คุณสมบัติเชิงกล โครงสร้างจุลภาค ของนาโนซิลิกาและแร่ใยธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล

Mechanical Microstructure of nanosilica and natural fiber to improve the properties of recycled aggregate concrete

วิชญพงศ์ ทั่วด้าว[1,*] ศตวรรษ หฤหรรษพงศ์[2]

[1,2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย จังหวัดกรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: mnarak_civil@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาคุณสมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลโดยใช้นาโนซิลิการ่วมกับแร่ใยธรรมชาติ ใยป่านศรนารายณ์และใยปาล์มน้ำมันทดแทนมวลรวมละเอียด หินรีไซเคิลทดแทนมวลรวมตามธรรมชาติ และใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำหนดอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.60 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังรับแรงดัด ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาและมวลรวมตามธรรมชาติมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 201.80 ksc ที่อายุ 7 วัน และ 308.25 ksc ที่อายุ 28 วัน สำหรับค่ากำลังรับแรงดัดพบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวมรีไซเคิลและใยปาล์มน้ำมันมีค่าสูงสุด เท่ากับ 45.90 ksc ส่วนผลของโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของแร่ใยธรรมชาติจะไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกันและมีช่องว่างเกิดขึ้น สอดคล้องกับผลกำลังอัด

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล, นาโนซิลิกา, แร่ใยธรรมชาติ

Abstract

This research focuses on mechanical properties development and microstructure of Recycled Concrete Aggregate (RCA) using nano silica and natural fibers. Sisal fibers and palm oil fibers used to replace fine aggregate; Recycled Concrete Aggregate used to replace Natural Concrete Aggregate (NCA) and nano silica used to replace Portland cement type 1 (OPC). The water to binder (W/B) ratios was 0.60 by weight. The concrete containing nano silica and Natural aggregate had the highest compressive strength of 201.80 ksc at 7 days and 308.25 ksc at 28 days, according to the compressive strength and flexural strength tests at 7 days and 28 days. The flexural strength of concrete containing recycled aggregate and palm oil fibers had maximum value of 45.90 ksc after 28 days. Scanning Electron Microscope (SEM) investigation of the microstructure of recycled aggregate concrete revealed that concrete containing natural fibers is less homogenous. When a gap appears, which corresponds to the compressive test results.

Keywords: Recycled Concrete Aggregate (RCA), Nano silica, Natural fibers

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และน้ำ ซึ่งนิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้าง เช่น อาคาร ถนน เขื่อน สะพาน และโครงสร้างพื้นฐาน แต่สิ่งที่มักเกิดขึ้นหลังการก่อสร้างหรือการรื้อถอนหากสิ่งก่อสร้างเกิดการชำรุดและหมดอายุการใช้งาน คือ เกิดเศษคอนกรีตเหลือทิ้งจำนวนมาก และถูกนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง [1-2] จึงมีความพยายามในการหาวิธีลดปริมาณของเศษคอนกรีตเหลือทิ้งโดยการผลิตเป็นมวลรวมชนิดใหม่ที่เรียกว่า มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate) ซึ่งเกิดจากการนำเศษคอนกรีตเหลือทิ้งจากการก่อสร้าง การรื้อถอนหรือการทำลายสิ่งปลูกสร้าง และชิ้นส่วนคอนกรีตที่ไม่ได้คุณภาพมาทำการย่อยและบดอัดเพื่อนำมาเป็นมวลรวมในส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับใช้ทดแทนคอนกรีตจากมวลรวมธรรมชาติ (Natural Concrete Aggregate) [3] อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจากเศษคอนกรีตมีคุณภาพและคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่ามวลรวมคอนกรีตธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โมดูลัสความยืดหยุ่น กำลังดึง กำลังอัดและกำลังรับแรงดัด เป็นต้น [1,3,4]

การพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลให้มีกำลังสูงขึ้นจึงเป็นวิธีที่ช่วยให้สามารถนำมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลมาใช้ทดแทนมวลรวมคอนกรีตธรรมชาติ ซึ่งวิธีการที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ การนำวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์หรือจากธรรมชาติ เช่น วัสดุนาโนและเส้นใยธรรมชาติ

