

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทัศน์

### 2.1 บทนำ

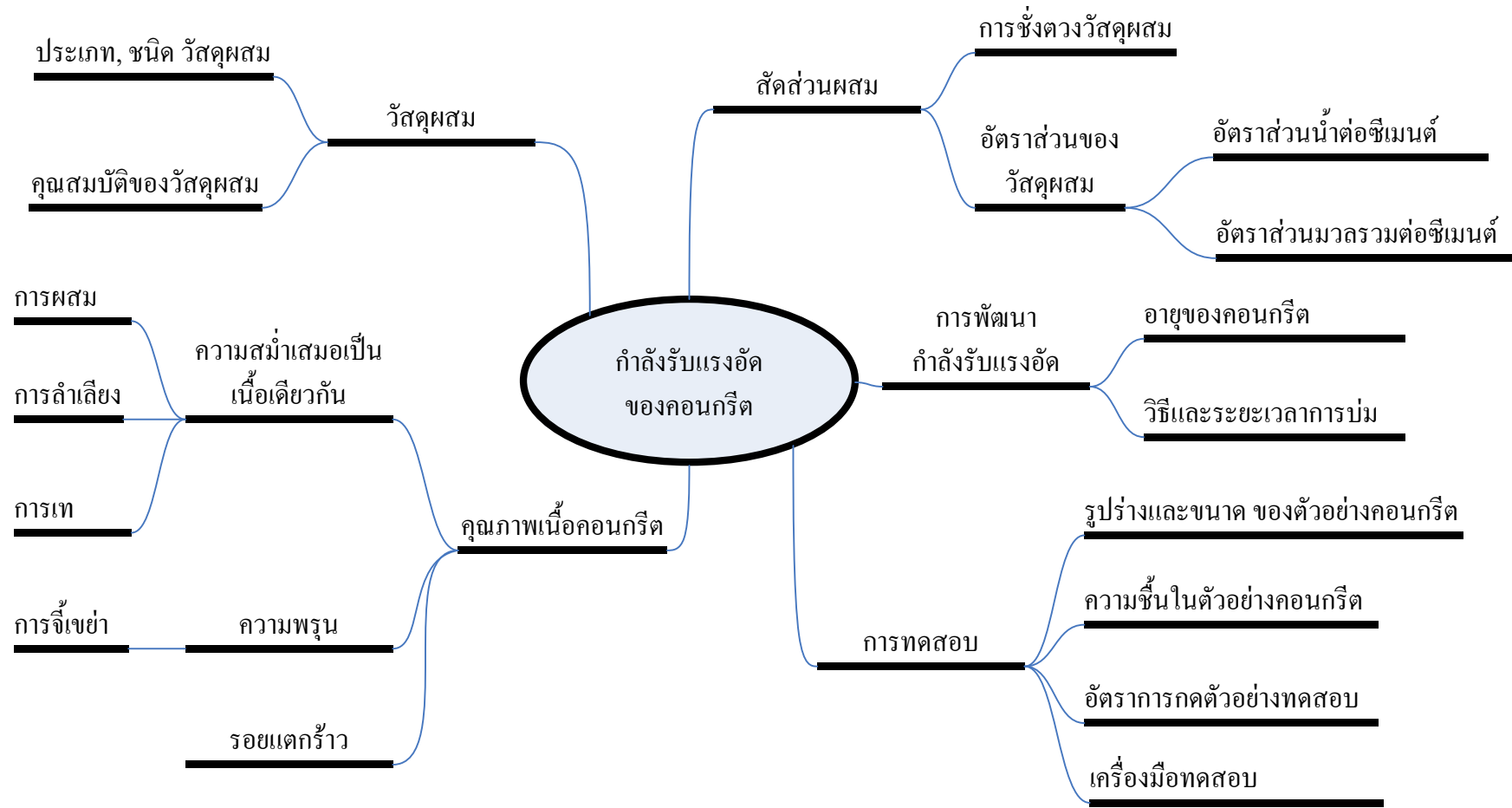
ในบทนี้จะกล่าวโดยสรุปเกี่ยวกับการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาตำรา, เอกสาร, วารสาร และงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งจะประกอบด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งแบ่งเป็นการพยากรณ์ด้วยวิธีทางสถิติ และโครงข่ายประสาทเทียม โดยการทบทวนวรรณกรรมจะเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ถึงความแม่นยำ และข้อจำกัดของแต่ละวิธีการพยากรณ์

### 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติที่เหมาะสม เช่น สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามความต้องการ, มีความคงทนสูง, ไม่ติดไฟ, สามารถเทหล่อในสถานที่ก่อสร้าง และตกแต่งผิวให้สวยงามได้ โดยทั่วไปคอนกรีตจะประกอบด้วยส่วนผสมพื้นฐาน 2 ส่วน คือ ซีเมนต์เพสต์ ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์, น้ำ, สารผสมเพิ่ม และ มวลรวม ซึ่งได้แก่ มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด เมื่อนำส่วนผสมดังกล่าวมาผสมกันจะได้คอนกรีตที่คงสภาพเหลวอยู่ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งเรียกสภาวะนี้ว่า คอนกรีตสด (Fresh Concrete) หลังจากนั้นคอนกรีตจะเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง ซึ่งจะเรียกคอนกรีตในสภาวะนี้ว่าคอนกรีตแข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete)

ในการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตในโครงการก่อสร้าง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การควบคุมคุณภาพของคอนกรีตสดก่อนที่จะนำไปเทในโครงการก่อสร้าง เช่น การทดสอบความชื้นเหลวของคอนกรีต (Slump), น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต (Bulk Density), ปริมาณอากาศในคอนกรีต (Air Content) และ อุณหภูมิของคอนกรีต (Temperature) เป็นต้น และการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเพื่อทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่นำไปใช้ในโครงสร้างนั้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบทางด้านกำลังของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength), กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength), กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) และกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) เป็นต้น

โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เป็นการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากกำลังรับแรงอัดจะบ่งบอกถึงคุณภาพโดยรวมของคอนกรีต อีกทั้งการคำนวณออกแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีการกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในโครงการ นอกจากนั้นกำลังรับแรงดึง, กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมักจะสามารถประเมินได้จากค่ากำลังรับแรงอัด [1]



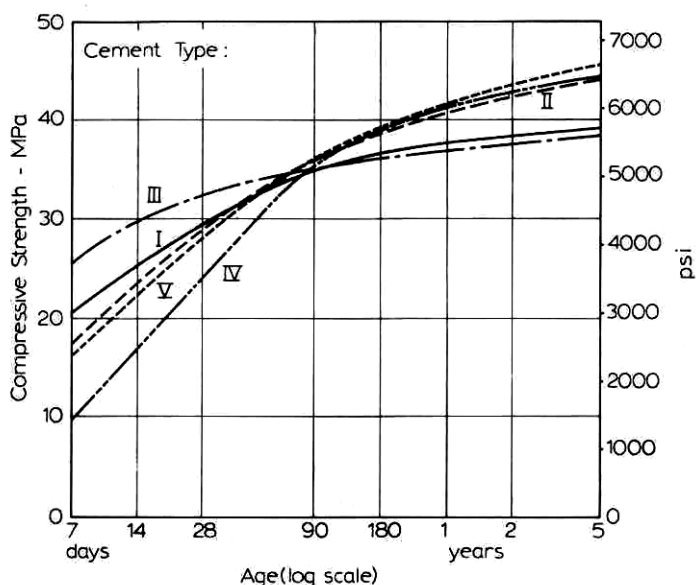
รูปที่ 2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

