สมบัติของคอนกรีตมวลรวมหินควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีน้ำหนักสูญหายหลังเผาสูง

Properties of Quartzite Aggregate Concrete Blended with Oil Palm Ash with High Loss on Ignition

ดนุพล ตันนโยภาส[1] ศรวิษฐ์ ลิขิตวานิช[1] และนันทวิทย์ ชัยวิชิต[1]

Received: July, 2013; Accepted: August, 2015

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงทดลองครั้งนี้เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตมวลรวมส่วนใหญ่เป็นหินควอร์ตไซต์จากเหมืองดีบุกเก่าผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ทดสอบสมบัติมวลรวม ได้แก่ ความหนาแน่นหลวมและความหนาแน่นแน่น การคละขนาด ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ ดัชนีความแบนและดัชนีความยาว การขัดสีแบบลอสแองเจลิส ค่ากระแทก กำลังแรงกดจุด ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีน้ำหนักสูญหายหลังเผาสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 คงที่ตลอดการทดลอง หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร ไม่บ่มน้ำ และบ่มน้ำที่ 7 และ 28 วัน ครบกำหนดนำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความแข็งแบบชอร์ ความต้านทานไฟฟ้า ทนทานต่อแมกนีเซียมซัลเฟตกำลังอัด และวิเคราะห์แร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลศึกษาครั้งนี้ได้คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% อายุบ่ม 28 วัน มีกำลังอัด 67.55 เมกะพาสคัล ความทนทานต่อแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มค่อนข้างต่ำกว่าของคอนกรีตควบคุม

คำสำคัญ : หินควอร์ตไซต์; เถ้าปาล์มน้ำมัน; สมบัติดัชนีมวลรวม; วัสดุปอซโซลาน; ความทนทานต่อแมกนีเซียมซัลเฟต

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*
E - mail : danupon.t@psu.ac.th

Abstract

In this experimental investigation was carried out the properties of concrete containing waste rock aggregate which had mostly quartzite from former tin mine blended with oil palm ash (OPA). Aggregate property tests were conducted on loose and dense density, fineness modulus, specific gravity, water absorption, flakiness and elongation index, Los Angeles abrasion, impact value, and point load strength. OPA with high loss on ignition was used as a pozzolanic material partially replaced ordinary Portland cement type 1 in proportion of 10, 20 and 30wt.%. The water to binder ratio 0.45 was kept constant throughout this study. The concrete specimen used in this study was cubic with the size of 10 x 10 x 10 cm and classified as non-curing and cured in water for 7 and 28 days. The concrete specimens were tested on bulk density, water absorption, Shore hardness, electrical resistance, compressive strength and magnesium sulfate durability. Also, scanning electron microscope was used to analyze microstructure and mineral phase via X-ray diffraction. From this studied result, it was provided that the 28-day compressive strength of concrete blended with 10% OPA was 67.55 MPa. Magnesium sulfate durability of concrete blended with OPA was rather lower than control concrete.

Keywords: Quartzite; Oil Palm Ash; Aggregate Index Properties; Pozzolanic Materials; Magnesium Sulfate Durability

บทนำ

เมื่อราวห้าทศวรรษที่ผ่านมาอุตสาหกรรมดีบุกเป็นที่เฟื่องฟูมากในภาคใต้ของประเทศไทย แต่ปัจจุบันเหมืองส่วนใหญ่ในจังหวัดสงขลาได้เลิกกิจการไป คงทิ้งร่องรอยแห่งความรุ่งเรืองไว้ เช่น เครื่องจักรการทำเหมืองและเศษหินที่สกัดแยกดีบุกออกไปแล้วเหลือตกค้าง ซึ่งมีการโม่ย่อยทำเป็นมวลรวมเหลือไว้เป็นปริมาณ 1,000 ลูกบาศก์เมตร และไม่มีผลศึกษาสมบัติหินที่นำมาใช้ในงานคอนกรีต ประกอบกับปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย มีการนำกากผลปาล์มน้ำมันมาเป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าภายในโรงงานเป็นส่วนใหญ่ เถ้าของเสียมักนำไปฝังกลบ ทำให้เกิดผลกระทบเรื่องการกำจัดตามมาส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนหลายรูปแบบ จึงได้มีการศึกษานำเถ้าปาล์มน้ำมันไปแทนที่ปูนซีเมนต์ (Tonnayopas, D. et al., 2004; Tonnayopas, D. and Laopreechakul, S., 2006; Tonnayopas, D. et al., 2006) เนื่องจากพบว่าองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าปาล์มน้ำมันใกล้เคียงกับวัสดุปอซโซลาน (ASTM C618, 2012)

Yellishetty, M. et al. (Yellishetty, M. et al., 2008) จำแนกขนาดของเสียจากการทำเหมืองแร่เหล็กใช้ในงานก่อสร้าง และทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของของคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน ได้กำลังอัดมวลรวมจากของเสียและมวลรวมหินแกรนิตมีค่า 21.93 และ 19.91 เมกะพาสคัล การประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของมวลรวมหินควอร์ตไซต์มีระดับผุต่างกันมาหล่อคอนกรีต ด้วยส่วนผสม 1:1:2 1:1.5:3 1:2:4 และ 1:3:6 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 0.50 และ 0.60 บ่ม 7 14 28 และ 56 วัน กำลังอัดคอนกรีตหล่อด้วยมวลรวมควอร์ตไซต์สดใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลรวมแกรนิต แต่คอนกรีตควอร์ตไซต์ผุบางส่วนกำลังอัดเฉลี่ย 86% ของคอนกรีตแกรนิต (Adom-Asamoah, M. et al., 2014)

ผลศึกษาชนิดมวลรวมหยาบที่ย่อย (หินควอร์ตไซต์ หินแกรนิต หินปูนและหินอ่อน) มีต่อกำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก พลังงานรอยแตก การหดตัว โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใส่ผงตะกรันละเอียดสูง (Ultrafine Slag Powder) สารลดน้ำ กำหนดให้ระดับกำลังอัดต่างกันที่ 30 60 และ 90 เมกะพาสคัล อายุ 28 วัน พบว่ากำลัง ความแข็ง และพลังงานรอยแตกของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.26 0.44 และ 0.55 ขึ้นกับชนิดของมวลรวม โดยเฉพาะมวลรวมที่มีกำลังสูงและความเปราะต่ำ (Wu, K. -R. et al., 2001)

Kilic, A. et al. (Kilic, A. et al., 2008) ศึกษาอิทธิพลของมวลรวมห้าชนิดต่อกำลังและการสึกกร่อนของคอนกรีตกำลังสูง ได้แก่ หินแกบโบร หินบะซอลต์ หินควอร์ตไซต์ หินปูนและหินทราย ผสมซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ 15% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดเป็น 4% ของวัสดุประสาน หินแกบโบรมีกำลังอัดและกำลังดัดและทนต่อการสึกกร่อนสูงสุด ในขณะที่หินทรายมีกำลังอัดและดัดและทนต่อการสึกกร่อนได้ต่ำสุด มวลรวมที่ทนต่อการสึกกร่อนสูงผลิตคอนกรีตทนต่อการสึกกร่อนได้สูงเช่นกัน กำลังอัดของคอนกรีตอายุสามเดือนใส่หินบะซอลต์ หินปูนและหินทรายพบว่า เท่ากับกำลังอัดแกนเดียวของหินมวลรวม อย่างไรก็ตามคอนกรีตหล่อด้วยมวลรวมหินควอร์ตไซต์และแกบโบรกำลังอัดต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของหินมวลรวมชนิดดังกล่าว

