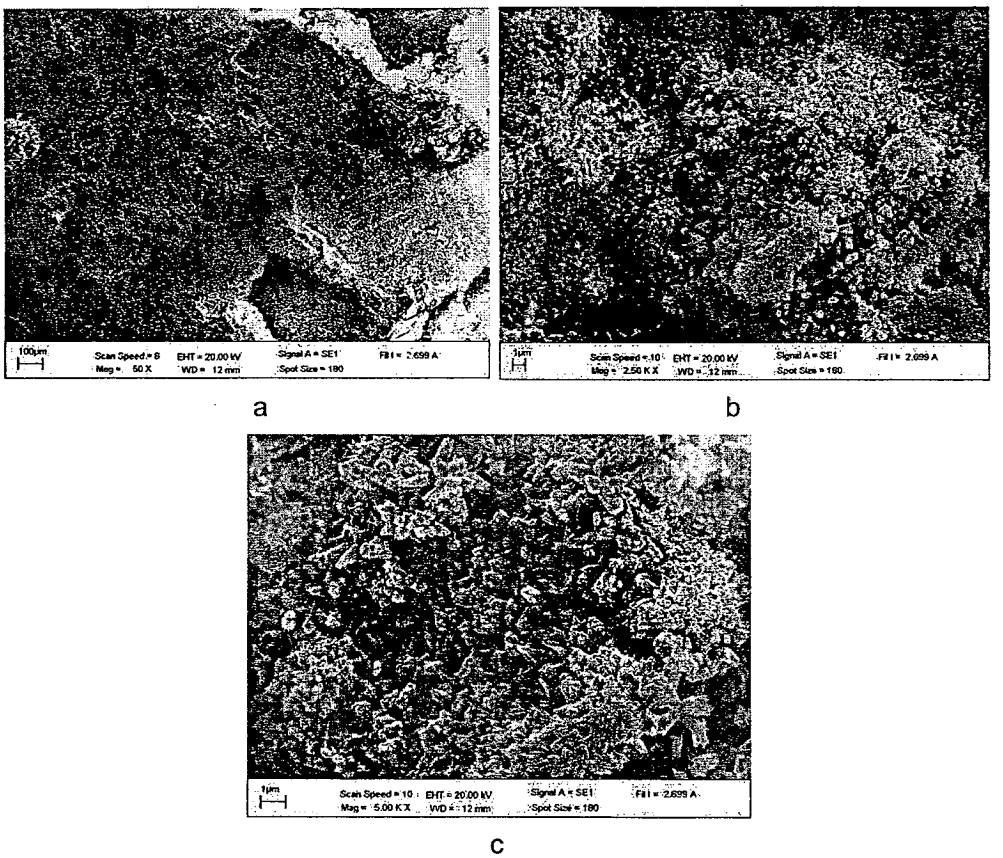
บทที่ 4

ผลการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของนาโนซิลิก้า

1. การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ส่องดูขนาด รูปร่างของอนุภาคนาโนซิลิก้า และผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของซีเมนต์มอร์ต้า

จากการทดสอบส่องดูลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างภายในของซีเมนต์มอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/b) 0.55 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งประเภทที่ชอบน้ำ (HI) และประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ0-2 ที่ตัวอย่างทดสอบอายุ 60 วัน สังเกตพบลักษณะการเปลี่ยนแปลงภายในของซีเมนต์มอร์ต้าดังแสดงดังภาพ 77-81 เมื่อพิจารณาภาพที่ได้จากการทดสอบจะพบว่า ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าที่มีปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) มีลักษณะพื้นผิวภายนอกโดยทั่วไปมีรูพรุนบ้างเพียงเล็กน้อย (ที่กำลังการขยาย 50x) และมีองค์ประกอบหลักประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอื่นๆ เมื่อทำการเพิ่มกำลังขยายจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและช่วยเชื่อมผสานระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ช่วยลดช่องว่างรูพรุน ให้กำลังอัดเพิ่มมากขึ้น ลดการซึมผ่านของน้ำและอากาศ

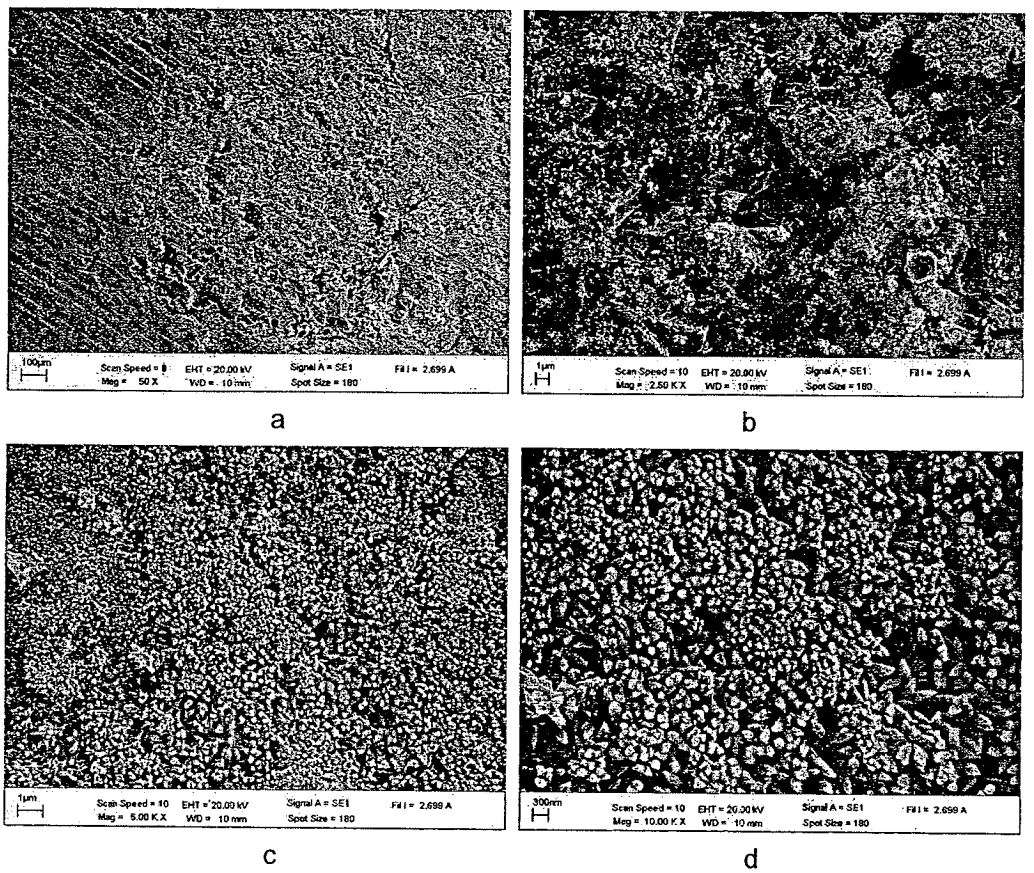


ภาพ 77 ซีเมนต์มอร์ต้าหลัก (OPC) ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x และ c) 5000x เท่า

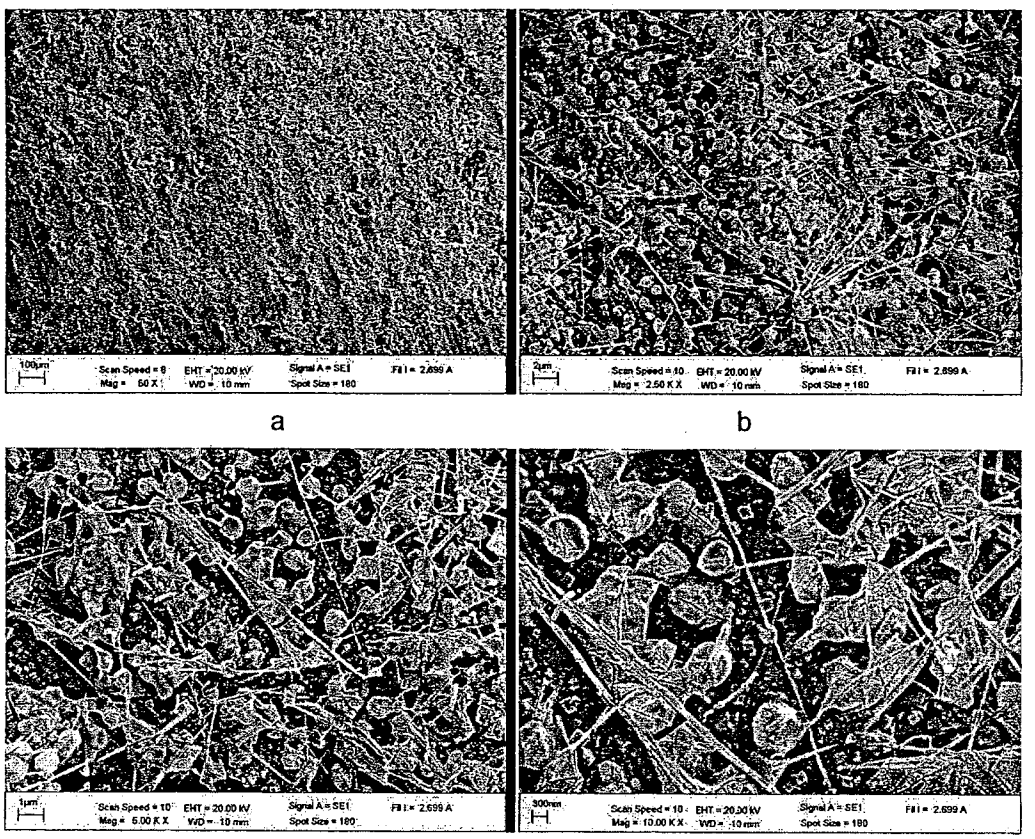
หากพิจารณาซีเมนต์มอร์ต้าที่มีแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 1, 2 (โดยการผสมแบบผงแห้ง) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และก้อนตัวอย่างอายุ 60 วัน สังเกตพบลักษณะกายภาพ ดังภาพ 74 (c-d) ภาพ 79 พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าร้อยละ 2 (ภาพ 78 a-d) ช่วยเพิ่มความแน่นให้เนื้อของซีเมนต์มอร์ต้ามากกว่าส่วนผสมหลัก และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 2500x, 5000x,10000x ตามลำดับ จะพบผลึกขนาดเล็กมากมายก่อตัวขึ้น สลับกันไปมาอย่างซับซ้อน ในตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าร้อยละ 2 ซึ่งน่าจะสามารถช่วยลดความพรุนทำให้ซีเมนต์มอร์ต้ามีความทึบน้ำมากยิ่งขึ้น และกำลังอัดสูงขึ้น

สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 1 โดยผสมแบบทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำความเข้มข้น 29 g/l พบว่า ลักษณะทางกายภาพภายในปรากฏเป็นผลึกก้อนเหลี่ยมมุมมากมายบนพื้นผิวของซีเมนต์มอร์ต้า และถูกเชื่อมโยงด้วยผลึกที่มีลักษณะเป็นแทงยาวเชื่อมระหว่างผลึกดังกล่าว เชื่อว่าการใช้งานนาโนซิลิก้าในลักษณะนี้

สามารถช่วยให้การกระจายตัวของนาโนซิลิก้าได้ดีกว่าจึงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่า และเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่า สังเกตได้จากการเกิดผลึกดังกล่าวแทรกและกระจายทั่วไปที่บริเวณพื้นผิวของนาโนซิลิก้า ซึ่งน่าจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของซีเมนต์เพสสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดที่สูงขึ้นดังแสดงในหัวข้อต่อไป