เนื่องจากมีปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลายปัจจัย [2 – 7] ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยสำคัญและจัดแบ่งกลุ่มได้ดังรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

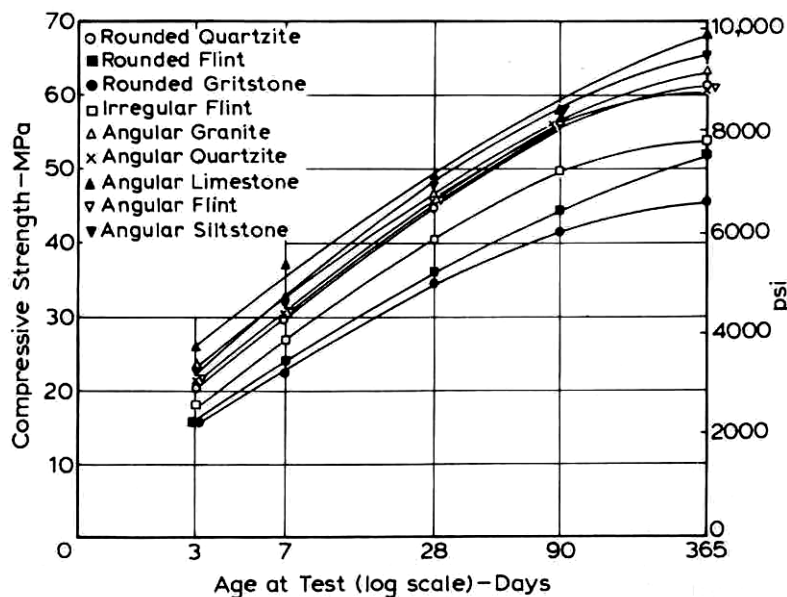
### 2.2.1 วัสดุผสม

จากที่กล่าวข้างต้นคอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์, มวลรวมหยาบ, มวลรวมละเอียด และน้ำ โดยอาจมีการใส่สารผสมเพิ่ม (Admixture) ลงเพิ่มเติม จำพวกสารกักกระจายฟองอากาศ (Air Entraining Agent), สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture) เช่น สารยืดเวลาการก่อตัว (Retarder), สารลดน้ำ (Plasticizer), สารลดน้ำจำนวนมาก (Superplasticizer) เป็นต้น และสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture) เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) และ ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เป็นต้น

ดังนั้นประเภทหรือชนิดของวัสดุผสมจึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปูนซีเมนต์ซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับกำลังรับแรงอัด โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีทั้งหมด 5 ประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.2 ส่วนประเภทและชนิดของมวลรวมก็ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ [3] อ้างอิงจาก [19]



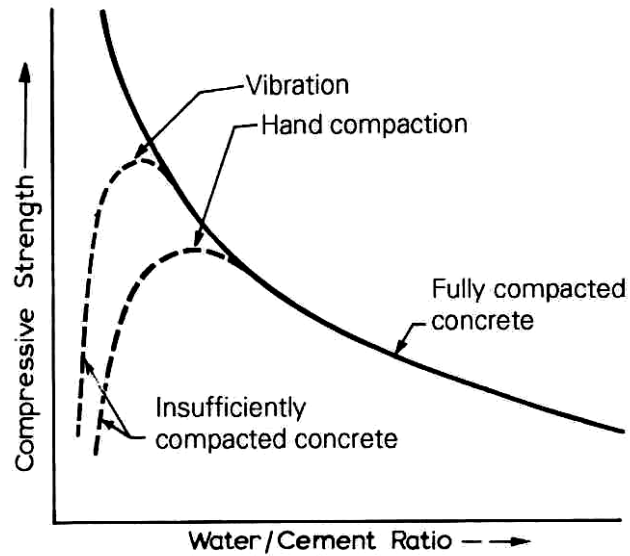
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมต่างชนิดกัน โดยกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.50 [3] อ้างถึงจาก [20]

ชนิด, ปริมาณ และผู้ผลิตสารผสมเพิ่มส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้และปริมาณของสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม ควรได้รับคำแนะนำจากผู้ผลิตเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพ

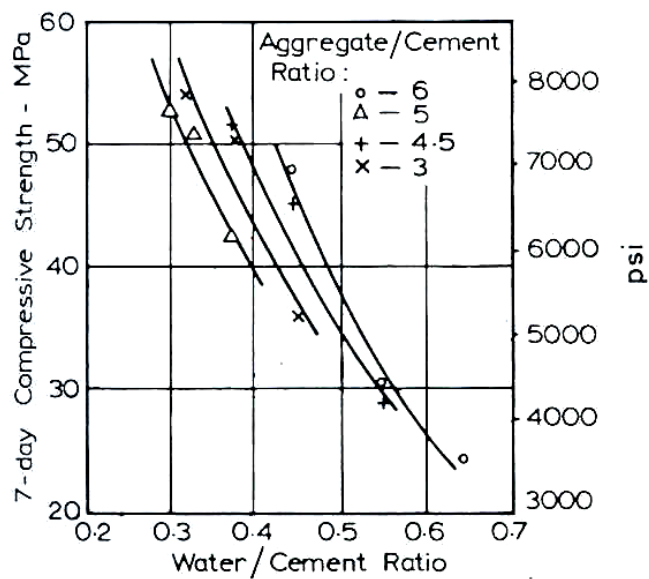
นอกจากนั้นคุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีตก็ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน ดังนั้นมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-46 [1] และ มาตรฐาน ASTM C94 [21] จึงได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

## 2.2.2 สัดส่วนผสม

ปริมาณของแต่ละวัสดุผสมในคอนกรีตส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน โดยอัตราส่วนวัสดุผสมที่มีความสำคัญได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ซึ่งแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังรูปที่ 2.4 และอัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อซีเมนต์ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรองลงมาจากรัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ [3]



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับ อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ใดๆ [3] อ้างอิงจาก [22]

นอกจากนั้นความถูกต้องแม่นยำในการชั่งตวงวัสดุผสมก็ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด ดังมาตรฐาน ASTM C94 [21] ที่กำหนดความผิดพลาดในการชั่งตวงวัสดุได้ไม่เกิน 1% สำหรับปริมาณซีเมนต์ และ 3% สำหรับปริมาณมวลรวม, น้ำ และสารผสมเพิ่ม อีกทั้งความถูกต้องแม่นยำของเครื่องชั่งก็มีผลด้วยเช่นกัน

