

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง

ในการผลิตปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งนั้นมีวิธีการผลิตได้ 2 วิธีคือ กรรมวิธีแบบแห้ง และกรรมวิธีแบบเปียก ทั้งสองกรรมวิธีนั้นมีข้อแตกต่างกันอยู่ตรงที่ ขั้นตอนในการบด เพราะหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ถ้ามีมากถึงปริมาณหนึ่งการที่จะบดนั้นทำได้ยาก จึงทำได้สองวิธีคือ ขจัดน้ำที่มีอยู่ให้เหลือน้อยที่สุดแล้วใช้กรรมวิธีแบบแห้ง หรือเติมน้ำเข้าไปแล้วใช้กรรมวิธีแบบเปียก

กรรมวิธีแบบแห้งนั้นเริ่มโดยนำหินปูนหรือหินดินดานมาย่อยและบดให้ละเอียดแล้วนำไปใส่ในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1400-1500 °C ทำให้เย็นตัวลงเป็นปูนเม็ด จากนั้นเติมยิปซัมและบดให้เป็นปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ส่วนกรรมวิธีแบบเปียกนั้นจะเริ่มโดยนำดินเหนียวหรือดินสอพองซึ่งบดละเอียดมาล้างด้วยน้ำแล้วกรองแยกโดยละเอียด จากนั้นนำไปใส่ในเตาเผาที่อุณหภูมิเดียวกันกับกรรมวิธีแบบแห้งตลอดจนกรรมวิธีต่อจากนี้ก็เหมือนกับกรรมวิธีแบบแห้งดังแสดงในผังรูปที่ 1

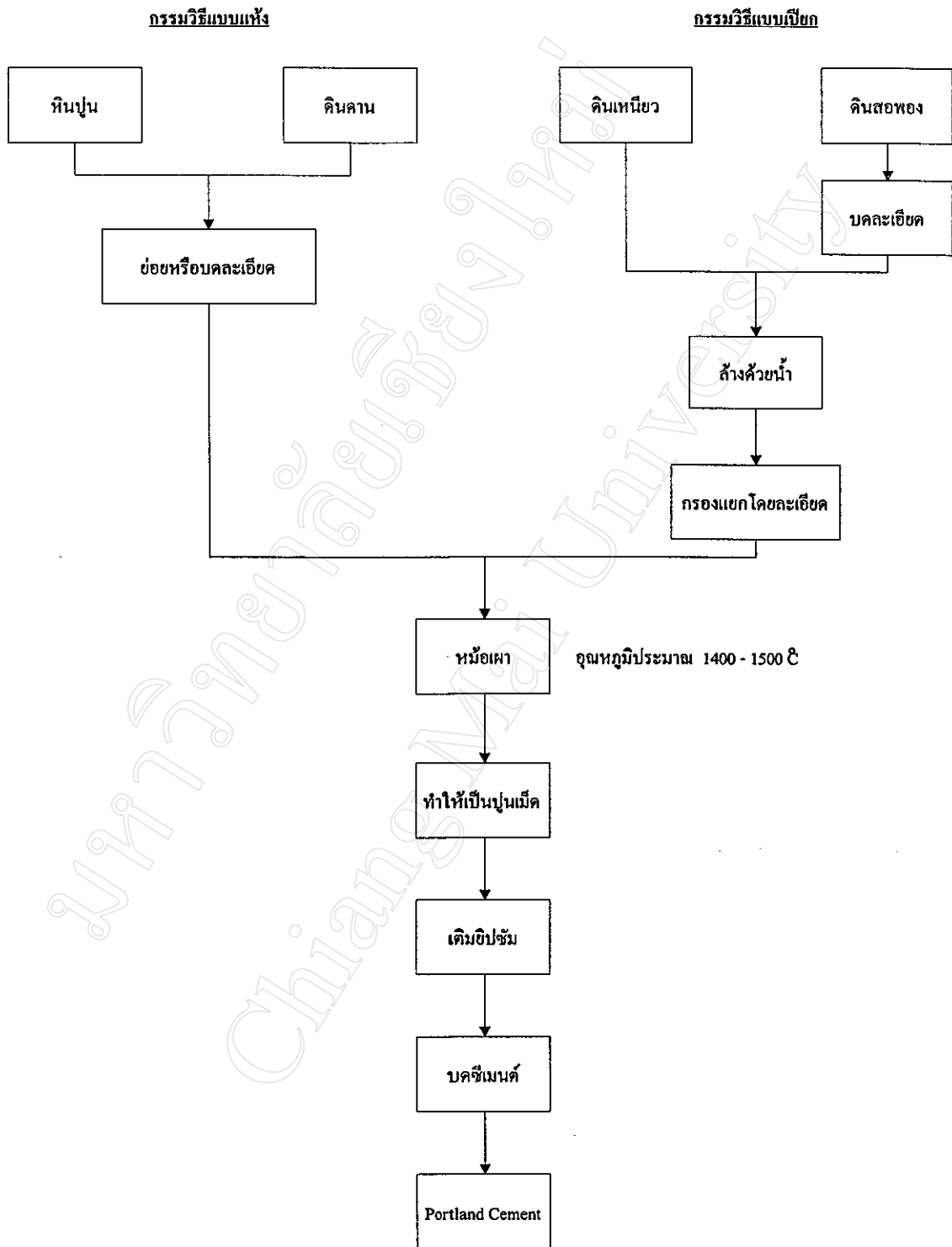
2.1.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลายชนิดด้วยกัน โดยสารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในเตาเผา (ชัชวาลย์, 2537) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพองคงเหลือไว้เพียงแคลเซียมออกไซด์
- แคลเซียมออกไซด์จากหินปูนและดินสอพอง รวมตัวกับอลูมินา ซิลิกาและเหล็กออกไซด์จากดินเหนียวและดินดาน
- เกิดการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ใน 2 กลุ่มใหญ่คือ

- ออกไซด์หลักได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันแล้วมีประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- ออกไซด์รองได้แก่ MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O และ Na_2O



รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการผลิตซีเมนต์

ออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ดเกิดเป็นสารประกอบหลัก 4 สารประกอบดังต่อไปนี้

- ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) ซึ่งจะเขียนแทนโดย C_3S เป็นสารประกอบ ซึ่งเป็นตัวกำหนดกำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) ซึ่งจะเขียนแทนโดย C_2S เป็นสารประกอบ ซึ่งเป็นตัวกำหนดกำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นกัน กำลังในช่วงแรกของไตรแคลเซียมซิลิเกตจะสูงกว่า แต่กำลังในช่วงสุดท้ายจะเท่าๆกัน
- ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งจะเขียนแทนโดย C_3A มีผลต่อกำลังของซีเมนต์ในช่วงเริ่มต้นของการทำปฏิกิริยาทางเคมีเท่านั้น ทำให้ซีเมนต์เมื่อแข็งตัวแล้วไม่ต้านทานต่อกรดซัลเฟต แต่ไตรแคลเซียมอลูมิเนตก็ยังมีประโยชน์คือเป็นตัวช่วยในการรวมตัวของหินปูนและซิลิกา
- เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) ซึ่งจะเขียนแทนโดย C_4AF มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสารประกอบหลักตัวอื่นๆ เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์จะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตเกิดเป็นซัลโฟเฟอร์ไรท์และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกต

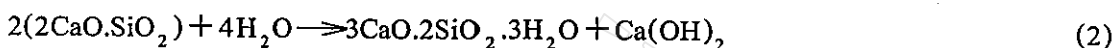
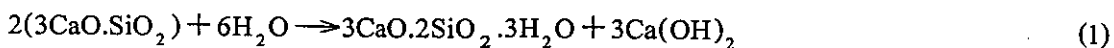
ออกไซด์รองเป็นออกไซด์ที่มีปริมาณน้อย ซึ่งออกไซด์ที่มีผลต่อคอนกรีตได้แก่ K_2O , Na_2O เนื่องจากออกไซด์พวกนี้จะแตกตัวเป็นอัลคาไลน์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับมวลรวมบางประเภท ทำให้คอนกรีตที่ได้แตกร้าวและกำลังรับแรงอัดลดลง

2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ทำให้เกิดการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์ เราสามารถแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบแต่ละชนิดได้ดังนี้

ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

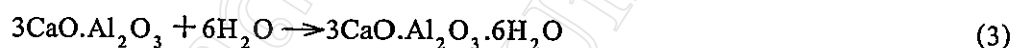
แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งก่อตัวในรูปผลึกและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่มีลักษณะคล้ายเจล โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



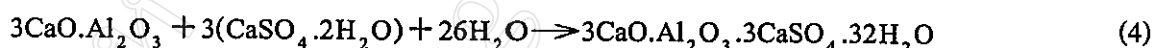
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดเจลซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนี้จะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี

ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการ



ดังนั้นเพื่อที่จะหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นของเอทริงไจท์ (Ettringite, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) บนผิวของอนุภาคเม็ดซีเมนต์ดังสมการ



ชั้นของเอทริงไจท์จะหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตเป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของเอทริงไจท์ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำเสียทีเดียว เพราะเมื่อเกิดเอทริงไจท์จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของเอทริงไจท์แตกออกทำให้ไตรแคลเซียมอลูมิเนตทำปฏิกิริยากับน้ำได้อีก แต่ในขณะที่เดียวกันก็จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมด้วย เกิดเป็นเอทริงไจท์ใหม่เข้าไปแทนที่ ทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำอีกครั้งหนึ่ง ชั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งซัลเฟตไอออนมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดเอทริงไจท์ หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต โดยจะเปลี่ยนเอทริงไจท์ไปเป็น โมโนซัลเฟต

ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์นี้จะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กเหมือนเข็มของซัลโฟลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4$) และซัลโฟเฟอร์ไรท์ ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 3CaSO_4$)

2.1.3 การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่หนึ่ง

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์นั้นสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอน ได้ดังนี้

ก. ช่วงของการผสม (Mixing Period)

เป็นช่วงที่อิออนชนิดต่างๆ จากสารประกอบในปูนซีเมนต์ละลายน้ำ การละลายในช่วงแรกจะเกิดค่อนข้างเร็วและมีความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.4 พบว่าการนำไฟฟ้าและการไหลเวียนของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และที่ผิวของเม็ดซีเมนต์จะถูกปกคลุมด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะรวมตัวกันจาก Ca^{++} , $H_2SiO_4^{--}$ และ OH^- ซึ่งเกิดจากส่วนของซิลิเกตในเม็ดปูน
- เอทตริงไท์ (Ettringite, a Hydrated Trisulfoaluminate Salt of Calcium) เกิดจากการรวมตัวของ Ca^{++} , SO_4^{--} , AlO_2^- และ OH^- ซึ่งเกิดจากอินเทอร์สตีเชียลเฟส (Interstitial Phase) ในส่วนของไตรแคลเซียมอลูมิเนต และจากแคลเซียมซัลเฟตที่มีอยู่ในซีเมนต์

ข. ช่วงสงบตัว (Dormant Period)

เนื่องจากความเป็นค้างและแคลเซียมอิออนที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่ผ่านมาทำให้เม็ดปูนละลายได้น้อยลงดังจะเห็นได้จากในรูปที่ 2.4 การนำไฟฟ้าในช่วงนี้ค่อนข้างจะคงที่ การสร้างตัวของเอทตริงไท์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ยังคงมีอยู่แต่มีในอัตราที่ช้า ในช่วงนี้สารประกอบปอร์ตแลนด์ ($Ca(OH)_2$, Portlandite) ยังไม่มีเนื่องจากอัตราการรวมตัวระหว่างนิวเคลียสเกิดช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตการเกิดปฏิกิริยาในช่วงนี้ที่เวลา 1 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมงจะแสดงไว้ดังในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

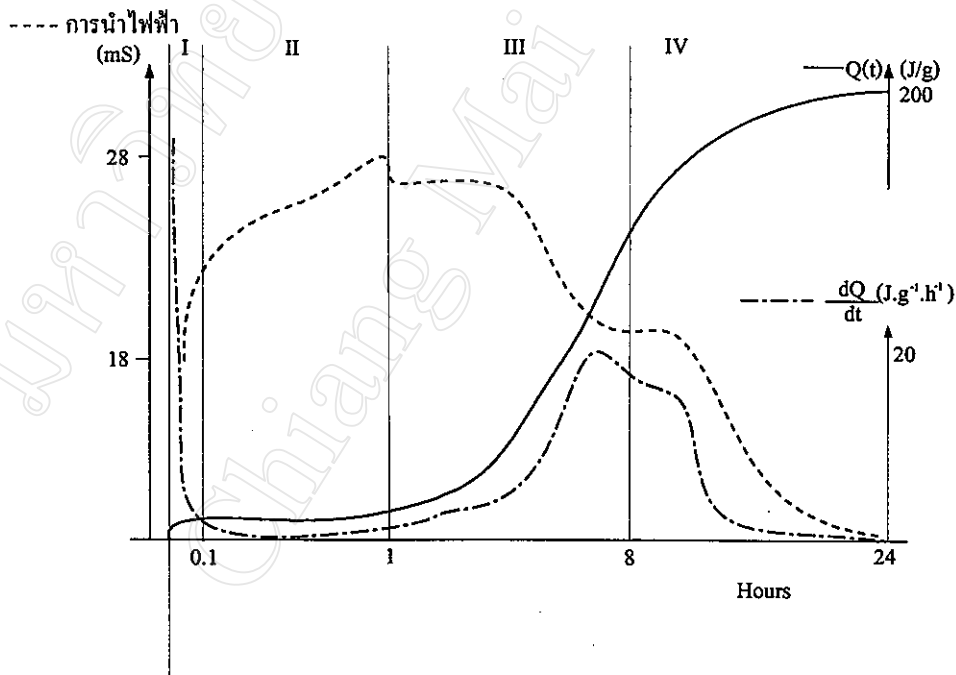
ค. ช่วงเริ่มการก่อตัว (Initial Setting)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปอร์ตแลนด์ เริ่มตกตะกอนและที่เป็นเช่นนี้ได้ก็เพราะว่าระดับความเข้มข้นของซิลิเกตลดลงจนเกือบไม่มี และการที่ Ca^{++} และ OH^- ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วทำให้ส่วนประกอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ละลายได้ดีขึ้น ในช่วงแรกในช่วงนี้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นช้ามากแต่จะเร็วขึ้นในช่วงท้าย รูปการก่อตัวในช่วงนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7

