

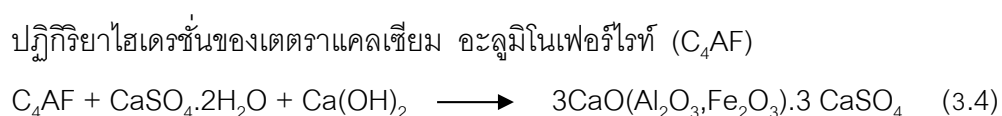
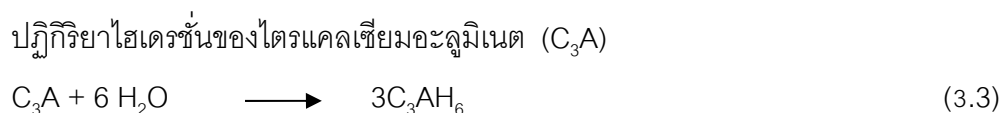
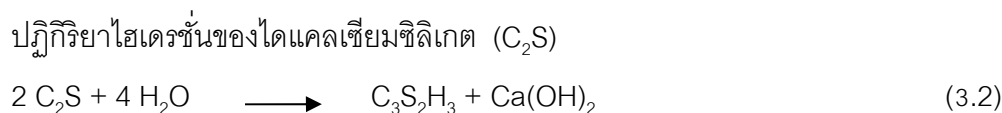
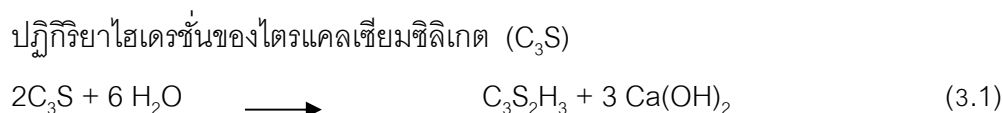
บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เสนอในบทนี้เป็นทฤษฎีเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยและทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติที่ทำการทดสอบ วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ ปูนซีเมนต์ น้ำ น้ำสลดจ์และสารผสมเพิ่ม ซึ่งโดยสารผสมเพิ่มเกี่ยวข้องกับงานวิจัยคือ สารลดน้ำ สารหน่วงการแข็งตัว สารลดน้ำระดับสูง สารกันซึมและแก้ลอย มีรายละเอียดตามลำดับดังนี้

3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หมายถึงปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ชนิดหนึ่ง ซึ่งได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) กับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เมื่อผสมกับน้ำสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน” ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวในน้ำ ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์มีหลายชนิด สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน องค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำมีรายละเอียดดังนี้



ตารางที่ 3.1 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

3.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้คือ

ประเภทที่ 1 คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตมากที่สุด เหมาะสำหรับผสมเป็นคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ

ประเภทที่ 2 คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานคอนกรีตที่เกิดความร้อนและความทนต่อซัลเฟตได้ปานกลาง

ประเภทที่ 3 คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้กำลังสูงระยะแรก (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้สามารถให้กำลังอัดสูงในระยะแรกเพราะมีความละเอียดของผงซีเมนต์มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำงานที่เร่งหรือถอดไม้แบบในระยะเวลานานขึ้น ข้อควรระวังคือไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เนื่องจากมีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงมากในช่วงระยะแรกซึ่งอาจทำให้โครงสร้างเกิดการแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศอเมริกา เนื่องจากมีความร้อนจาก

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำทำให้ลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) เช่นการสร้างเขื่อน

ประเภทที่ 5 คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทนต่อซัลเฟต (Sulfate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณของ C_3A ที่ต่ำ เพื่อจะป้องกันไม่ให้อายุการใช้งานเสื่อมสภาพภายนอกความเสียหายต่อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมมีสารละลายซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้พัฒนามากำลังอัดช้ากว่าและมีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่หนึ่ง

3.2 น้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตคอนกรีต โดยทำหน้าที่เป็นส่วนผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ (Work ability) สำหรับการขนส่งและการเทเข้าแบบหล่อ ตลอดจนใช้ในการบ่มคอนกรีต ปริมาณและคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต สิ่งเจือปนต่างๆในน้ำเพียงเล็กน้อยอาจจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นค่าระยะเวลาการก่อตัว ค่ากำลังอัด ความทนทานและผลต่อลักษณะทางสถาปัตยกรรม สิ่งเจือปนที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ ตะกอน สารละลายอินทรีย์ และสารละลายอนินทรีย์ สิ่งเจือปนเหล่านี้ถ้ามีปริมาณไม่มากจะไม่ก่อให้เกิดผลเสียร้ายแรงต่อคอนกรีต เกณฑ์ของปริมาณของสารเจือปนในน้ำที่ยอมรับได้และผลกระทบต่อคอนกรีตแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

กฎเกณฑ์เบื้องต้นสำหรับน้ำที่จะใช้ผสมคอนกรีตคือเป็นน้ำที่ใช้ดื่มได้และในกรณีที่สงสัยในคุณภาพน้ำ นิยมใช้วิธีทดสอบด้วยการผสมเป็นตัวอย่างคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ แล้วทำการทดสอบกำลังอัดและค่าระยะเวลาการก่อตัวเทียบกับตัวอย่างที่ผสมด้วยน้ำกลั่น โดยผลการทดสอบของตัวอย่างต้องมีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting) แตกต่างจากตัวอย่างที่ผสมด้วยน้ำกลั่นไม่เกิน 30 นาทีและมีค่าเฉลี่ยของกำลังอัดไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของกำลังอัดของตัวอย่างที่ผสมด้วยน้ำกลั่น

ตารางที่ 3.2
เกณฑ์ที่ยอมรับได้ของปริมาณสิ่งเจือปนในน้ำ

สิ่งเจือปน	ความเข้มข้นสูงสุด (ppm)	หมายเหตุ
ตะกอน	2,000	ต้องใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น
เหล็ก	500-1,000	เพิ่มฟองอากาศและเพิ่มเวลาการก่อกำเนิด
เกลือคาร์บอเนต	1,000	ลดเวลาการก่อกำเนิด
เกลือไบคาร์บอเนต	400-1,000	
โซเดียมซัลเฟต	10,000	อาจเพิ่มกำลังในระยะแรกแต่ลดกำลังในระยะยาว
แมกนีเซียมซัลเฟต	40,000	
โซเดียมคลอไรด์	20,000	ลดเวลาการก่อกำเนิด เพิ่มกำลังในระยะแรก ลดกำลังสูงสุด
แคลเซียมคลอไรด์	50,000	
แมกนีเซียมคลอไรด์	40,000	
เกลือของเหล็ก	40,000	
ฟอสเฟต อาร์ซีเนตบอเรตส์	500	ลดเวลาการก่อกำเนิด
เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส และดีบุก	500	
กรดอินทรีย์	10,000	ค่า pH ไม่ควรต่ำกว่า 3
โซเดียมไฮดรอกไซด์	500	ลดเวลาการก่อกำเนิดและกำลัง
โซเดียมซัลไฟด์	100	ควรหล่อคอนกรีตทดสอบ
น้ำตาล	500	หน่วงเวลาการก่อกำเนิด

(ที่มา : ราชบัณฑิตยสถาน, 2544, น. 45-47)

