

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

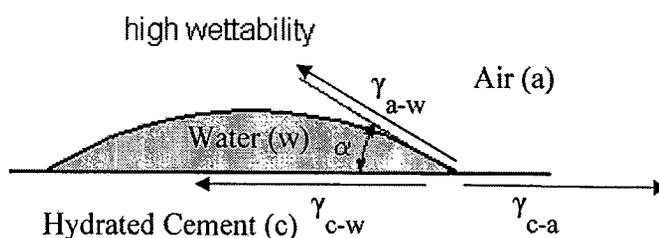
จากอดีตจนถึงปัจจุบันพัฒนาการของอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ทั้งด้านเทคโนโลยี และเครื่องมือที่ใช้ในงานการก่อสร้าง แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาเดิมๆ ที่เกิดขึ้นไม่รู้จักจบสิ้นนั่นก็คือ ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อาทิเช่น ปัญหารอยแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัว ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด-ด่าง ปัญหาเหล็กเสริมเกิดสนิมจากซัลเฟต และคลอไรด์ไอออน เป็นต้น โดยปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้นมักจะถูกมองข้าม ละเลย ในการคำนึงถึงการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาและวิจัยวัสดุเพื่อลดปัญหาดังกล่าว รายละเอียดของเนื้อหาปัญหาต่างๆ จะกล่าวโดยละเอียดดังต่อไปนี้

#### ปัญหาการแตกร้าว

ปัญหาการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมา เช่น เหล็กเสริมเกิดสนิม กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง เนื่องด้วยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ คอนกรีตและเหล็กเสริม ทั้งสองส่วนจะมีความสัมพันธ์กันโดยที่เหล็กเสริมจะถูกห่อหุ้มด้วยคอนกรีต เพื่อที่ป้องกันการเกิดสนิม และเหล็กเสริมจะช่วยลดข้อด้อยในการรับหน่วยแรงดึงให้แก่คอนกรีต หากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว ก็ทำให้สิ่งรบกวนภายนอกทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้เร็วกว่าปกติ โดยที่สาเหตุของปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตเกิดจากการสูญเสียความชื้นจากก้อนคอนกรีตในการทำปฏิกิริยา และการสูญเสียความชื้นภายในสู่สภาพแวดล้อมภายนอก โดยที่น้ำภายในคอนกรีตที่อยู่ในช่องว่างค้ำปิลลารีเกิดการเคลื่อนที่ออกจากช่องว่างค้ำปิลลารีมีผลทำให้เกิดแรงดึงขึ้นภายในช่องว่างค้ำปิลลารี ผล คือ คอนกรีตเกิดการเปลี่ยนแปลงด้านปริมาตร (เกิดการหดตัว) หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในสภาวะที่ถูกยึดรั้งจากโครงสร้างรอบข้าง ก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่หากหน่วยแรงดึงดังกล่าวมีค่ามากกว่าหน่วยแรงดึงที่คอนกรีตจะสามารถรับได้จะปรากฏรอยแตกที่ผิวหน้าของคอนกรีต สามารถอธิบายด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{-2\gamma_{a-w} \cos \alpha}{r} \quad (1)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ แรงที่กระทำต่อผิวของรูปทรงระดับไมโครเมตร (รัศมี  $r$ ) ของโครงสร้างคอนกรีต,  $\alpha$  คือ มุมสัมผัส (Contact Angle) , และ  $\gamma_{a-w}$  คือ แรงตึงผิว (Surface Tension) ที่ผิวสัมผัสของน้ำและอากาศซึ่งเป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิและสภาวะหนึ่งๆ

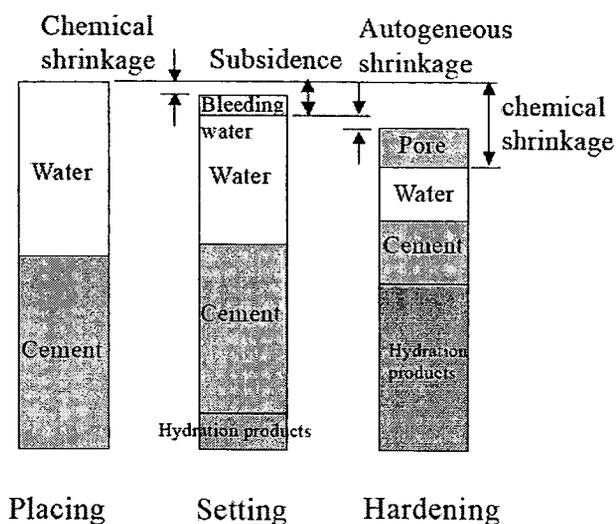


ภาพ 3 แรงกระทำที่ผิวของไฮเดรตซีเมนต์ในช่องว่างค้ำปิลลารีระดับไมโครเมตรของโครงสร้างคอนกรีต

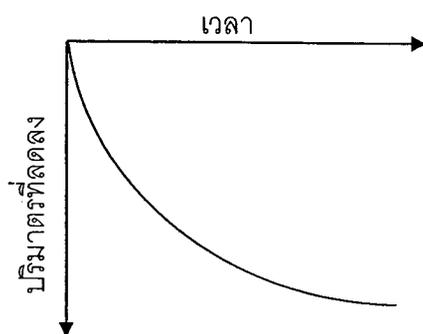
การแตกร้าวเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ แต่ในการศึกษาจะให้ความสนใจคอนกรีตที่อยู่ในสถานะแข็งตัวแล้ว (หลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายจบลง) เพราะว่ายากที่แก้ไขได้ และมักประสบปัญหาบ่อยมากที่สุดในงานก่อสร้าง คือ การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และการแตกร้าวเนื่องจากการหดแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

#### 1. การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัส เป็นการหดตัวที่เกิดหลังจากสิ้นสุดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตแล้วเสร็จ การหดตัวดังกล่าวเป็นผลจากการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน รวมทั้งอีกส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างค้ำปิลลารี เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิดแรงดึงในช่องว่างค้ำปิลลารี ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัว โดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดภายนอก แต่ไม่มีการสูญเสียความชื้นภายในให้กับสภาพแวดล้อม การหดตัวแบบออโตจีนัสจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน [2] แต่ช่วงหลังจะมีอัตราการหดตัวที่ต่ำลงหรือเกือบจะคงที่เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น ดังภาพ 5



ภาพ 4 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการหดตัวของแบบอโตจีนิส [3]



ภาพ 5 อัตราการหดตัวของแบบอโตจีนิส [2]

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของแบบอโตจีนิสมีอยู่หลายประการ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันหากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเร็วการหดตัวของแบบอโตจีนิสจะเกิดขึ้นเร็วและสูงตามไปด้วย
2. ปูนซีเมนต์ที่มี ไตรแคลเซียมอลูมิเนต เป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงมีแนวโน้มเกิดการหดตัวของแบบอโตจีนิสที่เพิ่มมากขึ้น เพราะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเร็วขึ้น
3. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและปริมาณเพสต์มากมีส่วนทำให้เกิดการหดตัวของแบบอโตจีนิสที่สูงขึ้น

4. ลักษณะของโครงสร้างช่องว่างในซีเมนต์เฟสก็ยังมีขนาดเล็กมากและมีความไม่ต่อเนื่องมากก็ทำให้เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสสูงขึ้น



ภาพ 6 ลักษณะรอยแตกเนื่องการหดตัวแบบออโตจีนัส [4]

## 2. การหดตัวแบบแห้ง

ปัญหาการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หมายถึงการเกิดการหดตัวของคอนกรีตในระยะสิ้นสุดการก่อตัวขั้นสุดท้าย (สภาพที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว) เกิดการสูญเสียความชื้นบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตให้แก่สภาพแวดล้อม โดยที่น้ำอิสระในช่องว่างคัปิลลารีบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตระเหยทำให้เกิดแรงดึงขึ้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงทางขนาดภายนอกโดยที่มีปริมาตรลดลง แต่หากคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่ถูกยึดรั้งเนื่องจากโครงสร้างรอบข้างก็จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงเกิดขึ้น หากหน่วยแรงดึงดังกล่าวมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงที่กำลังของคอนกรีตจะสามารถรับได้ ก็เกิดรอยแตกบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต [2]

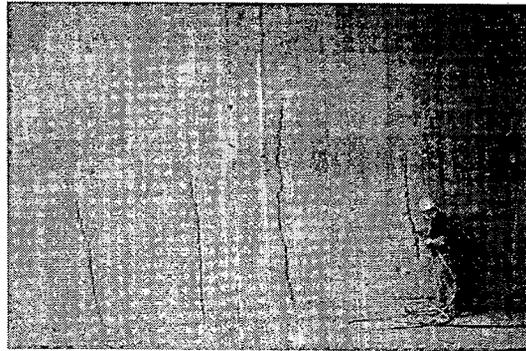
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวแบบแห้งมีหลายประการ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนระหว่างน้ำและวัสดุประสานสูง ทำให้มีการหดตัวแบบแห้งสูง เนื่องจาก มีปริมาณน้ำอิสระในช่องว่างมาก อีกทั้งมีผลให้มีช่องว่างคัปิลลารีปริมาณมาก [5] จะทำให้น้ำอิสระสามารถระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก

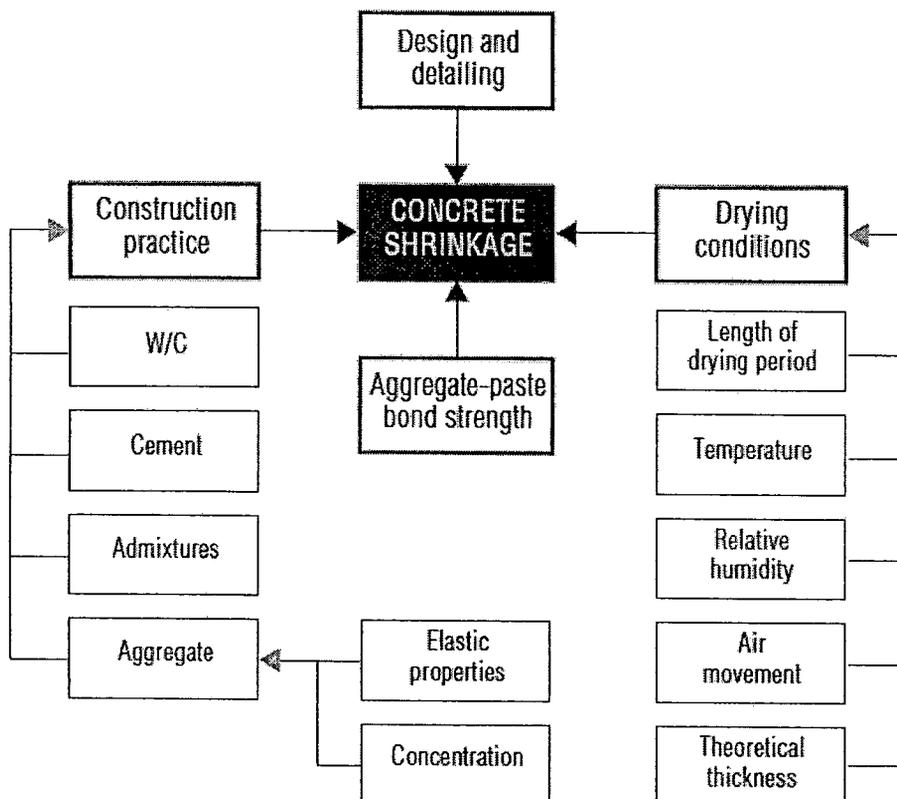
2. คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เฟสมากทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งสูง เพราะการหดตัวเกิดขึ้นกับซีเมนต์เฟส

3. คอนกรีตที่มีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำ การหดตัวแบบแห้งจะต่ำลงตามด้วย เนื่องจากคอนกรีตประเภทนี้มีความหนาแน่นสูงทำให้มีช่องว่างคัปิลลารีต่ำ

4. สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ส่งผลให้บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตมีการสูญเสียน้ำ ทำให้การหดตัวแบบแห้งเกิดได้สูง



ภาพ 7 รอยแตกเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง [6]



ภาพ 8 ตัวแปรที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง [7]

## กำลังรับแรงอัด

กำลังอัดของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับใช้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งทราบโดยทั่วกันแล้วว่าคอนกรีตมีจุดเด่นด้านความสามารถรับแรงอัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อทำการศึกษา และค้นคว้าที่จะพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตให้มีจุดเด่นด้านกำลังรับแรงอัดที่ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยการทดสอบใช้นาโนซิลิกาประเภทที่ชอบน้ำ และประเภทที่ไม่ชอบน้ำเป็นส่วนผสมแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในการทดสอบ เพื่อหาแนวโน้มของดัชนีการพัฒนากำลังอัด จุดเด่นของงานวิจัยนี้ คือ สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุชนิดนี้ได้ ถือว่าเป็นผลที่ดีต่ออุตสาหกรรมการก่อสร้างในอนาคต แต่แนวคิดในการเลือกใช้วัสดุที่ถือว่าใหม่จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ด้วย เช่น การทดสอบด้านความคงทน การทดสอบกำลังดัด การทดสอบความเป็นปอซโซลาน และการทดสอบด้านกำลังอัด เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบด้านกำลังอัดของคอนกรีตเพียงเท่านั้น ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ จะกล่าวถึงต่อไป โดยจะสรุปปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังดังต่อไปนี้

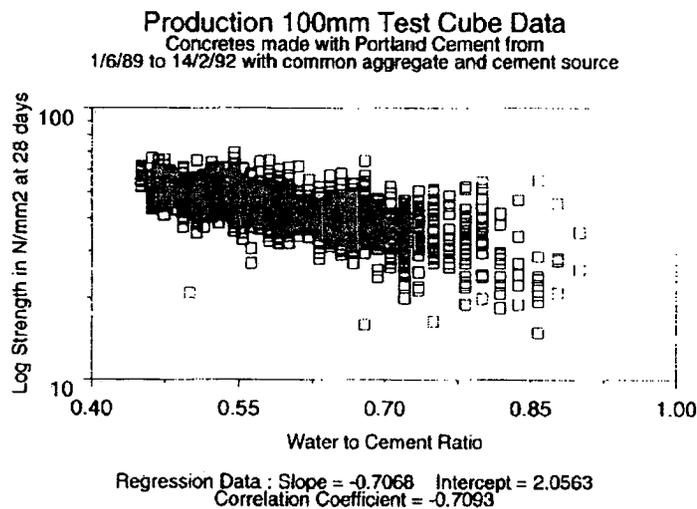
### 1. ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของกรีต

#### 1.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

จากกฎของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตของ อาบรัมส์ ในปี พ.ศ. 2461 อธิบายไว้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเป็นส่วนกลับของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$$S = \frac{A}{B^x}$$

เมื่อ	S	คือ	กำลังอัดของคอนกรีต
	X	คือ	อัตราส่วนโดยปริมาตรน้ำต่อปูนซีเมนต์
	A,B	คือ	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์และวิธีการบ่ม



ภาพ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยปริมาตร [8]

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยมีการควบคุมส่วนผสม วิธีการทดสอบ แต่การทดสอบมีการใช้ปริมาณอัตราส่วนของน้ำที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบ คือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงดัง ภาพ 9

## 1.2 อิทธิพลส่วนผสม

**น้ำ** น้ำส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีต ตามคุณภาพและปริมาณที่ใช้ในการผสม หากนำน้ำที่มีคุณภาพที่ต่ำกว่ามาตรฐานมาใช้ เช่น มีความชื้นและสารอินทรีย์แขวนลอยมากจะทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง แต่หากใช้ในผสมในปริมาณที่มากเกินไปความเหมาะสมอาจจะทำให้เกิดปัญหาอื่นตามมาเช่น ผิวหน้าเป็นฝุ่นหรือหลุดร่อน กำลังรับแรงต่ำ เป็นต้น

**ปูนซีเมนต์** ปูนซีเมนต์มีหลากหลายประเภทที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด ทั้งนี้ ผู้ใช้ควรที่จะศึกษาความแตกต่างของการใช้งาน และเลือกใช้งานให้ถูกต้องและเหมาะสม ดังเช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปมีการพัฒนากำลังตามปกติ แต่หากพิจารณาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 เป็นปูนซีเมนต์ที่มีการพัฒนากำลังอัดจะเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่วัน ความร้อนที่เกิดสูงเนื่องจากความแตกต่างทางองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพ

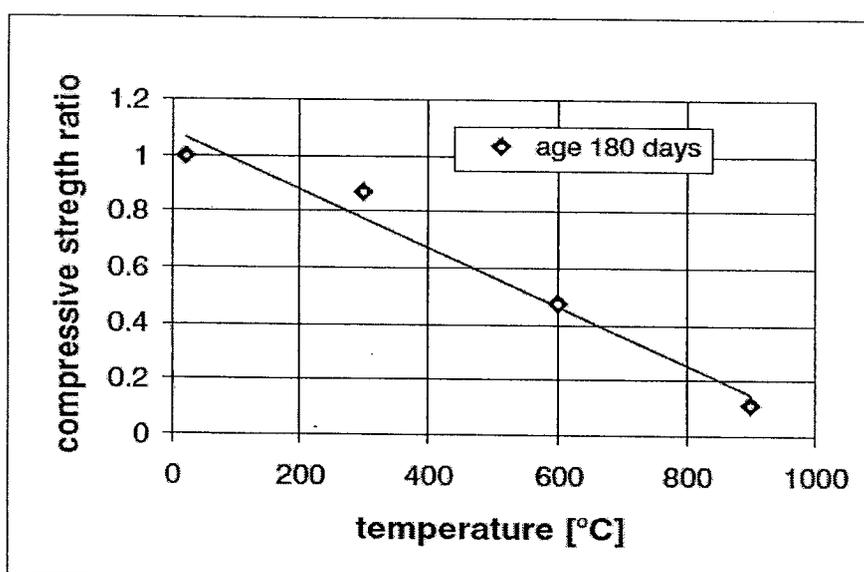
**มวลรวม** มวลรวมจัดเป็นวัสดุเฉื่อยที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย ที่สำคัญเป็นตัวกำหนดหน่วยน้ำหนัก และกำลังรับแรงของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ ขนาดรูปร่าง ลักษณะพื้นผิวของมวลรวม และอื่นๆ โดยปัจจัยเหล่านี้ยังเชื่อมโยงต่อคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของคอนกรีตอีกด้วย อันจะกล่าวให้หัวข้อต่อไป