Hong, L. et al. (Hong, L. et al., 2014) ศึกษามวลรวมหยาบสามชนิดคือ หินปูน หินบะซอลต์และหินควอร์ตไซต์ที่มีความขรุขระของผิวต่างกันต่อกำลังยึดหน่วง (Bond Strength) ระหว่างผิวมวลรวมหยาบกับมอร์ต้าร์และผลต่อกระบวนการวิบัติภายหลังของคอนกรีต ภายใต้แรงดึงแบบผ่าซีกและการอัดแกนเดียว โดยประเมินด้วยเครื่องกวาดสามมิติ พบว่ากำลังยึดหน่วงแบบดึงและแบบเฉือนเพิ่มขึ้น และแนวโน้มคงที่เมื่อความขรุขระของผิวมวลรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้หินควอร์ตไซต์ให้กำลังยึดหน่วงดึงและเฉือนของระหว่างผิวหน้าสูงสุด รองลงมาเป็นหินปูนและบะซอลต์

ผลศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตซิลิกา (Silica Concrete) หล่อจากเศษแก้ว มวลรวมละเอียดเป็นทรายแก้วและมวลรวมหยาบควอร์ตไซต์ แกรนิต ไดอะเบสและบะซอลต์ ด้วยกรรมวิธีจีโอพอลิเมอร์ตัวอย่างแช่ในกรดซัลฟูริกแบบคงที่หรือซ้ำหลายรอบ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตซิลิกาขึ้นกับชนิดมวลรวมหยาบและความเข้มข้นของกรด คอนกรีตซิลิกาที่มีมวลรวมควอร์ตไซต์ให้คุณภาพและความคงทนสูงในกรดซัลฟูริกเข้มข้นน้อยถึงปานกลาง โดยเฉพาะที่ 30% เทียบขั้นอิฐทนกรด กรดซึมผ่านภายใต้สภาพซึมผ่านจากการดูดของรูเล็ก (Capillary Suction Permeability) ลึกถึง 20 มม. (Freidin, C., 1999) นอกจากนี้การศึกษาศักยภาพการขยายตัวของคอนกรีตใส่มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับแอลคาไล ได้แก่ โอปอ หินปูนเนื้อซิลิกา ควอร์ตไซต์และควอตซ์พบว่าควอตซ์เกิดน้อยสุด (Gao, X. X. et al., 2013)

จากวรรณกรรมปริทัศน์ที่ผ่านมาหินบางชนิดเหลือจากการทำเหมืองสามารถมาทดแทนมวลรวมทั่วไปได้ จึงสมควรที่ศึกษาศักยภาพหินควอร์ตไซต์จากเหมืองแร่ดีบุกเก่าที่กองทิ้งไว้และเถ้าปาล์มน้ำมันมาผลิตเป็นคอนกรีตโครงสร้าง ซึ่งจะช่วยให้หินตกค้างจากประกอบการเหมืองแร่และเถ้าปาล์มน้ำมันได้นำกลับมาใช้ใหม่เป็นการเพิ่มมูลค่า ลดการกำจัดเศษหินให้มีประโยชน์สูงสุดอย่างยั่งยืนและผลิตคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่ใช้หินควอร์ตไซต์จากเหมืองดีบุกเก่าทำเป็นมวลรวมหยาบและปริมาณปูนซีเมนต์เป็นตัวแปรตามผสมกับปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันและคอนกรีตอายุบ่มต่างกันเป็นตัวแปรอิสระ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

หินควอร์ตไซต์ (QA) กองอยู่ในเหมืองดีบุกเก่า อำเภอเทพา จังหวัดสงขลา ผ่านการบดมีลักษณะรูปร่างยาวและแบน ผิวสาก จากการตรวจสอบชนิดหินทางศิลาวรรณนา (Tonnayopas, D., 2010) พบว่าประกอบด้วยหินควอร์ตไซต์เป็นหินแปรประมาณ 95% และหินอาร์จิลไลต์ 5% ซึ่งได้คัดออกเนื่องจากเข้าข่ายวัสดุเปราะ (ASTM C142/C142M-10, 2010) ขนาดได้จากเหมืองตั้งแต่ 9.5 ถึง 19 มิลลิเมตร (รูปที่ 1 (ก)) และคัดขนาดมวลรวมควอร์ตไซต์และทรายหยาบตาม ASTM C136-06 (ASTM C136-06, 2006) ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน (OPA) นำไปบดลดขนาด (รูปที่ 1 (ข)) โดยใช้หม้อบด (Ball Mill) ประมาณ 3 ชั่วโมง นำมาคัดเอาที่ผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมครอน เท่านั้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น (Tonnayopas, D. et al., 2006)

(ก) (ข)

รูปที่ 1 (ก) หินควอร์ตไซต์มาทำมวลรวมหยาบจากเหมืองดีบุกร้าง และ (ข) เถ้าปาล์มน้ำมัน

2. การออกแบบตัวอย่างคอนกรีต

หล่อตัวอย่างคอนกรีตลงแบบขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร มีอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 1 ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายที่นำมาใช้เป็นทรายหยาบน้ำจืดและน้ำประปาสะอาด

เถ้าปาล์มน้ำมันที่ละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ตลอดการศึกษา ซึ่งพบว่าคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 ให้ค่ากำลังสูงสุดและเหมาะสมที่สุด (Adom-Asamoah, M. et al., 2014)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตในการศึกษา

ส่วนผสม / ชนิด	ปริมาณ (กก./เมตร^3)			
	เถ้าปาล์มน้ำมัน (wt.%)			
	0	10	20	30
OPC	360	324	288	252
OPA	0	36	72	108
QA	1,300	1,300	1,300	1,300
sand	860	860	860	860
water	162	162	162	162

3. การเตรียมตัวอย่างมวลรวมและคอนกรีต

เถ้าปาล์มน้ำมันกับปูนซีเมนต์ใส่ในกระบอกผสมและวางหมุนบนรางหม้อบดแบบลูกกลิ้ง (Jar Mill) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นหล่อตัวอย่างทั้งหมด 4 ชุด ชุดละ 3 ก้อน แบ่งชุดตัวอย่าง ไม่บ่ม และบ่มแบบชื้นเป็นเวลา 7 และ 28 วัน ตามวิธี ASTM C192/C192M-14 (ASTM C192/C192M-14, 2014) ทั้งหมด 40 ก้อน

4. การทดสอบมวลรวมและตัวอย่างคอนกรีต

การทดสอบมวลรวมหินควอร์ตไซต์

ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) การดูดซึมน้ำ ตามวิธี ASTM C127-04 (ASTM C127-04, 2004) ความหนาแน่นแบบหลวม (Loose Density) และความหนาแน่นแบบแน่น (Dense Density) ตามวิธี ASTM C29/C29M-09 (ASTM C29/C29M-09, 2009) ดัชนีความแบน (Flakiness Index) ตาม BS EN 933-3 (BS EN 933-3, 2012) และดัชนีความยาว (Elongation Index) ตาม BS EN 933-4 (BS EN 933-4, 2009) ค่ากระแทก (Aggregate Impact Value, AIV) ตาม BS 812-112 (BS 812-112, 1990) กำลังแรงกดจุด (ISRM, 2007) การทดสอบคอนกรีตประกอบด้วย การก่อตัวของเพสต์ด้วยเข็มไวแคตตาม ASTM C191-13 (ASTM C191-13, 2013) และวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ส่วนสมบัติคอนกรีตแข็งตัวที่ทดสอบ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ (ASTM C138/C138M, 2014) การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรหาจากการวัดขนาดด้านทั้งสามที่ปักหมุดไว้เทียบกับขนาดตอนเริ่ม ความแข็งแบบชอร์ (Shore Hardness) Hardness Tester รุ่น EQUOTIP อ่านค่ากระดอนไม่แปลงค่า ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance) ด้วยเครื่อง McOhm-Meter กำลังอัด และการทนทานต่อแมกนีเซียมซัลเฟตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อแมกนีเซียมซัลเฟตที่ 10 : 8 ซึ่งมีความเข้มข้นสูง เพื่อเร่งให้เกิดผลปฏิกิริยาในช่วงเวลาสั้น โดยวัดค่าน้ำหนักที่หายไป นำตัวอย่าง