3.3 น้ำเสี้ยว

จากการศึกษาพบว่า มีคำศัพท์เป็นภาษาอังกฤษที่ใช้เรียกน้ำเสียที่เกิดจากการทำความสะอาดและกิจกรรมของโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จอยู่หลายคำ ซึ่งพบจากบทความและมาตรฐานต่างๆที่เกี่ยวข้อง มีรายละเอียดดังนี้

Wash Water เป็นศัพท์ที่พบในมาตรฐาน ASTM C94 เป็นศัพท์ที่ใช้เรียกทั่วไปของน้ำจากการล้างทำความสะอาดขนส่งคอนกรีตและน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมในโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ รวมถึงน้ำฝนที่ตกภายในบริเวณโรงงานแล้วปนเปื้อนกับเศษคราบปูนซีเมนต์ทำให้มีความเป็นกรดต่าง (pH) ที่สูง ตามมาตรฐาน ASTM C94 อนุโลมให้ใช้น้ำชนิดนี้ผสมคอนกรีตได้ ถ้ามีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์ของมาตรฐาน

Grey (Gray) Water เป็นศัพท์ที่พบในเอกสารงานวิจัยและเอกสารข้อมูลเกี่ยวกับน้ำเสียของโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ ศัพท์คำนี้เรียกตามลักษณะน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นสีเทาตามสีของปูนซีเมนต์และยังใช้เรียกรวมถึงน้ำในส่วนที่ผ่านระบบการแยกหิน-ทราย (Reclaimer) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบแยกส่วนคอนกรีตสดเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ ในต่างประเทศมักนิยมใช้ระบบนำมาใช้ใหม่ทันทีที่มีคอนกรีตเสีย (concrete waste) เกิดขึ้น เนื่องจากสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบและการผลิตตลอดจนลดขั้นตอนการกำจัด แต่วิธีการนำกลับมาใช้ทันทีอาจจะต้องผสมสารผสมเพิ่มบางชนิดช่วยเช่น สารปรับสภาพที่ใช้ยืดระยะเวลาหรือหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่อยู่ในน้ำก่อนนำไปผสมคอนกรีตใหม่

Sludge Water เป็นศัพท์ที่พบในมาตรฐาน JIS A5308 ใช้เรียกน้ำเสียจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ ซึ่งเป็นน้ำเสียที่ผ่านการแยกเอาส่วนมวลรวมคือหินและทรายออกไปเหลือเพียงแต่ส่วนที่เป็นอนุภาคตะกอนขนาดเล็กปนอยู่ในน้ำ โดยส่วนอนุภาคที่มีขนาดโตกว่านั้นถือเป็นส่วนมวลรวมละเอียด

Supernatant Water เป็นศัพท์ที่พบในมาตรฐาน JIS A5308 ใช้เรียกน้ำเสียจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ ที่เป็นส่วนน้ำใส ไม่มีสารแขวนลอย ซึ่งได้จากการปล่อยให้ตะกอนหรือวิธีอื่นๆ

จากการศึกษาข้อมูลของมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับน้ำสลัดจ์พบว่าข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับน้ำสลัดจ์มักจะถูกกำหนดรวมอยู่กับมาตรฐานข้อกำหนดของน้ำที่จะใช้ในการผสมคอนกรีต ตัวอย่างมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับน้ำสลัดจ์ที่สำคัญคือ

- ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต (E.I.T. Standard 1014-40)
- Standard Specification for Ready-Mixed Concrete (ASTM C 94-94)
- Method of Tests for Water for Making Concrete (Including Notes on the Suitability of the Water (BS 3148:1980)
- Standard Specification for Ready-Mixed Concrete (AASHTO M 157)
- Mixing Water for Concrete – Specifications and Tests (Draft - prEN 1008 – February 1993)
- Ready-Mixed Concrete (JIS A 5308-1983)

ข้อกำหนดที่อยู่ในมาตรฐานเหล่านี้มีหลักการในการทดสอบน้ำสลัดจ์คล้ายกับการทดสอบคุณภาพน้ำสำหรับผสมสำหรับคอนกรีต โดยมีวิธีการที่คล้ายๆกันคือให้ทดสอบคุณสมบัติปริมาณสารเคมีในน้ำสลัดจ์ โดยมีรายละเอียดของค่าปริมาณสารเคมีที่กำหนดแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 และการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำสลัดจ์ โดยการทดสอบค่าระยะเวลาการก่อตัวและค่ากำลังอัด ผลการทดสอบของตัวอย่างที่ผสมด้วยน้ำสลัดจ์นำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ผสมด้วยน้ำประปา โดยมีเกณฑ์ใช้ในการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 ซึ่งตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดตามตารางที่ 3.3 และ 3.4 ถือว่าไม่สามารถใช้ในการผสมคอนกรีตได้

สำหรับในส่วนของประเทศไทยพบว่ามียุทธศาสตร์สำหรับการนำน้ำสลัดจ์มาผสมคอนกรีตคือข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต (ว.ส.ท. 1014-40) โดยในรายละเอียดของข้อกำหนดพบว่ามียุทธศาสตร์คล้ายกับมาตรฐาน ASTM C94 ซึ่งจากรายละเอียดของข้อกำหนดดังกล่าวยังเป็นข้อมูลที่ไม่เพียงพอต่อผู้ใช้งานที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากยังขาดงานวิจัยสนับสนุนที่เป็นข้อมูลภายในประเทศเช่นข้อมูลแสดงรายละเอียดพื้นฐานของน้ำสลัดจ์ ข้อมูลแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำสลัดจ์ ตลอดจนผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคอนกรีตเมื่อผสมด้วยน้ำสลัดจ์

ตารางที่ 3.3
เกณฑ์คุณสมบัติปริมาณสารเคมีในน้ำสลัดจ์ของมาตรฐานที่สำคัญ

รายละเอียด	ปริมาณที่ยอมให้				
	EIT 1014 (ppm)	ASTM C94 (ppm)	BS 3148 (mg/l)	EN 1008 (mg/l)	JIS A 5308 (ppm)
1) คลอไรด์ (Cl ⁻)					
- สำหรับงานคอนกรีตอัด แรงหรืองานสะพาน	500	500	500 ^[***]	600	200
- สำหรับงานคอนกรีตเสริม เหล็กทั่วไป	1,000	1,000		2,000	200
2) ซัลเฟต (SO ₄)	3,000	3,000	1,000	2,000	
3) อัลคาไล (Na ₂ O + 0.658K ₂ O)	600	600	1,000 ^[****]	1,000	
4) ปริมาณของแข็ง	50,000 ^[*]	50,000 ^[**]	2,000 ^[*****]	50,000	30,000

หมายเหตุ ^[*] คือสารแขวนลอย ^[**] คือของแข็งทั้งหมด (Total Solids)

^[***] ไม่ระบุประเภทของงาน ^[****] คืออัลคาไลด์ในรูปคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต

^[*****] คือของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolve Solid)

ตารางที่ 3.4
เกณฑ์การทดสอบน้ำสลัดจ์ของมาตรฐานที่สำคัญ

ประเภท การทดสอบ	มาตรฐาน		
	ASTM C94-94	JIS A5308-1993	EN 1008:1993
ค่าระยะเวลา การก่อตัวเทียบกับ ตัวอย่างควบคุม	น้อยกว่าไม่เกิน 1 ชั่วโมง ถึงมากกว่า 1.50 ชั่วโมง	น้อยกว่าไม่เกิน 30 นาที มากกว่าไม่เกิน 1 ชั่วโมง	แตกต่าง ไม่เกิน 30 นาที
ค่ากำลังอัดเทียบ กับตัวอย่าง ควบคุม	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ที่อายุ 7 วัน	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ที่อายุ 7 และ 28 วัน	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ที่อายุ 7 และ 28 วัน