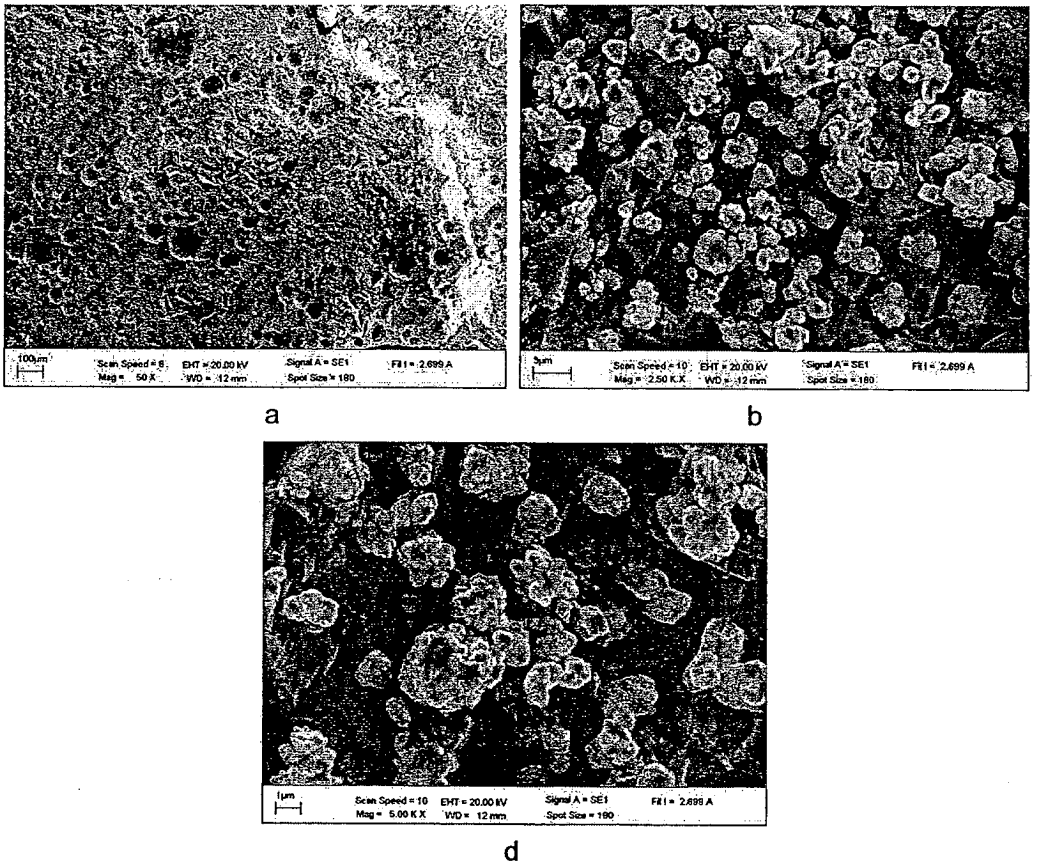
ภาพ 78 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 2 ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x, c) 5000x, d) 10000x ตามลำดับ (ผสมแบบผง)



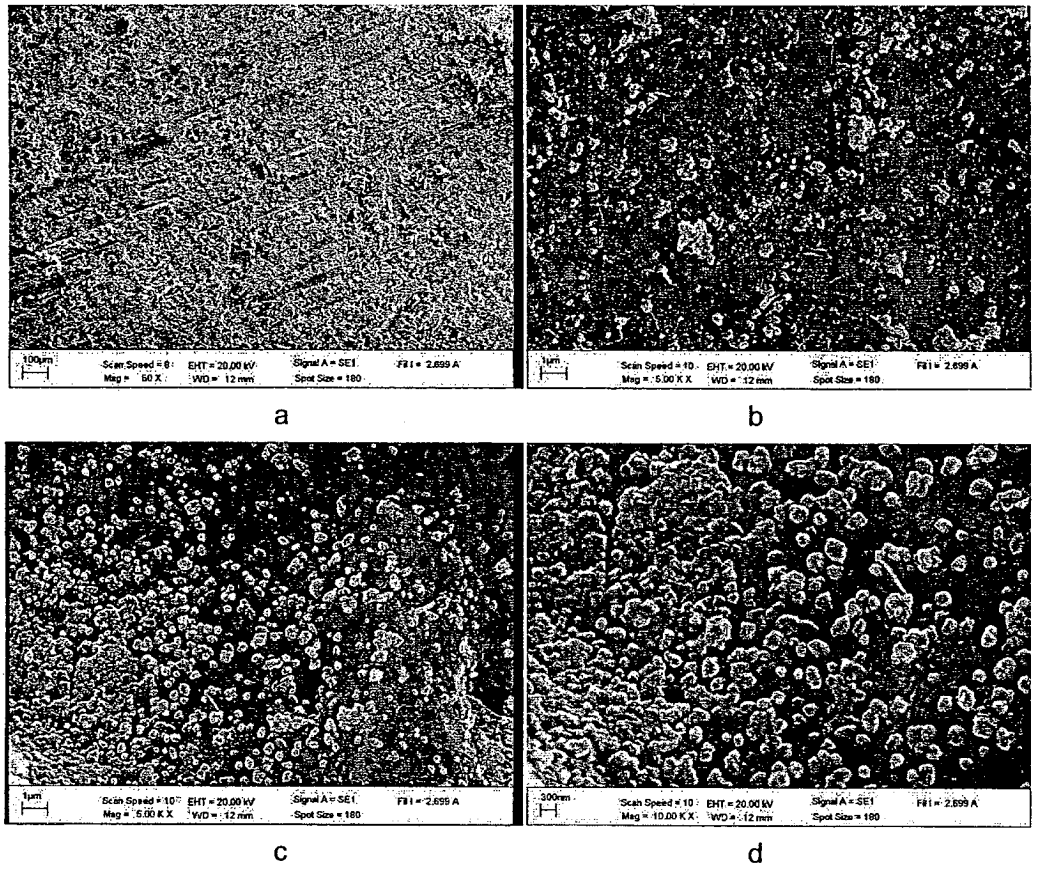
ภาพ 79 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 1 ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x, c) 5000x, d) 10000x ตามลำดับ (ผสมแบบแขวนลอยความเข้มข้น 29 g/l)

ภาพ 80-81 แสดงลักษณะทางภาพของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ1 และ2 โดยผสมแบบแห้งที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่ตัวอย่างอายุ 60 วัน จะเห็นได้ว่าเกิดรูพรุนเป็นจำนวนมากในเนื้อของซีเมนต์มอร์ต้า ซึ่งอาจเกิดมาจากฟองอากาศที่ถูกกักในเนื้อของซีเมนต์เพสตั้งแต่ซีเมนต์เพสยังไม่แข็งตัว โดยฟองอากาศนี้ก่อตัวขึ้นด้วยความไม่ชอบน้ำของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำที่ชอบเกาะกับอากาศมากกว่าน้ำ ซึ่งเป็นไปได้ว่าขณะที่ทำการผสมนั้นอากาศจะเข้ามาเกาะติดกับอนุภาคนาโนซิลิก้าที่ไม่ชอบน้ำ มากพอที่จะเกิดเป็นกระเปาะอากาศขึ้น [41] เมื่อเพิ่มกำลังขยาย จะพบว่าบางส่วนของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำยังคงหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาสอดคล้องกับอัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่น่าจะต่ำเนื่องจากพื้นผิวของนาโนซิลิก้าถูกเคลือบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำและปิดกันการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิค

แต่สำหรับการใช้งานนาโนซิลิก้าแบบทำให้แขวนลอยในน้ำก่อนน้ำไปใช้งาน ที่ร้อยละการแทนที่ 1 (ความเข้มข้น 29 g/l) จะพบผลึกของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคเป็นจำนวนมาก และกระจัดกระจายอยู่บริเวณทั่วไปแต่ปริมาณจะไม่มากเท่ากับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) แสดงว่าในใช้งานนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำในรูปแบบแขวนลอยน้ำให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้งานแบบผง อีกทั้งไม่สังเกตพบรูพรุนอันเนื่องมาจากฟองอากาศ เป็นไปได้ว่าการทำนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำให้แขวนลอยในน้ำก่อนน้ำไปใช้งานเปลี่ยนแปลงเคมีพื้นผิวของสารประกอบอินทรีย์ที่เคลือบผิวของนาโนซิลิก้าทำให้นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำนั้นชอบน้ำมากขึ้นกักอากาศน้อยลงและทำปฏิกิริยาปอซโซลานิคได้ดีขึ้น



ภาพ 80 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 2 ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x, c) 5000x ตามลำดับ (ผสมแบบผง)



ภาพ 81 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 1 ที่กำลังขยาย a) 50x, b) 2500x, c) 5000x, d) 10000x ตามลำดับ (ผสมแบบแขวนลอย)

2. **ปฏิกิริยาปอซโซลานนิค**

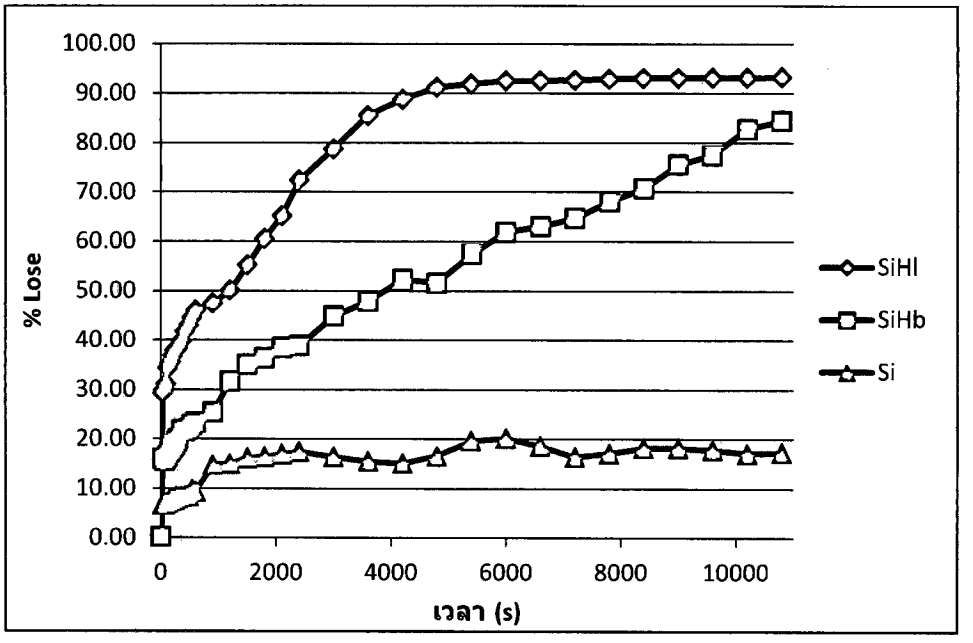
ปฏิกิริยาปอซโซลานนิคเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) กับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ช่วยในการปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็น การเพิ่มความทึบ ลดการซึมผ่านของน้ำและอากาศ เพิ่มกำลังการรับแรง และเพิ่มความคงคงให้กับคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวไว้ในขั้นต้น

หัวข้อนี้การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิคของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) และไมโครซิลิก้า (Si) ที่ใช้งานอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วไป ทั้งการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาในทางตรงและทางอ้อม เช่น การศึกษาการสูญเสียประจุไฟฟ้าของ

ปฏิกิริยาปอซโซลานนิคระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO_2) กับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของวัสดุในข้างต้น (ทางตรง) และการวัดดัชนีการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า (ทางอ้อม) ซึ่งจากการทดสอบ พบว่า ได้ผลดังต่อไปนี้

การศึกษาความเป็นปอซโซลานของวัสดุจากการวัดประจุไฟฟ้า

การศึกษาการทำปฏิกิริยาปอซโซลานนิคจากการวัดประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นการวัดการสูญเสียประจุทางไฟฟ้าของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(HO)_2$) ในระบบ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) และไมโครซิลิก้า (Si) จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิคของวัสดุ พบว่า ที่เวลาการทดสอบ 11000 วินาที มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียประจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบโดยเรียงลำดับจากมาก-น้อยมีค่าดังนี้ นาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) และไมโครซิลิก้า (Si) มีค่าเท่ากับ 93, 85 และ17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (ภาพ 82) จากภาพแสดงนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) มีความเป็นปอซโซลานมากที่สุด เนื่องจากมีขนาดของอนุภาคที่เล็กที่สุด พื้นที่ผิวสัมผัสมาก ปริมาณซิลิก้าออกไซด์สูงจึงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง สำหรับนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) มีความเป็นปอซโซลานอยู่ในลำดับที่สอง ณ ที่เวลา 11000 วินาที จะเห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาเกิดแบบค่อยเป็นค่อยไป เนื่องจากนาโนซิลก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำมีขนาดเล็ก พื้นผิวสัมผัสมาก แต่ด้วยลักษณะที่พื้นผิวไม่ชอบสัมผัสกับน้ำจึงมีส่วนทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้า และน้อยกว่านาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ อีกทั้งพื้นผิวซิลิก้าบางส่วนอาจจะถูกปิดกั้นด้วยสารอินทรีย์ที่เคลือบทำให้เกิดความไม่ชอบน้ำ ในขณะที่ไมโครซิลิก้ามีความเป็นปอซโซลานน้อยที่สุดอาจเนื่องมาจากผลของขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ และพื้นผิวสัมผัสน้อยกว่านาโนซิลิก้าทั้งสองชนิด จึงส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างช้าๆ



