

## บทที่ 2 สารเคมีผสมเพิ่ม

### 2.1 ทัวไป

สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีตหมายถึง สารเคมีที่ใช้เติมลงในส่วนผสมคอนกรีตก่อนผสมหรือขณะผสม เพื่อวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่งตามต้องการ ตามมาตรฐาน มอก.733-2530 หรือ ASTM C494 (Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete) ได้แบ่งประเภทตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานต่าง ๆ เป็น 7 ประเภทด้วยกันคือ

1. ชนิด A สารลดน้ำ (Water - Reducing Admixture)
2. ชนิด B สารหน่วงการก่อตัว (Retarding Admixture)
3. ชนิด C สารเร่งการก่อตัว (Accelerating Admixture)
4. ชนิด D สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water - Reducing Admixture and Retarding Admixture)
5. ชนิด E สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว (Water – Reducing and Accelerating Admixture)
6. ชนิด F สารลดน้ำอย่างมาก (Water – Reducing Admixture, High Range)
7. ชนิด G สารลดน้ำอย่างมากและหน่วงการก่อตัว (Water – Reducing, High Range and Retarding Admixture)

สำหรับคุณลักษณะใช้งานของสารผสมเพิ่มนั้นต้องเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.733-2530 หรือ ASTM C494 ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และคุณลักษณะทางฟิสิกส์แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

### 2.2 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำ

ในการผสมคอนกรีต น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ น้ำถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการคือ ทางกายภาพ คือ ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในสภาวะเหลว และทางเคมี คือเพียงพอที่จะทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ เมื่ออนุภาคซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นทันที และอนุภาคซีเมนต์มีแนวโน้มที่จะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (รูปที่ 2.1ก. และ 2.1ข.) ส่งผลให้ปริมาณน้ำส่วนหนึ่งถูกกักอยู่ในอนุภาคซีเมนต์ และพื้นที่ผิวประมาณ 12 – 20% ของอนุภาคซีเมนต์ที่ติดกันกับอนุภาคข้าง ๆ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำ

เมื่อสารลดน้ำถูกเติมไปในคอนกรีต อนุภาคซีเมนต์จะกระจายตัวในเฟสของเหลวของคอนกรีตและไม่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของซีเมนต์กับน้ำ (รูปที่ 2.1ค.) ซึ่งส่งผลให้

1. ปริมาณน้ำอิสระซึ่งโดยปกติถูกกักอยู่รอบ ๆ อนุภาคซีเมนต์ถูกปล่อยออกมา ดังนั้นจึงเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลของคอนกรีต
2. พื้นที่ผิวของอนุภาคซีเมนต์ที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มต้นเพิ่มขึ้น

## 2.2.1 กลไกการทำงานของสารลดน้ำ

สารลดน้ำที่มีใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แต่สารลดน้ำที่ใช้อย่างแพร่หลายคือ สารลดน้ำที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulfonate) (โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำชนิดลิกโนซัลโฟเนตแสดงในรูปที่ 2.2)

สำหรับกลไกการทำงานของสารลดน้ำนั้น Dodson<sup>[9]</sup> สรุปได้เป็น 2 ทฤษฎีหลัก ๆ คือ

1. เมื่อสารลดน้ำดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์ จะทำให้อนุภาคซีเมนต์เกิดประจุที่เหมือนกันขึ้น ซึ่งประจุนี้นำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้า เป็นผลให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัว
2. เมื่อสารลดน้ำดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์ สารลดน้ำจะทำหน้าที่เสมือนฟิล์มบางเคลือบที่ผิวอนุภาคซีเมนต์ ฟิล์มบางนี้จะทำหน้าที่ป้องกันอนุภาคซีเมนต์ที่จะดูดติดกับอนุภาคซีเมนต์อื่น ๆ

เมื่อสารลดน้ำดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์ พบว่า ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง ซึ่งส่งผลให้หน่วงเวลาการก่อตัวและการพัฒนากำลังอัดเริ่มต้นของคอนกรีต สำหรับสาเหตุที่สารลดน้ำทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลงนั้น Yuasuf et al.<sup>(23)</sup> ได้ศึกษาและอธิบายถึงกลไกการทำงานของสารลดน้ำชนิดโซเดียม ลิกโนซัลโฟเนต (Sodium Lignosulfonate) ดังนี้ สารลดน้ำทำให้การเกิดของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ลดลง ซึ่งอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง 3 ชั้น (Tri-Layer Model) ดังนี้ เริ่มแรกจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วระหว่างอนุภาคซีเมนต์กับน้ำ จึงเกิดฟิล์มบางของแคลเซียมซัลไฟด์ไฮเดรต (CSH) ขึ้นบนอนุภาคซีเมนต์ ฟิล์มบางนี้จะยอมให้น้ำผ่านเข้าไปข้างในและยอมให้  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{OH}^-$  จากภายในไหลออกมาได้ จึงเป็นผลให้  $\text{Ca}^{2+}$  ไหลออกมาเกาะโดยรอบ ๆ และกรณีที่มีสารลดน้ำชนิดนี้ ประจุลบของสารลดน้ำจะมาเกาะติดที่  $\text{Ca}^{2+}$  เกิดเป็นชั้น 3 ชั้น และเป็นเหตุให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง ซึ่งข้อกำหนดตามมาตรฐาน มอก.733-2530 หรือ ASTM C494 กำหนดให้ สารลดน้ำ (ชนิด A) สามารถหน่วงระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายได้สูงสุด 90 นาที ในขณะที่สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (ชนิด D) สามารถหน่วงระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายได้สูงสุด 210 นาที

