บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกรอบงานศึกษา วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย รวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของ ซิลิก้าฟูม นาโนซิลิก้า ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้าในสภาพที่สด และในสภาพที่แข็งตัวแล้ว ตามมาตรฐานต่างๆ ตลอดจนกรอบแนวคิดในการทดสอบวิธีการทดสอบอย่างละเอียด ตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มแรกของการเตรียมวัสดุ การผสมซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า การเทเข้าแบบ การเก็บค่าข้อมูลทดสอบและ แผนการดำเนินงานในการศึกษาทั้งหมด และเทคนิคพิเศษที่ช่วยในการทำงานเพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการทดสอบ ซึ่งรายละเอียดของเนื้อหามีดังต่อไปนี้

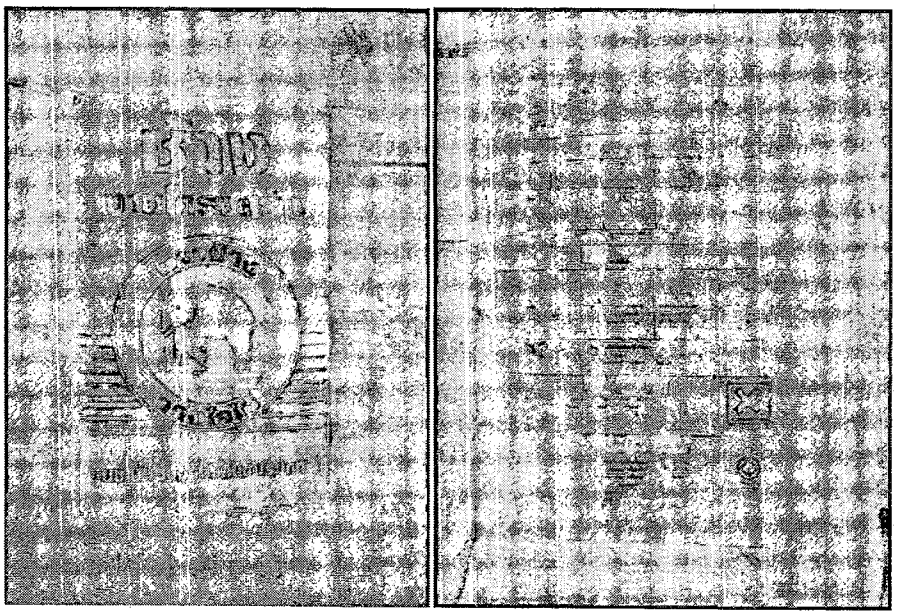
วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์

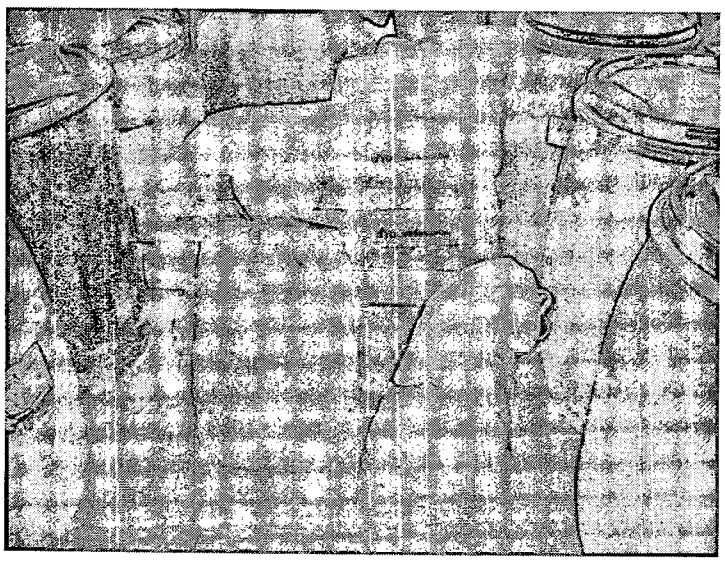
ปูนซีเมนต์ในการทดสอบเลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างแดง บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด จ.ลำปาง จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทั้ง คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทั้งสองประเภทจาก บริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด มีรายละเอียดดังตาราง 1 –ตาราง 3 ปูนซีเมนต์ดังกล่าว ผลิตตามมาตรฐานอังกฤษ คือ oridinary portland cement : 1058 และตามมาตรฐานอเมริกัน คือ ASTM.C.150 – 53 และมาตรฐานไทย คือ มอก.15 เล่มที่ 1 สมบัติทางเคมี SiO_2 19.87 เปอร์เซ็นต์ Al_2O_3 4.87 เปอร์เซ็นต์ Fe_2O_3 3.55 เปอร์เซ็นต์ CaO 65.03 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบทางแร่ C_3S 69 เปอร์เซ็นต์ C_2S 7.1 เปอร์เซ็นต์ C_3A 6.6 เปอร์เซ็นต์ C_4AF 10.6 เปอร์เซ็นต์ คุณสมบัติทางกายภาพ ความถ่วงจำเพาะ 3.15 กรัม/ลบ.ซม. พื้นที่ผิว 3480 ตร.ซม./กรัม แสดงดัง ตาราง 1 ตาราง 2 และตาราง 3 ตามลำดับ

การเก็บรักษาและการเตรียมปูนซีเมนต์เพื่อใช้งาน

เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบจะถูกสั่งซื้อเพื่อให้เพียงพอการใช้งานตลอดโครงการ เป็นการลดผลของความแตกต่างของคุณสมบัติด้านต่างๆ ของปูนซีเมนต์ จึงจำเป็นต้องให้ความสนใจระมัดระวังในการเก็บรักษาปูนซีเมนต์เพื่อลดการสัมผัสกับความชื้นให้มากที่สุด โดยเก็บไว้ในถุงพลาสติกเป็นจำนวนสองชั้น และวางบนชั้นวางที่ถูกยกสูงขึ้นจากพื้น แต่ก่อนการนำมาใช้งานจะร่อนผ่านด้วยตระแกรงร่อนเบอร์16 อีกครั้งเพื่อตรวจสอบก่อนนำมาใช้งาน



ภาพ 26 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ปูนตราช้าง



ภาพ 27 การเก็บรักษาปูนซีเมนต์พลาสติกจำนวนสองชั้นก่อนเก็บบนชั้นวาง

ตาราง 1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบเคมี	ปริมาณของส่วนประกอบทางเคมี %
SiO_2	19.87
Al_2O_3	4.87
Fe_2O_3	3.55
CaO	65.03
MgO	0.73
SO_3	2.52
Na_2O	0.02
K_2O	0.45
TiO_2	0.26
P_2O_5	0.07
LOI	2.26

ตาราง 2 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบของแร่	ปริมาณขององค์ประกอบของแร่ %
C_3S	69
C_2S	7.1
C_3A	6.6
C_4AF	10.6
Gypsum*	5.4

ตาราง 3 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	3.09
พื้นที่ผิวสัมผัส (cm^2/g)	3,480

2. **ซิลิก้าฟูม** (Silica fume)

การทดสอบเลือกใช้ซิลิก้าฟูมที่มีความแตกต่างกันตามลักษณะพื้นผิว คือ ซิลิก้าฟูมพื้นผิวสัมผัสประเภทที่ไม่ชอบน้ำ และซิลิก้าฟูมพื้นผิวสัมผัสประเภทที่ชอบน้ำ ซึ่งทั้งสองชนิดที่กล่าวมามีความแตกต่างกันทางพื้นผิวสัมผัสกับน้ำ โดยการปรับปรุงพื้นผิวการสัมของนาโนซิลิก้า (ประเภทที่ไม่ชอบน้ำปรับปรุงให้พื้นผิวสัมผัสเมื่อสัมผัสกับน้ำมีลักษณะเดียวกันกับในบัว,ประเภทที่ชอบน้ำ พื้นผิวมีลักษณะทั่วไปที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด) โดยรายละเอียดของซิลิก้าฟูมจะกล่าวดังต่อไปนี้

ซิลิก้าฟูมพื้นผิวสัมผัสประเภทที่ไม่ชอบน้ำ จากบริษัท COSMOS PLASTICS & CHEMICALS ชื่อทางการค้า คือ AEROSILR R 972 (Hydrophobic Fumed Silica) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 16 นาโนเมตร พื้นผิวสัมผัส 110±20 ตารางเมตรต่อกรัม (BET) ความหนาแน่นประมาณ 50 กรัม/ลิตร ปริมาณคาร์บอน 0.6-1.2 % โดยน้ำหนัก และปริมาณ $SiO_2 \geq 99.8$ โดยน้ำหนัก

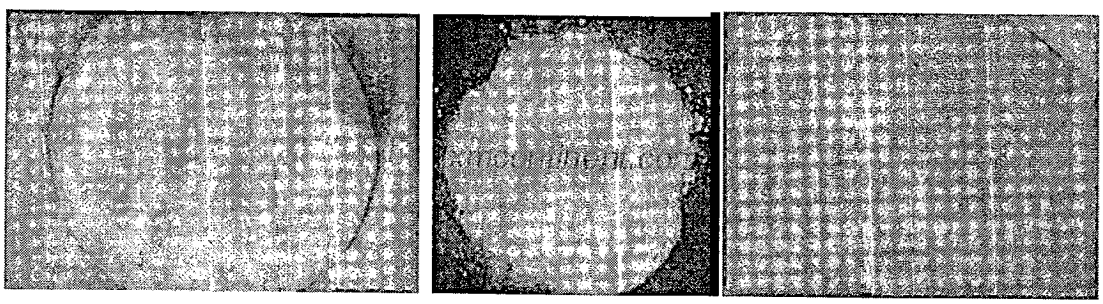
ซิลิก้าฟูมพื้นผิวสัมผัสประเภทที่ชอบน้ำ เลือกใช้ซิลิก้าฟูมเพื่อทำการทดสอบจาก 2 แหล่งทดสอบ คือ จากบริษัท COSMOS PLASTICS & CHEMICALS และจากบริษัท W. R. Grace & Co.–Conn โดยซิลิก้าจากทั้งสองบริษัทมีความแตกต่างกันทางขนาดและปริมาณ SiO_2 รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

ซิลิก้าฟูมจากบริษัท COSMOS PLASTICS & CHEMICALS ชื่อทางการค้า คือ AEROSIL R 200 (Hydrophilic Fumed Silica) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 12 นาโนเมตร พื้นผิวสัมผัส 175-225 ตารางเมตรต่อกรัม (BET) ความหนาแน่น ประมาณ 30 กรัม/ลิตร ปริมาณ$SiO_2 \geq$ 99.8 %โดยน้ำหนัก

ซิลิก้าฟูมจากบริษัท W. R. Grace & Co.–Conn ชื่อทางการค้า คือ Force 10,000 D มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 15 ไมโครเมตร ความถ่วงจำเพาะ 2.2 ปริมาณSiO_2 92-98 %โดยน้ำหนัก

ตาราง 4 คุณสมบัติของนาโนซิลิก้าฟูม

Properties,Unit	r200 (Hl)	R972 (Hb)
Specific surface area (BET) m^2/g	200 ± 25	110 ± 20
Carbon content wt. %	0	0.6 – 1.2
Average primary particle size	nm 12	nm 16
Tapped density* g/l (approx. value) acc.to DIN EN ISO 787/11, Aug. 1983	approx. 50	approx. 50
Moisture * wt. % 2 hours at 105 °C	≤ 1.5	≤ 0.5
Ignition loss, 2 hours at 1000 °C, based wt. % on material dried for 2 hours at 105 °C	≤ 1.0	≤ 2.0
pH in 4% dispersion	3.7 - 4.7	3.6 – 4.4
SiO2-content wt. % based on ignited material	≥ 99.8	≥ 99.8



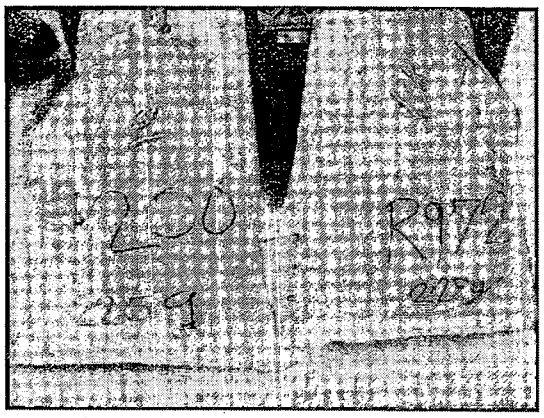
a b c

ภาพ 28 ภาพแสดงตัวอย่างซิลิก้าฟูม

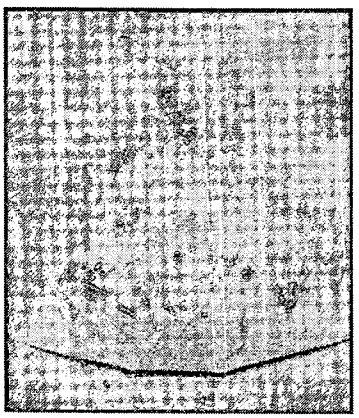
a คือ AEROSILR R 972 (Hydrophobic Fumed Silica)

b คือ AEROSILR R 200 (Hydrophilic Fumed Silica) ,

c คือ Force 10,000 D (Micro Fumed Silica)



a. ซิลิก้าจากบริษัท COSMOS PLASTICS & CHEMICALS

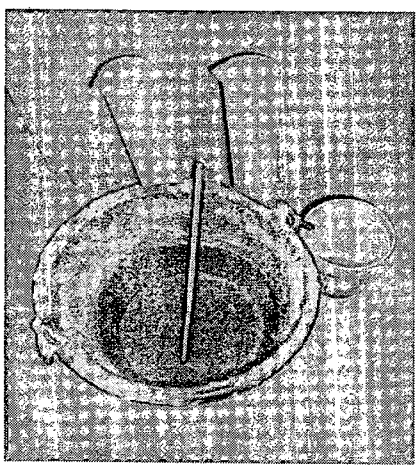


b. ซิลิก้าจากบริษัท W. R. Grace & Co.–Conn

ภาพ 29 ภาพแสดงตัวอย่างซิลิก้าฟูมจากทั้ง 2 แหล่ง

3. น้ำ (Water)