3.4 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่ม (Concrete Admixtures) คือสารใดๆ นอกเหนือไปจากสารประกอบหลัก คือ น้ำ ปูนซีเมนต์ หิน และทราย ที่ใช้เติมลงไปเพื่อผสมในคอนกรีตในช่วงก่อนหรือกำลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีต เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติตามที่ต้องการเช่น ปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ เร่งหรือหน่วงเวลาการก่อตัว ปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและด้านความทนทาน ตลอดจนเพื่อลดต้นทุนของคอนกรีต สารผสมเพิ่มมีทั้งประเภทของเหลวและผง ประเภทของสารผสมเพิ่มแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 4 กลุ่มคือ

1. สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Agent)
2. สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixture)
3. แร่ผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)
4. สารผสมเพิ่มอื่นๆ

3.4.1 สารเคมีผสมเพิ่ม

สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixture) คือสารละลายเคมีชนิดต่างๆสำหรับผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงระยะเวลาในการก่อตัวและลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งประเภทสารเคมีผสมเพิ่มตามมาตรฐาน ASTM C494 เป็น 7 ประเภท คือ

- ประเภท A สารลดน้ำ (Water Reducing)
- ประเภท B สารหน่วงการแข็งตัว (Retarding)
- ประเภท C สารเร่งเวลาแข็งตัว (Accelerating)
- ประเภท D สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water Reducing and Retarding)
- ประเภท E สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว (Water Reducing and Accelerating)
- ประเภท F สารลดน้ำระดับสูง (Water Reducing-High Range)
- ประเภท G สารลดน้ำระดับสูงและหน่วงการแข็งตัว
(Water Reducing-High Range and Retarding)

3.4.1.1 สารลดน้ำ

สารลดน้ำ (Water Reducing) หมายถึงสารผสมเพิ่มใช้สำหรับผสมคอนกรีตเพื่อลดปริมาณน้ำที่ในส่วนผสม เพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวตามกำหนด ซึ่งการผสมสารลดน้ำทำให้การทำงานเทคอนกรีตง่ายขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำ การผสมสารลดน้ำทำให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้น มีความทนทานมากขึ้น การเพิ่มกำลังอัดโดยไม่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ช่วยลดปัญหาการแตกร้าวจากอุณหภูมิในคอนกรีตที่สูงเกินไป จากการศึกษาพบว่าสารเคมีผสมเพิ่ม 5 ใน 7 ชนิดของมาตรฐาน ASTM C494 เป็นสารลดปริมาณน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของสารลดน้ำ สารประกอบหลักของสารลดน้ำมี 3 ชนิด คือเกลือและสารประกอบของ Lignosulphonate เกลือและสารประกอบของ Hydroxycarboxylic Acid และ Polymer เช่น Hydroxylated Polymers

โดยปกติอนุภาคซีเมนต์ในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าเหลือตกค้างบนผิว อนุภาคที่มีประจุต่างกันจะถูกดึงดูดรวมกันเป็นกลุ่ม (Flocculate) ทำให้เกิดการเก็บกักน้ำไว้มีผลทำให้เหลือปริมาณน้ำในการหล่อลื่นคอนกรีตน้อยลง สารลดน้ำสามารถช่วยเปลี่ยนคุณสมบัติของประจุระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำในคอนกรีต โดยทำให้มีค่าเป็นกลางหรือกลายเป็นประจุชนิดเดียวกัน ซึ่ง

ทำให้เกิดแรงผลักแยกออกจากกัน ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหล่อลื่นคอนกรีตจึงมีมากขึ้น ผลของการผสมสารลดน้ำที่มีต่อคอนกรีตสดพบว่าสามารถเพิ่มความสามารถเทได้ โดยมีการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ที่มากคอนกรีตปกติ การผสมสารลดน้ำอาจทำให้เวลาการก่อตัวนานขึ้นและสารลดน้ำบางชนิดมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวสูง ผลของการผสมสารลดน้ำที่มีต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วพบว่า ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดเนื่องจากการกระจายตัวของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมและจากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ลดลง ช่วยเพิ่มความทนทานและการกันซึมผ่านของน้ำน้อยลงเนื่องจากคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

3.4.1.2 สารหน่วงการแข็งตัว

สารหน่วงการแข็งตัว (Retarding) เป็นสารเคมีที่ช่วยหน่วงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ทำงานในอากาศร้อน เพราะที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์จะลดลง วัตถุประสงค์ที่ใช้ทำสารหน่วงการแข็งตัวแบ่งได้เป็น 4 ประเภทประกอบด้วยกรดและเกลือของสาร Lignosulphonic กรดและเกลือของสาร Hydroxycarboxylic เกลือของสารอนินทรีย์ น้ำตาลและสารประกอบของน้ำตาล ผลของการหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์เกิดจากสารผสมเพิ่มจะถูกดูดซึมไว้บนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้การซึมผ่านของน้ำเพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ลดลง ผลของการผสมสารหน่วงการแข็งตัวที่มีต่อคอนกรีตสดพบว่า ช่วยให้มีความสามารถเทได้ของคอนกรีตนานขึ้น โดยมีการสูญเสียค่ายุบตัวน้อยลง อัตราการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง สารหน่วงการแข็งตัวมีผลทำให้เกิดการหดตัวแบบพลาสติกมากขึ้นจึงจำเป็นต้องมีการบ่มอย่างถูกต้องและเพียงพอ ผลของการผสมสารหน่วงการแข็งตัวที่มีต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นมีค่าลดลง อัตราการเกิดการหดตัวแบบแห้งและการคืบเพิ่มขึ้น

3.4.1.3 สารลดน้ำระดับสูง

สารลดน้ำระดับสูง (Water Reducing-High Range หรือ Superplasticizer) สารผสมเพิ่มชนิดนี้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมได้ร้อยละ 15 ถึง 30 เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าสารลดน้ำธรรมดา ในปัจจุบันสารผสมเพิ่มนิยมใช้กันแพร่หลายในโรงงานผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เนื่องจากความสามารถในการลดน้ำในปริมาณมากๆ จึงสามารถผสมคอนกรีตในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ คอนกรีตจึงมีกำลังอัดในช่วงต้นที่สูงมากทำให้สามารถถอดแบบและ

ตัดลดอัดแรงได้ในเวลารวดเร็ว ตลอดจนทำให้สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย สารเคมีที่ใช้เป็นส่วนประกอบสารลดน้ำระดับสูงได้แก่ สารประกอบของเกลือซัลโฟเนทเมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ คอนเดนเซท (Sulfonated Melamine Formaldehyde Condensates) สารประกอบของเกลือซัลโฟเนทแนฟทาลีน ฟอรัมาลดีไฮด์ คอนเดนเซท (Sulfonated Naphthalene Formaldehyde Condensates) สารโมดิฟายด์ลิกโนซัลโฟเนต (Modified Lignosulfonates) และกรดซัลโฟนิคเอสเทอร์และคาร์โบไฮเดรตเอสเทอร์ (Sulfonic Esters and Carbohydrate Esters) กลไกในการลดน้ำของในส่วนผสมของสารลดน้ำระดับสูงมีลักษณะคล้ายกับสารลดน้ำธรรมดา แต่ไม่มีผลกระทบต่อแรงดึงผิวของน้ำมีดำทำให้เกิดฟองอากาศในคอนกรีตน้อยและสามารถใช้ผสมคอนกรีตในปริมาณที่สูงได้