เพื่อที่จะชดเชยผลของการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นสารลดน้ำจึงอาจมีส่วนผสมของสารเร่งการก่อตัวเพื่อชดเชยกับผลของการหน่วงเวลาการก่อตัว โดยส่วนผสมที่ใช้เพื่อเร่งการก่อตัวอาจจะเป็น คลอไรด์ , ไนเตรท หรือ ไนไตรท์ เป็นต้น

## 2.2.2 ผลของแคลเซียมซัลเฟตต่อประสิทธิภาพของสารลดน้ำ

แคลเซียมซัลเฟตเป็นวัสดุที่ถูกเติมในกระบวนการบดเม็ดซีเมนต์ เพื่อควบคุมปฏิกิริยาไฮเดรชันของเฟสอะลูมินา แคลเซียมซัลเฟตถูกเติมลงไปในรูปแบบของยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) หรือ ส่วนผสมระหว่างยิปซัมและแอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) แม้ว่าทั้งยิปซัมและแอนไฮไดรต์จะมีส่วนประกอบที่คล้ายกัน และต่างกันที่ปริมาณน้ำในโครงสร้างเท่านั้น แต่ทั้งยิปซัมและแอนไฮไดรต์มีอัตราการละลายในเฟสของเหลวระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของสารลดน้ำ

พิจารณารูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของแอนไฮไดรต์จะแสดงถึงคุณสมบัติการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจาก ความสามารถในการละลายของแอนไฮไดรต์ต่ำ (รูปที่ 2.2ค.) เป็นผลให้สารลดน้ำส่วนใหญ่ดูดติดบนผิวของแอนไฮไดรต์ ส่งผลให้เฟสอะลูมินาเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับน้ำ ทำให้ซีเมนต์แข็งตัวอย่างรวดเร็ว

### 2.2.3 ผลของเฟสอัลคาไลน์และอะลูมินในซีเมนต์ต่อประสิทธิภาพของสารลดน้ำ

ปริมาณอัลคาไลน์และอะลูมินในซีเมนต์จะมีผลต่อการลดน้ำของสารลดน้ำ ผลการลดน้ำเนื่องจากสารลดน้ำจะเห็นผลชัดเจน ในกรณีที่มีปริมาณอัลคาไลน์หรือไตรแคลเซียมอะลูมิน (C<sub>3</sub>A) ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.4ก. ถึง 2.4ค. โดยที่สารลดน้ำที่ใช้คือผลรวมของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต (Calcium Lignosulfonate) และไตรเอตตะโนลามีน (Triethanolamine) ที่ปริมาณ 0.18% ต่อน้ำหนักซีเมนต์ จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ชัดเจนว่า C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF จะเป็นตัวดูดซับที่รุนแรงของสารลดน้ำในกรณีไม่มีประจุซัลเฟตเพียงพอที่จะป้องกันผิวของมันเป็นกับเฮตตรังโกท์ Dodson<sup>[9]</sup> เสนอว่า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดของสารลดน้ำ อัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ C<sub>3</sub>A ต่อซัลเฟต (SO<sub>3</sub>) ควรจะน้อยกว่า 2.5 และถ้าจะให้ดีควรจะประมาณ 2.0

### 2.2.4 ผลของการหน่วงระยะเวลาการเติมสารลดน้ำ

จากผลการศึกษาของ Dodson<sup>[9]</sup> พบว่า เฟสอะลูมินทั้งในกรณีมีหรือไม่มีแคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวดูดซับอย่างแรงของสารลดน้ำ โดยที่การดูดซับของเฟสซิลิเกตนั้นสามารถดัดตั้งได้เนื่องจากต่ำมาก จากผลข้างต้นนี้เอง ทำให้ การหน่วงระยะเวลาการเติมของสารลดน้ำมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

เมื่อสารลดน้ำถูกเติมในคอนกรีตหลังจากที่ส่วนผสมทั้งหมดของคอนกรีตได้ผสมเข้าด้วยกันแล้ว (การหน่วงระยะเวลาการเติมสารลดน้ำ) จะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยเปรียบเทียบกับกับคอนกรีตเดียวกันที่สารลดน้ำถูกเติมไปกับน้ำที่ใช้ผสม โดยจะพบว่าค่าการยุบตัว ,ปริมาณอากาศที่ถูกกัก และเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า

1. เมื่อสารกระจายตัวถูกเติมกับน้ำที่ใช้ผสม ปริมาณส่วนใหญ่ของสารกระจายตัวจะถูกดูดซึมโดยเฟสอะลูมินก่อนที่จะผลิตผลจากปฏิกิริยากับแคลเซียมซัลเฟตจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ และมีเพียงเล็กน้อยที่ถูกดูดโดยเฟสของซิลิเกต
2. หลังจากช่วงสั้น ๆ ของการผสม สารประกอบของแคลเซียมอะลูมินโนซัลเฟตจะเริ่มเกิดขึ้น และสารประกอบนี้มีแนวโน้มจะดูดซึมสารกระจายตัวน้อยเมื่อการเติมสารกระจายตัวถูกหน่วงให้ช้าลง ผลนี้เองจึงทำให้มีสารกระจายตัวที่อิสระมากขึ้นที่จะกักฟองอากาศหรือถูกดูดซึมโดยสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
3. เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>S คือตัวการหลัก ๆ ของเวลาการก่อตัว การแทรกแซงต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันปกติของมันโดยสารกระจายตัวที่ไปถูกดูดซึมที่ผิวก่อให้เกิดการหน่วงเวลาการก่อตัว

อย่างไรก็ตาม สารลดน้ำโดยปกติแล้วจะไม่สามารถใช้ปริมาณมากได้ ซึ่งโดยปกติจะไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนักซีเมนต์ เนื่องจากอาจจะก่อให้เกิดปัญหาการไม่ก่อตัวของคอนกรีต และการใช้ปริมาณมากยังมีส่วนทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ด้วย ทำให้ไม่สามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้สูงได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเป็นสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งสามารถใช้ในปริมาณที่สูงได้