คอนกรีตที่ค่ากำลังอัดสูงสุดตรวจวิเคราะห์วัฏภาคแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. สมบัติของมวลรวม

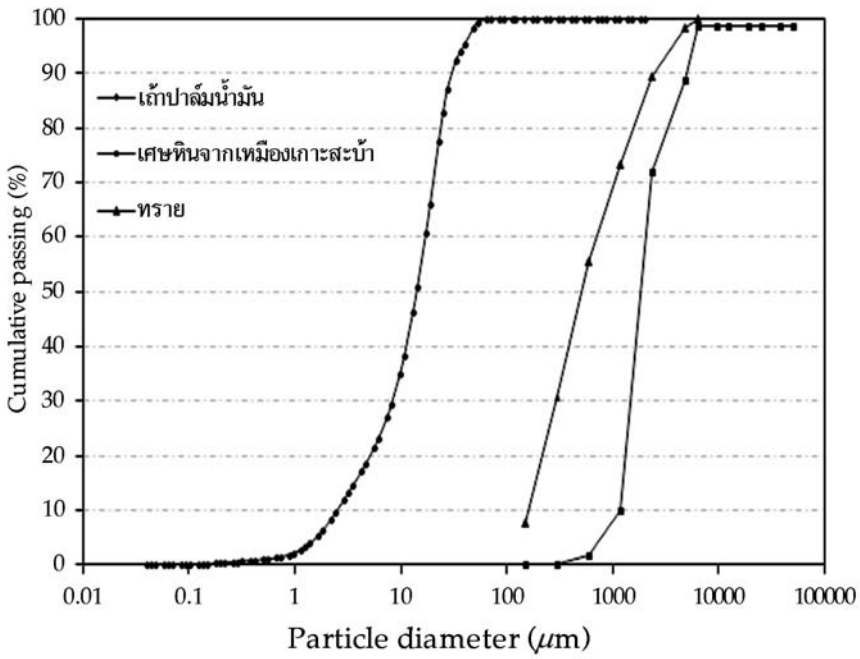
สมบัติมวลรวมทางกายภาพและวิเคราะห์ทางเคมีทั้งหมดได้สรุปไว้ในตารางที่ 2 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 2 สมบัติมวลรวมควอร์ตไซต์ที่ใช้

List of tests	Value
Specific gravity	2.71
Water absorption, %	0.80
Flakiness index, %	40.93
Elongation index, %	36.93
Modulus of fineness	5.67
Point load strength, MPa	3.30±2.56
AIV, %	11.7-13.0
Los Angeles abrasion, %	27.40
$MgSO_4$ soundness, %	0

1.1 การคละขนาด

มวลรวมควอร์ตไซต์ส่วนใหญ่มีขนาดตั้งแต่ 9.5 - 19 มม. ไม่อยู่ในช่วงตาม ASTM C33/C33M-13 (ASTM C33/C33M-13, 2013) กำหนด จึงทำให้คอนกรีตไม่แน่น มีช่องว่างมากและเปลืองปูนซีเมนต์ มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 5.67 ส่วนทรายมีขนาด 0.15 - 4.75 มม. และค่าโมดูลัสความละเอียด 3.55 เกินเกณฑ์เหมาะสม 2.3 - 3.1 (ASTM C33/C33M-13, 2013) ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีขนาด 2.51 - 29.85 ไมครอน มีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ดังในรูปที่ 2 การแทนที่จึงมีผลทางกายภาพน้อย



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของวัตถุดิบที่ใช้หล่อคอนกรีตครั้งนี้

1.2 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบควอร์ตไซต์มีค่า 2.71 อยู่ในช่วงมวลรวมจากหินแตกหัก (Neville, A. M., 2011) สูงกว่าที่ Abdullahi, M. (Abdullahi, M., 2012) ได้ ถ.พ. 2.66 แต่ต่ำกว่าของ Kilic, A. et al. (Kilic, A. et al., 2008) มี ถ.พ. 2.78 ส่วนการดูดซึมน้ำของควอร์ตไซต์มีค่า 1.25% จัดเป็นมวลรวมการดูดซึมน้ำปานกลาง (Tonnayopas, D., 2012) มากกว่าของ Kilic, A. et al. (Kilic, A. et al., 2008) และ Adom-Asamoah, M. et al. (Adom-Asamoah, M. et al., 2014) มีค่า 0.18% และ 1.0% ควอร์ตไซต์ผุมี ถ.พ. น้อยกว่าและดูดซึมน้ำมากกว่า (Torrijos, M. C. et al., 2013)

1.3 กำลังแรงกดจุด

ค่ากำลังแรงกดจุดเฉลี่ยเท่ากับ 3.30 MPa ซึ่งจำแนกกำลังแรงกดจุด จัดเป็นหินกำลังปานกลาง (Moderate Strength) ประมาณค่ากำลังอัดได้ 85 เมกะพาสคัล (ISRM, 2007) ใกล้เคียงกับควอร์ตไซต์ที่ Torrijos, M. C. et al. (Torrijos, M. C. et al., 2013) ทดสอบแบบกดได้ 86 เมกะพาสคัล แต่ต่ำกว่าของ Kilic, A. et al. (Kilic, A. et al., 2008) ได้ถึง 160 เมกะพาสคัล

1.4 ค่ากระแทก

ค่ากระแทกเฉลี่ย 12.37% จำแนกค่ากระแทกกับการใช้งาน พบว่าเป็นหินมีความแข็งแรง (Tonnayopas, D., 2012) มากกว่าของ Adom-Asamoah, M. et al. (Adom-Asamoah, M. et al., 2014) ที่ได้ 8%

1.5 การสึกหรอแบบลอสแองเจลิส

ค่าการสึกหรอ 27.40% น้อยกว่าของ Adom-Asamoah, M. et al. (Adom-Asamoah, M. et al., 2014) ที่ได้ 29% มากกว่าของ Kilic, A. et al. (Kilic, A. et al., 2008) ที่ได้ 16.2% อยู่ในเกณฑ์ ASTM C131/C131M-14 (ASTM C131/C131M-14, 2014) กำหนดไม่เกิน 40 - 45% สามารถนำมาผสมกับคอนกรีตมีค่าไม่เกิน 50% (SDPT.1202-07, 2007)

1.6 ดัชนีความยาวและดัชนีความแบน

มวลรวมหินควอร์ตไซต์มีค่าดัชนีความแบน 40.93% และดัชนีความยาว 36.93% ตามเกณฑ์ BS-1241 กำหนดค่าไม่เกิน 30% และ 45% ค่าดัชนีความแบนและดัชนีความยาวมากทำให้สิ้นเปลืองปูนซีเมนต์มากกว่า และมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตได้เช่นกัน (Adom-Asamoah, M. et al., 2014) อย่างไรก็ตามมวลรวมหินควอร์ตไซต์มีรูปร่างเหลี่ยมมุมและผิวหยาบขรุขระมีค่ายุบตัวน้อยกว่าที่มีปริมาณน้ำผสมคอนกรีตเท่ากัน ผิวหน้ามวลรวมขรุขระยังช่วยกำลังอัดดีขึ้น (Hong, M. et al., 2014; Adom-Asamoah, M. et al., 2014)