มาผสมร่วมกับคอนกรีตเพื่อพัฒนาให้เป็นคอนกรีตกำลังสูงขึ้น Haruehansapong และคณะ [5] ศึกษาผลของกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผสมนาโนซิลิกาพบว่าการใช้นาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 7 12 และ 40 นาโนเมตรแทนที่ปูนซีเมนต์ ที่อายุ 28 วัน ให้กำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ควบคุม 1.11 1.21 และ 1.69 เท่า และยังพบว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้นาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร มีความแน่นและเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปาล์มน้ำมัน ยังเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่มีการนำมาใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) และแรงเสียดทาน (Friction) ที่เพิ่มขึ้นอีกทั้งปริมาณและความยาวของเส้นใยยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับกำลังอัดและกำลังดัด [6-8] Santhi และคณะ [9] ศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ พบว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณและความยาวของเส้นใย Pipathattakul และคณะ [10] ศึกษาการดัดแปลงพื้นผิวที่มีต่อความต้านแรงดึงของเส้นใยป่านศรนารายณ์เดี่ยว พบว่าเส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวมีค่าความต้านแรงดึงและร้อยละของการยืดตัวสูงขึ้นแต่เมื่อระยะเวลาในการดัดแปลงเพิ่มขึ้นความต้านแรงดึงจะมีค่าลดลง Buathong และคณะ [11] ศึกษาคุณสมบัติทางกลของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยปาล์มน้ำมันโดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัด พบว่าการเพิ่มเส้นใยช่วยเปลี่ยนพฤติกรรมการเปราะของทรายซีเมนต์ให้เป็นความเหนียวและช่วยลดการสูญเสียกำลัง โดยกำลังอัดแกนเดียวของทรายซีเมนต์ที่เสริมเส้นใยปาล์มน้ำมันมีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะมีการลดลงและกำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

งานวิจัยครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้นาโนซิลิกา ใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยปาล์มน้ำมัน มาพัฒนากำลังของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล โดยเน้นไปที่การศึกษาผลของคุณสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบกำลังดัดและกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เพื่อให้เข้าใจในพฤติกรรมเชิงลึกของคอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกาและเส้นใยธรรมชาติมากขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่อไปในอนาคต

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

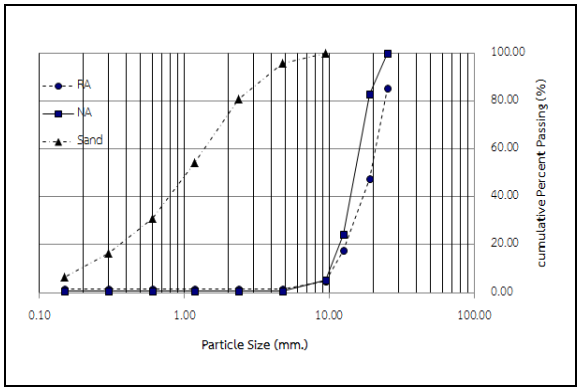
2.1 วัสดุ สัดส่วนผสม และการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

2.1.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ทรายมาตรฐานที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 และค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 นาโนซิลิกา (Nano-SiO_2) มีขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ซึ่งมีส่วนผสมของ SiO_2 ร้อยละ 99.8 ใยป่านศรนารายณ์ (Sisal Fiber) ความยาว 20 มม. ผ่านกรรมวิธี 5% ของ NaOH (ความเข้มข้น 0.1) เป็นเวลา 20 นาทีแล้วทำให้แห้ง หลังจากนั้นล้างด้วยกรดอะซิติก 1% เพื่อขจัด NaOH. ส่วนเกินออกไป และเส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber) ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วนำมาตากแดดและอบที่อุณหภูมิ 50±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนแห้งสนิทและนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว โดยค้างตะแกรงเบอร์ 4 มวลรวมตามธรรมชาติ (NA) ได้รับการคัดเกรด จากหินผสมคอนกรีต ขนาด 3/4" และมวลรวมรีไซเคิล (RA) ได้มาจากการรื้อถอนสิ่งก่อสร้างในพื้นที่จังหวัดสระบุรี ขนาด 1-1/2" โดยกำหนดให้มีค่าการสึกหรอไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 สมบัติจำเพาะของมวลรวม

Property	Sand	NA	RA
Fineness Modulus	3.15	7.84	8.34
Specific Gravity (SSD)	2.64	2.71	1.85
Water Absorption (%)	0.91	0.80	5.70
Unit Weight (kg./m3.)	1,763.04	1,501.41	1,443.84
Void Content (%)	33.72	44.95	25.97
Abrasion Loss (%)	-	26.54	40.23



