

สทร. HSR-CT-4010-2568

มาตรฐานการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่สัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียม
ซัลเฟต สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูง

(Standard Test Method for Weight Change of Mortars Exposed to Magnesium
Sulfate Solution in High-Speed Rail Projects)

บทนำ

ร่างมาตรฐานนี้พัฒนาโดยอ้างอิงวิธีการทดสอบ ASTM C1012/C1012M-18b Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution และ มอก. 2752 เล่ม 25-2566 วิธีทดสอบปูนซีเมนต์ เล่ม 25 วิธีทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต และผลทดสอบจากบทความวิจัยซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานนี้กำหนดวิธีทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมอร์ตาร์สัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยตัวอย่างทดสอบเตรียมขึ้นตาม มอก. 2752 เล่ม 12 โดยที่ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของตัวอย่างทดสอบต้องมีค่า 20.0 ± 1.0 MPa จึงจะนำตัวอย่างทดสอบไปแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
- 1.2 ใช้ระบบหน่วย SI เป็นหน่วยสำหรับมาตรฐานนี้
- 1.3 มาตรฐานฉบับนี้ใช้สำหรับการทดสอบในงานก่อสร้างโครงการรถไฟความเร็วสูง สำหรับระบบรางอื่น ๆ เช่น รถไฟระหว่างเมือง รถไฟชานเมือง และรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน สามารถนำมาตรฐานการทดสอบฉบับนี้ไปใช้ศึกษาอ้างอิงประกอบงานก่อสร้างได้ตามความเหมาะสม

2. มาตรฐานอ้างอิง

มาตรฐานอ้างอิงต่อไปนี้จะยึดตามฉบับปรับปรุงล่าสุดในทุก ๆ ครั้งที่มีการบังคับใช้ในมาตรฐาน แต่ต้องไม่ขัดกับมาตรฐานฉบับนี้

- 2.1 มอก. 15 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- 2.2 มอก. 849 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน
- 2.3 มอก. 2587 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กากรจากเตาถลุงแบบพ่นลม
- 2.4 มอก. 2594 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- 2.5 มอก. 2752 เล่ม 12 วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

- 2.6 มอก. 2752 เล่ม 17 การผสมซีเมนต์ไฮดรอลิกเพสต์และมอร์ตาร์ ในสภาพเหลวด้วยเครื่องผสม
- 2.7 ASTM C490/490M Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Sulfate Solution
- 2.8 ASTM C778 Specification for Standard Sand

3. นิยาม

3.1 นิยาม

“การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมอร์ตาร์สัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต” หมายถึง การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยก่อให้เกิดการสูญเสียเนื้อคอนกรีตที่นำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในระยะยาวได้

“มอร์ตาร์” (mortar) หมายถึง ส่วนผสมของวัสดุประสาน มวลรวมละเอียด กับน้ำ โดยอาจมีหรือไม่มีสารผสมเพิ่มก็ได้

4. การใช้มาตรฐาน

- 4.1 มาตรฐานการทดสอบนี้ใช้เพื่อตรวจสอบความคงทนต่อแมกนีเซียมซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตาม มอก. 15 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตาม มอก. 2594 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานตาม มอก. 849 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กากกลูจากเตาถลุงแบบพ่นลมตาม มอก. 2587 โดยเฉพาะในส่วนผสมที่มีการผสมวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ดินเหนียวเผา (calcined clay) และเถ้าที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงทดแทน เช่น แกลบ เปลือกไม้ ปาล์มน้ำมัน ที่เผชิญกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่มักแสดงผลการขยายตัวที่ต่ำแต่มีการสูญเสียน้ำหนักที่สูงเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน
- 4.2 สารละลายสำหรับแช่ตัวอย่าง ในวิธีทดสอบนี้ ประกอบด้วยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เท่ากับ 67600 ppm เช่น ในกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 0.704 M (84.72 g/L)

5. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 5.1 เครื่องผสม
ตาม มอก. 2752 เล่ม 17
- 5.2 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ
ตาม มอก. 2752 เล่ม 12
- 5.3 เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 g

- 5.4 ภาชนะสำหรับแช่ตัวอย่างทดสอบต้องทำจากวัสดุทนต่อการกัดกร่อน เช่น พลาสติก แก้ว เซรามิก โดยต้องมีตัวยึดตัวอย่างทดสอบ เพื่อไม่ให้ด้านข้างของตัวอย่างทดสอบสัมผัสกับภาชนะสำหรับแช่ตัวอย่างทดสอบ และต้องมีฝาปิดเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
- 5.5 ภาชนะสำหรับบ่มตัวอย่างช่วงต้น ต้องทำจากวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนและความร้อน เช่น พลาสติก แก้ว เซรามิก ขนาดของภาชนะสำหรับบ่มต้องใหญ่เพียงพอที่จะทำให้ด้านข้างของแบบหล่อตัวอย่างทดสอบไม่สัมผัสกับภาชนะสำหรับบ่ม และต้องมีฝาปิดเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ
- 5.6 ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 30 ± 3 °C
- 5.7 แปรงสำหรับกำจัดส่วนที่ยุบบนพื้นผิวหลังจากการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยชนแปรงไม่ควรอ่อนเกินไปจนไม่สามารถกำจัดส่วนที่ยุบออกได้ หรือแข็งเกินไปจนอาจทำลายผิวตัวอย่างทดสอบที่ยังสมบูรณ์อยู่

6. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

6.1 ความบริสุทธิ์ของสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบต้องเป็นเกรดงานวิเคราะห์ (analytical grade/ AR grade/ reagent grade) สำหรับสารเคมีเกรดอื่นอาจใช้ได้หากมีการตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่ามีความบริสุทธิ์สูงเพียงพอที่จะใช้งานได้ โดยไม่ลดความถูกต้องของการทดสอบ

6.2 น้ำ

น้ำที่ใช้ต้องเป็นน้ำกลั่นหรือน้ำปราศจากไอออน

6.3 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ในกรณีแมกนีเซียมซัลเฟต ให้เตรียมแมกนีเซียมซัลเฟตปราศจากน้ำ (magnesium sulfate anhydrous) 84.27 g ละลายในน้ำปริมาตร 900 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นหรือน้ำปราศจากไอออนจนได้สารละลายปริมาตร 1.0 L โดยต้องเตรียมล่วงหน้าก่อนใช้งาน 1 วัน และเก็บสารละลายที่อุณหภูมิ 23 ± 2 °C ในภาชนะปิด ทั้งนี้ก่อนนำไปใช้งานให้วัดค่า pH ซึ่งต้องอยู่ในช่วง 6.0 ถึง 8.0 รักษาปริมาตรสารละลายที่ใช้แช่ตัวอย่างทดสอบเป็น 4.0 ± 0.5 เท่าของปริมาตรตัวอย่างทดสอบ

6.4 ทรายมาตรฐาน

เป็นทรายซิลิกาธรรมชาติชนิด graded sand ตาม ASTM C778

7. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- 7.1 เตรียมมอร์ตาร์ตาม มอก. 2752 เล่ม 12 โดยใช้สัดส่วนปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดไม่กักอากาศ ใช้สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.485 โดยน้ำหนัก

สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดกักอากาศ ใช้สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.460 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กากลูจากเตาถลุงแบบพ่นลม ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ปูนซีเมนต์ที่มีการผสมวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ใช้สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ทำให้ค่าอัตราการใช้มวลมีค่า $110 \pm 5\%$

ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบความต้านทานซัลเฟตของส่วนผสมคอนกรีต สามารถใช้ตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเช่นเดียวกับมอร์ตาร์ที่อยู่ในคอนกรีตที่ต้องการประเมินเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผลิตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 5 ตาม มอก. 15 ได้

7.2 การเตรียมแบบหล่อตาม ASTM C490/490M ที่ผิวด้านในของแบบหล่อให้ทาน้ำยาถอดแบบ (release agent) ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของปูนซีเมนต์และไม่มีสารตกค้างใด ๆ ที่จะมีส่วนต่อการซึมผ่านในขั้นตอนการแช่ตัวอย่าง

7.3 การเตรียมภาชนะสำหรับบ่มตัวอย่างช่วงต้น วางที่รองแบบหล่อลงไปที่ก้นภาชนะ เติมน้ำอุณหภูมิ 30 ± 3 °C ให้ระดับน้ำพอดีกับขอบบนของที่รองแบบหล่อ

8. กระบวนการทดสอบ

8.1 การหล่อและการบ่มมอร์ตาร์ช่วงต้น

หล่อตัวอย่างทดสอบตาม มอก. 2752 เล่ม 12 จำนวน 24 ตัวอย่าง (หมายเหตุ 1) เมื่อเทส่วนผสมลงในแบบหล่อเสร็จ ให้ปิดด้านบนแบบหล่อด้วยแผ่นเหล็ก กระจก หรือแผ่นพลาสติกโดยทันที แล้วจึงนำไปวางบนที่รองแบบหล่อในภาชนะสำหรับบ่มตัวอย่างช่วงต้น จากนั้นปิดฝาภาชนะให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหยและนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 30 ± 3 °C เป็นเวลา $23\frac{1}{2}$ h $\pm$ 30 min เมื่อครบกำหนดเวลาให้นำออกจากตู้อบและถอดแบบหล่อ