มอร์ต้าในช่วงนี้จะเริ่มเหนียวขึ้นเนื่องจากการก่อตัวของ เอทตรึงใจท์และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในบางส่วน เฟสของซิลิเกตและอลูมิเนตจะสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความเหนียวขึ้น การวัดการก่อตัวนั้นวัดได้โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Sensor) ซึ่งเข็มไวแคตจะจมทะลุผ่านเอทตรึงใจท์เพราะยังเป็นผลึกบางๆเส้นบางๆ ลึนๆ เท่านั้น ในช่วงการก่อตัวสุดท้ายสามารถวัดกำลังรับแรงอัดเริ่มแรกของคอนกรีตได้ดังในกราฟรูปที่ 2.3

ง. ช่วงแข็งตัว (Hardening)

ในปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีแคลเซียมซัลเฟตน้อยกว่าปริมาณที่จำเป็นที่จะทำปฏิกิริยากับอลูมิเนตเฟส ดังนั้นในช่วงแรกของการก่อตัวซัลเฟตอิออนจะถูกใช้ในการก่อตัวเป็นเอทตรึงใจท์จนหมดซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 9-15 ชั่วโมงหลังจากการผสมหลังจากนั้นเอทตรึงใจท์ก็จะเปลี่ยนเป็นโมโนซัลโฟลูมิเนตด้วยอลูมิเนตที่เหลืออยู่ จากปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดความร้อนและเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกตเฟส รูปการก่อตัวในช่วงนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8

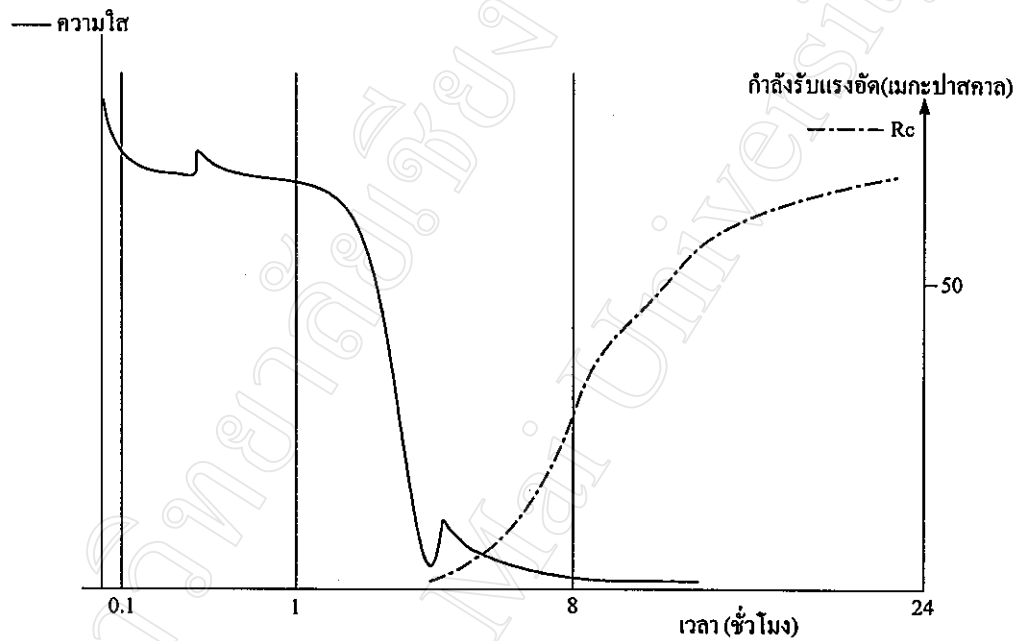


รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์กับเวลาในช่วงต่างๆ ภายใน 24 ชั่วโมง

ที่มา: Malier (1992)

จ. ช่วงชะลอตัว (Slow Down)

ในช่วงนี้เม็ดซีเมนต์จะถูกปกคลุมโดยชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งหนาขึ้นเรื่อยๆทำให้น้ำเข้าไปถึงส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันยากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดช้าลง ซีเมนต์เพสต์ที่ถูกน้ำแล้วจะมีรูปร่างไม่แน่นอนและอัดแน่นมากซึ่งเรียกว่าผลิตภัณฑ์ภายใน (Internal Product)



CPA HPR 400 kg/m³

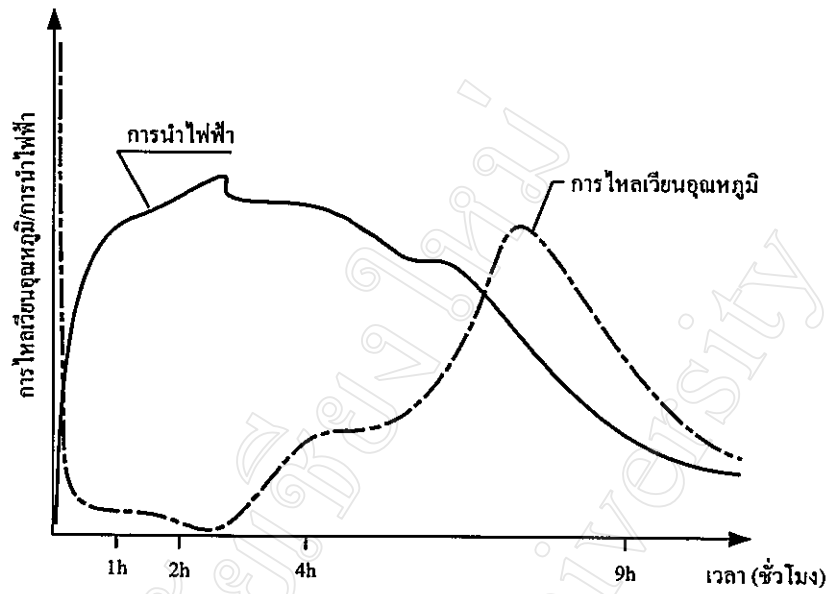
Sand 0-1 450 kg/m³ Melamine 3.6 %

E/C 0.35

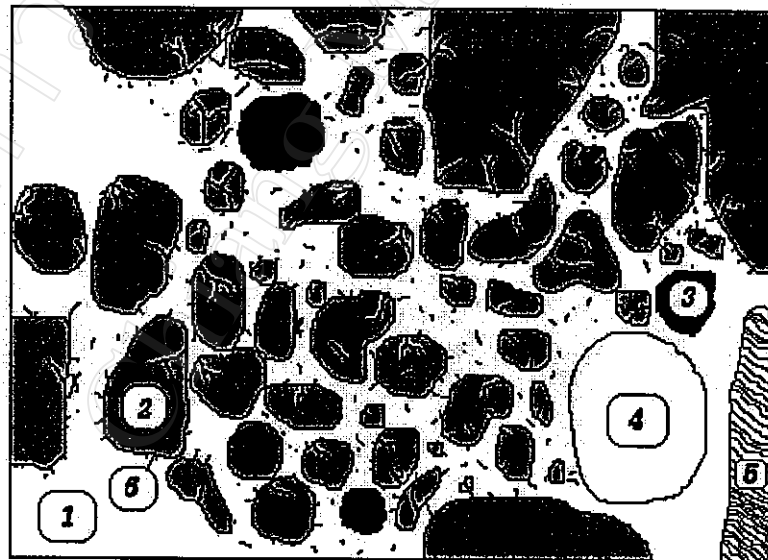
Sand 1-4 450 kg/m³ Non chlorinated accelerator 3 %

รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์กับเวลาในช่วงต่างๆ ภายในเวลา 24 ชั่วโมง