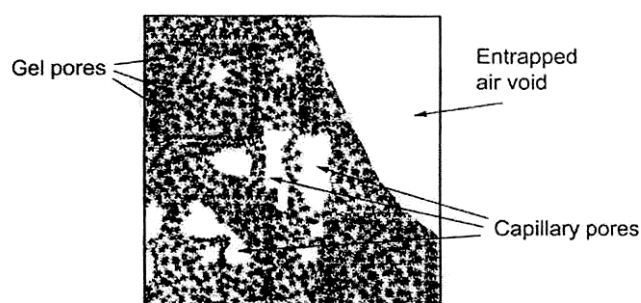
### 2.2.3 คุณภาพเนื้อคอนกรีต

คุณภาพเนื้อคอนกรีตจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับกระบวนการตั้งแต่การผสมคอนกรีตจนถึงช่วงเวลาที่คอนกรีตจะแข็งตัว โดยปัจจัยหลักสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพคือ ความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน, ความพรุน และรอยแตกร้าวในเนื้อคอนกรีต

การที่คอนกรีตมีส่วนผสมทั้งหมดสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันไม่แยกตัว ซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีคุณภาพและกำลังสม่ำเสมอ ต้องมีการระวังควบคุมกระบวนการดังต่อไปนี้

- การผสมคอนกรีต
- การลำเลียง
- การเท

นอกจากนั้นสาเหตุที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดคือความพรุนหรือช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต โดยช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตประกอบด้วย โพรงอากาศของน้ำที่ถูกกักไว้ (Entrapped Air), โพรงอากาศของฟองอากาศที่ถูกกักกระจาย (Entrained Air), โพรงคาпилลารี (Capillary Pores) และ โพรงเจล (Gel Pores) แสดงได้ดังรูปที่ 2.6

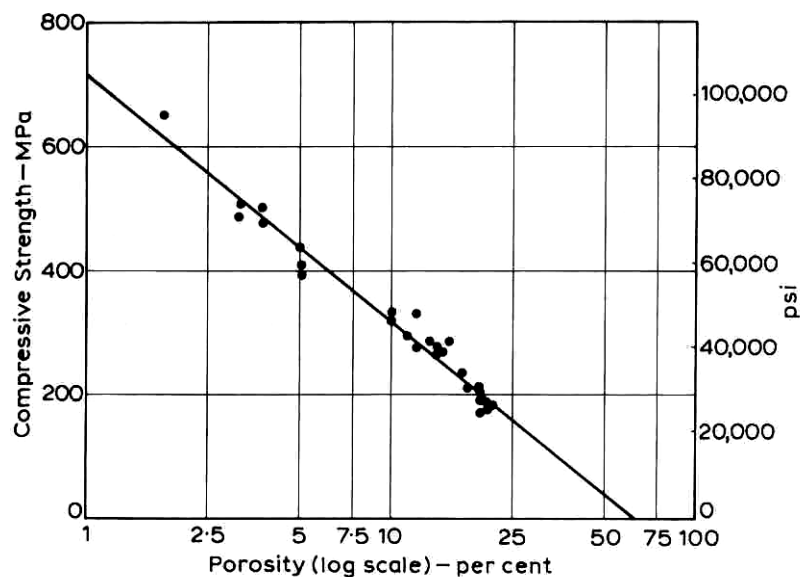


รูปที่ 2.6 ช่องว่างในเนื้อคอนกรีต [23]

โดยปริมาณของช่องว่างภายในคอนกรีตถ้ามีมากจนเกินไปจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดต่ำลง ดังรูปที่ 2.7 โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตประเภท โพรงอากาศของน้ำที่ถูกกักไว้, โพรงอากาศของฟองอากาศที่ถูกกักกระจาย และโพรงคาпилลารี โดยปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณช่องว่างในคอนกรีตได้แก่ ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีต, ส่วนผสมคอนกรีต และการจีเขย่าคอนกรีต ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อปริมาณช่องว่างในเนื้อคอนกรีต

การจีเขย่าคอนกรีตเป็นกระบวนการไล่ฟองอากาศออกจากคอนกรีตสดให้มากที่สุด ซึ่งทำให้อนุภาคของแข็งในคอนกรีตเข้าใกล้กัน ส่งผลให้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีช่องว่างน้อยที่สุด การจีเขย่าคอนกรีตที่ดีจะทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นสม่ำเสมอ, ไม่แยกตัว และความพรุนหรือช่องว่างในเนื้อคอนกรีตน้อยไม่เป็นรูโพรง ซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังและความคงทนสูง อย่างไรก็ตาม การจีเขย่าคอนกรีตที่มากจนเกินไปก็จะก่อให้เกิดผลเสียคือจะทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว โดย

มวลรวมหยาบจะทรุดตัวลงด้านล่างปล่อยให้ น้ำหรือซีเมนต์เพสต์ลอยขึ้นมาด้านบน [1] ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังและความทนทานของคอนกรีตบริเวณผิวหน้าที่จะลดต่ำลง



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับ ความพรุน [3] อ้างอิงจาก [24]

รอยแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีตเป็นสาเหตุที่สำคัญสาเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด รอยแตกร้าวมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยทั้งการออกแบบโครงสร้างเสริมเหล็กที่ไม่ถูกต้อง, การใช้วัสดุผสมที่ไม่มีคุณภาพ รวมทั้งจากการก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน

การแตกร้าวเกิดขึ้นได้ทั้งในช่วงก่อนและหลังคอนกรีตแข็งตัว โดยการแตกร้าวของคอนกรีตช่วงก่อนการแข็งตัวมักเกิดจาก

- การหดตัวขณะก่อสร้าง (Plastic Shrinkage) เกิดจากการแห้งหรือสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วของคอนกรีต

- การทรุดตัวขณะก่อตัว (Plastic Settlement) เกิดจากการเยิ้ม (Bleeding) ของคอนกรีต

- การเคลื่อนไหวขณะก่อสร้างของแบบหล่อ หรือค้ำยัน

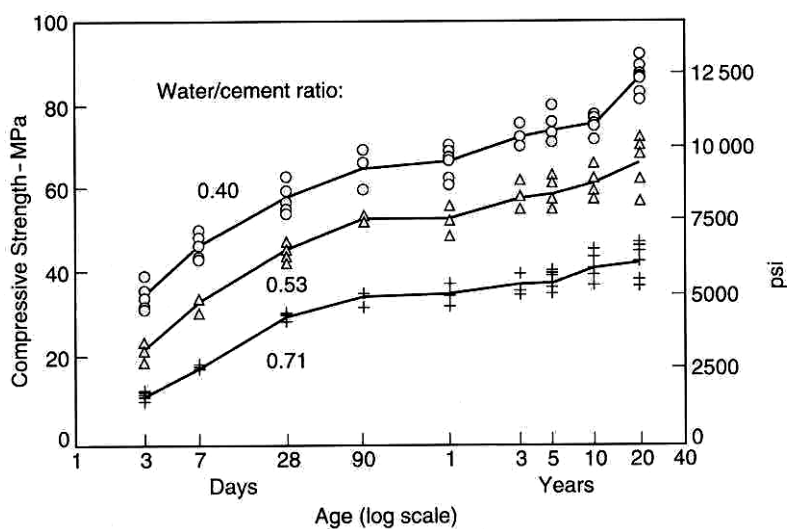
ส่วนการแตกร้าวหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากสภาพแวดล้อม, การออกแบบโครงสร้างเสริมเหล็ก หรือการก่อสร้างที่ไม่ถูกต้อง