ภาพ 82 การสูญเสียประจุทางไฟฟ้าของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO_2) ในระบบ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานนิก

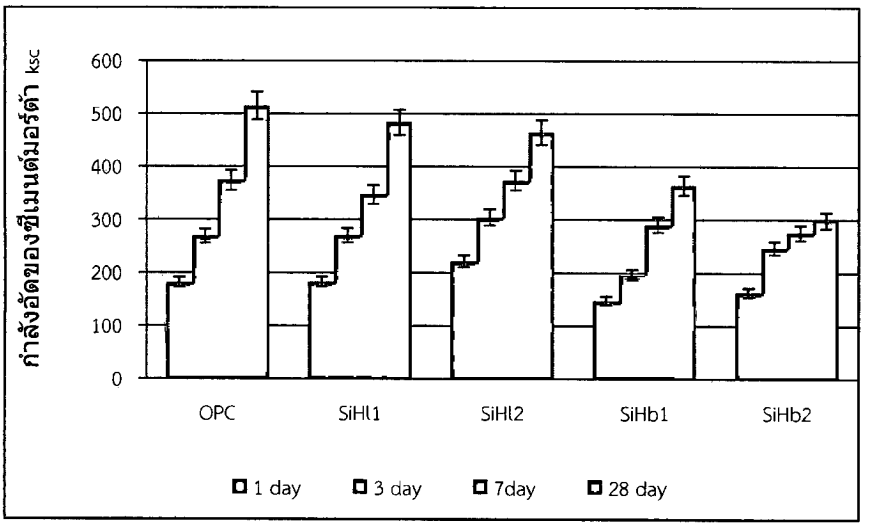
การศึกษาความเป็นปอซโซลานของวัสดุจากดัชนีการพัฒนากำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้าเป็นหนึ่งในทางเลือก ที่ใช้วัดความเป็นปอซโซลานของวัสดุในเบื้องต้นเท่านั้น แต่ไม่สามารถระบุค่าความเป็นปอซโซลานได้อย่างเป็นชัดเจน ใช้ได้เพียงเปรียบเทียบความเป็นปอซโซลานระหว่างตัววัสดุเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากนอกจากปฏิกิริยาปอซโซลานนิคแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังเช่น การกักฟองอากาศ หรือความพรุ่นของซีเมนต์มอตาร์ด้วย ซึ่งล้วนแล้วแต่ถูกกระทบด้วยการใส่นาโนซิลิก้าแบบต่างๆ ทั้งสิ้น

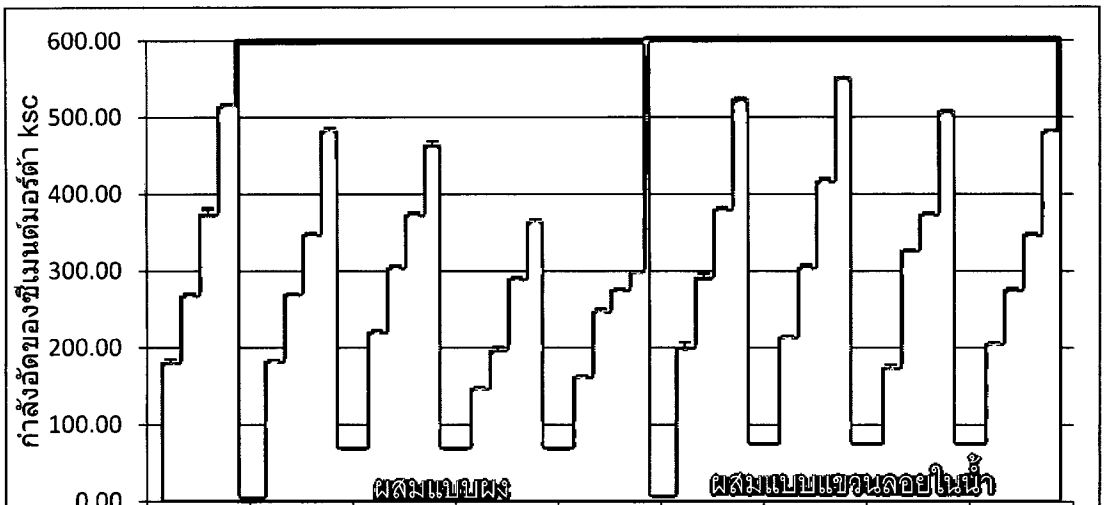
ในหัวข้อนี้เกี่ยวข้องกับศึกษาแนวโน้มของดัชนีการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภท ร้อยละ 1-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความเข้มข้น 14.9-29 กรัมต่อลิตร (การทดสอบโดยแบ่งการวิธีการผสมออกเป็นสองลักษณะ คือ การใช้นาโนซิลิก้าผสมแบบผงรวมกับปูนซีเมนต์ และการใช้นาโนซิลิก้ารูปแบบสารแขวนลอยในน้ำแล้วจึงนำไปผสม) ก้อนตัวอย่างทดสอบใช้ทรงลูกบาศก์ขนาด 5*5*5 เซนติเมตร ถอดแบบที่อายุ 24±0.5 ชั่งโมง บ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO_2) ตลอดอายุการทดสอบ ทดสอบที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน จากการทดสอบได้ผลดังภาพ 83

จากกราฟดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการพัฒนากำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้าที่อายุต่างๆ สามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าที่มีความแตกต่างทางพื้นผิวสองชนิด คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ และนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (ภาพ 83) ที่อายุการทดสอบ 1 วัน ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 1 และ2 มีค่าเป็น 181.8, 183.26, 221.54,148, 163 ksc. ตามลำดับ ที่อายุการทดสอบ 3 วัน มีค่าเป็น 268.73, 270.10, 304.00, 196.50, 247.37 ksc. ที่อายุการทดสอบ 7 วัน มีค่าเป็น 374.32, 347.50, 373.77, 290.64, 275.91 ksc. ที่อายุการทดสอบ 28 วัน มีค่าเป็น 515.11, 483.54, 464.83, 364.66, 299.01 ksc. จากผลการทดสอบพบว่า ในช่วงอายุต้น-ปลาย ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลักมีอัตราการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากซีเมนต์มอร์ต้าในช่วงอายุน้อยกว่า 3 วัน การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์และน้ำยังไม่สมบูรณ์ จึงมีรูพรุนขนาดเล็กๆ เป็นจำนวนมากในเนื้อของซีเมนต์มอร์ต้า ความสามารถในการรับแรงอัดจึงน้อย แต่ช่วงอายุปลาย (28 วัน) ปฏิกิริยาระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์และน้ำ ดำเนินไปมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ตามทฤษฎี ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นช่วยอุดช่องว่างคะปิลลารี บางส่วนให้มีขนาดเล็กลง เพิ่มความทึบน้ำ เพิ่มเนื้อแน่น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่หากนำไปเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำร้อยละ 1 และ 2 ช่วงอายุต้น (อายุ1 และ 3 วัน) จะพบว่า ค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลักมีค่าน้อยกว่า อาจเนื่องจากนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ มีขนาดเล็กมาก พื้นผิวสัมผัสสูง (ตาราง 4) ช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นสูงในช่วงอายุต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวจึงช่วยลดความพรุน เพิ่มความทึบ กำลังอัดจึงมีค่าสูง [16, 19, 26, 27] แต่สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำร้อยละ1และ2 เมื่อเปรียบเทียบค่ากับซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำจะมีค่าที่ต่ำที่สุด เนื่องจากนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำจะมีลักษณะพื้นผิวสัมผัสหลีกเลี่ยงที่จะสัมผัสกับน้ำเป็นผลให้เพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมรวม เกิดปริมาณน้ำอิสระในช่องว่างสูง มีรูพรุนและความพรุนสูงจากการกักฟองอากาศ (ภาพ 88 และภาพ 80 a) ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง จากภาพ 84 ที่แสดงผลทดสอบดัชนีการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่อายุการทดสอบต่างๆ หากทำการเปรียบเทียบวิธีการใช้งานนาโนซิลิก้าที่แตกต่างกัน พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองชนิด ผสมแบบแขวนลอยในน้ำทำให้ดัชนีการพัฒนากำลังอัดมีค่าสูงกว่าวิธีผสมนาโนซิลิก้า

แบบผง ทุกอายุการทดสอบ อาจเนื่องจาก นาโนซิลิก้าเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กมากเมื่อผสมแบบผง บางส่วนของอนุภาคอาจจับตัวเป็นกลุ่ม แต่หากทำให้อยู่ในรูปแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปใช้งาน อนุภาคจะกระจายตัวได้ดีกว่า จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว สมบูรณ์และทั่วถึงได้ดีกว่า จึงสามารถช่วยลดรูพรุนในเนื้อซีเมนต์มอร์ต้าส่งผลให้มีกำลังอัดที่สูงกว่า นอกจากนี้สำหรับนาโนซิลิก้าแบบไม่ชอบน้ำการผสมแบบผงจะทำให้เกิดการกักฟองอากาศซึ่งลดกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอตาร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพ 83 ดัชนีการพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ต้า (ผสมแบบผงนาโนซิลิก้า) อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 บ่มด้วยน้ำที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมไดกไซด์



	OPC	HI1	HI2	Hb1	Hb2	HI14.5 g/l(0.5)	HI29 g/l(1)	Hb14.5 g/l(0.5)	Hb29 g/l(1)
1 day	181.80	183.26	221.54	148.02	163.10	199.80	214.39	175.33	206.20
3 day	268.73	270.10	304.45	196.50	247.37	292.22	304.45	326.20	275.91
7day	374.32	347.50	373.77	290.64	275.91	380.46	417.39	373.77	347.94
28 day	515.11	483.54	464.83	364.66	299.01	524.63	553.18	508.32	481.14

ภาพ 84 ดัชนีการพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ต้า

การศึกษาค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า

การทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้าที่ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) และนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 0.5, 1 และ 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ขณะทำการทดสอบมีการควบคุมที่ 25±1 °c จากการทดสอบได้ค่าดังภาพ 85 แกนแนวราบ คือ ชื่อส่วนผสม แกนในแนวดิ่ง คือ ค่าร้อยละการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า ในทดสอบทำการศึกษาผลของวัสดุดังต่อไปนี้