**สารเคมีผสมเพิ่ม** สารเคมีผสมเพิ่มมีหลากหลายชนิดและประเภทให้เลือกใช้งาน แต่ชนิดที่ส่งผลและใช้สำหรับงานคอนกรีตกำลังอัดสูง คือ สารลดน้ำและสารลดน้ำชนิดพิเศษ จะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้เช่นค่าการยุบตัว แต่สารเคมีประเภทนี้สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตในทางอ้อมได้เนื่องจากช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมแต่จะมีผลกระทบในด้านระยะเวลาการถอดแบบ

**วัสดุปอชโซลาน** จัดเป็นวัสดุที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของ ซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต โดยจะทำปฏิกิริยาปอชโซลาน ระหว่างซิลิกาไดออกไซด์ และอลูมินาไดออกไซด์ กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงและเพิ่มการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นและช่วงปลายได้

### 1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม

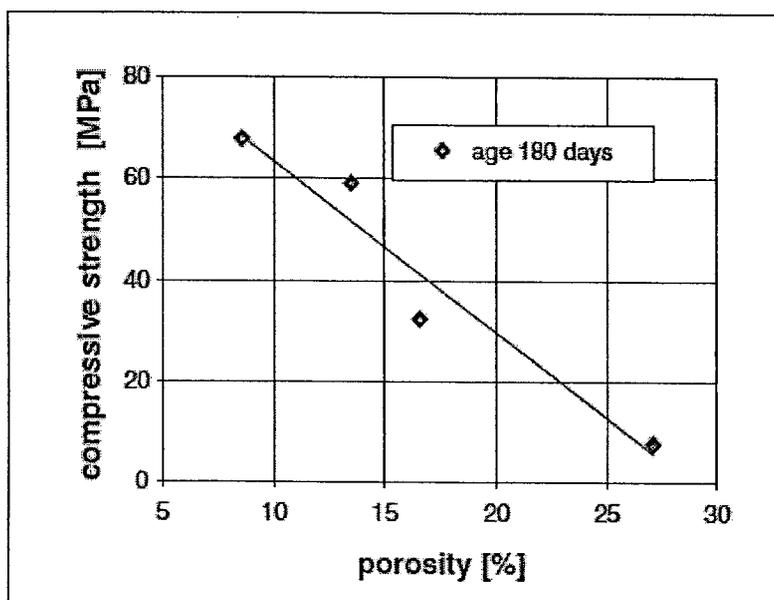
จัดว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมาก เพราะมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตในช่วงอายุต่างๆ จะเห็นได้จากภาพด้านล่าง แสดงผลของอุณหภูมิในช่วงต่างมีที่อิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทั้งนี้ในการเลือกใช้อุณหภูมิในการบ่มควรที่จะพิจารณาให้มีความเหมาะสมต่อสภาพการทำงานและคุณสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีตด้วย



ภาพ 10 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม [9]

#### 1.4 อิทธิพลของความพรุน

ความพรุนหมายถึงปริมาณช่องว่างในก้อนคอนกรีตทั้งหมดซึ่งมีผลโดยตรงกับกำลังอัดของคอนกรีต สามารถอธิบายได้โดยกราฟด้านล่าง เป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ของความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีต จากภาพจะเห็นว่าความพรุนแปรผกผันกับกำลังอัดของคอนกรีต



ภาพ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความพรุนของซีเมนต์เพสต์ [9]

#### 2. แนวทางการเพิ่มกำลังอัดให้กับซีเมนต์มอร์ต้าและคอนกรีต

2.1 ลดอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับส่วนผสมเดียวกันที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่าเนื่องจากจะมีปริมาณน้ำอิสระและความพรุนที่ต่ำกว่า

2.2 ใช้สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้มากกว่าเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่ใช้ มีส่วนช่วยลดปริมาณน้ำอิสระ ความพรุน และเพิ่มกำลังอัดได้

2.3 ใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความพรุนทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ ช่วยให้คุณสมบัติการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นได้

2.4 คอนกรีตหลังจากการถอดแบบควรมีการบ่มแบบถูกต้อง และเหมาะสม จะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานนิค อันจะส่งผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด

2.5 ควบคุมกรรมวิธีในการผลิตคอนกรีต การก่อสร้างให้ถูกต้องตามหลักวิชาการซึ่ง จะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราการพัฒนากำลังเป็นไปตามอายุที่ออกแบบไว้



ภาพ 12 ตัวอย่างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกล้ำลายโดยซัลเฟต [10]

**ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากการโจมตีของซัลเฟต (Sulfate Attack)**

หนึ่งในปัญหาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ ใกล้ทะเล น้ำกร่อย หรือต้องสัมผัสกับน้ำเสียจากบ้านเรือนอยู่ตลอดเวลา และโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่แหล่งน้ำพุร้อนตามธรรมชาติ จากปัญหาดังกล่าวนี้ทำให้เหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมักเกิดสนิมเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้ ความสามารถในการรับแรงลดลง อายุการใช้งานลดลง และความมั่นใจของผู้ใช้งานและพักอาศัยลดลง ดังนั้นจึงต้องตระหนักและให้ความสำคัญเพื่อพิจารณาในรายละเอียดสำหรับการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต และศึกษาถึงปัจจัยและกลไกเพื่อนำไปสู่วิธีการพัฒนาส่วนผสมที่จะใช้ป้องกันปัญหาต่อไปนี้

### 1. โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและสารซัลเฟต

เนื่องด้วยในปัจจุบันความนิยมในการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นไปอย่างแพร่หลาย สังเกตได้จากการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ทุกพื้นที่และแต่ละภาคของประเทศไทย แต่ด้วยการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่ได้คำนึงถึงความคงทน การควบคุม การก่อสร้างที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ สภาพแวดล้อมในการใช้งานที่มีความรุนแรงส่งผลให้

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุในการใช้งานไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องประสบกับปัญหาการถูกทำลายโดยซัลเฟต

โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในบางพื้นที่เท่านั้นที่จะประสบปัญหาดังกล่าวนี้ ยกตัวอย่าง เช่น ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกทำลายโดยเกลือซัลเฟตมักพบในดินพื้นที่บริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไป ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตถูกทำลายเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟต มักจะพบได้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือจากแหล่งน้ำพุร้อนตามธรรมชาติ เป็นต้น



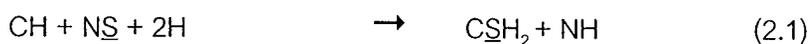
ภาพ 13 ตัวอย่างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสน้ำเสีย [11]

## 2. กลไกการทำลายโดยซัลเฟต

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำการศึกษาได้โดยจำลองสภาพการใช้งานของคอนกรีตที่สภาพแวดล้อมต่างๆ โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นตัวแทนของซัลเฟตที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีต สามารถตรวจพบได้ในน้ำเสีย น้ำทะเล และในดิน [2] ในการทดสอบสามารถทำได้โดยจำลองเสมือนว่าคอนกรีต ณ สภาพใช้งานจริง ต้องสัมผัสกับซัลเฟต โดยทำการแช่ตัวอย่างเพื่อใช้ทดสอบในสารละลายซัลเฟต แล้วบันทึกการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี แต่กลไกการทำลายคอนกรีตโดยซัลเฟตนั้นค่อนข้างที่มีความซับซ้อน จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในหลักการอย่างชัดเจน โดยอธิบายดังต่อไปนี้

## 2.1 กลไกการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

กลไกการทำลายคอนกรีตโดยโซเดียมซัลเฟต เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate, NS) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีผลทำให้ความเป็นด่างในซีเมนต์เพสต์สูงมากจากปกติ (pH=12.4) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น pH=13.5 มีผล คือ ทำให้เกิดการรักษาสีของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) และ Ettringite ( $C_6ASH_{32}$ ) ไม่ทำให้ปฏิกิริยาละลายเป็นผลิตภัณฑ์อื่น และสารยิปซัม ( $CSH_2$ ) ที่เป็นผลผลิตจากสมการที่ 2.1 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮดรอกไซด์บางตัว เช่น แคลเซียมมอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ ( $C_4AH_{13}$ ) โมโนซัลเฟต ( $C_4ASH_{12}$ ) และไตรแคลเซียมมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ถึง 2.4 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ผลกระทบต่อคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและเกิดรอยแตกร้าวได้ [2]

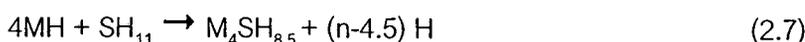


โดยที่ C = CaO, N = Na<sub>2</sub>O, M = MgO, S = SiO<sub>2</sub>, S = SO<sub>3</sub> และ H = H<sub>2</sub>O

## 2.2 กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตจะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต คือ กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตทำให้คอนกรีตมีค่า pH สูงกว่าปกติแต่กรณีแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) จะทำให้คอนกรีตมีค่า pH ต่ำกว่าปกติ เนื่องจาก แมกนีเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำมาก จึงทำให้มีค่า pH ของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 10.5 ส่งผลให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.5 โดยที่  $CSH_2$  และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย  $CSH_2$  จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล ( $S_2H$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.7 เกิดผลิตภัณฑ์ตัวใหม่ คือ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (M-S-H) ซึ่งไม่มีเป็นประโยชน์ในด้านการเชื่อมประสาน จากสมการที่ 2.5-2.7 เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก C-S-H เป็น

M-S-H ผลจากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของซีเมนต์เพสต์ แต่การทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตไม่เกิดการขยายตัวมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีแรก [2]