น้ำ ใช้ในการศึกษาและการทดสอบของงานวิจัยนี้ใช้น้ำประปาจากมหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัด พิษณุโลก ที่อุณหภูมิ 23±1 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดด่าง 6.83 (ASTM C490) แสดงดังภาพ 30 น้ำสะอาด และต้องมีคุณสมบัติดัง ตาราง 5 และตาราง 6



ภาพ 30 น้ำสะอาดที่ปรับอุณหภูมิ 23±1 องศาเซลเซียส

ตาราง 5 ตารางแสดงเกณฑ์สมบัติของน้ำในการผสมคอนกรีต

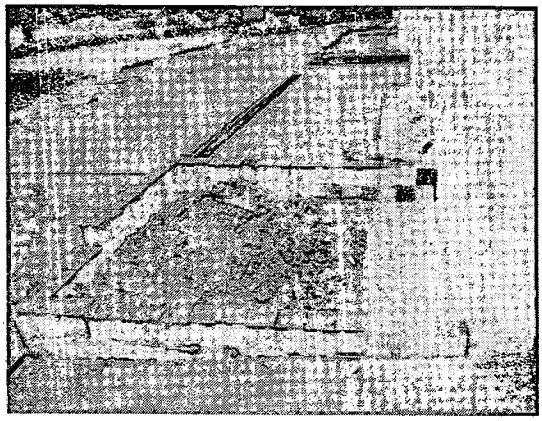
สมบัติของคอนกรีต	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน	ไม่น้อยกว่า 90% ของความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตควบคุม	ASTM 31/C31M ASTM 39/C39M
ระยะเวลาก่อตัว	ไม่เร็วกว่า 1 ชั่วโมง และไม่ช้ากว่า 1.5 ชั่วโมง จากคอนกรีตควบคุม	ASTM 403/C403M

ตาราง 6 ปริมาณสารที่ยอมให้มีได้ในน้ำผสมคอนกรีต

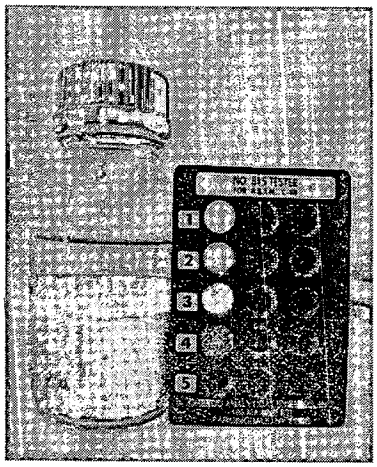
สารที่ยอมให้มีได้ในน้ำผสมคอนกรีต	ปริมาณที่ยอมให้ mg/L	วิธีทดสอบ
คลอไรด์ในรูปของ Cl ไม่เกิน	500	ASTM C114
ซัลเฟตในรูปของ SO4 ไม่เกิน	3000	ASTM C115
ด่างในรูปของ Na2O+0.658K2O ไม่เกิน	600	ASTM C116
สารแขวนลอยไม่เกิน	50000	ASTM C1603

4. **มวลรวมละเอียด** (fine aggregate)

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ คือ ทรายแม่น้ำ แหล่งผลิต อยู่ที่อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก ค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C128 และ มาตรฐาน ASTM C29 ตามลำดับ มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าความถ่วงจำเพาะในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 2.606 ร้อยละการดูดซึมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.794 และมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 166.70 กก./ลบ.ม การทดสอบสารอินทรีย์ในมวลรวมละเอียด (Organic Impurities in Fine Aggregate) ASTM C 40 (ภาพ 32)



ภาพ 31 ตัวอย่างของมวลรวมละเอียด

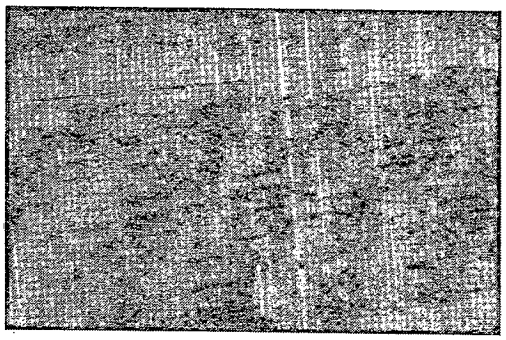


ภาพ 32 การทดสอบหาสารอินทรีย์ในทราย

การเตรียมตัวอย่างมวลรวมละเอียด

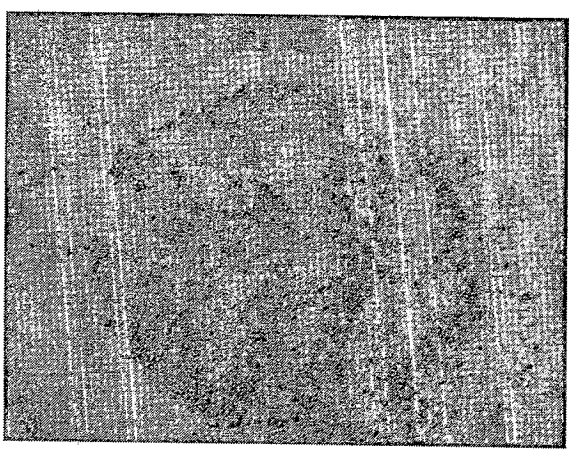
การเตรียมทรายก่อนทำการผสมคอนกรีตนั้น ต้องทำการปรับความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการดูดซึมของทราย ควรอยู่ในช่วงประมาณ 1-1.5% วิธีการเตรียมความชื้นของทรายมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

แผ่ทรายในร่มเพื่อ สามารถควบคุมอัตราการละเหยของทรายให้มีความชื้นตามที่ต้องการ ลดการระเหยของทรายที่อาจจะเร็วเกินไป และความแตกต่างของความชื้นทรายที่บริเวณผิวด้านบนและล่างที่อาจจะไม่เท่ากัน โดยต้องการพลิกและตรวจสอบความชื้น



ภาพ 33 ลักษณะการผึ่งทรายในร่ม

การเตรียมตัวอย่างทรายต้องมีการพลิกกลับทรายเพื่อเป็นการปรับให้ความชื้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด อาจจะพลิกทุกๆ 15-30 นาที โดยนำทรายคลุกรวมกันเป็นกองก่อนดังภาพ 34 แล้วค่อยแผ่ตากอีกครั้ง

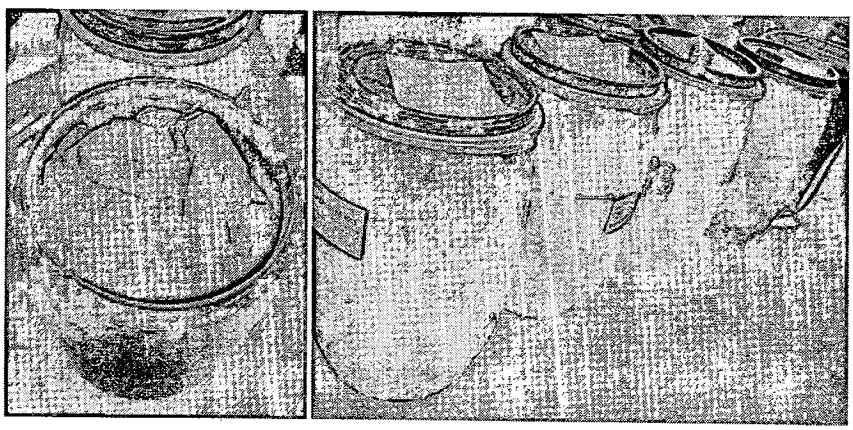


ภาพ 34 การพลิกกลับทรายขณะปรับความชื้น

การตรวจสอบความชื้นขณะทำการปรับความชื้น สามารถทำได้ด้วยการจับทรายขึ้นมาประมาณหนึ่งกำ แล้วกำให้แน่นพอประมาณ แล้วสังเกตการจับตัวกันของทราย (เป็นตรวจสอบในขั้นต้น) หากทรายยังจับตัวกันเป็นกลุ่มแสดงว่าความชื้นยังสูง แต่หากทรายไม่จับกันและไถลไหลลงถือว่าวามชื้นใกล้เคียงที่ต้องการ

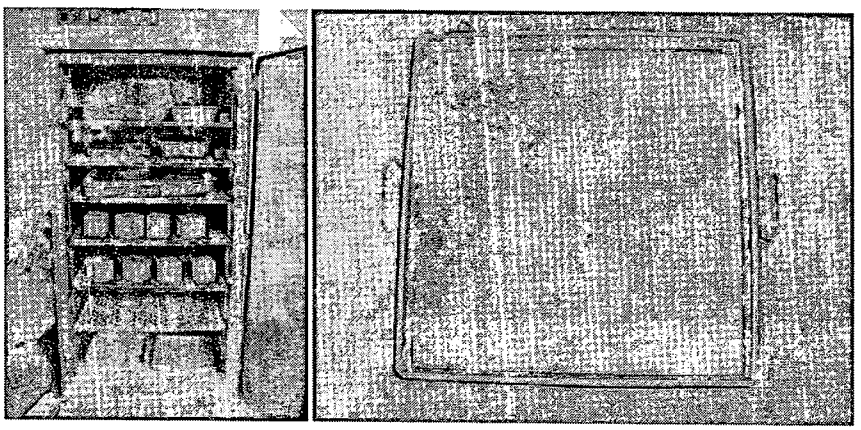
เมื่อแน่ใจว่าความชื้นอยู่ในช่วงที่ต้องการทำการตรวจสอบซ้ำอีกครั้งด้วยการสุ่มตัวอย่างทราย นำไปคั่วด้วยไฟ เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจก่อนการเก็บทรายไว้ในถังเก็บตัวอย่าง แล้วปิดด้วยกระดาษที่ชื้น ป้องกันการระเหยของทรายบริเวณด้านบน

ภาพ 35 ตรวจสอบความชื้นอย่างรวดเร็ว



ภาพ 36 การเก็บทรายในถัง

เมื่อทำการเก็บทรายไว้ในถังเรียบร้อยแล้ว บันทึกข้อมูล รอบการสั่ง ว/ด/ป การเตรียมการตรวจสอบความชื้น และจัดเข้าที่เพื่อความเป็นระเบียบเรียบร้อย แล้วทำการตรวจสอบความชื้นอีกครั้ง ในขั้นตอนนี้จะสุ่มตัวอย่างจากจากถัง แล้วอบทรายที่อุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม.ก่อนนำไปใช้งานต้องตรวจสอบทุกๆ ครั้งก่อนการทำการผสมคอนกรีต หรือซีเมนต์มอร์ต้า



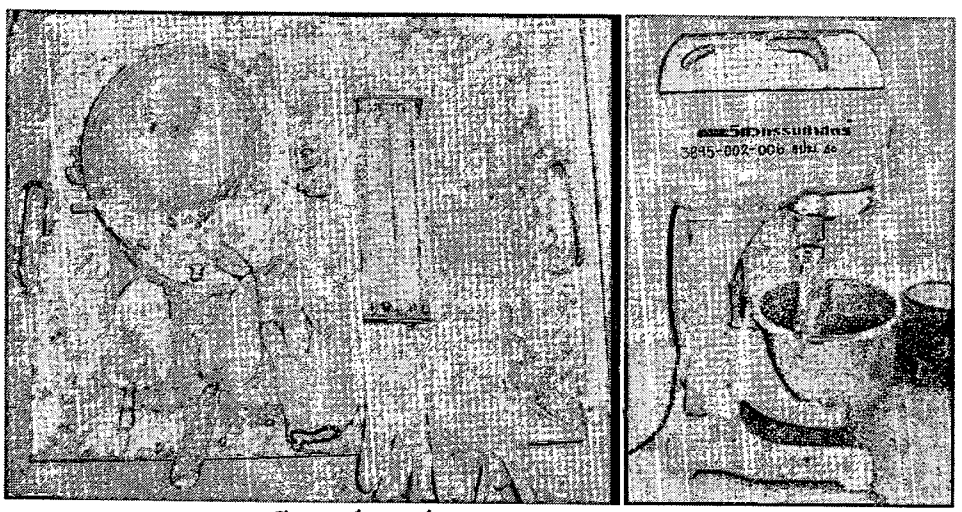
ภาพ 37 การตรวจสอบความชื้นของทราย

เครื่องมือที่ในการทดสอบ

เครื่องมือการทดสอบมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการใช้งานห้องปฏิบัติทดสอบเนื่องจากช่วยให้ค่าที่ได้จาการทดสอบนั้นมีความแม่นยำ เที่ยงตรง และสนับสนุนให้ผลการทดสอบน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ในการทดสอบใช้เครื่องมือการทดสอบดังต่อไปนี้

1. **ชุดผสมซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์มอร์ต้า**

ชุดเครื่องมือสำหรับใช้ในผสมซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์มอร์ต้าเพื่อใช้ในการทดสอบต่างๆ ดังภาพ 38