3.1.4.4 สารกันซึมและทึบน้ำ

(วินิต ช่อวิเชียร, 2539, น. 66)

สารกันซึมและทึบน้ำ (Water Proofing Admixtures) แบ่งตามชนิดของหลักการทำงานได้เป็น 2 ประเภทคือสารทำให้คอนกรีตทึบน้ำ (Permeability Reducers) ทำให้คอนกรีตสามารถกันน้ำไม่ให้ซึมผ่านได้ภายใต้ความดันน้ำที่สูงเช่น โครงสร้างที่กั้นน้ำ ห้องใต้ดิน อุโมงค์ สระน้ำ คาดฟ้า เป็นต้น สารประเภทนี้มักเป็นสารเคมีประเภทลดน้ำ ในกรณีออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตได้ดีก็สามารถทำคอนกรีตที่แน่นทึบ กันน้ำได้ แต่ในกรณีที่ไม่สามารถหาส่วนผสมของวัสดุผสมได้ดีพอ สารชนิดนี้สามารถช่วยทำให้คอนกรีตทึบน้ำโดยจะไปแทรกอุดรูเล็กๆในคอนกรีต

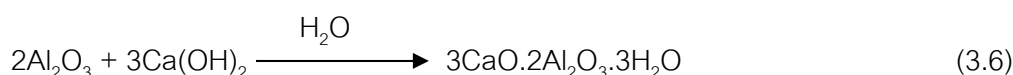
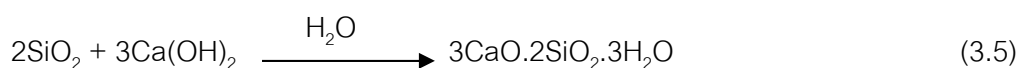
ประเภทที่สองคือสารกันซึมแบบขับน้ำ (Water-repellent Admixtures) หลักการทำงานของสารผสมเพิ่มชนิดนี้คือจะทำหน้าที่ไล่น้ำไม่ให้ผ่านเข้าเนื้อซีเมนต์หรือคอนกรีต เหมาะสำหรับผสมกับปูนทรายแล้วใช้โบกกำแพงหรือผนัง เพื่อกันไม่ให้ความชื้นซึมเข้าไปได้และป้องกันราขึ้น สารชนิดนี้เป็นพวกอัลคาไลด์ซิลิเกต (Alkaline Silicates) เช่น โซเดียมซิลิเกต หรืออะลูมิเนียม และสังกะสีซัลเฟต (Zinc Sulfates)

3.4.2 แร่ผสมเพิ่ม

แร่ผสมเพิ่ม (Mineral Admixture) เป็นวัสดุผงละเอียดที่ใส่รวมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลวและเพิ่มความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัว

แล้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบชนิดปอซโซลาน วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประเภทซิลิกา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดตัวเชื่อมประสาน (Calcium Silicate Hydrate) เพิ่มขึ้น ซึ่งการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารเคมีสูงขึ้น วัสดุปอซโซลานช่วยลดปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้นิยมใช้ในงานคอนกรีตขนาดใหญ่ ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ และปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 แสดงได้ดังตาราง 3.5 ส่วนตารางที่ 3.6 แสดงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม, แก้วถ่านหิน, แก้วเกลบอบด, ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือปฏิกิริยาของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ/หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิคอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอะลูมิเนียมออกไซด์ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{A}_2\text{H}_3$) แสดงดังสมการที่ (3.5) และ (3.6) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารปอซโซลานกับไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) แสดงได้ดังภาพที่ 3.1



ตารางที่ 3.5

ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)					
	ปูนซีเมนต์ ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน แม่เมาะ	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม	เถ้าแกลบ	ดินขาวเผา
SiO ₂	20	48	37	92	90	55
Al ₂ O ₃	5	26	11	0.7	0.5	40
Fe ₂ O ₃	3	10	0.3	1.2	2.0	0.5
CaO	60	5	40	0.2	0.5	-
MgO	1.1	2	7	0.2	0.2	-
SO ₃	2.4	0.7	0.3	-	1.5	-
ออกไซด์อื่น ๆ	1.5	1.3	2.3	2.6	-	-
LOI	2	3	-	-	4.7	-

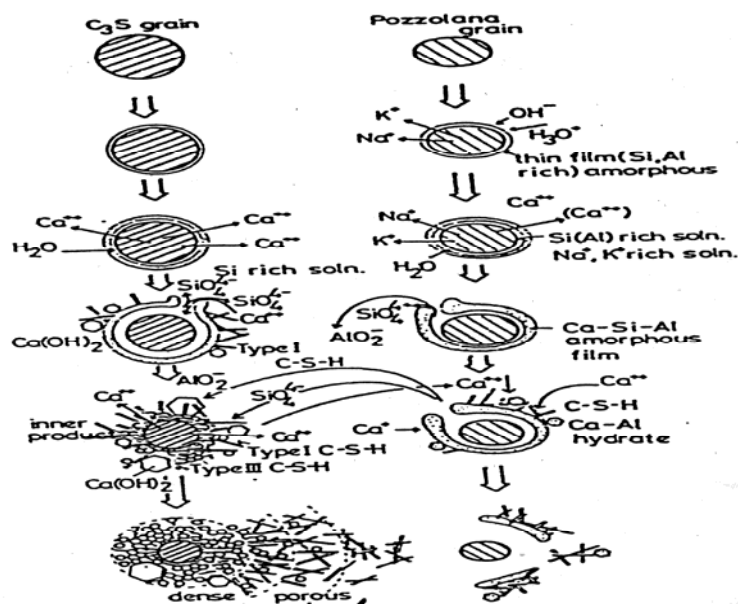
(ที่มา : ปรินญาและชัย, 2547, น. 290)

ตารางที่ 3.6

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม, เถ้าถ่านหิน, เถ้าแกลบบด, ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน แม่เมาะ	เถ้าแกลบบด	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของ เบลน (ซม ² /ก)	3,400	3,500	8,000	3,500	200,000*
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.0	2.2	2.9	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึง เทาเข้มหรือสี น้ำตาล	เทาถึงเทาดำ	เทา	เทาอมขาว ถึงเทาดำ

(ที่มา : ปรินญาและชัย, 2547, น. 291)หมายเหตุ * ทดสอบด้วยวิธี Nitrogen Absorption



ภาพที่ 3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารปอซโซลานกับไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)
(Takemoto and Uchikawa, 1980)

3.4.2.1 แก้วลอย

แก้วลอยมีลักษณะเป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ (Precipitator) เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงในเตาเผา คุณสมบัติของสารประกอบต่างๆในถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงไปทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งวิธีการทำให้เย็น แก้วลอยที่จะใช้ในงานคอนกรีตควรมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.7 และ 3.8

ตารางที่ 3.7

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ว.ส.ท 1014-46

คุณลักษณะ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
SiO ₂ ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	30.0	30.0	30.0	30.0
CaO ร้อยละ	-	<10.0	>10.0	-
SO ₃ ร้อยละ ไม่เกิน	5.0	5.0	5.0	5.0
ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	3.0	3.0	2.0	3.0
LOI ร้อยละ ไม่เกิน	6.0	6.0	6.0	12.0