รูปที่ 1 ขนาดคละของมวลรวม

2.1.2 สัดส่วนผสม

การศึกษานี้ใช้สัดส่วนผสมทั้งหมด 14 ตัวอย่าง โดยระบุหมายเลขส่วนผสมเป็นชุดตัวเลขสี่ชุด ซึ่งชุดตัวเลขลำดับที่ 1 แสดงถึงอัตราส่วนการแทนที่ของ RA หมายถึง มวลรวมรีไซเคิล ชุดตัวเลขลำดับที่ 2 แสดงถึง OPF หมายถึง เส้นใยปาล์มน้ำมัน ชุดตัวเลขลำดับที่ 3 แสดงถึง SF หมายถึง ใยป่านศรนารายณ์ และชุดตัวเลขลำดับที่ 4 ชุดตัวเลขแสดงถึง NS หมายถึง นาโนซิลิกา ตัวอย่างเช่นหมายเลข R100-3-3-3 ระบุว่าอัตราส่วนทดแทน RA เท่ากับ 100% ปริมาณ OPF เท่ากับ 3 กก./ลบ.ม. ปริมาณ SF เท่ากับ 3 กก./ลบ.ม. และปริมาณ NS เท่ากับ 3% ในสัดส่วนผสม โดยการออกแบบส่วนผสมกำหนดอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 โดยน้ำหนัก และการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผสมคอนกรีตควบคุม กับคอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลในแต่ละส่วนผสมที่เติมนาโนซิลิกาและแร่ใยธรรมชาติ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ **2** สัดส่วนส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	สัดส่วนผสม ($kg.m^{-3}$)								Price/ m^{-3}
	W	OPC	S	NA	RA	OPF	SF	NS	
R0-0-0-0	210	350	730	1100	0	0	0	0	1937
R100-0-0-0	210	350	710	0	990	0	0	0	1575
R0-3-0-0	210	350	730	1100	0	12	0	0	2537
R100-3-0-0	210	350	710	0	990	12	0	0	2175
R0-0-3-0	210	350	730	1100	0	0	12	0	2897
R100-0-3-0	210	350	710	0	990	0	12	0	2535
R0-0-0-3	210	340	730	1100	0	0	0	10	3409
R100-0-0-3	210	340	710	0	990	0	0	10	3047
R0-3-0-3	210	340	730	1100	0	12	0	10	4009
R100-3-0-3	210	340	710	0	990	12	0	10	3647
R0-0-3-3	210	340	730	1100	0	0	12	10	4369
R100-0-3-3	210	340	710	0	990	0	12	10	4007
R0-3-3-3	210	340	730	1100	0	12	12	10	4969
R100-3-3-3	210	340	710	0	990	12	12	10	4607

หมายเหตุ: *W* = น้ำ
OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
S = ทราย
NA = มวลรวมธรรมชาติ

2.1.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

นำวัสดุมวลรวมตามธรรมชาติ หรือ วัสดุมวลรวมรีไซเคิล ใส่ลงในน้ำครึ่งหนึ่งแล้วผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที ในอัตราการผสมปกติหลังจากนั้นเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรืออนุภาคนาโนซิลิกา ลงในน้ำส่วนที่เหลือและกวนอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 2 นาที และผสมลงในส่วนผสมข้างต้น และกวนด้วยอัตราปกติเป็นเวลา 2 นาที ขั้นตอนต่อไปนำเส้นใยปาล์มน้ำมัน หรือ ใยป่านศรนารายณ์ ผสมลงในปูนซีเมนต์และผสมด้วยอัตราปกติเป็นเวลา 2 นาที ใส่ส่วนผสมทรายละเอียดลงในส่วนผสมแห้งเส้นใยปาล์มน้ำมัน หรือ ใยป่านศรนารายณ์ แล้วคนให้เข้ากันตามปกติเป็นเวลา 2 นาที ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ในกรณีที่ต้องใช้สารลดน้ำให้ผสมไปพร้อมกับน้ำ โดยคอนกรีตจะต้องควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตที่เหมาะสม 10 เซนติเมตร ± 2.5 หลังจากนั้นเทคอนกรีตลงในแบบหล่อ

คอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 ซม. และคานแท่งปริซึม ขนาด 15×15×50 ซม. หลังจากนั้น ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกถอดออกหลังจากการหล่อ 24 ชั่วโมงจากนั้นแช่ในถังน้ำมาตรฐาน ก่อนการทดสอบตัวอย่างจะถูกนำออกจากถังน้ำและวางไว้ในที่ร่ม เพื่อทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลคอนกรีตมวลรวม ส่วนการศึกษาโครงสร้างจุลภาคคอนกรีตมวลรวม นั้น จะเก็บชิ้นตัวอย่างหลังจากการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลแล้วเสร็จโดยการตัดชิ้นส่วนที่สนใจมาทำการวิเคราะห์โดยแบ่งเป็น วิธีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ต่อมาวิธีการจัดเรียงตัวของคอนกรีตจากการวัดการแพร่กระจายรังสีเอกซ์ (XRD) ใช้การวิเคราะห์โดย X-ray diffractometer และวิธีการวิเคราะห์เชิงความร้อนเทอร์โมกราวิเมตริก (TG) วิธีละจำนวน 14 ตัวอย่าง

