีเอสสามารถรองรับน้ำหนักได้มากกว่า 2000 กิโลกรัม
3. โฟมอีพีเอสมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนมากกว่าวัสดุอื่น
4. โฟมอีพีเอสในการก่อสร้าง เป็นชนิดแบบไม่ลามไฟ
5. โฟมอีพีเอสไม่มีสารพิษ

โฟมอีพีเอสเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ในเรื่องคุณสมบัติ คือ เบา แต่สามารถรับน้ำหนักได้ดี นอกจากนั้นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน เก็บความเย็นและป้องกันการผ่านของเสียง จึงเหมาะสำหรับงาน ก่อสร้างที่ต้องการประหยัดพลังงาน งานรับน้ำหนักหรืองานกันกระแทกรวมทั้งงานที่ต้องการความเบา ซึ่งจะ เห็นได้ว่าโฟมนำไปใช้งานประเภทต่างๆ มากมาย เช่น งานก่อสร้างอาคาร บ้านแบบประหยัดพลังงาน งาน ก่อสร้าง ถนน สะพาน งานก่อสร้างบ้านลอยน้ำ งานกันฉนวนความร้อน งานบรรจุภัณฑ์และงาน Lost Foam งานอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทคุณสมบัติที่ต้องการใช้งานนั้นๆ ปัจจุบันการใช้โฟมในงานก่อสร้าง จะมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากภูมิอากาศประเทศไทยเมืองร้อน อากาศอบอ้าว จึงต้องการที่จะสร้างที่ อยู่อาศัยขึ้นเพื่อป้องกันความร้อน และประหยัดความร้อนได้ดีที่สุด แถมยังมีน้ำหนัก ที่เบา ง่ายต่อการติดตั้ง อีกด้วย

โฟมอีพีเอสเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมีน้ำหนักเบาสะดวกในการขนย้าย ทำให้ง่ายในการก่อสร้าง สามารถที่จะตัดตามแบบที่ต้องการได้ ประหยัดพลังงาน ป้องกันความชื้นจากผิวดิน คงทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีอยู่รอบๆ มีความต้านทานต่อแรงอัด จึงทำให้ช่วยในการลดการทรุดตัวเมื่อรับน้ำหนักอาคารใช้งานยาวนาน อีกทั้งไม่ติดไฟ จึงเหมาะในการใช้งานกรณีที่ต้องการลดการทรุดตัวบนชั้นดินเหนียวอ่อนและกระพังหลายของดิน บริเวณ คอสะพานได้เป็นอย่างดี [19]

2.6 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิระหว่างสองตำแหน่งมีค่าแตกต่างกัน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ 3 แบบ คือ การนำความร้อน (Conduction) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลาง ในขณะที่การพาความร้อน (Convection) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่เคลื่อนที่เมื่อมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และในส่วนของรังสีความร้อน (Radiation) จะเป็นการที่ทุกพื้นผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในสถานะที่ปราศจากตัวกลางใดๆ จะมีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่างๆ



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อน [20]

2.6.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อน จากอะตอมหนึ่งไปยังอะตอมหนึ่ง ที่อยู่ข้างเคียง โดยอะตอมเหล่านั้นไม่ได้เคลื่อนที่ไปเพียงสั้นกลับไป-กลับมาผ่านสมดุลที่ตำแหน่งเดิม การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่บีบอัดได้ เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิสามารถเกิดขึ้นได้ในของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แต่เนื่องจากการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลวและก๊าซ แต่สำหรับในของแข็ง ที่บีบอัดได้ไม่มีการเคลื่อนที่มวลภายในวัสดุจะมีความการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเพียงอย่างเดียว อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิคูณกับพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน

ผ่านสารในความหนา ช่วงเวลา พื้นที่ และค่าความแตกต่างอุณหภูมิหนึ่งๆ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนใช้ในการวัดค่าความร้อนที่ผ่านภายในผนัง (q_{cond}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$q_{cond} = -\frac{kA}{\Delta x} \Delta T \quad (2.5)$$

โดยที่	q_{cond}	= อัตราการนำความร้อน (W)
	k	= ค่าการนำความร้อนของผนัง (W/mK)
	A	= พื้นที่ผิว (m^2)
	ΔX	= ผลต่างความหนา (m)
	ΔT	= ผลต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกผนัง (K)

จากสมการที่ 2.5 คือกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางขวาของสมการเป็นผลเนื่องจากกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิจะต้องลดลงเมื่อระยะทาง X เพิ่มมากขึ้นจึงมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวกหรือมีค่าเป็นบวก จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวาของสมการที่ 8

อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านตัวกลางนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น รูปทรง ความหนา และวัสดุที่ใช้ในการทำตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลาง ค่าการนำความร้อน (k) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของเหลว ของแข็ง และก๊าซ ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำๆ ของก๊าซไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัสดุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัสดุแปรตามอุณหภูมิ แต่การนำไปใช้งานในด้านการปฏิบัตินั้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิจำกัด สารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะมีค่าการนำความร้อนสูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น สารอโลหะ ก็จะมีค่าการนำความร้อนต่ำ ค่าการนำความร้อนจึงเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารที่สำคัญมากในการศึกษาการเคลื่อนที่ของความร้อนในสารนั้น สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการนำความร้อนของสารต่างๆ โดยการเปรียบเทียบจากค่าการนำความร้อนของสารเหล่านั้น โดยสารที่มีค่าการนำความร้อนสูง จะเรียกว่า สารตัวนำ (conductor) และสารที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ จะเรียกว่า ฉนวน (insulator) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (conductivity, k) หน่วยเป็น W/m·K หรือ Btu/(ft·h·°F) ตัวอย่างค่าการนำความร้อนของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.5 [20]

ตารางที่ 2.5 ค่าการนำความร้อนของสารบางชนิด [20]

วัตถุ	ค่าการนำความร้อน (k), W/m·K
โลหะบริสุทธิ์	35-430
โลหะผสม	20-200
โลหะเหลว	9-90
ของเหลว (อโลหะ)	0.2 -2.0
ของแข็ง (อโลหะ)	0.02-20
ฉนวน	0.02-0.40
ก๊าซ	0.002-0.2

2.6.2 การพาความร้อน (Convection)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาประกอบด้วยกลไก 2 อย่าง คือ พลังงานเกิดการถ่ายเทเนื่องจากการเคลื่อนที่หรือการแพร่แบบสุ่มของโมเลกุล และผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหล การถ่ายเทลักษณะนี้เกิดขึ้นได้ เช่น ในระบบที่มีเกรเดียนต์อุณหภูมิจะมีการ ถ่ายเทความร้อนได้ (เกรเดียนต์ของปริมาณใดๆ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณที่เปลี่ยนแปลง ต่อระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป) และเนื่องจากโมเลกุลในกลุ่มของไหลจะมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม อยู่ด้วย ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงเกิดจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลและการเคลื่อนที่ของของไหลส่วนใหญ่ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

1.1 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) หรือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้ โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล

1.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็ง โดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือ เครื่องสูบน้ำ

2.6.3 การแผ่รังสี (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือ การที่พลังงานถูกปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แน่นอน โดยวัตถุนั้นอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ก็ได้ การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีไม่ต้องอาศัยตัวกลางใดๆ ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาความร้อนจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเท

2.7 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อใช้สำหรับงานก่อสร้างผนังและพื้นเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตมวลเบาทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยใช้เทคนิคเติมสารเคมี หรือใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่าทดแทนมวลรวม และส่งผลให้คอนกรีตพองฟู มีรูพรุนเล็กๆ เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตซึ่งเหมาะกับงานโครงสร้างที่ไม่ต้องรับน้ำหนักและรับความต้านการอัดมาก เนื่องจากมีน้ำหนักเบา จึงไม่จำเป็นที่จะต้องมีโครงสร้าง ขนาดใหญ่ ซึ่งจะช่วยประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง และประหยัดเวลา อีกทั้งคอนกรีตมวลเบายังมีจุดเด่นด้านคุณสมบัติเป็นฉนวนป้องกันความร้อน และเสียง ลดการใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลืองและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป [21-22]

2.7.1 ประเภทของคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาที่มีมากมายหลายประเภท แต่คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัสดุดิบ และกระบวนการผลิตที่ต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของอิฐมวลเบาแตกต่างกัน คอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปอาจแบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ระบบ ดังนี้

1. ระบบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non-Autoclaved System) ซึ่งจะแบ่งย่อยออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ ใช้วัสดุเบากว่ามาทดแทน และใช้สารเคมี

ประเภทที่ 1 ใช้วัสดุเบากว่ามาทดแทน เช่น ขี้เถ้า ขี้เถ้า ขานอ้อย หรือเม็ดโพลี ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้น แต่จะมีอายุการใช้งานที่สั้นเสื่อมสภาพได้เร็ว และหากเกิด ไฟไหม้ สารเหล่านี้อาจเป็นพิษต่อผู้อยู่อาศัย

ประเภทที่ 2 ใช้สารเคมี (Cellular Lightweight Concrete) เพื่อให้เนื้อคอนกรีตฟู และทิ้งให้แข็งตัว คอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวมากกว่า ทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ง่าย ไม่ค่อยแข็งแรง

คอนกรีตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงนี้ส่วนใหญ่เนื้อผลิตภัณฑ์มักจะมีสีเป็นสีปูนซีเมนต์ ต่างจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงซึ่งจะมีเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์สีขาว

2. ระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclaved System) ซึ่งแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ ใช้ปูนขาว (Lime base) และประเภทใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Cement base)

ประเภทที่ 1 Lime Base ใช้ปูนขาว ซึ่งควบคุมคุณภาพได้ยาก มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตทำให้คุณภาพคอนกรีตที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอมีการดูดซึมน้ำมากกว่าปกติ

ประเภทที่ 2 Cement Base ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เป็นระบบ ที่นอกจากจะช่วยให้คอนกรีต มีคุณภาพได้มาตรฐานสม่ำเสมอแล้ว ยังช่วยให้เกิดการตกผลึก (Calcium Silicate) ในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรง ทนทาน กว่าที่การผลิตในระบบอื่นๆ มาก

2.7.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ [23]

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4562 (2556) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก.2601-2556 มีรายละเอียดดังนี้

1) ความหนาแน่น

คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งออกเป็น 8 ชนิด ตามตารางที่

2.6

ตารางที่ 2.6 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา [23]

ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งเฉลี่ย (kg/m^3)
C6	501 ถึง 600
C7	601 ถึง 700
C8	701 ถึง 800
C9	801 ถึง 900
C10	901 ถึง 1000
C12	1001 ถึง 1200
C14	1201 ถึง 1400
C16	1401 ถึง 1600

2) ความต้านแรงอัด

คอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องมีความต้านแรงอัดที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา [23]

ชนิด	ความต้านทานแรงอัด MPa (kg/cm^2)
C6	
C7	2.0(20.4)
C8	
C9	
C10	2.5(25.5)
C12	
C14	
C16	5.0(51.0)



1050599

3) อัตราการดูดซึมน้ำ

เมื่อทดสอบชิ้นงานตามตาราง 9 และ 10 แล้ว อัตราการดูดซึมน้ำต้องเป็นไปตามตารางที่ 2.8 สำนักหอสมุด
ตารางที่ 2.8 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบา [23] 22 มี.ค. 2565

ชนิด	อัตราการดูดซึมน้ำ% (เศษส่วนโดยมวล)
C6	
C7	25
C8	
C9	
C10	23
C12	
C14	20
C16	

2.8 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนางานวิจัยทางด้านคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยการใช้เถ้าลอยในการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีมานานมากกว่า 40 ปี ทำให้ได้ข้อสรุปจากการนำเอาเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต [10-11, 24] โดยกล่าวได้ว่าเถ้าลอยสามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาวได้โดยการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 และยังสามารถเพิ่มความสามารถในการไหลได้ของคอนกรีตได้ ซึ่งจะทำให้การใช้งานคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยทำงานได้ง่ายขึ้น โดยปฏิกิริยาของเถ้าลอยเกิดจากการที่ซิลิกา และอะลูมินาที่เป็นองค์ประกอบหลักทำปฏิกิริยากับเบสที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำได้เป็นเฟสที่ช่วยยึดประสานทำให้ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ได้ในช่วงต้นและจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตนานขึ้น [25-26]

จากแนวทางการใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีนักวิจัยพยายามหาวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเถ้าลอย (วัสดุปอซโซลาน) มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต โดย Cordeiro และ คณะ [27] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาขานอ้อยในช่วง 400-800 องศาเซลเซียส ต่อสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าขานอ้อยหรือไม่ พบว่าอุณหภูมิของการเผาเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุด โดยดูจากค่าสูญเสียน้ำเนื่องจากการเผา (Loss of Ignition; LOI) มีค่าที่ต่ำ และค่าดัชนีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าสูงที่สุดด้วย ซึ่ง นอกจากอุณหภูมิของการเผาจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของเถ้าขานอ้อยแล้ว Morales [28] ยังมีการรายงานว่าความละเอียดของวัสดุปอซโซลานมีผลต่อการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน ซึ่งอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 10-20 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าขานอ้อย นอกจากนี้การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและลดการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตได้อีกด้วย [29-32]

การใช้งานเถ้าขานอ้อยในงานก่อสร้างแบบอื่น ได้ถูกรายงานโดย Akram [33] ที่นำเอาเถ้าขานอ้อยมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิต Self-compacting concrete (SCC) ต้นทุนต่ำ พบว่าการคอนกรีตชนิด SCC ที่ผสมซีเถ้าขานอ้อยที่ 28 วันมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม การวิเคราะห์ต้นทุนพบว่าต้นทุนของวัตถุดิบของคอนกรีต SCC ตัวที่ผสมเถ้าขานอ้อยคิดเป็น 35.63% ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมโดยคิดตัวที่มีแรงอัดเท่ากันที่ 34 MPa นอกจากนี้ Sales [34] ได้นำเอาเถ้าขานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลมาผสมปูนซีเมนต์เพื่อผลิตเป็นคอนกรีตโดยนำเอาเถ้าขานอ้อยมาแทนทราย ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่าเถ้าขานอ้อยมีสมบัติทางกายภาพเหมือนกับทรายทั่วไป ซึ่งการนำเอาเถ้าขานอ้อยมาทดแทนทรายสามารถทำให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตมี ในส่วนงานวิจัยของ Corderio และคณะ [35] ได้นำวัสดุปอซโซลานสองชนิด ได้แก่เถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต พบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบในคอนกรีตสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการไหล (slump) ของคอนกรีตสดได้ เมื่อทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละและเถ้าแกลบรวมกันร้อยละ 40 สามารถเพิ่มค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้ 1.2 เท่า และยังพบว่าสามารถช่วยลดความร้อนเนื่องจากการทำปฏิกิริยา และยังลดปริมาณรูพรุนของคอนกรีตอีก นอกจากนี้ ชัย และคณะ [8] ได้แนะนำเกี่ยวกับการใช้งานเถ้าขานอ้อยในงานคอนกรีตว่า ควรใช้เถ้าขานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ 15 มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ความละเอียดของเถ้าขานอ้อยควรคัดตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตรไม่เกินร้อยละ 5 รวมทั้งเถ้าขานอ้อยต้องไม่มีน้ำตาลหรือน้ำอ้อยปะปนอยู่ เพราะน้ำตาลหรือน้ำอ้อยเป็นสารหน่วงการก่อตัวของรูแรงด้วย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าขานอ้อยในคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย โดยมีการใช้วัสดุอื่น ๆ ในคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS เช่นการผสมยางไม้ลงไปคอนกรีตมวลเบาในอัตราส่วน 0.5%, 1%, และ 1.5% และอัตราส่วนซีเมนต์กับโฟม EPS เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80% พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเมื่ออัตราส่วนโฟม EPS และอัตราส่วนยางไม้เพิ่มขึ้น [36-37] นอกจากนี้มีการศึกษาผลของวัสดุปอซโซลานอื่นๆ เช่นเถ้าแกลบ ซิลิกาฟุ่ม และนาโนซิลิกา ต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS พบว่าสามารถช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาได้เป็นอย่างดี และมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุด เหมาะแก่การนำไปใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา [38-41]

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นเพื่อเป็นแนวทางในการส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลในงานก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าลอยจนถึงในระดับที่มีมาตรฐานในการควบคุมสำหรับการนำไปใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการใช้เถ้าขานอ้อยเพื่อเป็นส่วนผสมในการออกแบบคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS โดยจะทำการศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาให้ตรงตามมอก. และยังเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในชุมชนอีกด้วย

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

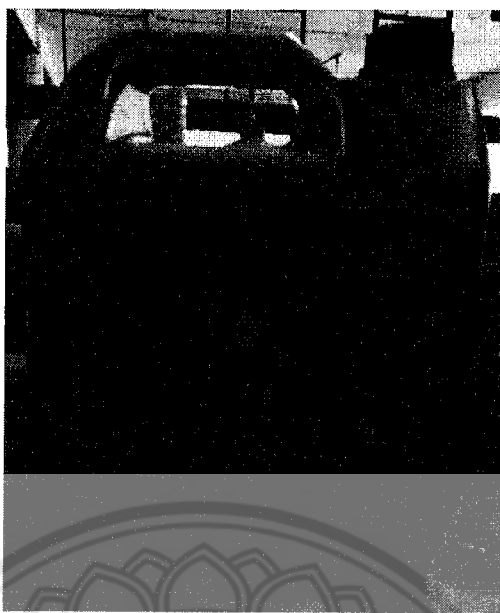
3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ทราย (บด 12 ชั่วโมง)
3. ซิลิกาฟูม
4. โฟมอีพีเอสรีไซเคิล
5. ทราย
6. น้ำ
7. น้ำยาผสมคอนกรีต (Superplasticizer) ยี่ห้อ Sika Viscocrete-10 (รูป 3.1)
8. แคลเซียมไฮดรอกไซด์

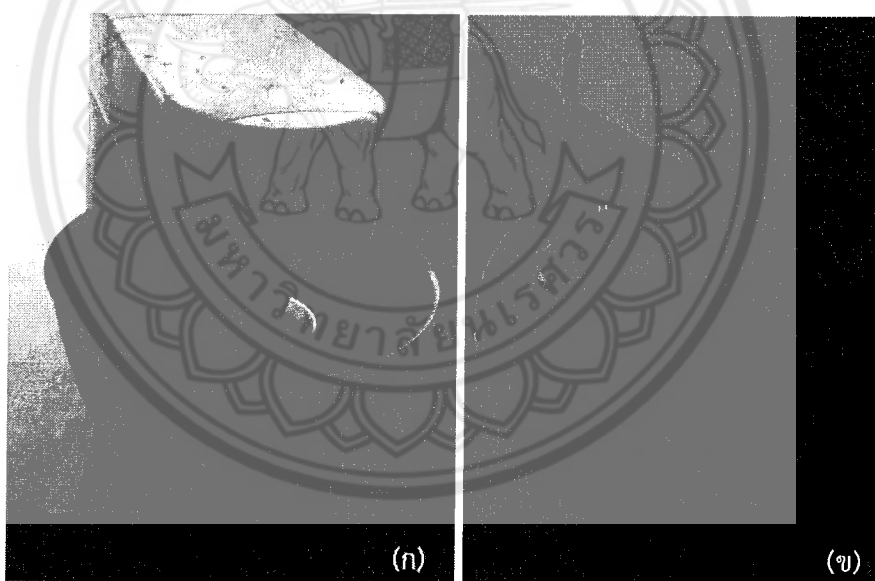
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบหล่อขึ้นงานทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. แบบหล่อขึ้นงานแบบแผ่นขนาด 20×20×2 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. แบบหล่อขึ้นงานแบบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. สูง 10 ซม.
4. เครื่องผสมมอร์ตาร์แสดงดังรูป 3.2(ก)
5. เครื่องผสมคอนกรีตแสดงดังรูป 3.2(ข)
6. เครื่องบดสารแบบบอลมิล
7. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 1 กรัม รุ่น AND HT-5000
8. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 5 กรัม ยี่ห้อ
9. แท่งตำคอนกรีต
10. เกรียงเหล็ก และอุปกรณ์ตวงสาร
11. ถังเก็บขึ้นงาน
12. ชุดอุปกรณ์ทดสอบความชื้นเหลว Flow Table มาตรฐาน ASTM C230
13. ชุดอุปกรณ์ทดสอบการหน่วงเวลา (Time lag)
14. เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อน
15. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตขนาด 100 ตัน ยี่ห้อ Baldwin รุ่น 16127

ผลิตโดย SATEC System Inc.