1.7 ความหนาแน่นแบบหลวมและความหนาแน่นแบบแน่น

ค่าความหนาแน่นหลวม 1,353 กก./ม.^{3} และความหนาแน่นแบบแน่น 1,559 กก./ม.^{3} มากกว่าของมวลรวม Yellishetty, M. et al. (Yellishetty, M. et al., 2008) มีค่าความหนาแน่นหลวม 1,200 - 1,360 กก./ม.^{3} และความหนาแน่นแบบแน่น 1,250 - 1,350 กก./ม.^{3}

1.8 การทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

มวลรวมหินควอร์ตไซต์ทนต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้สูงมาก ไม่มีน้ำหนักสูญหายขณะที่เกณฑ์กำหนดไม่เกิน 15% (ASTM C33/C33M-13, 2013)

2. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วย XRF ดังตารางที่ 3 ซึ่งรวมปริมาณของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 48.47% และมีค่าน้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI) เท่ากับ 24.13% จึงเทียบไม่ได้กับวัสดุปอซโซลานชนิด C (ASTM C618, 2012) หรือไม่อยู่ในวัสดุปอซโซลานงานก่อสร้าง (ASTM D5370-14, 2014) ซึ่งทำนองคล้ายเถ้าชานอ้อยของ Suntharanurak, J. and Tonnayopas, D. (Suntharanurak, J. and Tonnayopas, D., 2014) ที่มีค่า LOI เท่ากับ 21.10% พบว่ามีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีต เนื่องจากขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี	OPA	OPC
SiO_2	45.97	21.30
Al_2O_3	0.80	4.96
Fe_2O_3	1.70	3.10
MgO	5.39	-
P_2O_5	4.59	-

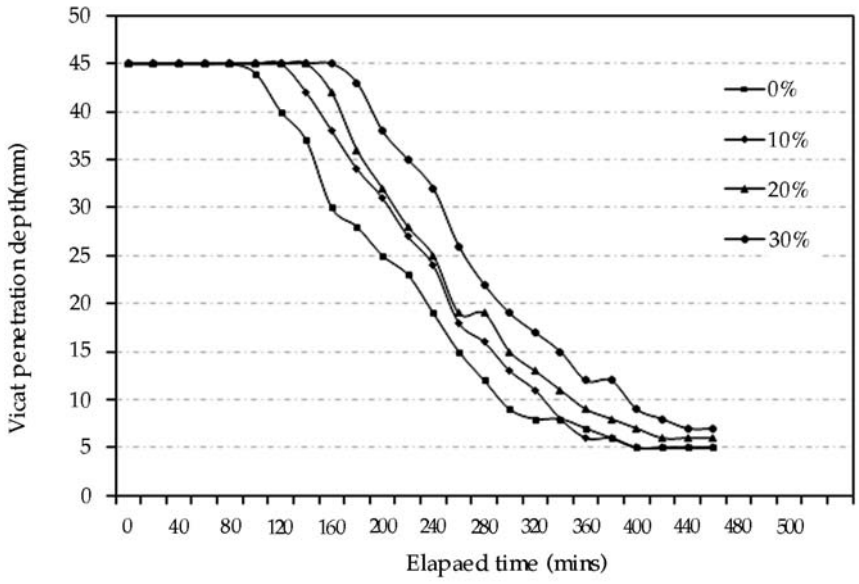
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ (ต่อ)

องค์ประกอบทางเคมี	OPA	OPC
SO_3	1.33	2.72
K_2O	6.39	0.50
CaO	8.56	66.61
MnO	0.90	-
LOI	24.13	0.74

3. สมบัติของเพสต์

3.1 การก่อตัว

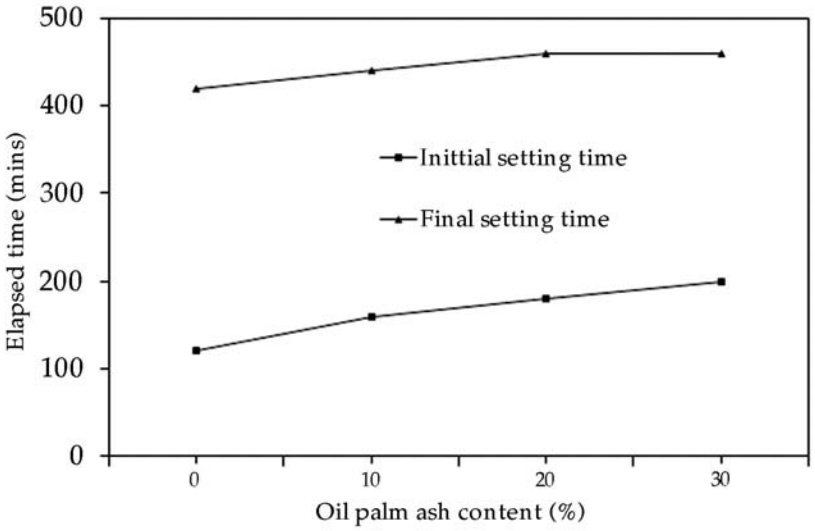
ผลการทดสอบเวลาการก่อตัวของเพสต์พบว่าเวลาการก่อตัวระยะต้นของซีเมนต์เพสต์เร็วที่สุด คือ 120 นาที และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 30% มีเวลาก่อตัวระยะต้นช้าสุดคือ 200 นาที แสดงถึงปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นมีผลต่อการก่อตัวช้า (รูปที่ 3) ทำนองเถ้าชานอ้อยที่ใช้ Suntharanurak, J. and Tonnayopas, D. (Suntharanurak, J. and Tonnayopas, D., 2014) พบว่าระยะเวลาก่อตัวของเพสต์แปรผกผันกับปริมาณวัสดุประสานที่เติมลงไปทำให้ความสามารถเทได้ลดน้อยลงไป (รูปที่ 4) ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงขึ้นจะส่งผลให้โอกาสหรือความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ LOI ที่สูงกีดขวางการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน



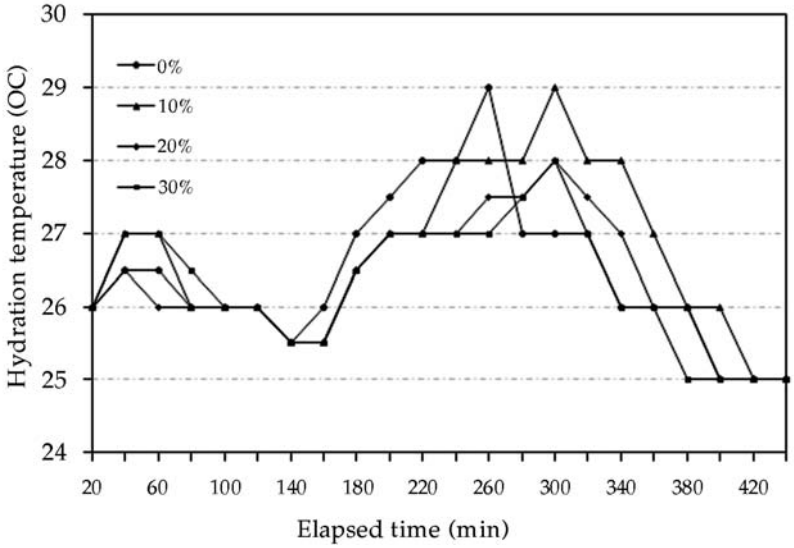
รูปที่ 3 พฤติกรรมการก่อตัวของเพสต์

3.2 อุณหภูมิของเพสต์

พบว่าอุณหภูมิในช่วงเพสต์เหลวจนแข็งตัว อุณหภูมิในช่วงขณะเริ่มก่อตัวเวลาผ่านไป 120 - 180 นาที อุณหภูมิในเพสต์คงเดิม ภายหลังจากนั้นอุณหภูมิสูงขึ้นไปเป็นช่วง (25.5 - 29°C) อันเป็นช่วงคายความร้อนออกมา จนเมื่อเพสต์ใกล้เข้าสู่ระยะการแข็งตัว พบว่าปฏิกิริยาการดูดความร้อนได้เริ่มขึ้น พร้อมกับค่าอุณหภูมิความร้อนได้ลดจาก 29°C ลงไป 25°C (รูปที่ 5)



รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์



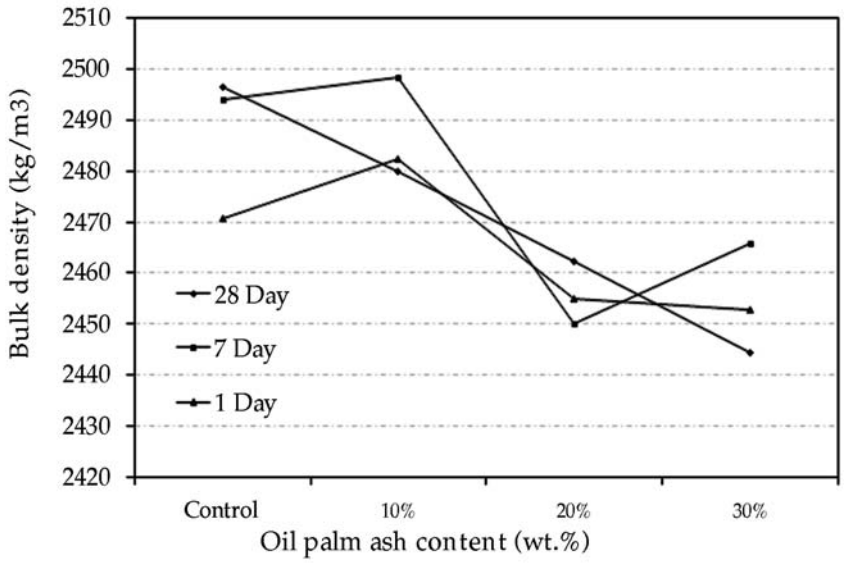
รูปที่ 5 อุณหภูมิในช่วงของการก่อตัวของเพสต์

4. สมบัติของคอนกรีต

สมบัติของคอนกรีตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ความหนาแน่นรวม

ค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของคอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์สูงสุดประมาณ 2,498 กก./ม.^{3} แทนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% บ่ม 7 วัน และส่วนตัวอย่างที่มีความหนาแน่นต่ำสุดประมาณ 2,444 กก./ม.^{3} ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ 30% บ่ม 28 วัน (รูปที่ 6) เนื่องจากเถ้าปาล์มมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์จึงทำให้คอนกรีตมีค่าความหนาแน่นลดลง



รูปที่ 6 ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.2 การดูดซึมน้ำ

คอนกรีตดูดซึมน้ำที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดคือ 0.71% และน้อยสุดคือ 0.28% ซึ่งแนวโน้มของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่มีการดูดซึมน้ำลดลงตามเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น (รูปที่ 7) น่าเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เนื้อคอนกรีตทึบน้ำมากขึ้น

4.3 การหดตัวแบบแห้ง

ค่าการหดตัวแบบแห้งคิดจากน้ำหนักของคอนกรีตอยู่ในช่วง 0.71 - 1.20% (รูปที่ 8) ส่วนการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรอยู่ในช่วง 0.07 - 1.66% (รูปที่ 9) การหดตัวลดลงสันนิษฐานอาจเนื่องมาจากไฮเดรชันของ CaO เปลี่ยนรูปเป็น $Ca(OH)_2$ ในช่วงต้นและไฮเดรชันของ MgO ไปสู่ $Mg(OH)_2$ ในช่วงปลาย ตามลำดับ จึงช่วยกระชับลดการหดตัวของคอนกรีตลง

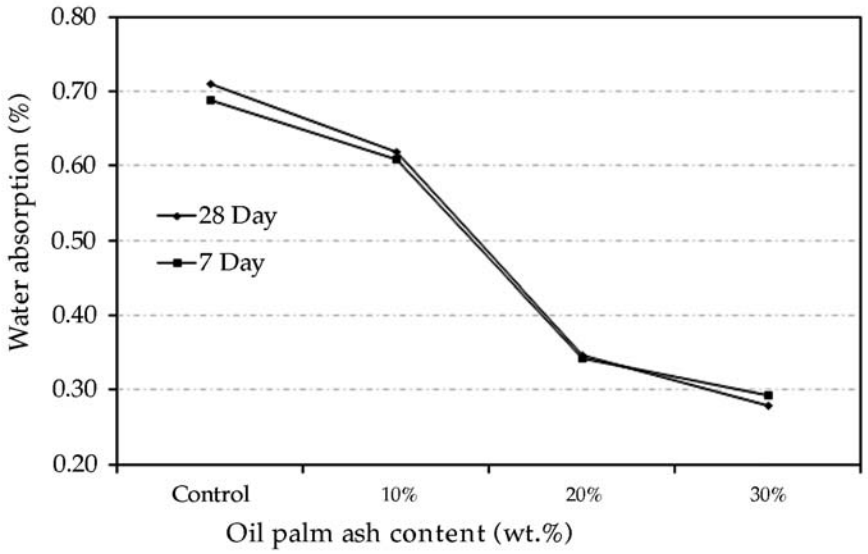
4.4 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 30% บ่ม 7 วัน มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุด 63.17 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร และค่าต่ำสุด 49.12 เมกกะโอห์ม-เซนติเมตร ของคอนกรีตควบคุมบ่ม 28 วัน

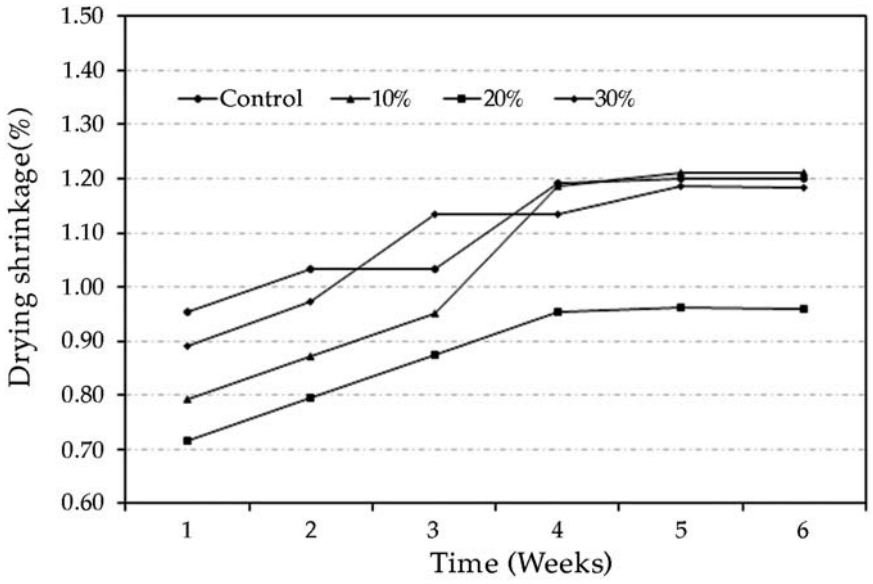
(รูปที่ 10) โดยแนวโน้มของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเพิ่มขึ้นตามการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน ค่าเพิ่มขึ้นจาก 36.74 ถึง 92.48% ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำ (รูปที่ 7) อาจเป็นผลจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ลด $Ca(OH)_2$ และเป็นผลดีต่อโครงสร้างคอนกรีตที่ช่วยลดการกัดกร่อนจากสารละลายคลอไรด์ (ASTM C1218/C1218M-99, 2008)