หมายเหตุ 1 ชุดตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยตัวอย่างทดสอบ 24 ตัวอย่างจะถูกนำไปใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 3 ตัวอย่าง และตัวอย่างอีก 21 ตัวอย่าง จะถูกนำไปใช้ในการทดสอบความต้านแรงอัดที่ 20.0 ± 1.0 MPa หากมีข้อมูลเพียงพอ สามารถลดจำนวนตัวอย่างทดสอบได้

8.2 การบ่มตัวอย่าง และการเตรียมการทดสอบ

เมื่อถอดแบบหล่อเรียบร้อยแล้ว นำตัวอย่างทดสอบไปแช่ในภาชนะสำหรับบ่มตัวอย่างที่บรรจุน้ำปูนใสอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 23 ± 2 °C โดยเหลือตัวอย่างทดสอบไว้ 2 ตัวอย่าง ให้คลุมด้วยผ้าชุบน้ำจุ่มอุณหภูมิเท่ากับบรรยากาศ แล้วจึงนำไปทดสอบความต้านแรงอัดตาม มอก. 2752 เล่ม 12 ถ้าความต้านแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 มากกว่าหรือเท่ากับ 20 MPa ให้วัดค่าน้ำหนักและบันทึกเป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้น และวางตัวอย่างทดสอบทั้งหมดลงในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แต่หากได้ความต้านแรงอัดน้อยกว่า 20 MPa ให้บ่มตัวอย่างทดสอบต่อ คำนวณค่าความต้านแรงอัดจากสองตัวอย่างแรกเพื่อนำ

ตัวอย่างทดสอบอื่นมาทดสอบความต้านแรงอัดอีกครั้ง จนได้ความต้านแรงอัดมากกว่าหรือเท่ากับ 20 MPa แล้วจึงนำตัวอย่างทดสอบมาวัดค่าน้ำหนักและบันทึกเป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้น แล้ววางตัวอย่างทดสอบทั้งหมดลงในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (หมายเหตุ 2) อุณหภูมิในการเก็บรักษาและอุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 23 ± 2 °C

หมายเหตุ 2 ถ้าค่าความต้านแรงอัดที่ 24 h มีค่าน้อยกว่า 20 MPa ไม่ควรทำการทดสอบเพิ่มเติมในวันเดียวกัน และถ้าค่าความต้านแรงอัดมากกว่า 21 MPa เมื่อทดสอบในวันถัดไป ไม่จำเป็นต้องทำซ้ำใหม่ทั้งชุดการทดสอบ ถ้าทั้ง 2 ตัวอย่างทดสอบได้ค่าความต้านแรงอัดน้อยกว่าค่าที่ต้องการ ให้บ่มตัวอย่างทดสอบที่เหลือตามข้อ 8.2 ในภาชนะที่มีน้ำปูนใสอิมมัวที่อุณหภูมิ 23 ± 2 °C

- 8.3 แช่ตัวอย่างทดสอบในภาชนะสำหรับแช่ตัวอย่างทดสอบที่บรรจุสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตไว้ และปิดฝาภาชนะให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายหรือน้ำจากภายนอกเข้า โดยต้องรักษาอุณหภูมิทั้งขณะแช่และขณะทดสอบไว้ที่ 23 ± 2 °C

- 8.4 การวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ

วัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้เครื่องชั่ง ที่อายุ 1 สัปดาห์ 2 สัปดาห์ 3 สัปดาห์ 4 สัปดาห์ 8 สัปดาห์ 13 สัปดาห์ และ 15 สัปดาห์นับจากวันที่เริ่มแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตรวจสอบข้อมูลของตัวอย่างที่อายุทดสอบ 15 สัปดาห์ ทำการวัดต่อไปอีกที่อายุทดสอบ 4 เดือน 6 เดือน 9 เดือน และ 12 เดือน (หรือตามอายุที่ต้องการ) ถ้าที่เวลาใด ๆ อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักระหว่างการอ่านค่าได้สูง สามารถเพิ่มจำนวนครั้งที่วัดได้โดยลดอายุทดสอบลง (เพิ่มความถี่ของการวัด) เพื่อให้สามารถสังเกตและรายงานพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบได้

