

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ลักษณะวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์กับเส้นใยผลตาลโตนดใส่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการปรับปรุงผิวภายนอกด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

สุชาติ จันทรมณี^{1*} นันทชัย ชูศิลป์¹ ชาตรี หอมเขียว^{1,2} และ ดนุพล ตันนโยภาส³

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

^{1,2} 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

³ 15 ถนนกาญจนวนิชย์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

รับบทความ 6 กรกฎาคม 2563 แก้ไขบทความ 15 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์จากเส้นใยผลตาลโตนดและท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการปรับปรุงผิวภายนอกด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เส้นใยผลตาลโตนดบดละเอียด 270 เมช และท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ออกแบบการทดลอง 3 ระดับ คือ ไม่บ่ม บ่มในน้ำกลั่น 28 วัน และ 56 วัน แล้ววิเคราะห์สมบัติทางเคมี กายภาพ ทางกล วัฏภาคแร่ โครงสร้างจุลภาค และวิเคราะห์ทางสถิติของวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์ พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยผลตาลโตนดมีปริมาณซิลิคอนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ร้อยละ 51.53 อยู่ในชนิด C สำหรับค่าความหนาแน่นรวมบ่มน้ำกลั่น 56 วัน ระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) มีความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์บ่มน้ำกลั่น 56 วัน ของ PFA5OSWNT0.03 (F) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.14 ± 0.31 เมกกะโอห์มมิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงอัดวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่บ่มน้ำกลั่น 28 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดสูงสุดเฉลี่ย 25.45 ± 2.00 เมกกะปาสคาล มากกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 5 และการวิเคราะห์ทางสถิติค่าความหนาแน่นรวมระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นอกจากนี้ วัสดุซีเมนต์ผสมพบวัฏภาคแร่แคลไซต์ พอร์ตแลนด์ คิวตซ์ โดโลไมต์ และเอิร์ทรินไกต์ ทำให้ความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมพบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต พอร์ตแลนด์ และเอิร์ทรินไกต์ ดังนั้น เส้นใยผลตาลโตนดสามารถนำไปทำวัสดุพอลิเมอร์ของวัสดุซีเมนต์ผสมสำหรับงานซีเมนต์มวลเบาได้

คำสำคัญ : ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น; วัสดุผสมซีเมนต์; เส้นใยผลตาลโตนด; การชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4632 0709, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: suchart.c@rmutsv.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Characterization of Cement Paste Composites Blended with Palmyra Fiber Ash and Surface-treated on Short SWNT Prepared by an Electroless Plating Process

Suchart Chantaramanee^{1*} Nuntachai Chusilp¹ Chatree Homkhiew^{1, 2} and Danupon Tonnayopas³

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Materials Processing Technology Research Unit, Rajamangala University of Technology Srivijaya

³ Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

^{1, 2} 1 Ratchadamnoennok Rd. Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000

³ 15 Karnjanavanich Rd., Hat Yai, Songkhla 90112

Received 6 July 2020; Revised 15 November 2020; Accepted 25 December 2020

Abstract

This research was resulted of the characterization of cement paste composites (CPC) blended with palmyra fiber ash and surface-treated on short SWNT prepared by an electroless plating process. The cement paste composites included cement, 270 meshes of palmyra fiber ash and short SWNT. The design of experiment was divided into 3 conditions namely uncuring, 28 and 56 days in distilled water. The properties of CPC were carried out in chemical composition, physical, mechanical, mineral phase, microstructure and statistical analysis. It was found that in the chemical compositions an amount of silicon dioxide, aluminium oxide and ferric oxide were 51.53%, which was rated in class C. The bulk densities of CPC series between PFA10 (C) and PFA5AgSWNT0.01 (G) cured 56-day distilled water were an increased 38%. Then, the highest specific electrical resistivity of CPC series PFA5OSWNT0.03 (F) cured 56-day distilled water was 1.14 ± 0.31 mega-ohm.mm. The highest compressive strength of CPC series PFA5AgSWNT0.01 (G) cured at 28-day distilled water was 25.45 ± 2.00 MPa compared with the OPC (A) was an increased 5%. Which, the bulk densities of CPC series between PFA10 (C) and PFA5AgSWNT0.01 (G) were statistical analyzed the mostly cured at significant difference, $\alpha = 0.05$. In addition, CPC series PFA5AgSWNT0.01 (G) mainly contained calcite, portlandite, quartz dolomite and ettringite were caused increasing compressive strength. And the SEM microphotograph were also displayed the calcium silicate hydrate, portlandite and ettringite. Consequently, the PFA was used to ability pozzolanic material using for lightweight concrete of CPC.

Keywords : Short SWNT; Cement Paste Composites; Palmyra Fiber Ash; Electroless Plating

* *Corresponding Author. Tel.: +668 4632 0709, E-mail Address: suchart.c@rmutsv.ac.th*

1. บทนำ

ปูนซีเมนต์ (Cement) ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้างจนถึงปัจจุบัน ซึ่งประเทศไทยได้ผลิตปูนซีเมนต์เพื่อการส่งออกและใช้ภายในประเทศมีรายงานการผลิตปูนซีเมนต์โดยรวมในเดือนมกราคม ปีพุทธศักราช 2563 จำนวน 6.76 ล้านตัน ซึ่งได้มีการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดือนเดียวกันในปีที่ผ่านมาร้อยละ 1.21 [1] ซึ่งการผลิตและการจำหน่ายปูนซีเมนต์นั้นคาดว่าจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในปีถัดไป [2] ผลจากความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งทราบว่าปูนซีเมนต์มีส่วนผสมของออกไซด์ต่าง ๆ ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO₂) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide, Al₂O₃) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe₂O₃) [3] จากการค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยเราสามารถนำเอาจากการเผาเศษเหลือทิ้งจากผลิตผลทางการเกษตรใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ เช่น เถ้าชานอ้อย [4] เถ้าลอย [4], [5] เถ้าแกลบขาว [6], [7] เถ้าปาล์มน้ำมัน [8] และได้นำเอาเส้นใยผลตาลโดนด (Palmyra Fiber Ash, PFA) มาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยข้อมูลในปีพุทธศักราช 2560 ประเทศไทยมีเนื้อที่ปลูกตาลโดนดใน 7 จังหวัด รวมทั้งหมด 10,417 ไร่ ได้ผลผลิต 4,469 ตัน และผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 668 กิโลกรัม ในจังหวัดสงขลามีพื้นที่ปลูกมากที่สุด 8,246 ไร่ รองลงมาเป็นจังหวัดเพชรบุรี 1,214 ไร่ [9] มีส่วนผสมของออกไซด์หลักเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นของเหลือใช้จากภาคการเกษตรเพื่อลดการทำลายสิ่งแวดล้อมจากการผลิตปูนซีเมนต์ การเกิดมลภาวะจากเถ้า และสามารถนำของเหลือใช้มาสร้างมูลค่าเพิ่มด้วยการนำมาปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการความแข็งแรงอัด (Compressive Strength) สูง มีน้ำหนักเบา และนำไฟฟ้าที่ดี จึงได้มีแนวความคิดที่จะลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลรวม และเพิ่ม