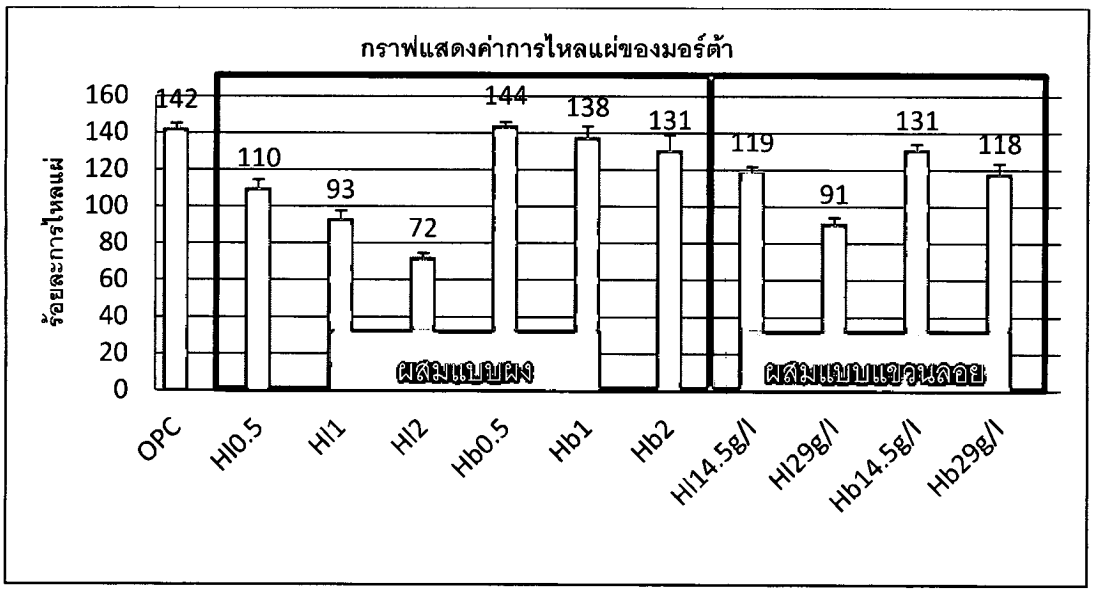
การศึกษาผลประเภทพื้นผิวของนาโนซิลิก้าต่อค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า พบว่าค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 0.5, 1, 2 และส่วนผสมหลัก (OPC) มีค่าการไหลแผ่ดังนี้ 110, 93, 72, 144, 138, 131 และ142 เปอร์เซ็นต์ (ตามภาพ 85) ตามลำดับ สำหรับการผสมแบบทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำ ก็ได้ผลการทดสอบในแนวทางเดียวกัน โดยมีค่าการทดสอบมีค่าการไหลของซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำและประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ปริมาณ 14.5,29 กรัมต่อลิตร ดังนี้ 119, 91, 131 และ 118 เปอร์เซ็นต์ (ภาพ 85) จากการทดสอบพบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทมีค่าการไหลแผ่น้อยกว่า

ส่วนผสมหลัก (OPC) เนื่องจาก นาโนซิลิก้าเป็นวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร และมีพื้นผิวสัมผัสมากและสามารถดูดน้ำให้ติดกับพื้นผิวได้ (เป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ) ส่งผลต่อปริมาณน้ำอิสระลดลง อีกทั้งด้วยลักษณะทางรูปร่างของนาโนซิลิก้าเป็นเหลี่ยมมุมจึงทำให้เกิดการขัดกันระหว่างอนุภาค ทั้งสองปรากฏการณ์ส่งผลให้การไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) มีความข้นเหลวต่ำกว่าส่วนผสมหลัก แต่หากทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) มีค่าการไหลแผ่น้อยกว่านาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) อาจเนื่องมาจากนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทมีความแตกต่างกันทางพื้นผิวการสัมผัสที่มีความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำมีลักษณะพื้นผิวสัมผัสหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระมีปริมาณสูงกว่าประเภทที่ชอบน้ำ ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำจึงมีค่าการไหลแผ่สูงกว่าซึ่งแตกต่างกับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ มีขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสัมผัสที่ชอบน้ำมากว่านาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้มีค่าการไหลแผ่ที่น้อยกว่า

การศึกษาผลปริมาณการแทนที่นาโนซิลิก้าต่อค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า จะเห็นว่าจากภาพ 85 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ และความเข้มข้นของนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภท มีผลทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง โดยจะแปรผกผันตามปริมาณของการใช้งาน อาจเนื่องมาจากความละเอียด พื้นที่ผิวสัมผัส ของอนุภาคนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภท เมื่อทำการเพิ่มปริมาณการแทนที่ส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระลดลง โดยปริมาณน้ำบางส่วนจะเกาะติดกับอนุภาคของนาโนซิลิก้า อีกประการหนึ่ง คือ ในการทดสอบเลือกใช้การแทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลก้าเมื่อเปรียบเทียบผลของ ขนาดของอนุภาคและพื้นผิวของวัสดุทั้งสองชนิดแล้วนาโนซิลิก้าจะมีปริมาณพื้นผิวสัมผัสที่มากกว่า (ดังตาราง 3 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์, ตาราง 4) จึงส่งผลให้มีความต้องการน้ำในปริมาณที่มากกว่าที่ความเข้มข้นเหลวเดียวกัน และมีความสมารถในการไหลน้อยกว่าเมื่อใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน

การศึกษาผลวิธีการผสมนาโนซิลิก้าต่อค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการใช้งานนาโนซิลิก้าผสมในซีเมนต์มอร์ต้าที่มีความแตกต่างกันสองลักษณะ คือ การผสมแบบใช้ผง คือ การนำนาโนซิลิก้าร่วมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.5, 1 และการทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปใช้งานที่มีความเข้มข้น 14.5, 29 กรัมต่อลิตร เทียบเป็นปริมาณการแทนที่เท่ากับร้อยละ 0.5, 1 ของการแทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบได้ค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้า

ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ร้อยละ 0.5, 1 ผสมแบบทั่วไป และผสมแบบแขวนลอยในน้ำ เท่ากับ 110, 93, 144, 138, 119, 91, 131 และ118 เปอร์เซ็นต์ (ดังภาพ 85) เมื่อเปรียบเทียบซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำผสมแบบทั่วไป ที่มีการแทนที่ร้อยละ 0.5, 1 มีค่าการไหลแผ่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กับการผสมแบบแขวนลอยในน้ำ แต่ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของวิธีการผสมทั้งสองวิธีการทดสอบ การผสมด้วยวิธีทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำมีค่าการไหลแผ่ที่ต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ต้าผสมด้วยวิธีทั่วไป อาจเนื่องมาจากการเตรียมนาโนซิลิก้าผสมแบบแขวนลอยในน้ำ อาจเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวทำให้สมบัติพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำของนาโนซิลิกามีความไม่ชอบน้ำลดลง จึงมีน้ำอิสระบางส่วนเกาะที่ผิวของอนุภาคและส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง



ภาพ 85 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า

การศึกษาค่าระยะเวลาการก่อตัว

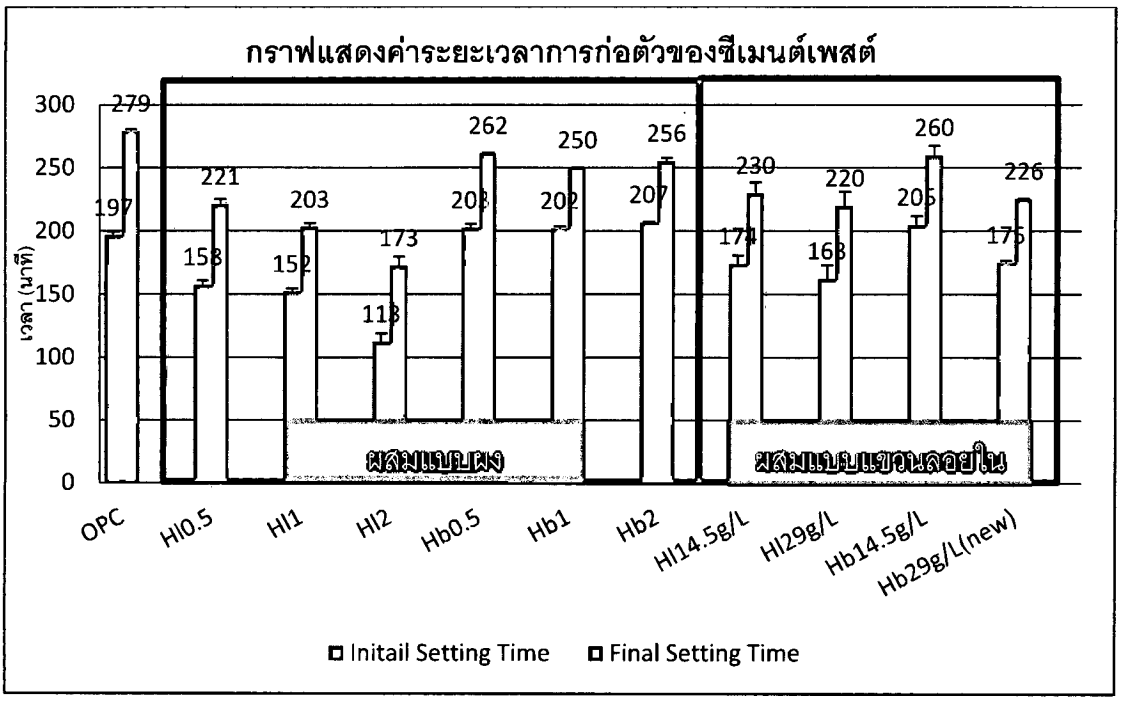
การศึกษาการก่อตัวซีเมนต์เพสต์

การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.35 ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ร้อยละ 0.5, 1 และ 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่เป็นส่วนผสมหลัก ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) และประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0.5, 1, 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ (ผสมแบบผง) และซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำและประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (ผสมแบบทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำ) ใช้ในความเข้มข้น 14.5, 29 กรัมต่อลิตร ผลทดสอบได้ค่าดังภาพ 86

การศึกษาผลของปริมาณการแทนที่นาโนซิลิก้าต่อค่าการก่อตัว พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่เป็นส่วนผสมหลัก และ ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วนนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 0.5, 1, 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเท่ากับ 279, 221, 203, และ173 นาที ตามลำดับ กล่าว คือ มีค่าระยะเวลาการก่อตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณการไแทนที่ที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก (ระดับนาโนเมตร) ทำให้มีปริมาตร และพื้นผิวสัมผัสที่มาก เมื่อเทียบที่ปริมาณน้ำหนักที่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ก็ทำให้เพิ่มปัจจัยดังกล่าวด้วย ทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทชอบน้ำจึงมีปริมาณน้ำอิสระในระบบที่ลดลง และจะมีแนวโน้มค่าระยะเวลาการก่อตัวที่จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งาน สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 0.5, 1, 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีระยะเวลาการก่อตัว 262, 250, 256 นาที ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการแทนที่ พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจาก ในการใช้งานจะเลือกใช้งานการแทนที่ในปริมาณที่น้อย และนาโนซิลิก้าประเภทนี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยเนื่องจากพื้นผิวสัมผัสหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ ผลที่เกิดปฏิกิริยาโดยส่วนใหญ่จึงเป็นผลจากปูนซีเมนต์และน้ำ

จากการศึกษาผลของประเภทพื้นผิวของนาโนซิลิก้าต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) มีค่าระยะเวลาการก่อตัวที่น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ที่อัตราส่วนการแทนที่ที่เท่ากัน เนื่องจากอนุภาคของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำเป็นวัสดุที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าอนุภาคของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้มีพื้นที่ผิวผัสมาก [27] เป็นผลทำให้มีความต้องการน้ำในปริมาณมากเช่นกัน [20, 22, 23, 24] เพราะน้ำส่วนหนึ่งจะเคลือบผิว

ของอนุภาคนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ และเนื่องด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กจึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับน้ำ (สอดคล้องกับผลการทดสอบค่าการไหลแผ่) จึงเป็นเหตุให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกัน



ภาพ 86 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์แต่ละส่วนผสมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำและประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ร้อยละ 0.5,1 และ 2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ร้อยละ (w/b) 0.35

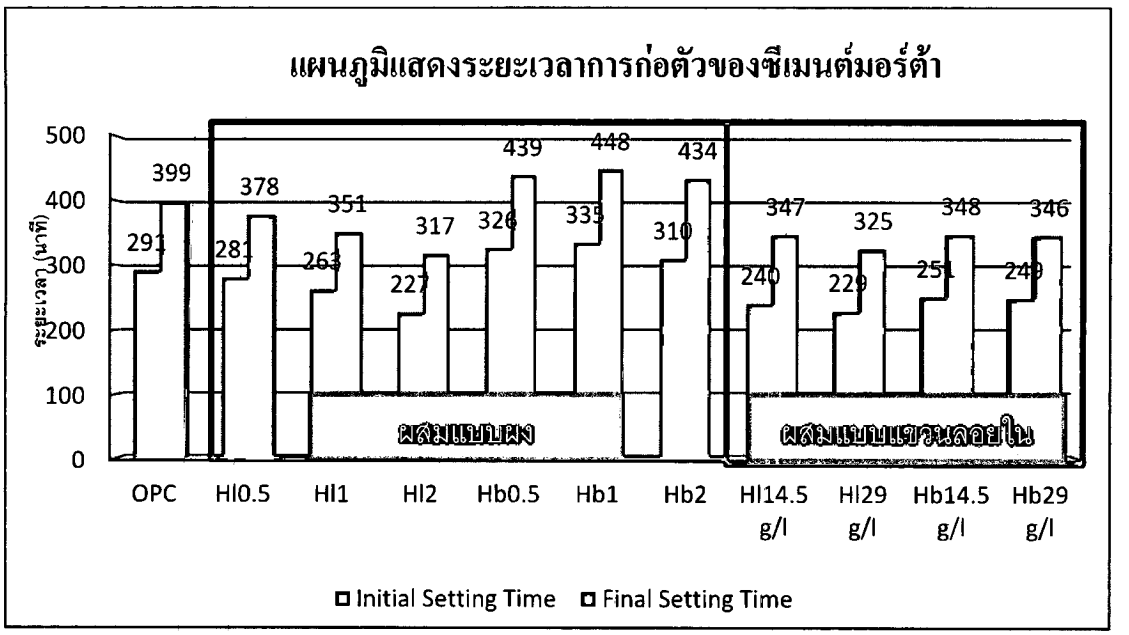
การศึกษาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์มอร์ต้า