#### 2.2.4 การพัฒนากำลังรับแรงอัด

ภายหลังจากคอนกรีตได้รับการผสม ปูนซีเมนต์และน้ำ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีการพัฒนาโครงสร้างทันที โดยเป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนสารประกอบ Tricalcium Silicate ( $C_3S$ ), Dicalcium Silicate ( $C_2S$ ), Tricalcium Aluminate ( $C_3A$ ) และ

Tetracalcium Aluminoferrite ( $C_4AF$ ) ในปูนซีเมนต์เป็นสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ซึ่งจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ส่งผลให้ความพรุนของเพสต์ลดลง ทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และการพัฒนากำลังของคอนกรีต

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต จะมีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อยๆลดอัตราการพัฒนากำลังลงเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีต กับ กำลังรับแรงอัด

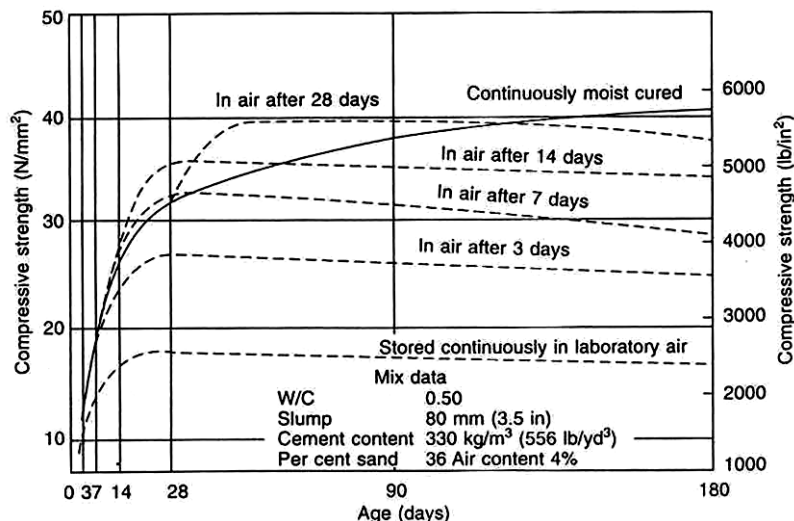


รูปที่ 2.8 การพัฒนากำลังรับแรงอัด (ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150 mm.) [3] อ้างอิงจาก [25]

อีกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด คือ วิธีและระยะเวลาในการบ่ม การบ่มคอนกรีตเป็นการป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัดพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง รูปที่ 2.9 แสดงถึงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเนื่องจากการบ่มขึ้นที่ระยะเวลาต่างกัน ซึ่งจะพบว่า

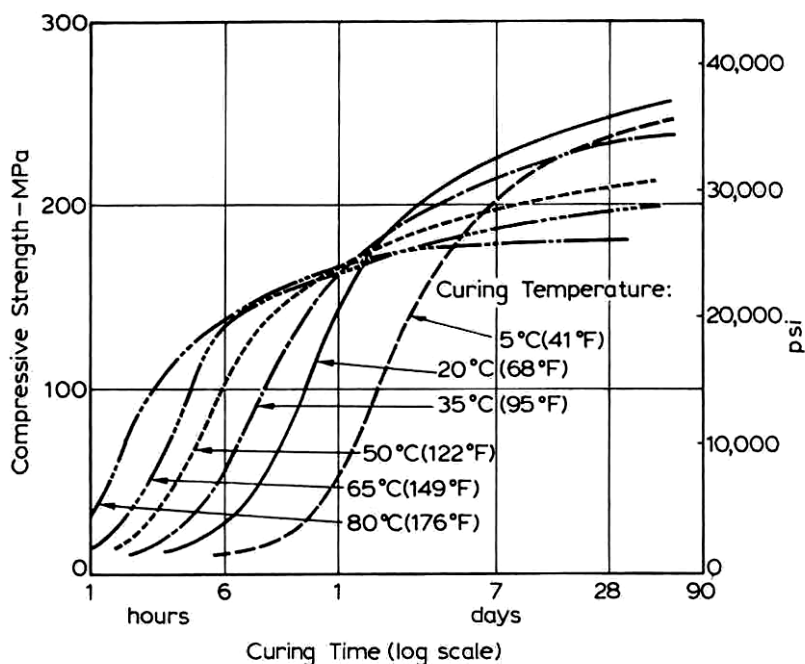
- กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันแรกๆ ถ้าได้รับการบ่มอย่างพอเพียง
- หลังจากคอนกรีตมีอายุ 28 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีโอกาสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถ้าได้รับการบ่มที่ดี
- ถ้าคอนกรีตไม่ได้รับการบ่ม กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นระยะหนึ่ง จนกระทั่งความชื้นภายในคอนกรีตหมดไป กำลังรับแรงอัดจะไม่เพิ่มขึ้นอีก



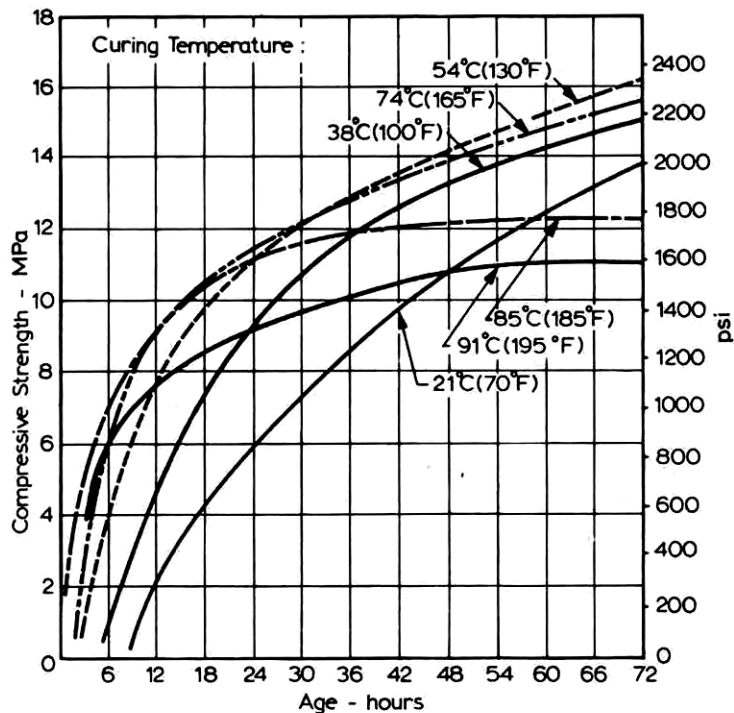


รูปที่ 2.9 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเนื่องจากการบ่มชื้นที่ระยะเวลาต่างกัน (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50) [6] อ้างถึงจาก [26]