4.5 **ความแข็งแบบชอร์**

คอนกรีตควบคุมอายุบ่ม 28 วัน มีค่าความแข็งแบบชอร์สูงสุด 490 ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นได้ให้ค่าความแข็งแบบชอร์ลดลง โดยคอนกรีตที่ไม่บ่มผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 30% มีค่าความแข็งแบบชอร์ต่ำสุดเท่ากับ 297 (รูปที่ 11) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 6) เป็นวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายใช้ประเมินคอนกรีตได้อีกทางหนึ่ง



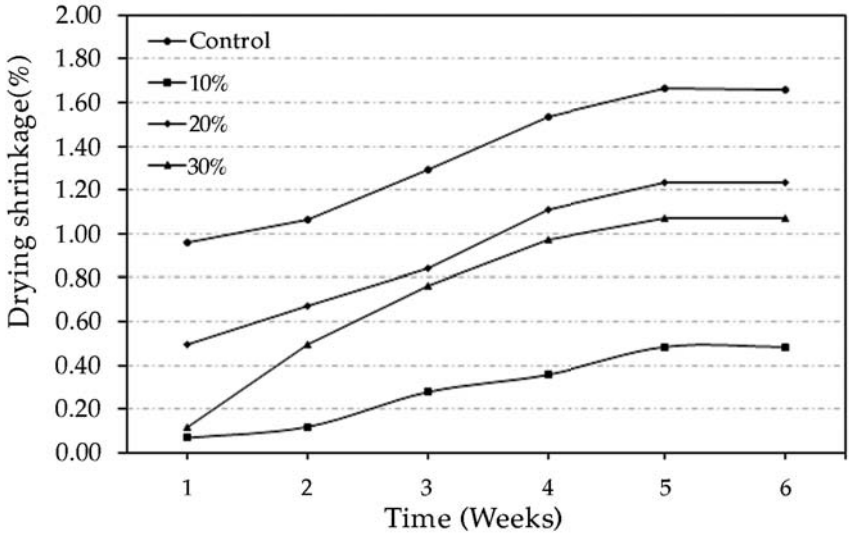
รูปที่ 7 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน



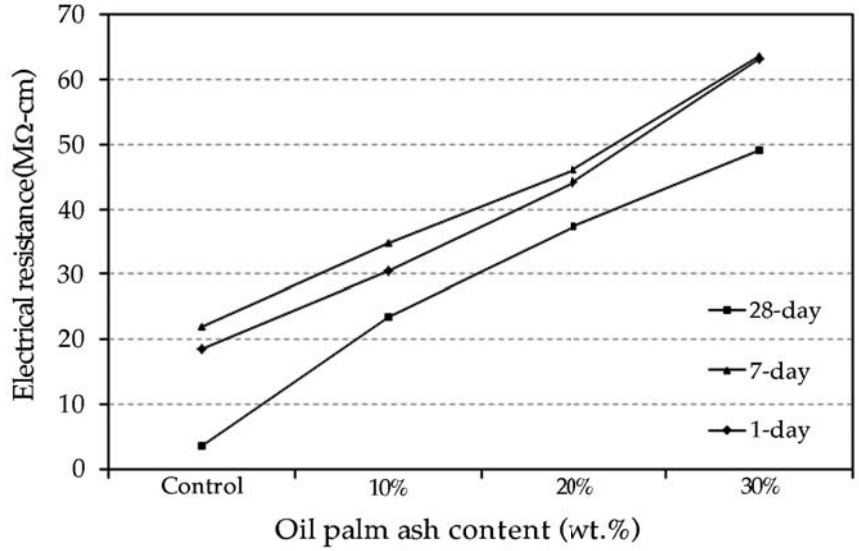
รูปที่ 8 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันคำนวณจากน้ำหนัก

4.6 กำลังอัด

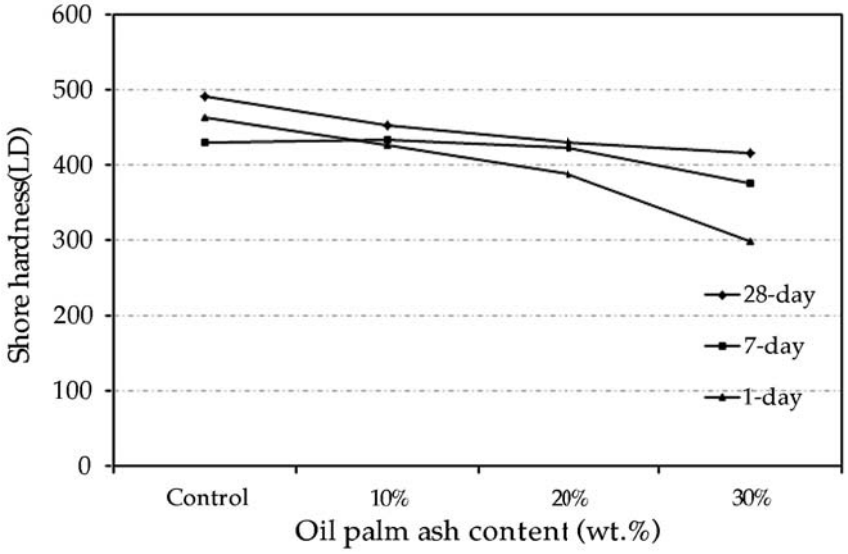
คอนกรีตมีการพัฒนากำลังตามอายุบ่ม (รูปที่ 12) ค่ากำลังอัดสูงสุด คือคอนกรีตควบคุมอายุบ่มที่ 28 วัน มีค่า 71.79 เมกะพาสคัล มากกว่าของ Adom-Asamoah, M. et al. (Adom-Asamoah, M. et al., 2014) ที่ได้ 33 เมกะพาสคัล และค่ากำลังอัดต่ำสุด คือคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 30% ไม่บ่ม โดยมีค่าอยู่ที่ 35.90 เมกะพาสคัล (รูปที่ 12) เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันเกินส่วนผสมที่เหมาะสมทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณค่าของ LOI สูง (Suntharanurak, J. and Tonnayopas, D., 2014) ค่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมครั้งนี้ใกล้เคียงกับของ Freidin, C. (Freidin, C., 1999) ได้ 69.2 เมกะพาสคัล ส่วน Wu, K. -R. et al. (Wu, K. -R. et al., 2001) ใส่สารลดน้ำและตะกรันได้กำลังอัด 70.4 เมกะพาสคัล และ Kilic, A. et al. (Kilic, A. et al., 2008) ได้ 97.4 เมกะพาสคัล โดยทั้งหมดใช้มวลรวมควอร์ตไซต์อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและบ่ม 28 วัน หาก w/b = 0.6 ได้ค่ากำลังอัดต่ำประมาณ 40 เมกะพาสคัล (Abdullahi, M., 2012) เมื่อเปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตผสมเถ้ากับคอนกรีตควบคุมที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 87 ถึง 94% และที่อายุบ่ม 28 วัน อยู่ในช่วง 82 ถึง 90% คอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์อายุนาน 10 ปี ระดับกำลังคงเดิม 40 เมกะพาสคัล (Torrijos, M. C. et al., 2013)