การศึกษาอิทธิพลของนาโนซิลิก้าต่อค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.55 ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 0.5, 1, 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) และประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0.5, 1, 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ (ผสมแบบผง) มีค่าการก่อตัวสุดท้ายดังนี้ 399, 378, 531, 317, 439, 448, 434 นาที ตามลำดับ และซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) และประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) (ผสมแบบทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำ) ความเข้มข้น 14.5, 29.0 กรัมต่อลิตร

(เท่ากับร้อยละการแทนที่ 0.5 และ1) มีค่าเท่ากับ 347, 325, 348, 346 นาที ตามลำดับ จากผลการทดสอบเปรียบเทียบผลของปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิก้าทั้งสองชนิดต่อค่าเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้า ดังภาพ 87 พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 0.5, 1, 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่าระยะเวลาการก่อตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณการใช้งาน อาจเนื่องมาจากนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก (ขนาดระดับนาโนเมตร) ทำให้มีปริมาตร และพื้นผิวสัมผัสที่มาก เมื่อเทียบที่ปริมาณน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งานก็ทำให้เพิ่มปัจจัยดังกล่าวด้วย ทำให้ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทชอบน้ำมีปริมาณน้ำอิสระในระบบที่ลดลง และจะมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งาน

การศึกษาผลประเภทพื้นผิวของนาโนซิลิก้าต่อค่าเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้า ดังภาพ 87 แสดงค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้า และ ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำซึ่งมีค่าระยะเวลาการก่อตัวที่น้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ที่อัตราส่วนการแทนที่ที่เท่ากัน เนื่องจากอนุภาคของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำเป็นวัสดุที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าอนุภาคของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้มีพื้นที่ผิวผัสมาก [27] เป็นผลทำให้มีความต้องการน้ำในปริมาณมากเช่นกัน [20, 22, 23, 24] เพราะน้ำส่วนหนึ่งจะเคลือบผิวของอนุภาคนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ และเนื่องด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กจึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับน้ำ จึงเป็นเหตุให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวลดลง

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของวิธีการใช้งานนาโนซิลิก้าทั้งสองแบบ คือ ใช้นาโนซิลิก้าผสมแบบผง และทำให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยก่อนนำไปใช้งาน ได้ผลการทดสอบ คือ การใช้งานนาโนซิลิก้าทั้งสองชนิดในรูปแบบแขวนลอยสามารถเร่งระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์มอร์ต้าได้อย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องจากด้วยขนาดอนุภาคของนาโนซิลิก้ามีการกระจายตัวได้ดีกว่าการใช้งานแบบผง และบางส่วนของนาโนซิลิก้าที่ทำให้แขวนลอยในน้ำต้องใช้ระยะเวลานานถึง 7 วัน จึงมีบางส่วนที่ละลายอยู่กับน้ำเมื่อนำไปผสมกับซีเมนต์มอร์ต้าจึงมีการเกิดปฏิกิริยาที่ง่าย และรวดเร็วกว่าผสมแบบผง จึงสามารถช่วยเร่งระยะเวลาการก่อตัวให้กับซีเมนต์มอร์ต้าได้



ภาพ 87 ค่าการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.55 **อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย** 1:1.55

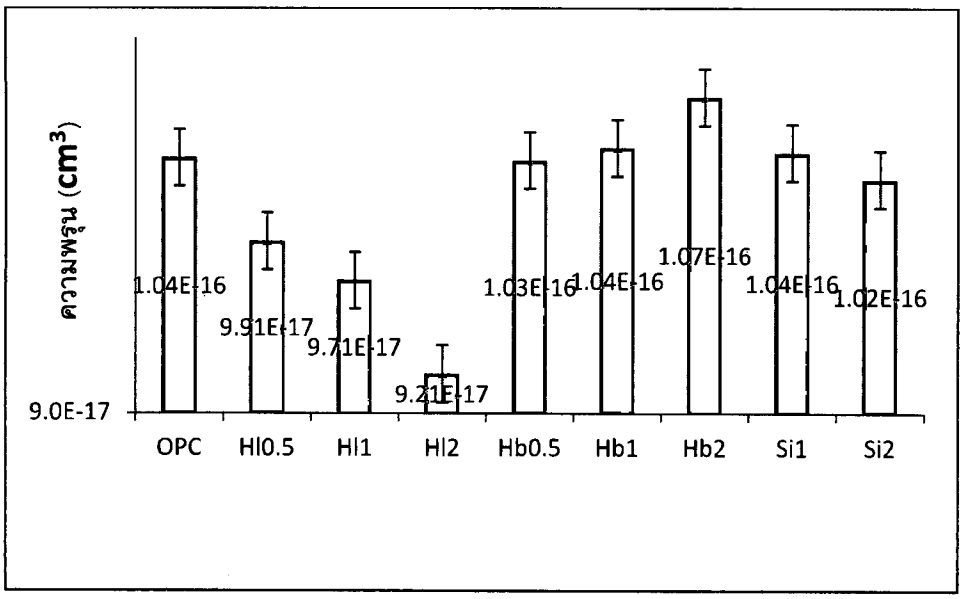
การศึกษาการซึมผ่านของอากาศ

การทดสอบการซึมผ่านอากาศของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภท คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละการแทนที่ 0, 0.5, 1 และ 2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 อายุทดสอบ 60 วัน ก้อนตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอก ขนาด 10*5 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยค่าที่ได้เป็นค่าที่เฉลี่ยจากค่าการทดสอบทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบ (ดังภาพ 88) จากการทดสอบพิจรณาผลของปริมาณการใช้งานนาโนซิลิก้าต่อความพรุนที่เกิดขึ้น พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) มีค่าความความพรุน 1.04×10^{-16} cm^3ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 0.5, 1, 2 มีค่าเท่ากับ 9.91×10^{-17},9.71×10^{-17}, 9.21×10^{-17} cm^3ตามลำดับ ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 0.5, 1, 2 มีค่าเท่ากับ 10.03×10^{-16}, 10.04×10^{-16}, 10.07×10^{-16} cm^3ตามลำดับ ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของซิลิก้าฟูม (Si) ร้อยละ 1, 2 มีค่าเท่ากับ 10.04×10^{-16},10.02×10^{-16} cm^3ตามลำดับ จากผลในข้างต้น พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของซิลิก้าฟูม (Si) และนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) มีค่าความพรุนน้อยกว่าส่วนผสมหลัก (OPC) และค่าความพรุ่นดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งาน โดยเฉพาะการใช้งานนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากนาโนซิลิก้ามีความเป็นปอซโซลานสูง (จากการทดสอบความเป็นปอซโซลานทั้งวิธีวัดประจุไฟฟ้า และดัชนีการพัฒนากำลังอัด)

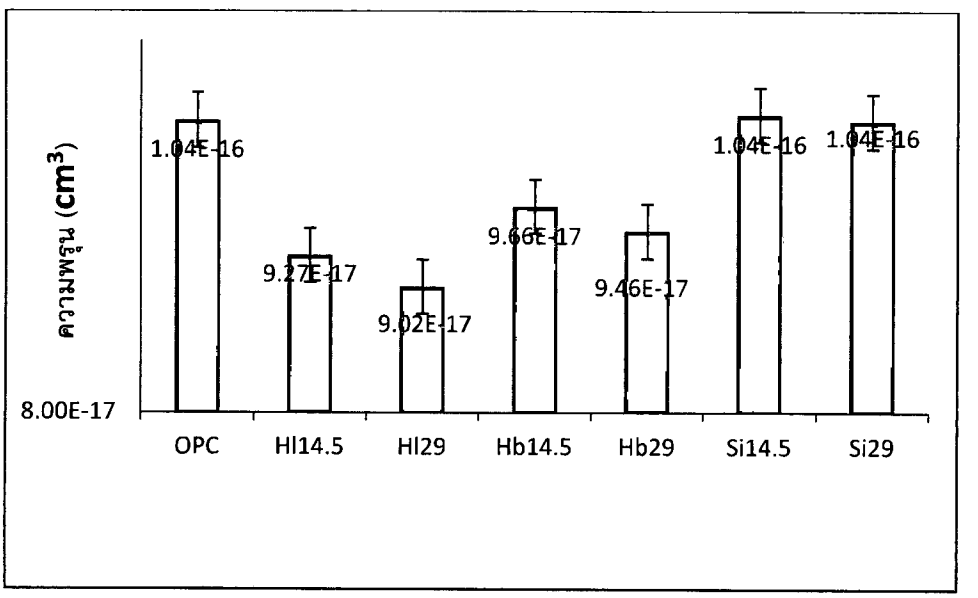
เมื่อซิลิก้าไดออกไซด์ (SiO_2) ที่เป็นองค์ประกอบของซิลิก้าฟูม และนาโนซิลิก้าทำปฏิกิริยากับสารแคลเซียมไฮดรอไซด์ ($Ca(OH)_2$) ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) ช่วยในการเชื่อมประสาน จึงสามารถลดความพรุนได้ แต่การใช้งานซิลิก้าฟูมในการทดสอบนี้ค่อนข้างใช้ในปริมาณที่น้อยจึงเห็นความแต่ต่างน้อยเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ แต่สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ0.5-2 มีค่าความพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งาน อาจเนื่องจากนาโนซิลิก้ามีลักษณะพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงค่อนข้างมีแนวโน้มที่ช้าและเกิดน้อย (การใช้งานผสมแบบผง) อีกทั้งยังสามารถกักฟองอากาศได้จึงทำให้ความพรุนจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มการใช้งาน

พิจารณาผลของประเภทพื้นผิวของนาโนซิลิก้าต่อค่าการซึมผ่านของอากาศ จะพบว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ทุกส่วนผสมที่อัตราการใช้งานที่เท่ากัน มีค่าความพรุนน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ทุกอัตราส่วนที่เปรียบเทียบปริมาณการใช้งานที่เท่ากัน เนื่องจากนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่า พื้นผิวสัมผัสสูงกว่า ความเป็นปอซโซลานสูงกว่า จึงทำให้อัตราการปฏิกิริยาปอซโซลานิค และผลิตภัณฑ์จึงมีโอกาสเกิดที่สูงกว่า ความพรุนจึงมีค่าน้อยกว่า ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับการทดสอบความเป็นปอซโซลานของวัสดุและการทดสอบกำลังอัด