### 3. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต สามารถแบ่งแยกโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้าง

3.1.1 ปริมาณ  $\text{C}_3\text{A}$  และ  $\text{C}_4\text{AF}$  ในปูนซีเมนต์ หากมีในปริมาณที่น้อยสามารถช่วยลดการเกิดการทำลายจากซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $\text{C}_3\text{A}$  และ  $\text{C}_4\text{AF}$  ที่มากกว่า [2]

3.1.2 ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณอัตราส่วนระหว่าง  $\text{C}_3\text{S}$  ต่อ  $\text{C}_2\text{S}$  ต่ำก็จะสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น [2]

3.1.3 ถ้าสามารถลดปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะช่วยลดความรุนแรงของการเสื่อมสภาพจากการทำลายโดยซัลเฟตได้ (อาจใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน) [2]

3.2 ความทึบน้ำ ถ้าคอนกรีตมีความทึบน้ำสูงจะสามารถป้องกันการซึมเข้าของซัลเฟตได้ ซึ่งจะช่วยลดความรุนแรงที่อาจจะเกิดขึ้น [2]

3.3 ความเข้มข้นของซัลเฟตในพื้นที่ ถ้าในพื้นที่ที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงก็ทำให้โครงสร้างถูกทำลายได้เร็วกว่าพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตต่ำ

### 4. การป้องกันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต

#### 4.1 การเลือกใช้ปูนซีเมนต์

4.1.1 เลือกใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 เนื่องจากมีปริมาณอัตราส่วนระหว่าง  $\text{C}_3\text{S}$  ต่อ  $\text{C}_2\text{S}$  ต่ำ

4.1.2 เลือกใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อลดปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  และเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต

4.2 ลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อเพิ่มความทึบน้ำ

4.3 ใช้สีชนิดพิเศษในการเคลือบผิวหน้าเพื่อเพิ่มระดับการป้องกันการทำลายของซัลเฟต



ภาพ 14 ตัวอย่างของโครงสร้างถูกกัดกร่อนโดยกรด [12]

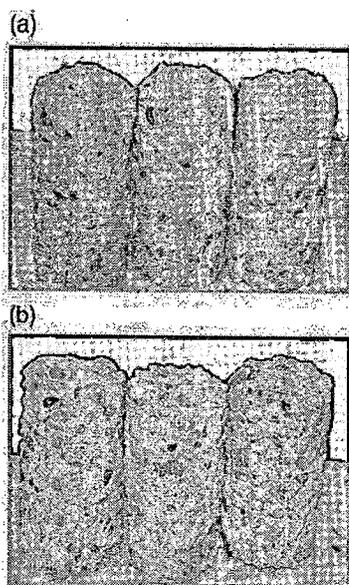
**ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack)**

ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากสารเคมีส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็น คุณสมบัติเชิงเคมี คุณสมบัติเชิงกล และความสวยงาม โดยในหัวข้อนี้จะพิจารณาปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากการทำลายโดยกรด เป็นปัญหาที่พบบ่อยมากที่สุดสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ใช้งานในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ต่างๆ ที่มีกรดจากกระบวนการในการผลิตที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ ระบบบำบัดหรือท่อน้ำเสีย หรือจากฝนกรดเป็นต้น ผลที่ตามมา คือ โครงสร้างดังกล่าวมักมีสภาพดังภาพ 14

ดังนั้นในงานการศึกษานี้ต้องการที่จะทดสอบการต้านทานของคอนกรีตโดยการจำลองการทดสอบให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง โดยทั่วไปสามารถแบ่งระดับความรุนแรงของกรดในสภาพแวดล้อมได้ ดังนี้ pH ต่ำกว่า 6.5 ถือว่าอยู่ในสภาพแวดล้อมเป็นกรด แต่หากมีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 ถือว่าเป็นสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดที่ทำให้เกิดการเสียหายอย่างรุนแรง ตัวอย่างของกรดที่ใช้ทดสอบ Carbonic, Hydrochloric, Hydrofluoric, Nitric, Phosphoric, Sulfuric, Acetic, Citric, Formic, Humic, Lactic และ Tannic [2] ซึ่งกรดเหล่านี้สามารถตรวจพบได้ในโรงงานหรือแหล่งที่มีการใช้กรดในกระบวนการการผลิต หรือได้จากกระบวนการในการผลิตที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ ระบบบำบัดหรือท่อน้ำเสีย และจากฝนกรดเป็นต้น

## 1. กลไกการกัดกร่อนโดยกรด

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากกรด เกิดจากการเสื่อมสภาพของเนื้อซีเมนต์เพสต์ เกิดจากกระบวนการที่กรดเปลี่ยนแปลงสารประกอบแคลเซียมที่มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ ตัวอย่างเช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ให้กลายเป็นเกลือแคลเซียม ส่วนใหญ่แล้วกรดสร้างความเสียหายให้กับคอนกรีตโดยการเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมดังกล่าว ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ง่าย ผล คือ ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมลดลง จึงเป็นเหตุทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตที่สัมผัสกับกรดโดยตรงเกิดการหลุดร่อนไปในที่สุด จึงมีสภาพดังภาพ 15



ภาพ 15 สภาพคอนกรีตถูกทำลายโดยกรด [13]

## 2. วิธีการป้องกันการกัดกร่อนโดยกรด

การป้องกันคอนกรีตเสื่อมสภาพเนื่องจากการกัดกร่อนโดยกรด อาจจะยังไม่สามารถที่จะป้องกันได้ แต่ยังมีวิธีที่จะช่วยชะลอให้คอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับกรดมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้น สามารถทำได้โดย

2.1 ใช้สารเคลือบผิวของคอนกรีต เพื่อลดความรุนแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนโดยกรด

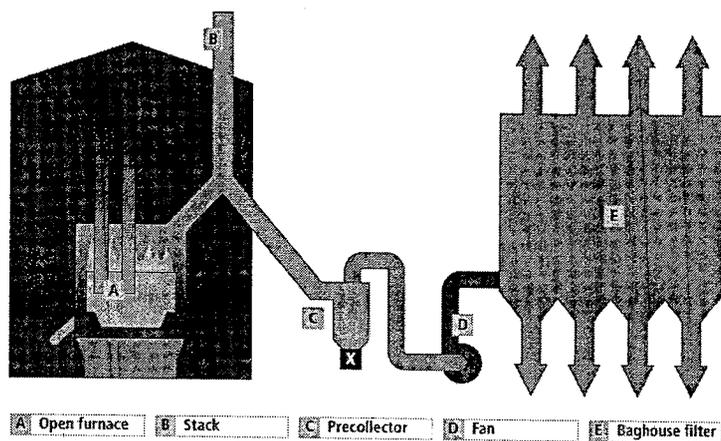
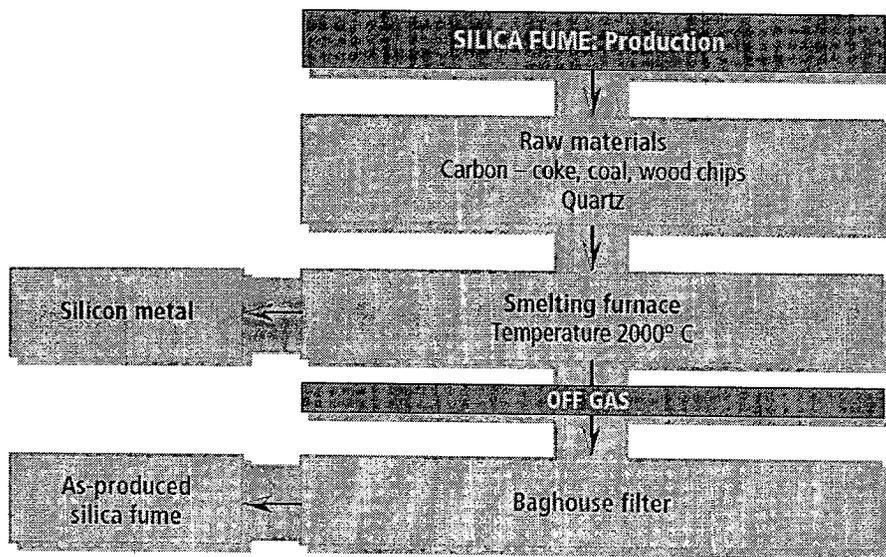
2.2 เลือกใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมที่มีความทึบน้ำสูง สามารถช่วยยืดอายุในการใช้งานได้

2.3 เลือกใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานในการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ เพราะจะได้ช่วยลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ลดความพรุน และเพิ่มความทึบน้ำ

### ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume)

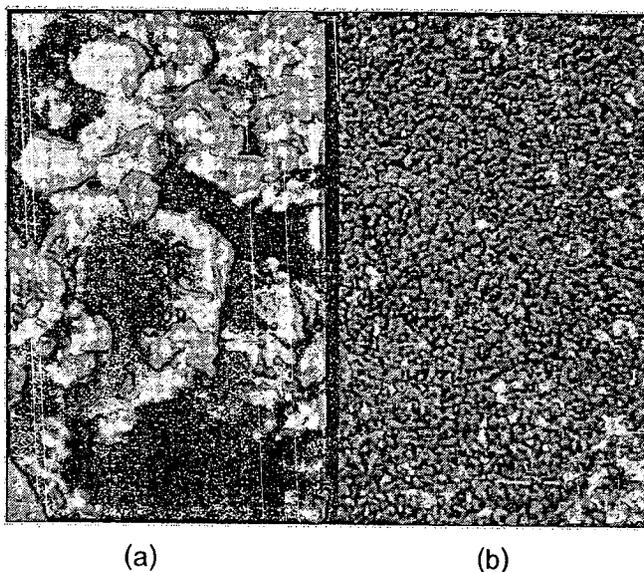
จากการศึกษางานวิจัยทางผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำเอนานาโนซิลิกาช่วยในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวในหัวข้อขั้นต้น โดยการศึกษาสมบัติของไมโครซิลิกา หรือซิลิกาฟุ้งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ณ ปัจจุบัน ในการศึกษา มีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาและค้นคว้าผลการใช้งานไมโครซิลิกาต่อสมบัติด้านต่างของซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีต จากผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy ได้ซิลิกาฟุ้งถึงร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วยซิลิกอนกว่าร้อยละ 85 ถึง 95 เกิดจากขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์เป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000°C ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO ต่อมาเปลี่ยนเป็นออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำ ได้เป็นอนุภาคของซิลิกาที่มีขนาดเล็กมากๆ ในรูปที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) ลอยปะปนกับอากาศ และจะถูกดักจับเก็บไว้ เพื่อใช้ประโยชน์กันต่อไป [14, 15]



ภาพ 16 ขั้นตอนการผลิตซิลิกาฟุ่ม [15]

คุณสมบัติทางกายภาพทั่วไปของซิลิกาฟุ่มมีสีดำหรือขาว ขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนและเหล็ก [14] ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25  $\text{m}^2/\text{g}$  (โดยวิธี Nitrogen Absorption) ซิลิกาฟุ่ม 0.1 ไมครอนเมตร ถือว่ามีขนาดเล็กมากๆ เล็กกว่าขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24] ทำให้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก ดังนั้นจึงมีการนำซิลิกาฟุ่มมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีต เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติที่บางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้นและเหมาะสมแก่สภาพการเลือกให้ใช้งานที่มีความแตกต่างกันออกไป



ภาพ 17 ตัวอย่างซีเมนต์ (a) ตัวอย่างของอนุภาคซิลิกาฟุ่ม (b) [15]

## 1. ปฏิกริยาเนื่องจากซิลิกาฟุ่ม

ซิลิกาฟุ่มถูกนำมาใช้งานในคอนกรีตเพื่อวัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่นคุณสมบัติด้านกำลังการรับแรง และคุณสมบัติด้านความคงทนเป็นต้น เพื่อที่จะตอบสนองต่อความต้องการของการใช้งาน ก่อนการใช้งานควรที่จะต้องทำการศึกษาถึงใจ เข้าใจก่อน โดยจะอธิบายตามหัวข้อต่อไปนี้

### 1.1 ปฏิกริยาปอซโซลาน

ซิลิกาฟุ่มเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกริยาปอซโซลานิก กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกริยาไฮเดรชัน โดยมีกระบวนการและลำดับของปฏิกริยาอธิบายได้ดังนี้

#### ลำดับที่ 1

ปฏิกริยาไฮเดรชัน เกิดเมื่อน้ำกับสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ระหว่าง แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกริยากับน้ำ ก่อให้เกิด  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ตามสมการการเกิดปฏิกริยานี้

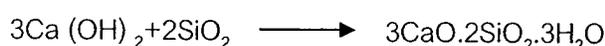


หรือ



## ลำดับที่ 2

ปฏิกิริยา pozzolanic เป็นปฏิกิริยาลำดับที่สอง ต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นระหว่าง ซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของซิลิกาฟูมกับสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นสารเชื่อมประสานขึ้น คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) (ตั้งสมการด้านล่าง) ช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในคอนกรีตให้มีความหนาแน่นมากขึ้น ความทึบน้ำสูงขึ้น อีกทั้งช่วยเพิ่มกำลังอัดให้แก่คอนกรีต [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]



### 1.2 ผลของไมโครฟิวเลอร์ (Microfiller effect)

เนื่องด้วยซิลิกาฟูมเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กมาก (ระดับไมโครเมตร-ระดับนาโนเมตร) และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงทำให้มีความต้องการน้ำในปริมาณที่มาก จากคุณสมบัติทางกายภาพซิลิกาฟูม จึงสามารถปรับปรุงโครงสร้างช่องว่างภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์โดยการอุดช่องว่างภายใน [15] ทำให้มีความพรุนน้อยลง ความแน่นเพิ่มมากขึ้น ความชื้นน้ำต่ำ [16, 17, 18, 19, 25] และสามารถรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น [22, 26, 27, 28]

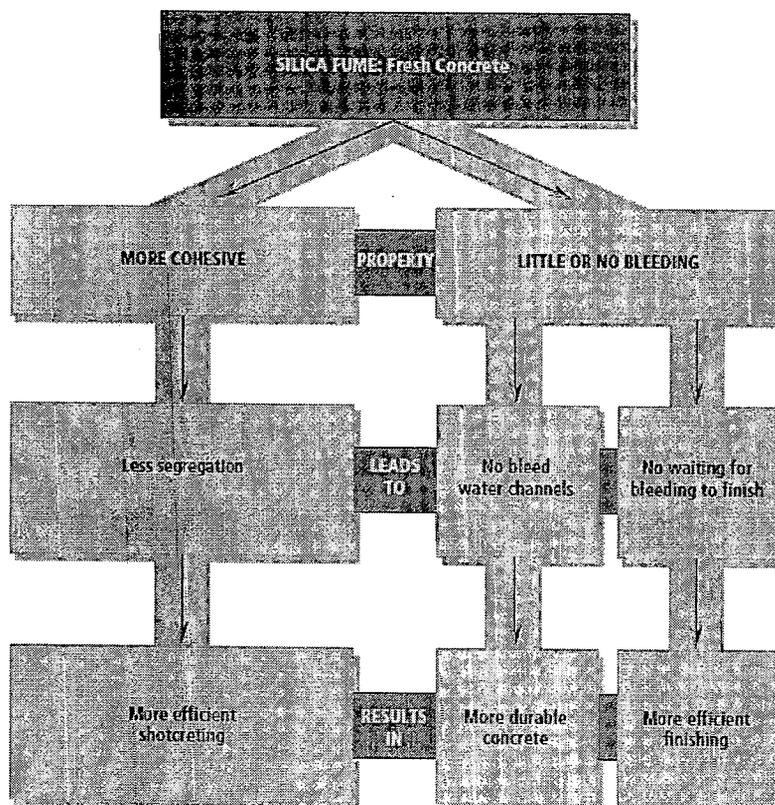
## 2. ผลกระทบที่เกิดจากการใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีต

ซิลิกาฟูม หรือไมโครซิลิกาถูกนำมาใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติหลายๆ ประการของคอนกรีต ช่วยให้คอนกรีตมีสมบัติที่ดีขึ้น จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

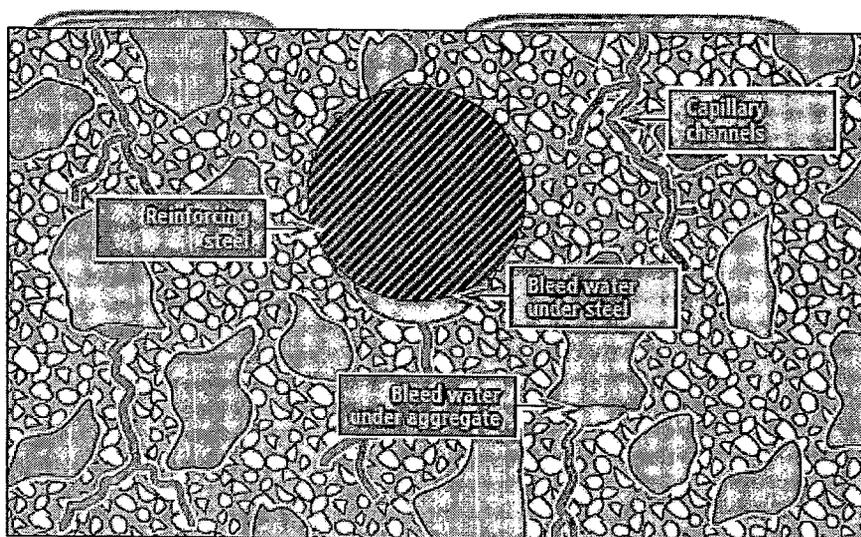
### 2.1 ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าซิลิกาฟูมเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กมาก พื้นผิวสัมผัสสูงเมื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีต มักจะส่งผลต่อสมบัติคอนกรีตสด คือ ช่วยให้เพิ่มแรงยึดเกาะภายในให้กับเนื้อของคอนกรีต อีกทั้งสามารถช่วยลดการเกิดการแยกตัวที่อาจจะเกิดขึ้นได้ [15] และหลายๆ งานวิจัยยังพบอีกว่าสามารถช่วยลดการเยิ้มได้เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมเดียวกัน เนื่องจากผลขนาดและพื้นที่ผิวสัมผัส [16, 17, 18, 19, 27] ซึ่งเชื่อว่าจะสามารถเพิ่มสมบัติด้านความคงทนให้กับคอนกรีตในสภาพที่แห้งตัวแล้วได้ด้วย เนื่องจากโดยทั่วไปเมื่อคอนกรีตเกิดการเยิ้มดังภาพ 19 เกิดการแบ่งชั้นระหว่างคอนกรีตและน้ำที่มีความแตกต่างของความตึงจำเพาะ น้ำจึงถูกขับให้ลอยอยู่ที่บริเวณผิวหน้า ส่งผลให้ผิวหน้าของคอนกรีตมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุ

ประสานสูง ความแข็งแรงจึงต่ำกว่าชั้นอื่น ๆ จึงเกิดการหลุดร่อนเมื่อถูกขัดสีในระหว่างการใช้งานได้  
 ง่าย แต่จากผลของการใช้งานซิลิกาฟุ้งในคอนกรีตในชั้นต้นส่วนใหญ่ในการทำงานมักจะพบว่า  
 ความสามารถในการทำงานลดลง (ค่าการยุบตัวของคอนกรีต) จึงต้องมีการใช้ร่วมกับสารลดน้ำ  
 หรือสารลดน้ำพิเศษเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานให้ง่ายต่อการทำงาน ซึ่งจากการศึกษา  
 สามารถสรุปเป็นแผนภาพ ดังภาพ 18



ภาพ 18 ผลของซิลิกาฟุ้งต่อสมบัติของคอนกรีตสด [15]



ภาพ 19 ภาพแสดงการเกิดการเยิ้มในคอนกรีต [15]

## 2.2 ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

จากผลการศึกษางานวิจัย การใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีต สามารถสรุปได้ดังภาพ 20 แสดงผลของการใช้งานซิลิกาฟูมต่อสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ส่งผลต่อสมบัติคอนกรีตสองส่วนหลัก ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและช่วยลดการซึมผ่านของคอนกรีตได้ จากสมบัติในสองประเด็นหลักนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติด้านอื่นๆ ของคอนกรีตได้อีกด้วย

### 2.2.1 กำลังการรับแรง

การใช้งานคอนกรีตร่วมกับซิลิกาฟูม จะมีความโดดเด่นในสมบัติการรับแรงในช่วงอายุต้น ถือเป็นสมบัติเชิงกลที่มีประโยชน์มากสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำงานได้เร็วยิ่งขึ้น สำหรับการใช้งานซิลิกาฟูมร่วมในคอนกรีตทั่วไปอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 8-15 ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยต้องร่วมกับสารลดปริมาณน้ำ เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานให้กับคอนกรีต จากหลายๆ งานวิจัยที่ทำการศึกษาการ พบว่า คอนกรีต และซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูม มีกำลังอัด กำลังดึง และกำลังรับแรงดัดสูงในช่วงอายุต้น เนื่องจากผลของขนาดความละเอียด ความเป็นวัสดุเติมเต็ม และสมบัติความเป็นปอซโซลานของซิลิกาฟูมสูง สามารถช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เฟสและมวลรวม และคอนกรีตและเหล็กเสริมได้

### 2.2.2 การหดตัว

การใช้งานคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมเป็นอีกหนึ่งในทางเลือกสำหรับผู้ใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังเช่น คอนกรีตสมรรถนะสูง คอนกรีตกำลังอัดสูง ซึ่งมีสมบัติที่โดดเด่น ด้านกำลังอัดในช่วงอายุต้น และเพิ่มความทึบน้ำให้แก่คอนกรีต แต่หลายๆงานวิจัย พบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูมมักทำให้คอนกรีตมีค่าการหดตัวในปริมาณที่สูง ดังเช่น การหดตัวแบบพลาสติกสูง การหดตัวแบบแห้งสูง [29, 30] การหดตัวแบบออโตจีนัสสูง

**การหดตัวแบบพลาสติก** คอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูมมักมีการหดตัวแบบพลาสติกในอัตราที่สูง อาจเป็นผลเนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นวัสดุที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก และพื้นผิวสัมผัสมาก เมื่อนำไปผสมคอนกรีตทำให้ลดปริมาณน้ำอิสระ ลดการเยิ้ม เมื่อคอนกรีตเกิดการระเหยของน้ำที่บริเวณผิวหน้า น้ำในช่องว่างคະປິลລາรีที่ใกล้กับบริเวณผิวของคอนกรีตก็จะระเหยอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับคอนกรีตทั่วไปที่เกิดการเยิ้ม หากเกิดการระเหยของน้ำที่ผิวจะระเหยก่อนโดยไม่มีการสูญเสียจากช่องว่างภายในคະປິลລາรี การหดตัวแบบพลาสติกจึงมีค่าน้อย [31]

**การหดตัวแบบแห้ง** โดยทั่วไปคอนกรีตคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ดังเช่นคอนกรีตกำลังอัดสูง คอนกรีตไหลเข้าแบบได้ด้วยตัวมันเอง ซึ่งหลายๆงานวิจัย พบว่า เมื่อมีการใช้งานคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมทำให้มีการหดตัวแบบแห้งต่ำกว่าการหดตัวแบบออโตจีนัส เนื่องด้วยซิลิกาฟูมมีสมบัติทางกายภาพ ที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก และมีความเป็นวัสดุเติมเต็มจึงช่วยในการปรับปรุงโครงสร้างช่องว่างภายในให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น จึงส่งผลทำให้การหดตัวเกิดในอัตราที่ต่ำ แต่บางงานวิจัยก็พบคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูมมีการหดตัวที่สูง

**การหดตัวแบบออโตจีนัส** ปัญหาดังกล่าวโดยทั่วไปมักพบในคอนกรีตที่มีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วงที่ต่ำ จึงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดในอัตราสูง แต่สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูม การหดตัวแบบออโตจีนัสมักพบปัญหานี้เช่นกัน อาจเป็นผลมาจาก เนื่องด้วยซิลิกาฟูมมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ผิวสัมผัสมากและสมบัติความเป็นปอซโซลานสูงจึงมีอัตราการผลิตปฏิกิริยาปอซโซลานนิคสูง และรวดเร็วในช่วงแรก อีกทั้งยังมีสมบัติเป็นวัสดุเติมเต็มจึงช่วยในการปรับปรุงโครงสร้างช่องว่างภายในให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น จึงส่งผลทำให้การหดตัวเกิดในอัตราในช่วงอายุต้น [32]

จากปัญหาดังกล่าวหากคอนกรีตในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการหดตัวในอัตราสูง และถูกยึดตรึงจากโครงสร้างรอบข้าง จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้น แต่หากหน่วยแรงดังกล่าวมีค่าสูงเกินกว่ากำลังของคอนกรีตจะรับได้ก็จะปรากฏรอยแตกขึ้น จากหลักการ

ดังกล่าวมีคนพยายามแก้ปัญหาโดยการลดการหดตัวที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ให้มีอัตราการเกิดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

### 2.2.3 การต้านทานการทำลายโดยซัลเฟต

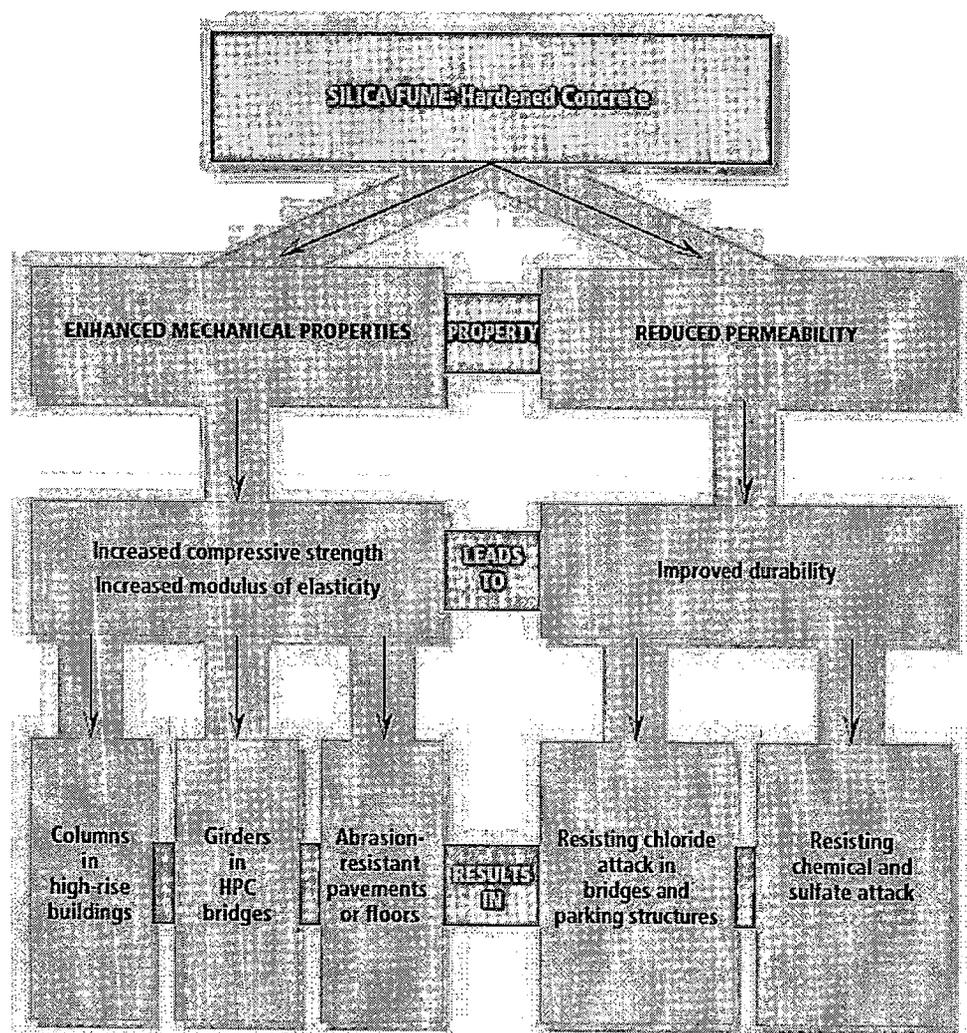
เนื่องด้วยการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตในบางพื้นที่มักจะประสบกับปัญหาเกี่ยวกับซัลเฟต ดังเช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกสร้างในพื้นที่ใกล้ทะเล พื้นแหล่งน้ำพุร้อนตามธรรมชาติ และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียอยู่เป็นประจำ โครงสร้างเหล่านี้มักจะประสบกับปัญหาดังกล่าว เนื่องมาจาก ซัลเฟตสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ จากงานวิจัยการศึกษาการใช้ซิลิกาฟุ่มในงานคอนกรีต พบว่า สามารถลดการซึมผ่านของของเหลวและอากาศได้ โดยซิลิกาฟุ่มช่วยปรับปรุงสมบัติให้คอนกรีตมีความทึบเพิ่มมากขึ้น ช่วยเพิ่มการต้านทานซัลเฟตและยืดอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 2.2.4 การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์