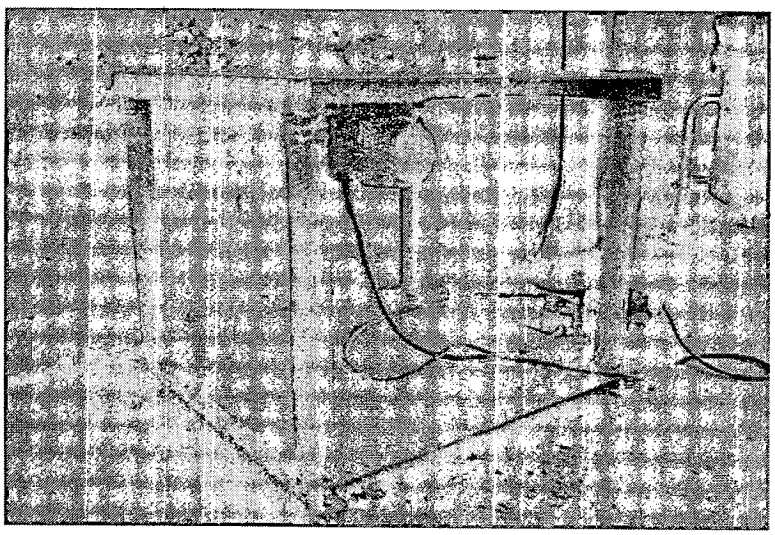


A. **ชุดผสมซีเมนต์เพสต์** B. **ชุดผสมซีเมนต์มอร์ต้า**

ภาพ 38 ชุดผสมซีเมนต์

2. **ชุดเครื่องมือโต๊ะเขย่าไล่ฟองอากาศ**

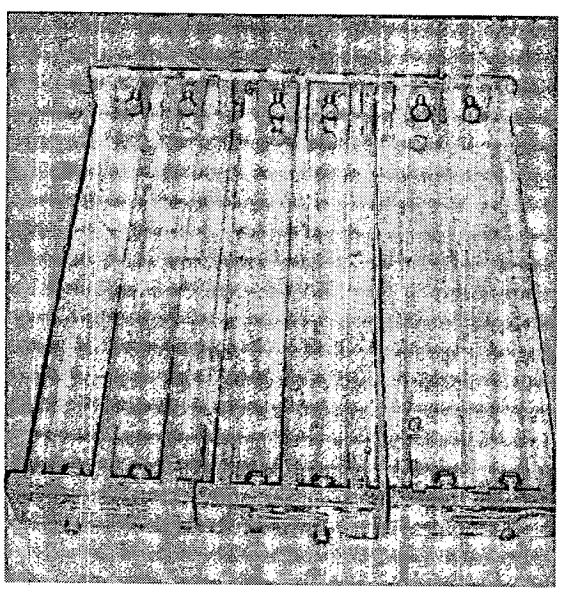
โต๊ะเขย่าใช้สำหรับการกำจัดฟองอากาศในเนื้อซีเมนต์เพสต์ให้มากที่สุด (ภาพ 39)



ภาพ 39 ชุดเครื่องมือโต๊ะเขย่าไล่ฟองอากาศ

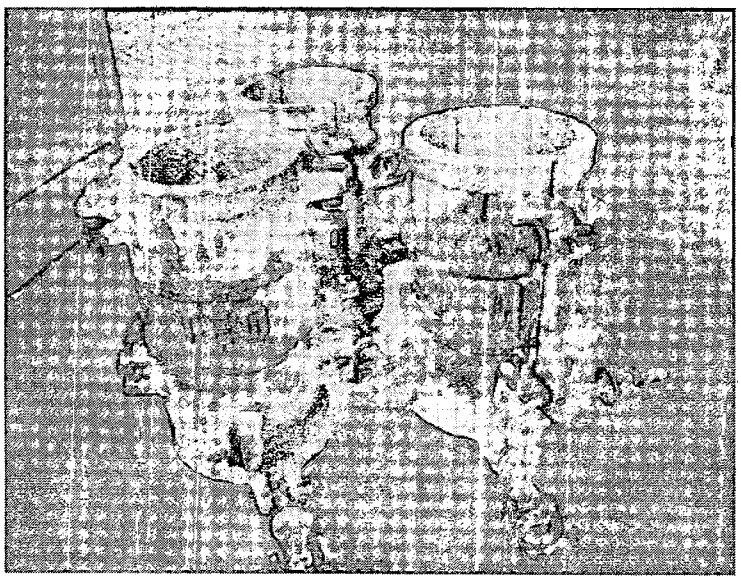
3. **แบบหล่อซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า**

3.1 แบบหล่อซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า ขนาด 2.5*2.5*28.5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบ การหดตัว การทำลายเนื่องจากซัลเฟตซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า ดังภาพ 40



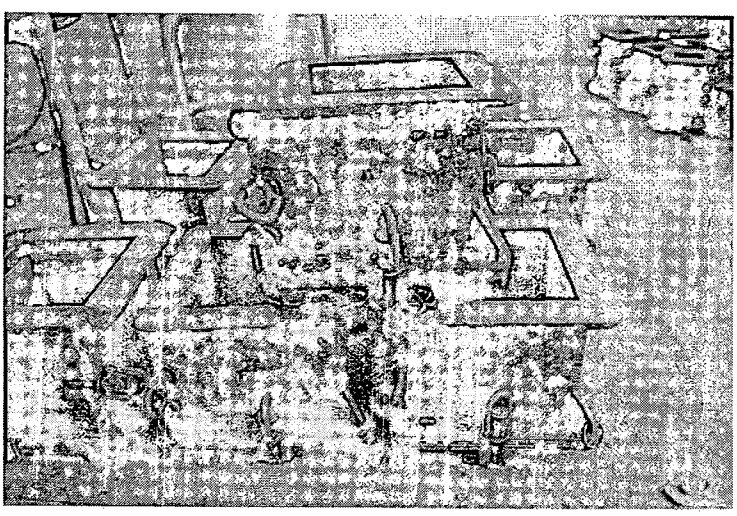
ภาพ 40 แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 2.5*2.5*28.5 เซนติเมตร

3.2 แบบหล่อซีเมนต์มอร์ต้า ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10*20 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการซึมผ่านของอากาศซีเมนต์มอร์ต้า ดังภาพ 41



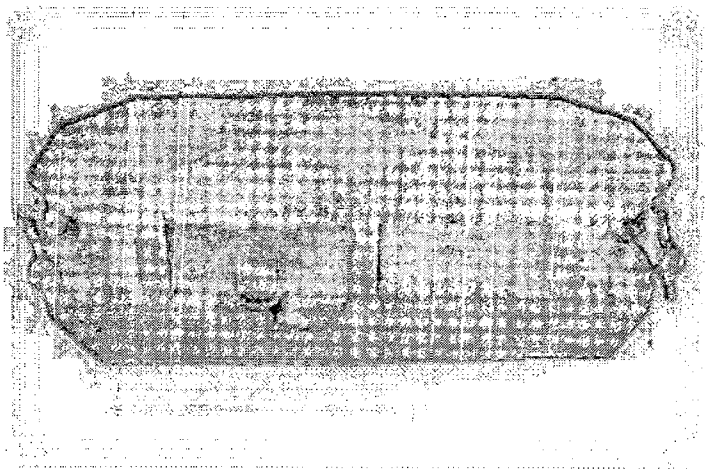
ภาพ 41 แบบหล่อก้อนตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10*20 เซนติเมตร

3.3 แบบหล่อซีเมนต์มอร์ต้า ลูกบาศก์ขนาด 15*15*15 เซนติเมตร สำหรับทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์มอร์ต้า ดังภาพ 42



ภาพ 42 แบบหล่อก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15*15*15 เซนติเมตร

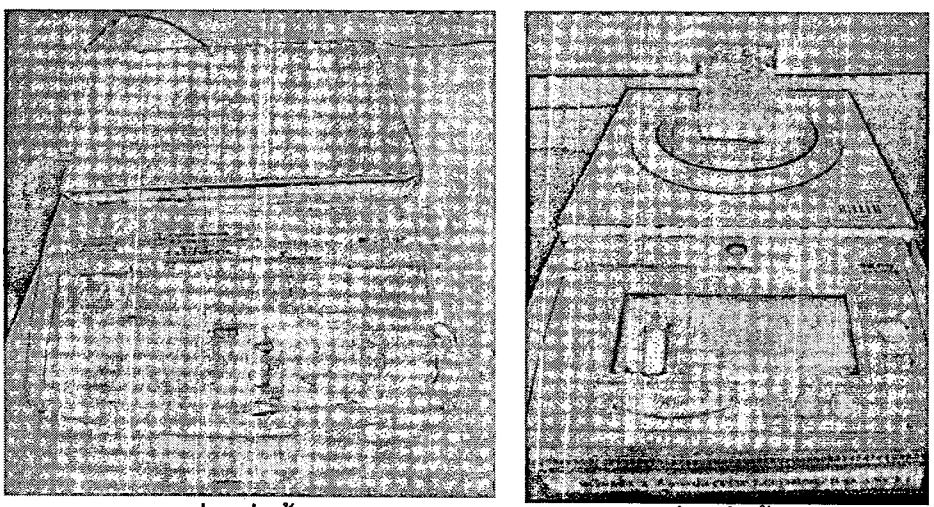
3.4 แบบหล่อซีเมนต์มอร์ต้า ลูกบาศก์ขนาด 5*5*5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบกำลังอัดการต้านทานการทำลายจากกรดซัลฟูริกซีเมนต์มอร์ต้า ดังภาพ 43



ภาพ 43 แบบหล่อก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5*5*5 เซนติเมตร

4. เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งความละเอียด 0.1 และ 0.001 กรัม สำหรับการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของก้อนตัวอย่างในการทดสอบการทำลายจากกรดซัลฟูริกซีเมนต์มอร์ต้า ดังภาพ 44



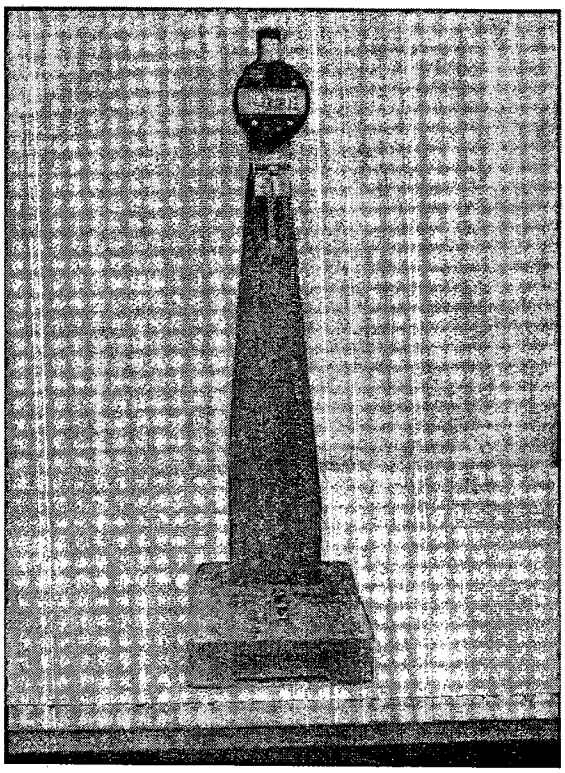
A เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.1กรัม

B เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.001 กรัม

ภาพ 44 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 กรัม (A) และ 0.001 กรัม (B)

5. **ชุดทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว**

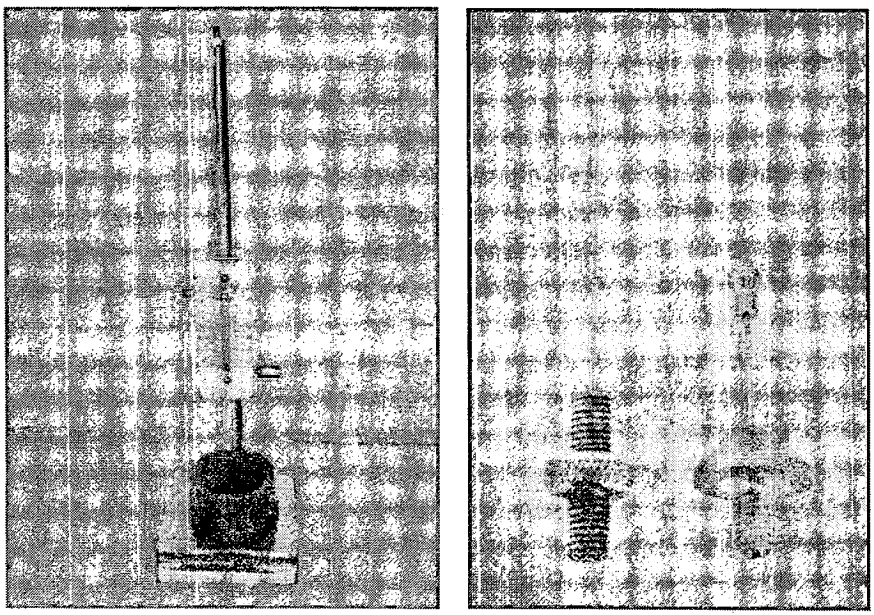
อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวของก้อนตัวอย่างทดสอบการหดตัว และการขยายตัวจากซัลเฟต โดยการเปลี่ยนแปลงความยาวอ่านค่าได้ในหน่วยไมโครเมตร ดังภาพ 45



ภาพ 45 ชุดทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว

6. **ชุดทดสอบแบบไวแคต**

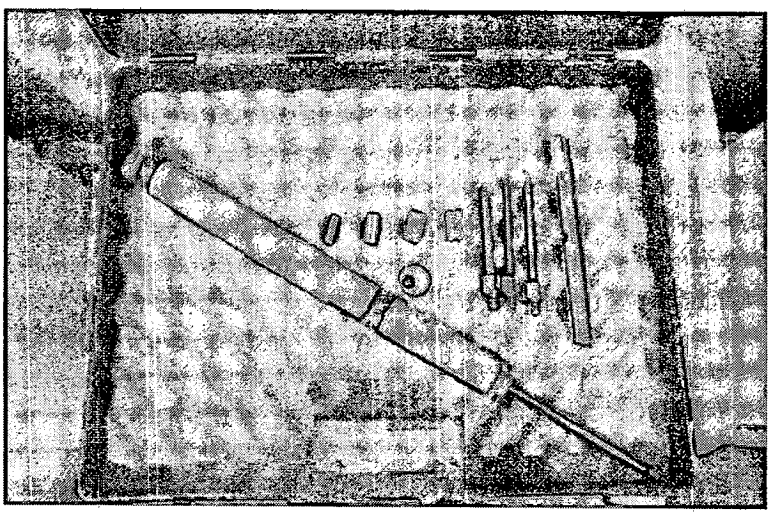
ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความข้นเหลว ค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (ภาพ 46) โดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 191