(ที่มา : มาตรฐาน ว.ส.ท 1014-46, 2546, น. 18)

3.4.2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

(สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2542, น. 3-6)

ในช่วง 28 วันแรกค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีอัตราการเพิ่มอย่างมาก หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมักจะให้ค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา ในช่วง 28 วันแรก สำหรับในระยะยาวคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมักจะมีค่ากำลังอัดที่เท่ากับหรือมากกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ถ้าผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงมากๆ ค่ากำลังอัดในระยะยาวก็อาจต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอยที่มีเงื่อนไขของส่วนผสมเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของเถ้าลอยที่ใช้ในส่วนผสมด้วย ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีดังนี้

ตารางที่ 3.8

คุณสมบัติกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ว.ส.ท 1014-46

คุณลักษณะ	ชั้น คุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้น คุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ความละเอียด - ปริมาณที่ค้ำบนตะแกรง 45 ไมโครเมตร โดยร่อนแบบเปียก (ไม่เกินร้อยละ) - พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเบลนแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้ (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	10 6,000	50 2,300	55 2,000	65 1,600
ดัชนีกำลัง เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภท 1 (ไม่ต่ำกว่าร้อยละ) - อายุ 7 วัน - อายุ 28 วัน - อายุ 91 วัน	85 95 100	70 75 85	70 75 85	60 70 75
ปริมาณน้ำที่ตึงการ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ ประเภท 1 (ไม่เกินร้อยละ)	102	105	105	108
ความอยู่ตัวโดยวิธีออโตเคลฟ (ไม่เกินร้อยละ)	0.8	0.8	0.8	0.8

(ที่มา : มาตรฐาน ว.ส.ท 1014-46, 2546, น. 19)

1) ปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมในวัสดุประสาน (CaO)

องค์ประกอบทางเคมีเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัด ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน แคลเซียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบในการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การเพิ่มของแคลเซียมออกไซด์โดยรวมในคอนกรีตจะทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์โดยรวมลดลงเนื่องจากเถ้าลอยมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณของเถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์จึงมีผลสำคัญต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต

2) อัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์

ปูนซีเมนต์มีปริมาณ SiO_2 ที่น้อยในขณะที่เถ้าลอยจะมีมากกว่า ดังนั้นถ้าผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากจะมีผลทำให้ SiO_2/CaO มีค่ามากเกินไปจนเป็นสาเหตุให้ Ca(OH)_2 ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ในเถ้าลอยเป็นผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลง ในทางกลับกันถ้า SiO_2/CaO มีค่าน้อยเกินไป ปริมาณ SiO_2 ก็จะไม่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) กำลังอัดก็จะพัฒนาไม่มากในระยะยาว อัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{SiO}_2/\text{CaO} = \frac{r \times (\text{SiO}_2)_r + (1-r) \times (\text{SiO}_2)_c}{r \times (\text{CaO})_r + (1-r) \times (\text{CaO})_c} \quad (3.7)$$

- เมื่อ $(\text{SiO}_2)_c$ คือค่าร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกอนไดออกไซด์ในปูนซีเมนต์
 $(\text{SiO}_2)_r$ คือค่าร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกอนไดออกไซด์ในเถ้าลอย
 $(\text{CaO})_c$ คือค่าร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์
 $(\text{CaO})_r$ คือค่าร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอย
 r คืออัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนัก
 SiO_2 คือปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์รวมในวัสดุประสาน (กก./ลบ.ม. ของคอนกรีต)
 CaO คือปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมในวัสดุประสาน (กก./ลบ.ม. ของคอนกรีต)

3) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยเป็นการเพิ่มความสามารถให้คอนกรีตสดเนื่องจากเถ้าลอยมีรูปร่างที่ค่อนข้างเป็นทรงกลมจึงสามารถลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและลดความต้องการน้ำของส่วนผสมคอนกรีตได้ ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) แทน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง เนื่องจากจะทำให้เกิดช่องว่างคาปิลลารี (Capillary Pores) จำนวนมากในเฟสสด ซึ่งเป็นผลทำให้ความหนาแน่นของเฟสสดต่ำและกำลังอัดของคอนกรีตจึงต่ำตามไปด้วย แต่ถ้าพิจารณาถึงอัตราการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวแล้ว คอนกรีตที่มีค่า w/b สูงจะมี

อัตราการพัฒนากำลังต่อเนื่องดีกว่าคอนกรีตที่มีค่า w/b ต่ำ เนื่องจากมีปริมาณน้ำมากสำหรับการทำปฏิกิริยาต่อเนื่องในระยะยาว อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีค่า w/b ต่ำก็มักจะมีกำลังอัดในระยะยาวสูงกว่าคอนกรีตที่มีค่า w/b สูง เนื่องจากผลของ w/b ต่อการพัฒนากำลังอัดมีไม่มากเมื่อเทียบกับผลของ w/b ต่อปริมาณช่องว่างคาปิลลารีในเฟส

4) อัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ)

ผลของปริมาณเฟสต่อกำลังอัดของคอนกรีตสามารถอธิบายโดยใช้ตัวแปร อัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) โดยกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับปริมาณเฟส ถ้าเฟสมีปริมาณมากเพียงพอที่จะทำให้มีกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสและมวลรวมที่ดีจะมีผลทำให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตที่สูง แต่ถ้าเฟสมีมากเกินไปก็จะมีผลทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำลงและทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลงด้วย หรือถ้าเฟสมีปริมาณน้อยเกินไปจนไม่เพียงพอที่จะอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมและยึดมวลรวมให้ติดกันได้ ก็จะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าที่ให้ผลดีที่สุด (Optimum) ของ γ จึงจะให้กำลังอัดที่สูงที่สุด ค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) จะสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\gamma = \frac{V_p}{V_{\text{void}}} \quad (3.8)$$

$$V_p = V_c + V_f + V_w + V_{\text{air}} \quad (3.9)$$

$$V_{\text{void}} = v \times 1000 \quad (3.10)$$

เมื่อ V_p คือปริมาตรเฟสในคอนกรีต 1 ลบ.ม. (ลิตร/ลบ.ม.)

V_c คือปริมาตรปูนซีเมนต์ในคอนกรีต 1 ลบ.ม. (ลิตร/ลบ.ม.)

V_f คือปริมาตรเถ้าลอยในคอนกรีต 1 ลบ.ม. (ลิตร/ลบ.ม.)

V_w คือปริมาตรน้ำในคอนกรีต 1 ลบ.ม. (ลิตร/ลบ.ม.)

V_{air} คือปริมาตรอากาศในคอนกรีต 1 ลบ.ม. (ลิตร/ลบ.ม.)

V_{void} คือปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นในคอนกรีต 1 ลบ.ม. (ลิตร/ลบ.ม.)