สมบัติดังกล่าวที่ยังด้อยอยู่ โดยมีผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ประเด็นเหล่านี้ เช่น W. Saiwarin, C. Napia และ T. Sinsiri [10] ศึกษาสมบัติของกากก่อนหล่อแข็งตะกอนโรงชุบโลหะเต็มเก้าชานอ้อยโดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และเติมกากตะกอนโลหะร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ของวัสดุประสาน พบว่า ความแข็งแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อเติมกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ก่อนหล่อแข็งที่นำแทนที่ปูนซีเมนต์เต็มเก้าชานอ้อยร้อยละ 20 มีค่าความแข็งแรงอัดมากกว่าร้อยละ 10 และ 30 ต่อมา W. Kroehong และคณะ [11] ศึกษาสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และการนำความร้อน ของคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำเท่ากับ 0.70, 0.80 และ 0.90 ต่อวัสดุประสาน พบว่า คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 มีความแข็งแรงอัดต่ำ การดูดซึมน้ำ (Water Absorption, D) และความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำเมื่อผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกควบคุม และต่อมา P. Kejaroen และ S. Sethabouppha [12] ศึกษาความเหมาะสมการเติมเถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมในคอนกรีต พบว่า ความหนาแน่น ความแข็งแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 766 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และ 0.194 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ สมบัติต่าง ๆ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสามารถประยุกต์นำไปใช้งานได้

นอกจากนี้ได้มีการปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์เพสต์ โดยเติมตัวเสริมแรง (Reinforcement) เช่น ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes) [13], [7] ซึ่งเป็นวัสดุหนึ่งที่โดดเด่นมากด้านความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา แต่ด้วยคุณลักษณะผิวของท่อนาโนคาร์บอนมีปฏิกิริยาทางเคมีต่ำ (Low Chemical Reactivity) กับเนื้อพื้น (Matrix) ของวัสดุ [14] จึงต้องปรับปรุงผิวให้มี

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีก่อนโดยการนำสารละลายและอะตอมของโลหะทำปฏิกิริยากับผิวท่อนาโนคาร์บอน ดังเช่น Y. Hu และคณะ [15] ศึกษาความแข็งแรงอัดและกำลังตัดโดยเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWCNTs และ MWCNTs-COOH ผสมลงในซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 0.1 โดยน้ำหนัก พบว่า กำลังตัดมีค่าเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเติม MWCNTs สำหรับโครงสร้างจุลภาค สังเกตเห็นรูพรุนในโครงสร้างมีขนาดลดลงอยู่ระหว่าง 25 ไมครอน ถึง 50 ไมครอน เมื่อเติมด้วยท่อนาโนคาร์บอนทั้ง MWCNTs และ MWCNTs-COOH นอกจากนี้ สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWCNTs ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.1 บ่มที่ 7 วัน และ 28 วัน ค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 และ 15 ตามลำดับ ต่อมา M. Elkashef, K. Wang และ M. N. Abou-Zeid [16] ได้ปรับปรุงผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยสารละลายของกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 100 นาที และ 180 นาที พบว่า ผิวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นมีนัยสำคัญต่อการปรับปรุงค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับปรุงผิวด้วยสารละลายดังกล่าว ในปีถัดมา K. M. Liew, M. F. Kai และ L. W. Zhang [17] ศึกษาการนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น MWCNT-OH เติมลงในซีเมนต์ พบว่า ค่าความแข็งแรงอัดและความแข็งแรงต่อการโค้งงอมีค่าร้อยละ 17.3 และ 16.3 ตามลำดับ ต่อมา S. Chantaramanee และคณะ [7] ศึกษาสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์ผลิตจากเถ้าแกลบขาวผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น พบว่า ความแข็งแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบขาวร้อยละ 10 เติมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นร้อยละ 0.20 และบ่ม 28 วัน มีค่าสูงสุด คือ 36.45 เมกะปาสคาล ต่อมา M. A. Mousavi และ A. Bahari [18] ศึกษาการเติมท่อ

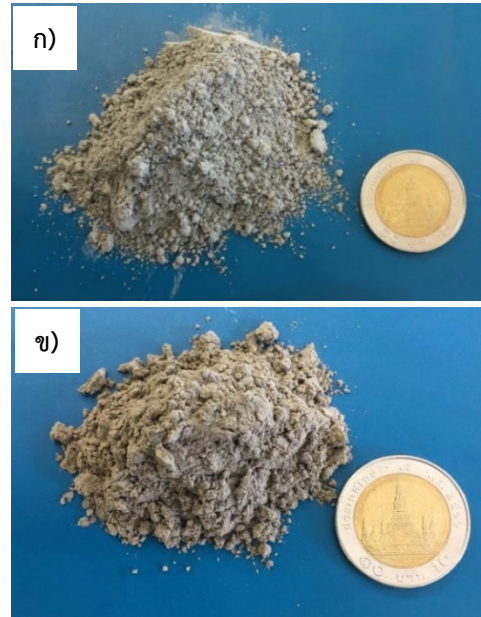
นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น MWCNT-COOHs ร้อยละ 0, 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.2 ลงในปูนซีเมนต์เพสต์วิเคราะห์สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค พบว่า การแทนที่ของ MWCNT-COOHs ร้อยละ 0.05 ดีที่สุด สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคมีการปรับปรุงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ควบคุม ต่อมา R. Kaur, N. C. Kothiyal และ H. Arora [19] ศึกษาวัสดุซีเมนต์ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอนผ่านการปรับปรุงผิว (Functionalized Carbon Nanotubes, FCNT), แกรฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) และ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ผสมในซีเมนต์ผสมอัตราส่วน 30:70 แล้ววิเคราะห์สมบัติทางกล พบว่า เมื่อเติม GO ร้อยละ 0.02 และ FCNT ร้อยละ 0.02 ความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 35.6 และร้อยละ 24.5 ตามลำดับ และยังพบว่า ความแข็งแรงดึงแยกเมื่อเติม FCNT, GO และ ไฮบริดท่อนาโนคาร์บอน (Hybrid Carbon Nanomaterials, HCNs) มีค่าร้อยละ 16.0, 53.6 และ 74.0 ตามลำดับ ทั้งความแข็งแรงอัดและความแข็งแรงดึงแยกสูงสุดที่ตัวอย่าง mHCN-FCNT เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์จากเถ้าเส้นใยผลตาลโตนดและท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการปรับปรุงผิวภายนอกด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีความต้องการนำไปพัฒนาต่อเป็นวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์สู่การประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างที่มีความแข็งแรงอัดสูง มีน้ำหนักเบา และสามารถนำไฟฟ้าได้ สิ่งที่สำคัญที่สุดใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุใช้แทนที่ซีเมนต์ จากสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตรและสามารถช่วยประหยัดพลังงานจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland

Cement Type 1, OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150 [20] และมาตรฐานอุตสาหกรรม 15 เล่ม 1-2555 ประเภท 1 [21] ดังแสดงในรูปที่ 1 ก) เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ เถ้าเส้นใยผลตาลโตนดซึ่งเป็นเศษของเหลือใช้จากผลผลิตผลทางการเกษตรในพื้นที่อำเภอสังขละ จังหวัดสงขลา โดยการเลือกเฉพาะเส้นใยผลตาลโตนดแห้งมาเผาไหม้สมบูรณ์ ได้เถ้าเส้นใยผลตาลโตนดมีลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งรวมกันทั้งผงละเอียดและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย แล้วนำมาบดลดขนาดด้วยหม้อบดขนาดเล็ก รุ่น Planetary Mono Mill PULVERISETTE 6 Classic Line ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 270 เมช ได้ผงละเอียดขนาด 53 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ข) แล้วนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น Zetium ดังแสดงในตารางที่ 1 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น (Short Single-Walled Carbon Nanotubes, Short SWNT) จัดซื้อจาก Chengdu Organic Chemicals Company Limited, China Academy of Sciences ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน รหัสผลิตภัณฑ์ SS1240 มีความบริสุทธิ์ของธาตุคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 90 มีลักษณะทอกลวงเป็นเส้นโค้งและมัดรวมกัน ความยาวของท่อระหว่าง 0.5 ไมโครเมตร ถึง 2.0 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อระหว่าง 1.0 นาโนเมตร ถึง 2.0 นาโนเมตร มีรายละเอียดข้อมูลจำเพาะวัสดุดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) พบว่า ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน อะลูมิเนียม คลอรีน โคบอลต์ และซิลเฟอร์ ปริมาณร้อยละ 96.30, 0.08, 0.41, 2.91 และ 2.09 ตามลำดับ [22] และน้ำกลั่น (Distilled Water) ใช้ในการหล่อตัวอย่างวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 1 ก) ปูนซีเมนต์ ข) เถ้าเส้นใยผลตาลโตนด

2.2 การปรับปรุงผิวท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นสภาวะผิวของท่อนาโนคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ทับเนื้อพื้นของวัสดุจึงจำเป็นต้องนำมาปรับปรุงผิวภายนอกเพื่อให้ผิวสามารถทำปฏิกิริยาดีขึ้นด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless Plating) มีขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าเส้นใยผลตาลโตนดและปูนซีเมนต์ด้วยวิธี XRF

Chemical Composition	Content, wt%	
	PFA	OPC [23]
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	40.25	21.20
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	7.82	1.04
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.46	5.22
ฟอสฟอรัสไดออกไซด์ (P ₂ O ₅)	5.21	0.00
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	19.08	0.42
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	2.89	64.73
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.12	0.00
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	1.87	2.44
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	4.27	3.08
น้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI)	6.33	1.45

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของ Short SWNTs 90s [22]

Specifications	Values
SWNTs Outer Diameter	1.0-2.0 nm
SWNTs Inside Diameter	0.8-1.6 nm
SWNTs Ash	<1.5 wt%
SWNTs Purity	>90 wt%
Additional MWNTs Content	>5 wt%
Amorphous Carbon Content	<3 wt%
SWNTs Length	0.5-2.0 μm
SWNTs Specific Surface Area	407 m^2/g
SWNTs Electrical Conductivity	> 10^{-2} S/cm

เริ่มขั้นตอนแรกโดยการ Pre-treatment ท่อนานโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการสะสมไอทางเคมีผนังเย็น (Cold Wall Chemical Vapor Deposition, CCVD) มา แ ซ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร โดยกวนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองแล้วทำให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อมาทำการออกซิเดชัน (Oxidation) นำท่อนานโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการเตรียมผิวเบื้องต้น Pre-treatment แล้วต้มในสารละลาย HNO_3 และ H_2SO_4 ในอัตราส่วน 3:1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองแล้วปล่อยให้แห้งในบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง ต่อมาทำการ Sensitization นำท่อนานโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการออกซิเดชัน แล้วแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.1M SnCl_2 กับ 0.1M HCl (เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ก่อนการนำมาใช้งาน) กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองแล้วทำให้แห้งในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ต่อมาทำการกระตุ้นผิว (Activation) ของท่อนานโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการ Sensitization แล้วแช่ในสารละลายความเข้มข้น

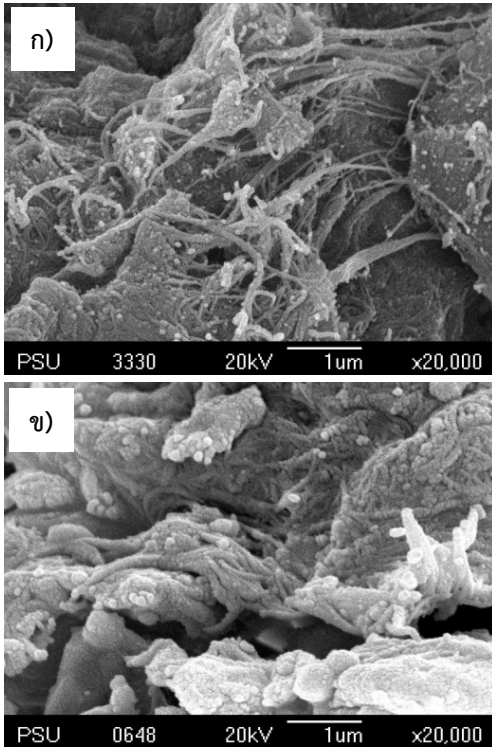
ตารางที่ 3 ส่วนผสมของสารเคมีและสภาวะของการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า [14]

Chemical	Concentration
AgNO_3	10.0 kg/m^3
$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.5 (vol%)
HCHO (added later)	3.0 (vol%)
pH : 8.5 \pm 0.5;	
Temperature : 20 $^\circ\text{C}$	

ระหว่าง 0.0014M PdCl_2 กับ 0.25M HCl กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองแล้วทำให้แห้งในอากาศที่อุณหภูมิห้อง และขั้นตอนสุดท้ายทำการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3

กระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้าโดยการนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ในปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เติมด้วยสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ปริมาตรร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก แล้วนำท่อนานโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการกระตุ้นผิวแล้ว เติมลงไปกวนด้วยเครื่องกวนกับแท่งแม่เหล็กกวนสารแล้วเติมสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (HCHO) ปริมาตรร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนัก กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองทำให้แห้งในอากาศที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการกวนด้วยเครื่องกวนกับแท่งแม่เหล็กกวนสารและกรองด้วยแผ่นกรองเมมเบรนชนิดไนลอนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะสุญญากาศ นำวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Model JSM-5800LV แสดงดังในรูปที่ 2 และวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบบกระจายพลังงาน (EDS) รูปที่ 2 ก) ท่อนานโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการออกซิเดชัน ประกอบด้วยธาตุ C, O, Si, S, Cl, Cr, Fe, Co, Cu และ Zn ซึ่งมีธาตุหลักคือ