ภาพ 46 ชุดทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์เพสต์

7. **ชุดทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต**

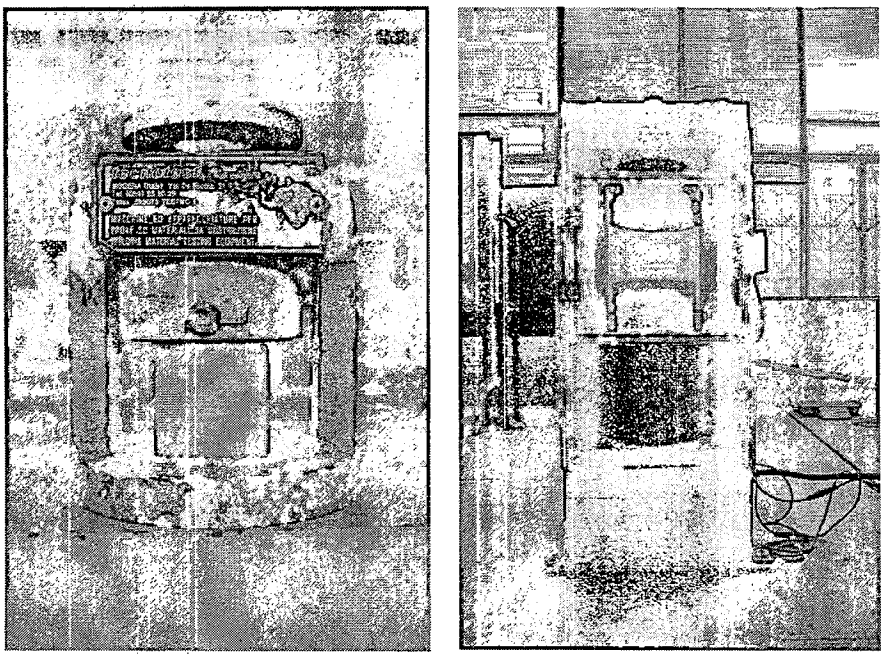
ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์มอร์ต้าและคอนกรีต (ภาพ 47) โดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 403 ค่าที่อ่านได้จากชุดทดสอบมีหน่วยเป็นปอนด์



ภาพ 47 ชุดทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต

8. **ชุดทดสอบกำลังรัดแรงอัดซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต**

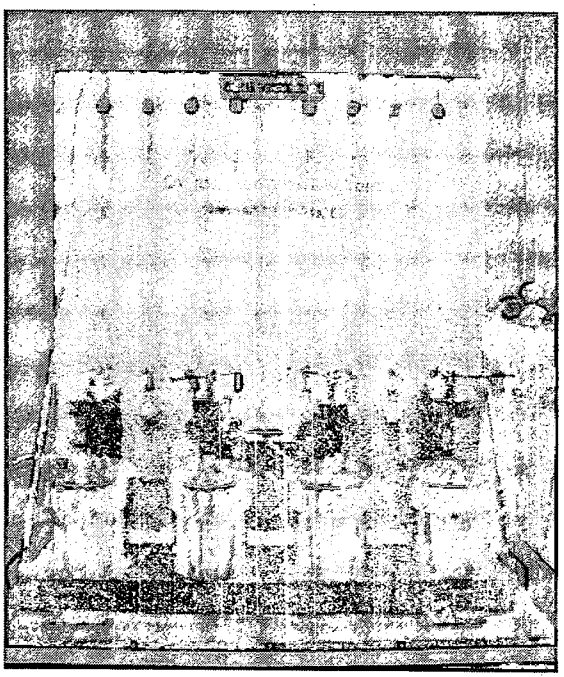
อุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต (ภาพ 48)



ภาพ 48 ชุดทดสอบกำลังรัดแรงอัดซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต

9. **ชุดทดสอบการซึมผ่านของอากาศ**

ชุดอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของอากาศ (ภาพ 49) โดยใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นตัวทดสอบ โดยหลักการวัดปริมาณอัตราความเร็วของก๊าซที่สามารถซึมผ่านก้อนตัวอย่างที่ต้องการทำการทดสอบ



ภาพ 49 ชุดทดสอบการซึมผ่านของอากาศ

ตาราง 7 สรุปการทดสอบ

ลำดับ	การทดสอบ	ซีเมนต์เพสต์	ซีเมนต์มอร์ต้า	คอนกรีต
1	ทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว	✓	✓	-
2	ทดสอบการหดตัว	-	✓	-
3	ทดสอบกำลังอัด	-	✓	-
4	ทดสอบการต้านการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	-	✓	-
5	ทดสอบการต้านการกัดกร่อนเนื่องจากกรด	-	✓	-

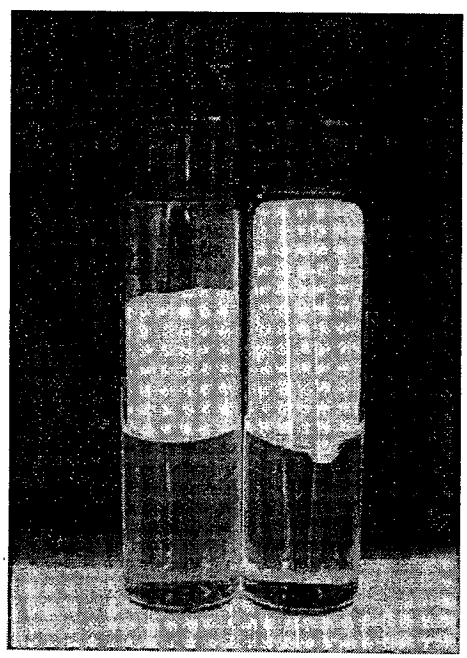
หมายเหตุ: ✓ = ทำการทดสอบ, - = ไม่ทดสอบ

รายละเอียดการทดสอบ

1. การเตรียมนาโนซิลิก้าก่อนการนำไปใช้งาน

ในการเตรียมตัวอย่างนาโนซิลิก้าก่อนนำไปผสมซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบตามแผนงาน นาโนซิลก้าจะถูกเตรียมก่อนนำไปใช้งาน โดยแบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ การใช้งานนาโนซิลิก้าลักษณะแบบผงจะสามารถใช้ผสมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการใดๆ ลักษณะที่สอง คือ ทำให้นาโนซิลิก้าในรูปของสารแขวนลอยก่อนใช้ทดสอบ ต้องอาศัยกระบวนการอื่นเพื่อช่วยทำให้นาโนซิลิก้าเกิดการแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปผสม รายระเอียดการเตรียมสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

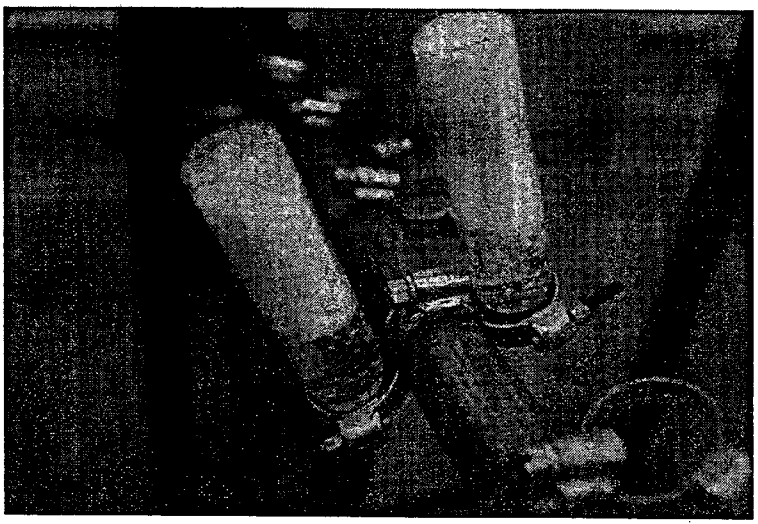
การเตรียมตัวอย่างนาโนซิลิก้าให้แขวนลอยอยู่ในน้ำจะผ่านกระบวนเพิ่มเติม เฉพาะสำหรับทำให้นาโนซิลิก้าประเภทพื้นผิวไม่ชอบน้ำแขวนลอยในน้ำ เนื่องจากนาโนซิลิก้าประเภทนี้จะหลีกเหลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ เมื่อผสมกับน้ำจะลอยอยู่บนผิวของน้ำดังภาพ 50



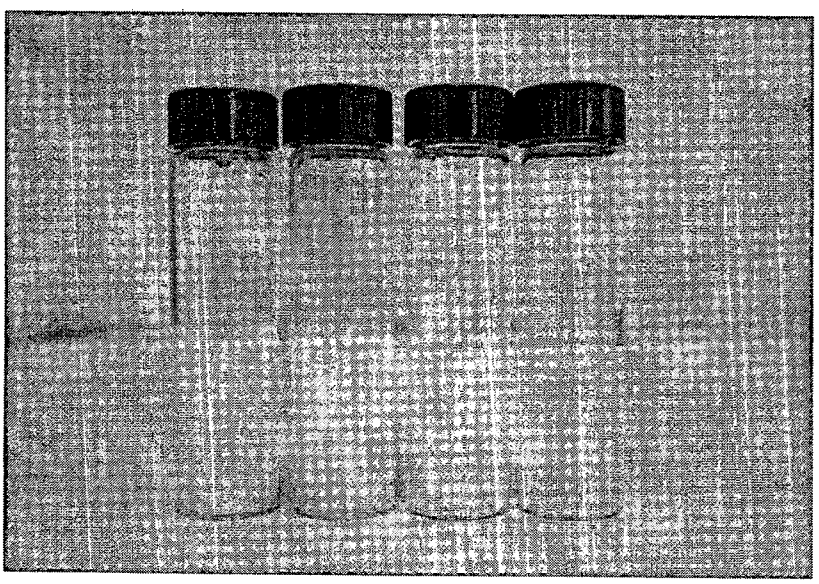
ภาพ 50 ลักษณะนาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำลอยบนผิวน้ำ

ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเทคนิคเพิ่มเติมเข้ามาช่วย เพื่อทำให้นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำแขวนลอยอยู่ในน้ำโดยการแกว่งในขวดทดสอบ (ดังภาพ 51) ด้วยเครื่องแกว่งสาร เพื่อให้นาโนซิลิก้าประเภทนี้สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำโดยไม่มีการแยกตัวระหว่างอนุภาคนาโนซิลิก้าและน้ำ ในการทดสอบจะใช้เวลาการแกว่งจนกว่าอนุภาคของนาโนซิลิก้าจะแขวนลอยในน้ำทั้งหมด

(เป็นเวลา 7 วัน หมุนด้วยความเร็ว 80 รอบ/นาที) ดังภาพ 52 สำหรับการเตรียมนาโนซิลิก้า จะมีการควบคุมปริมาณของนาโนซิลิก้าให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 29 กรัมต่อลิตร ก่อนนำไปใช้งาน



ภาพ 51 ลักษณะการทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำด้วยการหมุนด้วยเครื่องหมุน



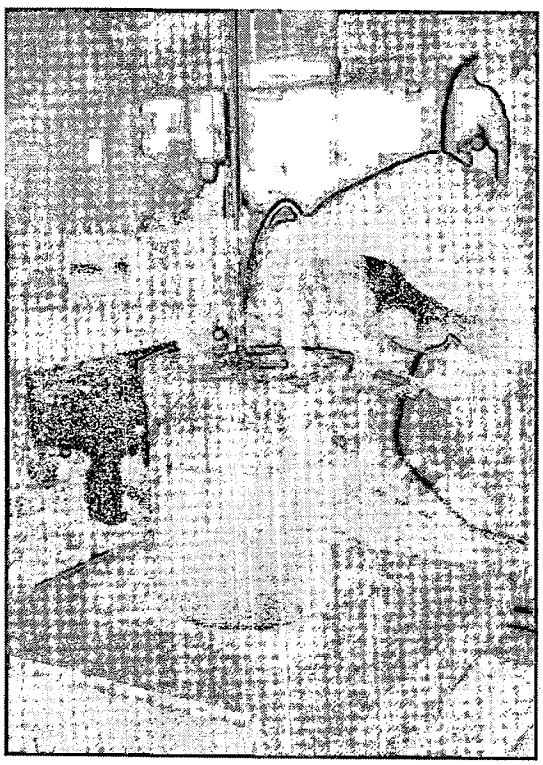
ภาพ 52 ลักษณะการแขวนลอยของนาโนซิลก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ

2. การทดสอบความเป็นปอซโซลานของนาโนซิลิก้า

เป็นการทดสอบความเป็นปอซโซลานของวัสดุที่ใช้ในงานคอนกรีตด้วยวิธีการวัดประจุไฟฟ้าของสารละลายในระบบ โดยใช้หลักการการวัดประจุไฟฟ้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์หลังจากทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลาน ทำให้ประจุไฟฟ้าของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในระบบมีค่าลดลง โดยสามารถแปรผลได้ คือ หากวัสดุปอซโซลานชนิดใดทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วสามารถทำให้เกิดเปอร์เซ็นการสูญเสียประจุไฟฟ้าในระบบการทดสอบมากที่สุด แสดงว่าวัสดุชนิดนั้นมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นปอซโซลานมากเช่นกัน (การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความเป็นปอซโซลานของวัสดุได้โดยตรง)