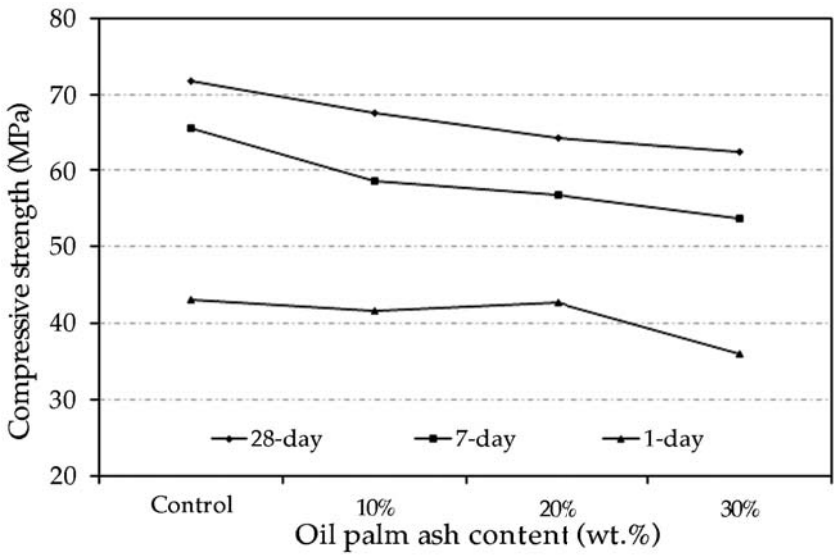
รูปที่ 9 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันคำนวณจากปริมาตร



รูปที่ 10 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของคอนกรีตมวลรวมหินควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 11 ความแข็งแบบชอร์ของคอนกรีตมวลรวมหินควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

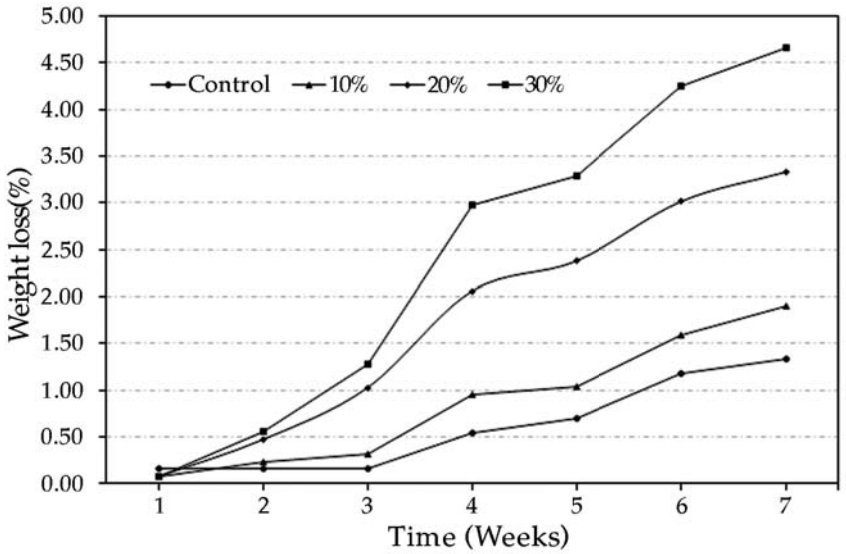


รูปที่ 12 กำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมหินควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.7 ความทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ค่าน้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตหลังจากแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น พบว่าปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มมีผลทำให้ความทนทานต่อสารลดลง (รูปที่ 13) ซึ่งอาจเนื่องมาจากคอนกรีตทดลองนี้มีกำลังต่ำ สารละลายจึงแทรกซึมเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายหรืออีกแง่หนึ่งองค์ประกอบของเถ้าปาล์มคล้ายสารปอซโซลานทำให้ลดความทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียม (SDPT 1322-07, 2007) หรือเพราะมีค่า LOI สูงอยู่ที่ 24.13% ผลทำนองเดียวกับใส่เถ้าชานอ้อยที่มี LOI สูง (Suntharanurak, J.

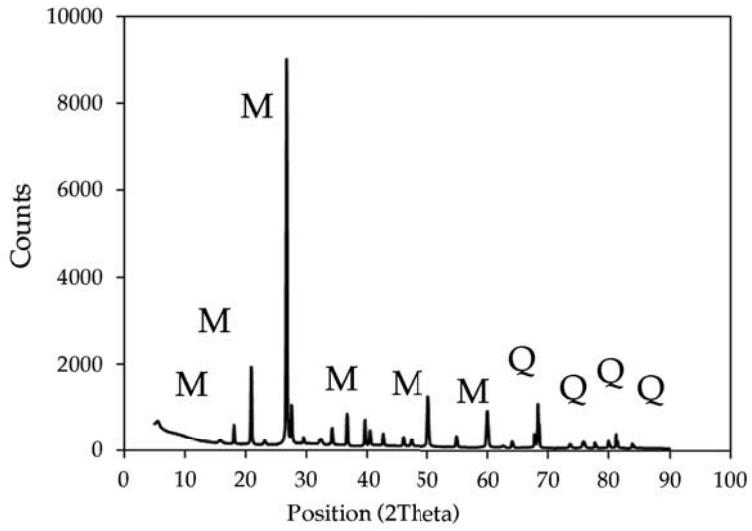
and Tonnayopas, D., 2014) มวลรวมหินควอร์ตไซต์มีการทนทานต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี เช่น กรดซัลฟูริก (Freidin, C., 1999) และการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลต่ำ (Gao, X. X. et al., 2013)



รูปที่ 13 ความทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตมวลรวมหินควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

5. การวิเคราะห์แร่ในคอนกรีต

ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% บ่ม 28 วัน (รูปที่ 14) และคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ (ตารางที่ 4) พบว่าประกอบด้วย แร่ควอตซ์ (Q) 47.54% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca) 4.71% แคลไซต์ (C) 2.05% เอต์ทรินไกต์ (E) 11.82% และไมโครไคลน์ (M) 31.97% ในขณะที่คอนกรีตควบคุมไม่พบแคลไซต์และไมโครไคลน์



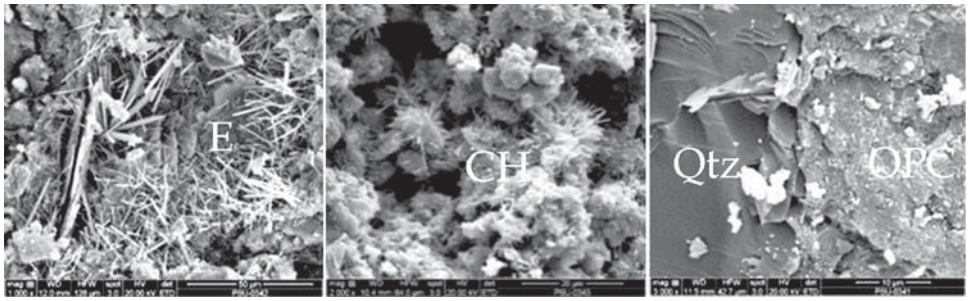
รูปที่ 14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอนกรีตมวลรวมหินควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10%

ตารางที่ 4 ปริมาณและชนิดแร่ที่พบในคอนกรีตมวลรวมหินควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

ชนิดแร่	สูตรเคมี	ปริมาณ (wt.%)
ควอตซ์	SiO_2	47.54
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	$Ca(OH)_2$	4.71
แคลไซต์	$CaCO_3$	2.05
เอต์ทรินไกต์	$Ca_6Al_2(SO_4)_3$ $(OH)_{12}.26H_2O$	11.82
ไมโครไคลน์	$KAlSiO_3O_8$	31.97

6. โครงสร้างจุลภาค

ผลวิเคราะห์โครงสร้างภายในคอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ 10% อายุบ่ม 28 วัน โดยการถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ควอตซ์ ไมโครไคลน์ เอต์ทรินไกต์ และโพรง (รูปที่ 15) รอยต่อบริเวณเนื้อปูนกับหินพบว่าเชื่อมประสานแน่น ส่วนเอต์ทรินไกต์นั้นมีลักษณะเป็นเส้น และแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นเส้นรัศมีทรงกลม