C นอกนั้นเป็นธาตุเจือปนของวัสดุฐานจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน และรูปที่ 2 ข) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้าได้อนุภาคเงิน AgSWNT ที่ผิวโดยประกอบด้วยธาตุหลักคือ Ag และ C [24]



รูปที่ 2 ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ก) ผ่านการออกซิเดชัน ข) ผ่านการชุบผิวด้วยอนุภาคเงิน

2.3 การเตรียมตัวอย่างและอัตราส่วนผสม

ตัวอย่างในการวิจัยนี้ได้เตรียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมเส้นใยผลตาลโตนดในปริมาณ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และเติมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น 2 ชนิด คือ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการออกซิเดชันปริมาณร้อยละ 0.01 (OSWNT0.01) และ 0.03 (OSWNT0.03) ตามลำดับ และท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการชุบ

ผิวด้วยอนุภาคเงินโดยไม่ใช้ไฟฟ้าปริมาณร้อยละ 0.01 (AgSWNT0.01) และ 0.03 (AgSWNT0.03) ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำกลั่นต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 คงที่ตลอดการวิจัย ซึ่งการกำหนดสัญลักษณ์และอัตราส่วนของตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4 และโดยเฉพะอย่างยิ่ง ได้เลือกใช้สูตรเส้นใยผลตาลโตนดที่ปริมาณร้อยละ 5 (สูตร E, F, G และ H ใช้ PFA 5%) เนื่องจากปริมาณของเส้นใยเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนและช่องว่างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่าง ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง [7], [11]

ตารางที่ 4 สัญลักษณ์และส่วนผสมของตัวอย่างงานวิจัย

Code	OPC	PFA	SWNT
OPC (A)	100.00	-	-
PFA5 (B)	95.00	5.00	-
PFA10 (C)	90.00	10.00	-
PFA15 (D)	85.00	15.00	-
PFA5OSWNT0.01 (E)	94.99	5.00	0.01
PFA5OSWNT0.03 (F)	94.97	5.00	0.03
PFA5AgSWNT0.01 (G)	94.99	5.00	0.01
PFA5AgSWNT0.03 (H)	94.97	5.00	0.03

ในขั้นตอนการหล่อชิ้นตัวอย่างโดยชั่งน้ำหนักวัสดุหลักและน้ำกลั่นตามปริมาณของอัตราส่วนที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4 เริ่มจากการนำน้ำกลั่นเทลงในบีกเกอร์ เติमत่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า เติมเส้นใยผลตาลโตนดและเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามลำดับ ในขั้นตอนการเติมวัสดุแต่ละชนิดใช้ถังแก้วคนให้ส่วนผสมกระจายตัวเข้ากันก่อนเบื้องต้นแล้วกววมผสมด้วยคลื่นเหนือเสียงอีกครั้งโดยใช้พลังงานช่วงกว้างของคลื่นร้อยละ 60 เวลาที่ใช้ในการผสมสั้นด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 3 นาที ด้วยเครื่องผสมชนิดใช้ถังกระจายคลื่น (Probe-Type Ultrasonic Processor) ยี่ห้อ Sonics Model VC 750 เพื่อให้ส่วนผสมกระจายตัวละเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด เมื่อวัสดุผสมซีเมนต์

เรียบร้อยแล้วนำเทใส่ลงในแบบหล่อรูปทรงกระบอกที่ทำด้วยพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ขนาดความสูง 32 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ($L/D = 2.0$) ตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M [25] ซึ่งภายในแบบหล่อทาเคลือบผิวด้วยวาสลีนเพื่อป้องกันการติดกันระหว่างชิ้นตัวอย่างกับแบบหล่อ เมื่อเทลงในแบบหล่อเรียบร้อยท่อหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกชนิดบางที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ตัวอย่างที่ไม่บ่ม บ่มในน้ำกลั่นอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน และ 56 วัน ได้ใช้ตัวอย่างในการทดสอบสมบัติของวัสดุแต่ละสมบัติเป็นจำนวน 5 ตัวอย่าง (จำนวน 4 ซ้ำ) มีชิ้นตัวอย่างกลุ่มละ 40 ตัวอย่าง โดยรวมตัวอย่างจำนวนทั้งหมด 120 ตัวอย่าง และเมื่อครบเวลากำหนด นำตัวอย่างดังกล่าววิเคราะห์สมบัติทางเคมี ภายภาพทางกล ทั้งแบบไม่ทำลายและทำลายตามที่จัดเตรียมไว้ในวิธีการทดลอง

2.4 วิธีการทดลอง

ตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง แก๊สไนโตรเจนผลตาลโตนดด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สำหรับตัวอย่างไม่บ่ม ที่บ่มน้ำกลั่นครบกำหนด 28 วัน และ 56 วัน ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density, ρ) และการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C642 [26] ทดสอบความเร็วคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) เพื่อวัดความสมบูรณ์หรือความต่อเนื่องของวัสดุใช้ตรวจสอบจุดบกพร่อง เช่น ช่องว่าง รูพรุน หรือความเสียหายภายในชิ้นตัวอย่าง โดยวัดจากความเร็วของคลื่นเหนือเสียงระหว่างหัวส่งสัญญาณและหัวรับสัญญาณ เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย สามารถนำใช้งานในการตรวจสอบชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงอัดสูง ทดสอบด้วยเครื่อง Proceq Pundit Lab+UPV Instrument Model:CT-133 ตามมาตรฐาน ASTM C597 [27]

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Resistivity, $\rho_{\text{จำเพาะ}}$) สำหรับสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรงอัด (Compressive Strength, σ_c) ตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M [25] และความแข็งแรงดึงแยกโดยวิธีผ่าซีก (Splitting Tensile Strength, σ_T) ตามมาตรฐาน ASTM C496 [28] โดยสรุปเปรียบเทียบผลสมบัติต่าง ๆ ของทุกสูตรที่ทำการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 5 และนำผลการทดลองจากจำนวน 5 ตัวอย่างต่อสูตรที่สนใจวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-sample t-test ว่ามีนัยสำคัญต่อสมบัติที่ศึกษาของวัสดุผสมซีเมนต์หรือไม่ นอกจากนี้ นำวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์วัฏภาคแร่ (Mineral Phases) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีความแข็งแรงอัดสูงสุดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยผลตาลโตนดของอำเภอสังขละบุรี จังหวัดสงขลาด้วยวิธีการร้าวแสงรังสีเอกซ์ (XRF) แบบกึ่งปริมาณ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า มีปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ ร้อยละ 40.25 อะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 7.82 และเพอร์ริกออกไซด์ร้อยละ 3.46 รวมกันเท่ากับร้อยละ 51.53 โดยน้ำหนัก น้ำหนักสูญหายหลังเผาร้อยละ 6.33 ซึ่งมีผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเพอร์ริกออกไซด์ รวมกันมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C618 [29] ดังนั้นเส้นใยผลตาลโตนดที่นำมาใช้แทนปูนซีเมนต์มีสมบัติเทียบเคียงได้กับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ชนิด C ซึ่งมีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 50.2-58.6 ของเถ้าปาล์ม น้ำมัน [8], [30] และมีค่าปอซโซลานต่ำกว่างานวิจัยเถ้าแกลบ [8] คาดว่าสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานผสมกับปูนซีเมนต์ได้

3.2 ความหนาแน่นรวม

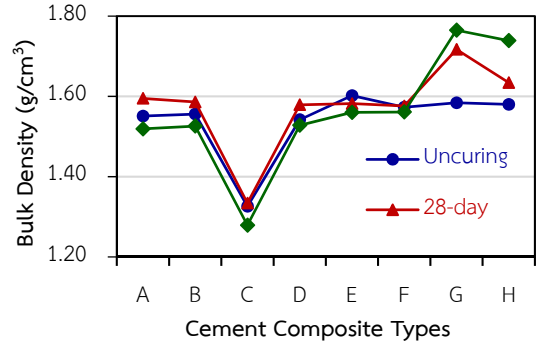
ในบรรดาความหนาแน่นรวมของตัวอย่างทั้งหมด พบว่าสูตร PFA10 (C) มีความหนาแน่นรวมต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3 และตัวอย่างสูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) มีแนวโน้มความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตร C กับ G ที่บ่ม 56 วัน มีค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 ซึ่งค่าความหนาแน่นรวมของสูตร G มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากเส้นใยผลตาลโตนดมีปริมาณต่ำและท่อนาโนคาร์บอนได้แทรกตัวเข้าแทนที่ในช่องว่าง (Voids) และรูพรุนขนาดเล็ก (Microvoids) สอดคล้องกับงานวิจัย G. Y. Li, P. M. Wang และ X. Zhao [31] ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยเกิดจากช่องว่างของซีเมนต์ลดลง ทำให้ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดลดลงด้วย

3.3 การดูดซึมน้ำ

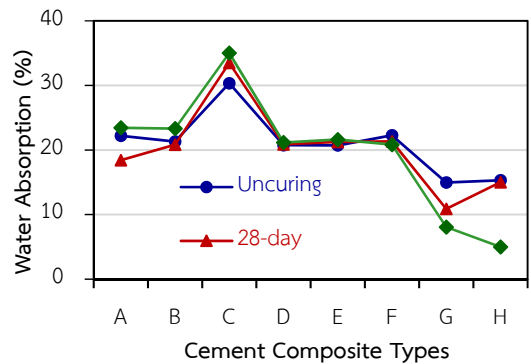
ผลการดูดซึมน้ำของวัสดุซีเมนต์ผสมดังแสดงในรูปที่ 4 มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ตัวอย่างสูตร PFA10 (C) ทั้งสามอายุบ่ม มีค่าเท่ากับร้อยละ 30.34 ± 2.87 , 33.48 ± 1.81 และ 35.01 ± 0.96 ตามลำดับ ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นรวมอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 3)

3.4 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

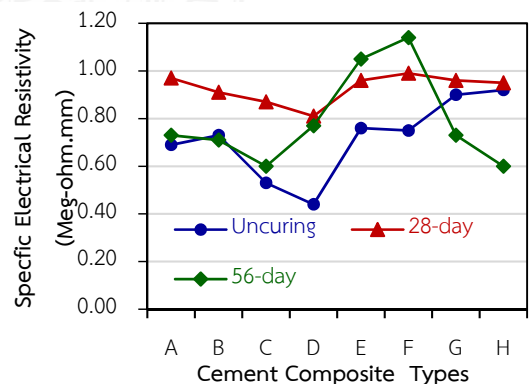
ตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกันของสูตรผสมเส้นใยผลตาลโตนด พบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใ้นั้นมากขึ้นทำให้แนวโน้มความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะลดลง เช่นตัวอย่างของสูตร C ไม่บ่ม และยังพบว่า การใส่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นช่วยให้ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมากขึ้น เช่นตัวอย่างสูตร PFA5OSWNT0.03 (F) บ่ม 56 วัน มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 1.14 ± 0.31 เมกกะโอห์ม มิลลิเมตร



รูปที่ 3 ความหนาแน่นรวมของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 4 การดูดซึมน้ำของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 5 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน

3.5 ความเร็วคลื่นเหนือเสียง

ความเร็วคลื่นเหนือเสียงของวัสดุซีเมนต์ผสมสูตร PFA5OSWNT0.01 (E) ที่อายุบ่มเพิ่มขึ้นมีค่า 3,170±84.90, 3,232±0.00 และ 3,170±84.90 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 และบรรดาตัวอย่างที่ใส่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น (E, F, G, H) มีส่วนช่วยให้ความเร็วคลื่นเหนือเสียงค่อนข้างสูงขึ้น แนวโน้มสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 3) แต่ค่อนข้างแปรผกผันกับปริมาณเถ้าเส้นใยผลตาลโดนดเพิ่มขึ้น

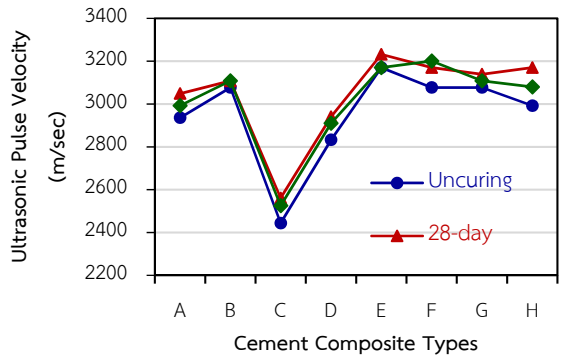
3.6 ความแข็งแรงอัด

ความแข็งแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมสูตร B ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด 28.61±3.67 เมกกะปาสคาล สอดคล้องกับมาตรฐาน [21] อาทิเช่น ตัวอย่างสูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) มีค่าความแข็งแรงอัด 25.45±2.00 เมกกะปาสคาล ขณะที่ตัวอย่างควบคุม (A) ได้ 19.57±7.36 เมกกะปาสคาล มีค่ามากกว่าร้อยละ 5 และยังพบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเหนือเสียงพบว่า ค่าความแข็งแรงอัดของตัวอย่างทุกสูตรที่บ่ม 28 วัน ยังให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าเกือบทุกสูตร ยกเว้นสูตร E และ F (รูปที่ 7) สันนิษฐานว่าจากทิศทางการเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่เติมเข้าไปแบบไม่จัดเรียงแนว