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

2.2.1.1 การทดสอบกำลังอัด

ทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 ซม.ที่มีส่วนผสมทั้งหมด 14 ตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 เพื่อหาค่ากำลังอัดตามวิธีการทดสอบกำลังอัดมาตรฐาน ASTM C109 โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน ในแต่ละส่วนผสมทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างและหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย

2.2.1.2 การทดสอบกำลังดัด

ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตรูปคานแท่งปริซึม ขนาด 15×15×50 ซม. จำนวน 14 ตัวอย่าง ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ทดสอบกำลังรับแรงดัดภายใต้มาตรฐาน ASTM C 78

2.2.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

2.2.2.1 การศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เพื่อศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยการศึกษาโครงสร้างของผลึก โดยการตัดชิ้นส่วนที่สนใจตามขนาดของฐานวาง (Stub) แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปวางติดบนฐานวาง แล้วนำไปฉาบผิวด้วยทองหรือโลหะผสมระหว่างทองกับพลาเดียมด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการฉาบผิว เรียกว่า Sputter Coater เมื่อชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการฉาบผิวด้วยทองแล้ว ให้นำตัวอย่างนำมาใส่ในเครื่องทดสอบ SEM และถ่ายภาพขยายในตำแหน่งที่ต้องการจะศึกษาในแต่ละกรณีที่จะศึกษา โดยทำการทดสอบเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุ 28 วัน

2.2.2.2 การศึกษาการจัดเรียงตัวของโมเลกุลด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

เพื่อศึกษาการตกผลึกของคอนกรีตจากการวัดการแพร่กระจายรังสีเอกซ์ (XRD) ยิงกระทบกับตัวอย่างโดยให้ปริมาณรังสีสะท้อนกลับ โดยส่วนผสมแต่ละชนิดจะมีมุมสะท้อนในมุมและทิศทางที่แตกต่างกันในแต่ละกรณีที่จะศึกษา โดยใช้ D8000 ด้วยรังสี CuK (k = 1.54056 A°) ที่สร้างที่ 40 mA และ 40 kV. การรวบรวมข้อมูลดำเนินการในช่วง 2 พิสัย 5° - 70° โดยใช้เวลาขั้นตอนละ 0.1 วินาที โดยทำการทดสอบเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุ 28 วัน

2.2.2.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo Gravimetric, TG)

เพื่อศึกษาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ โดยการนำตัวอย่างที่ได้รับความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึง 1,000 °C ที่อัตราความร้อน 10 °C ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ใช้ในการคำนวณการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการให้ความร้อนและเพื่อประมาณส่วนผสมของ $Ca(OH)_2$ ซึ่งคำนวณจากการลดน้ำหนักระหว่าง 450 ถึง 580 °C โดยทำการทดสอบเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุ 28 วัน

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

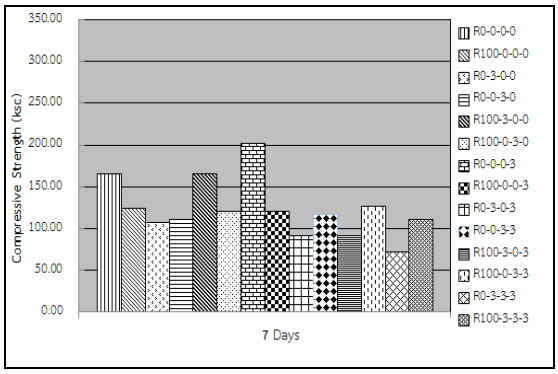
3.1 ผลทดสอบคุณสมบัติเชิงกลคอนกรีตมวลรวม

ตารางที่ 3 ค่ากำลังอัดและค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลรวม

Symbol	W/B	Compressive Strength (ksc)		Flexural Strength (ksc)
		7 (วัน)	28 (วัน)	28 (วัน)
R0-0-0-0	0.6	164.77	271.50	40.90
R100-0-0-0	0.6	123.31	226.70	40.40
R0-3-0-0	0.6	106.81	204.41	42.40
R0-0-3-0	0.6	110.56	207.49	39.10
R100-3-0-0	0.6	164.79	239.15	45.90
R100-0-3-0	0.6	120.12	203.54	36.40
R0-0-0-3	0.6	201.80	308.25	33.50
R100-0-0-3	0.6	120.21	225.50	33.40
R0-3-0-3	0.6	91.10	171.85	28.60
R0-0-3-3	0.6	116.53	213.14	31.40
R100-3-0-3	0.6	90.93	194.63	31.40
R100-0-3-3	0.6	126.65	219.18	29.60
R0-3-3-3	0.6	71.82	107.25	20.30
R100-3-3-3	0.6	109.96	206.33	24.50

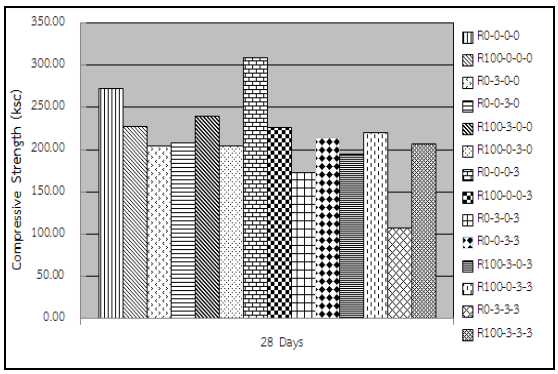
3.1.1 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวม

ตารางที่ 3 และรูปที่ 2 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมที่อายุ 7 วัน จากผลการทดสอบ พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาและมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-3) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 201.80 ksc มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-0) 1.22 เท่า เนื่องจากนาโนซิลิกามีอนุภาคที่เล็กมากและเล็กกว่าส่วนผสมอื่นๆ อีกทั้งนาโนซิลิกายังมีองค์ประกอบของ SiO_2 ในปริมาณสูงทำให้สามารถสอดแทรกเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ดีทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและมีกำลังยึดเหนี่ยวที่มากขึ้น [5] และค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อมีส่วนผสมของเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนประกอบหลัก (R0-3-0-3) และ (R0-3-3-3) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 91.10 ksc และ 71.82 ksc ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม 0.55 และ 0.44 เท่า ตามลำดับ ซึ่งของผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Abreu และคณะ [12] และ คณุตม์ [13]



รูปที่ 2 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมที่อายุ 7 วัน

ตารางที่ 3 และรูปที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมที่อายุ 28 วัน จากผลการทดสอบ พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสม ของนาโนซิลิกาและมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-3) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 308.25 ksc มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม 1.14 เท่า ซึ่งผลทดสอบที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมที่อายุ 7 วัน เนื่องจากนาโนซิลิกามีอนุภาคที่เล็กมากและเล็กกว่าส่วนผสมอื่นๆ อีกทั้งนาโนซิลิกายังมีองค์ประกอบของ SiO_2 ในปริมาณสูงทำให้สามารถสอดแทรกเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ดีทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและมีกำลังยึดเหนี่ยวที่มากขึ้น [5] และค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อมีส่วนผสมของเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนประกอบหลัก (R0-3-0-3) และ (R0-3-3-3) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 171.85 ksc และ 107.25 ksc ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม 0.63 และ 0.40 เท่า ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Abreu และคณะ [12] และ คณุตม์ และคณะ [13]

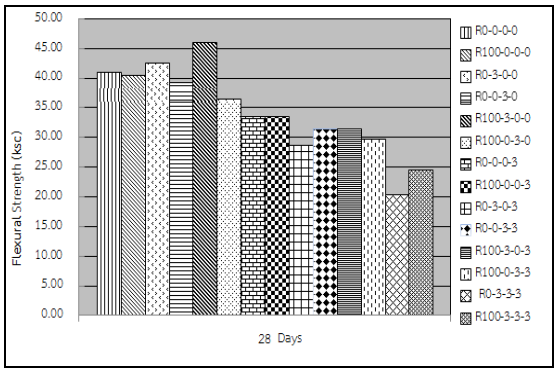


รูปที่ 3 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมที่อายุ 28 วัน

3.1.2 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลรวม

ตารางที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลรวมที่อายุ 28 วัน จากผลการทดสอบ พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเส้นใยปาล์มน้ำมัน (R100-3-0-0) และ (R0-3-0-0) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 45.90 ksc และ 42.40 ksc มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม 1.12 และ 1.04 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นเส้นใยที่มีความเหนียว ความทนทาน มีคุณสมบัติทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว (Bonding)