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 15 ภาพถ่ายจุลภาคอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอนกรีตกำลังขยาย (ก) 1,000 เท่าพบเอต์ทรินไกต์ (ข) 2,000 เท่าพบโพรงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ (ค) 3,000 เท่าพบรอยต่อบริเวณเนื้อปูนกับหินติดกันสนิท

สรุปผลการดำเนินการ

1. สมบัติมวลรวมของหินควอร์ตไซต์ครั้งนี้ ส่วนมากมีค่าอยู่ในเกณฑ์เป็นมวลรวมหยาบงานคอนกรีต ยกเว้นค่าดัชนีความแบน ช่วยลดการใช้หินธรรมชาติ เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์และหินทราย และในพื้นที่ขาดแคลนหินมวลรวม

2. เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่นำมาศึกษาครั้งนี้ มีค่าน้ำหนักสูญหายหลังเผาสูงมาก (24.13%) เป็นสาเหตุสำคัญหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

3. คอนกรีตมวลรวมควอร์ตไซต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% บ่ม 28 วัน ให้กำลังอัด 67.55 เมกะพาสคัล ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมบ่ม 28 วัน ที่มีค่ากำลังอัด 71.79 เมกะพาสคัล ค่ากำลังเปรียบเทียบของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าอยู่ในช่วง 87 - 94% และ 82 - 90%

4. คอนกรีตมวลรวมที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ต่ำ

5. ผลวิเคราะห์โครงสร้างเนื้อคอนกรีตไม่พบแร่ประกอบจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ยืนยันว่าเถ้าปาล์มที่เติมเข้าไปขาดคุณภาพ ส่วนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อเนื้อปูนกับเม็ดหินพบว่าเนื้อปูนมีลักษณะเรียบและหินมีลักษณะขรุขระ ส่วนเอต์ทรินไกต์มีลักษณะเป็นเส้น และแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นเส้นรัศมีทรงกลม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเหมืองเกาะสะบ้า จังหวัดสงขลา ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างหิน ควอร์ตไซต์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

References

Abdullahi, M. (2012). Effect of aggregate type on compressive strength of concrete. International Journal of Civil and Structural Engineering. Vol. 2. No 3. pp. 791-800

ACI 318-05/318R-05. (2005). Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute. Detroit. USA

Adom-Asamoah, M., Tuffour, Y. A., Afrifa, R. O. and Kankam, C. K. (2014). Strength characteristics of hand-quarried partially-weathered quartzite aggregates in concrete. American Journal of Civil Engineering. Vol. 2. No. 5. pp. 134-142

ASTM C29/C29M-09. (2009). Standard test method for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C33/C33M-13. (2013). Standard specification for concrete aggregates. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C127-04. (2004). Test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C128-12. (2012). Test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C131/C131M-14. (2014). Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C136-06. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C138/C138M-14. (2014). Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C142/C142M-10. (2010). Standard test method for clay lumps and friable particles in aggregates. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C191-13. (2013). Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C192/C192M-14. (2014). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C494/C494M. (2013). Standard specification for chemical admixtures for concrete. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C618. (2012). Standard specifi- cation for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM C1218/C1218M-99. (2008). **Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete**. West Conshohocken, Pennsylvania

ASTM D5370-14. (2014). **Standard specification for pozzolanic blended materials in construction applications**. West Conshohocken, Pennsylvania

BS EN 933-3. (2012). **Tests for geometrical properties of aggregates Part 3: Determination of particle shape-flakiness index**. British Standards Institution. London

BS EN 933-4: 2008. (2009). **Tests for geometrical properties of aggregates Part 4: Determination of particle shape - shape index**. British Standards Institution. London

BS 812-112. (1990). **Testing aggregates - method for determination of aggregate impact value (AIV)**. British Standards Institution. London

Freidin, C. (1999). Behaviour of silica-concrete based on quartz bond in sulphuric acid. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 21. pp. 317-323

Gao X. X., Cyr M., Multon S. and Sellier, A. (2013). A comparison of methods for chemical assessment of reactive silica in concrete aggregates by selective dissolution. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 37. pp. 82-94

Hong, L., Gu, X. and Feng, L. (2014). Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 65. pp. 338-349

ISRM. (2007). **The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring:** 1974-2006, Ulusay R. and Hudson J.A. ed.

Kilic, A., Atis, C. D., Teymen, A., Karahan, O., Ozcan, F., Bilim, C. and Ozdemir, M. (2008). The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. **Cement & Concrete Composites**. Vol. 30. Issue. 4. pp. 290-296

Neville, A. M. (2011). **Properties of concrete**. 5th ed. Pearson. Education Limited. England

SDPT. 1202-07. (2007). **Standard test method for resistance to degradation of coarse Aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine**. Department of Public Works and Town & Country Planning. Ministry of Interior (in Thai)

SDPT. 1322-07. (2007). **Standard specification for durability and service life of concrete**. Department of Public Works and Town & Country Planning. Ministry of Interior (in Thai)

Suntharanurak, J. and Tonnayopas, D. (2014). Strength development and sulfate durability of waste clear bottle glass aggregate concrete containing sugarcane bagasse ash. **Journal of Industrial Technology**. Vol. 10. No. 1. pp. 63-75 (in Thai)

Tonnayopas, D. (2010). **Minerals and rocks**. 1st ed. Dept. of Mining and Materials Engineering. Prince of Songkla University. p. 344 (in Thai)

Tonnayopas, D. (2012). **Manual laboratory of engineering geology**. 3rd ed., Dept. of Mining and Metallurgical Engineering. Prince of Songkla University. p. 100 (in Thai)

Tonnayopas, D., Masniyom, M. and Laopreechakul, S. (2004). Influence of oil palm shell fuel ash on strength and durability of mortar. **The 3rd PSU Engineering Conf., 8-9 Dec. 2004**. Prince of Songkla University. pp. MN1-MN6. (in Thai)

Tonnayopas, D., Chankeaw, P., and Maneedap, W. (2006). Behaviour of cement paste blended with rice husk ash and oil palm fiber fuel ash by using attritor mill. **Proceedings of the 11th National Convention on Civil Engineering**. May 20-22, 2005, Merlin Beach Resort Hotel, Phuket, Thailand, p. 6 (in Thai)

Tonnayopas, D. and Laopreechakul, S. (2006). Utilization of oil palm shell ash as mineral admixture in Portland cement mortar, In **Proc. 1st Inter. Conf. Hazardous Waste Management for a Sustainable Future**. p. 7. Bangkok : Century Park Hotel

Tonnayopas, D., Nilrat, F., Putto, K. and Tantiwitayawanich, J. (2006). Effect of oil palm fiber fuel ash on compressive strength of hardening concrete. In **Proc. 4th Thailand Materials Science and Technology Conf**. pp. 64-66. Pathumthani : Thailand Science Park Convention Center

Torrijos, M. C., Giaccio, G. and Zerbino, R. (2013). Mechanical and transport properties of 10 years old concretes prepared with different coarse aggregates. **Construction and Building Materials**. Vol. 44. pp. 706-715

Wu, K.-R., Chen, B., Yao, W. and Zhang, D. (2001). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. Vol. 31. Issue 2. pp. 1421-1425

Yellishetty, M., Karpe V., Reddy, E. H., Subhash, K. N. and Ranjith, P. G. (2008). Reuse of iron mineral wastes in civil engineering constructions. **Resources, Conservation and Recycling**. Vol. 52. No. 11. pp. 1283-1289