วิธีการทดสอบสามารถทำได้โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ (analytical-grade) ปริมาณ 200 mg. เติมลงในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (deionized water) 250 ml. ใน บิกเกอร์ ควบคุมอุณหภูมิ 40±1 °C คนด้วยเครื่องกวนสาร (ภาพ 53) จนสารละลายแคลเซียมไฮดรอไซด์ละลายจนหมดและอุณหภูมิคงที่ ทำการวัดประจุไฟฟ้า และ pH จากนั้นทำการเติมวัสดุปอซโซลาน 5 กรัม และทำการวัดประจุไฟฟ้า และ pH จนกว่าค่าไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง (ภาพ 54)

ภาพ 53 การเติมสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์



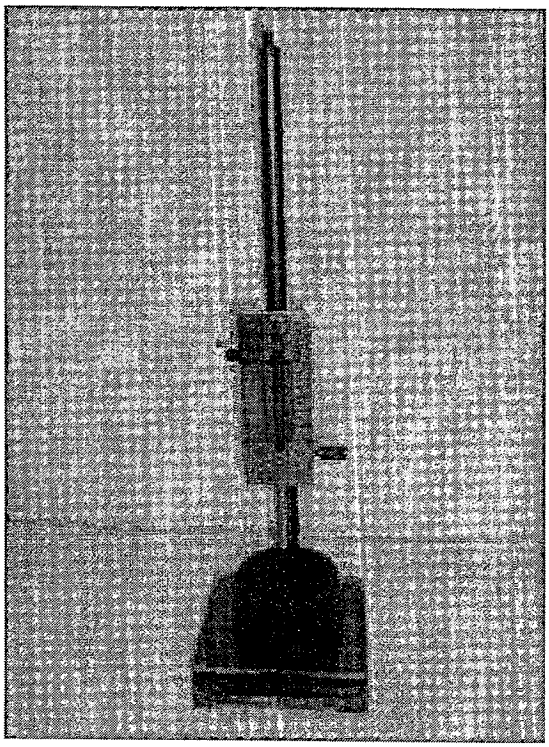
ภาพ 54 ตัวอย่างการทดสอบวัดประจุไฟฟ้า

3. **การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว**

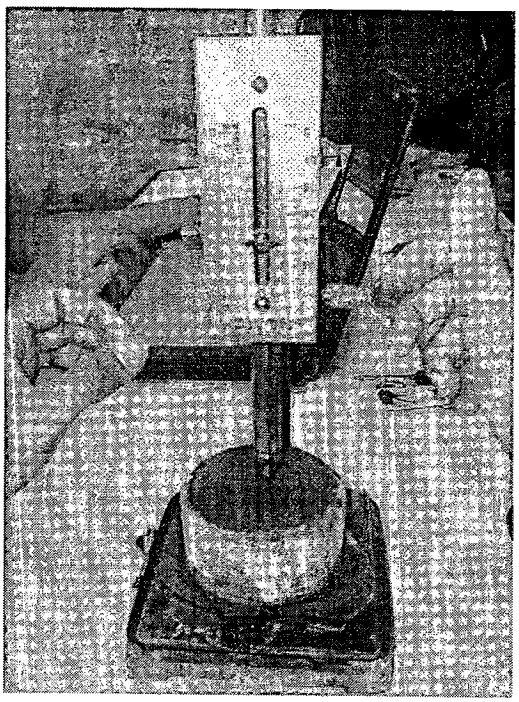
ระยะเวลาก่อตัวมีความสำคัญมากที่มีผลต่อการทำงาน โดยการก่อตัวแบ่งออกเป็นสามขั้น คือ การเริ่มก่อตัว การก่อตัวขั้นต้น และการก่อตัวขั้นสุดท้าย แต่ในการทดสอบให้ความสนใจที่จะศึกษาการก่อตัวขั้นต้น และการก่อตัวขั้นสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต เพื่อที่จะได้ทราบค่าความเหมาะสมต่อระยะเวลาการทำงานจริง

การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

การหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ด้วยเข็มไวแคต เพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งในการทดลองเราได้ใช้เครื่องมือทดสอบไวแคตแต่เข็มที่ใช้ในการทดสอบ (ภาพ 55) ในการทดสอบออกเป็นสองช่วงการทดสอบ คือ ช่วงแรก การหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม9 [19] และ ASTM C 191 ซีเมนต์เพสต์สามารถรับน้ำหนักของเข็มไวแคตได้โดยมีระยะการจมของเข็มที่ 25 มม. โดยใช้เข็มทดสอบที่มีลักษณะเป็นแท่งตรงดังภาพ 56 ช่วงความถี่ในการวัดค่าการทดสอบนั้นสามารถกำหนดได้โดยตัวผู้ทำการทดสอบเอง เมื่อได้ทำการวัดค่าเวลาการก่อตัว ค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นเป็นค่าระยะจมของเข็ม แล้วนำค่าดังกล่าวพล็อตกราฟ ซึ่งในการทดลองจะทำการทดลองจนกว่าเข็มจมในระยะ 25 มม. จึงถือว่าสิ้นสุดการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์

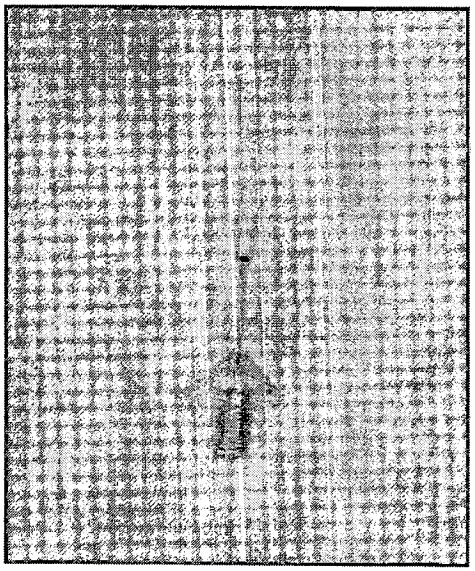


ภาพ 55 ชุดเครื่องมือไวแคต



ภาพ 56 การทดสอบหาค่าการก่อตัวเริ่มต้น

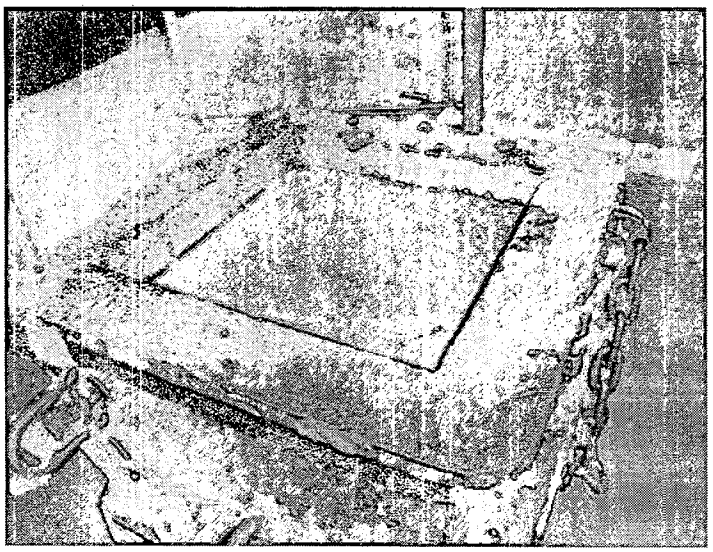
จากนั้นทำการทดสอบในช่วงที่สอง คือ การหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้ายโดยใช้เข็มทดสอบดังภาพ 57 การทดสอบนั้นจะทำจนกว่าจะไม่เห็นวงกลมรอบนอกของเข็ม จะถือว่าซีเมนต์เพสต์สิ้นสุดการก่อตัวขั้นสุดท้าย ในการทดสอบทั้งสอบส่วน มีการควบคุมอุณหภูมิ ที่ 25 ±1 องศาเซลเซียส ความชื้นอิ่มตัวโดยใช้ สเปรย์พ่นละอองน้ำเพื่อให้เกิดความชื้น เมื่อได้ค่าระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นและระยะเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้ายเรียบร้อยแล้ว



ภาพ 57 เข็มการหาเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้าย

การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้า

การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้าสามารถทำได้โดยนำซีเมนต์มอร์ต้าที่ทำการผสมไว้เทเข้าแบบหล่อ ขนาด 15*15*15 เซนติเมตร แบ่งเทออกเป็นสามชั้นที่เท่าๆ กันเพื่อง่ายต่อการไล่ฟองอากาศ ชั้นบนสุดไม่ควรเทจนเต็มแบบหล่อเว้นระยะประมาณ 1-2 เซนติเมตร (ภาพ 58)

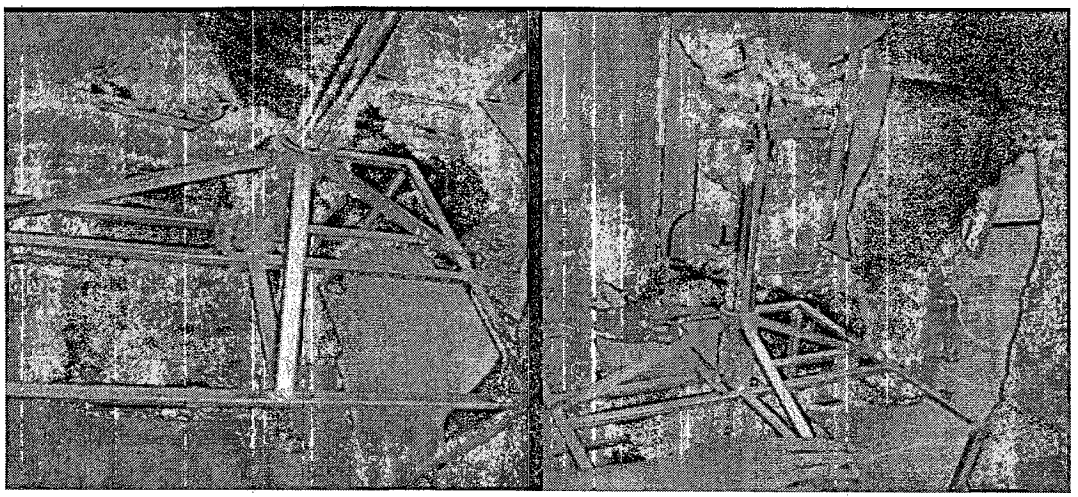


ภาพ 58 ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าในแบบเทก่อนการทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว

ทำการไล่ฟองอากาศออกจากเนื้อซีเมนต์มอร์ต้าด้วยโต๊ะเขย่าไล่ฟองอากาศ (ภาพ 59) แล้วนำตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าเก็บในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 25±1 °C ปิดให้สนิทด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นระหว่างการทดสอบ

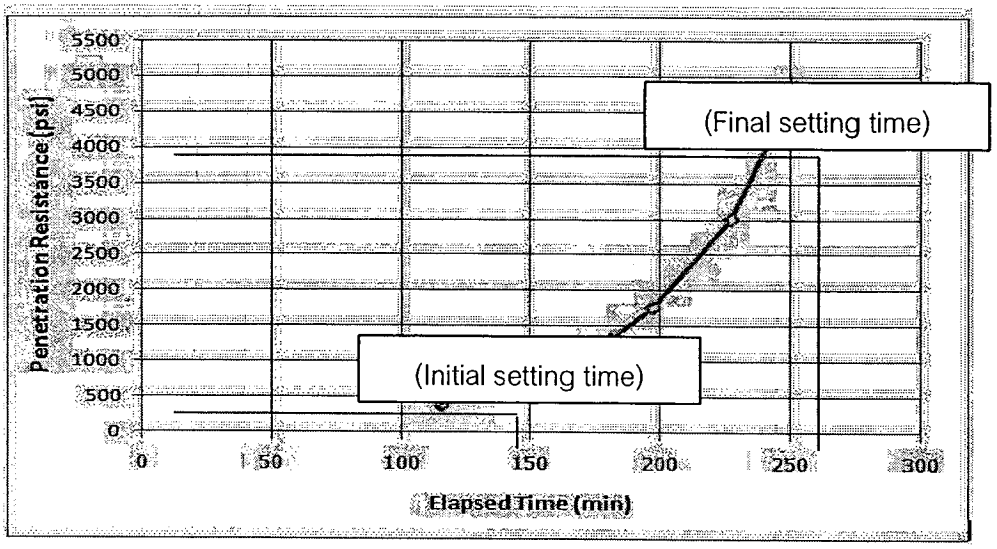
ภาพ 59 การไล่ฟองอากาศด้วยโต๊ะเขย่าไล่ฟองอากาศ

ทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว (ภาพ 60) ตามมาตรฐาน ASTM C 403 โดยทำการเปลี่ยนหัวกดทดสอบเมื่อซีเมนต์มอร์ต้ามีความสารถในการรับแรงมากกว่าที่จะอ่านค่าได้ตามสเกล โดยที่หัวกดแบ่งออกตามพื้นที่ 1, ½, ¼, 1/10, 1/20, 1/40 ตารางนิ้ว



ภาพ 60 การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว

เมื่อทำการทดสอบจะได้ค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากสเกลนำมาคำนวณหาแรงต้านทานจากน้ำหนักที่อ่านค่าได้ต่อพื้นที่หัวกด หน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยมาตรฐานกำหนดว่าจุดที่ซีเมนต์มอร์ต้าหรือคอนกรีต มีแรงต้านทาน 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คือ จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และแรงต้านทาน 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คือ จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final setting time) ดังภาพ 61