และแรงเสียดทาน (Friction) ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งปริมาณและความยาวของเส้นใยยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการเพิ่มกำลังรับแรงดัด [6-8] โดยค่ากำลังดัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อมีส่วนผสมของเส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นส่วนประกอบหลัก (R100-3-3-3) และ (R0-3-3-3) มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด เท่ากับ 24.50 ksc และ 20.30 ksc ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม 0.60 และ 0.50 เท่า ตามลำดับ

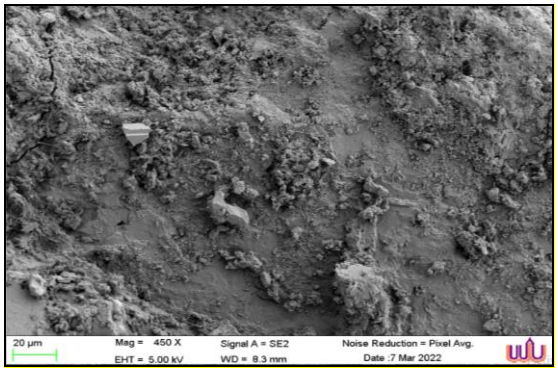


รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลรวมที่อายุ 28 วัน

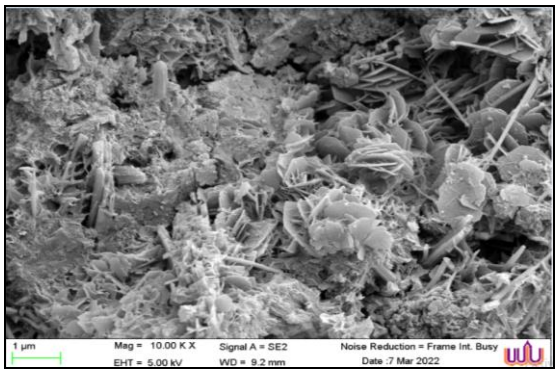
3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวม

3.2.1 การศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

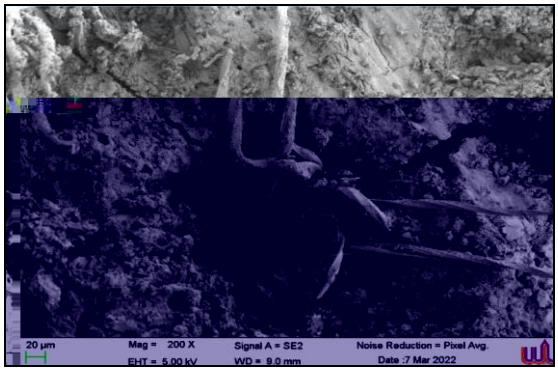
รูปที่ 5 รูปภาพขยายคอนกรีตควบคุมที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-0) ที่มีโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเต็มพื้นที่ แต่ไม่มีความสม่ำเสมอ มีช่องว่างเกิดขึ้น เมื่อเทียบกับรูปที่ 6 ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาและมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-3) นั้น มีโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเป็นชิ้นเดียวกัน เนื่องจากมีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิกา เป็นผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่สูงกว่า ส่วนรูปที่ 7 พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของแร่ใยธรรมชาติโครงสร้างจุลภาคไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีช่องว่างเกิดขึ้นมาก เป็นโพรงขนาดใหญ่ ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนาโนซิลิกาไม่สามารถสอดแทรกเข้าไปได้ จึงทำให้ไม่มีการยึดเกาะตัวกัน สอดคล้องกับผลค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่รับกำลังได้น้อย



รูปที่ 5 ภาพขยายคอนกรีตควบคุมที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-0)



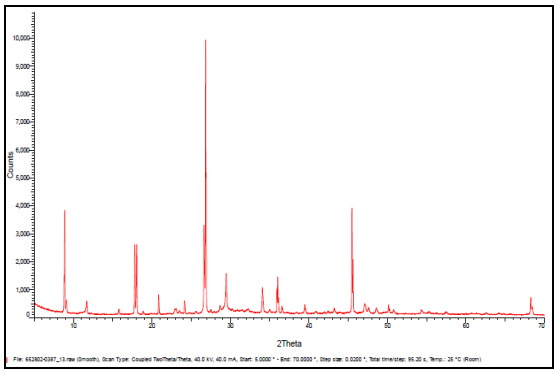
รูปที่ 6 ภาพขยายคอนกรีตที่มีส่วนผสม ของนาโนซิลิกาและมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-3)