### 2.3 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างมาก

สารลดน้ำอย่างมาก (High Range Water-reducing Admixture, HRWRA) เป็นสารลดน้ำชนิดใหม่ซึ่งบ่อยครั้งจะถูกเรียกว่าสารลดน้ำพิเศษหรือรู้จักกันในชื่อ "Superplasticizers" สารลดน้ำอย่างมากสามารถลดน้ำในคอนกรีตได้มากกว่าสารลดน้ำธรรมดาอย่างมาก โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการหน่วงระยะเวลาการก่อตัวและปริมาณฟองอากาศที่มากเกินไป

มาตรฐาน ASTM C494 ได้กำหนดคุณสมบัติความต้องการของสารลดน้ำอย่างมากไว้คือ สำหรับ สารเคมีผสมเพิ่มชนิด F จะต้องสามารถลดน้ำได้ต่ำสุด 12% (ชนิด A สามารถลดน้ำต่ำสุดเพียง 5%) และสามารถเพิ่มกำลังอัดต่ำสุดที่อายุ 1 วันได้ 140% เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ซึ่งสาเหตุที่สามารถลดน้ำได้มากนั้นเป็นเพราะอัตราการเติมที่สูงกว่าสารลดน้ำธรรมดา ความต้องการใช้สารลดน้ำอย่างมากเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากสารลดน้ำอย่างมากส่งผลที่เป็นประโยชน์ในแง่ของราคาในการก่อสร้าง สารลดน้ำอย่างมากสามารถเพิ่มค่ายุบตัวซึ่งช่วยให้ทำงานง่ายโดยปราศจากการเพิ่มน้ำ และผู้รับเหมาสามารถเทเข้าแบบได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานมาก และที่สำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ สำหรับแบบหล่อที่ประกอบด้วยเหล็กเสริมที่หนาแน่นจะจำเป็นต้องใช้สารลดน้ำอย่างมากทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหาคอนกรีตเป็นโพรงแน่นอนผู้รับเหมาสามารถทำคอนกรีตให้ไหลได้โดยใช้น้ำมากขึ้น แต่ผลที่ตามมาก็คือคุณภาพของคอนกรีต อันได้แก่ การแยกตัว ,การเยิ้มที่มากเกินไป ,การสูญเสียการกักฟองอากาศ (ถ้าการกักฟองอากาศเป็นสิ่งจำเป็น) และการลดลงของกำลังอัด

สารลดน้ำอย่างมากมีสารประกอบอินทรีย์พื้นฐานอยู่ 2 ชนิดคือ

1. เกลือของซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (Sulfonated melamine – formaldehyde condensates ,HR-M)
2. เกลือของซัลโฟเนตแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (Sulfonated naphthalene – formaldehyde condensates .HR-N)

โดยที่โครงสร้างทางเคมีของทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์นี้ แสดงในรูปที่ 2.5ก. และ 2.5ข. ตามลำดับ

สำหรับกลไกการทำงานของสารลดน้ำอย่างมากทั้งชนิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทและแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท จะคล้ายกับสารลดน้ำธรรมดา โดยจะกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 3

## 2.4 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารเร่งการก่อตัว

สารเร่งการก่อตัว คือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติคือ เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ลดระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ และเพิ่มอัตราการพัฒนากำลังระยะต้นของซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C494 กำหนดว่าสารเคมีผสมเพิ่มที่เป็นสารเร่งการก่อตัวคือ สารเคมีผสมเพิ่มชนิด C ซึ่งเป็นสารเร่งการก่อตัว และชนิด E ซึ่งเป็นสารลดน้ำและเร่งการก่อตัว

สารเร่งการก่อตัวมีหลายชนิด ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) , แคลเซียมฟอर्मेट ( $\text{Ca}(\text{CHO}_2)_2$ ) , แคลเซียมไนเตรท ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) และไตรเอทอะโนลามีน (Triethanolamine) เป็นต้น สารเร่งการก่อตัวที่จะกล่าวถึงคือ แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์จะมีผลต่อการเร่งการก่อตัวในซีเมนต์แต่ละชนิดที่แตกต่างกัน คือ ในกรณีที่ไม่มียิปซัม พบว่าแคลเซียมคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตเกิดเป็นแคลเซียมคลอโรอะลูมิเนต แต่ในกรณีที่มียิปซัม พบว่า อัตราการเกิดของแคลเซียมคลอโรอะลูมิเนตจะช้ามาก จนพิจารณาได้ว่า ไม่มีผลต่อการลดลงของระยะเวลาการก่อตัวและพัฒนากำลังระยะต้น Dodson<sup>[9]</sup> สรุปว่า ถ้าซีเมนต์มีส่วนผสมของแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซัม) ในปริมาณน้อย ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตบางส่วนจะรวมตัวกันกับแคลเซียมคลอไรด์ และส่งผลให้ปฏิกิริยาโดยตรงของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตกับน้ำเกิดช้า และไม่ส่งผลให้เร่งระยะเวลาการก่อตัว

Dodson<sup>[9]</sup> พิจารณากลไกการทำงานของแคลเซียมคลอไรด์กับไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) เพียงอย่างเดียว แล้วสรุปว่า จากการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในน้ำของส่วนผสมไตรแคลเซียมซิลิเกต , น้ำและแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าปริมาณคลอไรด์ค่อนข้างคงที่ที่ระยะเวลาการผสมต่าง ๆ และมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับปริมาณที่สมมติว่าแคลเซียมคลอไรด์ไม่เกิดปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมซิลิเกต แสดงว่าแคลเซียมคลอไรด์ไม่ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมซิลิเกต และเมื่อพิจารณารูปที่ 2.6ข. จะพบว่า การสลายตัวของไตรแคลเซียมซิลิเกตจะรวดเร็วขึ้นเมื่อมีแคลเซียมคลอไรด์ สำหรับผลของความร้อนจากปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่าง ๆ (ดังแสดงในรูปที่ 2.6ก.) สรุปได้ว่า การเติมแคลเซียมคลอไรด์จะช่วยลดช่วงเวลาพักตัว (Dormant Period) และทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาสูงขึ้นในช่วงแรก อย่างไรก็ตาม พบว่า ทั้งกรณีมีและไม่มีแคลเซียมคลอไรด์ จะมีพื้นที่ใต้เส้นโค้งเวลาและอุณหภูมิทั้งหมดเท่ากัน ดังนั้น จึงสรุปผลของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ว่า