ภาพ 61 กราฟแสดงวิธีการหาค่าการก่อตัวของคอนกรีต

4. การศึกษาการหดตัวในซีเมนต์มอร์ต้า

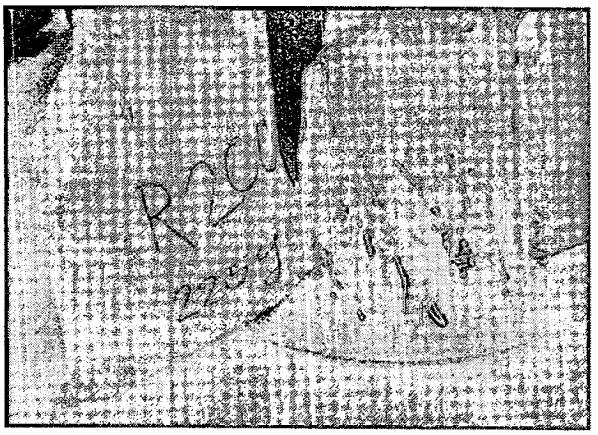
เนื่องด้วยสถานการณ์ปัจจุบันปัญหาเรื่องการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทวีคูณความรุนแรง อันส่งผลเสียในหลายๆ ด้าน ดังที่ได้กล่าวมาก่อนนี้ ด้วยเหตุนี้ผู้ทำวิจัยจึงให้ความสำคัญและมุ่งเน้นที่จะพัฒนาส่วนผสมทั้ง ซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต เพื่อต้องการลดการหดตัวที่จะเกิดขึ้น อันจะเป็นผลดีในอนาคต เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทนและยืดอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น

4.1 แผนการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักด้วยกัน คือ ส่วนแรกเป็นการดำเนินการเพื่อศึกษาสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้าในสภาพการใช้งาน (สภาพที่ยังไม่แข็งตัว คือ หลังจากสิ้นสุดระยะก่อตัวสุดท้าย) ส่วนที่สองเป็นการศึกษาคุณสมบัติหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

4.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการหดตัว

การเตรียมสำหรับทดสอบการหดตัวซีเมนต์มอร์ต้า และซีเมนต์เพสต์ ต้องเป็นไปตามหลักมาตรฐานการทดสอบสากล เพื่อให้สามารถอ้างอิงและสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบกับงานวิจัยอื่นที่ใกล้เคียงได้ การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้า ขนาด 25*25*285 มม. (ASTM C 490) การผสมซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า อ้างอิงตามมาตรฐานมาตรฐาน ASTM C 187 (หากเป็นวัสดุที่มีการดูดซึมน้ำต้องทำการปรับค่าการดูดซึมก่อนให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง)



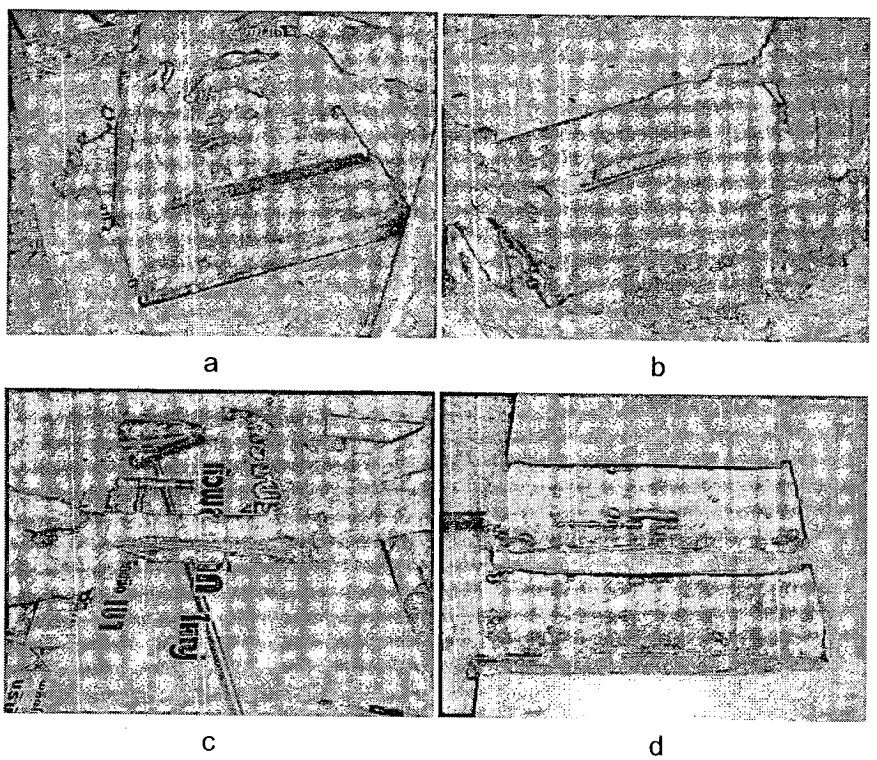
ภาพ 62 การเตรียมวัสดุก่อทำการผสม

a b

d d

ภาพ 63 ขั้นตอนการผสมซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้า

ซีเมนต์เพสต์หรือซีเมนต์มอร์ต้าที่ผสมเสร็จ นำเทลงในแบบที่ทำการเตรียมไว้ ดังภาพ 64 (a) การเทควรเทเป็นชั้นๆ จุดประสงค์เพื่อกำจัดฟองอากาศในแท่งตัวอย่าง อาจจะเทประมาณอย่างน้อย 2-3 ชั้น หรือมากกว่านั้น โดยแต่ละชั้นจะต้องทำการเขย่าเพื่อกำจัดฟองอากาศที่จะเกิดขึ้น ดังภาพ 64 (b) ทำการตกแต่งผิวหน้าของก้อนตัวอย่างให้เรียบร้อยและสวยงาม เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วนำแบบเทเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25±1 องศาเซลเซียส ความชื้น 50±5 %RH และห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร 2 ชั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นให้แก่สภาพแวดล้อมดังภาพ 64 (c-d) เมื่อสิ้นสุดเวลาการก่อตัวขั้นสุดท้าย นำเก็บไว้ในห้องเก็บตัวอย่างเพื่อรอการแกะแบบต่อไป

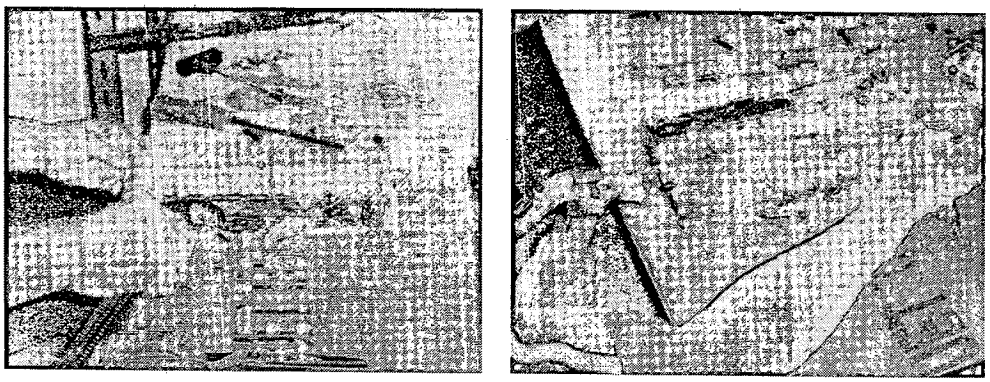


ภาพ 64 ลักษณะการเทซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้าลงในแบบ

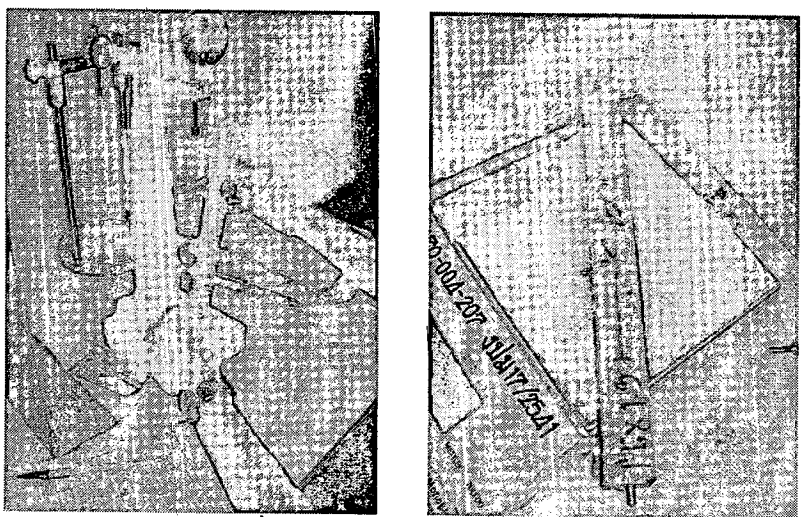
4.3 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

ก้อนตัวอย่างทดสอบซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า ถอดแบบหลังจากอายุครบ 23 ชั่วโมง 30 นาที ดังภาพ 65 ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ในการถอดแบบต้องทำด้วยความระมัดระวังและความชำนาญเป็นอย่างมาก มิเช่นนั้นก้อนตัวอย่างทดสอบอาจเกิดความเสียหายได้ ทำความสะอาด เครื่องหมายแสดงทิศทางของงการวัดก้อนตัวอย่างให้เรียบร้อย

เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวัดครั้งต่อๆ ไป ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวของก้อนทดสอบ (ASTM C 490) ชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเริ่มต้น แล้วนำไปบ่มในน้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 7 วัน บันทึกการเปลี่ยนแปลงความยาวและน้ำหนัก



ภาพ 65 ตัวอย่างการถอดแบบซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า



(a) การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว (b) ทดสอบวัดค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

ภาพ 66 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

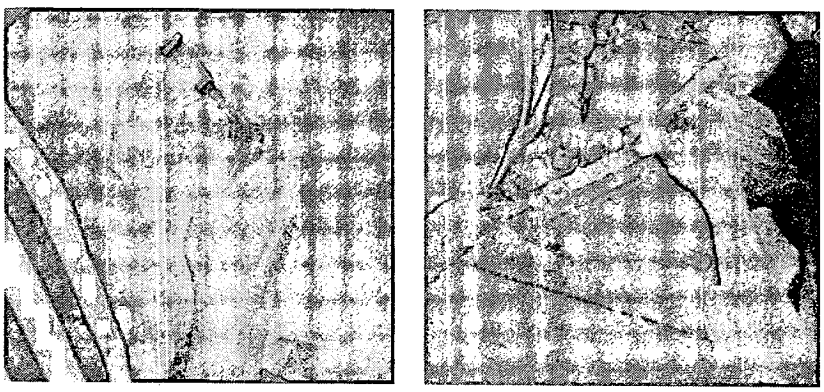
การเก็บข้อมูลการทดสอบในช่วงแรกจำเป็นต้องมีการบ่มก้อนตัวอย่างทดสอบเป็นเวลา 7 วัน ทำการเก็บข้อมูลที่อายุ 1, 3, 5 และ 7 วัน หลังจากอายุการบ่มที่ 7 วัน นำตัวอย่างทดสอบซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้าออกจากน้ำ และเริ่มนับอายุหลังจากการบ่มใหม่ ทำการเก็บก้อนทดสอบตัวอย่างที่อายุ 3 5 7 10 14 28 เมื่อออกจากน้ำ และหลังจากอายุการทดสอบที่ 28 วัน เก็บทุกๆ 7 วัน

4.4 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวออโตจีนัส

ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า การเตรียมตัวอย่างเหมือนกับการทดสอบแบบแห้ง แต่จะแตกต่างดังต่อไปนี้ จะต้องถอดแบบหลังจากสิ้นสุดการก่อตัวขั้นสุดท้ายเรียบร้อยแล้ว ต้องระมัดระวังเรื่องการสูญเสียความชื่นของก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยพันก้อนตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนึ่งชั้นด้วยความเร็ว ดังภาพ 67 (a) เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ทำความสะอาดหัวน็อตให้สะอาดมากที่สุด หยดกาวปิดรอยต่อที่หัวน็อต ดังภาพ 67 (b) วัดค่าและบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวเริ่มต้น พันด้วยเทปอลูมิเนียมอีกชั้น หยดกาว เขียนชื่อ พันด้วยพลาสติกห่ออาหารจำนวน 4 ชั้น และติดด้วยเทปใสเป็นชั้นสุดท้าย (ภาพ 68) ขั้นตอนการห่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้าควรใช้เวลาไม่เกิน 15 นาที สุดท้ายชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าพร้อมเก็บก้อนตัวอย่างที่ชั้นวาง

a b

ภาพ 67 การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบออร์โตจีนัส

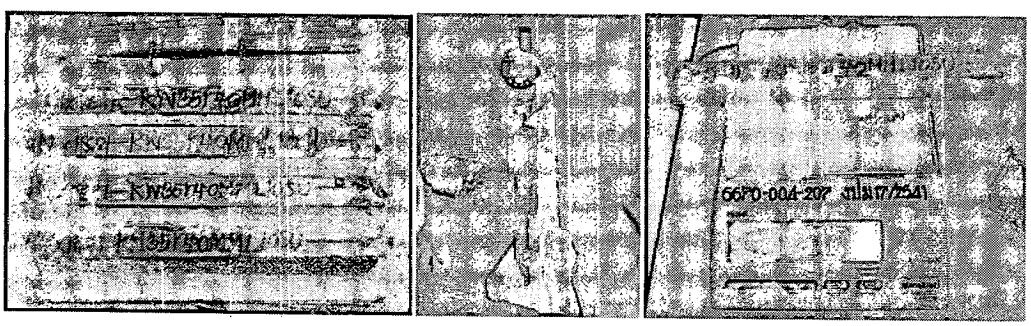


a b

ภาพ 68 การเตรียมก้อนตัวอย่าง

การเก็บข้อมูลการการเปลี่ยนแปลงความยาวและน้ำหนักกระทำดังภาพ 69 เก็บข้อมูลที่อายุก้อนทดสอบ 3, 5, 7, 10, 14 และ 28 วัน และทุกๆ 7วัน หลังจากอายุ 28