ที่มา: Malier (1992)



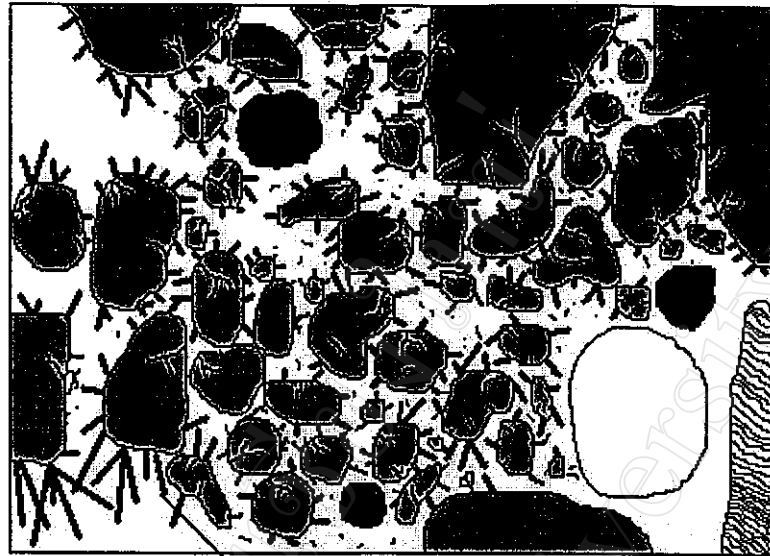
รูปที่ 2.4 แสดงการนำไฟฟ้าและการไหลเวียนของอุณหภูมิของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่เวลาต่างๆ
ที่มา: Aitcin (1998)



5 microns

1-Water 2-Clinker 3-Gypsum 4-Bubble 5-Sand 6-Hydrates

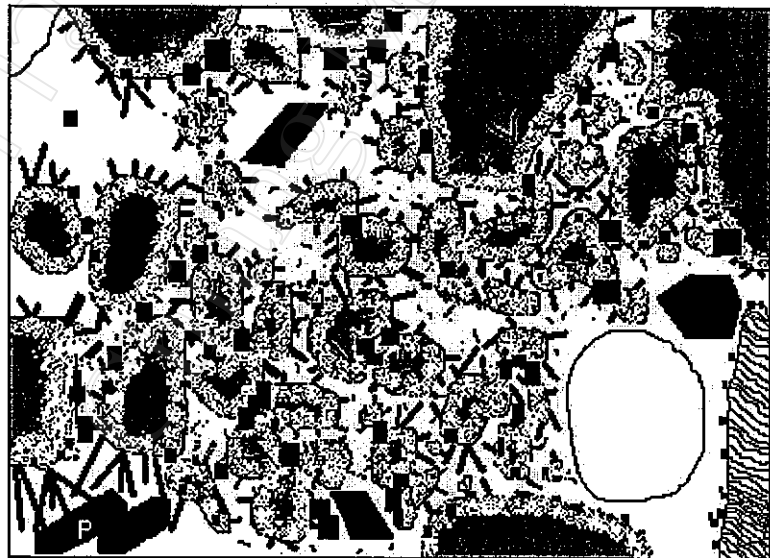
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่เวลา 1 ชั่วโมง
ที่มา: Aitcin (1998)



5 microns

ETTRINGITE CRYSTALS

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของซีเมนต์เฟสต์ที่เวลา 2 ชั่วโมง
ที่มา: Aïtcin (1998)

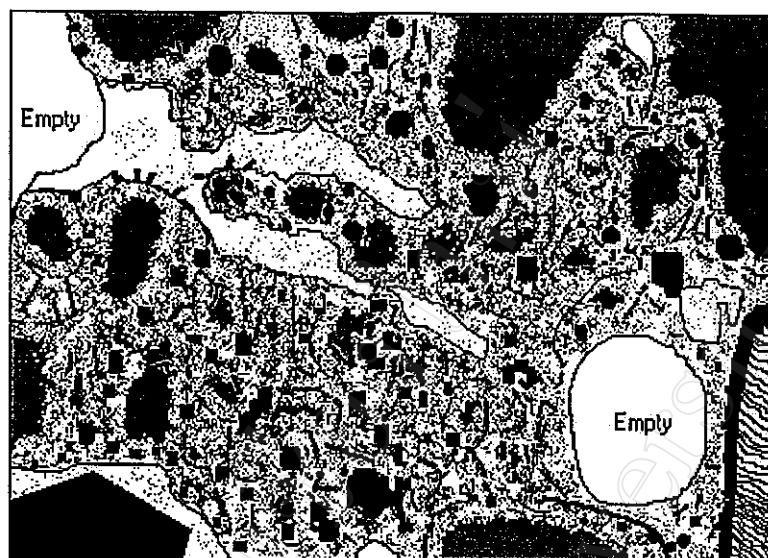


5 microns

BEGINNING OF SETTING

(P : PORTLANDITE)

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของซีเมนต์เฟสต์ที่เวลา 4 ชั่วโมง
ที่มา: Aïtcin (1998)



5 microns

AFTER GYPSUM HAS BEEN USED UP,
ETTRINGITE DISSOLVES

รูปที่ 2.8 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่เวลา 9 ชั่วโมง
ที่มา: Aitcin (1998)

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งของทั้ง 5 ยี่ห้อ

รายการ	ยี่ห้อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง				
	ช้าง	ภูเขา	เพชร	พญานาคเขียว	ทีพีไอแดง
C ₃ S	64.77	56.59	62.14	53.50	57.2
C ₂ S	10.95	18.19	13.67	17.09	16.2
C ₃ A	7.14	7.45	7.39	9.68	7.0
C ₄ AF	9.76	10.75	9.91	9.54	11.8
SO ₃	2.36	2.50	2.75	2.82	2.57
Al ₂ O ₃	4.74	5.07	4.87	5.23	5.12
Alkalies	0.52	0.30	0.54	0.20	0.38

2.2 สารลดน้ำอย่างแรง

2.2.1 ชนิดของสารลดน้ำอย่างแรง

สารลดน้ำอย่างแรงเป็นสารผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ และลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการทำคอนกรีตลงอย่างมาก สารลดน้ำอย่างแรงที่มีขายตามท้องตลาดนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มซึ่งแบ่งตามพื้นฐานทางเคมีของสารนั้นๆ ได้แก่

- Polycondensate of Formaldehyde and Melamine Sulfonate หรือ ตามที่เราเรียกสั้น ๆ ว่า Melamine Sulfonate
- Polycondensate of Formaldehyde and Naphthalene Sulfonate หรือ ตามที่เราเรียกสั้น ๆ ว่า Naphthalene Sulfonate
- Lignosulfonate - based
- Polyacrylates

สารลดน้ำอย่างแรงชนิดหนึ่งๆอาจจะมีสารตัวอื่นๆเข้ามาผสมด้วยเพื่อช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพเช่น ในเนฟทาไลน์ซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์สามารถใส่ลิกโนซัลโฟเนตผสมเข้าไปได้ด้วยได้ ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องการสูญเสียค่าการยุบตัวได้ เพราะลิกโนซัลโฟเนตทำหน้าที่คล้ายกับสารหน่วงปฏิกิริยา และลิกโนซัลโฟเนตราคาถูกกว่าทำให้เป็นผลดีทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย ซึ่งรายละเอียดของสารลดน้ำอย่างแรงแต่ละชนิดมีดังนี้