รูปที่ 3.1 น้ำยาผสมคอนกรีต (Superplasticizer)

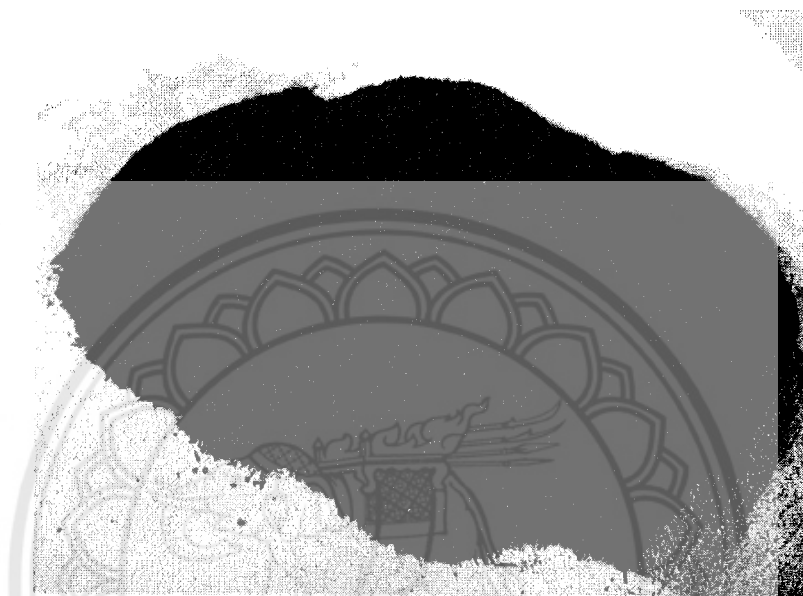


รูปที่ 3.2 เครื่องผสมคอนกรีตมวลเบา (ก) สำหรับหล่อชิ้นงานปริมาตร 1,000 ลบ.ซม. (ข) สำหรับหล่อชิ้นงานปริมาตร 800 ลบ.ซม.

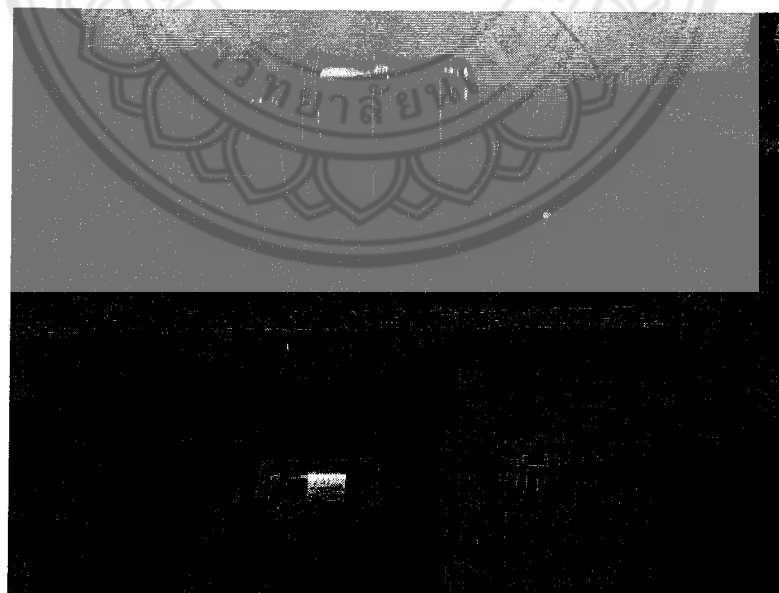
3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 การเตรียมเก้าขานอ้อย

นำเก้าขานอ้อยที่แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล มาตากแดดให้แห้ง ทำการคัดขนาด และนำมาบดด้วยเมื่บด (ball mill) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งภาชนะและเครื่องบดสารแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 เก้าขานอ้อยที่ตากแห้งและผ่านการคัดขนาด



รูปที่ 3.4 เครื่องบดสารแบบ ball mill

3.3.2 อัตราส่วนผสม

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และทดแทนทรายด้วยเม็ดโพลีเอทิลีน (ขนาดใหญ่สุด 6 มิลลิเมตร) ที่อัตราส่วนร้อยละ 80 โดยปริมาตรของทราย โดยใช้ซิลิกาฟูมทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยซึ่งผ่านการบด 12 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยการหล่อคอนกรีตมวลเบาจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.46 ของทุกสัดส่วนผสมเนื่องจากในงานวิจัย มีการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizers) แล้วทำการผสมคอนกรีตมวลเบาตามสัดส่วนดัง ตารางที่ 3.1 เพื่อทำการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา

สูตร	อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)						สารลดน้ำ(CC)
	ปูนซีเมนต์	ซิลิกาฟูม	เถ้าขานอ้อย	น้ำ	ทราย	โพลีเอทิลีน	
CT	420	-	-	195	340	10	2
SCBA10%	378	-	42	195	340	10	2
SCBA20%	336	-	84	195	340	10	2
SCBA30%	294	-	126	195	340	10	2

หมายเหตุ: *อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน = 0.46, ทรายต่อวัสดุประสาน = 2.5

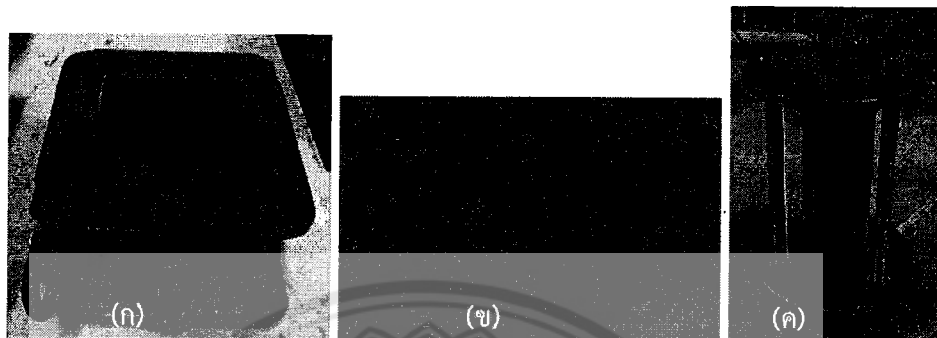
3.3.3 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหล่อชิ้นงานคอนกรีตซึ่งใช้แบบหล่อขนาด 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.5(ก) เพื่อทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความพรุน และใช้แบบหล่อ 20×20×2 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.5(ข) หล่อชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาเพื่อทำการทดสอบการหน่วงเวลา (Time lag) และแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.5(ค) เป็นขนาดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบค่าการนำความร้อน โดยการหล่อคอนกรีตมวลเบาจะใช้อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.46 ของทุกสัดส่วนผสม ชิ้นงานที่หล่อเสร็จแล้วจะถูกถอดออกจากแบบเมื่อผ่านไปแล้ว 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบในน้ำอีก 2, 6, 27 และ 89 วัน ตามลำดับ เมื่อครบกำหนดเวลาการบ่มก็นำชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังที่กล่าวไปข้างต้น โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบสัดส่วนละ 3 ก้อนตัวอย่าง และเปรียบเทียบกับมาตรฐานมอก. 2601-2556 (สำหรับค่ากำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ) ในส่วนของความพรุนจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C642 ดังแสดงในตารางที่ 2.6-2.8 ซึ่งขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทำได้ดังนี้

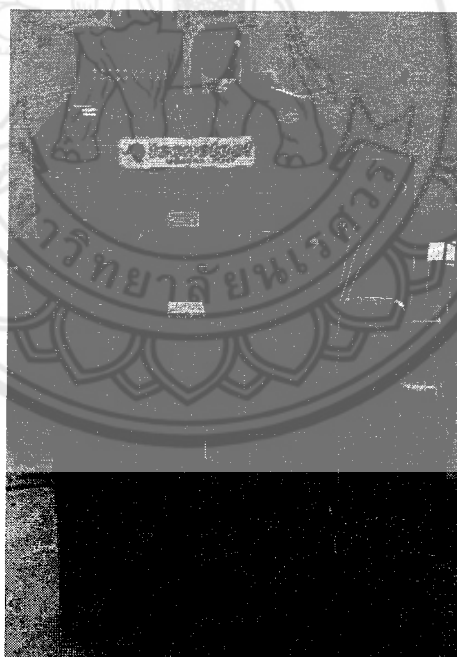
1. ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง และทาน้ำมันที่ผิวด้านในของแบบหล่อทุกด้าน
2. ชั่งเตรียมส่วนผสมตามสัดส่วนตามตารางที่
3. ทำการผสมส่วนผสมลงในเครื่องผสมคอนกรีต
4. ตักส่วนผสมคอนกรีตโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่าๆ กัน แต่ละชั้นตักด้วยแท่งเหล็ก 25 ครั้ง

5. เมื่อทำเสร็จทั้ง 3 ชั้น ก็ปิดผิวหน้าให้เรียบ แล้วหุ้มด้วยพลาสติก เพื่อป้องกันผิวหน้าของชิ้นงานสัมผัสกับอากาศ และป้องกันการระเหยของน้ำ

6. ชิ้นงานที่หล่อเสร็จแล้วจะถูกถอดออกจากแบบเมื่อผ่านไปแล้ว 24 ชั่วโมง แล้วนำไปป้อนในน้ำที่ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ระยะเวลา 2, 6, 27 และ 89 วัน



รูปที่ 3.5 แบบหล่อคอนกรีตมวลเบาขนาด (ก) 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ข) 20×20×2 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ค) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. สูง 10 ซม.



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบกำลังอัด

3.4 การทดสอบชิ้นงาน

3.4.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength)

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโพลิเมอร์ไฮดรอกซีเซล โดยใช้ซิลิกาฟุ่มทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยซึ่งผ่านการบด 12 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้ชิ้นงานขนาด 10 x 10 x 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อทดสอบกำลังอัดแสดงดังภาพ 24 โดยใช้ระยะเวลาการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วันเมื่อครบกำหนดดังกล่าว ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยเครื่อง compressive strength tester และใช้แรงในการกด (dF/dT) อยู่ในช่วง 0.9-1.8 KN/s (ในงานวิจัยนี้ใช้แรงในการกด = 1.2 KN/s) ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาในแต่ละสูตรจะใช้ก้อนตัวอย่างจำนวน 3 ก้อนตัวอย่าง จากนั้นนำกำลังอัดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบกับซีเมนต์ควบคุม การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) หาได้จากสมการที่ 3.1

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

โดยที่ f_c = กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย มีหน่วยเป็น N/mm²

P = แรงอัด มีหน่วยเป็น N

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง มีหน่วยเป็น mm²

3.4.2 การทดสอบค่าดัชนีกำลังรับแรงอัด (Strength activity index)

จากการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย และซิลิกาฟุ่มควบแน่น จากนั้นนำค่ากำลังอัดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT) และทำการหาค่าดัชนีกำลังรับแรงอัด ซึ่งจะนำค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีการผสมเถ้าขานอ้อย และซิลิกาฟุ่มควบแน่น (A) มาเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม (B) ตามมาตรฐาน ASTM C618 แสดงดังสมการที่ 3.2

$$\text{ค่าดัชนีกำลังรับแรงอัด (\%)} = \left(\frac{A}{B}\right) \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ A = ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมวัสดุปอซโซลาน (ksc)

B = ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาควบคุม (ksc)

3.4.3 การทดสอบหาความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ

การทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ จะทดสอบตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ในส่วนของการทดสอบความพรุน จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 โดยใช้ตัวอย่าง ชิ้นงานขนาด 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อน ในการทดสอบ โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะต้องผ่านการบ่มที่ระยะเวลา 3, 7, 28 และ 90 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มก็นำชิ้นงาน ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72

ชั่วโมง หลังจากนั้นก็นำชิ้นงานมาวางไว้ ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง และทำการชั่งน้ำหนัก (มวลแห้ง) จากนั้นนำชิ้นงานที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วนำไปแช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และจึงทำการชั่งน้ำหนักเปียก (มวลเปียก) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความพรุน ดังสมการที่ 3.3-3.5 ตามลำดับ

การดูดซึมน้ำหลังจากรับม

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \left| \frac{(B-A)}{A} \right| \times 100 \quad (3.3)$$

ความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} \rho = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

ความพรุน

$$\text{ความพรุน (\%)} = \frac{B-A}{V} \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่ A = มวลแห้งชั่งในอากาศ (g)

B = มวลที่ผ่านการแช่ในน้ำ 24 ชั่วโมง (g)

ρ = ความหนาแน่น (g/cm³)

m = มวลแห้ง (g)

V = ปริมาตรของก้อนชิ้นงาน (cm³)

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

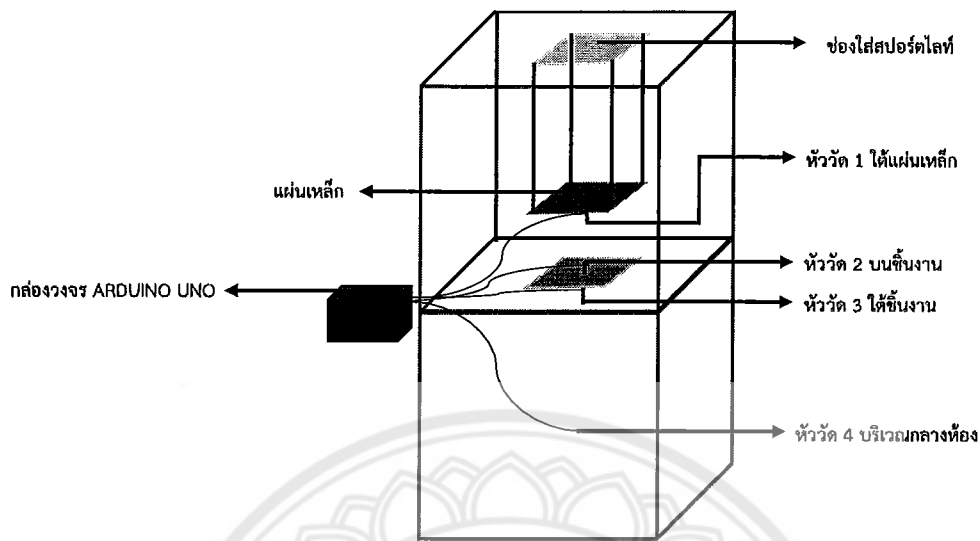
การทดสอบสมบัติทางความร้อนจะใช้ชิ้นงานตัวอย่างขนาด 20×20×2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในการทดสอบการหน่วงอุณหภูมิ และการทดสอบค่าการนำความร้อนใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสมบัติทางความร้อนต้องผ่านการบ่มที่ระยะเวลา 28 และ 90 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มก็นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นก็นำชิ้นงานมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง และเริ่มทำการทดสอบชิ้นงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การทดสอบการหน่วงเวลา (Time lag)

1. ใช้ชุดวงจร Arduino UNO แสดงดังรูปที่ 3.7 ในการเก็บข้อมูลการทดสอบการหน่วงเวลา
2. ใช้หัววัดเซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิ DS18B20 เป็น IC แบบดิจิตอล สามารถวัด อุณหภูมิในช่วง -55°C ถึง 125°C มีความคลาดเคลื่อนต่ำสุด $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
3. ทดสอบหัววัดแต่ละตำแหน่ง ให้มีค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันก่อนทำการทดสอบ
4. นำชิ้นงานแบบแผ่นขนาด 20×20×2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ครบระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 90 วัน ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นก็นำชิ้นงานมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง
5. ทาสารนำความร้อน (Heat sink Compounds HY510) บริเวณที่จะทำการติดหัววัด ติดหัววัดไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน โดยอุณหภูมิแวดล้อมในขณะที่ทำการทดสอบ จะอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส
6. นำชิ้นงานวางในชุดทดสอบดังตำแหน่งดังรูปที่ 3.8
7. การเพิ่ม และการเพิ่มอุณหภูมิ มีขั้นตอนดังนี้
 - 7.1 เปิดสปรอตไลท์ เพื่อให้ความร้อนแก่แผ่นเหล็กจนอุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส
 - 7.2 หยุดการให้ความร้อน และจับเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที เพื่อเก็บข้อมูล
 - 7.3 ทำซ้ำตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น อีก 4 ครั้งติดต่อกัน
8. นำข้อมูลทั้ง 5 ครั้ง มาวิเคราะห์โดยเลือกใช้ข้อมูลจาก 4 ครั้งสุดท้าย มาวิเคราะห์เนื่องจากในช่วงแรกนั้นเป็นการทดสอบให้เครื่องมีความเสถียรในการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.7 วงจร Arduino UNO สำหรับการเก็บข้อมูลอุณหภูมิการทดสอบการหน่วงเวลาความร้อน