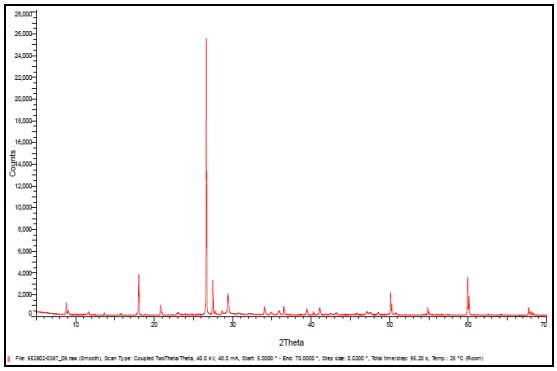
รูปที่ 7 ภาพขยายคอนกรีตที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกา แร่ใยธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิล (R100-3-3-3)

3.2.2 การศึกษาการจัดเรียงตัวของโมเลกุลด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

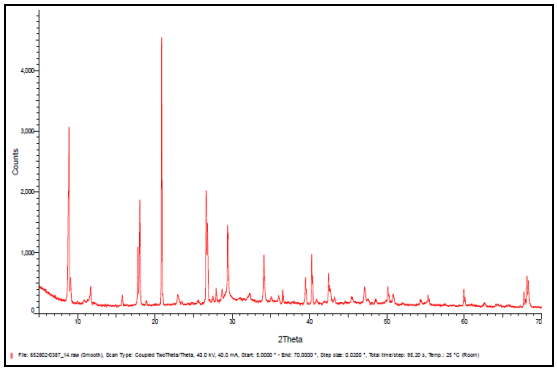
จากการศึกษาการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ของคอนกรีตจากการวัดการแพร่กระจายรังสีเอกซ์ (XRD) ตามรูปที่ 8 ถึง รูปที่ 10 ความเข้มของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) รูปที่ 8 เป็นคอนกรีตควบคุมจะเห็นได้ว่าความเข้มเชิงปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) มีปริมาณเท่ากับ 13,000 และจะมีความเข้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของนาโนซิลิกาเป็นส่วนประกอบเท่ากับ 26,000 แต่เมื่อมีส่วนผสมของเส้นใยธรรมชาติปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) จะลดลงอยู่ที่ 4,500 ถึง 7,500 เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) มีปริมาณที่ลดน้อยลง และมีค่าที่แตกต่างกันไปแต่ยังอยู่ในช่วง 2 พิสัย 26° และ 29° ตามลำดับ [14]



รูปที่ 8 ภาพสารประกอบของคอนกรีตควบคุมที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-0)



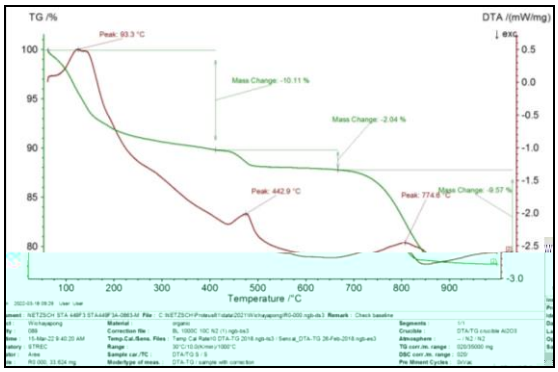
รูปที่ 9 ภาพสารประกอบของคอนกรีตควบคุมที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาและมวลรวมรีไซเคิล (R100-0-0-**3)**



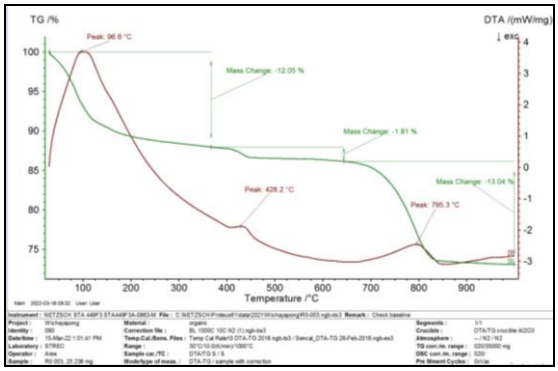
รูปที่ 10 ภาพสารประกอบของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกา แร่ใยธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิล (R100-3-3-3)

3.2.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo Gravimetric, TG)