ก. เมลามีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์

เมลามีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ที่จำหน่ายอยู่ตามท้องตลาดนั้นจะจำหน่ายในรูปแบบของของเหลวซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งเพียง 22 เปอร์เซ็นต์ โดยจะเป็นเกลือของโซเดียม แต่ก็ได้มีความคิดที่จะเปลี่ยนสูตรคือเพิ่มปริมาณอนุภาคของแข็งจาก 22 เปอร์เซ็นต์เป็น 40 เปอร์เซ็นต์

คุณสมบัติของเมลามีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์เมื่อเปรียบเทียบกับเนฟทาไลน์ซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์นั้นนอกจากจะแตกต่างกันในเรื่องปริมาณของแข็งแล้ว ยังมีความแตกต่างกันดังนี้

- เมลามีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์นั้นทำให้เกิดฟองอากาศ (Entrap air) น้อยกว่าเนฟทาไลน์ซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์
- เมลามีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ไม่ทำให้เกิดสีในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ขาว
- เมลามีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ทำให้เกิดฟองอากาศที่บริเวณผิวที่ติดกับแบบหล่อ น้อยกว่าในเนฟทาไลน์ซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์

ข. แนนฟาติงซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์

แนนนฟาติงซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์นั้นมักจะจำหน่ายในรูปของเหลวสีน้ำตาล โดยมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่ระหว่าง 40 ถึง 42 เปอร์เซ็นต์ แต่บางที่อาจจะอยู่ในรูปของแข็งโดยจะมีลักษณะเป็นแป้งสีน้ำตาล โดยแนนนฟาติงซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ทั้งที่อยู่ในรูปของแข็งและของเหลวสามารถเป็นได้ทั้งเกลือแคลเซียม หรือเกลือโซเดียม ซึ่งส่วนใหญ่ที่ใช้กันจะอยู่ในรูปเกลือโซเดียม

เกลือแคลเซียมจะใช้ในงานที่ค่อนข้างพิเศษ เช่นงาน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือ คอนกรีตอัดแรงที่เกี่ยวข้องกับทางพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งคลอไรด์ไอออนจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็ก โดยคลอไรด์ไอออนจะเกิดในขั้นตอนการผลิตคือ ขั้นตอนการนิวทรอลไลเซชัน เพราะโซดาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหักล้างกรดซัลฟอนิกนั้นทำมาจากโซเดียมคลอไรด์ ดังนั้นเกลือแคลเซียมที่ในขั้นตอนนิวทรอลไลเซชันนั้นไม่ได้ใช้โซดาแต่ใช้ไฮเดรตไลม์ (Hydrated Lime) แทนก็จะไม่มีคลอไรด์อยู่

กรณีที่ใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ได้ (Alkali - Reactive Aggregate) จะนิยมใช้เกลือแคลเซียมมากกว่า เพราะจะทำให้ส่วนผสมมีปริมาณอัลคาไลน์น้อย

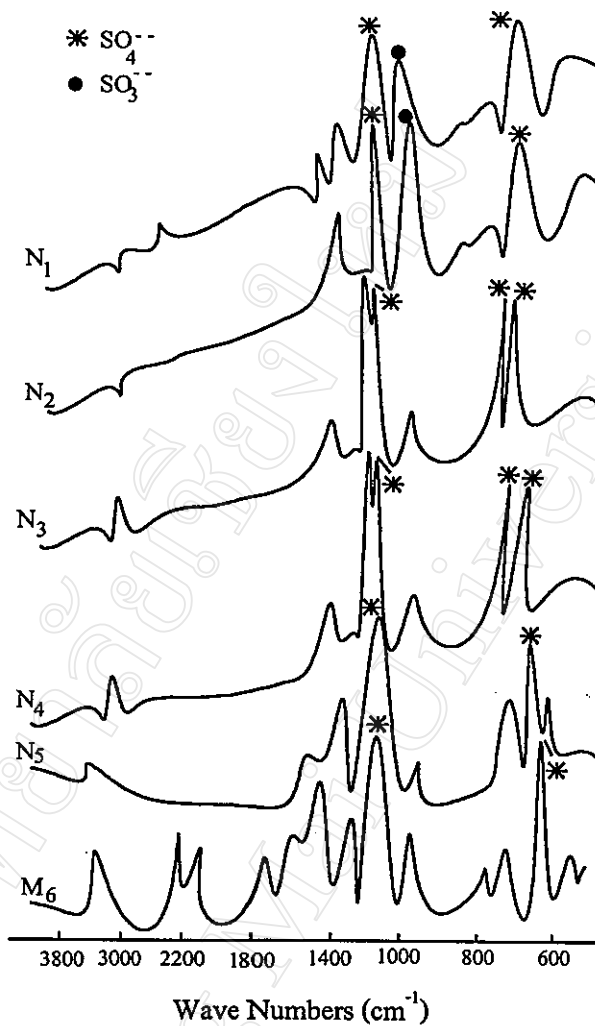
ในการทำคอนกรีตกำลังอัดสูงนั้นนอกจากสองกรณีที่ว่ามาแล้ว จะใช้เกลือโซเดียมเป็นส่วนใหญ่เพราะนิยมผลิตกันมากกว่า เพราะว่าผลิตง่ายและต้นทุนผลิตต่ำกว่า

ค. ลิกโนซัลโฟเนตซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์

ในการเติมลิกโนซัลโฟเนตนั้นจะเติมได้ไม่เกินปริมาณหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากจะทำให้มีผลกระทบตามมาเพราะว่ามันมีสารเจือปนที่ไม่บริสุทธิ์อยู่ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากน้ำที่กลั่นจากโรงงานซึ่งใช้ในการเตรียมลิกโนซัลโฟเนต และการที่จะกำจัดสารไม่บริสุทธิ์นั้นให้หมดไปจะต้องเสียค่าใช้จ่ายอย่างมาก

ลิกโนซัลโฟเนตซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์จะไม่ค่อยถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังอัดสูงเท่าใดนัก ยกเว้นคอนกรีตกำลังอัดสูงประเภทที่หนึ่ง ส่วนใหญ่จะใช้เมลามีนหรือแนนนฟาติงซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ แต่ก็มีผู้ผลิตบางรายใช้ลิกโนซัลโฟเนตซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์เติมลงไปในช่วงเริ่มต้นผสมและเติมเมลามีนหรือแนนนฟาติงซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ในช่วงท้ายของการผสม หรือเมื่อต้องการปรับแก้ค่าความยุบตัวที่หน้างาน

ผู้ผลิตสารผสมเพิ่มบางรายจะผสมลิกโนซัลโฟเนตซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์กับแนนนฟาติงซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์เข้าด้วยกัน และเนื่องจากสีเป็นสีน้ำตาลเหมือนกันทำให้ดูได้ยาก อีกทั้งยังมีความหนืดและปริมาณของแข็งใกล้เคียงกัน ทำให้ดูออกยากว่าผสมหรือไม่ วิธีที่ดีที่สุดคือการดูจากอินฟราเรดสเปกโตรกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 N_1 - N_5 เป็นอินฟราเรดสเปกโตรกราฟของแนฟทาลีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ และ M_6 เป็นอินฟราเรดสเปกโตรกราฟของลิก โนซัลโฟเนตซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์และสารซูปเปอร์-พลาสติกไซเซออร์ผสม