1. แคลเซียมคลอไรด์ไม่ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมซิลิเกต จะมีผลเพียงแต่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตเกิดเร็วขึ้น ผลที่ตามมาคือ การเร่งระยะเวลาการก่อตัว และการพัฒนากำลังระยะต้นสูงขึ้น
2. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตไม่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคลอไรด์ เว้นแต่ ซีเมนต์มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟตไม่เพียงพอต่อความต้องการของเฟสอะลูมิเนต

สำหรับข้อควรระวังของการใช้สารเร่งการก่อตัวประเภทแคลเซียมคลอไรด์คือ ปัญหาการเป็นสนิมของเหล็กเสริม เพราะคลอไรด์จะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าวได้

## 2.5 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารหน่วงการก่อตัว

สารหน่วงการก่อตัวถูกนิยามว่า คือสารที่ลดระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟสท์ ซึ่งส่งผลต่อการแข็งตัวของมอร์ตาร์และคอนกรีต ผลที่ตามมาของการลดระยะเวลาการแข็งตัวคือ ลดการพัฒนากำลังระยะต้นแต่เพิ่มกำลังรับแรงระยะปลายของเฟสท์มอร์ตาร์ หรือคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C494 กำหนดว่าสารเคมีผสมเพิ่มที่เป็นสารหน่วงการก่อตัวมี 3 ชนิดคือ สารเคมีผสมเพิ่มชนิด B ซึ่งเป็นสารหน่วงการก่อตัว ชนิด D ซึ่งเป็นสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว และชนิด G ซึ่งเป็นสารลดน้ำอย่างมากและหน่วงการก่อตัว

สำหรับสารหน่วงการก่อตัว ที่มีใช้ในปัจจุบันได้แก่ โซเดียมเมตาบอเรต (Sodium metaborate,  $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4$ ) โซเดียมเตตราบอเรต (Sodium tetraborate,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) สแตนเนสซัลเฟต (Stannous sulfate,  $\text{SnSO}_4$ ) เลทอะซีเตต (Lead acetate,  $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_4)_2$ ) และ โมโนเบสิกแคลเซียมฟอสเฟต (Monobasic calcium phosphate,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) เป็นต้น สารหน่วงการก่อตัว มีประสิทธิภาพในการหน่วงระยะเวลาการก่อตัวที่ดี แต่บางครั้งพบว่า ไม่สามารถทำนายการหน่วงเวลาการก่อตัวได้ สารหน่วงการก่อตัวส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้ในปริมาณที่สูงกว่า 0.05% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และไม่ช่วยกระจายอนุภาคซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ สารหน่วงการก่อตัวที่นิยมใช้ในปัจจุบันจึงเป็นสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว ส่วนประกอบที่สำคัญของสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัวคือสารอินทรีย์ โดยจะเหมือนกับสารลดน้ำธรรมดา (ดังตารางที่ 2.4) แต่จะต่างกันตรงที่สารหน่วงการก่อตัวไม่มีการเติมสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยา สำหรับกลไกการทำงานต่าง ๆ ของสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัวจะเหมือนกับสารลดน้ำธรรมดา

### 2.5.1 ผลของการหน่วงการก่อตัวต่อกำลังอัด

การหน่วงระยะเวลาการก่อตัวของเฟสท์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีต จะมีผลทำให้กำลังอัดระยะต้นต่ำกว่าปกติเล็กน้อย แต่กำลังอัดระยะปลายจะสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทั้งนี้เป็นเพราะปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดช้าลง ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดระยะต้นจึงช้าเนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Hydration product) เกิดช้า ในขณะที่เดียวกัน การเกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Hydration product) ช้า จะทำให้ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันในส่วนของเฟสท์มีโอกาสจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น และส่งผลให้กำลังอัดระยะปลายสูงขึ้นได้

## 2.6 สรุป

จากผลการศึกษาสารเคมีผสมเพิ่ม สรุปได้ดังนี้

1. สารลดน้ำมีคุณสมบัติช่วยให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัว โดยสารลดน้ำจะดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์และทำให้อนุภาคซีเมนต์เกิดประจุที่เหมือนกัน และผลึกซึ่งกันและกัน เป็นผลให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัว อย่างไรก็ตาม สารลดน้ำไม่สามารถใช้ในปริมาณที่สูงกว่า 0.5% โดยน้ำหนักซีเมนต์ได้ เพราะจะมีก่อให้เกิดปัญหาด้านการก่อตัว และปัญหาฟองอากาศขนาดใหญ่
2. สารลดน้ำอย่างมากมีคุณสมบัติช่วยให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัว โดยสารลดน้ำอย่างมากจะทำหน้าที่เช่นเดียวกับสารลดน้ำธรรมดา แต่ต่างกันที่สารลดน้ำอย่างมากสามารถใช้ในปริมาณที่สูงได้ โดยที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านการก่อตัว

3. สารเร่งการก่อตัว จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยจะไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบของซีเมนต์ เว้นแต่ว่า ซีเมนต์มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟตที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเฟสอะลูมิเนต
4. สารเคมีผสมเพิ่มที่มีผลต่อการกระจายตัวของซีเมนต์คือ สารลดน้ำและสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งผลการกระจายตัวต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 4