ส่วนวิธีการบ่มแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามสภาพอุณหภูมิที่ใช้บ่มคือ การบ่มที่อุณหภูมิปกติ และการบ่มที่อุณหภูมิสูง การเลือกอุณหภูมิในการบ่มจะขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการ โดยการบ่มที่อุณหภูมิสูงจะทำให้คอนกรีตกำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วแต่กำลังประลัยสูงสุดจะต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า ความสัมพันธ์นี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 โดยการพัฒนากำลังในช่วงต้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต [3] อ้างถึงจาก [27]



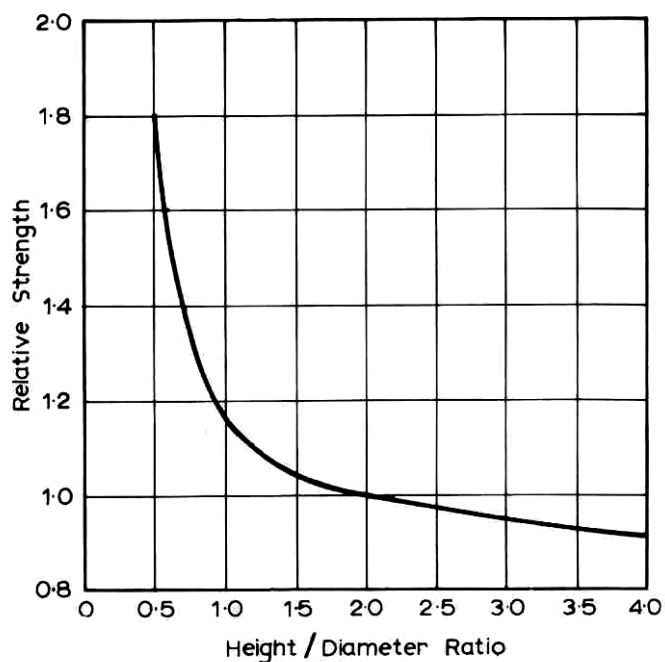
รูปที่ 2.11 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม กับการพัฒนากำลังของคอนกรีตในช่วงต้น [3] อ้างถึงจาก [19]

### 2.2.5 การทดสอบ

กระบวนการทดสอบเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดในกระบวนการทดสอบได้แก่

- รูปร่างและขนาดของตัวอย่างคอนกรีต

การที่ตัวอย่างคอนกรีตทดสอบมีขนาดต่างกัน จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ทดสอบได้จากรูปที่ 2.12 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กับ อัตราส่วนระหว่างความสูง/เส้นผ่านศูนย์กลาง (Height/Diameter,  $h/d$ ) ของตัวอย่าง โดยเทียบกับแท่งตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน ( $h/d$  เท่ากับ 2) แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มี  $h/d$  ต่ำจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีค่า  $h/d$  สูง ดังนั้นมาตรฐาน ASTM C42 [29] จึงได้กำหนดค่าปรับแก้กำลังรับแรงอัดในกรณีที่มีอัตราส่วน  $h/d$  น้อยกว่า 1.94 ดังตารางที่ 2.1

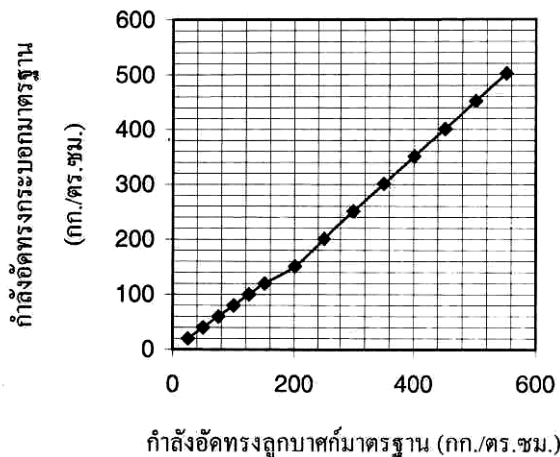


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กับ อัตราส่วนระหว่าง ความสูง/เส้นผ่านศูนย์กลาง ของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก [3] อ้างอิงจาก [28]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าปรับแก้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

อัตราส่วนระหว่าง ความสูง/เส้นผ่านศูนย์กลาง (h/d)	ค่าปรับแก้กำลังรับแรงอัด
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

รูปทรงของตัวอย่างคอนกรีตก็มีผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน โดยทั่วไปแล้วโครงการก่อสร้างในประเทศไทยจะมีการเก็บตัวอย่างคอนกรีต 2 รูปแบบคือ รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C31 [30] และ ASTM C192 [31] กับทรงลูกบาศก์ขนาด 15 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS EN 12390-2 [32] โดยแสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดของแต่ละตัวอย่างทั้ง 2 รูปทรงได้ดังรูปที่ 2.13



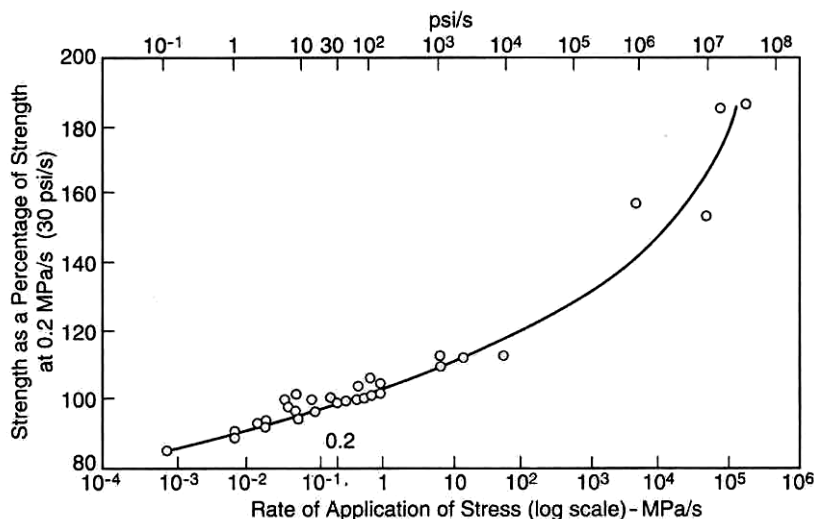
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกกับตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ [1]

- ความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตที่มีความชื้นมากกว่าจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่มีความชื้นน้อยกว่า เนื่องจากแรงภายในของน้ำในเนื้อคอนกรีต