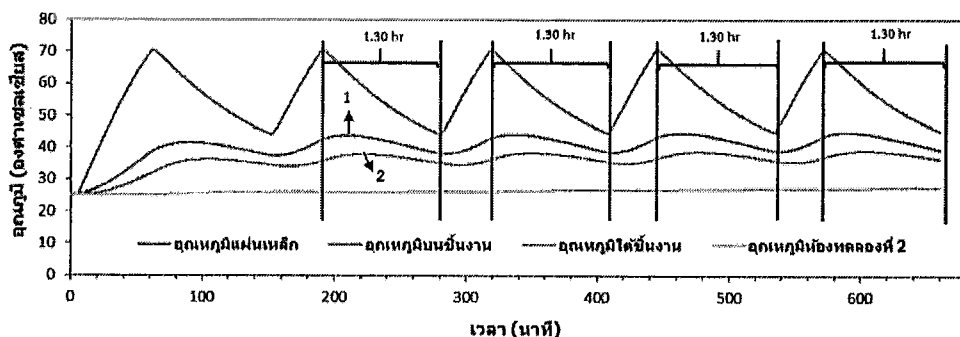


รูปที่ 3.8 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการหน่วงอุณหภูมิ

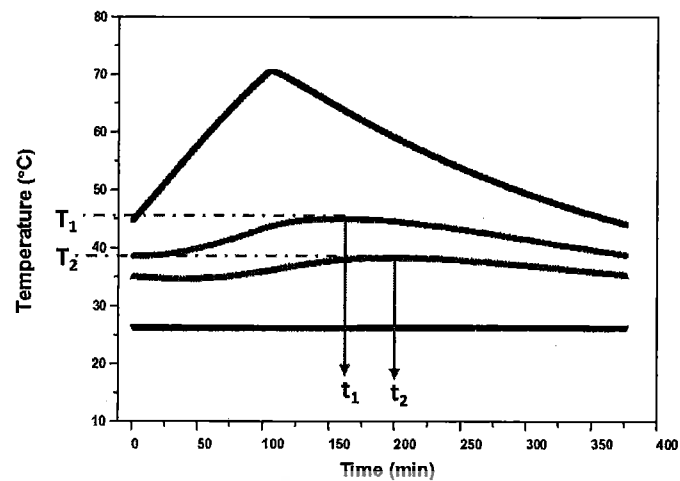
การวิเคราะห์การทดสอบการหน่วงอุณหภูมิ

ลักษณะของชุดอุปกรณ์ทดสอบการหน่วงอุณหภูมิจะจำลองให้คล้ายกับบ้านหนึ่งหลัง จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่ากล่องสี่แดงจะเปรียบเสมือนสภาพแวดล้อมภายนอกบ้านที่มีความร้อนจากดวงอาทิตย์ตลอด (สปอร์คไลท์เปรียบเสมือนดวงอาทิตย์) และในส่วนของกล่องสีน้ำเงิน ก็เปรียบเสมือนภายในบ้านที่ไม่ได้มีการปรับอากาศ ซึ่งจากการทดสอบขึ้นงานจะได้ผลออกมาเป็นกราฟช่วงการทดสอบ 5 loops ดังรูปที่ 3.9 นำกราฟในช่วงที่ 2-5 มาใช้วิเคราะห์ และหาค่าเฉลี่ยของ การหน่วงของเวลา (Δt) หรือ Time lag (นาที), ความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงสุดบนชั้นงานและอุณหภูมิสูงสุดล่างชั้นงาน ในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 3.10

ตัวอย่าง



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างกราฟการหน่วงเวลาที่ได้จากการทดสอบ 5 loops



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างกราฟการหน่วงเวลาที่ใช้วิเคราะห์ Δt และ ΔT

เมื่อได้กราฟมา นำข้อมูลของอุณหภูมิและเวลาสูงสุดบนชิ้นงาน ล้างชิ้นงานมาหา ค่าการหน่วงของเวลา (Δt) หรือ (Time lag) ดังสมการที่ 3.6-3.7

$$\Delta t = \text{time}_{\text{maxdown}} - \text{time}_{\text{maxup}} \quad (3.6)$$

โดยที่ $\text{time}_{\text{maxup}}$ คือ เวลาที่อุณหภูมิบนชิ้นงานสูงสุด
 $\text{time}_{\text{maxdown}}$ คือ เวลาที่อุณหภูมิล้างชิ้นงานสูงสุด

และหาค่าความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากกราฟ โดยคำนวณค่าความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ดังสมการที่ 3.7

$$\text{Difference in temperature } (^\circ\text{C}) = \Delta T$$

$$\Delta T = \text{Temp}_{\text{maxup}} - \text{Temp}_{\text{maxdown}} \quad (3.7)$$

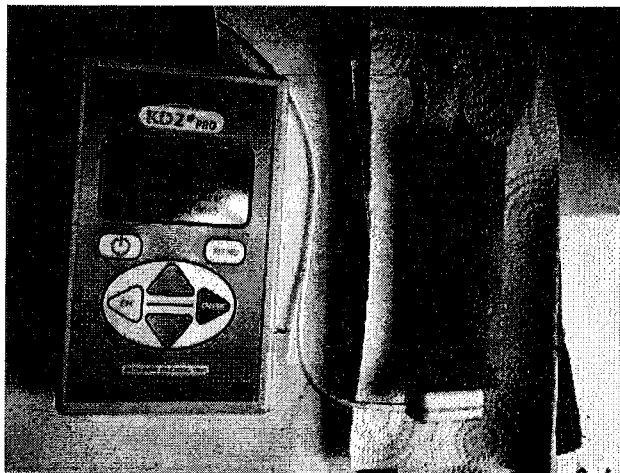
โดยที่ $\text{Temp}_{\text{maxup}}$ คือ อุณหภูมิสูงสุดบนชิ้นงาน
 $\text{Temp}_{\text{maxdown}}$ คือ อุณหภูมิสูงสุดล้างชิ้นงาน
 นำค่าที่ได้จากการคำนวณมาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์เป็นลำดับถัดไป

2) การทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

1. ใช้เครื่องทดสอบ KD2 PRO Thermal Properties Analyser ดังรูปที่ 3.11 ใช้หัววัดเซ็นเซอร์ TR-1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร
2. ทดสอบหัววัดเพื่อให้มีความเสถียรก่อนทำการทดสอบชิ้นงาน
3. นำชิ้นงานทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร และมีช่องว่างตรงกลางชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ครบระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 90 วัน ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นก็นำชิ้นงานมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง
4. นำสารนำความร้อน (Heat sink compounds HY510) อัดลงในช่องว่างตรงกลางชิ้นงานให้เต็มทั้งช่องก่อนที่จะทำการใส่หัววัดลงไป โดยอุณหภูมิแวดล้อมในขณะทำการทดสอบจะอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส
5. เริ่มทำการทดสอบชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.12
 - 5.1 เปิดเครื่องทดสอบ และนำหัววัดใส่ลงไปในห้องของชิ้นงานที่มีสารนำความร้อนอยู่
 - 5.2 กด Enter เริ่มการทดสอบ ใช้เวลาในการทดสอบ 5 นาที
 - 5.3 หน้าจอจะแสดงผลอัตโนมัติ โดยจะแสดงค่าการนำความร้อน ค่า error ของข้อมูล
 - 5.4 ทดสอบตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นทุกชิ้นงาน เพื่อเก็บข้อมูลนำมาวิเคราะห์ผล



ภาพ 29 เครื่องทดสอบ KD2 PRO Thermal Properties Analyser



รูปที่ 3.12 การทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง KD2 PRO Thermal Properties Analyser

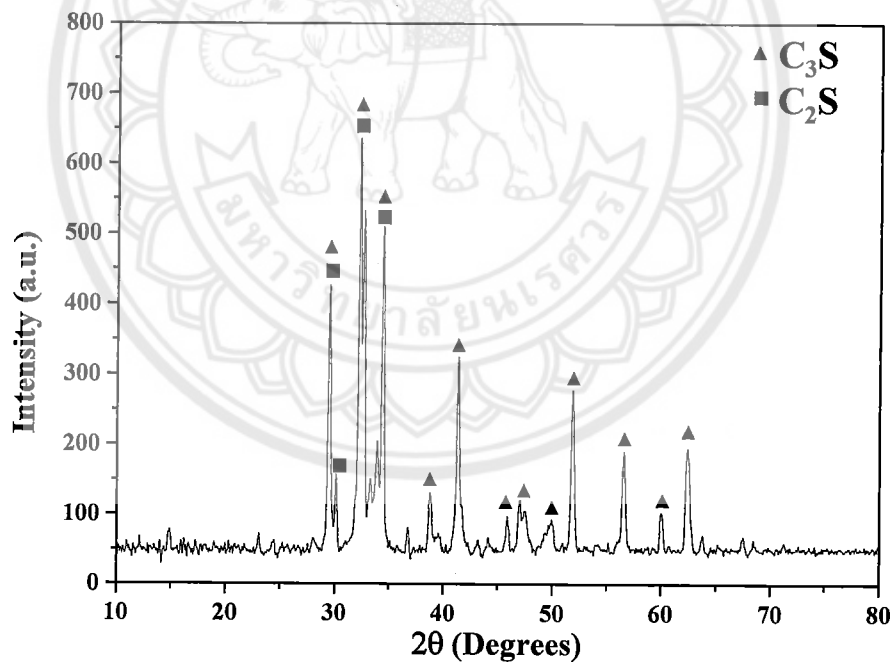


บทที่ 4

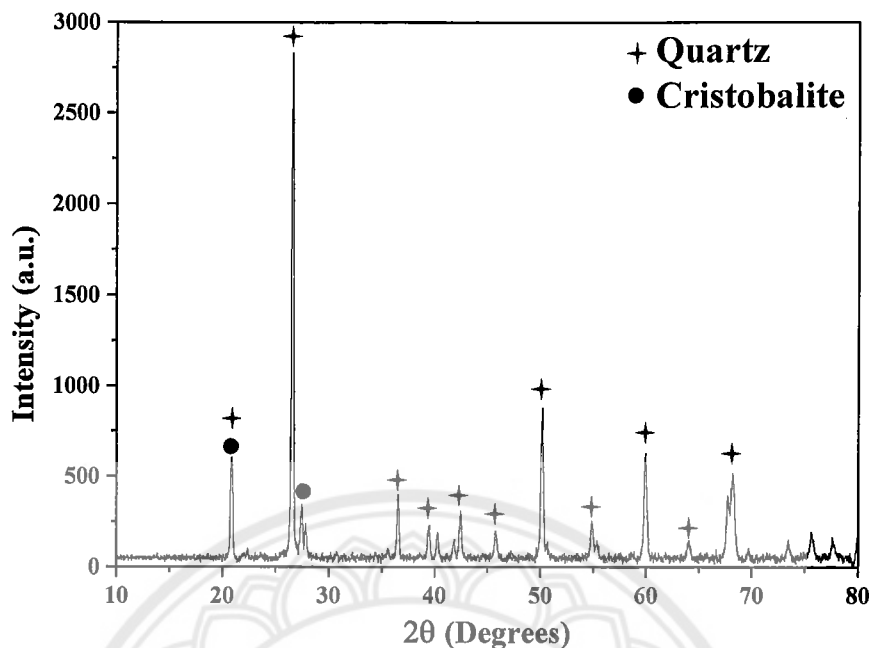
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาโครงสร้างของวัสดุขี้เถ้าโดยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)

จากการนำปูนซีเมนต์ เถ้าขี้เถ้า และซิลิกาฟุ่มควบแน่น ไปวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากรูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ พบว่าปูนซีเมนต์มีพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ที่มุม 30-35 องศา [42] และมีพีคของสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งตรงกับฐานข้อมูล JCPDS 31-0301 และจากรูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของเถ้าขี้เถ้า จะพบว่าเถ้าขี้เถ้ามีส่วนประกอบของซิลิกาซึ่งอยู่ในรูปของควอตซ์ ซึ่งตรงกับฐานข้อมูล JCPDS 02-0471 และซิลิกาที่อยู่ในรูปของคริสโตบาไลต์ที่มุม 21 องศา และ 27 องศา และตรงกับฐานข้อมูล JCPDS 03-0276



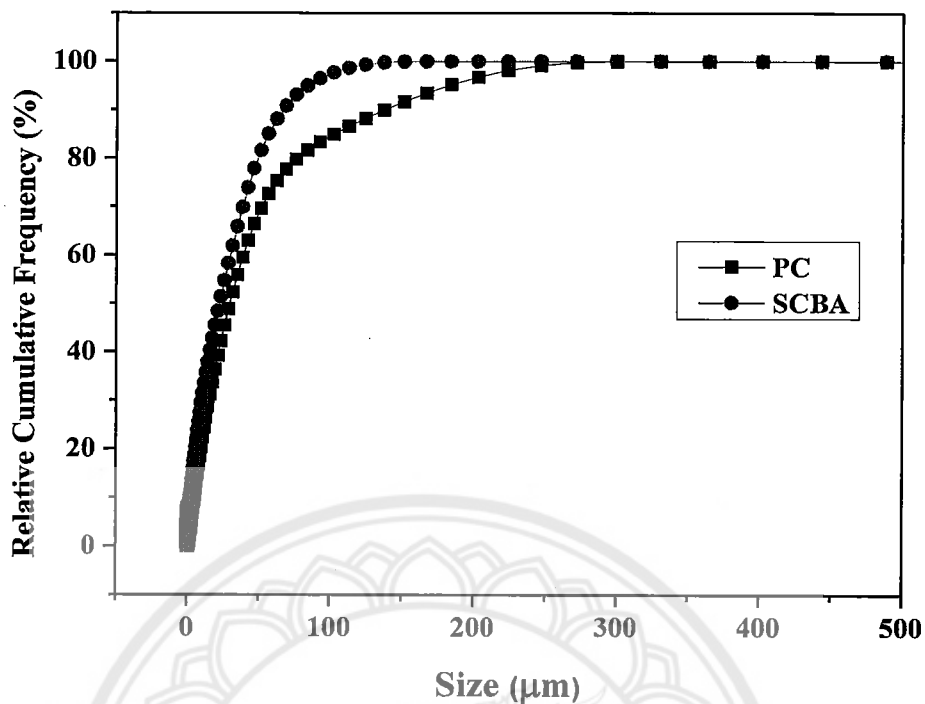
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์



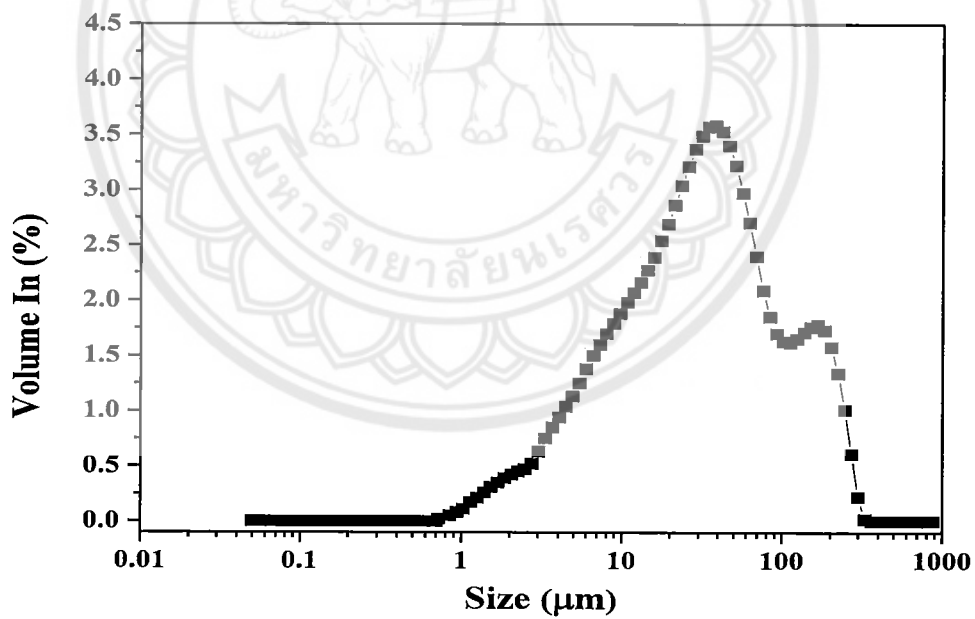
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของเก้าชานอ้อย

4.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ

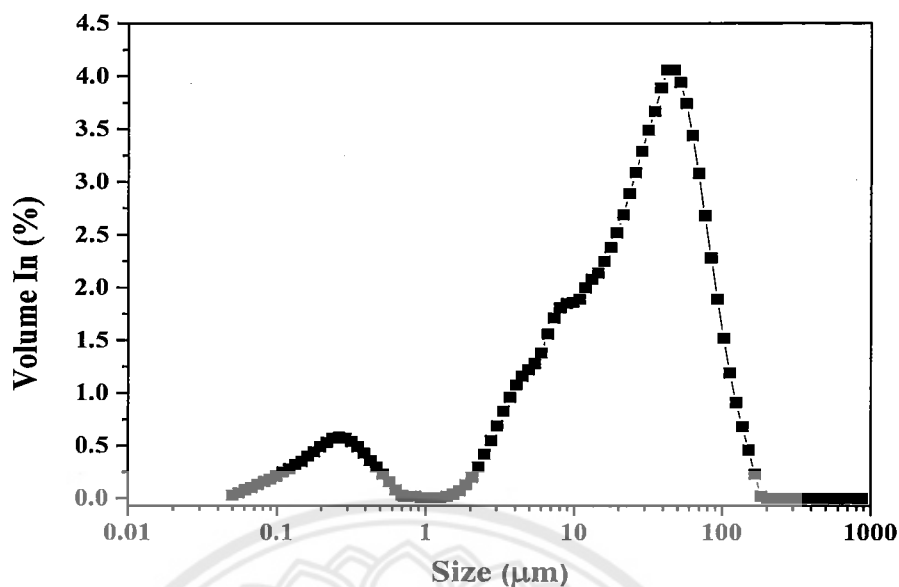
จากรูปที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และขนาดอนุภาคของเก้าชานอ้อย ด้วยเครื่อง Particle size analyzer laser พบว่าค่ากลางของขนาดอนุภาค (D_{50} μm) ของเก้าชานอ้อยมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ ซึ่งค่ากลางของขนาดอนุภาคของเก้าชานอ้อย และปูนซีเมนต์มีค่าอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 27.61 μm และ 36.78 μm ตามลำดับ และขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ที่พบมากที่สุดมีขนาดเท่ากับ 19.42 μm แสดงดังรูปที่ 4.4 และขนาดของอนุภาคเก้าชานอ้อยที่พบมากที่สุดมีขนาดเท่ากับ 15.97 μm แสดงดังรูปที่ 4.5 และจากตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเก้าชานอ้อย พบว่าช่วง 10% โดยปริมาตรทั้งหมด (D_{10} μm), ช่วง 50% โดยปริมาตรทั้งหมด (D_{50} μm) และช่วง 90% โดยปริมาตรทั้งหมด (D_{90} μm) ทุกๆ ช่วงของการทดสอบขนาดของอนุภาคจะเห็นว่าเก้าชานอ้อยจะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเก้าชานอ้อยที่ผ่านการบด 12 ชั่วโมง เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และเถ้าขาน้อย