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณลักษณะใช้งานของสารเคมีผสมเพิ่มตามมาตรฐาน มอก.733-2530<sup>[21]</sup>

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด							
		สารลดน้ำ	สารหน่วง การก่อหิว	สารเร่ง การก่อหิว	สารลดน้ำและ หน่วงการก่อหิว	สารลดน้ำและ เร่งการก่อหิว	สารลดน้ำ พิเศษ	สารลดน้ำพิเศษ และหน่วงการก่อหิว	
1	น้ำ ร้อยละของปริมาณน้ำที่ผสม คอนกรีตควบคุม* ไม่เกิน	95			95	95	98	88	
2	ระยะเวลาการก่อหิว เทียบกับ คอนกรีตควบคุม ที่วาง: นาที การก่อหิวระดับ อย่างน้อย แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 1:00 ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 1:00 เร็วขึ้น 3:30	ช้าลง 1:00 ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 1:00 เร็วขึ้น 3:30	- เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 1:00 ช้าลง 3:30	
		การก่อหิวระยะเวลา อย่างน้อย แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 1:00 -	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 1:00 -	- เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	- ช้าลง 3:30
3	ความต้านแรงอัด ร้อยละของ คอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า เมื่ออายุ 1 วัน	-	-	-	-	-	140	125	
		3 วัน	110	90	125	110	125	125	
		7 วัน	110	90	100	110	110	115	115
		28 วัน	110	90	100	110	110	110	110
4	ความต้านแรงอัด ร้อยละของ คอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า เมื่ออายุ 3 วัน	100	90	110	100	110	110	110	
		7 วัน	100	90	100	100	100	100	100
		28 วัน	100	90	90	100	100	100	100

หมายเหตุ \* หมายถึง คอนกรีตที่ไม่ได้สารผสมเพิ่ม

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะทางฟิสิกส์เมื่อทดสอบแล้วของสารเคมีผสมเพิ่ม<sup>[21]</sup>

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
1	สิ่งที่เหลือจากการอบ ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	- ชนิดเหลว	$X_1 \pm$ ร้อยละ 5
	- ชนิดผง	$X_2 \pm$ ร้อยละ 4
2	ความหนาแน่นสัมพัทธ์	$X_3 \pm 0.01$
3	คลอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก	$X_4 \pm$ ร้อยละ 5

- หมายเหตุ 1.  $X_1$   $X_2$  และ  $X_3$  หมายถึง ตัวเลขที่ผู้หาค่ากำหนด และต้อง  
แจ้งต่อสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
2.  $X_4$  หมายถึง ตัวเลขที่ผู้หาค่ากำหนด แต่ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ  
0.2 โดยน้ำหนัก
3. ในกรณีที่มีการส่งมอบสารผสมเพิ่มเกินกว่า 1 ครั้ง ให้ใช้วิธี  
การทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบหิวอย่าง ที่ส่งมาครั้งแรก



ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดของสารลดน้ำและอัตราการเติมของสารลดน้ำ<sup>[9]</sup>

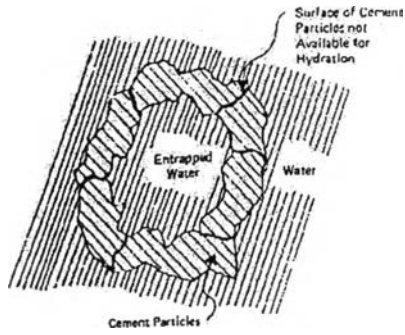
DISPERSANT NAME	ADDITION RATE <sup>a</sup>	SECOND INCREMENT	
		NAME	ADDITION RATE <sup>a</sup>
Alkali metal or alkaline earth salts of lignosulfonic acid	0.15	Triethanolamine	0.01
		Calcium chloride	0.30
Carbohydrates, such as glucose and corn syrup	0.04	Triethanolamine	0.01
		Calcium chloride	0.30
Alkali metal or alkaline earth salts of hydroxylated carboxylic acids (such as gluconic or heptogluconic acid)	0.06	Triethanolamine	0.01
		Calcium chloride	0.30

<sup>a</sup>% solids on weight of cement.