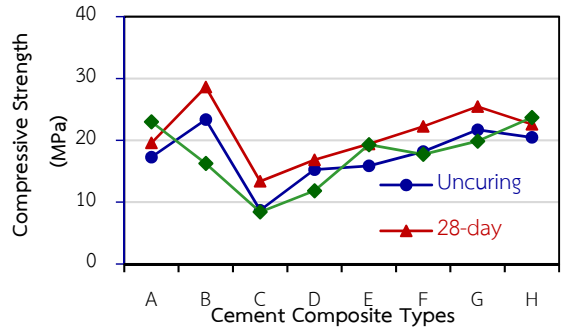
3.7 ความแข็งแรงดึงแยก

ความแข็งแรงดึงแยกที่ไม่บ่ม (รูปที่ 8) ของตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสมทุกสูตร (A-H) มีค่าเท่ากับ 1.42±0.00, 2.87±1.16, 1.11±0.00, 2.32±0.03, 2.20±0.59, 2.07±0.22, 2.47±0.47 และ 2.55±0.14 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงแยกสูงสุดของตัวอย่างควบคุม (A) บ่ม 28 วัน มีค่า 4.18±0.33 เมกกะปาสคาล

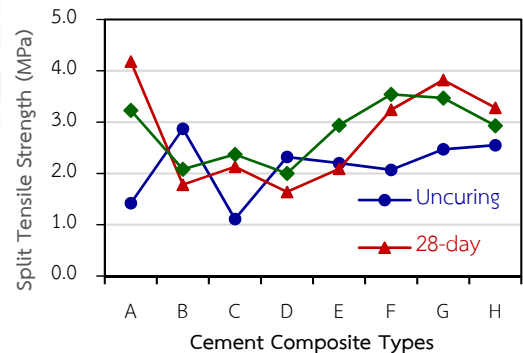
นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงแยกแนวโน้มแปรผันตามอายุบ่ม บางสูตรต่างออกไปน่าจะผลจากเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนไปรบกวนการพัฒนากำลัง อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึงแยกได้แปรผกผันกับค่าความแข็งแรงอัดอย่างชัดเจนโดยเฉพาะตัวอย่างที่ได้ผ่านการบ่ม (รูปที่ 7)



รูปที่ 6 ความเร็วคลื่นเหนือเสียงของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน



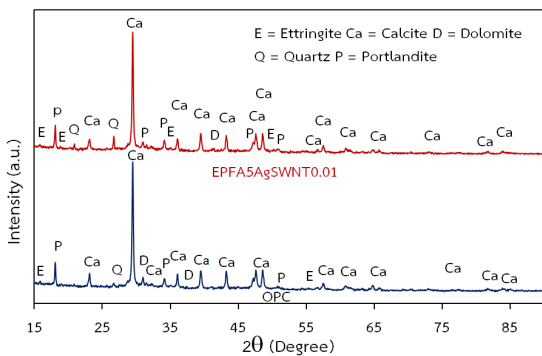
รูปที่ 7 ความแข็งแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 8 ความแข็งแรงดึงแยกของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน

ตารางที่ 5 สรุปเปรียบเทียบผลสมบัติต่าง ๆ ของแต่ละสูตรที่ทำกรวิจัย

Code	Curing (Day)	ρ (g/cm ³)	D (%)	ρ (เฉพาะ) (mega-ohm.mm)	UPV (m/sec)	σ_c (MPa)	σ_T (MPa)
(A)	0	1.55±0.0	22.20±0.33	0.69±0.10	2936.00±0.00	17.27±3.67	1.42±0.00
	28	1.60±0.04	18.41±2.02	0.97±0.17	3048.80±63.06	19.57±7.36	4.18±0.33
	56	1.52±0.01	23.44±0.57	0.73±0.06	2992.40±77.23	23.00±1.80	3.23±0.59
(B)	0	1.56±0.04	21.31±0.51	0.73±0.09	3077.00±0.00	23.35±2.59	2.87±1.16
	28	1.56±0.02	20.81±0.67	0.91±0.38	3108.00±69.32	28.61±3.67	1.78±0.04
	56	1.53±0.04	23.32±2.93	0.71±0.12	3108.00±69.32	16.26±6.37	2.08±0.61
(C)	0	1.33±0.03	30.34±2.87	0.53±0.20	2443.80±50.94	8.69±2.43	1.11±0.00
	28	1.33±0.04	33.48±1.81	0.87±0.29	2561.00±44.72	13.36±1.88	2.13±0.73
	56	1.28±0.02	35.01±0.96	0.60±0.14	2525.40±132.95	8.41±0.61	2.37±0.07
(D)	0	1.55±0.02	20.76±1.31	0.44±0.10	2832.80±57.69	15.26±0.72	2.32±0.03
	28	1.58±0.03	20.87±1.11	0.81±0.21	2940.80±135.03	16.84±1.88	1.64±1.17
	56	1.53±0.02	21.17±0.89	0.77±0.06	2910.20±57.69	11.84±3.38	2.00±0.02
(E)	0	1.60±0.01	20.72±0.44	0.76±0.16	3170.00±84.90	15.86±1.71	2.20±0.59
	28	1.58±0.01	21.25±0.38	0.96±0.17	3232.00±0.00	19.40±2.84	2.09±0.75
	56	1.56±0.01	21.62±0.41	1.05±0.16	3170.00±84.90	19.30±1.72	2.94±0.42
(F)	0	1.57±0.01	22.28±0.41	0.75±0.10	3077.00±0.00	18.18±3.50	2.07±0.22
	28	1.58±0.01	21.34±0.17	0.99±0.24	3170.00±84.90	22.24±1.55	3.24±0.77
	56	1.56±0.02	20.82±0.27	1.14±0.31	3201.00±69.32	17.73±5.68	3.54±0.24
(G)	0	1.58±0.01	14.96±4.53	0.90±0.28	3077.00±0.00	21.70±2.25	2.47±0.47
	28	1.72±0.07	10.88±4.80	0.96±0.14	3139.00±84.90	25.45±2.00	3.82±0.69
	56	1.77±0.05	8.06±2.71	0.73±0.32	3108.00±69.32	19.86±3.34	3.47±1.47
(H)	0	1.58±0.01	15.32±4.58	0.92±0.27	2992.40±77.23	20.47±5.56	2.55±0.14
	28	1.63±0.06	15.01±5.20	0.95±0.38	3170.00±84.90	22.58±0.46	3.28±0.58
	56	1.74±0.08	5.00±5.75	0.60±0.16	3079.80±104.72	23.69±1.23	2.93±0.09