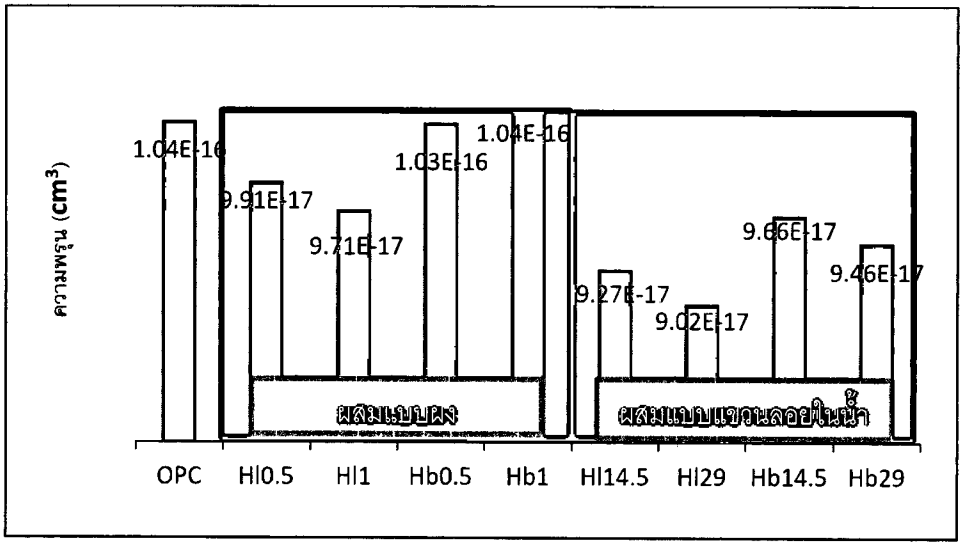
การศึกษาหาความเหมาะสมสำหรับหาวิธีการใช้งานนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน ดังภาพ 90 พบว่า ใช้นาโนซิลิก้าแบบผสมผง และการใช้งานนาโนซิลิก้าแบบทำให้แขวนลอยในน้ำจึงนำไปใช้งาน จากผลการทดสอบ พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทที่ผสมแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปใช้งาน ร้อยละ 0.5, 1 (มีค่าเท่ากับ 14.5, 29 g/l ตามลำดับ) มีค่าความพรุนน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทที่ผสมผงร้อยละ 0.5, 1 อาจเนื่องมาจากผลของการกระจายตัว และผลของการละลายในน้ำของนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภท อีกทั้งการลดการกักตัวของฟองอากาศมนเนื้อของซีเมนต์มอตาร์



ภาพ 88 ความความพรุนของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (การใช้งานแบบผง) ทดสอบที่ตัวอย่างอายุ 60



ภาพ 89 ความความพรุนของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ทำให้แขวนลอยก่อนนำไป) ทดสอบที่ตัวอย่างอายุ 60 วัน



ภาพ 90 ความความพรุนของซีเมนต์มอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ทดสอบที่ตัวอย่างอายุ 60 วัน

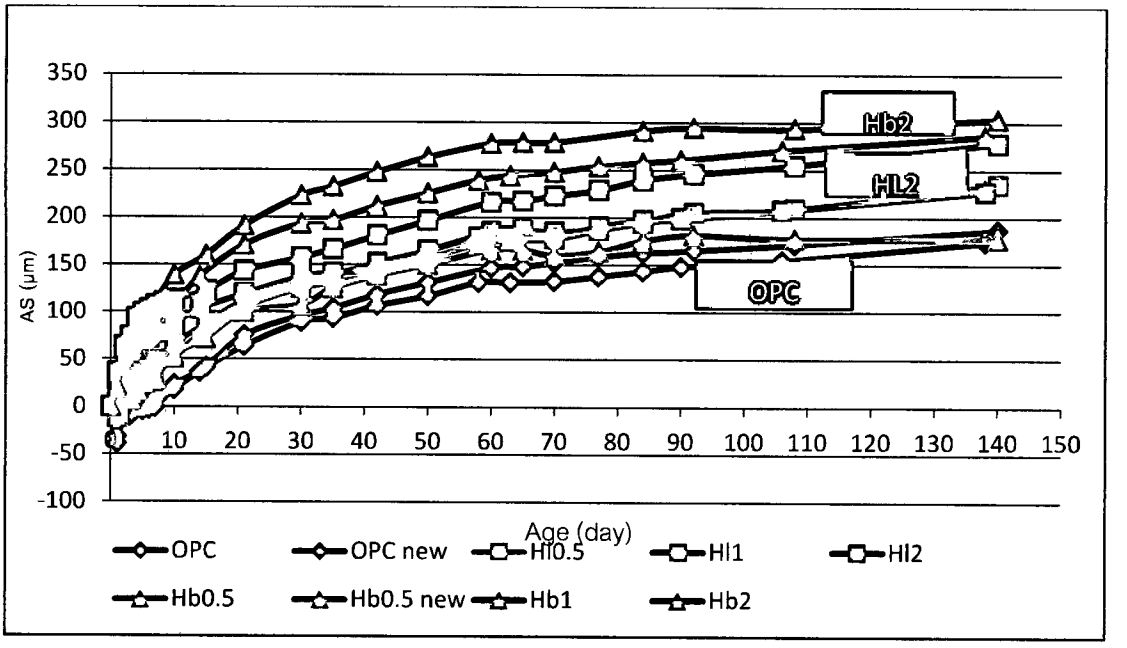
การศึกษาการหดตัว

การหดตัวแบบออร์โตจีนัส

การศึกษาการหดตัวแบบออร์โตจีนัสของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภท คือ การแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) และนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 0, 0.5, 1 และ2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ควบคุมอุณหภูมิที่ 28±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50±5 %RH เก็บข้อมูลที่อายุตัวอย่าง 140 วัน จากการทดสอบได้ผลการทดสอบดังภาพ 91 สามารถจำแนกปัจจัยที่ต้องการศึกษาดังต่อไปนี้

การศึกษาผลของปริมาณการใช้งานของนาโนซิลิก้าที่มีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์มอร์ต้า พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) มีค่าการหดตัวที่ต่ำสุด สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองชนิด มีค่าการหดตัวแบบออร์โตจีนัสสูงกว่าส่วนผสมหลักและจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ อาจเนื่องมากจาก นาโนซิลิก้าทั้งสองชนิด มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก พื้นที่ผิวสัมผัสสูง และมีความเป็นปอซโซลานสูง เมื่อนำมาใช้งานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอไซด์ จึงมีการดึงน้ำจากช่องว่างคะปิลารีไประหว่างการทำปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาดังกล่าว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ช่วยให้ปรับปรุงขนาดของช่องว่างรูพรุนให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งทฤษฎีของแรงดึงผิว ตามสมการที่ 1 แรงดึงผิวจะแปรผกผันกับขนาดของรูพรุนช่องว่างคะปิลลารี คือ การหดตัวจะมีค่าสูงเมื่อแรงดึงผิวมีค่าสูงและรูพรุนมีขนาดเล็ก ดังนั้นการหดตัวแบบออร์โตจีนัสจะมีค่าสูงเมื่อเพิ่มการใช้งานนาโนซิลก้าทั้งสองประเภท

การศึกษาผลประเภทพื้นผิวของนาโนซิลิก้ามีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์มอร์ต้า ที่ร้อยละการแทนที่เท่ากับ 0.5 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb 0.5) มีค่าการหดตัวน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลก้าประเภทที่ชอบน้ำ (Hl 0.5) อาจเนื่องจาก นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำมีลักษณะมีความเป็นปอซโซลานน้อยกว่านาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (สังเกตได้จากการทดสอบความเป็นปอซโซลานจากการนำไฟฟ้า) แต่หากพิจารณาร้อยละการแทนที่เท่ากับ 1และ 2 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลก้าประเภทที่ชอบน้ำ (Hl1, Hl2) มีค่าการหดตัวน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb1, Hb2) อาจเพราะซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลก้าประเภทที่ชอบน้ำมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามีผลทำให้เกิดแรงต้านทานภายในช่วยการหดตัวที่จะเกิดขึ้นได้ การหดตัวแบบออร์โตจีนัสที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยกว่า



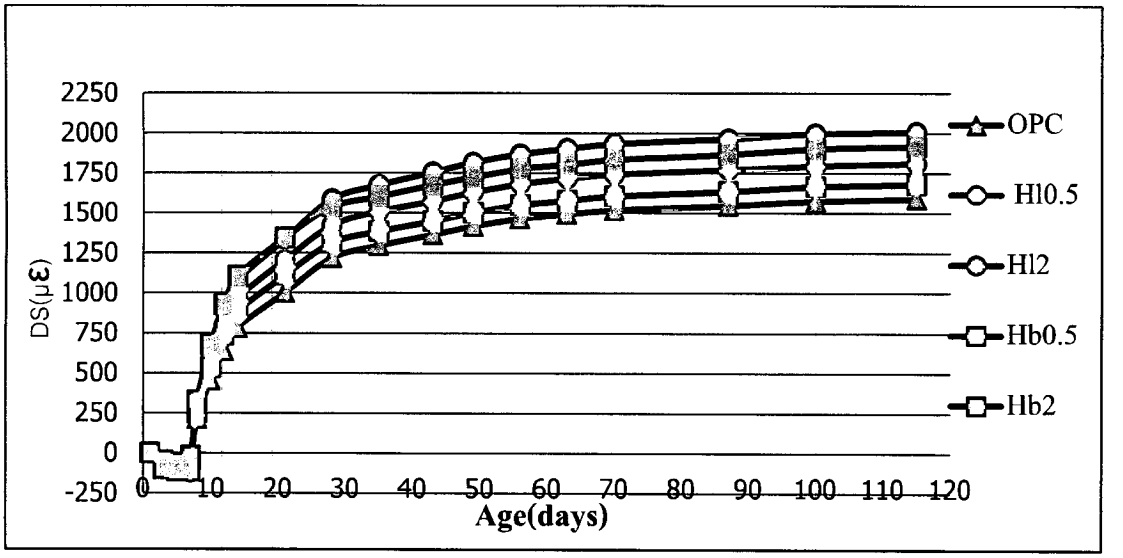
ภาพ 91 ผลการทดสอบการหดตัวแบบออร์โตจีนัส อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 การแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทร้อยละ 0, 0.5, 1 และ 2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ควบคุมอุณหภูมิ 28±1องศาเซลเซียส ความชื้น 50±5 %RH

การหดตัวโดยรวม

การศึกษาการหดตัวโดยรวมของซีเมนต์มอร์ต้า ขนาดตัวอย่าง 25*25*285 มิลลิเมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.55 การแทนที่บางส่วนปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าร้อยละ 0.5, 2 โดยน้ำหนัก การทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 28±1องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50±5 % RH โดยต้องการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

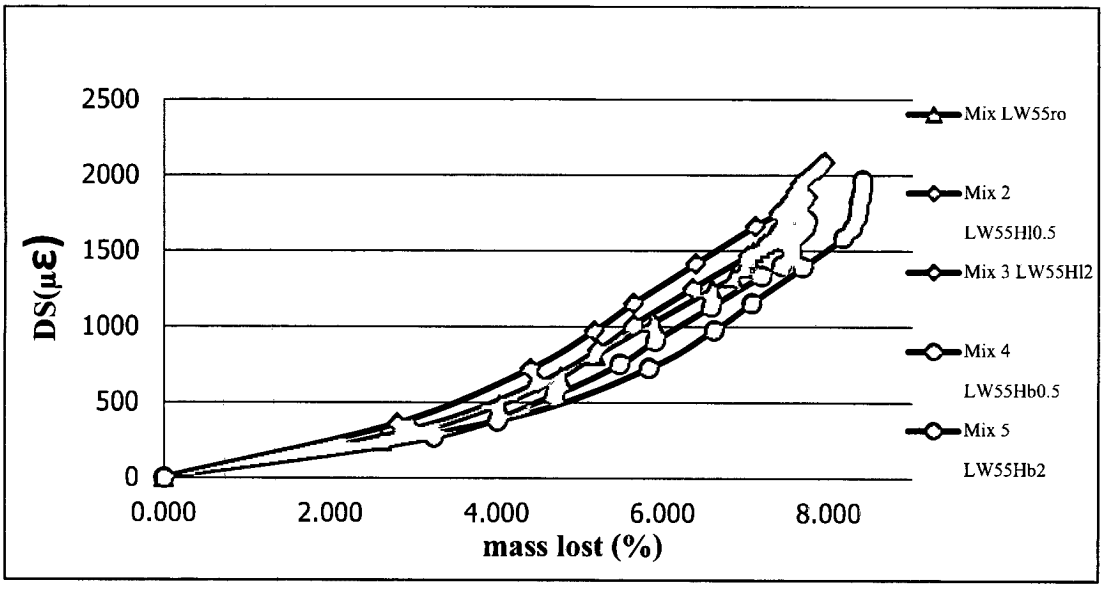
การศึกษาผลปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิก้าต่อการหดตัวแบบโดยรวมของซีเมนต์มอร์ต้า พบว่า ที่อายุทดสอบ 108 วัน าการหดตัวโดยรวมของซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 0.5 และ 2 มีค่าเท่ากับ 1589, 1811, 2008, 1681 และ1919 ไมโครสเมตร (สำหรับการผสมแบบผง) ตามลำดับ ดังภาพ 92 จากผลการทดสอบ พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภท มีค่าการหดตัวสูงกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) และจะมีค่าการหดตัวสูงมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งาน จาก ร้อยละ 0.5 เป็นร้อยละ 2 ตามลำดับ อาจเนื่องจาก นาโนซิลก้าทั้งสองประเภท มีขนาดที่เล็ก และมีความเป็นปอซโซลานสูง เมื่อเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ช่วยให้ปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์มอร์ต้า และลดขนาดช่องว่างคาปิลลารี ให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้แรงตึงผิวของของเหลวในช่วงว่างคาปิลลารีมีค่าสูงเมื่อเกิดการระเหยสู่ภายนอก ซึ่งสอดคล้องทฤษฎีและเป็นไปตามสมการที่ 1 ในบทก่อนนี้

การศึกษาอิทธิพลของนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทต่อค่าการหดตัวโดยรวมของซีเมนต์มอร์ต้า พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) มีค่าการหดตัวโดยรวมน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่บางส่วนด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) (ผสมแบบผง) อาจเนื่องมาจากการใช้งานนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำมีส่วนทำให้มีค่าความพรุนสูงและขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาถึง ซึ่งได้ผแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นจากการละเหยของน้ำในช่องว่างคะปิลลารีจึงมีค่าน้อยซึ่งสอดคล้องสมการในข้างต้น (สมการที่ 1)



ภาพ 92 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการหดตัวและการอายุของซีเมนต์มอร์ต้า (การผสมแบบผง) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.55

การการพิจารณาผลของความสัมพันธ์ของการหดตัวและการสูญเสียน้ำหนัก ตามภาพ 93 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการหดตัวและการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้า พบว่า ที่การสูญเสียความชื้นร้อยละ 8 พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการหดตัว เรียงลำดับ จากน้อยไปมาก ดังต่อไปนี้ ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 2 ร้อยละ 0.5 ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่นาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (Hl) ร้อยละ 0.5 และร้อยละ 2 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกราฟ ระหว่างค่าอัตราการระเหยและค่าการหดตัวของซีเมนต์มอร์ต้า ความชันของเส้นกราฟดังกล่าว คือ แรงตึงผิวของน้ำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ภายในช่องว่างคาปิลลารีสู่สภาพแวดล้อม จากผลการทดสอบซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) สามารถช่วยลดแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นในช่องว่างคาปิลลารีได้ แต่ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (Hl) ทำให้ค่าการหดตัวมีค่าสูงอาจเป็นผลเนื่องจาก ปฏิกิริยาปอซโซลาน ของนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำกับแคลเซียมออกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มีผลช่วยให้ปรับปรุงขนาดของช่องว่างให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ตามสมการที่ 1 แรงตึงผิวจะแปรผกผันกับขนาดของรูพรุนช่องว่างคะปิลลารี คือ การหดตัวจะมีค่าสูงเมื่อแรงตึงผิวมีค่าสูงและรูพรุนมีขนาดเล็ก



ภาพ 93 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของการหดตัวและการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้า (การผสมแบบทั่วไป) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.55

การศึกษาการต้านทานการทำลายจากกรดซัลฟูริกของซีเมนต์มอร์ต้า

การศึกษาการทดสอบการเสื่อมสภาพของซีเมนต์มอร์ต้าจากการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 3% และ 5% อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 นาโนซิลิก้าทั้งสองประเภท ร้อยละ 0.5, 1และ2 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ การทดสอบบ่มก้อนตัวอย่าง 28 วัน ก่อนนำตัวอย่างแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้นต่างๆ และทำการทดสอบวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้า จากการทดสอบสามารถแบ่งแยกปัจจัยการศึกษาเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

จากภาพ 94 แสดงผลการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 3% ที่อายุการทดสอบต่างๆ ค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสกับสารละลายกรดซัลฟูริก หากพิจารณาเปรียบเทียบผลปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิก้าต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้า พบว่า ค่าการสูญเสียน้ำหนักเรียงลำดับจากมากไปน้อยมีค่าดังต่อไปนี้ (พิจารณาที่อายุการทดสอบ 112 วัน) ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (Hl) ร้อยละ 0.5, 1, 2 ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 0.5, 1, 2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก (OPC) มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด อาจเนื่องมาจาก ซีเมนต์มอร์ต้ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น

แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท (C-A-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เมื่อสัมผัสกับกรดให้กลายเป็นเกลือแคลเซียม ส่วนใหญ่แล้วกรดสร้างความเสียหายให้กับคอนกรีตโดยการเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมดังกล่าว ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ง่าย ผล คือ ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมลดลง จึงเป็นเหตุทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตที่สัมผัสกับกรดโดยตรงเกิดการหลุดร่อนไปในที่สุด จึงมีสภาพดังภาพ 15

สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) ร้อยละ 0.5, 1, 2 มีแนวโน้มช่วยให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งาน เพราะนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ เป็นวัสดุที่มีความเป็นปอซโซลานสูงเมื่อนำมาผสมในซีเมนต์มอร์ต้า ซิลิก้าไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของนาโนซิลิก้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอไซด์ ($Ca(OH)_2$ (เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น) เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) ช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในให้มีความหนาแน่นมากขึ้น ความทึบน้ำสูงขึ้น ความซึมน้ำต่ำ [16, 17, 18, 19, 25] (จากการทดสอบการซึมผ่านอากาศ) ความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น [22, 26, 27, 28] (การทดสอบกำลังอัด) และสามารถช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้

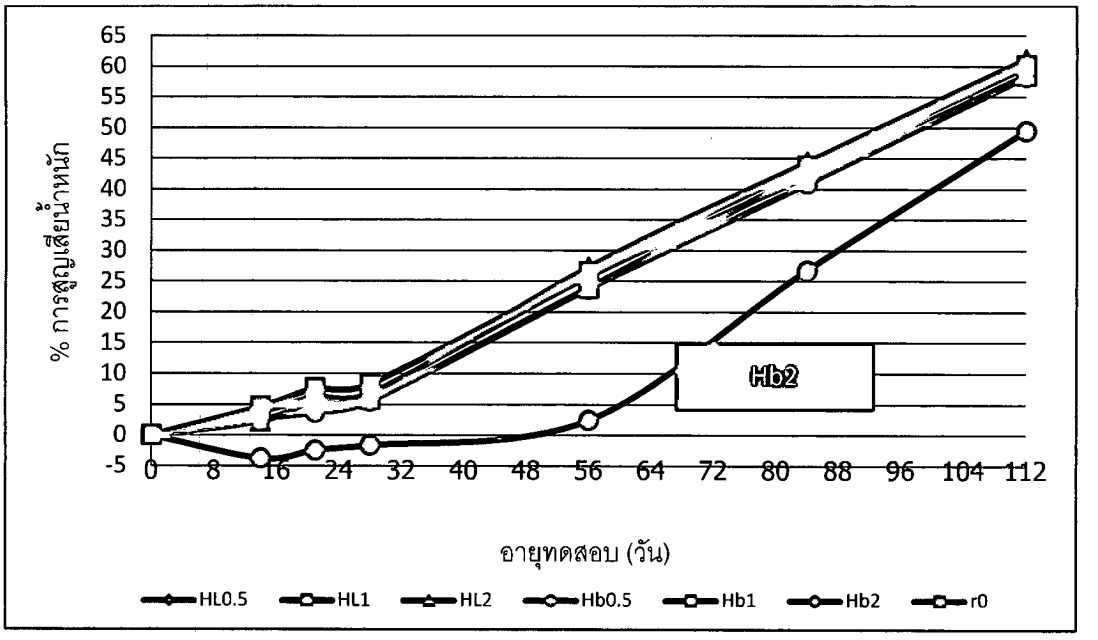
ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) ร้อยละ 0.5, 1, 2 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งานนาโนซิลิก้า และยัง พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำร้อยละ 2 (Hb2) มีการสูญเสียนำหนักน้อยที่สุด อาจเนื่องนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กมาก และเมื่อบางส่วนทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอไซด์ ($Ca(OH)_2$ ช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในให้ซีเมนต์มอร์ต้ามีความหนาแน่นมากขึ้น ความทึบน้ำสูงขึ้น ความซึมน้ำต่ำ อีกทั้งด้วยลักษณะทางกายภาพที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ต้าหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับสารละลายกรดด้วยดังภาพ 24 และสามารถช่วยชะลอความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเนื้อซีเมนต์มอร์ต้า ทำให้มีความต้านทานการทำลายจากสารละลายกรดซัลฟูลิก และมีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น

การเปรียบเทียบผลของชนิดของพื้นผิวของนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทจะพบว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hb) มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ (HI) เปรียบเทียบที่ปริมาณการแทนที่เท่ากัน ทุกอัตราส่วนการแทนที่ เนื่องจากนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทจะมีสมบัติหลายๆ ประการที่มีความใกล้เคียงกันมาก แต่ว่า นาโนซิลิก้าประเภทไม่ชอบน้ำมีสมบัติทางเคมี ประกอบด้วยคาร์บอนจึงช่วยปรับปรุงลักษณะช่วยให้พื้นผิวโดยรวมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบสัมผัสน้ำ ส่งผลให้

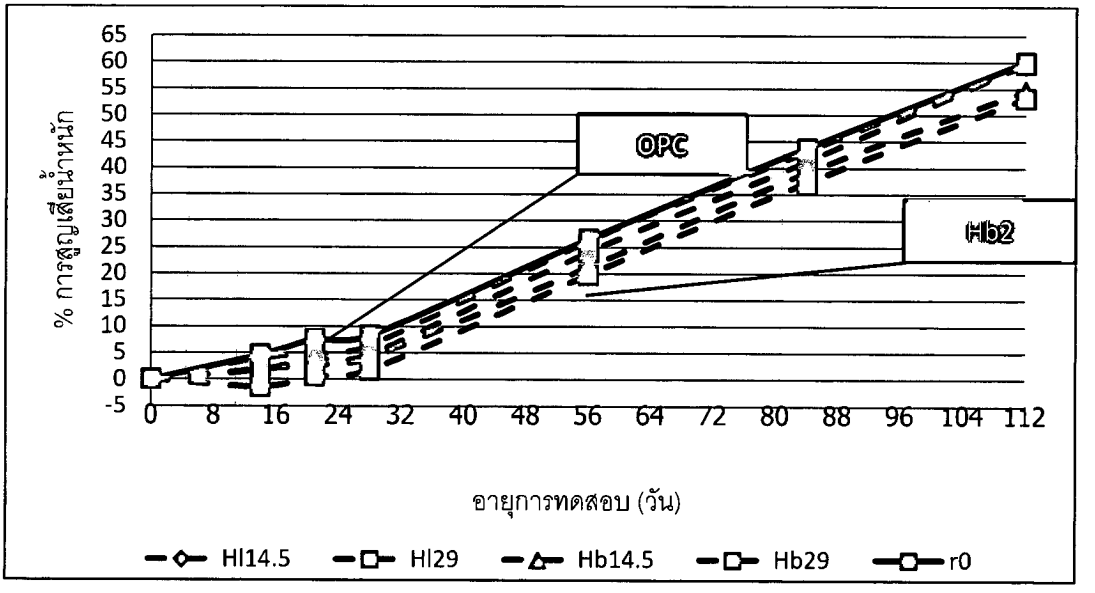
ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ มีลักษณะพื้นผิวหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับสารละลายกรด ช่วยชะลอความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเนื้อซีเมนต์มอร์ต้า อายุการใช้งานจึงยาวนานยิ่งขึ้น (สอดคล้องกับทฤษฎีในเบื้องต้น)