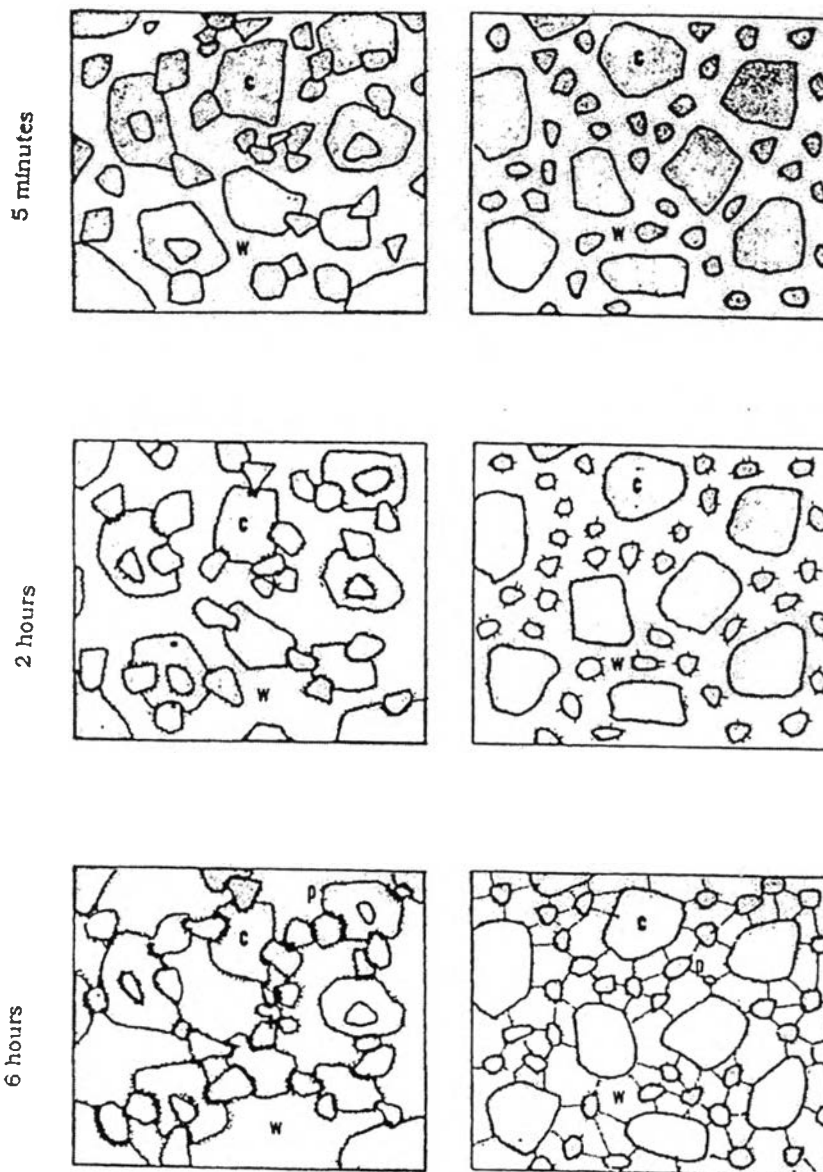
ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการเติมที่ใช้งานของสารหน่วงการก่อตัวชนิด A และ D<sup>[9]</sup>

RETARDING-DISPERSING COMPONENT	ADDITION RATE—% <sup>a</sup>	
	TYPE A	TYPE D
Salts of lignosulfonic acid	0.16	0.22
Salts of hydroxylated carboxylic acids	0.04	0.06
Glucose polymers	0.04	0.06

<sup>a</sup>% Solids on weight of cement.



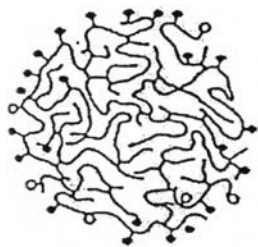
(ก.) แสดงอนุภาคซีเมนต์เมื่อสัมผัสน้ำ<sup>[9]</sup>



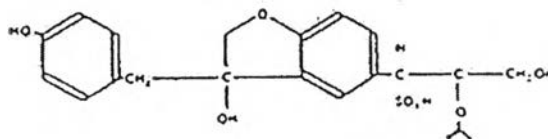
(ข.) ซีเมนต์และน้ำ

(ค.) ซีเมนต์, น้ำ และสารลดน้ำ

รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายตัวของซีเมนต์เฟสด้วยสารลดน้ำ<sup>[22]</sup>