การเก็บข้อมูลการทดสอบ จะต้องทำการกรอกข้อมูลในคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงความยาวและน้ำหนักของก้อนทดสอบ หากเกิดค่าข้อมูลผิดปกติกับก้อนตัวอย่างทดสอบ ก็ทำการเก็บข้อมูลใหม่อีกครั้ง เพื่อยืนยันค่าข้อมูล ในกรณีที่พบปัญหาน้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลงมากว่า 0.1 กรัม ทำการพันก้อนตัวอย่างอีกชั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำหนัก



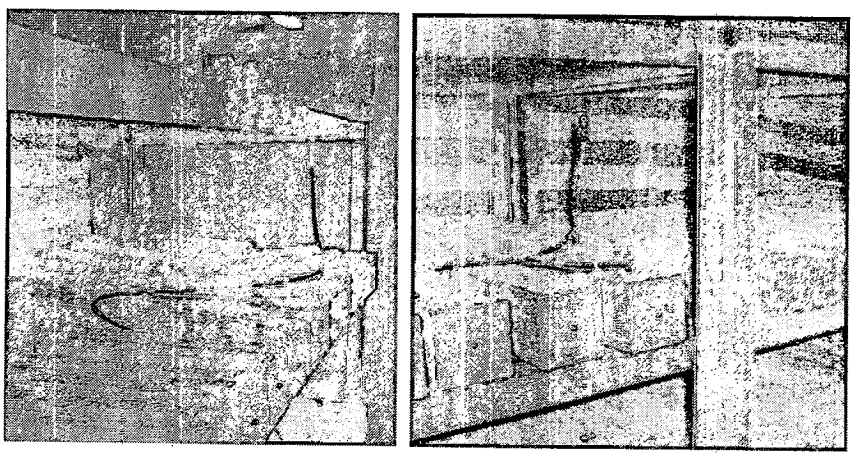
ภาพ 69 การวัดค่าการยืดหดและการชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างทดสอบ

4.5 การเก็บตัวอย่างทดสอบการหดตัว

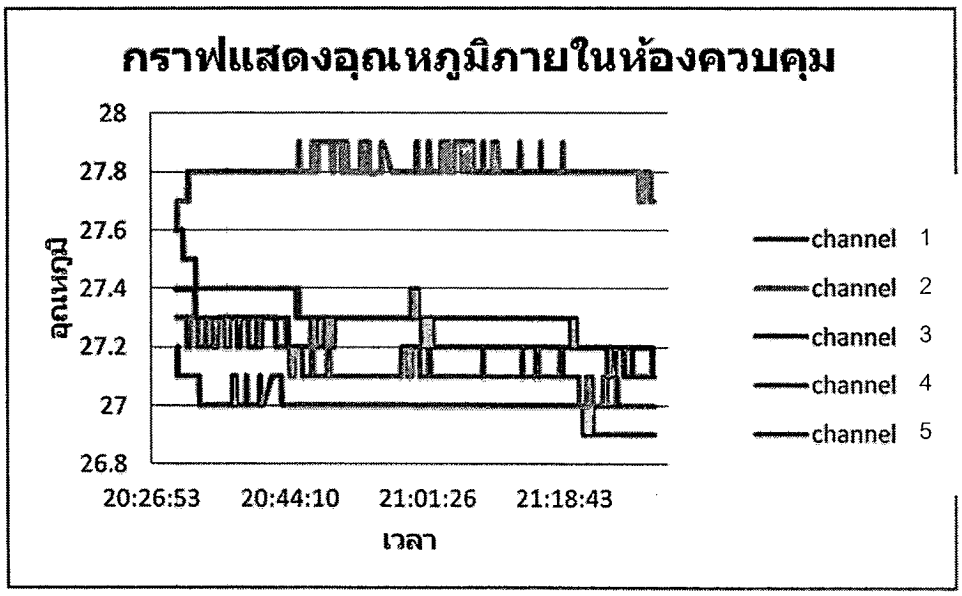
ตัวอย่างสำหรับการทดสอบการหดตัวจะถูกเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยมีอุณหภูมิ 28±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50±5 %RH หลักการพิจารณาเลือกใช้ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ คือ ใช้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นของประเทศไทยตลอดทั้งปี

การตรวจสอบห้องเก็บตัวอย่างทดสอบ จะทำการตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องเก็บตัวอย่างทดสอบทุกชั้น (ภาพ 70-71) โดยใช้เครื่องตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น รุ่น AP 104 จะเก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นภายใน ณ ตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบ แล้วนำค่าดังกล่าวเขียนเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบ (ภาพ 72-73) ค่าความแตกต่างของจุดทดสอบหากเกินกำหนดทำการปรับปรุงและแก้ไขต่อไป พร้อมตรวจสอบผลอีกครั้ง

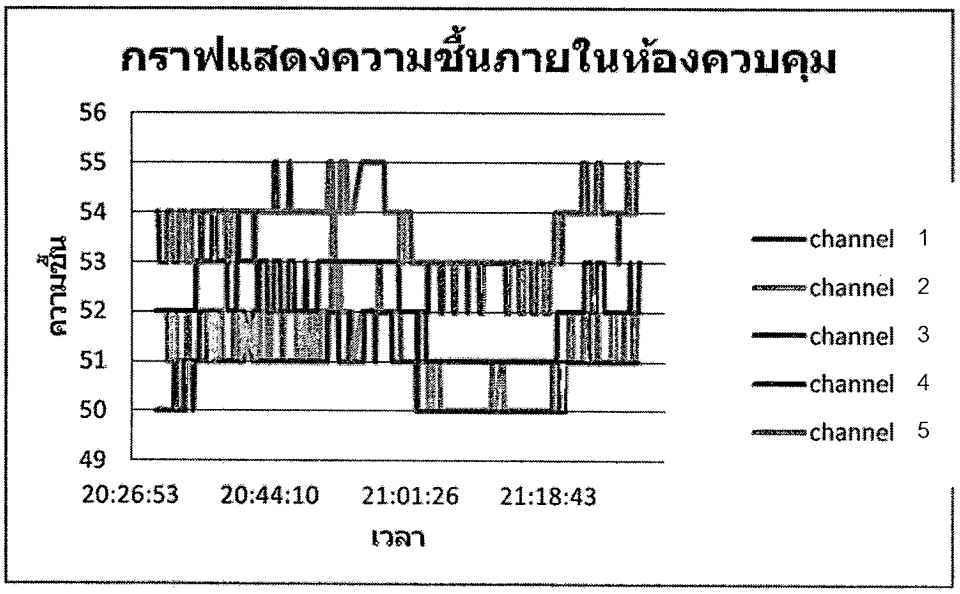
ภาพ 70 ชั้นวางตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต



ภาพ 71 ตัวอย่างอุปกรณ์ทดสอบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์



ภาพ 72 กราฟแสดงการตรวจสอบความอุณหภูมิของห้องเก็บตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต



ภาพ 73 กราฟแสดงผลการตรวจสอบความชื้นในห้องเก็บตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต

ตาราง 8 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

ลำดับ	ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้า	การผสม
1	LW55r0	0.55	0	การผสมนาโนซิลิก้าแบบผงกับปูนซีเมนต์
2	LW55SiHl0.50	0.55	0.5	
3	LW55SiHl1	0.55	1	
4	LW55SiHl2	0.55	2	
5	LW55SiHb0.50	0.55	0.5	
6	LW55SiHb1	0.55	1	
7	LW55SiHb2	0.55	2	
8	Lw55SiHb14.5 g/l	0.55	0.5	ทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปใช้งาน
9	Lw55SiHb29 g/l	0.55	1	

หมายเหตุ: L คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แหล่งผลิตจากจังหวัดลำปาง
W คือ ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์, ปูนซีเมนต์+นาโนซิลิก้า)
SiHl คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ
SiHb คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ

ตาราง 9 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส

ลำดับ	ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้า	การผสม
1	LW35r0	0.55	0	การผสมนาโนซิลิก้าแบบผงกับปูนซีเมนต์
2	LW35SiHl0.50	0.55	0.5	
3	LW35SiHl1	0.55	1	
4	LW35SiHl2	0.55	2	
5	LW35SiHb0.50	0.55	0.5	
6	LW35SiHb1	0.55	1	
7	LW35SiHb2	0.55	2	
8	LW35SiHb14.5 g/l	0.55	0.5	ทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปใช้งาน
9	LW35SiHb29 g/l	0.55	1	

หมายเหตุ: L คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แหล่งผลิตจากจังหวัดลำปาง
W คือ ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์,ปูนซีเมนต์+นาโนซิลิก้า)
SiHl คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ
SiHb คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ

5. การศึกษากำลังการรับแรงอัดในซีเมนต์มอร์ต้า

5.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์

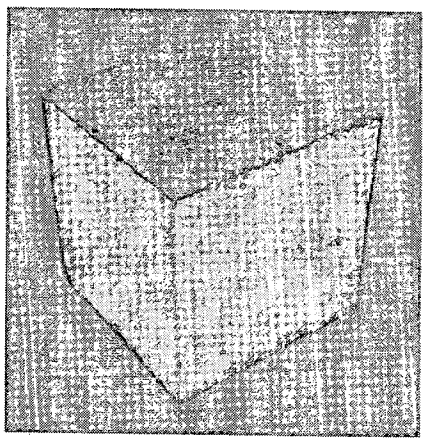
การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้า เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติทางความสามารถในการรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้า การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 109 ก้อนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยม ขนาด 5*5*5 เซนติเมตร ดังตัวอย่างภาพ 74 ถอดแบบที่อายุ 23 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบทำการบ่ม และทดสอบที่ซีเมนต์มอร์ต้าอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน

5.2 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด

ในการทดสอบแบ่งวิธีการผสมออกเป็นสองแบบ คือ ผสมแบบผงโดยคลุกซิลิก้ากับปูนซีเมนต์ก่อนการนำไปผสม และผสมแบบแขวนลอย คือ ทำให้ซิลิก้าแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปผสม เนื่องจากซิลิก้าฟูมพื้นผิวสัมผัสประเภทไม่ชอบน้ำมักจะหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ จึงต้องการผสมซิลิก้าฟูมประเภทนี้ให้ผสมกับน้ำก่อนนำไปใช้งาน การทดสอบแบบแรกเลือกใช้ปริมาณซิลิก้าฟูมในการทดสอบที่ปริมาณ 0-2% ของการแทนที่น้ำหนักของปูนซีเมนต์ การทดสอบแบบที่สอง คือ การทำให้ซิลิก้าฟูมแขวนลอยในน้ำก่อนทำการผสม ในปริมาณตามความเข้มข้น 14.9, 29 g/l

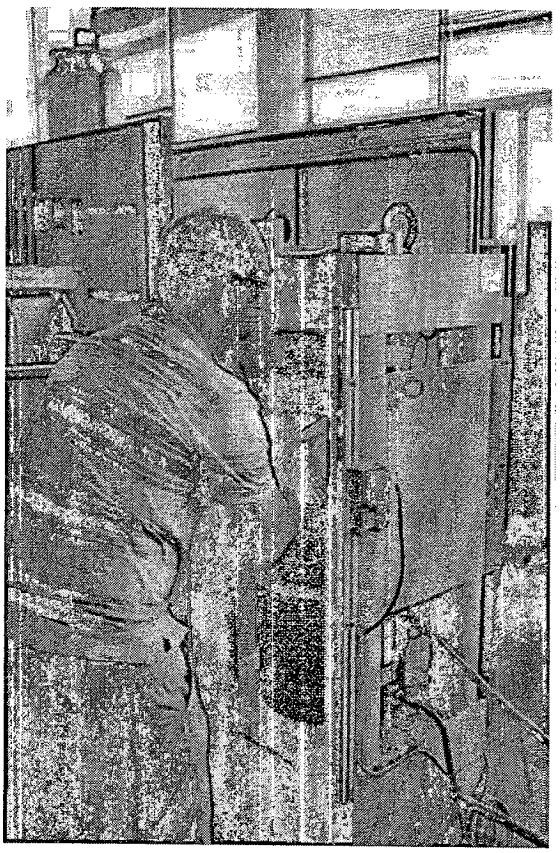
5.2.1 รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้า

ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าเตรียมตามมาตรฐาน ASTM C 305 โดยระวังการสูญเสียความชื้นระหว่างขั้นตอนการผสม การเทลงแบบ และขณะอยู่ในแบบเท จะต้องปิดด้วยพลาสติกห่ออาหารเพื่อป้องกันการระเหย รอครบเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบและทำความสะอาดก้อนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้า ทำบ่มในน้ำเพื่อรอการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ในขั้นต้น



ภาพ 74 ตัวอย่างก้อนซีเมนต์มอร์ต้าขนาด 5*5*5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้า ต้องทำการเก็บข้อมูลที่จำเป็นดังเช่น การชั่งน้ำหนัก วัดขนาดความกว้าง ยาว สูงของทุกด้านของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์บันทึกค่า จากนั้นทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบทำลาย บันทึกค่า หาหน่วยแรงที่ก้อนทดสอบสามารถรับได้และนำมาพล็อตค่าเพื่อเสนอผลการทดสอบต่อไป