- อัตราการกดตัวอย่างคอนกรีต

อัตราการกดตัวอย่างคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยถ้าใช้อัตราการกดสูงค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ก็จะสูงตามด้วย ดังรูปที่ 2.14 โดยมาตรฐาน ASTM C39 [34] ได้กำหนดอัตราการกดตัวอย่างระหว่าง 0.14-0.34 MPa/s (20-50 psi) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก และมาตรฐาน BS EN 12390-3 [35] ได้กำหนดอัตราการกดตัวอย่างระหว่าง 0.2-0.4 N/(mm<sup>2</sup>.s) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกดตัวอย่างคอนกรีต กับ กำลังของคอนกรีต โดยเทียบกับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่กดด้วยอัตรา 0.2 MPa/s (30 psi/s) [3] อ้างอิงจาก [33]

- เครื่องมือทดสอบ

เครื่องมือทดสอบต้องให้แรงอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดแรงกระแทก แผ่นรองกดต้องเรียบเป็นระนาบอยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนตัวอย่างคอนกรีต และต้องได้รับการสอบเทียบปรับแก้ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบกับค่าแรงมาตรฐาน

## 2.3 การพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

มีการพัฒนารูปแบบและวิธีการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดหลายรูปแบบวิธี โดยจุดมุ่งหมายเพื่อหาวิธีการที่จะพยากรณ์ให้มีความใกล้เคียงและแม่นยำเมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดทดสอบที่อายุ 28 วัน โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติของคอนกรีตเบื้องต้นในการพยากรณ์

รูปแบบวิธีการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดสามารถแบ่งประเภทได้เป็น 2 ประเภท คือ การพยากรณ์ด้วยวิธีทางสถิติ และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โดยในการทบทวนวรรณกรรมจะกล่าวถึงรูปแบบวิธีการที่ใช้ในการพยากรณ์, ความแม่นยำในการพยากรณ์ และข้อจำกัดของการพยากรณ์

### 2.3.1 การพยากรณ์กำลังรับแรงอัดด้วยวิธีทางสถิติ

การใช้สถิติในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดมีด้วยกัน 2 รูปแบบคือ

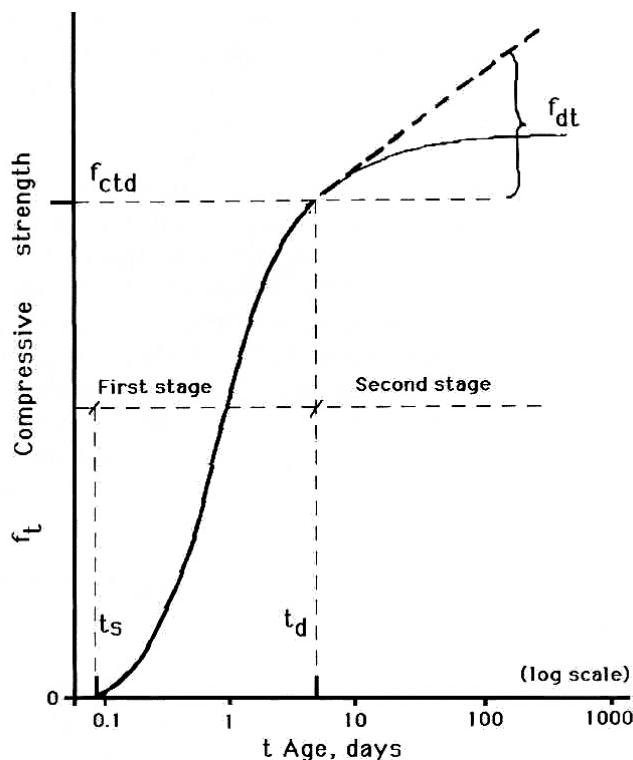
#### 2.3.1.1 การพยากรณ์โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอย

Snell [9] ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัด โดยใช้ปัจจัย ความชื้นเหลือ (Slump), อุณหภูมิคอนกรีต, อุณหภูมิอากาศ, ปริมาณอากาศใน

คอนกรีต (Air Content) และน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต (Unit Weight) โดยเก็บข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีต และทำการแยกวิเคราะห์แต่ละโรงงาน จากงานวิจัยพบว่า การพยากรณ์กำลังรับแรงอัดด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นให้ความแม่นยำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุ (Multiple Coefficient of Determination,  $R^2$ ) สูงสุดเท่ากับ 0.63 และความแม่นยำในการพยากรณ์จะขึ้นอยู่กับการควบคุมกระบวนการจัดเก็บอีกด้วย

จากผลการทดสอบความแม่นยำ  $R^2$  ที่ได้จากการวิจัยค่อนข้างต่ำ อีกทั้งข้อมูลที่ใช้ในสมการความถดถอยเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งข้อมูลเช่นความชื้นเหลือ และอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออายุของคอนกรีตสดมากขึ้น ดังนั้นความแม่นยำในการพยากรณ์จึงมีค่าต่ำ

จากนั้นในปี ค.ศ. 1987 Popovics [10] ได้เสนอสมการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดในรูปแบบสมการเอกซโปเนนเชียล (Exponential Model) โดยเป็นสมการเทียบกับการพัฒนากำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 2.15 ซึ่งแบ่งการพัฒนากำลังออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเริ่ม (Zeroth Stage) ตั้งแต่เริ่มผสมจนถึง  $t_s$ , ช่วงแรก (First Stage) อายุคอนกรีตจาก  $t_s$  จนถึง  $t_d$  และช่วงที่สอง (Second Stage) ตั้งแต่อายุคอนกรีต  $t_d$  เป็นต้นไป โดย  $t_s$  คืออายุที่คอนกรีตเริ่มพัฒนากำลัง ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) และ  $t_d$  คืออายุคอนกรีตที่การพัฒนากำลังในช่วงแรกสิ้นสุดและเข้าสู่ช่วงที่สอง



รูปที่ 2.15 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต[10]

ในช่วงเริ่ม (Zeroth Stage) ( $0 < t < t_s$ ) คอนกรีตกำลังเริ่มก่อตัวซึ่งมีค่าน้อยมากดังนั้นทางผู้วิจัยจึงสมมติให้ในช่วงนี้กำลังเท่ากับ 0 ดังสมการที่ 2.1

$$f_y = 0 \quad (2.1)$$

โดยที่  $f_y$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตช่วงเริ่ม

ช่วงแรก (First Stage) ( $t_s < t < t_d$ ) การพัฒนากำลังจะเป็นในรูปแบบสมการเอกซโพเนนเชียล (Exponential Model) โดยการพัฒนากำลังในช่วงนี้เกิดจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังสมการที่ 2.2

$$f_{ct} = f_0 f_{28} \frac{100 - C_3 e^{-a_1(t-t_s)(S/300)} - (100 - C_3) e^{-a_2(t-t_s)(S/300)}}{100 - C_3 e^{-a_1(28-t_s)(S/300)} - (100 - C_3) e^{-a_2(28-t_s)(S/300)}} \quad (2.2)$$