เพื่อศึกษาวิธีการใช้งานนาโนซิลิก้าเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพอันสูงสุด จึงทำการศึกษาผลของวิธีผสมนาโนซิลิก้าในสองรูปแบบต่อการต้านทานกรด ซึ่งประกอบด้วยวิธีการผสมแบบผง (ผสมให้คลุกเคล้าให้เข้ากับปูนซีเมนต์) และใช้ผสมโดยทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปผสมกับซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้าทั้งสองชนิดร้อยละ 0.5-1 (ผสมแบบผง) คิดเป็นปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 1.45, 29 กรัมต่อลิตร (ผสมแบบแขวนลอยในน้ำ) จากการทดสอบ พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำร้อยละการแทนที่ 0.5, 1 (HI0.5, HI1) ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบ การผสมแบบแขวนลอยในน้ำจะเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าผสมแบบผง อาจเนื่องมาจากนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำเมื่อทำให้อยู่ในรูปแขวนลอยในน้ำจะสามารถกระจายตัวได้ดีกว่าการใช้งานแบบผง ซึ่งการผสมแบบผงบางส่วนตัวกับเม็ดปูนซีเมนต์และจับตัวกันเองเพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ จึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง

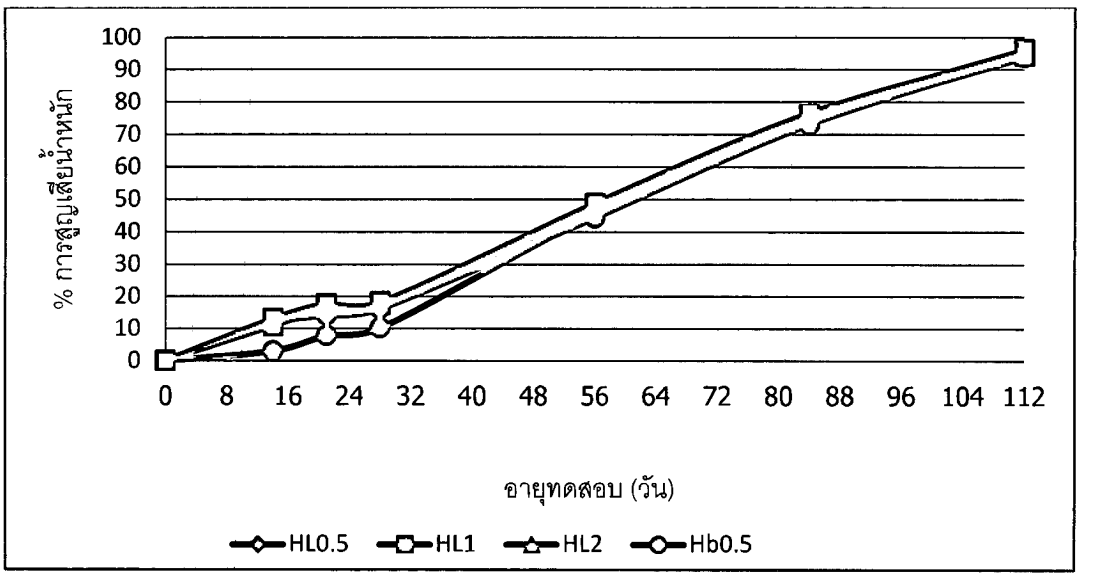
อย่างไรก็ตามจากการทดสอบยัง พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่ทดสอบโดยสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 5% มีการสูญเสียน้ำหนักที่มากกว่าซีเมนต์มอร์ต้าที่ทดสอบด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 % ทุกส่วนผสมเนื่องจาก ความเข้มข้นของสารละลายกรดที่สูง จึงมีโอกาสที่จะสามารถแพร่ และซึมผ่าน เพื่อสร้างความเสียหายให้กับเนื้อคอนกรีตได้มากกว่า อีกทั้งในการทดสอบที่มีการใช้สารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 5% เป็นไปได้ว่า ซีเมนต์มอร์ต้าไม่สามารถทนได้ เนื่องจากชุดข้อมูลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน จนไม่มีนัยสำคัญ



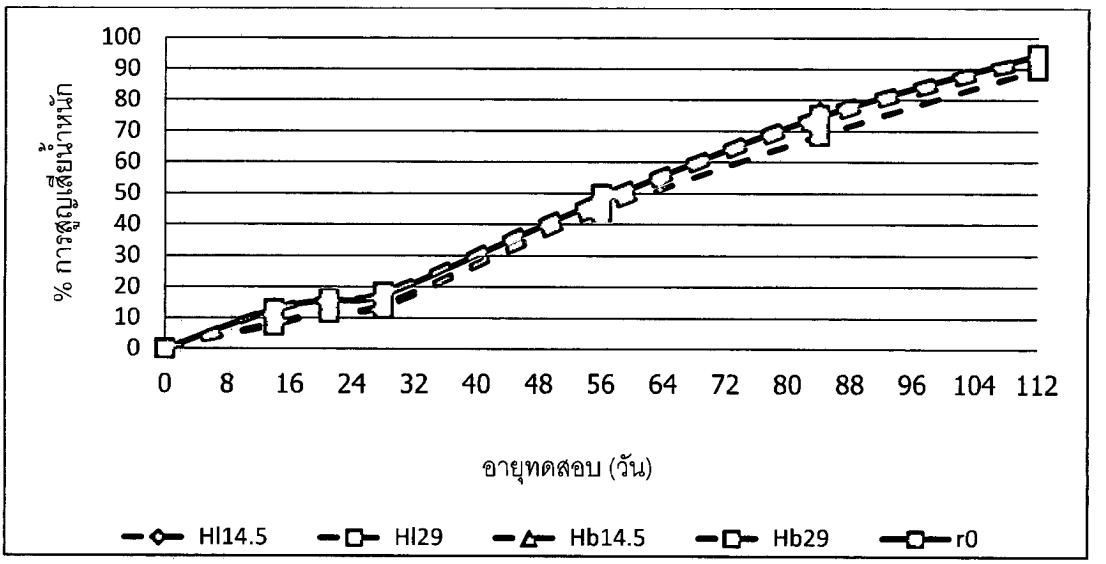
ภาพ 94 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทพื้นผิวชอบน้ำและไม่ชอบน้ำร้อยละ 0.5, 1 และ 2 (ผสมแบบผง) ทดสอบใช้สารละลายซัลฟูริกความเข้มข้น 3%



ภาพ 95 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทพื้นผิวชอบน้ำและไม่ชอบน้ำร้อยละ14.5, 29 g/l (เท่ากับร้อยละ 0.5, 1 ผสมแบบแขลนลอยในน้ำ) ทดสอบใช้สารละลายซัลฟูริความเข้มข้น 3%



ภาพ 96 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทพื้นผิวชอบน้ำและไม่ชอบน้ำร้อยละ 0.5, 1 และ 2 (ผสมแบบผง) ทดสอบใช้สารละลายซัลฟูริความเข้มข้น 5%



ภาพ 97 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทพื้นผิวชอบน้ำและไม่ชอบน้ำร้อยละ 14.5, 29 g/l (เท่ากับร้อยละ 0.5, 1 ผสมแบบแขลนลอยในน้ำ) ทดสอบใช้สารละลายซัลฟูริความเข้มข้น 5%

การศึกษาการต้านทานการทำลายจากซัลเฟตของซีเมนต์มอร์ต้า

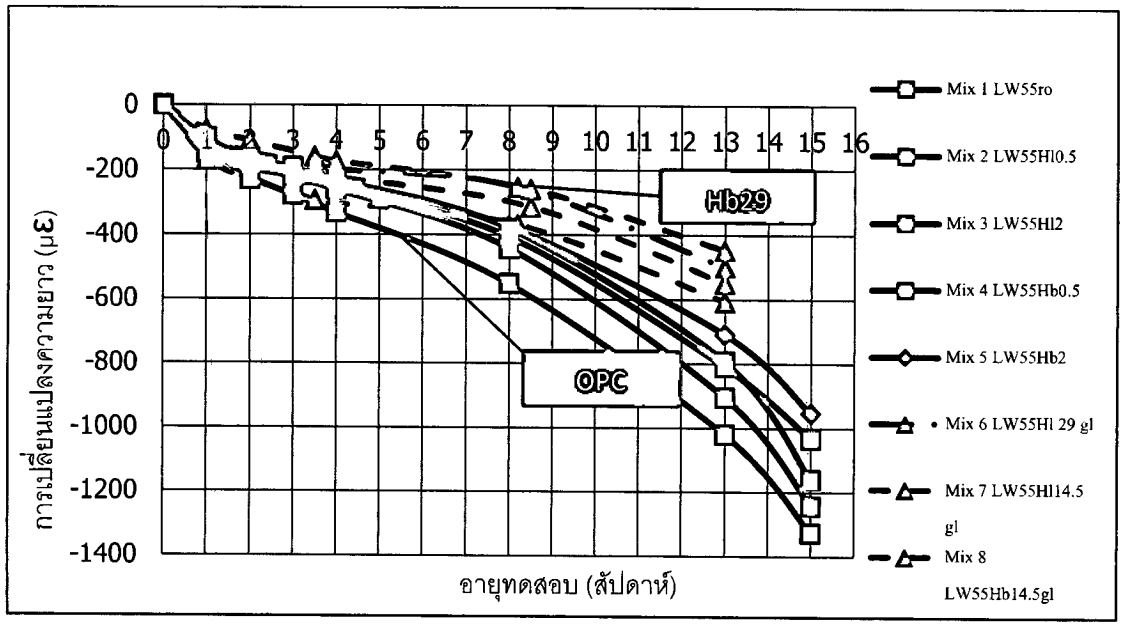
การทดสอบการต้านทานการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีส่วนผสมของนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ ประเภทที่ชอบน้ำ ร้อยละ 0-2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยการทดสอบกำหนดให้ซีเมนต์มอร์ต้ากำลังอัด 20 ksc ก่อนทดสอบแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 5% และทำการทดสอบวัดค่าการขยายตัว ตามอายุต่างๆ จากการทดสอบสามารถแบ่งปัจจัยในการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

การศึกษาผลปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิก้าต่อการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ต้า ผลการทดสอบ พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่เป็นส่วนผสมหลัก ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำร้อยละ 0.5 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำร้อยละ 2 ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำร้อยละ 0.5 (เรียงลำดับจากค่ามาก-น้อย) แสดงในภาพ 96 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้งานนาโนซิลิก้าทั้งสองประเภทจาก ร้อยละ 0.5 เป็นร้อยละ2 สามารถช่วยลดการขยายตัวที่เกิดขึ้นได้ อาจเนื่องนาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำมีความเป็นปอซโลลานสูง เมื่อซิลิก้าไดออกไซด์ (SiO_2) ทำปฏิกิริยา pozzolanic กับสารแคลเซียมไฮดรอไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดเป็นสารเชื่อมประสานขึ้น คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) (ดังสมการด้านล่าง) จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในของซีเมนต์มอร์ต้าให้มีความหนาแน่นมากขึ้น ความทึบน้ำสูงขึ้น อีกทั้งช่วยเพิ่มกำลังอัดให้แก่ซีเมนต์มอร์ต้า [16, 17, 18, 19] จึงสามารถเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่จะเข้ามาทำอันตรายกับซีเมนต์มอร์ต้าได้จึงสามารถลดการขยายตัวได้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$

สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ แทนที่ร้อยละ0.5 และ 2 จะมีความต้านทานการขยายตัวได้ดีกว่าเนื่องจากนาโนซิลิก้าชนิดนี้มีความเป็นปอซโซลานที่สูง และยังมีพื้นผิวที่หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำจึงสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์มอร์ต้าให้ช่วยเพิ่มความต้านทานการขยายตัวเนื่องโซเดียมซัลเฟตได้

แต่หากจะให้การใช้งานนาโนซิลิก้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดควร ใช้งานนาโนซิลิก้าในรูปแบบแขวนลอยในน้ำ อาจเนื่องจากผลของการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลิก้ามีการกระจายตัวได้ดีกว่า จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยามีโอกาสเกิดได้สมบูรณ์กว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีโอกาสเกิดสูงกว่า จึงทำให้ความทึบ ความแนนจึงมีค่าสูงกว่า ความพรุนน้อยกว่า ซึ่งมีความสอดคล้องการการทดสอบที่ผ่านมา



ภาพ 98 ค่าการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟต ของซีเมนต์มอร์ต้า