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเถ้าขานอ้อยบด 12 ชั่วโมง

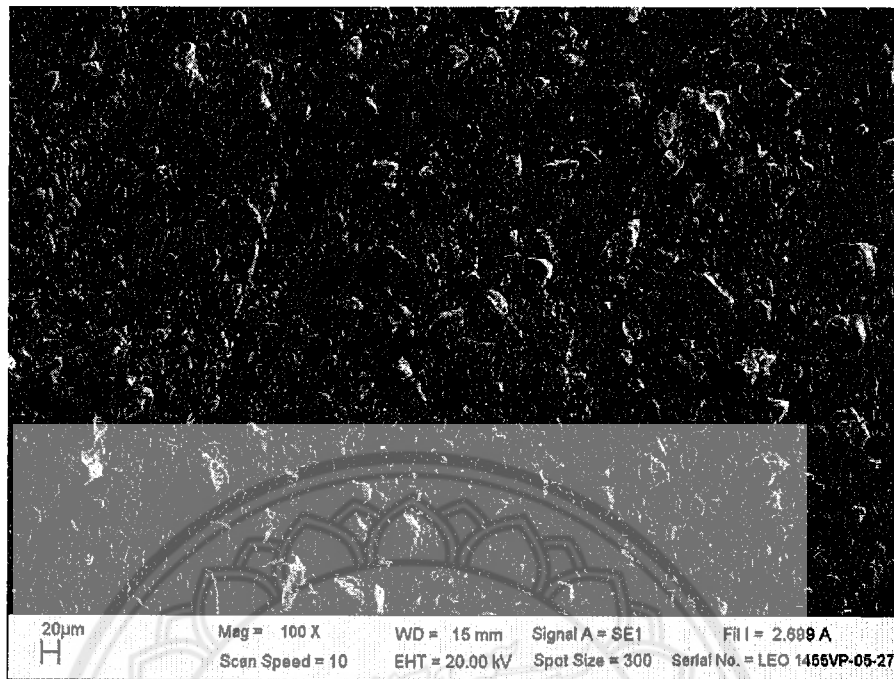
ตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าขานอ้อย

	ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ (μm)	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าขานอ้อย
D10	6.46	2.97
D50	36.78	27.61
D90	160.32	82.91
ขนาดโดยประมาณ	2-66	2-40
จากเทคนิค SEM		

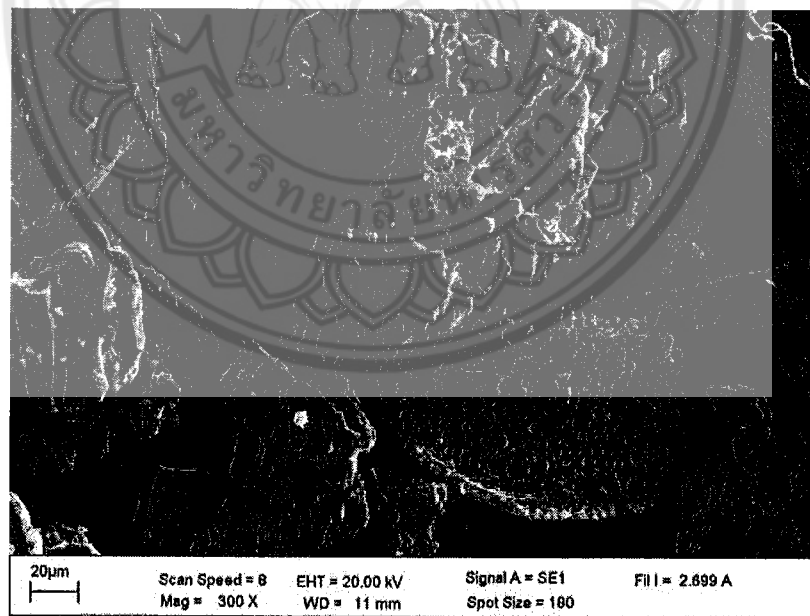
4.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

1. การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุดิบ

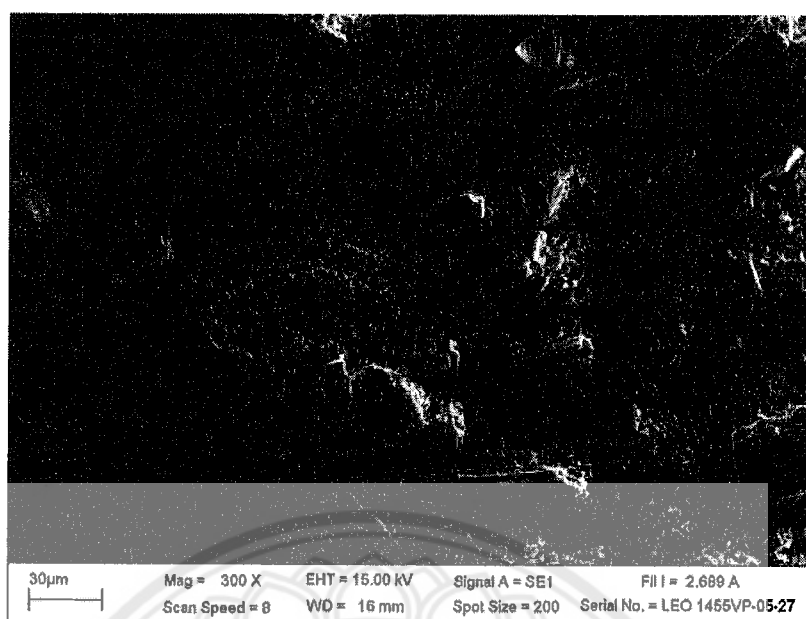
การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุดิบด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) จากรูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมีขนาดอนุภาคเท่าๆ กัน ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์มีขนาดอยู่ประมาณ 2-66 μm และจากรูปที่ 4.7 ภาพถ่ายแสดงลักษณะโครงสร้างของเถ้าขานอ้อย ที่ไม่ผ่านการบด ซึ่งจะมีรูปร่างไม่แน่นอน มีรูพรุนสูง มีขนาดอนุภาคหลากหลาย (ประมาณ 20-182 μm) ซึ่งเถ้าขานอ้อยดังกล่าวไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุผสมโซลานเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่ มีรูพรุนสูงจะส่งผลให้ต้องใช้น้ำในการผสมค่อนข้างมาก รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะทางโครงสร้างของเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบด 12 ชั่วโมง จะเห็นว่าเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบดจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 2-40 μm เถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบดจะมีขนาดเล็กลง ความพรุนลดลง เนื่องจากการบดสามารถเปลี่ยนความพรุนให้ไปเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสแทน ดังนั้นเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบดแล้วก็จะเหมาะสำหรับนำไปทดแทนปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์



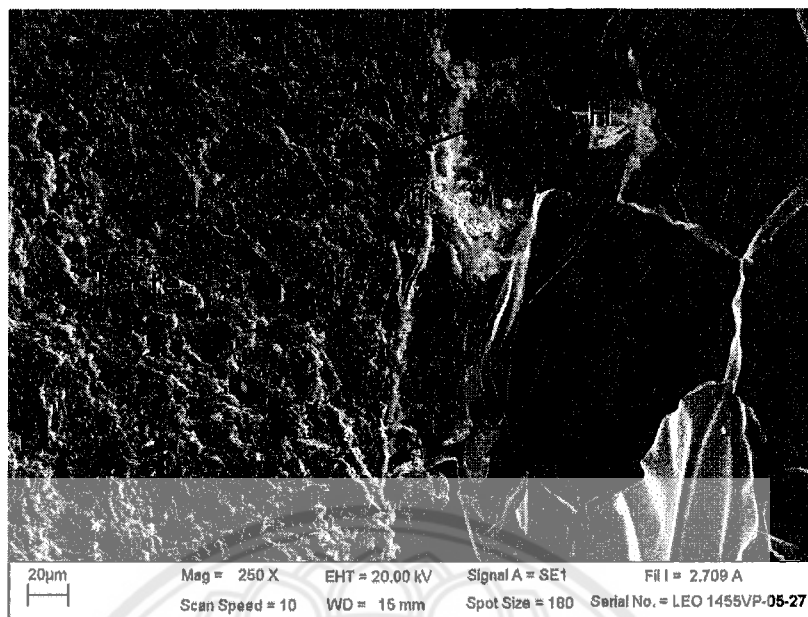
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคเถ้าขาน้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาล



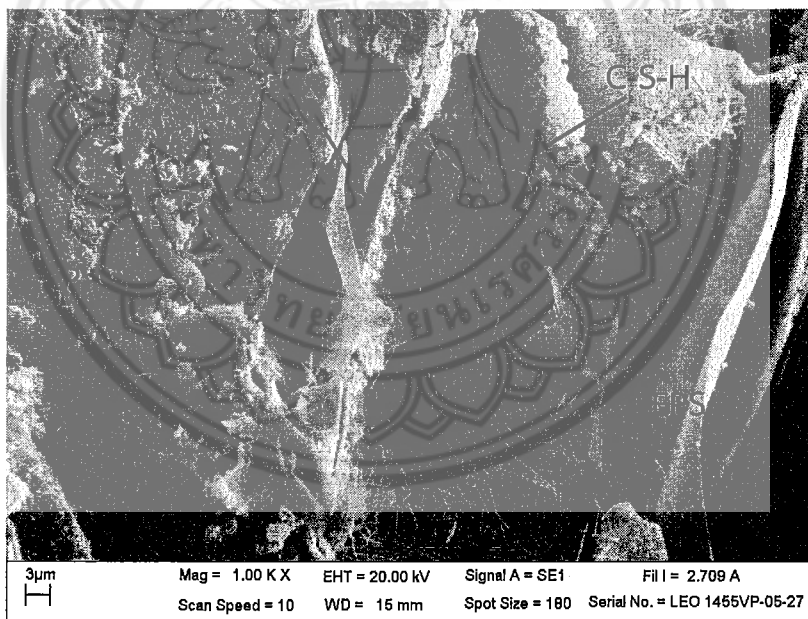
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของเก้าขานอ้อยที่ผ่านการบด 12 ชั่วโมง

4.4 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาผสมโฟมอีพีเอสผสมด้วยเก้าขานอ้อย

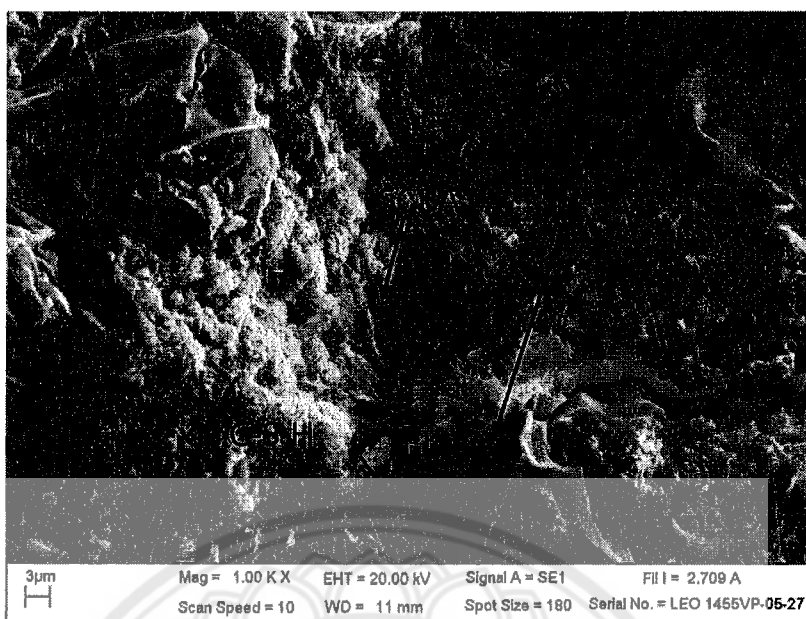
การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาผสมโฟมอีพีเอสรีไซเคิลร้อยละ 80 โดยปริมาตรของทราย และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเก้าขานอ้อยร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 0-8 โดยน้ำหนัก ของปูนซีเมนต์ จากรูปที่ 4.9 ภาพถ่ายลักษณะของคอนกรีตมวลเบาควบคุมที่กำลังขยาย 250 เท่า จะเห็นการเชื่อมต่อระหว่างรอยต่อของเนื้อปูนกับโฟมอีพีเอสรีไซเคิล และจากรูปที่ 4.10 เป็นภาพที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ซึ่งจากภาพจะเห็นลักษณะของเส้นเล็กๆ หลายเส้นสลับซ้อนกันไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งก็คือเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) มีลักษณะเป็นเข็มยาว และเฟสแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบนทกเหลี่ยม ซึ่งเฟสทั้ง 3 ได้มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จากรูปที่ 4.11-4.12 ภาพถ่ายคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนด้วยเก้าขานอ้อย จะเห็นลักษณะของเนื้อปูนเพสต์กับอนุภาคของ เก้าขานอ้อยที่มีการแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดโฟมอีพีเอสรีไซเคิล จะพบเฟสเหมือนกับเฟสของคอนกรีตมวลเบาควบคุม ได้แก่ เฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) และเฟสแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และจะพบอนุภาคของเก้าขานอ้อยเพิ่ม ซึ่งในภาพถ่ายจะมองลักษณะของเก้าขานอ้อยค่อนข้างยาก เนื่องจากเก้าขานอ้อยได้เกิดปฏิกิริยาจนไม่เห็นเป็นรูปร่างเดิม



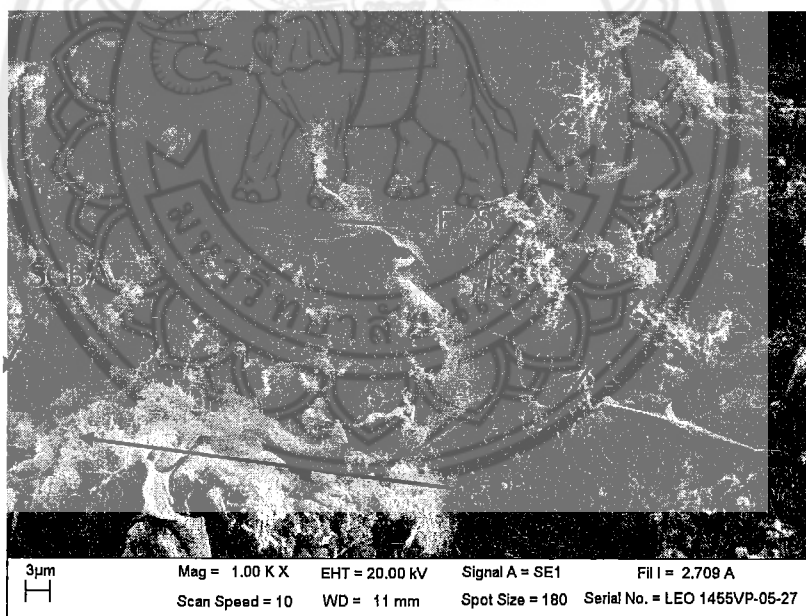
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM คอนกรีตมวลเบาควบคุมที่กำลังขยาย 250 เท่า



รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM คอนกรีตมวลเบาควบคุมที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าขาน้อยที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าขาน้อยที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

4.5 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย

ในการทดลองได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบผสมเม็ดโพม อีพีเอสรีไซเคิลที่อัตราส่วนร้อยละ 80 โดยปริมาตรของทราย และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบด 12 ชั่วโมงที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดเฉลี่ยจากตัวอย่างชิ้นงานละ 3 ก้อน เทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม (ไม่มีการทดแทนเถ้าขานอ้อย) ดังตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังอัดและอัตราการไหลของคอนกรีตมวลเบา คอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย จะมีอัตราการไหลที่ลดลงเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของคอนกรีตมวลเบาควบคุม และค่าอัตราการไหลจะลดลงตามปริมาณอัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีอนุภาคขนาดเล็ก และมีพื้นที่ผิวสัมผัสค่อนข้างสูงทำให้ต้องการน้ำในการผสมมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังอัดและอัตราการไหลของคอนกรีตมวลเบา

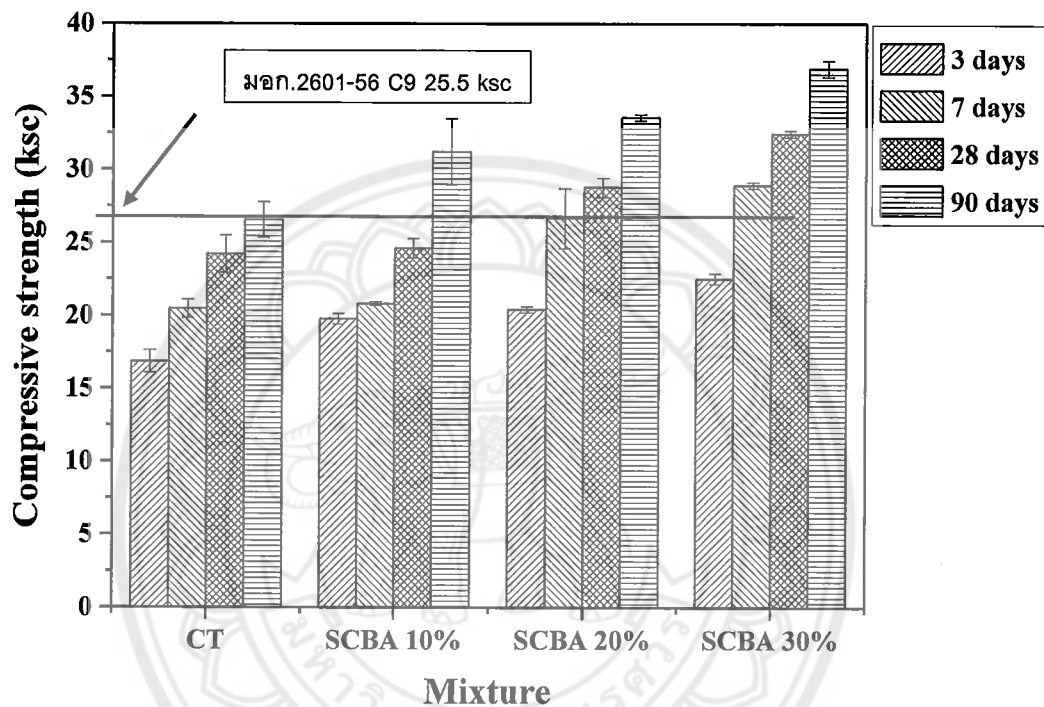
สูตร	กำลังอัดเฉลี่ย (ksc) \pm S.D.				อัตราการไหล (mm)
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	
CT	16.85 \pm 0.78	20.45 \pm 0.64	24.20 \pm 1.27	26.55 \pm 1.20	115.5
SCBA10%	19.75 \pm 0.35	20.80 \pm 0.14	24.60 \pm 0.67	31.20 \pm 2.26	112.0
SCBA20%	20.40 \pm 0.21	26.65 \pm 2.05	28.77 \pm 0.65	33.55 \pm 0.21	111.2
SCBA30%	22.50 \pm 0.35	28.90 \pm 0.21	32.43 \pm 0.23	36.90 \pm 0.57	109.5

จากรูปที่ 4.13 พบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน และ 7 วัน ค่ากำลังอัดของคอนกรีต มวลเบาที่ทดแทนเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัด 19.7 ksc และ 20.8 ksc ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม (20.45 ksc) ในอัตราที่มีการทดแทนเถ้าขานอ้อย 20% และ 30% มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 26.65-28.90 ksc ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน และ 90 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 25-36.9 ksc ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม และอยู่ในช่วง ตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ชนิด C9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh และคณะ ที่ได้ทำการศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มากถึงร้อยละ 30 โดยที่ไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง

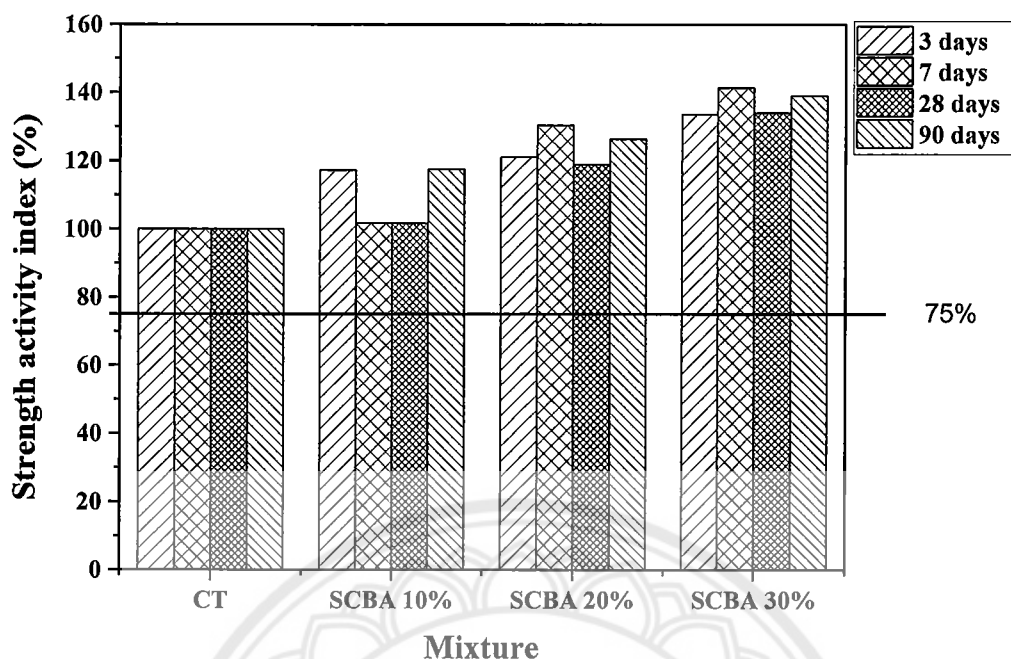
ซึ่งจากผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย เถ้าขานอ้อยที่ร้อยละ 30 ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 และ 90 วัน จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าขานอ้อย [43] ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าขานอ้อยจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ในวัสดุปอซโซลานิกจะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นสาร ยึดประสาน และเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คอนกรีตมวลเบา โดยปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดค่อนข้างสูงที่ระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ที่ทดแทนเถ้าขานอ้อยที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน 90 วัน

เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของค่าดัชนีกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อย ที่ระยะเวลาการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน (ดังรูปที่ 4.14) พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีค่าดัชนีกำลังอัด ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน อยู่ในช่วง 117.21%-133.53% และที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 101.71%-141.32% เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 90 วัน มีค่าดัชนีกำลังอัดอยู่ในช่วง 101.65%-134.02% และ 117.51%-138.98% พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในทุกๆ อัตราส่วนผสมนั้น มีค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดเกินกว่าร้อยละ 75 ในทุกๆ ระยะเวลาการบ่ม ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้



รูปที่ 4.13 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อย

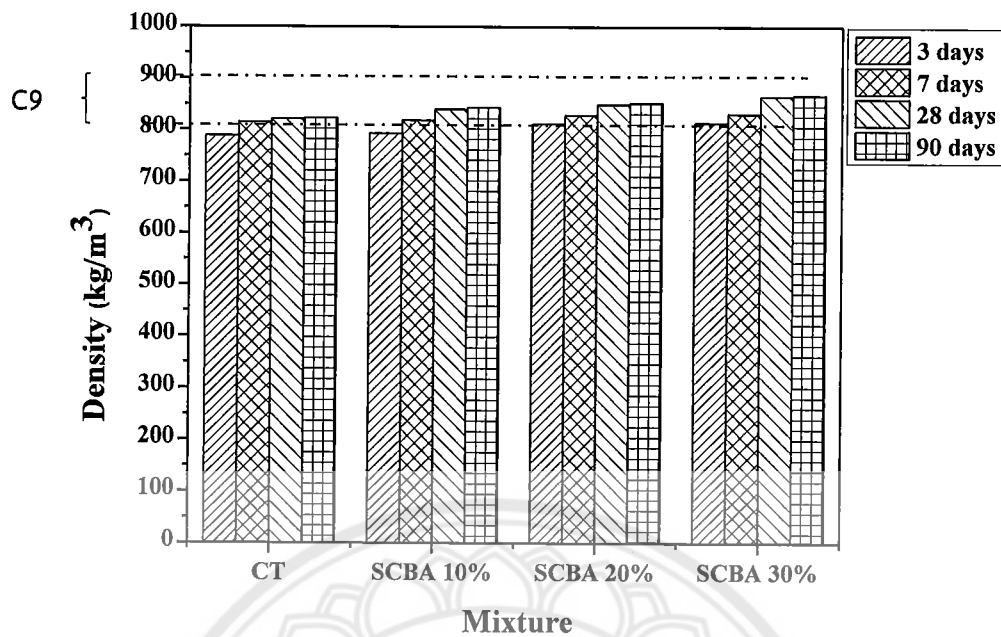


รูปที่ 4.14 ค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขาน้อย

4.6 ผลทดสอบทางกายภาพคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขาน้อย

4.6.1 ค่าความหนาแน่น

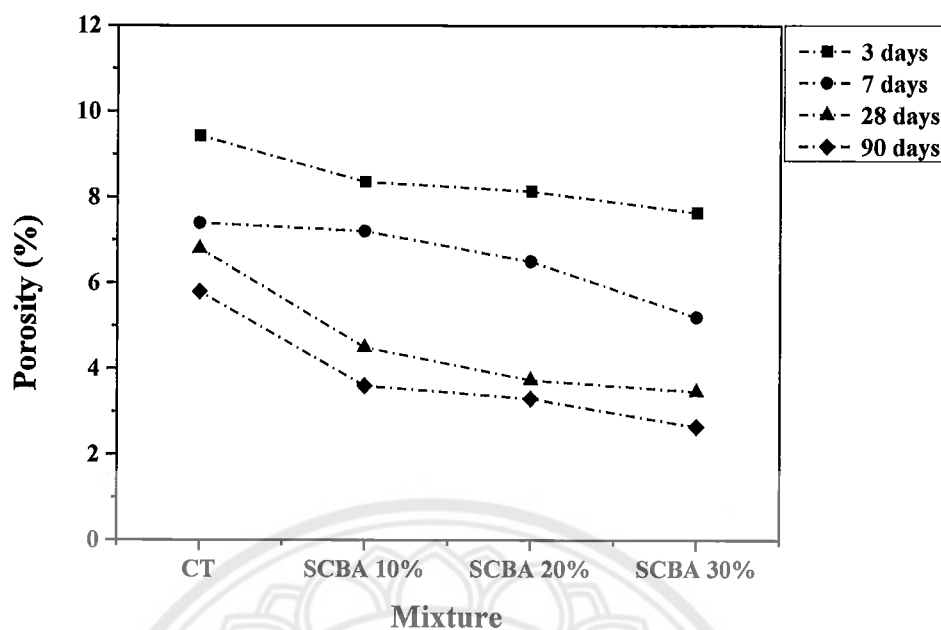
จากรูปที่ 4.15 แสดงความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเม็ดโฟมอีพีเอสรีไซเคิล และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขาน้อยร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน พบว่ามีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม ซึ่งมีค่า 789-793 กก./ลบ.ม. ส่วนความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ทดแทนเถ้าขาน้อยร้อยละ 20 และ 30 จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 812-814 กก./ลบ.ม. เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. ชนิด C9 นอกจากนี้ ยังพบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนเถ้าขาน้อยในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นจะมี ค่าความหนาแน่นที่มากกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีการทดแทนเถ้าขาน้อยเล็กน้อย และที่ระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มมากขึ้น (ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน) ค่าความหนาแน่น ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัด เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าขาน้อยกับปูนซีเมนต์จะเกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้คอนกรีตมีความแน่นตัวสูงขึ้น



รูปที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อย

4.62 การดูดซึมน้ำ

ผลค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมโพลีเอสเตอร์ไอโซไซเตล และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.16 ผลค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก จะมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับปริมาณ การทดแทนเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาการบ่มในช่วง 3 วัน และ 7 วัน จะมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 9.3%-10.5% และ 7.5%-8.74% ตามลำดับ โดยค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนด้วยเถ้าขานอ้อยจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม (11.9% และ 8.9% ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าขานอ้อยเข้าไปอุดช่องว่างของคอนกรีต นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน จะมีค่าที่ต่ำที่สุด เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าขานอ้อยจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่มทำให้รูพรุนของคอนกรีตมวลเบาลดลง จึงส่งผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง

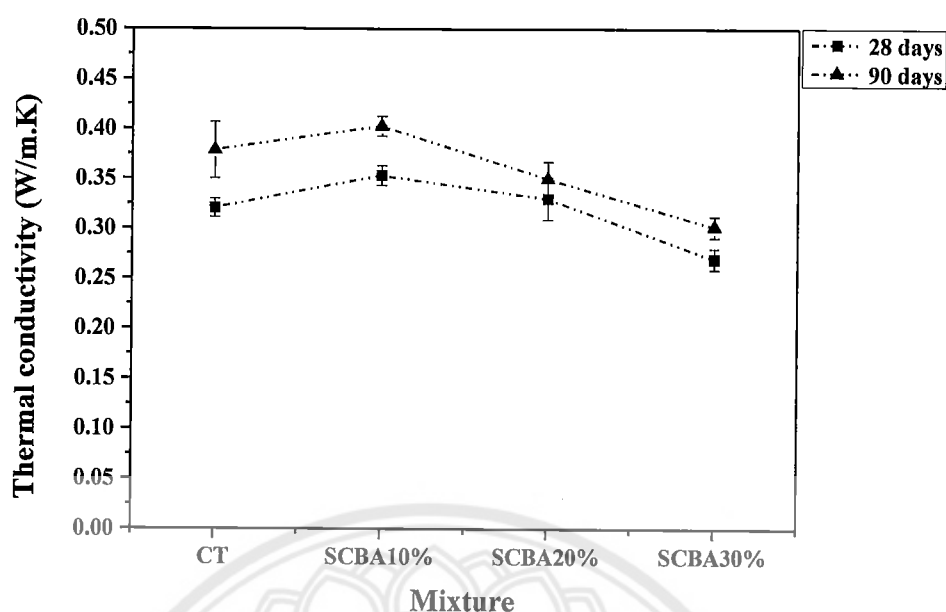


รูปที่ 4.17 ค่าความพรุนของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขาน้อย

4.7 สมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขาน้อย

4.7.1 ค่าการนำความร้อน

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดโพลีฟิเอส รีไซเคิล และ ทดแทนอัตราส่วนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขาน้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน พบว่าการทดแทนเถ้าขาน้อยในอัตราส่วน 10% และ 20% จะมีค่าการนำความร้อนในช่วง 0.35-0.34 W/m²·K ซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่ใกล้เคียง กับคอนกรีตมวลเบาควบคุม (ไม่มีการทดแทนด้วยเถ้าขาน้อย) ในขณะที่การทดแทนเถ้าขาน้อยในอัตราส่วนร้อยละ 30 ค่าการนำความร้อนจะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีค่าการนำความร้อน 0.27 W/m²·K เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน พบว่าการทดแทนเถ้าขาน้อยในอัตราส่วนร้อยละ 10 มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.40 W/m²·K ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม และคอนกรีตมวลเบาที่อัตราส่วนผสมเถ้าขาน้อยที่ร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการนำความร้อนที่ลดลงอย่างชัดเจน (0.35 W/m²·K และ 0.30 W/m²·K ตามลำดับ) สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลาการบ่มที่ 90 วัน ทุกอัตราส่วนผสมจะมีค่าการนำความร้อน ที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นค่อนข้างสมบูรณ์ตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นตัวสูง ซึ่งสัมพันธ์กับผลการทดสอบค่าความพรุนของคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4.18 ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อย

4.7.2 การหน่วงเวลา (Time lag)

จากผลการทดลองสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน และ 90 วัน เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์อุณหภูมิและการหน่วงเวลาดังตาราง 16 และ 17 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดบนชั้นงาน อุณหภูมิสูงสุดล่างชั้นงาน ผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้าน และผลต่างของเวลาเฉลี่ย

จากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 พบว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิผิวบนสูงสุด อุณหภูมิสูงสุดล่างชั้นงาน และผลต่างของอุณหภูมิลดลง แต่ในส่วนของการหน่วงเวลา (Time lag) กลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย สามารถช่วยชะลอความร้อนจากภายนอกอาคารผ่านเข้าไปภายในอาคารได้ ซึ่งความสามารถในการชะลอความร้อนก็จะแปรผันตรงกับอัตราส่วนการทดแทนเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของการหน่วงเวลา (Time lag) สามารถนำไปทำความเข้าใจกับอัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยแสดง ดังรูปที่ 4.19

การหน่วงเวลา (Time lag) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดโฟม อีพีเอสรีไซเคิล และทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน คอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยจะมีค่าการหน่วงเวลาอยู่ในช่วง 10.29-13.26 นาที ซึ่งมีค่าการหน่วงเวลาสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT, ไม่มีการทดแทนด้วยเถ้าขานอ้อย) ที่มีค่าการหน่วงเวลาเท่ากับ 10.16 นาที เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่มที่ 90 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม มีค่าการหน่วงเวลาเท่ากับ 11.32 นาที ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย คอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนเถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 มีค่าการหน่วงของเวลาเท่ากับ 12.41 นาที 14.38 นาที และ 13.31 นาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณการทดแทนปูนซีเมนต์

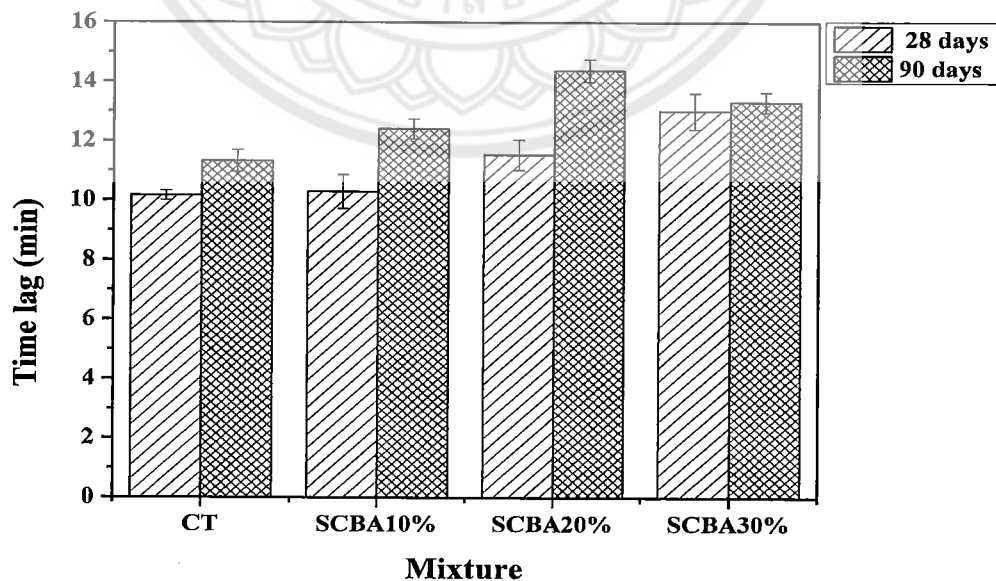
ด้วยเก้าชานอ้อยต่อผลการหน่วงเวลา (Time lag) พบว่าการหน่วงเวลามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเก้าชานอ้อยอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลต่างของอุณหภูมิและการหน่วงเวลาของคอนกรีตมวลเบา ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			การหน่วงเวลา (นาที)
	ผิวบน	ผิวล่าง	ผลต่าง	
CT	45.93	39.02	6.91	10.16
SCBA10%	45.94	39.06	6.88	10.29
SCBA20%	45.28	38.85	6.57	11.53
SCBA30%	44.61	38.30	6.31	13.26

ตารางที่ 4.4 ผลต่างของอุณหภูมิและผลการหน่วงเวลา ของคอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน

สูตร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			การหน่วงเวลา (นาที)
	ผิวบน	ผิวล่าง	ผลต่าง	
CT	45.59	38.18	7.41	11.32
SCBA10%	45.38	38.13	7.25	12.41
SCBA20%	45.22	38.13	7.10	14.38
SCBA30%	44.38	38.65	5.73	13.31



รูปที่ 4.19 แสดงผลการหน่วงเวลา ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 90 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเถาขานอ้อยที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาพบว่าต้องทำการอบให้แห้งและบดลดขนาดก่อน เนื่องจากเถาขานอ้อยที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลมีขนาดใหญ่และมีความชื้นสูง

2. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถาขานอ้อย พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถาขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่มชิ้นงานที่ 28 วัน มีค่ากำลังอัด และค่าความหนาแน่น สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม และมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ชนิด C9 และส่วนของค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความพรุนก็มีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถาขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น

3. จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถาขานอ้อย พบว่าค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของเถาขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนผสมเถาขานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุด และในส่วนของค่าการหน่วงเวลา (Time lag) พบว่าอัตราส่วนการผสมเถาขานอ้อยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการหน่วงของเวลามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งถ้ามีการนำคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถาขานอ้อยไปใช้งานก็จะสามารถช่วยชะลอมวลความร้อนจากภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. จากการศึกษาการนำวัสดุผลพลอยได้จากเกษตรกรรมและโรงงานอุตสาหกรรม มาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าสามารถพัฒนาคอนกรีตมวลเบาให้มีสมบัติทางกล และสมบัติเชิงความร้อนที่ดี ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้าง เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง อีกทั้งยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาทำให้เกิดประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Home Solution Center. 2012. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.aes-service.com>. สืบค้น 9 พฤษภาคม 2560
- [2] ความรู้เกี่ยวกับอิฐมวลเบา (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.qcon.co.th>. สืบค้น 10 พฤษภาคม 2560
- [3] ธนา จัดวัฒนกุล, คอนกรีตมวลเบา วัสดุผนังเพื่อการประหยัดพลังงาน, วารสาร วิศวกรรมสาร ฉบับที่ 10-11 ปีที่ 54
- [4] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, การใช้งานเถ้าขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต, วารสาร คอนกรีต, ฉบับที่ 16 ประจำเดือนสิงหาคม (2555) หน้า 1-7.
- [5] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และ คอนกรีต, สมาคมคอนกรีตไทย, พ.ศ. 2547, 362 หน้า
- [6] H.F.W. Taylor, Cement 2nd Edition, Thomas Telford Publishing, London, (1998) pp. 459.
- [7] ASTM C 618-08a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete¹. American Society for Testing and Materials, Philadelphia; 2008.
- [8] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, การใช้งานเถ้าขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต, *วารสารคอนกรีต*, ฉบับที่ 16 ประจำเดือนสิงหาคม (2555) หน้า 1-7.
- [9] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, กองอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย, กระทรวงอุตสาหกรรม, 2550, สรุปสถานการณ์อ้อยและน้ำตาลทรายของประเทศประจำปีการผลิต 2549/50, เล่มที่ 2, หน้า 1-3
- [10] บรรจง แสงแก้ว และคณะ, การศึกษาความสามารถเทได้ และกำลังของคอนกรีตผสมซีเมนต์ลอยลิกไนต์, รายงานการค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2536.
- [11] S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin, *Concrete; 2nd Edition*, Prentice Hall (2002).
- [12] สราวุธ เจริญสิริเสถียร. (2552). *คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงเถ้าหินปูนจากอุตสาหกรรมผลิตปูนขาว* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [13] รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 34(4), 369-381.
- [14] กฤษดา เสือเอี่ยม. (2556). การประยุกต์ใช้ผลผลิตพลอยได้จากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 36(4), 517-552
- [15] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2555). การใช้งานเถ้าขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต. *วารสารคอนกรีต*, 55(16), 1-7.