ที่มา: Aitcin (1998)

2.2.2 ผลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

การทำปฏิกิริยาระหว่างสารลดน้ำอย่างแรงกับซีเมนต์นั้นในปัจจุบันก็ยังไม่มีความชัดเจนที่อธิบายได้ทั้งหมด ซึ่งนักวิจัยทั้งหลายก็ช่วยกันค้นคว้าเริ่มตั้งแต่มีการใช้สารลดน้ำอย่างแรง โดยนักวิจัยบางท่านคิดว่าการทำปฏิกิริยาระหว่างสารลดน้ำอย่างแรงกับซีเมนต์นั้นเป็นเหตุการณ์ทางกายภาพเท่านั้น โดยใช้อุณหภูมิที่ไม่ทำปฏิกิริยา (Non-reactive Powder) ซึ่งมีผิวหลายรูปแบบ เพื่อศึกษาการกระจายของระบบที่ปราศจากน้ำนี้เพื่ออธิบายว่าสารลดน้ำอย่างแรงนั้นกระจายอนุภาค

ของของแข็งในน้ำได้อย่างไร (Foissy and Pierre (1990)) ส่วนนักวิจัยบางท่านนั้นก็มุ่งคิดถึงการทำปฏิกิริยาทางเคมีเป็นหลัก โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีต่ออัตราการละลายของอิออนแต่ละตัวในส่วนผสม (Andersen (1986); Diamond and Struble (1987); Odler and Abdul-Maula (1987); McCarter and Garvin (1989); Paulini (1990)) นอกจากนี้นักวิจัยบางท่านก็ยังศึกษาถึงผลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีต่อเฟสต่างๆของซีเมนต์ โดยตั้งสมมุติฐานว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์นั้นจะเกิดจากผลของสารลดน้ำอย่างแรงที่เกิดกับแต่ละเฟสรวมกัน (Massazza and Costa (1980)) แต่ในการทดสอบแบบนี้ก็มีปัญหาคือ ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แต่ละชนิดนั้นไม่ได้มีเฟสเหมือนกัน ในสัดส่วนเดียวกัน และไม่ได้มีเพียงการทำปฏิกิริยาระหว่างสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์เท่านั้น แต่ยังมีการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับซัลเฟต และซัลเฟตกับสารลดน้ำอย่างแรงอีก

จากการทดลองพบว่าสารลดน้ำอย่างแรงนั้นไม่ได้มีผลกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เท่านั้น แต่ยังมีผลกับการละลายของซัลเฟตและค่าอัตราส่วนของ SO_4^{2-}/AlO_2^- ด้วย ซึ่งค่าอัตราส่วน SO_4^{2-}/AlO_2^- นี้มีผลต่อการก่อตัวของซีเมนต์เฟสที่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ซึ่งถ้าอัตราส่วน SO_4^{2-}/AlO_2^- มีค่ามากก็จะทำให้เกิด False Set แต่ถ้ามีค่าน้อยมากก็จะทำให้เกิด Flash Set (Vemet (1995)) นอกจากนี้ Vemet (1995) ยังได้ศึกษาอัตราการละลายของแคลเซียมซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปต่างๆเนื่องจากสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ด้วย และก็ได้แสดงให้เห็นว่า แนฟทาลินซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ทำปฏิกิริยากับเฮมิไฮเดรต (Hemihydrate) ได้เป็นอย่างดีซึ่งจะช่วยให้การตกตะกอนของยิปซัมช้าลง

จากผลการทดลองของนักวิจัยหลายๆท่าน ทำให้ทราบความจริงอีกหลายข้อที่เกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับสารลดน้ำอย่างแรง เช่น

- ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่ต้องใช้เพื่อให้ซีเมนต์เฟสที่มีความเหลวค่าหนึ่งนั้น จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของซีเมนต์เพิ่มขึ้น หรือปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะต้องใช้ปริมาณของลดน้ำอย่างแรงมากขึ้นเพื่อให้เกิดความสามารถในการเทได้
- โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงจะถูกดูดซับลงบนไตรแคลเซียมซัลเฟตซึ่งทราบได้ทั้งจากการทดลองทางตรงและทางอ้อม โดยทางตรงนั้นทดสอบโดยใช้ Radioactive Sulfur-marked Superplasticizer (Onofrei and Gray (1989)) ส่วนทางอ้อมนั้นสรุปได้จากการสังเกตจากพฤติกรรมของมัน เช่น ถ้าปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดช้าลง และเวลาในการก่อตัวก็จะช้าลงด้วย นอกจากนี้ถ้าใส่สารลดน้ำอย่างแรงมากๆ อาจทำให้การก่อตัวช้าไปเป็นวันได้ (Aitcin, Laplante and Bedard (1985))

$\frac{\text{SO}_4^{--}}{\text{AlO}_2^-}$ Behaviour	MICROSTRUCTURE		
	Hydration time		
	10 min	1 hour	2 hours
Very high False set			
High Weak false set			
Average Normal slump loss			
Low Weak flash set			
Very low Flash set			

Legend:



Clinker



Calcium sulfate



Gypsum needles



Ettringite needles



Ettringite and C-S-H

 C_4AH_x gel

รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอัตราส่วนของ $\text{SO}_4^{--}/\text{AlO}_2^-$ ที่มีผลต่อ โครงสร้างของคอนกรีต

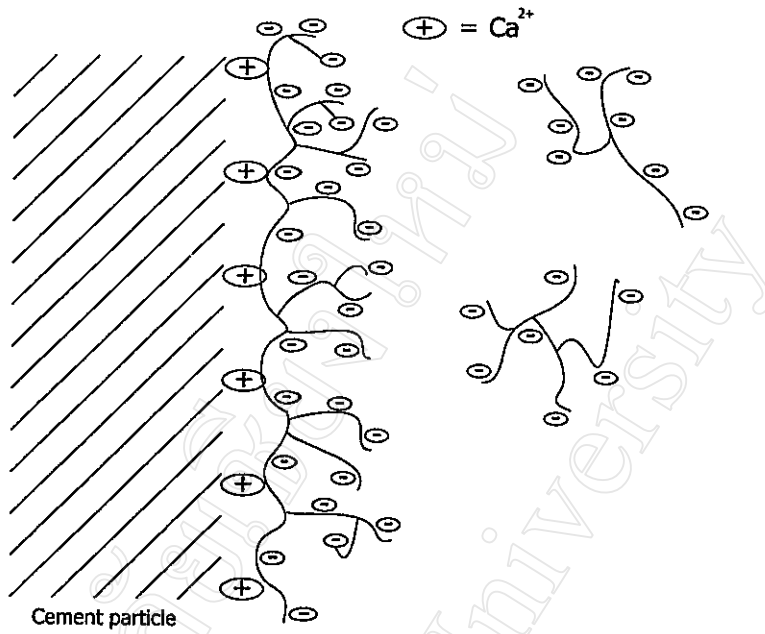
ที่มา: Aïtcin (1998)

- จากการศึกษาผลกระทบของส่วนประกอบของแต่ละเฟสของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์พบว่า การใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์พิเศษที่มีอินเตอร์สตีเชียลเฟส (Interstitial