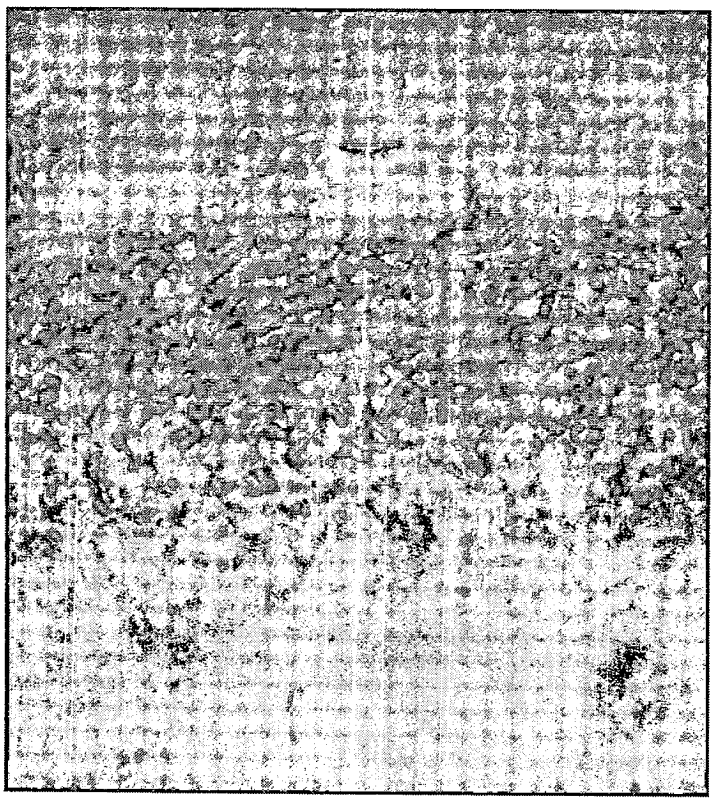
ภาพ 75 การทดสอบกำลังอัด

ตาราง 10 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัด

ลำดับ	ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้า	การผสม
1	LW55r0	0.55	0	การผสมนาโนซิลิก้าแบบผงกับปูนซีเมนต์
2	LW55SiHl0.50	0.55	0.5	
3	LW55SiHl1	0.55	1	
4	LW55SiHl2	0.55	2	
5	LW55SiHb0.50	0.55	0.5	
6	LW55SiHb1	0.55	1	
7	LW55SiHb2	0.55	2	
8	LW55SiHb14.5 g/l	0.55	0.5	ทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปใช้งาน
9	LW55SiHb29 g/l	0.55	1	

หมายเหตุ: L คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แหล่งผลิตจากจังหวัดลำปาง
W คือ ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์,ปูนซีเมนต์+นาโนซิลิก้า)
SiHl คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ
SiHb คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ

6. การศึกษาผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยกรดซัลฟูริกในซีเมนต์มอร์ต้า



ภาพ 76 ตัวอย่างคอนกรีตถูกกัดกร่อนโดยกรด

6.1 วิธีการและการทดสอบ

ในการทดสอบนี้เป็นการจำลองสถานการณ์ที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพจากการสัมผัสกับกรดในสภาพแวดล้อม โดยแบ่งระดับความรุนแรงของกรดที่ใช้ดังนี้ โดยมีค่า pH ต่ำกว่า 6.5 ถือว่าอยู่ในสภาพแวดล้อมเป็นกรด แต่หากมีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 ถือว่าเป็นสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดที่ทำให้เกิดการเสียหายอย่างรุนแรง ตัวอย่างของกรดที่ใช้ทดสอบ Carbonic, Hydrochloric, Hydrofluoric, Nitric, Phosphoric, Sulfuric, Acetic, Citric, Formic, Humic, Lactic และ Tannic

การทดสอบการต้านทานกรดของซีเมนต์มอร์ต้า ใช้ตัวอย่างขนาด 5*5*5 เซนติเมตร ถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง ทำการวัดขนาด ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่า และแช่ในสารละลายกรดซัลฟูลิก (Sulfuric acid) ที่มีความเข้มข้น 0.03 % (PH=2.5) ก้อนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้า จะแช่อยู่ในสารละลายกรดซัลฟูลิก โดยมีการเปลี่ยนกรดทุกวัน จนกว่าครบกำหนดการทดสอบ การทดสอบ

ต้องมีการทดสอบเก็บข้อมูล การวัดการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้า การทดสอบกำลังอัด และการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างของสารละลาย รายละเอียดของช่วงอายุการเก็บข้อมูลการทดสอบที่อายุก้อนตัวอย่างกำหนดดังนี้ก้อนตัวอย่างอายุครบ 5 10 20 30 และ40 รอบการเปลี่ยนกรด

6.1.1 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก

สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าขนาด 5*5*5 ซม. ต้องบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น และหลังจากแช่ในสารละลายกรด โดยทำการชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม แล้วบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักดังสมการดังต่อไปนี้

$$W = \frac{(W_x - W_i)}{W_i} * 100$$

เมื่อ W คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

W_x คือ ค่าน้ำหนักล่าสุดที่อ่านหลังจากแช่ในสารละลายกรด

W_i คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้นที่อ่านได้หลังจากบ่มน้ำ 28 วัน

ตาราง 11 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก

ลำดับ	ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้า	การผสม
1	LW55r0	0.55	0	การผสมนาโนซิลิก้าแบบผงกับปูนซีเมนต์
2	LW55SiHl0.50	0.55	0.5	
3	LW55SiHl1	0.55	1	
4	LW55SiHl2	0.55	2	
5	LW55SiHb0.50	0.55	0.5	
6	LW55SiHb1	0.55	1	
7	LW55SiHb2	0.55	2	
8	LW55SiHl14.5 g/l	0.55	0.5	ทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปใช้งาน
9	LW55SiHl29 g/l	0.55	1	
10	LW55SiHb14.5 g/l	0.55	0.5	
11	LW55SiHb29 g/l	0.55	1	

หมายเหตุ: L คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แหล่งผลิตจากจังหวัดลำปาง

W คือ ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์,ปูนซีเมนต์+นาโนซิลิก้า)

SiHl คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ

SiHb คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ

7. การทดสอบการต้านทานซัลเฟตซีเมนต์มอร์ต้า

7.1 วิธีการและการทดสอบ

การทดสอบการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ต้าจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร ในการทดสอบ ใช้ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าขนาด 25*25*285 มม.ทั้งหมดสี่ก้อนตัวอย่าง (ตามมาตรฐาน ASTM C 1012) ขณะตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าอยู่ในแบบเท ควบคุมการสูญเสียความชื้นโดยการห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร และถอดแบบที่อายุ 23±1/2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มตัวอย่าง ให้ตัวอย่างก้อนตัวอย่างมีกำลังอัด ได้มากกว่า 20±19 MPa ทำการวัดค่าความยาวเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparater ตามมาตรฐาน ASTM C 490) และบันทึกค่าเริ่มต้นไว้ จากนั้นนำไปบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ทำการเตรียมไว้ก่อนหนึ่งวัน โดยที่สารละลายมีความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 352 โมล (50 g/L) ในอัตราส่วนปริมาตรสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อปริมาตรซีเมนต์มอร์ต้า 4:1 เมื่อตัวอย่างการทดสอบอายุที่ 1 2 3 4 8 13 และ15 สัปดาห์ ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของก้อนตัวซีเมนต์มอร์ต้า ตามมาตรฐาน ASTM C 490 บันทึกค่า และนำเสนอค่า

การหาค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของซีเมนต์มอร์ต้า

$$L = \frac{(L_x - L_i)}{\mathrm{L_g}} * 100$$

เมื่อ L คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความยาว

L_x คือ ค่าความยาวล่าสุดที่อ่านไหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต

L_i คือ ค่าความยาวเริ่มต้น

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length เท่ากับ 285 มม.

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 4200 ppm (42.36 กรัมต่อลิตร) ในการทดสอบ ใช้ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าขนาด 5*5*5 ซม.ทั้งหมดสี่ก้อนตัวอย่าง (ตามมาตรฐาน ASTM C 1012) ขณะตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าอยู่ในแบบเท ควบคุมการสูญเสียความชื้นโดยการห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร และถอดแบบที่อายุ 23±1/2 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มตัวอย่าง ให้ตัวอย่างก้อนตัวอย่างมีกำลังอัด ได้มากกว่า 20±19 MPa ทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และบันทึกค่าเริ่มต้นไว้

จากนั้นนำไปบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ทำการเตรียมไว้ก่อนหนึ่งวัน ในอัตราส่วนปริมาตรสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อปริมาตรซีเมนต์มอร์ต้า 4:1 เมื่อตัวอย่างการทดสอบอายุที่ 1, 2, 3, 4, 8, 13 และ15 สัปดาห์ ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวซีเมนต์ บันทึกค่า และนำเสนอค่า

ตาราง 12 ส่วนผสมการทดสอบการต้านทานการทำลายจากโซเดียมซัลเฟตของซีเมนต์มอร์ต้า

ลำดับ	ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิก้า	การผสม
1	LW55r0	0.55	0	การผสมนาโนซิลิก้าแบบผงกับปูนซีเมนต์
2	LW55SiHl0.50	0.55	0.5	
3	LW55SiHl1	0.55	1	
4	LW55SiHl2	0.55	2	
5	LW55SiHb0.50	0.55	0.5	
6	LW55SiHb1	0.55	1	
7	LW55SiHb2	0.55	2	
8	LW55SiHl14.5 g/l	0.55	0.5	ทำให้นาโนซิลิก้าแขวนลอยในน้ำก่อนนำไปใช้งาน
9	LW55SiHl29 g/l	0.55	1	
10	LW55SiHb14.5 g/l	0.55	0.5	
11	LW55SiHl29 g/l	0.55	1	

หมายเหตุ: L คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แหล่งผลิตจากลำปาง
W คือ ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์,ปูนซีเมนต์+นาโนซิลิก้า)
SiHl คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ชอบน้ำ
SiHb คือ นาโนซิลิก้าประเภทที่ไม่ชอบน้ำ

ตาราง 13 สรุปการทดสอบของงานวิจัย

ลำดับ	การทดสอบ	ซีเมนต์เพสต์	ซีเมนต์มอร์ต้า	คอนกรีต
1	ทดสอบความข้นเหลว	✓	-	-
2	ทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว	✓	✓	-
3	ทดสอบค่าการไหลแผ่	-	✓	-
4	ทดสอบการหดตัว	-	✓	-
5	ทดสอบกำลังอัด	-	✓	-
6	ทดสอบการต้านการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	-	✓	-
7	ทดสอบการต้านการกัดกร่อนเนื่องจากกรด	-	✓	-
8	ทดสอบการท้านต้านการซึมผ่านของคลอไรด์	-	-	✓

หมายเหตุ: ✓ = ทำการทดสอบ, - = ไม่ทดสอบ

ตาราง 14 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

ลำดับ	การทดสอบ	ขนาดตัวอย่างทดสอบ (ซม.)	จำนวนส่วนผสมทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบต่อส่วนผสม	จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด
1	การทดสอบความข้นเหลวซีเมนต์เพสต์	-	9	1	9
2	การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์เพสต์	-	9	1	9
3	การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์มอร์ต้า	15*15*15	9	1	9
4	การทดสอบค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ต้า	-	9	1	9-
5	ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์มอร์ต้า	2.5*2.5*28.5	9	4	36
6	ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของเพสต์ และซีเมนต์มอร์ต้า	2.5*2.5*28.5	9	4	72
7	ทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้า	5*5*5	9	3	27
8	ทดสอบการต้านการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของซีเมนต์มอร์ต้า	5*5*5 2.5*2.5*28.5	9	4	72
9	ทดสอบการต้านการกัดกร่อนเนื่องจากกรด	5*5*5	9	3	27
10	ทดสอบการท้านต้านการซึมผ่านของคลอไรด์	รัศมี 5*10	9	1	9

แผนการทำงาน

ตาราง 15 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน		อายุการทดสอบ (สัปดาห์)	ช่วงระยะเวลาพ.ศ.2556						
			ม.ค.	ก.พ.	มี.ค	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
ค้นคว้าข้อมูล	ศึกษาคุณสมบัติของไมโครและนาโนซิลิก้า		←	—	—	→			
	ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		←	—	—	→			
	รวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิจัย		←	—	—	→			
ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ	ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพซิลิก้า		←	—	—	—	—	→	
	ทดสอบหาขนาดและรูปร่างภายนอกของซิลิก้า		←	—	—	—	—	→	
	ทดสอบความเป็นปอซโซลานของซิลิก้า		←	—	→				
ทดสอบการหดตัวซีเมนต์มอร์ต้า	หาค่าการไหลแผ่		←	—	→				
	ทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว		←	—	→				
	ทดสอบการหดตัวแบบแห้ง		←	—	—	→			
	ทดสอบการหดตัวแบบออร์โตจีนัส		←	—	—	→			

ตาราง 15 (ต่อ)

แผนการดำเนินงาน		อายุการทดสอบ (สัปดาห์)	ช่วงระยะเวลาพ.ศ.2556						
			ม.ค.	ก.พ.	มี.ค	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
ทดสอบการกำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้า	ออกแบบการทดสอบ		←	→					
	เตรียมตัวอย่างทดสอบและทำการทดสอบ		←	→					
	วิเคราะห์ผล		←	→					
ทดสอบการต้านทานการทำลายโดยกรด	ออกแบบการทดสอบ		←	→					
	เตรียมตัวอย่างทดสอบและทำการทดสอบ		←	→					
	วิเคราะห์ผล		←	→					
ทดสอบการขยายตัวจากซัลเฟต	ออกแบบการทดสอบ		←	→					
	เตรียมตัวอย่างทดสอบและทำการทดสอบ		←	→					
	วิเคราะห์ผล		←	→					
ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์	ศึกษาการทดสอบ			←	→				
	ออกแบบเครื่องทดสอบและทดสอบ			←	→				
	วิเคราะห์ผล			←	→				

ตาราง 15 (ต่อ)

แผนการดำเนินงาน		อายุการทดสอบ (สัปดาห์)	ช่วงระยะเวลาพ.ศ.2556						
			ม.ค.	ก.พ.	มี.ค	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
นำเสนอผลการทดสอบ	วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ					←	—	→	
	ศึกษางานวิจัยเพื่อเพิ่มพลูความรู้					←	—	→	
	นำเสนอและตีพิมพ์งานวิจัย						←	—	→
จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์		←	—	—	—	—	—	→	