- [16] Ganesh, K. (2003). Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement Concrete Res*, 33(5), 755 - 762.
- [17] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2550). ซิลิกาฟูม. *วารสารคอนกรีต*, 50(1), 1-8.
- [18] ปิยะกิจ โฟมสยาม. (2540). *EPS โฟม คืออะไร*. สืบค้น 15 กรกฎาคม 2559, จาก <https://www.xn--q3cfii4nd0c.com/15174866/eps-foam-คืออะไร>
- [19] ชนานันท์ (Chanunon). (2555). คอนกรีตโฟม (Concretefoam). สืบค้น 15 กรกฎาคม 2559, จาก <http://new-material.blogspot.com/2012/01/concretefoam.html>
- [20] ซาโตรี เซน (Satori Zen). (2553). *กลไกการถ่ายเทความร้อน*. สืบค้น 7 มกราคม 2561, จาก <http://www.academia.edu/5382088/รถ่ายเทความร้อน>
- [21] ภาณุ อดทน. (2550). *การศึกษาพฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตมวลเบารับแรงตามแนวแกน*. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [22] Miled, K. (2004). Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effect and failure mode. *Mech Mater*, 36(11), 1031 - 1046.
- [23] กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ. (24 กันยายน 2556). *ราชกิจจานุเบกษา ตอนพิเศษ*, 130(123ง). หน้า 9.
- [24] สันติ รุจิธพนานิช, “การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตอัดที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นส่วนผสม”, รายงานการค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.
- [25] M. Thomas, Supplementary cementing materials in concrete, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, (2013), pp. 190.
- [26] V.M. Malhotra and P.K. Mehta, Pozzolanic and cementitious materials, Gordon and Breach Publishers, Netherlands, (1996), pp. .
- [27] G.C. Carderio, R.D. Toledo Filho and E.M.R. Fairbairt, *Constr. Buil. Mater.*, 23 (2009) 3301-3303.
- [28] E.V. Morales, E. Villar-Cocina and *et al.*, *Cem. Concr. Compos.*, 31 (2009) 22-28.
- [29] N.B. Singh, V.D. Singh, and S. Rai, *Cem. Concr. Res.*, 30 (2000) 1485-1488.
- [30] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, and *et al.*, *Cem. Concr. Compos.*, 30 (2008) 410-418.
- [31] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul and *et al.*, *Constr. Buil. Mater.*, 23 (2009) 3523-3531.
- [32] N.B. Singh, V.D. Singh, S. Rai, Hydration of bagasse ash-blended Portland cement, *Cement Concrete Res* 30 (9) (2000) 1485-1488.
- [33] T. Akram, S.A. Memon, H. Obaid, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 703–712.
- [34] A. Sales, S.A. Lima, *Waste Management* 30 (2010) 1114–1122.

- [35] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho and et al., *Constr. Buil. Mater.*, 29 (2012) 641-646.
- [36] A. Kaya, F. Kar, Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin, *Constr. Build. Mater*, 105(2016) 572-578
- [37] A. Schackow, Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent, *Constr. Build. Mater*, 57(2014) 190-197
- [38] K.G. Babu, D.S. Babu, Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 755-762.
- [39] I.H. Ling, D.C.L. Teo, Properties of EPS RHA lightweight concrete bricks under different curing condition, *Constr. Build. Mater*, 25(201) 3648-3655.
- [40] A. Sadrmomtazi, J.Sobhani, M.A. Mirgozar, M.Najimi, Properties of multi-Strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash, *Constr. Build. Mater*, 35(2012) 211-219
- [41] M. Fathi, A. Yousefipour, E.H. Farokhy, Mechanical and physical properties of expanded polystyrene structural concretes containing Micro-silica and Nano-silica, *Constr. Build. Mater*, 136 (2017) 590-597.
- [42] Taylor, H.F.M. (1998). *Cement chemistry*. Oxford: Thomas Telford Publishing.
- [43] Singh, N.B. (2000). V.D. Singh, S. Rai, Hydration of bagasse ash-blended Portland Cement. *Cement Concrete Res*, 30(9), 1485-1488.

ผลลัพธ์ของโครงการ

ผลงานที่จะได้รับ	รายละเอียด	จำนวน	หน่วยนับ	ความก้าวหน้า	หลักฐาน
ต้นแบบผลิตภัณฑ์ (ระดับห้องปฏิบัติการ)	ได้สูตรคอนกรีตมวลเบา	1	ต้นแบบ	ทำสำเร็จ	ภาคผนวก
กระบวนการใหม่ (ระดับห้องปฏิบัติการ)	เทคนิคการทำคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม EPS	1	กระบวนการ	ทำสำเร็จ	ภาคผนวก
องค์ความรู้ 1. ทราบสูตรคอนกรีตมวลเบา 2. ทราบผลของเส้นใยอ้อยต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบา	1. มีสูตรที่ใช้เป็นต้นแบบ 2. ทราบกลไกของเส้นใยอ้อยต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบผสม EPS	1	เรื่อง	ทำสำเร็จ	ภาคผนวก
การพัฒนากำลังคน	พัฒนาให้บัณฑิตจบปริญญาโท	1	คน	นิสิตสำเร็จการศึกษา	ภาคผนวก
การประชุมวิชาการระดับชาติ	นำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ	2	ครั้ง	ทำสำเร็จ	ภาคผนวก
บทความทางวิชาการในวารสารระดับนานาชาติ (ไม่มี Impact Factor, อยู่ในฐาน ISI หรือ Scopus)	ตีพิมพ์บทความวารสารวิชาการระดับนานาชาติ	1	เรื่อง	ทำสำเร็จ	ภาคผนวก

*หมายเหตุ เนื่องจากสถานการณ์ COVID-19 ทำให้กระบวนการในการพิจารณาตอบกลับจากวารสารล่าช้าจนเกินระยะเวลาในการรับทุน



สรุปผลตัวชี้วัดโครงการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน (บูรณาการวิจัยและนวัตกรรม) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2562

โครงการ: การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาที่ผสมวัสดุผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาลสำหรับประยุกต์ใช้ในอาคารพลังงานต่ำ (R2562B061)

ผลงานที่จะได้รับ	รายละเอียด	จำนวน	หน่วยนับ	ความก้าวหน้า	รายละเอียด
ต้นแบบผลิตภัณฑ์ (ระดับห้องปฏิบัติการ)	ได้สูตรคอนกรีตมวลเบา	1	ต้นแบบ	ทำสำเร็จ	รายละเอียด สูตรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโพม EPS คือ สูตรที่ใช้โพมร้อยละ 80 โดยปริมาตรรวมทั้งหมด และใช้แกนข่อยทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 เนื่องจากสูตรนี้ต้นทุนต่ำสุดและผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-56
กระบวนการใหม่ (ระดับห้องปฏิบัติการ)	เทคนิคการทำคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโพม EPS	1	กระบวนการ	ทำสำเร็จ	ได้เทคนิคในการทำคอนกรีตมวลเบาผสมแกนข่อยแบบผสมโพม EPS ดังนี้ 1. แกนข่อยต้องผ่านกระบวนการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบเม็ดบอลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ 2. ใช้แกนข่อยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20-30 3. ในการผลิตต้องใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อเพื่อการไหลไม่เหนียว 4. ในการขึ้นรูปขึ้นงานต้องไม่ใช้การสั่นเข้าช่วย เนื่องจากจะทำให้เกิดการแยกชั้นของเนื้อโพมกับเนื้อคอนกรีต
องค์ความรู้ 1. ทราบสูตรคอนกรีตมวลเบา 2. ทราบผลของแกนข่อยต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบผสม EPS	1. มีสูตรที่ใช้เป็นต้นแบบ 2. ทราบกลไกของแกนข่อยต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบผสม EPS	1	เรื่อง	ทำสำเร็จ	1. ได้สูตรที่ใช้เป็นต้นแบบสำหรับการทำคอนกรีตมวลเบาที่ผสมแกนข่อย 2. แกนข่อยช่วยทำให้คอนกรีตมวลเบา มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีความเหนียว และยังลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบผสม EPS
การพัฒนาที่ถึงคน	พัฒนาให้ผลิตภัณฑ์	1	คน	นิติสำเร็จการศึกษา	นางสาวอภิญญา แสงนา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ปีการศึกษา 2561

การประชุมวิชาการระดับชาติ	นำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ	2	ครั้ง	ทำสำเร็จ	1. นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2 nd MRS Thailand International Conference (10-12 July 2019) ณ The sign hotel, Pattaya, Thailand ในหัวข้อเรื่อง “Compressive strength and thermal properties of recycle-expanded polystyrene concrete blended with condensed silica fume” 2. นำเสนอและตีพิมพ์รายงานสืบเนื่องการประชุมงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายวิจัยสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ ครั้งที่ 13 (20-22 พฤศจิกายน 2562) ณ โรงแรมเชียงใหม่แกรนด์วิว จังหวัดเชียงใหม่ ในหัวข้อเรื่อง “กำลังอัดและสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์มวลเบาที่ผสมซึ่งข้าวโพดจากอุตสาหกรรมเกษตร”
บทความทางวิชาการในวารสารระดับนานาชาติ (ไม่มี Impact Factor, อยู่ในฐาน ISI หรือ Scopus)	ตีพิมพ์บทความวารสารวิชาการระดับนานาชาติ	1	เรื่อง	ทำสำเร็จ	P. Torkittikul, T. Nochaiya and A. Chaipanich. The Investigation of Polyester Resin Polymer Concrete with Various Amount of Aggregate, AIP conference proceeding (In progress)



Proceedings of the 13th Research Administration Network Conference

รายงานการปรัระชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายวิจัยสภามหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ ครั้งที่ 13

ภายใต้หัวข้อ “ขับเคลื่อนพลังเครือข่ายวิจัย และนวัตกรรม
อย่างสร้างสรรค์ เพื่อพัฒนาประเทศไทย 4.0 ใช้ยั่งยืน”

21-22 พฤศจิกายน 2562
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเฉลิมฉลองวันแอกาเดมิก อิมพัลส์เฉลิมฉลอง

บรรณาธิการ
ทศพล มุลมณี
ใสภ ปุณณพาริชชัย
สัณชัย อตุณสิททา

กำลังอัดและสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขังข้าวโพด

จากภาคอุตสาหกรรมการเกษตร

Compressive Strength and Physical Properties of Mortars

Containing Corn Cob Ash from Agricultural Industry

พัชรพา ขาวราศรี¹ ปานิสรา ดีเสื่อ¹ ปัญชาน์ ต่อกิตติกุล² พลิศภัสร์ คำฟู³

และ ทนงศักดิ์ โนไชยา^{1,4}

Patcharapa Khaorasri¹, Panisara Disuea¹, Pincha Torkittikul²,

Phalitphat Khumfu³ and Thanongsak Nochaiya^{1,4}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

¹Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

²สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จังหวัดลำปาง 52100

²Department of Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Lampang 52100, Thailand

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

³Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit 53000, Thailand

⁴สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

⁴Research Center for Academic Excellence in Applied Physics, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขังข้าวโพด ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน จากการทดลองพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขังข้าวโพดร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของเถ้าขังข้าวโพด นอกจากนี้ค่ากำลังอัดยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม ส่วนค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขังข้าวโพดมีความหนาแน่นลดลง เมื่ออัตราส่วนผสมของเถ้าขังข้าวโพดเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขังข้าวโพดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำและค่าความพรุนของมอร์ตาร์ยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเถ้าขังข้าวโพดที่เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: เถ้าขังข้าวโพด มอร์ตาร์ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล

Abstract: This research studied the physical and mechanical properties of Portland cement mortar blended with corn cob ash at 0, 10, 20 and 30 wt% of cement curing at 7, 28 and 90 days. These results showed that the compressive strength of mortar blended with corn cob ash of 0, 10, 20 and 30 wt% was found to reduce when the percentage of corn cob ash was increased. Moreover, the compressive strengths of all mixes were increased with increasing the curing time. The density of mortars containing corn cob ash was presented to decrease when the corn cob ash increased. The water

absorption and porosity of mortars blended with corn cob ash tended to decrease when the curing time increased. In addition, the water absorption and porosity of mortars were found to increase when the content of corn cob ash increased.

Keywords: Corn cob ash, Mortar, Physical properties, Mechanical properties.

คำนำ

ซังข้าวโพด (corn cob) เป็นแกนกลางส่วนหนึ่งของข้าวโพดที่เหลือจากการสีเมล็ดข้าวโพดออกไป โดยปกติหลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวโพดแล้ว เกษตรกรจะไม่ได้ใช้ประโยชน์จากซังข้าวโพด บางรายทิ้งให้ย่อยสลายไปเอง บางรายก็นำมาเผาเพื่อเตรียมพื้นที่ปลูกในฤดูกาลถัดไป บางครั้งซังข้าวโพดจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาซังข้าวโพดเป็นการเพิ่มปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ และในปัจจุบันถือได้ว่าเรื่องมลภาวะทางอากาศเป็นเรื่องที่มีการรณรงค์กันทั่วประเทศด้วยซังข้าวโพดเมื่อเผาแล้วจะให้ค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ 3,000 Kcal/kg ทางภาคอุตสาหกรรมจึงได้มีการนำเอาซังข้าวโพดไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำไปทำเป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิง เผาเพื่อให้ความร้อนเอาไว้ใช้ในโรงงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานผลิตอาหารสัตว์ โดยหลังการเผาจะทำให้ซังข้าวโพดกลายเป็นขี้เถ้า (ash) ซึ่งทางโรงงานจะไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ โดยจะนำขี้เถ้าซังข้าวโพดนี้ไปทิ้งโดยการฝังกลบ ทำให้ทางโรงงานต้องสิ้นเปลืองทรัพยากรและพื้นที่ในการฝังกลบเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี (Wongpha, 2009) เช่นเดียวกับถ้าทางการเกษตรทั่วไปจะมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ มีความพรุนสูง เมื่อต้องการประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างทำให้ถ้ามีความต้องการน้ำในการผสมสูงกว่าปกติส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสดและคอนกรีตแข็งตัวลดลง โดยก่อนหน้านี้มีงานวิจัยที่พยายามลดขนาดของเถ้าขานอ้อยให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงก่อนนำไปผสมในคอนกรีต สามารถเพิ่มกำลังอัดเมื่อทดแทนในปูนซีเมนต์ได้ (Cordeiro, 2008) นอกจากนี้ เมื่อใช้เถ้าขานอ้อยจากภาคการเกษตรมาทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้ (Ganesan, 2007) จากการใช้เถ้าทางการเกษตรมาใช้ในงานก่อสร้างจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่เป็นไปได้ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้เถ้าซังข้าวโพดมาประยุกต์ใช้ร่วมกับคอนกรีตมีการรายงานโดย Suwanmaneechot (2015) ได้ศึกษาการนำเถ้าซังข้าวโพดมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ พบว่าเถ้าซังข้าวโพดที่ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีปริมาณของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์รวมกันประมาณ 72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจำแนกได้เป็นวัสดุพอซโซลานธรรมชาติ ชนิด N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 และการทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 สามารถช่วยเพิ่มสมบัติทางกลได้ นอกจากนี้ Owolabi (2015) ได้ศึกษาขนาดเถ้าซังข้าวโพดที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มาทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนัก พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 จะให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าซังข้าวโพดมากขึ้นจะทำให้อัตราการไหลของคอนกรีตลดลง (Adesanya, 2009) นอกจากนี้ Raheem (2010) ได้แนะนำการใช้คอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพด ต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สารลดน้ำและสารหน่วงปฏิกิริยา เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีสมบัติที่ดีทั้งในระยะแรกและระยะยาว

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการทำเอาเถ้าซังข้าวโพดมาใช้ในงานคอนกรีตยังมีไม่มากนัก ซึ่งทางผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของเถ้าซังข้าวโพด โดยการนำเถ้าซังข้าวโพดมาพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อพัฒนาปูนซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่สามารถใช้งาน

ได้เทียบเท่ากับคอนกรีตทั่วไป อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดพลังงานโดยตรงจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์และยังช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเผา ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการเกิดภาวะก๊าซเรือนกระจก และยังเป็นการผลิตปริมาณซังข้าวโพดที่เหลือ
จากการเก็บเกี่ยวผลผลิตอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมชิ้นงาน

นำเถ้าซังข้าวโพดที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากโรงงาน
อุตสาหกรรมทางการเกษตรมาคัดขนาดผ่านตะแกรง 600 ไมโครเมตร จากนั้นจึงนำไปอบเพื่อไล่
ความชื้น และนำมาบดด้วยเม็บบอล (ball milling) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำไปศึกษาโครงสร้างทาง
จุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากนั้นนำเถ้าซังข้าวโพดมาทดแทน
ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยทำการผสมเป็นชิ้นงานมอร์ตาร์มี
สัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 2.5
โดยใช้เครื่องผสมทำการผสมเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นเทลงแบบหล่อชิ้นงานขนาด 50x50x50 ลูกบาศก์
มิลลิเมตร ชิ้นงานจะถูกถอดออกจากแบบเมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 24 ชั่วโมง สัดส่วนการผสมของชิ้นงาน
แสดงดังตารางที่ 1

การทดสอบ

ชิ้นงานมอร์ตาร์ที่เตรียมได้จะถูกนำไปแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัวเป็นเวลา 7,
28 และ 90 วัน โดยจะนำไปทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109 และทดสอบความหนาแน่น
การดูดซึมน้ำ และความพรุน ตามมาตรฐาน ASTM C642 โดยจะนำชิ้นงานมอร์ตาร์มาอบที่อุณหภูมิ
100 ± 10 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากตู้อบ รอให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้อง นำมาชั่ง
น้ำหนัก (A) แล้วนำชิ้นงานมอร์ตาร์มาแช่น้ำสะอาดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักในน้ำ (B)
จากนั้นนำชิ้นงานมอร์ตาร์มาชั่งน้ำหนักให้ผิวชิ้นงานหมาด นำมาชั่งน้ำหนักอิมมัวแห้ง (C) นำค่าที่ได้ไป
คำนวณหาความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความพรุน ดังสมการ (1)-(3) ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จะเป็น
ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบสัดส่วนละ 3 ก้อน

$$\text{ความหนาแน่น} = [A/(A-B)] \times \text{ความหนาแน่นของน้ำ} \quad (1)$$

$$\text{การดูดซึมน้ำ} = [(C-A)/A] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{ความพรุน} = [(C-A)/(C-B)] \times 100 \quad (3)$$

Table 1. Mix proportion of mortar containing corn cob ash.