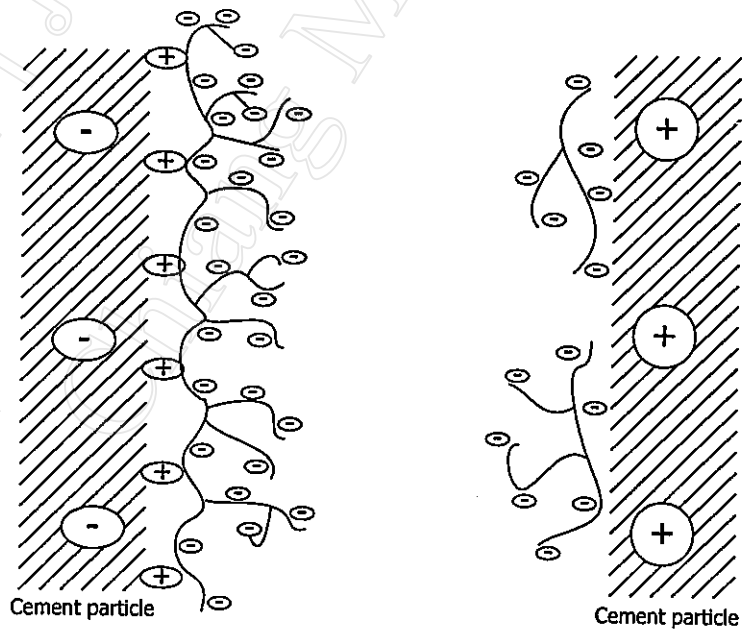
Phase) น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ (C_3A 3.6 เปอร์เซ็นต์และ C_4AF 6.9 เปอร์เซ็นต์) จะสามารถใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำมากๆ ได้ คือสามารถทำคอนกรีตกำลังอัดสูงโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.17 และค่าความยุบตัวเท่ากับ 230 ม.ม. ที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ใช้น้ำน้อยกว่า 100 ลิตร และใช้เนฟทาไลน์ซูปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ 28.6 ลิตร การก่อตัวนั้นก็ไม่ล่าช้า คือมีกำลังรับแรงอัด 720 ก.ก./ซ.ม.² ที่เวลา 24 ชั่วโมง

Jolicoeur et al. (1994) ได้อธิบายลักษณะของการทำปฏิกิริยาของสารลดน้ำอย่างแรงที่ได้กระทำต่อเม็ดซีเมนต์ ไว้ดังนี้

- รูปที่ 2.11 แสดงการดูดซับ โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงบนเม็ดซีเมนต์ซึ่งประจุที่ผิวของซีเมนต์มีประจุเป็นลบ โดยแคลเซียมไอออน (Ca^{++}) บางส่วนที่ละลายมาจากเม็ดซีเมนต์ช่วยเป็นตัวกลางให้ดังแสดงในรูป
- รูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการผลักกันระหว่างอนุภาคซีเมนต์สองอนุภาค โดยแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ โดยที่อนุภาคซีเมนต์อนุภาคหนึ่งมีประจุเป็นบวกและอีกอนุภาคมีประจุเป็นลบ ซึ่งถ้าไม่มีการดูดซับสารลดน้ำอย่างแรงแล้วทั้งสองอนุภาคนี้ก็จะดูดกัน การผลักกันแบบนี้จะเกิดโดยการทำปฏิกิริยาของเนฟทาไลน์ซูปเปอร์พลาสติกไซเซอร์และเมลามีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Uchikawa (1994); Uchikawa et al. (1997))
- รูปที่ 2.13 แสดงกรณีที่เกิดแรงผลักแบบสเตอริก (Steric Repulsion) ระหว่างสองเม็ดซีเมนต์ซึ่งดูดซับ โมเลกุลของซูปเปอร์พลาสติกไซเซอร์สองโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงจะคลุมรอบเม็ดซีเมนต์ทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าหมดไป ซึ่งในโพลีโอไคลด์ซูปเปอร์พลาสติกไซเซอร์จะทำให้เกิดแรงผลักแบบ สเตอริกและแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ร่วมกัน (Uchikawa (1994); Uchikawa et al. (1997))

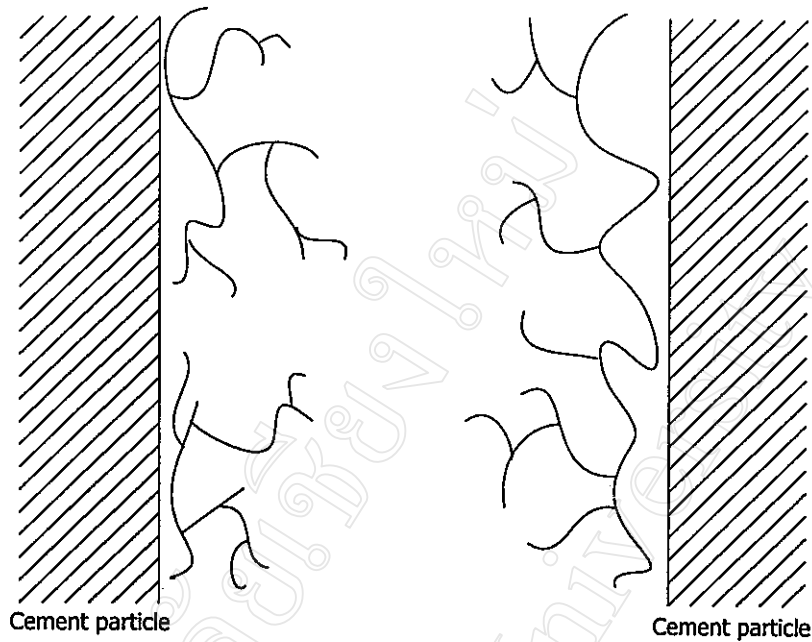


รูปที่ 2.11 แสดงการดูดซับ โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงบนผิวของเม็ดซีเมนต์
ที่มา: Aïtcin (1998)



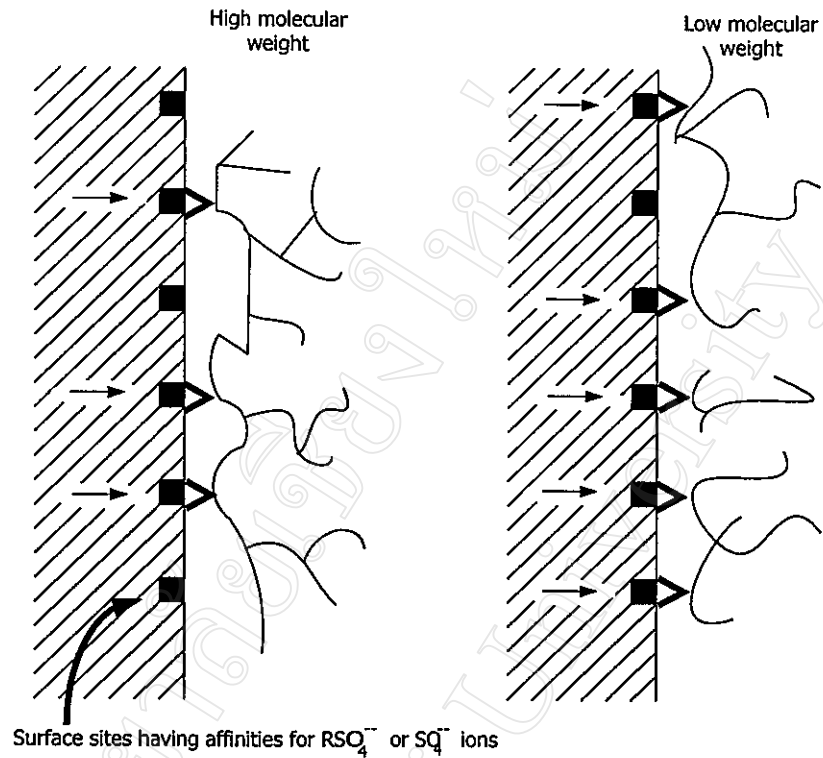
รูปที่ 2.12 แสดงการผลักรันของเม็ดซีเมนต์ โดยที่มีโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงเป็นตัวกลางช่วย
ทำให้เกิดการผลักรัน