หนึ่งในปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตที่มักจะพบบ่อยในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นที่ติดหรืออยู่ในทะเล มักจะเป็นปัญหาเกี่ยวกับคลอไรด์ คือ เมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไป ประกอบกับปัจจัยอื่นๆ เกื้อหนุนต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เหล็กเสริมภายในเกิดสนิม ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดความเสียหายในด้านต่างๆ เช่น กำล้างเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือ จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำเอาคอนกรีตที่มีส่วนผสมของคอนกรีตเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา เนื่องจากคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มมีความทึบสูงสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารดังกล่าวได้จึงสามารถยืดอายุการใช้งาน และลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้ด้วย ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 2.2.5 การต้านทานการทำลายโดยกรด

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมการใช้งานที่รุนแรง เนื่องจากการสัมผัสกับสารเคมี (กรด) อยู่เป็นประจำ มักประสบกับปัญหาการเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายจากกรด ส่งผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีสมบัติการรับแรงที่ลดลง อายุการใช้งานที่ลดลง และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา จากการศึกษาของหลายๆงานวิจัย พบว่า ผลการใช้งานซิลิกาฟุ่มในคอนกรีตลดความพรุนทำให้เพิ่มความต้านทานสารเคมีให้กับคอนกรีต [16, 33]



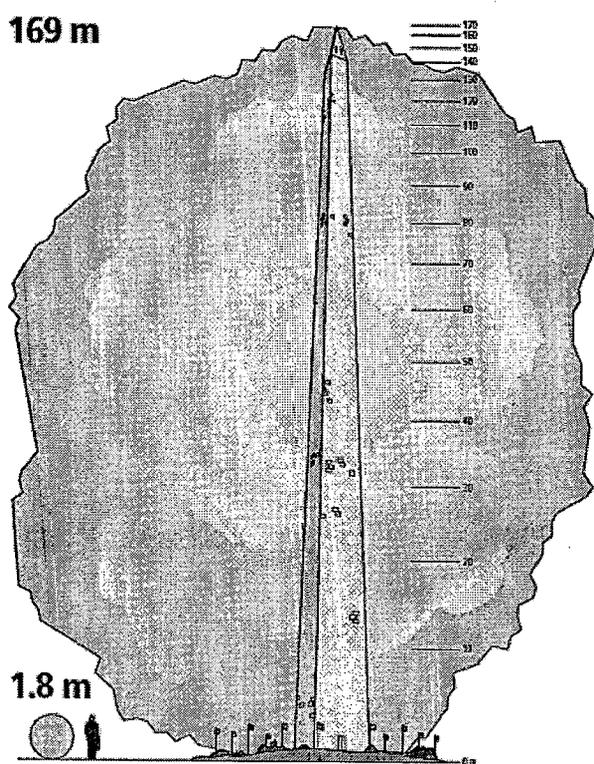
ภาพ 20 ผลของการใช้งานซิลิกาฟุ่มต่อสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว [15]

### 3. การใช้ประโยชน์จากซิลิกาในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

การใช้งานซิลิกาฟุ่ม (Silica Fume) ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือ ซิลิกาฟุ่มควบแน่น (Condensed Silica Fume) ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ณ ปัจจุบัน มีจุดประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตบางประการให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น เช่น ความสามารถในการรับแรงอัด (คอนกรีตกำลังสูง) การเพิ่มประสิทธิภาพความต้านทานกรด และซัลเฟต เป็นต้น

ซิลิกาฟุ่ม (Silica Fume) ที่ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างจะอยู่ในรูปของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เมื่อใช้ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ช่วยเพิ่มปริมาณ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ผล คือ ช่วยให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น เนื่องด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ ช่วยลด

ขนาดช่องว่างภายใน เพิ่มความแน่น แต่การใช้ซิลิกาฟุ้งไม่เพียงจะช่วยเรื่องการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ในช่วงต้นเท่านั้นยังส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการต้านทานสารละลายซัลเฟตหรือกรดต่างๆ ได้ดีขึ้น เนื่องจากช่วยลดปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในปูนซีเมนต์ให้มีปริมาณน้อยลงจากการแทนที่บางส่วนด้วยซิลิกาฟุ้ง



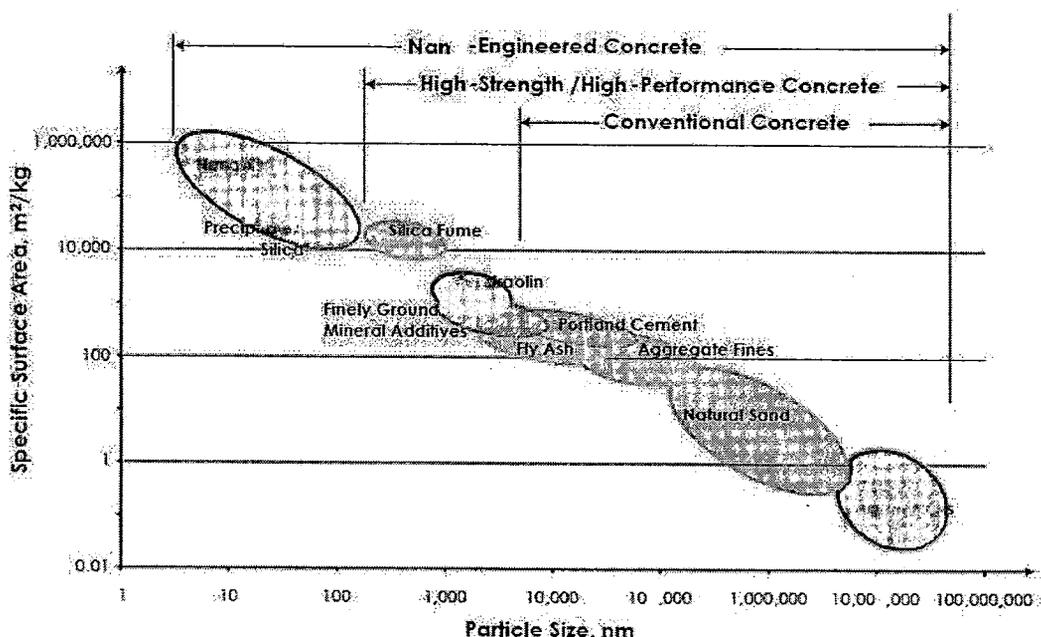
ภาพ 21 ตัวอย่างการใช้งานซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีตกำลังสูง [15]

ในระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาในอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการนำเอาไมโครและนาโนซิลิกาซึ่งเป็นของเสียที่ต้องกำจัด เข้ามาใช้ในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีตหลายๆ ประเภท ดังเช่น คอนกรีตสมรรถนะสูง (HPC) คอนกรีตไหลเข้าแบบได้ด้วยตัวมันเอง (SCC) และอีโคคอนกรีต (Eco-Concrete)

## นาโนซิลิกา

จากการศึกษาการใช้งานไมโครซิลิกาหรือซิลิกาฟูมในงานอุตสาหกรรมการก่อสร้างสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีตได้ ช่วยให้ลดการยึดเกาะและระยะเวลาการก่อตัว เพิ่มกำลังการรับแรง ลดการซึมผ่าน และช่วยเพิ่มการต้านทานสารเคมีทั้งกรดและด่าง ด้วยนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าไมโครซิลิกามากดังภาพ 22 เชื่อว่าจะสามารถปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์มอร์ต้า และคอนกรีตได้มีประสิทธิภาพมากกว่าด้วย โดยรายละเอียดของนาโนซิลิกามีดังต่อไปนี้

นาโนซิลิกาถูกประยุกต์ใช้งานในคอนกรีตคอนกรีตสมรรถนะสูงและคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ด้วยตัวมันเอง เป็นหลัก เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว ลดการแยกตัวให้กับคอนกรีตบางรายงานของการวิจัย [34, 35] กล่าวว่าการใช้งานนาโนซิลิกาในคอนกรีตสมรรถนะสูง (HPC) เมื่อใช้ในปริมาณ 2% ช่วยป้องกันการยึด เพิ่มความสามารถในการทำงาน และลดระยะเวลาการก่อตัว สำหรับงานอีโคคอนกรีต (Eco-Concrete) มันเป็นวัสดุผสมเพิ่มที่มาจากของเสีย เช่น แก้วลอย วัสดุชนิดนี้เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตจะทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวที่นานยิ่งขึ้น กำลังรับแรงลดลง แต่สำหรับนาโนซิลิกาฟูมจะช่วยเร่งระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดสูง [35, 36, 37] จะเห็นได้ว่าการใช้งานไมโครและนาโนซิลิกามีความต้องการเป็นไปต่อเนื่องและมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอีกในอนาคต

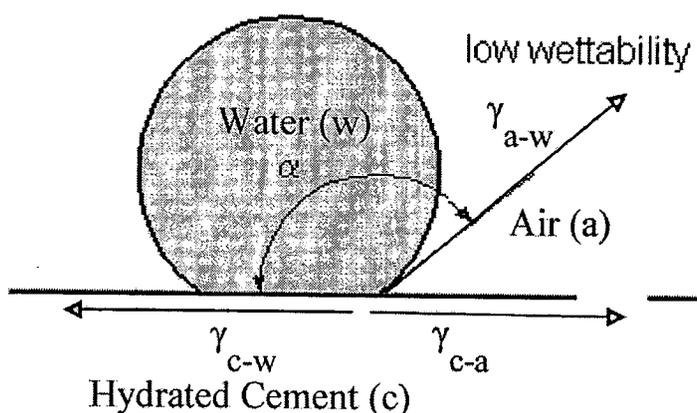


ภาพ 22 ขนาดของอนุภาคและพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุในงานคอนกรีต [38]

### กรอบแนวคิดและสมมติฐานของงานวิจัย

จากการศึกษาหลายๆงานวิจัย พอจะสรุปได้ว่าปัญหาทางด้านความคงทนของคอนกรีตเริ่มทวีความรุนแรงมากขึ้น ประกอบกับสภาพสภาวะของโลก ณ ปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก ส่งผลกระทบให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่ต่ำลง ด้วยเหตุนี้ทางผู้ศึกษาจึงตระหนักและให้ความสำคัญในปัญหาดังกล่าว จึงสนใจที่จะศึกษาการหดตัวของคอนกรีตแบบโดยรวม และการหดตัวแบบอโตจีนัส การพัฒนากำลังอัด การเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายจากกรด การเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายจากซัลเฟต โดยอาศัยหลักการดังต่อไปนี้

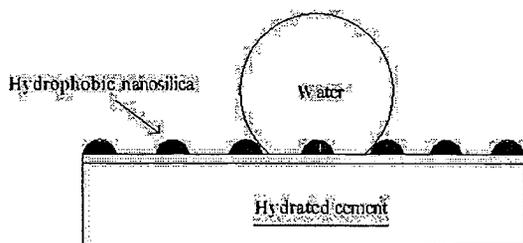
**การลดการหดตัวของคอนกรีต** ลดการหดตัวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น คือ การลดแรงดึง ในช่องว่างค้ำปิลลารี ระดับไมโครเมตรของโครงสร้างคอนกรีตโดยการใช้นิวคลานาโนซิลิกาให้ช่วยปรับปรุงพื้นผิวของไฮเดรตซีเมนต์ โดยที่อนุภาคจากกากของเสียจากการปรับปรุงเกิดการแขวนลอยอยู่ในน้ำอิสระในช่องว่างค้ำปิลลารีและตกตะกอนบนพื้นผิวไฮเดรตซีเมนต์หลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดชันอย่างเพียงพอ เพื่อสร้างความขรุขระระดับนาโนให้มีคุณสมบัติพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ จากเดิมเมื่อไฮเดรตซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะทำให้มุม  $\alpha$  มีค่าน้อยกว่า  $90^\circ$  ผลทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นแต่หลังจากการปรับปรุงพื้นผิวของไฮเดรตซีเมนต์ให้มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะทำให้มุม  $\alpha$  มากกว่า  $90^\circ$  หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงกันข้าม (ตามสมการที่ 1)



ภาพ 23 ลักษณะไฮเดรตซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยวัสดุนาโนให้ไม่ชอบสัมผัสกับน้ำ

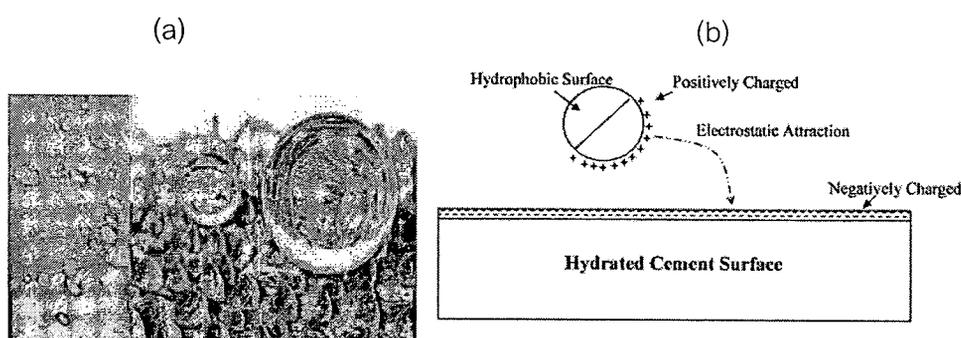
การเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เป็นที่ทราบดีอยู่แล้วว่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีต จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน จากหลักการจะพอทราบว่าหากใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ความพรุนจะมีค่าสูง อันส่งผลกระทบต่อกำลังการรับแรงของคอนกรีต ดังนั้นในการเพิ่มกำลังการรับแรงอัด จึงต้องการวัสดุบางประเภทช่วยในการปรับปรุงสมบัติ โดยการ ลดปริมาณน้ำอิสระในช่องว่าง ลดความพรุน โดยอาศัยใช้งานนาโนซิลิกาที่มีคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพเป็นวัสดุความเป็นปอลิไซลาลานสูง ขนาดอนุภาคเล็กมาก (ระดับนาโนเมตร) และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระในช่องว่างพรุนปริมาณลดลง จากคุณสมบัติดังกล่าวเมื่อนำไปใช้งานกับคอนกรีต จึงสามารถปรับปรุงโครงสร้างช่องว่างภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์ โดยซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของนาโนซิลิกาทำปฏิกิริยาปอลิไซลาลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ช่วยเพิ่มปริมาณ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ผล คือ ช่วยให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น เนื่องด้วยปฏิกิริยาปอลิไซลาลานเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วช่วงอายุต้น ช่วยในการอุดช่องว่างภายในระดับนาโนเมตร [15] ทำให้มีความพรุนน้อยลง ความแน่นเพิ่มมากขึ้น ความชื้นน้ำต่ำ [16, 17, 18, 19] และสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นในช่วงอายุต้น [22, 26, 27] คอนกรีตมีคุณสมบัติบางประการที่เพิ่มมากขึ้นจึงช่วยให้เพิ่มทางเลือกแก่การเลือกใช้งานคอนกรีตได้มากยิ่งขึ้น

การเพิ่มความต้านทานการเสื่อมสภาพคอนกรีตเนื่องจากการสัมผัสกับกรดและซัลเฟต ทำการลดความพรุน เพิ่มความทึบน้ำและลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) เนื่องจากสารละลายกรดและซัลเฟตจะเข้ามาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีผลทำให้คุณสมบัติหลายๆ ประการของคอนกรีตด้อยลง จึงมีการนำนาโนซิลิกาใช้งานแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตได้ดังเช่น เพิ่มความทึบน้ำ ลดความพรุน เพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต [19, 22, 24, 26, 27, 39, 40] และที่สำคัญหากทำการประยุกต์โดยปรับปรุงพื้นผิวของนาโนซิลิกาให้มีลักษณะไม่ชอบน้ำมาใช้งานจะช่วยให้โครงสร้างระดับนาโนเมตรของช่องว่างภายใน ลดการสัมผัสกับสารละลายกรดและซัลเฟต ช่วยลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมดังกล่าวมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป



ภาพ 24 ภาพจำลองพื้นผิวไฮเดรตซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาประเภทที่ไม่ชอบน้ำ

แนวความคิดของการใช้อนุภาคนาโนจากกากของเสีย (นาโนซิลิกาประเภทที่ไม่ชอบน้ำ) ปรับปรุงพื้นผิวของไฮเดรตซีเมนต์ให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสามารถทำได้ด้วยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ จะทำให้อนุภาคนาโนแขวนลอยในน้ำอิสระและตกตะกอนบนพื้นผิวของไฮเดรตซีเมนต์ด้วยแรงระหว่างประจุบนพื้นผิวระหว่างอนุภาคนาโนและพื้นผิวของไฮเดรตซีเมนต์ดังภาพ 25 (b) เพื่อช่วยสร้างความขรุขระบนพื้นผิวไฮเดรตซีเมนต์ระดับนาโน เป็นหลักการเดียวกันกับปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบอน ดังภาพ 25 (a) จากหลักการในข้างต้นเชื่อว่าจะสามารถเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีต เช่น การหดตัว การต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากกรด และซัลเฟตได้



ภาพ 25 ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบอนซึ่งเป็นตัวอย่างของการสร้างความขรุขระระดับนาโนซึ่งทำให้พื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น (a) และแบบจำลองแนวคิด (Conceptual Model) ของการใช้วัสดุนาโนซึ่งถูกปรับปรุง (b)