Mix	Proportion (%)			
	Portland cement	Corn cob ash	Water	Sand
PC	100	0	50	250
10CCA	90	10	50	250
20CCA	80	20	50	250
30CCA	70	30	50	250

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาวิจัยผลของเถ้าขังข้าวโพดที่ได้จากโรงงานอาหารสัตว์เพื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยนำชิ้นงานมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าขังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้

1. การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของของเถ้าขังข้าวโพดที่ผ่านการบด

การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ของเถ้าขังข้าวโพด แสดงดังรูปที่ 1 (a) เป็นภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าขังข้าวโพดที่ผ่านการคัดขนาด นำมาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบเม็ดบอล (ball milling) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าอนุภาคของเถ้าขังข้าวโพดมีรูปร่างไม่แน่นอนโดยจะมีขนาดประมาณน้อยกว่า 1.0 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 40.0 ไมโครเมตร โดยมีลักษณะพื้นผิวของอนุภาคขรุขระเล็กน้อย ลักษณะโดยรวมของอนุภาคจะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

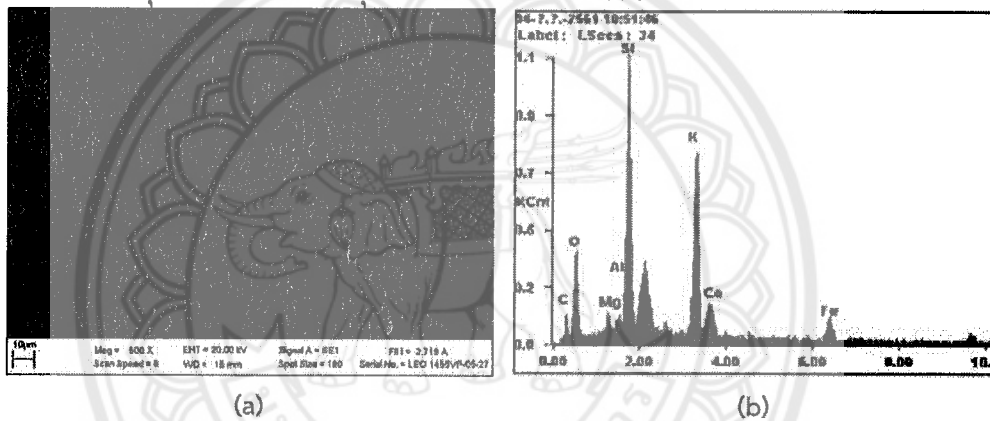


Figure 1. (a) SEM micrograph and (b) EDS of corn cob ash after ground for 12 hours.

Table 2. Chemical composition of corn cob ash after ground for 12 hours by EDS analysis.

Element	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Total
wt%	19.61	30.27	2.14	1.51	19.79	18.01	2.70	5.97	100.00
at%	32.60	37.78	1.76	1.11	14.07	9.20	1.34	2.14	100.00

จากรูป 1 (b) และตาราง 2 เป็นการศึกษาการหาตำแหน่งของธาตุด้วยเทคนิค energy dispersive spectroscopy (EDS) จากการศึกษารอบคอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าขังข้าวโพด คือ ซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) และยังมีโพแทสเซียม (K) อีกด้วย ตารางที่ 2 แสดง องค์ประกอบหลักและปริมาณธาตุของเถ้าขังข้าวโพดที่ผ่านการบด 24 ชั่วโมง โดยมี ออกซิเจน (O) ร้อยละ 30.27 โดยน้ำหนัก ซิลิกอน (Si) ร้อยละ 19.79 โดยน้ำหนัก คาร์บอน (C) ร้อยละ 19.61 โดยน้ำหนัก โพแทสเซียม (K) ร้อยละ 18.01 โดยน้ำหนัก และยังมีอะลูมิเนียม (Al) ร้อยละ 1.50 โดยน้ำหนัก

28 และ 90 วัน มีค่าสูงที่สุดโดยคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าซังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่เวลาการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน มีค่ามากกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมซึ่งสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างได้

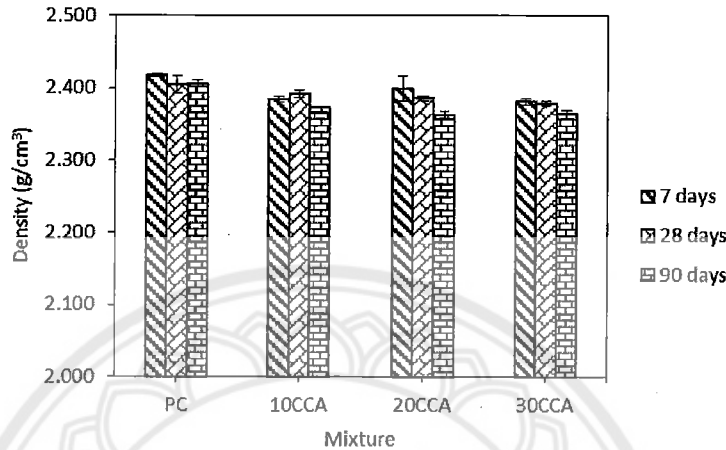


Figure 4. Density of mortars blended with corn cob ash after curing at 7, 28 and 90 days.

3. ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก ที่บ่มในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัวเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าความหนาแน่นปรากฏของมอร์ตาร์ควบคุม มีค่าเท่ากับ 2.41, 2.40 และ 2.40 g/cm^3 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2.36 – 2.41 g/cm^3 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความหนาแน่นสัมพัทธ์เทียบกับความหนาแน่นของมอร์ตาร์ควบคุมซึ่งคิดเป็น 100 จะพบว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 ที่เวลาการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์น้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเล็กน้อย โดยมีค่าประมาณ 98.1 - 99.5 เปอร์เซ็นต์

4. ความพรุน

จากรูปที่ 5 แสดงค่าความพรุนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก ที่บ่มในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัว 7, 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C642 พบว่าความพรุนของมอร์ตาร์ควบคุมมีค่าคิดเป็นร้อยละ 14.30, 14.45 และ 13.68 ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าซังข้าวโพดทุกอัตราส่วนผสมมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ 16.7 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าความพรุนต่อระยะเวลาในการบ่มจะพบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นค่าความพรุนของมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาผลกระทบของเถ้าซังข้าวโพดต่อความพรุนของมอร์ตาร์ พบว่าปริมาณเถ้าซังข้าวโพดที่ทดแทนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความพรุนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

5. การดูดซึมน้ำ

การทดสอบดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชังข้าวโพดในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 7, 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C642 (รูปที่ 6) พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น โดยมอร์ตาร์ควบคุมมีค่าการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 6.09, 7.32 และ 6.58 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชังข้าวโพดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณเถ้าชังข้าวโพดเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 8.5 อย่างไรก็ตามผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำก็เป็นไปในทางเดียวกับค่าความพรุนของมอร์ตาร์

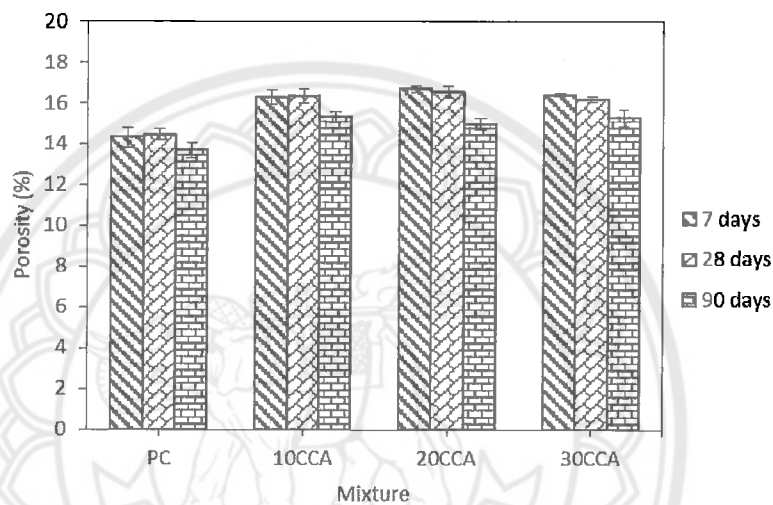


Figure 5. Porosity of mortars blended with corn cob ash after curing at 7, 28 and 90 days.

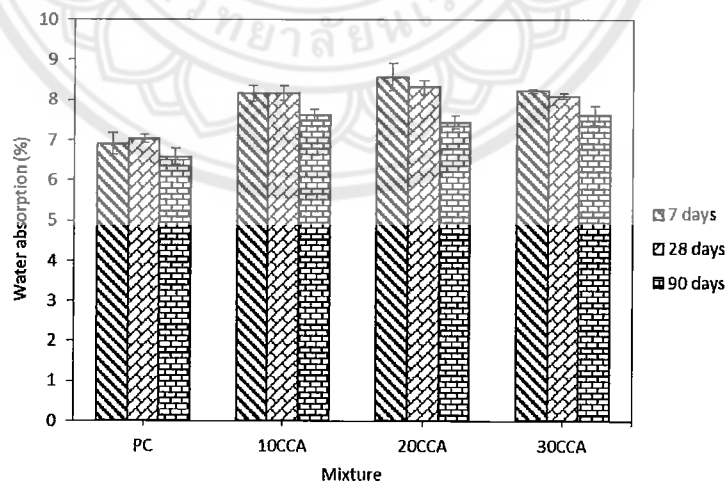


Figure 6 Water absorption of mortars blended with corn cob ash after curing at 7, 28 and 90 days.

วิจารณ์

จากการศึกษาการใช้เถ้าซังข้าวโพดทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อเป็นแนวทางในการทำเอาวัสดุเหลือใช้ในภาคอุตสาหกรรมการเกษตรมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสามารถพิจารณาได้ดังนี้

ด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงเป็นผลให้เฟสตั้งต้นของปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงเป็นอัตราส่วน 0-30 ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเฟสแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 70 ในปูนซีเมนต์ ทำให้เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จะลดปริมาณเฟสที่ช่วยยึดประสานโครงสร้างภายในชิ้นงานมอร์ตาร์ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ลง ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ นอกจากนี้อีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เกิดจากปฏิกิริยาบอซโซลานิกของวัสดุบอซโซลาน (เถ้าซังข้าวโพด) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดขึ้นได้ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Thomas, 2003) ทำให้มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่านั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าซังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมมากที่สุด ซึ่งนำอัตราส่วนผสมนี้มาใช้ในงานก่อสร้างได้เนื่องจากค่ากำลังอัดสัมพัทธ์มีค่ามากกว่าร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ทุกระยะเวลาในการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suwanmaneechot (2015) ที่พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดที่ร้อยละ 20 ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และงานวิจัยของ Owolabi (2015) ที่พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูงสุดเมื่อทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าซังข้าวโพดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของเถ้าซังข้าวโพด

ในส่วนของผลของค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดพบว่ามีความหนาแน่นเมื่อปริมาณเถ้าซังข้าวโพดมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าซังข้าวโพดมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.13 ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 เมื่อทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าซังข้าวโพดเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเกิดจากจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นโดยเปลี่ยนเฟสจากแคลเซียมซิลิเกตที่มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.15 ไปเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ 2.0-2.2 (Mindess, 2010)

นอกจากนี้การทดสอบค่าความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์พบว่าแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันเกิดจากน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในมอร์ตาร์จะเข้าไปอยู่ในรูพรุนของมอร์ตาร์นั่นเอง เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมพบว่าค่าความพรุนของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าซังข้าวโพดมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเถ้าซังข้าวโพดเองมีรูพรุนอยู่ภายในและจากการทำปฏิกิริยาของเถ้าซังข้าวโพดเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ยังไม่ค่อยดีมากนัก ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของเถ้าซังข้าวโพดกับเฟสรอบด้านเกิดเป็นรูพรุนขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นความพรุนของมอร์ตาร์มีปริมาณที่ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และเถ้าซังข้าวโพดเกิดเพิ่มมากขึ้น กลายเป็นสารประกอบของผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคจึงลดปริมาณรูพรุนของมอร์ตาร์ลงนั่นเอง

สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงผลของเถ้าชังข้าวโพดเมื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ปมในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัวที่ 7, 28 และ 90 วัน โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ และกำลังอัด พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 10 สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้ในการก่อสร้างได้เนื่องจากมีค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ทั้งที่ระยะเวลาในการบ่มที่ ระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน ในส่วนความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชังข้าวโพดทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเล็กน้อย ส่งผลให้มีน้ำหนักเบากวามอร์ตาร์ควบคุม แม้ว่าการใช้เถ้าชังข้าวโพดจะทำให้เกิดรูพรุนและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็ตาม นอกจากนี้การใช้เถ้าชังข้าวโพดยังเป็นการลดวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมการเกษตรอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และขอขอบคุณภาคควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Adesanya, D.A. and A.A. Raheem. 2009. Development of corncob ash blended cement. *Construction and Building Materials* 23(1): 347-352.
- Cordeiro, G.C., R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares and E.M.R. Fairbairn. 2008. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites* 30(5): 410-418.
- Ganesan, K., K. Rajagopal and K. Thangavel. 2007. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites* 29: 515-524.
- Mindess, S., J.F. Young and D. Darwin. (2003). *Concrete: 2 Edition*, Pearson Education, Upper Saddle River, USA, 644 p.
- Owolabi T.A., I.O. Oladipo and O.O. Popoola. 2015. Effect of corn cob ash partial substitute for cement in concrete. *New York Science Journal* 8(11): 1-4.
- Raheem, A.A., S.O. Oyebisi, S.O. Akintayo and M.I. Oyeniran. 2010. Effect of admixture on the properties of corn cob ash cement concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* 16: 13-20.
- Suwanmaneechot, P., T. Nochaiya and P. Julphunthong. 2015. Improvement, characterization and use of waste corn cob ash in cement based materials. *IOP.Ser.Material Science and Engineering*. 103. 012023.

- Thomas, M. (2003) Supplementary cementing materials in concrete, Taylor & Francis Group, NW USA, 190 p.
- Wongpha, J. 2009. Development of ash from industry as Portland cement replacement. (Online) Available: https://www.trf.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=721:2013-12-06-07-41-33&catid=26:rgj-network&Itemid=221&option=com_content&view=article&id=721:2013-12-06-07-41-33&catid=26:rgj-network&Itemid=221 (Sep 6, 2019). (in Thai)



MRS Thailand **2019**

The 2nd Materials Research Society
of Thailand International Conference

Acceptance Letter

24 February 2020

Dear Asst Prof Dr Pincha Torkittikul

On behalf of the MRS-Thailand 2019 academic committee, I am pleased to inform you that your manuscript has been accepted for publication in the proceeding/journal designated below. The details of your manuscript are as follows:

Manuscript title: The Investigation of Polyester Resin Polymer Concrete with Various Amount of Aggregate

Proceeding/Journal : AIP conference proceeding (In progress) (Scopus indexed, Accepted up to 200 papers from all symposia)

Please kindly be reminded that your accepted manuscript will be transferred to the production department of the respective proceeding/journal. The publication date is estimated to be around July 2020 but the actual date will depend on the processing schedule of each proceeding/journal.

Sincerely yours,



(Prof. Dr. Santi Maensiri, Ph.D.)
President
Materials Research Society of Thailand

The Investigation of Polyester Resin Polymer Concrete with Various Amount of Construction Aggregate

P. Torkittikul^{1, a)}, T. Nochaiya² and A. Chaipanich³

¹Department of Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Lampang 52100, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

³Construction Materials Research Unit, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand.

^{a)}Corresponding author: pincha_t@hotmail.com

Abstract. The aim of this study was to investigate the properties of polyester resin polymer concrete containing various amount of aggregate. The mixtures were prepared with three different aggregate to binder ratio of 70/30, 75/25 and 80/20. After mixing, all samples were cast in the standard molds and left to harden at room temperature until testing. The results show that the final setting time of binder was 50 minutes. Further, the polyester resin polymer concrete with 70, 75 and 80% aggregate achieved compressive strength of around 422-447 kg/cm² within 24 hours after mixing and achieved compressive strength of approximately 572, 540 and 525 kg/cm² respectively at 7 days of curing.

INTRODUCTION

It is known that Portland cement concrete is widely used for construction due to excellent structural characteristics, high strength and reasonable cost. However, normally, Portland cement concrete would take 24 hours to fully harden and take 28 days to reach its full strength which limit the application of early strength concrete such as pavement maintenance. To overcome this limitation, polymer concretes have been developed and investigated.

Polymer concrete is a relatively new high performance material and widely used in many application such as the production of precast members, highway surfaces and bridge decks, underground constructions, road surfaces and coating and repairs materials due to their excellent mechanical strength, fast curing time, very good adhesion properties, resistance to abrasion and weathering, waterproofness and good sound and thermal insulation properties in comparison with conventional concrete [1-5]. polyester resin [6-7], Epoxy resin [8-9] and acrylic [10] are widely used in fabrication of polymer concrete. Polyester resin is one type of thermosetting polymer which widely used in various application such as automotive parts, composite and construction due to their suitable processing characteristics and reasonable price. In present work, polyester resin was used as binder in fabrication of polymer concrete. The mechanical properties and material characteristic of polyester polymer concrete containing various amount of aggregate were carried out.

MATERIALS AND EXPERIMENTAL METHOD

Materials

Raw Materials

The binder used in this study was the unsaturated polyester resin used as binder in this study consisted of three parts which are an unsaturated polyester resin, a curing agent and a catalyst. Well-graded natural sand with a maximum size of 4.75 mm was used as aggregate.

Mixture Design and Preparation of Specimens

The details of mix proportion are presented in Table 1. The mixtures were prepared with three different aggregate to binder ratios of 70/30, 75/25 and 80/20. First step, all raw materials were weighed according to the amount presented in Table 1. Then, the curing agent and catalyst were added to resin and finally mixed together with aggregate. The mixture was poured in the standard mold without vibration and left to harden at room temperature.

TABLE 1. Mix design of polyester polymer concretes containing various amount of aggregate.