ที่มา: Aïtcin (1998)



รูปที่ 2.13 แสดงการผลักรันระหว่างเม็ดซีเมนต์โดยการทำปฏิกิริยาสเตริกจาก โมเลกุล สารลดน้ำอย่างแรง
ที่มา: Aitcin (1998)

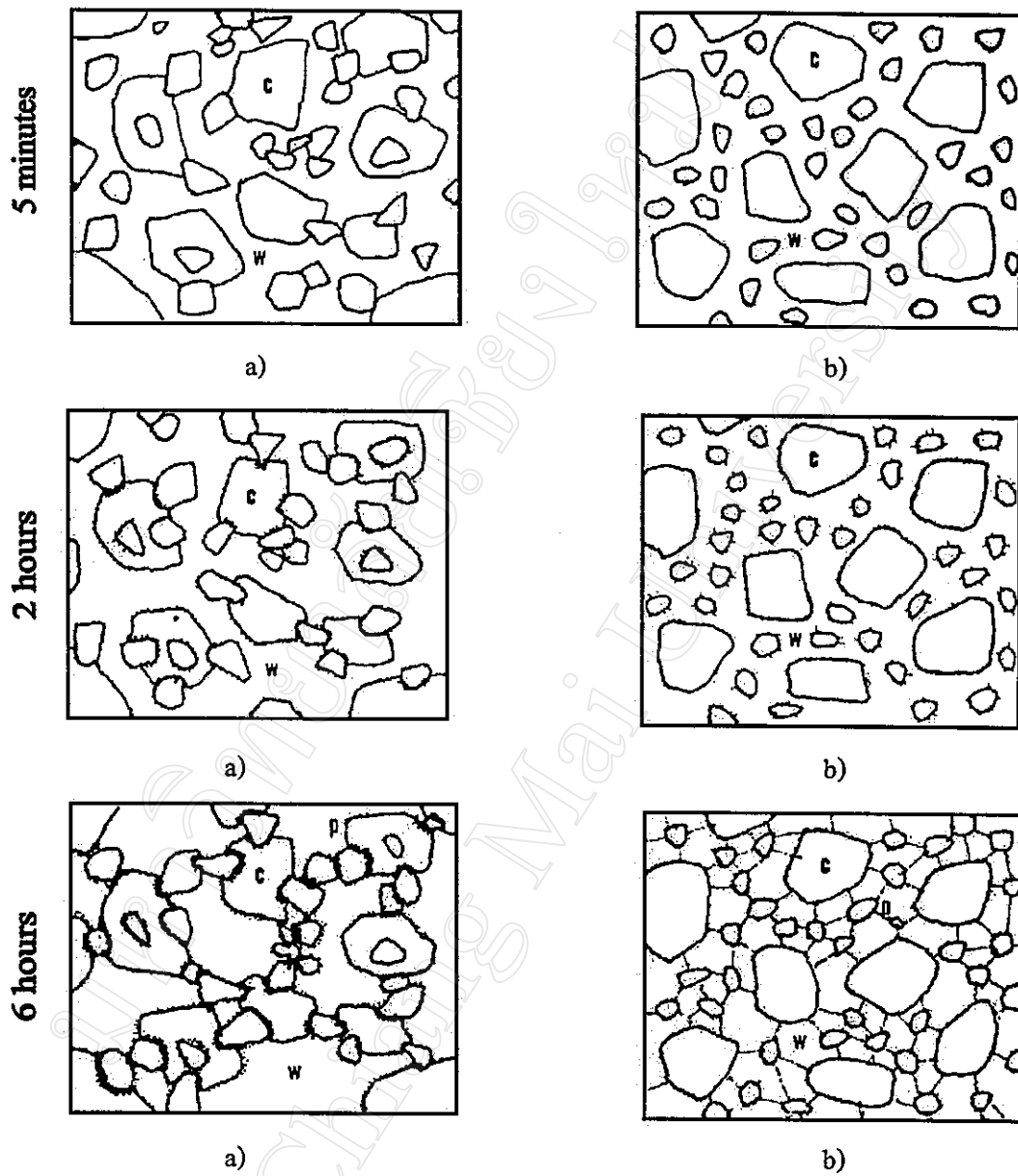
ในการทำปฏิกิริยานั้น โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงนั้นจะไปทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ที่บริเวณจุดที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (Active Site) ซึ่งในบริเวณนี้เป็นจุดที่ไอออนของ RSO_4^- และ SO_4^{2-} จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์เช่นกัน ดังในรูปที่ 2.14 นั้น ได้แสดงการเข้าทำปฏิกิริยาของโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน และในกรณีที่สารลดน้ำอย่างแรงสามารถเอาชนะซัลเฟตไอออนในการเข้าทำที่บริเวณจุดที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาได้ จะทำให้สารลดน้ำอย่างแรงไม่สามารถกระจายเม็ดซีเมนต์ได้เพราะสารลดน้ำอย่างแรงจะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่บริเวณจุดที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา แทนที่จะไปเกาะอยู่ที่เม็ดซีเมนต์เพื่อให้เกิดแรงผลักรันทางไฟฟ้าสถิตย์ และซัลเฟตไอออนไม่สามารถจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนตเพื่อให้เกิดเอทตรงใจท์ ซึ่งเอทตรงใจท์นี้เป็นตัวชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เป็นผลให้ซีเมนต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.14 แสดงการเข้าทำปฏิกิริยาของ โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน บนเม็ดซีเมนต์

ที่มา: Aitcin (1998)

จากรูปแบบการทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ในรูปแบบต่างๆ ทำให้เม็ดซีเมนต์กระจายตัวออกจากกันไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อน ดังในรูปภาพที่ 2.15 นั้นแสดงถึงกระจายตัวของเม็ดซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยมีและไม่มีสารลดน้ำอย่างแรง ที่เวลาต่างๆ โดยผลจากสารลดน้ำอย่างแรงทำให้น้ำเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และซีเมนต์เพสต์ลดความหนืดลงเพราะเม็ดซีเมนต์ไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการกระจายของเม็ดซีเมนต์ที่เวลาต่างกัน โดยในรูป a) ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมสารลดน้ำอย่างแรง b) ซีเมนต์เพสต์ที่เติมสารลดน้ำอย่างแรง

ที่มา: Malier (1992)

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลของสารลดน้ำอย่างแรง 3 ยี่ห้อ

รายการ	ยี่ห้อสารลดน้ำอย่างแรง		
	Sikament FF	Daracem 100	Rheobuild 1000
ถ.พ.	1.19-1.21	1.19-1.20	1.18-1.22
pH	9-10	6-8	7.5-9.5
Polymer Type	naphthalenesulfonate	naphthalenesulfonate	naphthalenesulfonate
Superplasticizer Type	F	F	F
ปริมาณของแข็ง, %	36.56	39.25	36.25