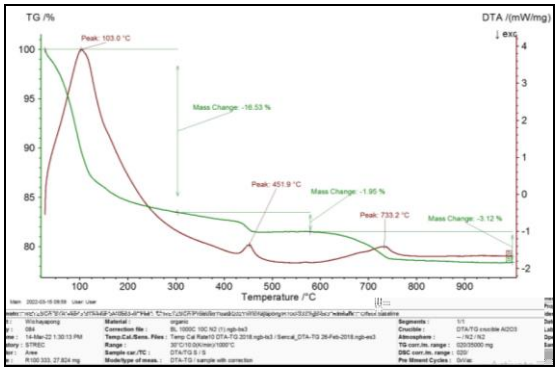
จากการศึกษาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ตามรูปที่ 11 ถึง รูปที่ 13 สรุปได้ว่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ด้วยกันดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นการเปลี่ยนถ่ายจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (C_2ASH_8) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) ที่อุณหภูมิ 105 ถึง 450 ℃ ส่วนที่ 2 เป็นการเปลี่ยนถ่ายจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อุณหภูมิ 450 ถึง 580 ℃ และส่วนที่ 3 เป็นการเปลี่ยนถ่ายจากแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่อุณหภูมิ 580 ถึง 1,000 ℃ และจากรูปที่ 12 สังเกตเห็นว่าจุดสูงสุดของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จะมีค่าต่ำลงมา เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของคอนกรีตมวลรวมที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมวลรวมตามธรรมชาติลดลง เพราะมีการแทนที่ด้วยส่วนผสมนาโนซิลิกา ทำให้มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Kroehong และคณะ [15] และ Chaipanich และคณะ [16]



รูปที่ 11 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตควบคุมที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-0)



รูปที่ 12 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกาและมวลรวมตามธรรมชาติ (R0-0-0-3)



รูปที่ 13 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกา แร่ใยธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิล (R100-3-3-3)

4. สรุปผลการทดลอง

4.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิกา ที่ทดแทนคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่สูงกว่า มีสาเหตุมาจากการที่ผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นได้เร็วที่สุด แต่ในส่วนของต้นทุนนั้น ส่วนผสมของนาโนซิลิกา จะมีค่าต้นทุนที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของแร่ใยธรรมชาติ (ใยป่านศรนารายณ์และใยปาล์มน้ำมัน) ที่ทดแทนมวลรวมละเอียด มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีส่วนผสมของมวลรวมตามธรรมชาติเป็นหลัก

4.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวม พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของแร่ใยธรรมชาติ ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีช่องว่างเกิดขึ้นมาก เป็นโพรงขนาดใหญ่ ส่งผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่รับกำลังได้น้อย ส่วนการศึกษาการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ของคอนกรีตจากการวัดการแพร่กระจายรังสีเอกซ์ (XRD) นั้น สามารถยืนยันผลความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย และสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครศรีธรรมราช ที่สนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Srichan, T., Chatveera, B., and Tangtermsirikul, S. (2011). A Study on Curing Sensitivity of Concrete with Different Cement Types and Mineral Admixtures. KMUTT Research and Development Journal, 34, pp.383-394.

[2] Kwan- Wai, H., Ramli, M., and Kam – Jhun, K. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. Construction and Building Materials, 26, pp.565-573.

[3] Kou, S.C., Poon, C.S., and Wan, H.W. (2012). Properties of concrete prepared with low grade recycled aggregates. Construction and Building Materials, 36, pp.881-889.

[4] Waijarean, N., and Asavapisit, S. (2019). Synthesis of Geopolymer From Water Treatment Residue and Palm Oil Fuel Ash. Journal of industrial technology, 15, pp.70-86.

[5] Haruehansapong, S., Pulngern, T., and Chucheepsakul, S. (2011). Compressive Strength and Microstructure of Cement Mortar with Nano-SiO2. Construction and Building Materials, 50, pp.471 -477.

[6] Somna, R., Jaturapitakkul, C., and Made, A.M. (2012). Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete Composite, 34, pp.848 -854.

[7] Tiwari, S. K., and Ghiya, A. (2013). Behavior of randomly oriented fiber reinforced fly ash. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 18, pp.3107- 3128.

[8] Abdi, M. R., and Mirzaeifar, H. (2016). Effects of Discrete Short Polypropylene Fibers on Behavior of Artificially Cemented Kaolinite. International Journal of Civil Engineering, 14, pp.253-262.

[9] Santhi, K. K., and Sayida, M. K. (2009). Behaviour of Black Cotton Soil Reinforced with Sisal fibre. 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09), Trivandrum, Kerala, India, 6-7 November 2009, pp.88-93.

[10] Pipathattakul, M,. Surin