Notation	Materials (Percentage by weight of polymer concrete (%))			
	Aggregate	Binder		
		Resin	Initiator*	Catalyst*
70A30B	70	30	1	0.05
75A25B	75	25	1	0.05
80A20B	80	20	1	0.05

*Percentage by weight of resin

Binder Characterization

The functional Groups of binder was characterized using FTIR technique. Small amount of binder was applied on FTIR glass plate and analyzed by infrared (IR) spectrum operated in the ranged of 400-4,000 cm^{-1} .

The Setting time of binder was carried out by using Vicat apparatus. The binder was prepared by mixing all components following the step as given in the above without adding aggregate. Then, the binder was filled in the mold to determine setting time at ambient temperature every 2 minutes until harden.

Experimental Method

Flowability

Raw materials of polymer concrete were weighed according to Table 1 and mixed following the procedure given in the previous section. Then, the fresh polymer concrete was added to a flow-table mold in two layers, with each layer compacted by 25 times using tamping rod. The excess polymer concrete was skimmed off, the mold was raised vertically and then the table was jolted for 15s. The value of flowability was obtained from the average of diameter of the fresh polymer concrete measured in two directions.

Apparent Density

Raw materials of polymer concrete were mixed following procedure as described in the previous section. Then, the mixtures were cast in 5 mm cubic mold and left to harden at ambient temperature. After 7 days of curing, the specimens were soaked in the water for 72 hours and weighed in water, this mass was recorded as A. Then, the specimens were raised from water and removed moisture on the surface by towel. The mass of surface-dried specimen was recorded as B. The apparent density of samples was calculated following equation (1) where ρ_w is the density of water according to ASTM C948:

$$\text{Apparent density (g/cm}^3\text{)} = \frac{B}{B-A} \times \rho_w \quad (1)$$

Compressive Strength

The mixtures prepared according to the procedure as given on the previous section were cast in 5 mm cubic mold and left to harden at room temperature. After 7 days of curing in room temperature, the specimens were tested for compressive strength.

Tensile Strength

For tensile strength testing, the mixtures were cast in dog bone mold according to ASTM C190 and left to harden at room temperature. The specimens were cured in ambient atmosphere for 7 days and then were tested for tensile strength.

Microstructure

Small piece of specimen after testing for compressive strength testing was collected to investigate morphology and chemical characteristics. The sample was attached on a brass stub and coated with gold operating by 10-20 mA DC current. The morphology of polymer concrete was investigated by low vacuum scanning electron microscopy linked to an energy dispersive X-ray spectrometry at Electron Microscopy Research and Service Center (EMRSC) of Chiang Mai University.

RESULTS AND DISCUSSION

Binder Characterization

The functional groups of resin were characterized using FTIR technique (Fig. 1). The results confirmed that resin used in this study was polyester resin. As can be seen, broad bands are observed at 3600–3400 cm^{-1} due to the stretching vibrations of hydroxyl (OH) groups. The bands at 2956 and 2880 cm^{-1} indicated the presence of the C–H symmetric stretching of the methylene (CH₂ and CH₃) groups. A carbonyl (C=O) stretching from the ester linkage is observed at 1719 cm^{-1} . The bands at 1600, 1579 and 1494 cm^{-1} are indicated to the C=C stretching vibrations within the aromatic ring. The asymmetrical and symmetrical vibrations of the methyl (CH₃) group are observed at 1448 and 1370 cm^{-1} . For the band at 1253 cm^{-1} exists due to the torsional vibrations of CH₂ groups. The bands at 1116 and 1068 cm^{-1} are revealed to the C–O stretching and C–O–C asymmetric stretching vibrations, respectively. The C–H out-of-plane bending of trans –CH=CH–, =C–H out-of-plane bending of aromatic ring and =C–H out-of-plane bending in singly substituted aromatic ring are found at 979, 741 and 697 cm^{-1} respectively. The final setting time of binder was 50 minutes.

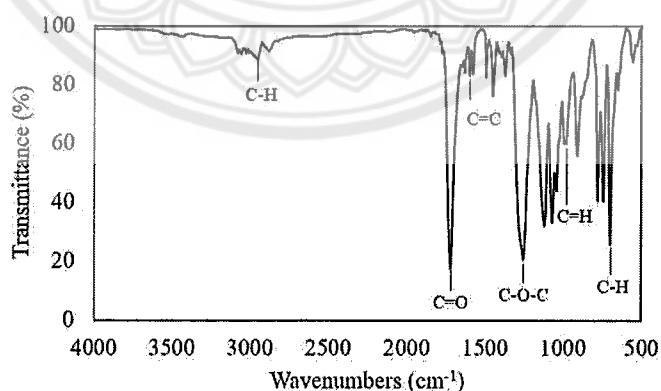


FIGURE 1. FTIR spectra of polyester resin.

Apparent Density

The apparent density of polymer concrete containing various amount of aggregate is presented in Fig. 2. As can be seen, the apparent density of polymer concrete containing 70%, 75% and 80% aggregate were 1.84, 1.88 and 1.91 g/cm³ respectively. The apparent density of polymer concrete was found to increase since the amount of aggregate increased due to the higher specific gravity of natural aggregate as compared to that of resin.

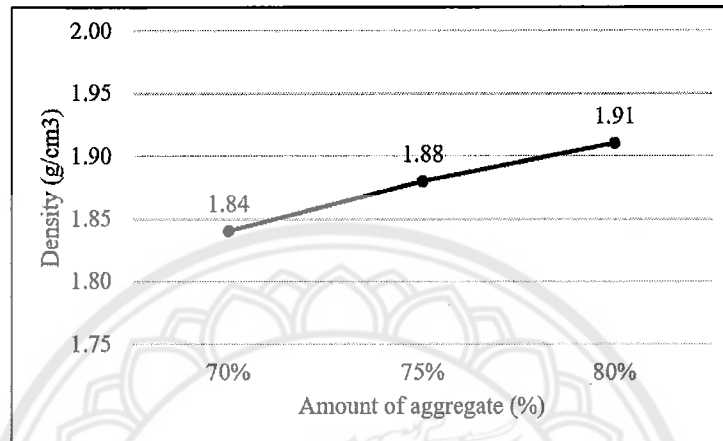


FIGURE 2. The apparent density of polymer concrete containing various amount of aggregate.

Compressive Strength

The compressive strength of polymer concrete containing various amount of aggregate is presented in Fig. 3. The result indicated that the increase of aggregate content would be result in a decrease in compressive strength. The compressive strength at the age of 7 days of polymer concrete with 70%, 75% and 80% aggregate were 572, 540 and 525 ksc respectively. The decrease in strength with the increase of aggregate content can be explained in the term of the stress concentration between two compartments. Namely, when load was applied to specimens, the stress was concentrated at the interface between binder and aggregate. As load was increased, crack was initiated and propagated within the matrix of specimen until the strength of the material was exceeded and wedge failure occurred under the loading plate.

The compressive strength development of polymer concrete with curing period as compared to polymer concrete at the age 7 days is shown in Fig. 4. However, as can be seen, all polymer concretes containing various amount of aggregate can achieved compressive strength of around 422-447 ksc within 24 hours after mixing and these are about 80% of the 7 days compressive strength polymer concrete.

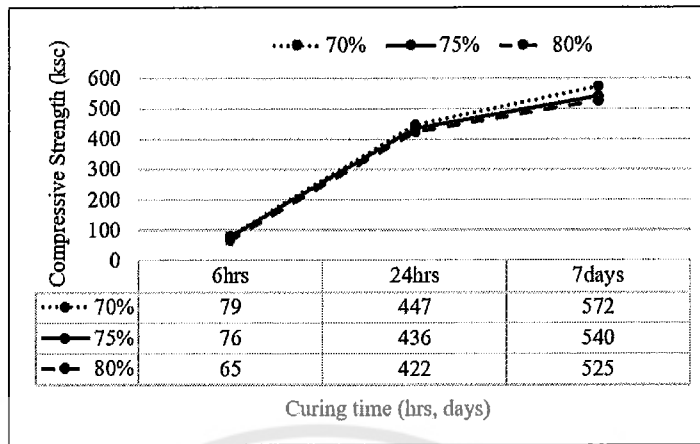


FIGURE 3. The compressive strength of polymer concrete at the age of 6hrs, 24 hrs and 7 days containing various amount of aggregate.

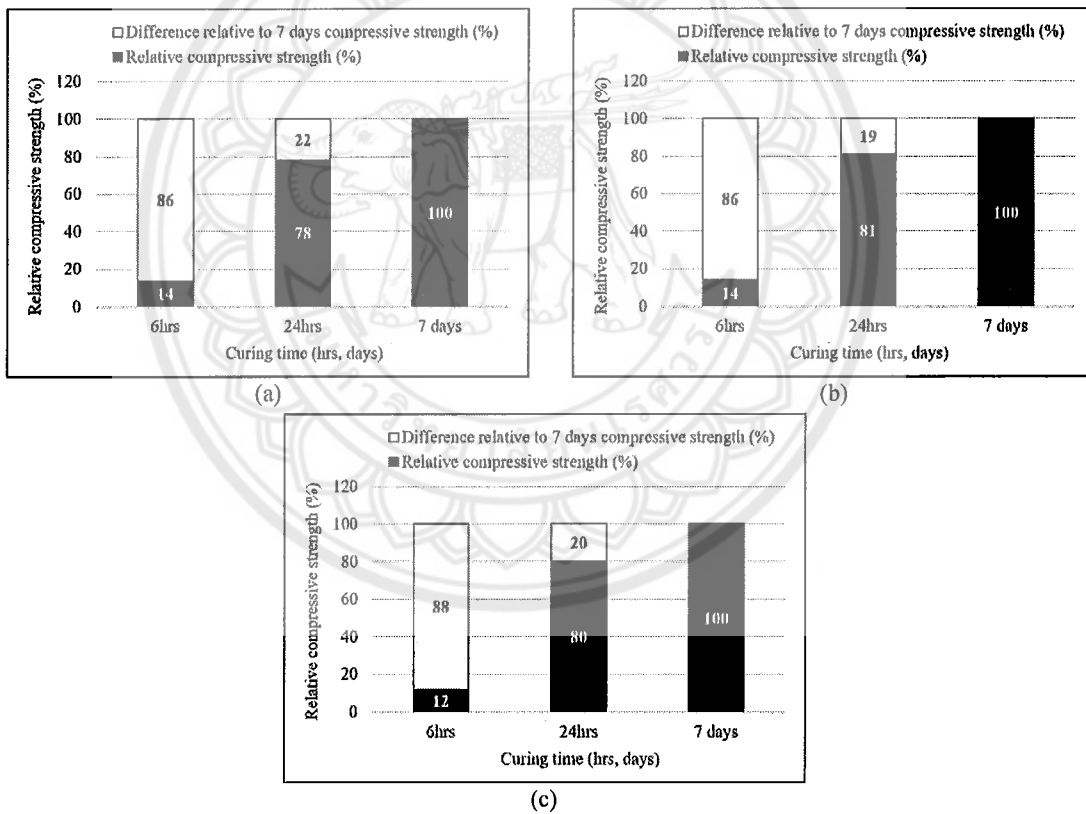


FIGURE 4. The compressive strength development of (a) 70% aggregate polymer concrete, (b) 75% aggregate polymer concrete and (c) 80% aggregate polymer concrete with curing period as compared to polymer concrete at the age 7 days.

Tensile Strength

The tensile strength of polymer concrete at the age of 6 hrs, 24 hrs and 7 days containing various amount of aggregate is presented in Fig. 5. As can be seen, this finding corresponds well with the result of compressive strength reported previously since tensile strength decreased with increasing aggregate content. At 24 hrs of curing in ambient condition, the tensile strength of polymer concrete with 70%, 75% and 80% aggregate were 6621, 6376 and 5715 kPa respectively. These achieved 73, 73 and 68 % tensile strength as compared to that of polymer concretes at the age of 7 days (Fig. 6).

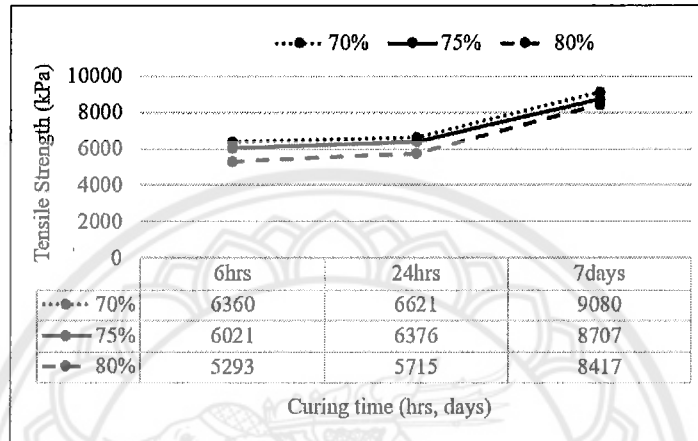
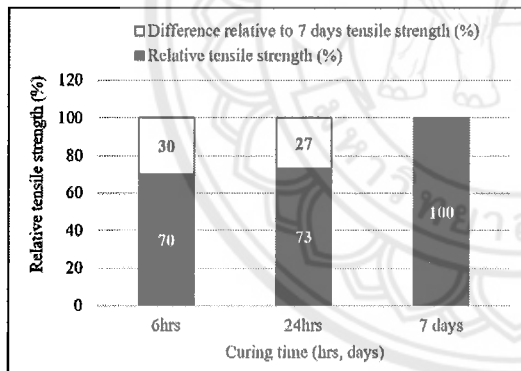
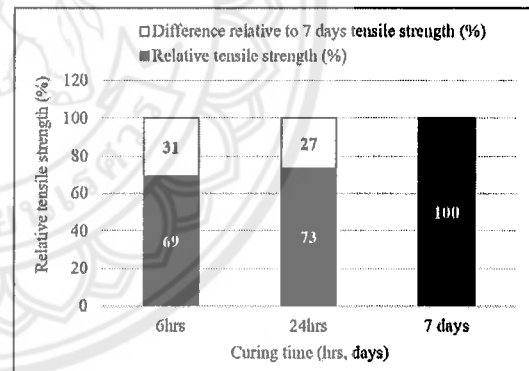


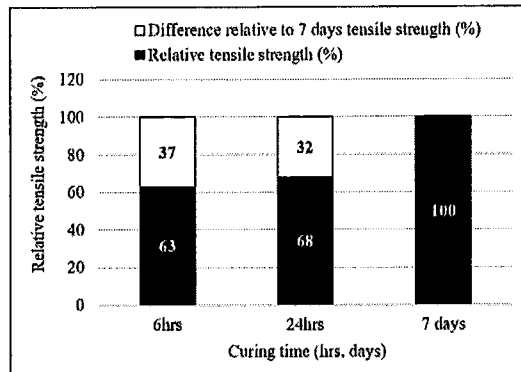
FIGURE 5. The tensile strength of polymer concrete at the age of 6 hrs, 24 hrs and 7 days containing various amount of aggregate.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 6. The tensile strength development of (a) 70% aggregate polymer concrete, (b) 75% aggregate polymer concrete and (c) 80% aggregate polymer concrete with curing period as compared to polymer concrete at the age 7 days.

Microstructure

The microstructure of polymer concrete containing polyester resin and natural aggregate observed by scanning electron microscopy is shown in Fig. 7. As can be seen from micrograph, the binder was homogeneous, as the color is relatively uniform, and completely coated the natural aggregate.

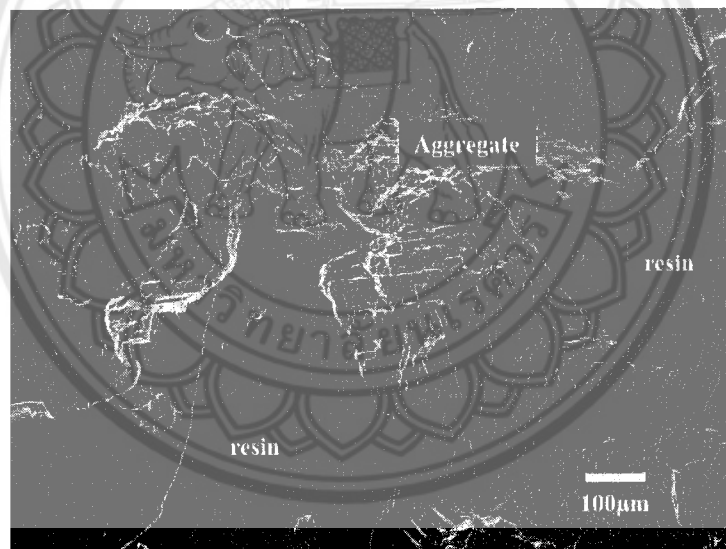


FIGURE 7. The microstructure of polymer concrete containing polyester resin and natural aggregate observed by scanning electron microscopy.

CONCLUSIONS

The apparent density of polymer concrete was found to increase since the amount of aggregate increased. Polymer concrete containing 70, 75 and 80% aggregate achieved compressive strength of around 422-447 kilogram per square centimeter within 24 hours and achieved compressive strength of approximately 572, 540 and 525 kilogram per square centimeter at 7 days of curing. For tensile strength, at 24 hrs of curing in ambient condition, the tensile strength of polymer concrete with 70%, 75% and 80% aggregate were 6621, 6376 and 5715 kPa respectively. The increase of aggregate content would be result in a decrease both in compressive and tensile strength of polymer

concrete. Further, a fast setting property with a high strength development provides a promising approach for creating new polymer concrete with attractive properties.

ACKNOWLEDGMENTS

Financial support from Thailand Science Research and Innovation to Asst. Prof. Dr. Pincha Torkittikul (Grant No. MRG6180040) is gratefully acknowledged. The authors would also like to thank the Department of Civil Technology, Lampang Rajabhat University, for providing facilities and equipment.

REFERENCES

1. I. T. Roh, K. C. Jung, S. H. Chang and Y. H. Cho, *Constr. Build. Mater.* **78**, 77–84 (2015)
2. K. S. Yeon, J. H. Yeon, Y. S. Choi and S.H. Min, *Constr. Build. Mater.* **63**, 125–131 (2014)
3. K. C. Jung, I. T. Roh and S. H. Chang, *Compos. B-Eng.* **58**, 352–360 (2014)
4. K. C. Jung and S. H. Chang, *Compos. Struct.* **158**, 217–226 (2016)
5. V. Toufigh, M. Hosseinali, S. M. Shir'khorshidi, *Constr. Build. Mater.* **112**, 183–190 (2016)
6. M.J. Hashemi, M. Jamshidi and J. H. Aghdam, *Constr. Build. Mater.* **163**, 767–775 (2018)
7. D. Chen, F. Liu, F. Yang, L. Jing, W. Feng, J. Lv and Q. Luo, *Constr. Build. Mater.* **177**, 477–498 (2018)
8. J. Wang, Q. Dai, S. Guo and R. Si, *Constr. Build. Mater.* **203**, 469–480 (2019)
9. W. Ferdous, A. Manalo, T. Aravinthan and G. V. Erp, *Constr. Build. Mater.* **124**, 287–300 (2016)
10. S. W. Son and J. H. Yeon, *Constr. Build. Mater.* **37**, 669–679 (2012)