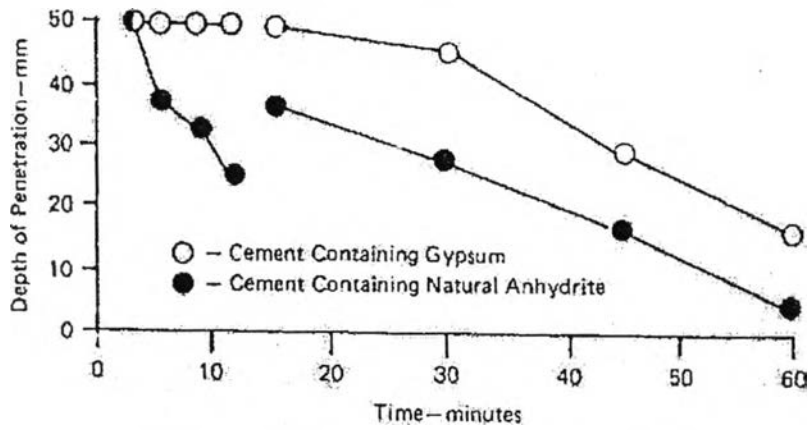


Molecule of  
lignosulfonate

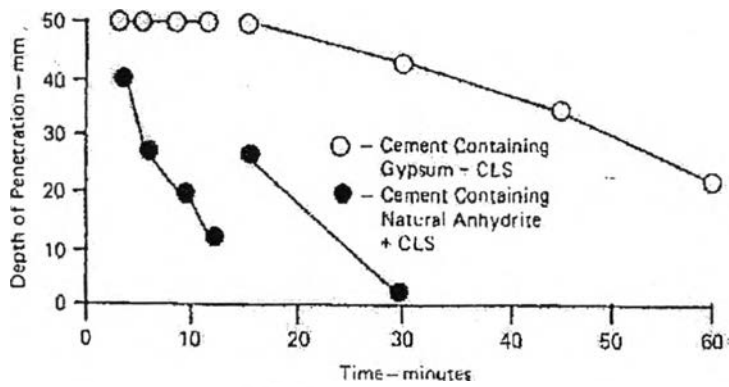


- COOH Group
- SO<sub>3</sub>H Group
- ⌘ R-O-R Linkages

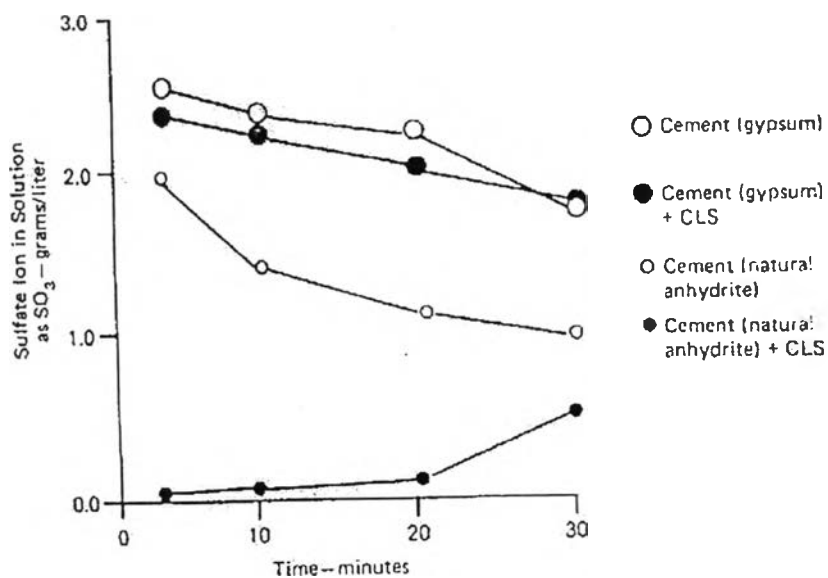
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำ<sup>[22]</sup>



(ก.) การแข็งตัวของซีเมนต์โดยซีเมนต์มีส่วนผสมของยิปซัมหรือแอนไฮไดรท์<sup>[9]</sup>

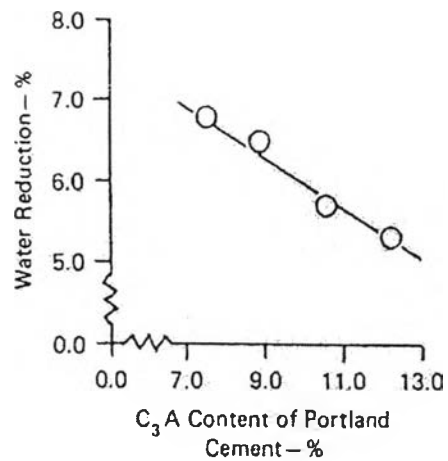


(ข.) การแข็งตัวของซีเมนต์ที่มีสารลดน้ำโดยซีเมนต์มีส่วนผสมของยิปซัมหรือแอนไฮไดรท์<sup>[9]</sup>

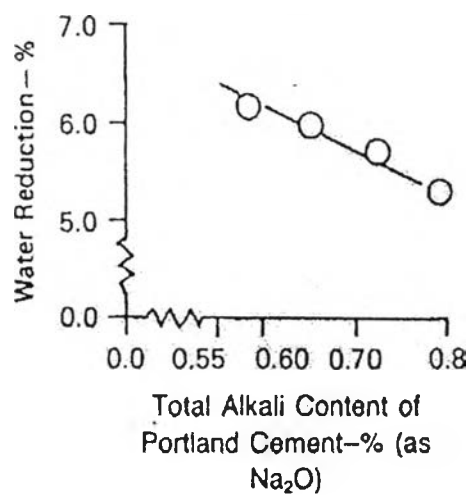


(ค.) การละลายของซัลเฟตของซีเมนต์ที่มียิปซัมหรือแอนไฮไดรท์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ<sup>[9]</sup>

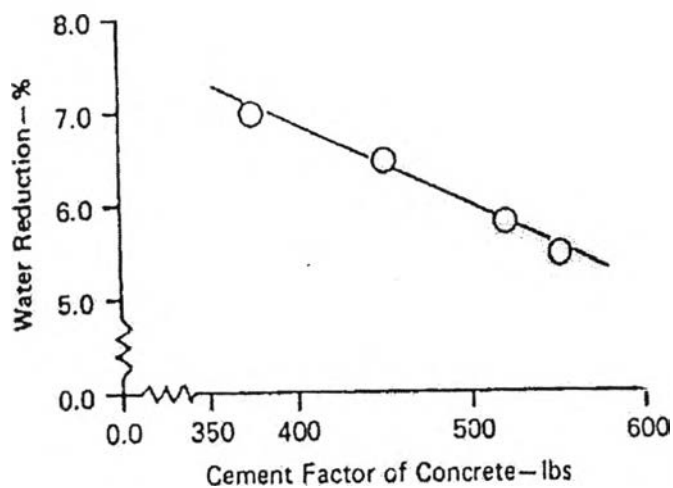
รูปที่ 2.3 ผลของยิปซัมและแอนไฮไดรท์ต่อประสิทธิภาพของสารลดน้ำ