- โดยที่  $f_{ct}$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตช่วงแรก
- $f_{28}$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมเดียวกัน โดยใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และได้รับการบ่มชื้นตลอด 28 วัน
- $f_0$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ  $t_d$  ที่สมมติขึ้นมา ถ้าให้ปฏิกิริยาทางเคมีดำเนินตลอดเวลา
- $C_3$  คือ ปริมาณ  $C_3S$  ของปูนซีเมนต์ (%)
- $a_1, a_2$  คือ อัตราขององค์ประกอบการแข็งช่วงแรกและช่วงที่สอง ซึ่งขึ้นกับกำลัง, อายุ, ปริมาณ  $C_3S$ , ปริมาณ  $C_3A$ , ความละเอียดของซีเมนต์ และปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- $S$  คือ พื้นผิวจำเพาะทดสอบด้วยเบลนแอร์เพอร์มีอะบิลิตี (Blain Specific Surface) ของซีเมนต์ ( $m^2/kg$ ), สำหรับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ใช้  $300 m^2/kg$

การพัฒนากำลังรับแรงอัดช่วงที่สอง (Second Stage) ( $t_d < t$ ) สามารถแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบลอการิทึมได้ตามสมการที่ 2.3 ดังกราฟเส้นประในรูปที่ 2.15

$$f_{dt} = \omega \log(t/t_d) \quad (2.3)$$

โดยที่  $f_{dt}$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตช่วงที่สอง

$\omega$  คือ พารามิเตอร์การทดสอบ ซึ่งอาจเป็นฟังก์ชันของส่วนประกอบซีเมนต์

จากสมการที่เสนอโดย Popovics [10] ซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการไม่เชิงเส้นรูปแบบเอกซโปเนนเชียล (Exponential Model) ถึงแม้ว่าจะอยู่ในรูปแบบที่เข้าใจง่ายแต่ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ เช่น  $C_3, a_1, a_2, f_{28}, f_0$  และ  $\omega$  หรือแม้กระทั่งอายุในการเปลี่ยนช่วง (Stage)  $t_s$  และ  $t_d$  เป็นตัวแปรที่หาค่ายาก ซึ่งต้องใช้ผลการทดสอบในอดีตเป็นจำนวนมากและหาความสัมพันธ์จนได้เป็นตัวแปรดังกล่าว ทำให้สมการดังกล่าวไม่เหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้งาน

### 2.3.1.2 การพยากรณ์โดยใช้ระบบแผนผังควบคุมผลรวมสะสม (Cusum System)

แผนผังควบคุมผลรวมสะสม (Cumulative Sum Techniques, cusum) เป็นระบบที่ใช้ควบคุมการผลิต โดยคำนวณความแตกต่างระหว่างผลที่ได้ (Results) กับ ค่าเป้าหมาย (Target Values) และสะสมอยู่ในรูปแบบผลรวมสะสม (Cumulative Sum, cusum) ซึ่งแสดงในรูปแบบกราฟเพื่อแสดงแนวโน้มของเป้าหมาย

การนำระบบ cusum มาใช้ในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดพัฒนาโดย Brown [8] เพื่อการติดตามแนวโน้มของกำลังอัดเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดช่วงอายุแรกๆกับกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน โดยระบบจะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุแรกๆ กับที่อายุ 28 วัน และพยากรณ์กำลังรับแรงอัดจากคอนกรีตช่วงอายุแรกๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน

ซึ่งความแม่นยำในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดรูปแบบนี้ขึ้นอยู่กับความใกล้เคียงของข้อมูลที่จะพยากรณ์กับข้อมูลในอดีต เนื่องจากระบบจะหาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดโดยเทียบกับคอนกรีตที่ชนิดและประเภทเดียวกัน ดังนั้นถ้าคอนกรีตที่จะใช้ในการพยากรณ์มีความแตกต่างกันมากๆ ความแม่นยำในการพยากรณ์ก็จะลดลง

### 2.3.2 การพยากรณ์กำลังรับแรงอัดด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANN) เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ โดยสามารถเรียนรู้และปรับตัวตามข้อมูลที่ได้รับจากสภาพแวดล้อมภายนอก และให้คำตอบในปัญหาที่ซับซ้อนได้น่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงมีการวิจัยนำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้กับการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต [12-18] ซึ่งสรุปรูปแบบของโครงข่าย, ความแม่นยำ ได้ดังตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัด

	Ni, H. G., et al. (2000) [12]	Dias, W.P.S., et al. (2001) [13]	Lee, S. C. (2003) [14]	Kim, J. I., et al. (2004) [15]	Hola, J., et al. (2004) [16]	Kim, D. K., et al. (2005) [17]	Oztas, A. et al. (2005) [18]
ผลลัพธ์ (Output)	<ul style="list-style-type: none"> <li>กำลังรับแรงอัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ความชื้นเหลือ</li> <li>กำลังรับแรงอัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 2, 3, 7, 28 วัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>กำลังรับแรงอัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>กำลังรับแรงอัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>กำลังรับแรงอัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ความชื้นเหลือ</li> <li>กำลังรับแรงอัด</li> </ul>
ปัจจัยนำเข้า (Input)	<ol style="list-style-type: none"> <li>ประเภทปูนซีเมนต์</li> <li>อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์</li> <li>น้ำหนักน้ำ</li> <li>น้ำหนักซีเมนต์</li> <li>ขนาดโตสุดของหิน</li> <li>FM ของทราย</li> <li>S/A</li> <li>อัตราส่วนมวลรวม/ซีเมนต์</li> <li>ความชื้นเหลือ</li> <li>ประเภทสารผสมเพิ่ม</li> <li>ปริมาณสารผสมเพิ่ม</li> </ol>	<p>น้ำหนักของ</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>ซีเมนต์</li> <li>น้ำ</li> <li>ทราย</li> <li>หิน</li> <li>สารหน่วงการก่อตัว</li> </ol>	<p>73 ปัจจัยตามหมวดหมู่</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลเบื้องต้น (3 ปัจจัย)</li> <li>สัดส่วนผสม (9 ปัจจัย)</li> <li>ผลการทดสอบ (3 ปัจจัย)</li> <li>อุณหภูมิและความชื้น (58 ปัจจัย)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ความชื้นเหลือ</li> <li>อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์ (w/c)</li> <li>อัตราส่วนทราย/มวลรวม (S/A)</li> <li>น้ำหนักน้ำ</li> <li>น้ำหนักซีเมนต์</li> <li>น้ำหนักทราย</li> <li>น้ำหนักกรวด</li> <li>น้ำหนักหิน</li> <li>ปริมาณสารผสมเพิ่ม</li> </ol>	<p>ค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Ultrasonic Wave Velocity</li> <li>Reflection Number</li> <li>Pulling-Out Force</li> <li>Age</li> <li>Bulk Density</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์ (w/c)</li> <li>อัตราส่วนทราย/มวลรวม (S/A)</li> <li>น้ำหนักน้ำ</li> <li>น้ำหนักซีเมนต์</li> <li>น้ำหนักทราย</li> <li>น้ำหนักหิน</li> <li>ปริมาณสารผสมเพิ่ม</li> <li>ความชื้นเหลือ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>อัตราส่วนน้ำ/ตัวประสาน (w/binder)</li> <li>น้ำหนักน้ำ</li> <li>น้ำหนักทราย</li> <li>น้ำหนักเถ้าลอย</li> <li>ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศ</li> <li>ปริมาณสารลดน้ำจำนวนมาก</li> <li>น้ำหนักซิลิกาฟูม</li> </ol>
จำนวนข้อมูล เรียนรู้:ทดสอบ (ตัวอย่าง)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลห้องทดลอง 50:15</li> <li>ข้อมูลโรงผสมคอนกรีต 85:15</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลห้องทดลอง 93:44</li> <li>ข้อมูลคอนกรีตกำลังสูง 50:25</li> </ul>	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลโรงผสม A 98:10</li> <li>ข้อมูลโรงผสม B 98:10</li> </ul>	40:10	N/A	169:18