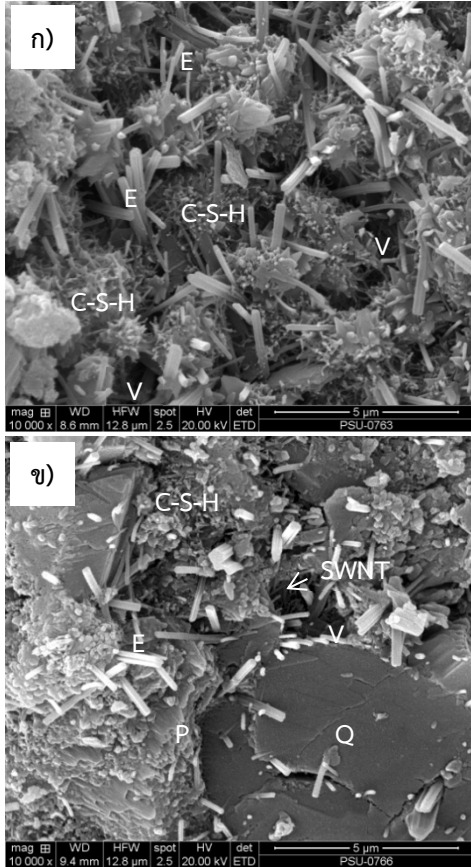
รูปที่ 9 กราฟแผนภาพ XRD ซ้อนกันของวัสดุซีเมนต์ควบคุมห่วงกับวัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใยผลตาลโตนดเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น

3.8 วิเคราะห์สารประกอบ

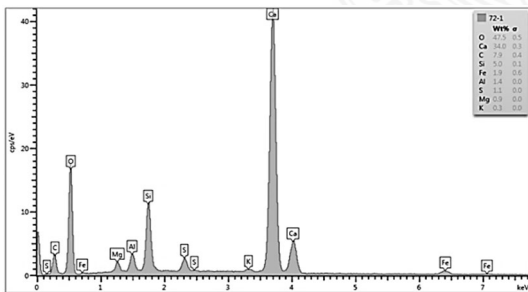
ตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ควบคุมห่วง สูตร A กับตัวอย่างที่มีค่าความแข็งแรงอัดตีที่สุดคือ สูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการในตัวอย่างด้วยวิธี XRD ดังแสดงในรูปที่ 9

ผลการวิเคราะห์พบแร่ ได้แก่ แคลไซต์ (Calcite, Ca(CO₃), พอร์ตแลนด์ (Portlandite, Ca(OH)₂), ควอตซ์ (Quartz, SiO₂), โดโลไมต์ (Dolomite, CaMg(CO₃)₂) และเอตทริงไกต์ (Ettringite, Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂-26H₂O) ซึ่งปริมาณแร่แต่ละชนิดเหล่านี้ในตัวอย่างสูตร G มีมากกว่าในตัวอย่างควบคุมห่วง

(สูตร A) เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานของปูนซีเมนต์กับเส้นใยผลตาลโตนดมีพฤติกรรมในทำนองวัสดุปอซโซลานที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 [29]



รูปที่ 10 ภาพถ่าย SEM ของ ก) วัสดุซีเมนต์ควมคุม (A) และ ข) วัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใยผลตาลโตนดเสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น (G)



รูปที่ 11 กราฟ EDS ของวัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใยผลตาลโตนดเสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น (G)

3.9 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ผลของภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมด้วยเทคนิค SEM พบว่า โครงสร้างจุลภาคตัวอย่างควมคุม (รูปที่ 10 ก) มีปริมาณช่องว่าง (V) ในโครงสร้างมากกว่าในตัวอย่างสูตร G ที่ผสมเส้นใยผลตาลโตนดและแท่งท่อนาโนคาร์บอนกระจายในเนื้อพื้นรูปที่ 10 ข) และผลวิเคราะห์ EDS ยืนยันว่ามีธาตุประกอบด้วย O, Ca, C, Si, Fe, Al, S, Mg และ K ดังแสดงในรูปที่ 11 ผลสืบเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดวัฏภาคแร่เอตทรินไกต์ (E) ดังรูปที่ 10 (ก) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมลดลง (รูปที่ 3) และค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4) และจากผลวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM พบลักษณะวัฏภาคสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) พอร์ตแลนด์และควอตซ์ (รูปที่ 10 ข) ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอัดอย่างยิ่ง ขณะที่การเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นแบบไม่จัดเรียงแถว (Random) ได้ส่งผลกระทบต่อสมบัติหลายประการ เช่น การนำไฟฟ้าจำเพาะ ความเร็วคลื่นเหนือเสียง และความแข็งแรงอัด

3.10 การวิเคราะห์ด้วยสถิติ

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างสูตรที่มีค่าสูงสุดด้วยสถิติ Two-sample t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) โดยวิเคราะห์สมบัติสำคัญ เช่น ความหนาแน่นรวม ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ และความแข็งแรงอัด ดังนั้น ในตารางที่ 6 พบว่าค่าความหนาแน่นรวมระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า P-value น้อยกว่า 0.05 สำหรับค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5OSWNT0.03 (F) มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ยกเว้นที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมี

ค่า *P*-value น้อยกว่า 0.05 และค่าความแข็งแรงอัดระหว่าง OPC (A) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ *P*-value มากกว่า 0.05

ตารางที่ 6 ค่าสถิติ Two-sample t-test ของสมบัติซีเมนต์ผสม

Code	ρ (g/cm ³)		
	ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ		
	0	28	56
PFA10 (C)	1.33a	1.33a	1.28a
PFA5AgSWNT0.01(G)	1.58b	1.72b	1.77b
<i>P</i> -value	0.000*	0.000*	0.000*

Code	ρ (จำเพาะ) (mega-ohm.mm)		
	ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ		
	0	28	56
PFA10 (C)	0.53a	0.87a	0.60a
PFA5OSWNT0.03(F)	0.75a	0.99a	1.14b
<i>P</i> -value	0.079	0.499	0.016*

Code	σ_c (MPa)		
	ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ		
	0	28	56
OPC (A)	17.27a	19.57a	23.00a
PFA5AgSWNT0.01(G)	21.70a	25.45a	19.86a
<i>P</i> -value	0.061	0.160	0.114

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และสำหรับสัญลักษณ์ a, b หากในสดมภ์เดียวกันมีสัญลักษณ์เหมือนกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4. สรุป

ถ้าเส้นใยผลตาลโตนดมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิโคนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ร้อยละ 51.53 เทียบเคียงกับวัสดุพอลิโพรพิลีนคุณภาพในระดับ C ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำของวัสดุซีเมนต์ผสม ไม่บ่ม บ่มน้ำกลั่น 28 วัน และ 56 วัน ของสูตร PFA10 (C) มีความหนาแน่นรวมต่ำกว่าค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุซีเมนต์ผสมของสูตรอื่น ๆ และแปรผกผันกับค่าการดูดซึมน้ำของ