(ก.) ปริมาณ C<sub>3</sub>A และประสิทธิภาพการลดน้ำ

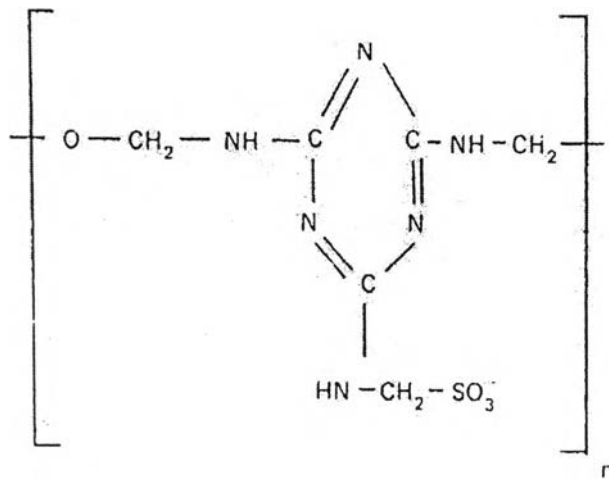


(ข.) ปริมาณอัลคาไลน์และประสิทธิภาพการลดน้ำ

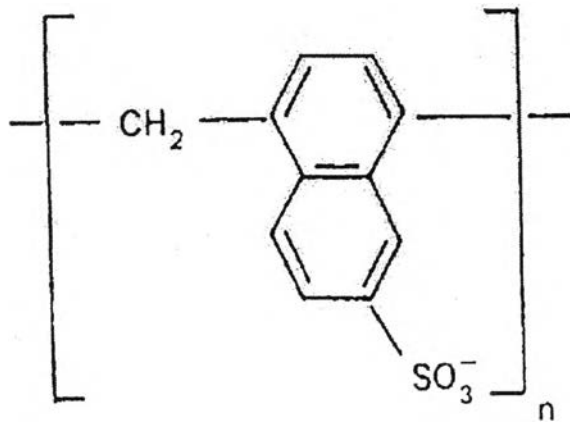


(ค.) ปริมาณซีเมนต์และประสิทธิภาพการลดน้ำ

รูปที่ 2.4 ผลของปริมาณอัลคาไลน์, อะลูมินัม และซีเมนต์ต่อสารลดน้ำ<sup>[9]</sup>

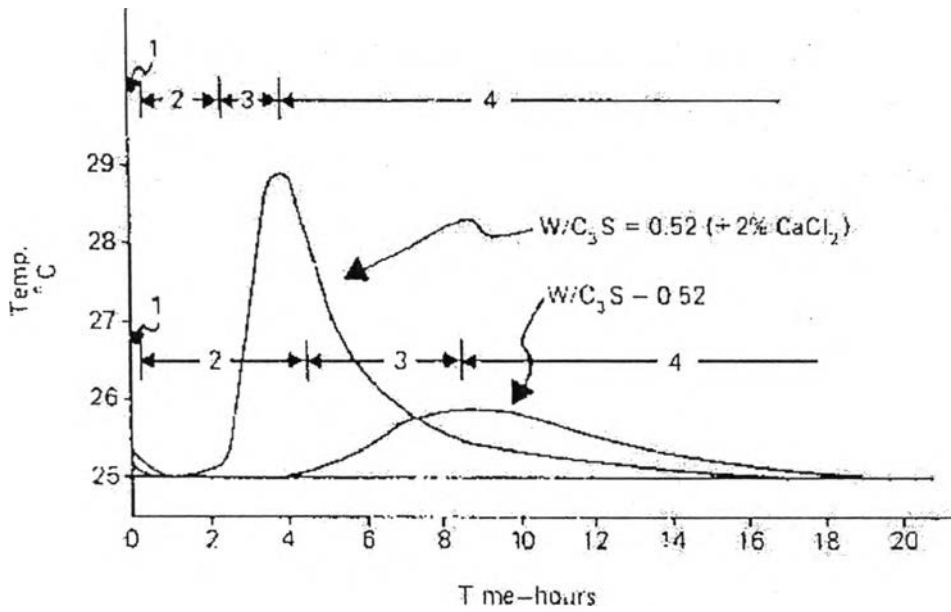


(ก.) โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมาทชนิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท

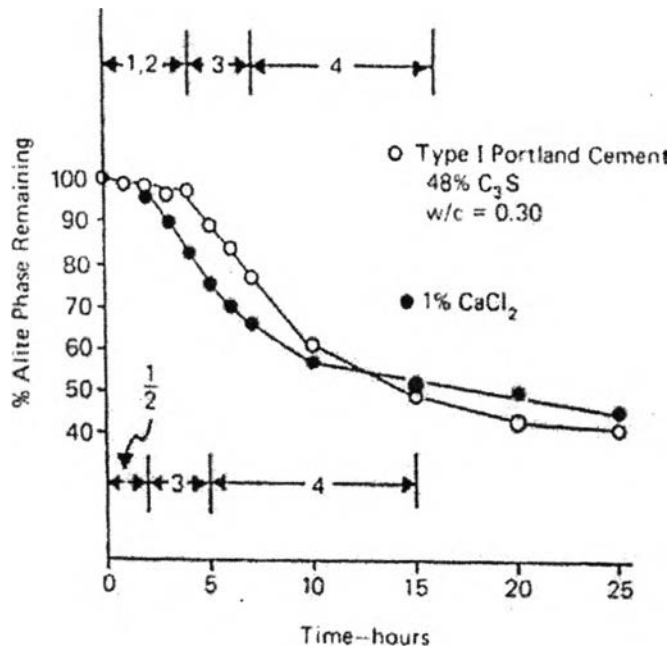


(ข.) โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมาทชนิดแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมาท<sup>[9]</sup>

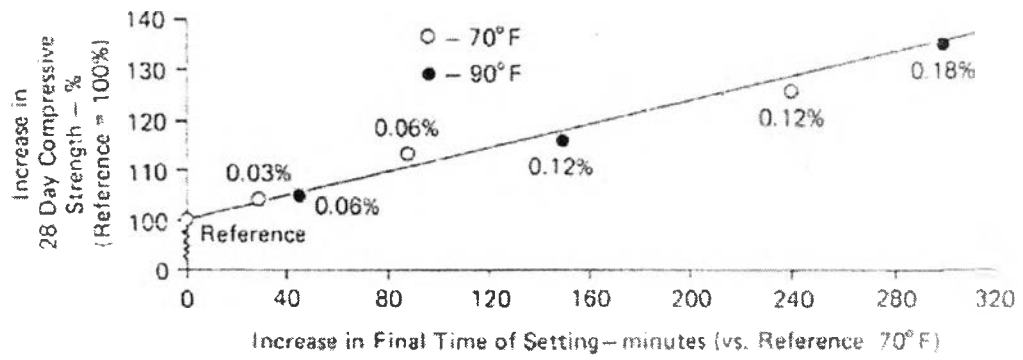


(ก.) แสดงความร้อนของของปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกตและน้ำทั้งที่มีและไม่มีแคลเซียมคลอไรด์<sup>[9]</sup>



(ข.) การสลายตัวของไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อมีแคลเซียมคลอไรด์

รูปที่ 2.6 แสดงผลของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกตและน้ำ<sup>[9]</sup>



รูปที่ 2.7 แสดงผลของระยะเวลาการก่อตัวต่อกำลังรับแรงอัดระยะปลายที่ 28 วัน<sup>[9]</sup>