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

	Ni, H. G., et al. (2000) [12]	Dias, W.P.S., et al. (2001) [13]	Lee, S. C. (2003) [14]	Kim, J. I., et al. (2004) [15]	Hola, J., et al. (2004) [16]	Kim, D. K., et al. (2005) [17]	Oztas, A. et al. (2005) [18]
รูปแบบ โครงข่าย	11-7-1 Feedforward Network with Back Propagation	Multilayer Feedforward Network with Back Propagation	73-80-7 Multilayer Feedforward Network with Back Propagation	Multilayer Feedforward Network with Back Propagation	5-10-1 Multilayer Feedforward Network with Back Propagation	Probabilistic Neural Network	7-5-3-2 Multilayer Feedforward Network with Back Propagation
วิธีการเรียนรู้ (Algorithm)	N/A	N/A	N/A	Gradient Descent	Levenberg-Marquardt	N/A	Scaled Conjugate Gradients (SCGA)
ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Func)	N/A	N/A	N/A	Sigmoid Function	N/A	N/A	Sigmoid Function
จำนวนรอบ การเรียนรู้ (Epochs)	5,000 รอบ	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลโรงผสม A 13,786 รอบ</li> <li>ข้อมูลโรงผสม B 44,791 รอบ</li> </ul>	20 รอบ	N/A	10,000 รอบ
ความแม่นยำ ในการ พยากรณ์	<ul style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลห้องทดลอง MAPE=3.45%</li> <li>ข้อมูลโรงผสม คอนกรีต MAPE=5.38%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลห้องทดลอง Slump <math>R^2=0.267</math> Strength <math>R^2=0.604</math></li> <li>ข้อมูลคอนกรีต กำลังสูง Slump <math>R^2=0.476</math> Strength <math>R^2=0.753</math></li> </ul>	R = 0.9	<ul style="list-style-type: none"> <li>ข้อมูลโรงผสม A Error=0.5-3.9%</li> <li>ข้อมูลโรงผสม B Error=0.5-2.3%</li> </ul>	Error 4.84%	Error 3.9%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ความชื้นเหลว MAPE=5.78%</li> <li>กำลังรับแรงอัด MAPE=1.96%</li> </ul>

จากงานวิจัยในตารางที่ 2.2 พบว่ารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมส่วนใหญ่ให้ผลลัพธ์ (Output) เพียงกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเพียงอย่างเดียว โดยมีงานวิจัยของ Dias [13] และ Oztas [18] ที่มีผลลัพธ์ 2 ผลลัพธ์คือ กำลังรับแรงอัด และความชื้นเหลือ และงานวิจัยของ Lee [14] ที่มีผลลัพธ์ 5 ค่าคือกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 2, 3, 7 และ 28 วัน

ส่วนปัจจัยนำเข้า (Input) ส่วนใหญ่เป็นสัดส่วนหรือปริมาณของวัสดุผสมในคอนกรีต โดยอาจมีคุณสมบัติของวัสดุผสมเช่น ประเภทปูนซีเมนต์, ประเภทสารผสมเพิ่ม, ขนาดโกลุสของหิน, Fine Modulus ของทราย [12] และผลการทดสอบคอนกรีตสด [14, 15, 17] เพิ่มเติม ยกเว้นงานวิจัยของ Hola [16] ที่ใช้ค่าการทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นปัจจัยนำเข้า (Input)

รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการวิจัยส่วนใหญ่เป็นรูปแบบโครงข่ายแบบไปข้างหน้า โดยมีวิธีการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Feedforward Network with Back Propagation) ยกเว้นงานวิจัยของ Kim [17] ที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมประเภท Probabilistic Neural Network

ส่วนความแม่นยำในการพยากรณ์พบว่างานวิจัยเกี่ยวกับการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมให้ผลค่อนข้างแม่นยำคือมีความผิดพลาดประมาณ 2-5% ยกเว้นงานวิจัยของ Dias [13] และ Lee [14] ซึ่งให้ความแม่นยำไม่สูงนักคือมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.604, 0.753 และ 0.81 ตามลำดับ

## 2.4 บทวิเคราะห์

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพ แต่เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด อีกทั้งการทดสอบต้องรออายุคอนกรีตที่ 28 วัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อโครงการก่อสร้างในกรณีที่กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

วิธพยากรณ์ทางสถิติจึงถูกเสนอขึ้นมาแต่เนื่องจากขาดความแม่นยำในการพยากรณ์ [9], ความยากในการหาค่าของตัวแปร [10] และการไม่สามารถพยากรณ์ในสัดส่วนที่ต่างจากข้อมูลในอดีตมากๆ [8] ทำให้วิธีการพยากรณ์ทางสถิติขาดความเชื่อถือ, ความแม่นยำ และความจงใจในการนำไปใช้งาน ดังนั้นวิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมกับปัญหาที่มีความซับซ้อนจึงถูกเสนอเพื่อนำมาพยากรณ์กำลังรับแรงอัด

ถึงแม้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมจะให้ค่าพยากรณ์ที่ค่อนข้างแม่นยำ [12, 15-18] แต่เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาโครงข่ายไม่หลากหลาย กล่าวคือข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลจากโรงผสมคอนกรีตซึ่งสัดส่วนผสมคอนกรีตใกล้เคียงกัน ไม่กระจายหลากหลาย ทำให้เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมพยากรณ์ภายนอกข้อมูลที่ได้รับการเรียนรู้ ความแม่นยำในการพยากรณ์ของโครงข่ายจะลดต่ำลง [35]

ดังนั้นการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการพยากรณ์กำลังรับแรงอัดของโครงข่ายประสาทเทียม ต้องให้โครงข่ายเรียนรู้ความสัมพันธ์จากข้อมูลที่มีความหลากหลาย ครอบคลุมข้อมูลที่จะนำมาพยากรณ์ทั้งหมด ซึ่งจะได้กล่าวในงานศึกษาวิจัยนี้ต่อไป