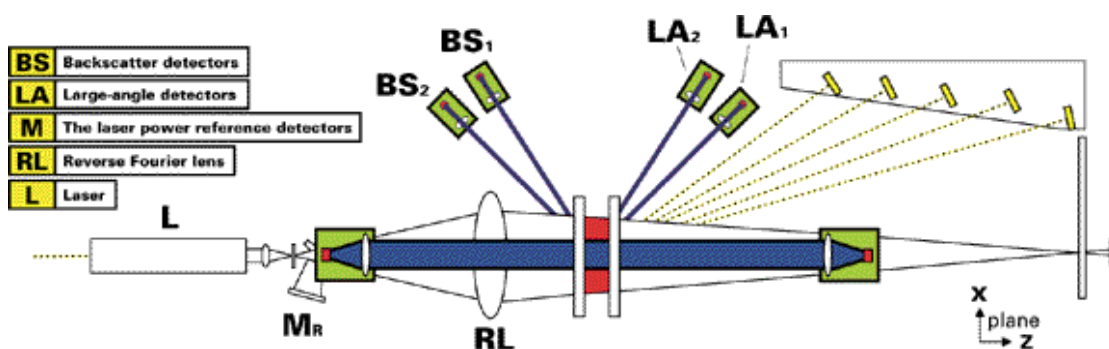
v คืออัตราส่วนช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (Void Ratio)

3.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติที่ทำการทดสอบ

3.5.1 การกระจายขนาดคละของอนุภาค

การกระจายขนาดคละของอนุภาค (Particle Size Distribution) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาวะสดและแข็งตัวแล้ว โดยมีเทคนิคในการทดสอบการกระจายขนาดคละหลายวิธีอาทิเช่นวิธีการร่อน (Sieve) วิธีการตกตะกอน (Sedimentation Method) และการแทรกสอดของเลเซอร์ (Laser Diffraction Method) เป็นต้น ซึ่งในวิธีการแทรกสอดของเลเซอร์มีข้อได้เปรียบกว่าสองวิธีแรกหลายกล่าวคือ จำนวนตัวอย่างน้อยและทดสอบได้เร็ว ความแม่นยำสูง แต่ก็มีข้อซับซ้อนในการเตรียมตัวอย่าง และต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ รูปแบบการทำงานของเครื่องมือแสดงดังภาพที่ 3.2 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง ระบบการตรวจวัดระบบการกระจายอนุภาคและกระจก

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะใช้ทฤษฎีทรงกลมเทียบเท่า (Equivalent Sphere Theory) ซึ่งมีหลักการที่การเปลี่ยนปริมาตรของรูปทรงต่างๆ (โดยปกติจะบอกขนาดด้วยของกว้าง ยาว และสูง) ให้มีปริมาตรเทียบเท่ากับทรงกลมแล้วแสดงขนาดในรูปของจำนวนเดียว (Unique Number) ซึ่งก็คือ รัศมีหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม



ภาพที่ 3.2 เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

3.5.2 ทฤษฎีความเป็นผลึกของสาร

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray มีประโยชน์ในการระบุชนิดและปริมาณของเป็นผลึกของสารที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ โดยจากหลักการที่ว่าธาตุหรือสารประกอบมีคุณสมบัติในการแทรกสอดที่ต่างกันทำให้สามารถระบุธาตุหรือสารประกอบนั้นได้ และยังสามารถพิจารณาได้ว่าผลึกประกอบด้วยชั้นหรือระนาบของอะตอมอย่างไร โดยการวิเคราะห์ผลการทดสอบพิจารณาจากการสะท้อนของคลื่นที่ตกกระทบ ซึ่งลำคลื่นที่ตกกระทบต้องมีความเข้มสูงและความแตกต่างของระยะเดินทาง (Path Difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังแสดงในภาพที่ 3.3 และสมการที่ (3.11)

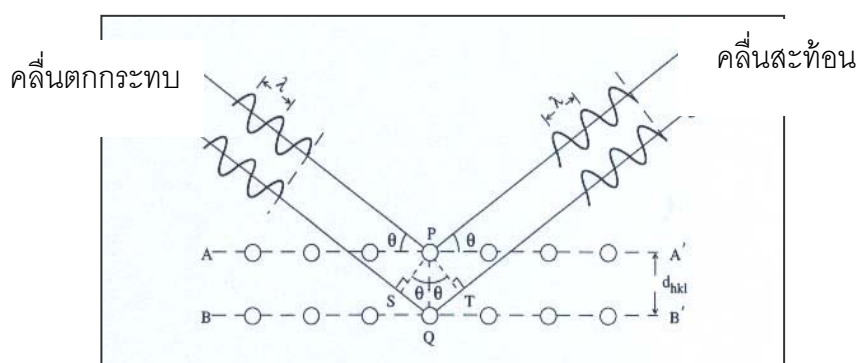
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.11)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น (เมตร)

n คือลำดับของการสะท้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., n

d_{hkl} คือระยะห่างระหว่างระนาบ (เมตร)

θ คือมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองสำหรับการแทรกสอดของคลื่นตามสมการ $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$

3.5.3 คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพสด

3.5.3.1 ความสามารถเทได้

(สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2542, น. 6 - 7)

ความสามารถเท (Workability) ได้เป็นคุณสมบัติที่ต้องการอย่างหนึ่งของคอนกรีตสด หมายถึงการที่คอนกรีตสดสามารถไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้แน่นง่าย ช่องว่างระหว่างวัสดุผสมจะต้องมีซีเมนต์เพสต์บรรจุเต็มทำให้ปราศจากรูโพรงต่างๆ เหล็กเสริมมีคอนกรีตหุ้มอยู่เป็นอย่างดี และไม่มีการแยกขนาดของส่วนผสมคอนกรีต วิธีทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีต นิยมใช้การวัดความขึ้นเหลวของคอนกรีตโดยการวัดค่าการยุบตัวของคอนกรีต ปัจจัยของความสามารถเทได้ของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ซึ่งอยู่ในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ กล่าวคือถ้าใช้น้ำมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตเหลวและเทลงในแบบหล่อได้ง่าย แต่กำลังความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลง ดังนั้นควรใช้ปริมาณน้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้เกิดความสามารถเทได้ที่ต้องการ
2. รูปร่างและส่วนขนาดของวัสดุผสม ถ้าใช้วัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมจะทำให้มีความสามารถเทได้ของคอนกรีตดีกว่าวัสดุผสมที่มีรูปเป็นเหลี่ยมเป็นมุม วัสดุผสมที่มีความลดหลั่นของขนาดอยู่ในพิภพทำให้ได้คอนกรีตมีเนื้อแน่นสม่ำเสมอต้องการปริมาณน้ำผสมน้อย มีคุณภาพดีและทำงานง่าย
3. ปริมาณและชนิดของปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์มีผลต่อค่าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่เทเข้าแบบได้ง่ายกว่า แต่ก็มีผลเสียในด้านอื่น
4. ปริมาณสารกระจายกักฟองอากาศ ถ้าผสมในปริมาณที่เหมาะสมจะมีผลทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ง่าย แต่ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง โดยที่ความคงทนของคอนกรีตก็ไม่เพิ่มขึ้น
5. สารผสมเพิ่ม สารเคมีผสมเพิ่มและวัสดุปอซโซลานบางชนิดเช่นเถ้าลอย จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้น และนอกจากนั้นจะช่วยลดการเยิ้มที่ผิวหน้าของคอนกรีต

6. เวลาและอุณหภูมิ ถ้าทั้งคอนกรีตที่เพิ่งผสมเสร็จใหม่ๆ ใช้นานเกินกว่า 15 นาที คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ต่ำลง หรืออาจแข็งตัวไปเลยหากใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยเกินไป

3.5.3.2 การสูญเสียค่าการยุบตัว

(ข้าหลวงพิเศษสูตร, 2543, น. 83)

การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) คือการสูญเสียความเหลวของคอนกรีตสดเมื่อเวลาผ่านไป การสูญเสียค่าการยุบตัวถือเป็นเหตุการณ์ปกติสำหรับคอนกรีตที่จะต้องแข็งตัวขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากผลของการแข็งตัวของซีเมนต์เฟสต์ การสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) การดูดซึมของมวลรวมและการระเหย ดังนั้นเมื่อคอนกรีตถูกผสมขึ้นมาแล้ว ควรรีบลำเลียง เท และแต่งผิวให้ทันกับเวลาที่คอนกรีตยังมีความสามารถเทได้เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียค่าการยุบตัว ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียค่าการยุบตัวมีดังนี้

1. อุณหภูมิ อุณหภูมิของคอนกรีตขณะที่คอนกรีตถูกผสม ลำเลียง ยิ่งสูงมากเท่าไร ระยะเวลาการสูญเสียค่าการยุบตัวยิ่งเร็วขึ้น ดังนั้นในสถานที่ที่อากาศร้อน มวลรวมที่ใช้ในการผสมควรทำให้มีอุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ เช่นการพรมน้ำ หรือการกองเก็บในบริเวณที่ร่ม

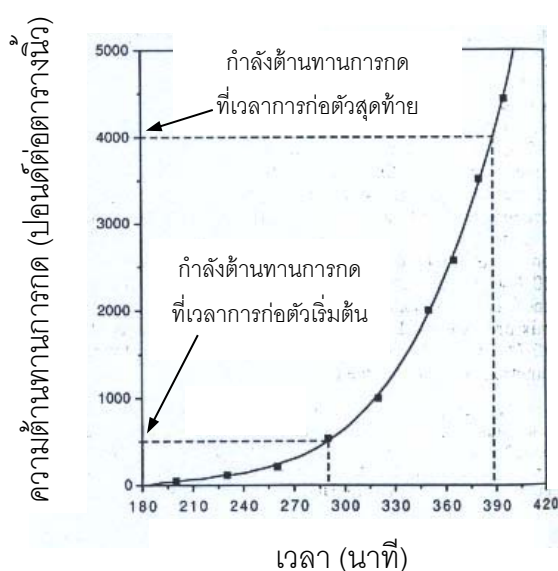
2. องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ การสูญเสียค่าการยุบตัวจะมีค่ามากเมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีส่วนผสมของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) หรือมีส่วนประกอบที่มีอัลคาไลสูง

3. สารผสมเพิ่ม คอนกรีตที่ผสมน้ำยาลดน้ำระดับสูง (Superplasticizer) มีแนวโน้มที่จะเกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวมากกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เพราะน้ำยาดังกล่าวจะทำให้ผงปูนซีเมนต์กระจายตัวอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีมากขึ้น ดังนั้นในการใช้น้ำยาดังกล่าวควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของผู้ผลิต

3.5.3.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

การก่อตัว (Setting) และการแข็งตัว (Hardening) ของคอนกรีตเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของคอนกรีตตามนิยามของมาตรฐาน ASTM 403 (Standard Test Method for Time of Setting of Concrete

Mixture by Penetration Resistance) ได้กำหนดด้วยค่าความต้านทานการกด (Penetration Resistance) ของ มอร์ตาร์ที่ได้จากการร่อนคอนกรีตผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดแยกมวลรวม หยาบ (หิน) แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และ ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) กำหนดจากระยะเวลาที่แรงต้านทานต่อพื้นที่ เท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.4 โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และสารผสมเพิ่มเป็นปัจจัยสำคัญ ที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว



ภาพที่ 3.4 ระยะเวลาการก่อตัวของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C403

3.5.4 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

3.5.4.1 กำลังของคอนกรีต

(ปริญาและชัย, 2547, น. 183-190)

กำลังถือเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะแข็งตัวแล้ว (Hardened State) ที่สำคัญที่สุดเนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้ในการออกแบบ คำนวณและการทดสอบ ค่ากำลังที่สำคัญ

ได้แก่กำลังอัด กำลังดัด กำลังดึง และกำลังเฉือน คอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้วต้องมีกำลังที่ดีโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญคือ

1. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปกำลังของคอนกรีตที่อายุเท่ากัน ผ่านการบ่มและการทำให้แน่นเหมือนกัน กำลังของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมหยาบและขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบมีผลต่อกำลังไม่มากเท่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีต

2. อัตราส่วนเจลต่อปริมาตร (Gel/Space Ratio) หมายถึง อัตราส่วนโดยปริมาตรของไฮเดรตซีเมนต์ต่อปริมาตรทั้งหมดของผลรวมของของไฮเดรตซีเมนต์และโพรงคาปิลารี ซึ่งปริมาณของเจลที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ ขึ้นอยู่กับอายุและชนิดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ ปริมาณฟองอากาศภายในเพสต์

3. อายุของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกหลังการแข็งตัว แต่ภายหลังจากอายุ 28 วันกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ถึงแม้ว่าคอนกรีตผสมสารปอซโซลานจะมีการพัฒนากำลังที่นานกว่านั้น แต่ค่ากำลังของคอนกรีตอายุที่ 28 วันยังเป็นค่านิยมใช้ในการออกแบบ

4. มวลรวมหยาบ คุณสมบัติของมวลรวมหยาบมีผลต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์ การเกิดและการขยายตัวรอยแตกในคอนกรีต ชนิดของหินยังมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยเฉพาะที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ

5. ปริมาณมวลรวม การเพิ่มมวลรวมลงในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดลักษณะเป็นวัสดุที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น (Heterogeneous) ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่น้อยลงทำให้การหดตัวและการเย็นเกิดขึ้นน้อยลง สำหรับคอนกรีตหยาบพบว่าปริมาณมวลรวมที่มากขึ้นให้กำลังอัดที่สูงขึ้น

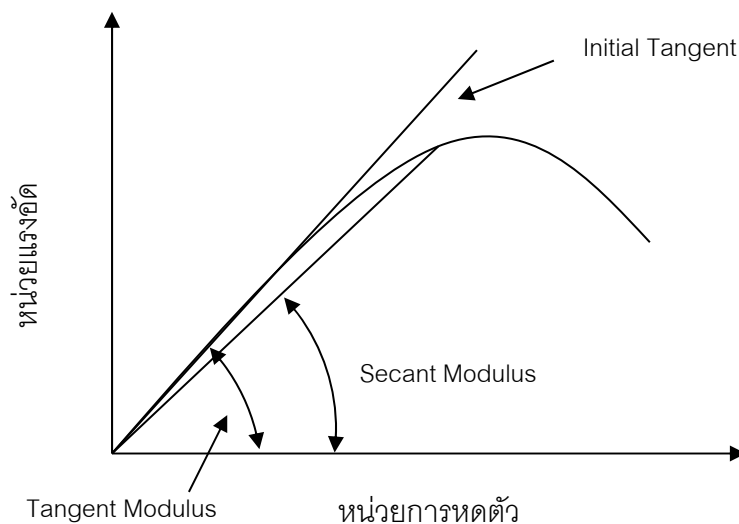
3.5.4.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เป็นคุณสมบัติที่บอถึงความต้านทานการเสียรูปของคอนกรีต หาได้จากเส้นสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลาดังแสดงในภาพที่ 3.5 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต มีวิธีดังต่อไปนี้

1. Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัส ซึ่งได้จากการลากเส้นให้สัมผัสกับเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว ณ จุดเริ่มต้น (Origin)

2. Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใด ๆ บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่ต้องการหา

3. Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับจุดใด ๆ บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว



ภาพที่ 3.5 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดและค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ค่าที่แนะนำไว้ตามมาตรฐาน ว.ส.ท 1008 ข้อ 4105 แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.12) ดังต่อไปนี้

$$E_c = 4270 W^{1.5} (f'_c)^{0.5} \quad (3.12)$$

โดยที่ E_c คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (กก/ซม²)

W คือค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่มีค่าระหว่าง 1,450 ถึง 2,480 กก/ม³

f'_c คือค่ากำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม²)

3.5.5 คุณสมบัติทางด้านการทนทานของคอนกรีต

3.5.5.1 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมาทำให้เกิดการหดตัว การหดตัวของคอนกรีตจะมีค่าที่น้อยกว่าของซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากอิทธิพลของมวลรวมที่ทำหน้าที่คอยควบคุม หนี้ยวรั้งการหดตัวไว้ การหดตัวของคอนกรีตส่วนมากเกิดขึ้นกับส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์ ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการหดตัวคือ

1. มวลรวม เมื่อมีการหดตัวทำให้มวลรวมที่ล้อมรอบด้วยซีเมนต์เพสต์จะถูกแรงดึงกระทำ ดังนั้นมวลรวมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวน้อยกว่ามวลรวมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำ คอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมมากจะเกิดการหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมน้อย

2. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เป็นตัวกำหนดปริมาณและคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังและความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ลดลง การหดตัวของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น

3. ขนาดและรูปแบบของคอนกรีต อัตราและปริมาณการหดตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวของคอนกรีต ถ้าปริมาตรของคอนกรีตเพิ่มขึ้นพบว่า การหดตัวของคอนกรีตลดลง ระยะเวลาในการหดตัวของคอนกรีตขนาดใหญ่จะยาวนานกว่าคอนกรีตขนาดเล็ก เนื่องจากต้องใช้เวลาในการที่ผลของการหดตัวจะขยายสู่ส่วนเนื้อในของคอนกรีต

4. ความชื้น ปริมาณความชื้นในสภาวะแวดล้อมมีผลกระทบโดยตรงต่อการหดตัวของคอนกรีต อัตราการหดตัวจะน้อยลงถ้าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้น และที่อุณหภูมิสูงการหดตัวจะเพิ่มขึ้น

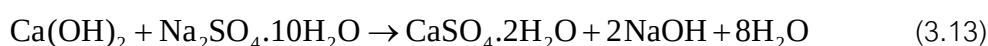
5. สารผสมเพิ่ม ผลของสารผสมเพิ่มขึ้นอยู่กับชนิดของสาร โดยสารที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของโพรงในซีเมนต์เพสต์ได้ก็จะส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีต โดยทั่วไปหากจำนวนโพรงอากาศเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวจะเพิ่มขึ้น วัสดุปอลิไซลาลอนจะทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตลดลง สารเคมีผสมเพิ่มมักส่งผลให้การหดตัวเพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีที่มีผสมแล้วสามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ซึ่งจะทำให้การหดตัวลดลง สารแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้เพื่อเร่งการก่อตัวของคอนกรีตมีผลทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น ส่วนสารกักกระจายฟองอากาศมีผลต่อการหดตัวเล็กน้อยเท่านั้น

6. ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ การหดตัวเนื่องจากคาร์บอนชั้นเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้ซีเมนต์เพสต์หดตัว การหดตัวเนื่องจากคาร์บอนชั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงหรือต่ำมากจะเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นได้ยาก

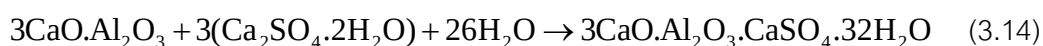
3.5.5.2 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

โดยทั่วไปสามารถพบสารซัลเฟตในรูปของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และซีเมนต์เพสต์เป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง เวลาในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออนและอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะทำให้เกิดเอ็ททริงไกต์ (Aft-phase) ที่มีคุณสมบัติในขยายตัวมาก ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กับซีเมนต์เพสต์ออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

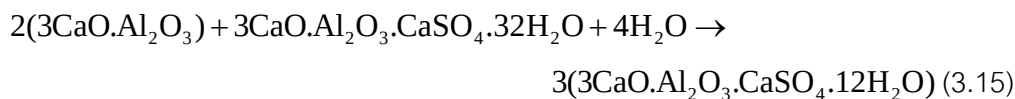
1. การเกิดยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยโซเดียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดผลิตภัณฑ์เป็นยิปซัม ดังแสดงในสมการที่ (3.13)



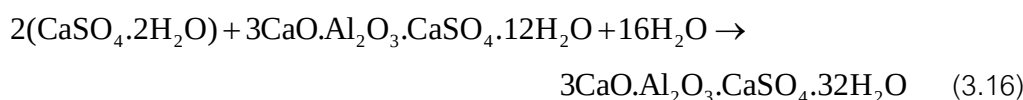
2. การเกิดเอ็ททริงไกต์ (Aft-phase) ซึ่งยิปซัมที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (3.13) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เกิดเอ็ททริงไกต์ผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในสมการที่ (3.14)



3. การเกิดโมโนซัลโฟอะลูมิเนต โดยเมื่อไตรแคลเซียมอะลูมิเนตทำปฏิกิริยากับซัลเฟตจะทำให้ปริมาณซัลเฟตในเพสต์ลดลง ส่งผลให้เอ็ททริงไกต์เปลี่ยนรูปไปอยู่ในสถานะกึ่งเสถียรที่เรียกว่าโมโนซัลโฟอะลูมิเนต (AFm-phase) ดังแสดงในสมการที่ (3.15)



4. การเกิดเอ็ททริงไกต์ซ้ำ (AFt-phase) เมื่อปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้นโมโนซัลโฟอะลูมิเนตจะเปลี่ยนรูปไปเป็นเอ็ททริงไกต์ซ้ำ ดังแสดงในสมการที่ (3.16)



ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตมีดังต่อไปนี้

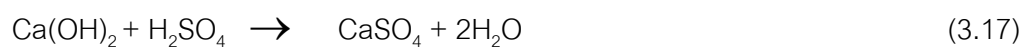
1. ปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ พบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) น้อยมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) มาก
2. ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในเฟสดี พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยลงจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต
3. ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต พบว่าความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตมีผลต่อการกัดกร่อนเฟสดี

3.5.5.3 การกัดกร่อนเนื่องจากกรด

อัตราการกัดกร่อนเนื่องจากกรดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ผิว อุณหภูมิ ความดัน ปริมาณ CO_2 ในบรรยากาศ การทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำสามารถช่วยให้คอนกรีตทนต่อการกัดกร่อนของกรดระดับปานกลางได้ระดับหนึ่ง การลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยการลดปริมาณปูนซีเมนต์หรือใช้วัสดุปอซโซลาน ทำให้คอนกรีตทนต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดีขึ้น สำหรับคอนกรีตที่สัมผัสกับกรดที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ต่ำกว่า 4 ควรป้องกันคอนกรีตโดยการเคลือบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเช่น Epoxy Resins หรือ Bituminous Paints

ปฏิกิริยาของกรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริกกับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพขององค์ประกอบแคลเซียมไปเป็นเกลือแคลเซียม แสดงดังสมการ (3.17) และ (3.18)

1. ปฏิกิริยาเคมีของกรดซัลฟูริก



2. ปฏิกิริยาเคมีของกรดไฮโดรคลอริก