8.4.1 รายละเอียดการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ เมื่อความต้านแรงอัดเป็นไปตามข้อ 8.2 ให้วัดน้ำหนักเริ่มต้น บันทึกค่า แล้วเก็บตัวอย่างทดสอบในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นวัดค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป โดยก่อนที่จะทำการชั่งน้ำหนัก แปรงพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบเพื่อกำจัดส่วนที่ยุบบนผิวที่ถูกทำลาย และคราบ ล้างน้ำ และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องปกติ แล้วทำการชั่งน้ำหนักบันทึกค่า แล้วนำตัวอย่างทดสอบแต่ละตัวอย่างกลับไปเก็บในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเดิมหลังจากวัดค่าแล้ว ทั้งสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ใช้หลังจากอ่านค่าน้ำหนักตัวอย่างทดสอบที่ 1 สัปดาห์ 2 สัปดาห์ 3 สัปดาห์ 4 สัปดาห์ 8 สัปดาห์ 13 สัปดาห์ และ 15 สัปดาห์ และ 4 เดือน 6 เดือน 9 เดือน และ 12 เดือน และทุก 3 เดือน โดยการล้างภาชนะสำหรับแช่ตัวอย่างทดสอบด้วยน้ำ 1 ครั้ง เทน้ำและเศษมอร์ตาร์ทิ้ง วางที่รองตัวอย่างทดสอบในภาชนะสำหรับแช่ตัวอย่างทดสอบอีกครั้ง เติมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตใหม่ลงในภาชนะในปริมาณที่เพียงพอในการแช่ตัวอย่างทดสอบและปิดฝาภาชนะให้สนิท

8.4.2 ในกรณีที่ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบเรียบร้อยแล้ว พบความผิดปกติของตัวอย่างทดสอบเช่น รอยแตก รอยคราบบนพื้นผิว เป็นต้น ให้จดบันทึกไว้ด้วย

8.5 ความคลาดเคลื่อนของระยะเวลาวัดตัวอย่างทดสอบที่แก้ไขในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในข้อ 8.4 ต้องไม่เกิน $\pm 2\%$

9. การคำนวณ

9.1 คำนวณการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบที่อายุต่าง ๆ ดังสูตรต่อไปนี้

$$\Delta W = \{ (W_x - W_i) / W_i \} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ ΔW คือ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่อายุ x (%)

W_x คือ น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบที่อายุ x (g)

W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ (g)

9.2 คำนวณการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบละเอียดถึง 0.01%

10. การรายงานผล

10.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

10.2 หน่วยงานที่ทดสอบ

10.3 ขนาดของตัวอย่างทดสอบ

10.4 น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างเริ่มต้น

10.5 น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างทดสอบที่อายุ x

10.6 รายงานการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมอร์ตาร์เฉลี่ยที่อายุที่ต้องการละเอียดถึง 0.01%

เอกสารอ้างอิง

Ahmed M. Diab, Abd Elwahab M.Awad, Hafez E. Elyamany and Abd Elmoty M. Abd Elmoty. (2008). Blended Cement Is A Bad Recommendation for Magnesium Sulfate Attack, 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, China, 13-15 October 2008.

Beulah M. and Prahallada M. C. (2013). Effect of Replacement of Cement by Metakalion on the Properties of High Performance Concrete Subjected to Magnesium Sulphate Attack,

International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research (IJIEASR), Volume 2, No. 2, February 2013.

- Davood Mostofinejad, Seyed Mohammad Hosseini, Farzaneh Nosouhian, Togay Ozbakkaloglu, and Bahareh Nader Tehrani. (2020). Durability of Concrete Containing Recycled Concrete Coarse and Fine Aggregates and Milled Waste Glass in Magnesium Sulfate Environment, *Journal of Building Engineering*, 29, 101182.
- Ittiporn Sirisawat, Lalita Baingam, Warangkana Saengsoy, Pitisan Krammart, and Somnuk Tangtermsirikul. (2014). Sodium and Magnesium Sulfate Resistance of Mortars with Interground Limestone and Limestone Powder Replacing Cements, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volume 12, pp. 403-412.
- Ittiporn Sirisawat, Warangkana Saengsoy, Lalita Baingam, Pitisan Krammart, and Somnuk Tangtermsirikul. (2014). Durability and Testing of Mortar with Interground Fly Ash and Limestone Cements in Sulfate Solutions, *Construction and Building Materials*, 64, pp. 39-46.
- Kiachehr Behfarnia and Omid Farshadfar. (2013). The Effects of Pozzolanic Binders and Polypropylene Fibers on Durability of SCC to Magnesium Sulfate Attack, *Construction and Building Materials*, 38, pp. 64-71.
- Lei Jiang and Ditao Niu. (2016). Study of Deterioration of Concrete Exposed to Different Types of Sulfate Solutions Under Drying-Wetting Cycles, *Construction and Building Materials*, 117, pp. 88-98.
- Pitisan Krammart and Somnuk Tangtermsirikul. (2004). Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution, *ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT*, V 21.
- Qian Huang, Xiaohong Zhu, Guangqi Xiong, Mingtao Zhang, Jiaxin Deng, Min Zhao, and Liang Zhao. (2021). Will the Magnesium Sulfate Attack of Cement Mortars Always Be Inhibited By Incorporating Nanosilica?, *Construction and Building Materials*, 305, 124695.
- Sheng Cang, Xiaoli Ge, and Yanlin Bao. (2017). Assessment of Mechanical Properties and Damage of High Performance Concrete Subjected to Magnesium Sulfate Environment, *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 9196187.