PFA10 (C) เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ค่าความหนาแน่นรวมมีผลสอดคล้องกับความแข็งแรงอัดต่ำกว่าสูตรอื่น ๆ ด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีวัสดุซีเมนต์ผสมของสูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่บ่มในน้ำกลั่น 28 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด 25.45±2.00 เมกกะปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงอัด OPC (A) มีค่าเท่ากับ 19.57±7.36 เมกกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 ความเร็วคลื่นเหนือเสียงของวัสดุซีเมนต์ผสมของสูตรที่เติมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ในทุกเงื่อนไขการบ่มทั้งหมด มีค่าความเร็วคลื่นเหนือเสียงมากกว่าตัวอย่างควบคุม OPC (A) ที่บ่ม 28 วัน โดยตัวอย่างสูตร PFA5OSWNT0.01 (E) มีค่าความเร็วคลื่นเสียงสูงสุดเท่ากับ 3,232.00±0.00 เมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเหนือเสียงของ OPC (A) ซึ่งมีค่า 3,048.80±63.06 เมตรต่อวินาที ได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.8 สอดคล้องกับความหนาแน่นรวมในสูตรเดียวกัน ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุซีเมนต์ผสม ที่บ่มน้ำกลั่น 56 วัน ของสูตร PFA5OSWNT0.03 (F) มีความสามารถในความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 1.14±0.31 เมกกะโอห์มมิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมมีการเกิดช่องว่างมากขึ้นในโครงสร้างจุลภาค การบ่มทำให้ค่าความหนาแน่นรวมและค่าการดูดซึมน้ำส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอัดและความแข็งแรงดึงแยกเป็นอย่างมาก สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความหนาแน่นรวมระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า *P*-value น้อยกว่า 0.05 และด้วยวัสดุซีเมนต์ผสมสูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) พบวัฏภาคแร่ แคลไซต์ พอร์ตแลนด์ คิวตซ์ โดโลไมต์ เอ็ดทรินไกต์ ในโครงสร้างจุลภาคพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และเอ็ดทรินไกต์ ซึ่งมีบทบาทอย่างมากสำหรับความแข็งแรงอัดในเนื้อวัสดุซีเมนต์ผสมและเหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์มวลเบาได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ และหน่วยวิจัยการป้องกันและควบคุมภัยพิบัติธรรมชาติ เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้าน โลหะและวิศวกรรมวัสดุ และหน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและ นวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์และ สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ สถานที่ในการดำเนินการ ขอขอบคุณ นายเกษียร หมายเต๊ะ นายเมธี จันทร์ทอง และ นายกรวิชญ์ ขุนกาญจน์ ในการเตรียมชิ้นตัวอย่าง งานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Industrial Economics Ministry of Industry. (2020, June 1) . Industrial Economic Conditions in January 2020. [Online]. Available: <https://www.ryt9.com/s/oie/3107077>
- [2] Thailand Fellowship of Cement Manufacturers. (2020, June 1). Export of Cement Industry. [Online]. Available: <http://thaicma.or.th/cms/scale-of-cement-industry/export-of-cement-industry/>
- [3] The Concrete Products and Aggregate Co., Ltd. (2020, June 4). Cement. [Online]. Available: https://cpacademy.com/download/cpacacademy_com/e-contech%20u2.pdf
- [4] S. Dumrongsil and S. Sujjavanich, "Effect of cement containing binary blended bagasse ash-fly ash on physical and mechanical properties of concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 30, no. 3, pp. 489-499, Jul.-Sep. 2007.
- [5] S. Dumrongsil, "Effect of rice husk ash blended with fly ash on mechanical properties of concrete," *RMUTP Research Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 125-133, Mar. 2015.
- [6] B. Chatveera and N. Makul, "Effect of curing temperature on mechanical properties of cement mixed with white rice husk ash paste," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 49-61, Jan.-Mar. 2004.
- [7] S. Chantaramanee, W. Keanthongdang, P. I-suwan and D. Tonnayopas, "Properties of cement composite fabricated from white rice husk ash incorporated with short single-walled carbon nanotubes," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 25, no. 3, pp. 113-121, Sep.-Dec. 2018.
- [8] W. Kroehong, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, "A study microstructure of blended cement paste containing palm oil fuel ash," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 187-200, Apr.-Jun. 2012.
- [9] Department of Agricultural Extension Ministry of Agriculture and Cooperatives. (2017, July 12). Tantanode. [Online]. Available: <https://production.doae.go.th/service/>
- [10] W. Saiwarin, C. Napia and T. Sinsiri, "The study of leaching of heavy metals contaminant in cement pastes containing

- bagasse ashes,” *KKU Engineering Journal*, vol. 41, no. 2, pp. 181-190, Apr.-Jun. 2014.
- [11] W. Kroehong, S. Sangpaen, P. Sitkanarak and J. Wilairat, “Mechanical properties microstructure and thermal conductivity of concrete block containing fly ash,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 39, no. 3, pp. 407-425, Jul.-Sep. 2016.
- [12] P. Kejaroen and S. Sethabouppha, “Development of lightweight concrete masonry units with oil palm ash,” *RMUTP Research Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 33-40, May. 2007.
- [13] S. Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon,” *Letters to Nature*, vol. 354, pp. 56-58, Nov. 1991.
- [14] Y. Feng and H. Yuan, “Electroless plating of carbon nanotubes with silver,” *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp. 3241-3243, 2004.
- [15] Y. Hu, D. Luo, P. Li, Q. Li and G. Sun, “Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-wall carbon nanotubes,” *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 332-338, 2014.
- [16] M. Elkashef, K. Wang and M. N. Abou-Zeid, “Acid treated carbon nanotubes and their effects on mortar strength,” *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 180-188, 2016.
- [17] K. M. Liew, M. F. Kai and L. W. Zhang, “Mechanical and damping properties of CNT-reinforced cementitious composites,” *Composite Structures*, vol. 160, pp. 81-88, 2017.
- [18] M. A. Mousavi and A. Bahari, “Influence of functionalized MWCNT on microstructure and mechanical properties of cement paste,” *Indian Academy of Sciences*, vol. 44, pp. 103, 2019.
- [19] R. Kaur, N. C. Kothiyal, and H. Arora, “Studies on combined effect of superplasticizer modified graphene oxide and carbon nanotubes on the physico-mechanical strength and electrical resistivity of fly ash blended cement mortar,” *Journal of Building Engineering*, vol. 30, 101234, 2020.
- [20] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM Standard C150-07, 2007.
- [21] *Portland Cement*, Thai Industrial Standard Institute TISI. 15, 2004.
- [22] Cheap Tubes Inc. (2020, June 9). Single walled carbon nanotubes, SWNTs, specifications and properties. [Online]. Available: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2180>
- [23] The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. (2020, June 9). Chapter 2 Cement. [Online]. Available: <https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0063>
- [24] S. Chantaramanee, S. Wisutmethangoon, L. Sikong and T. Plookphol, “Development of a lead-free composite solder from Sn-Ag-Cu and Ag-coated carbon nanotubes,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 24, pp. 3707–3715, 2013.
- [25] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete*

- Specimens, ASTM Standard C39/C39M-05, 2005.
- [26] *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM Standard C642-97, 1997.
- [27] *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, ASTM Standard C597-16, 2016.
- [28] *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM Standard C496-96, 1996.
- [29] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM Standard C618-12a, 2012.
- [30] W. Sanawung, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, "Strength, abrasion resistance, and chloride ion penetration of concrete containing palm oil fuel ash," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 83-96, Jan.-Mar. 2018.
- [31] G. Y. Li, P. M. Wang and X. Zhao, "Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes," *Carbon*, vol. 43 pp. 1239-1245, 2005.

