บทที่ 2.
หลักการ ทฤษฎี และแนวความคิด

2.1 คอนกรีต

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของคอนกรีต

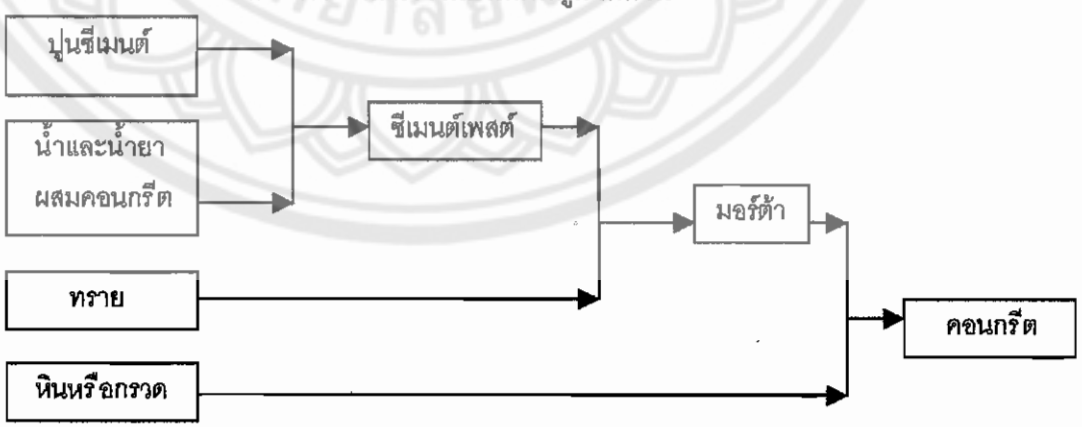
คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันมาเป็นเวลาช้านาน เป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่างๆ คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสานอันได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต ผสมกับวัสดุผสม อันได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการหลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

2.1.2 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำย่าผสมคอนกรีต โดยนำส่วนผสมต่างๆเหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต	เรียกว่า	ซีเมนต์เพสต์
ซีเมนต์เพสต์ ผสมกับ ทราย	เรียกว่า	มอร์ต้า
มอร์ต้า ผสมกับ หินหรือกรวด	เรียกว่า	คอนกรีต

สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



รูปที่ 1 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่างๆของคอนกรีต

2.1.3 หน้าที่และคุณสมบัติของส่วนผสม

2.1.3.1 ซีเมนต์เพสต์

หน้าที่ของซีเมนต์เพสต์

- เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม
- หล่อลื่นคอนกรีตลักษณะเทหล่อ
- ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ

- คุณภาพของปูนซีเมนต์
- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2.1.3.2 มวลรวม

หน้าที่ของมวลรวม

- เป็นตัวแทรกประสานราคาถูกที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์
- ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก

คุณสมบัติของมวลรวมที่สำคัญ

- มีความแข็งแรง
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ
- คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี

2.1.3.3 น้ำ

หน้าที่หลักของน้ำสำหรับงานคอนกรีต มี 3 ประการ คือ

- ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่างๆ
- ใช้ผสมทำคอนกรีต
- ใช้บ่มคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำในฐานะที่ใช้ผสมทำคอนกรีตยังแบ่งได้อีก 3 ประการ

- ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์
- ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้
- เคลือบหินทราย ให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์สามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ

2.1.3.4 น้ำยาผสมคอนกรีต

หน้าที่สำคัญของน้ำยาผสมคอนกรีต คือ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทั้งคอนกรีตที่เหลว และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านต่างๆ เช่น เวลาการก่อตัว, ความสามารถเทได้, กำลังอัด, ความทนทาน เป็นต้น

2.2 ซิลิกาฟูม

2.2.1 คอนกรีตที่ผสมสารซิลิกาฟูม

ซิลิกาฟูม คือ สารผสมเพื่อที่ทำให้กำลังอัดสูงขึ้น แต่ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย

ซิลิกาฟูม คือ Microsilica หรือ Condensed Silica Fume แต่ซิลิกาฟูม เป็นที่นิยมเรียกมากกว่า ซึ่งซิลิกาฟูมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Silicon และ Ferrosilicon alloys จากhigh – purity quartz และ ถ่านหิน (Coal) ในเตาเผาซึ่งจากการเผาจะไม่ให้แกส Sio ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และกลั่นในรูปอนุภาคที่ละเอียดของ Sio_2 เหตุนี้เองจึงเรียกว่า ซิลิกาฟูม (Silica Fume)

Silica Fume ในรูปของผลึกแก้ว จะทำปฏิกิริยาที่เร็วมาก และขนาดที่เล็กของอนุภาคจะทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดเร็วขึ้น พร้อมกับCalcium hydroxide โดยขบวนการ hydration ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จากขนาดอนุภาคที่เล็กของซิลิกาฟูม สามารถที่จะเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ และจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อเตาเผามีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนที่สูงจะทำให้ปริมาณคาร์บอนเกือบทั้งหมดถูกเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้ซิลิกาฟูมมีคาร์บอนผสมอยู่เป็นจำนวนที่น้อยลงและทำให้สีของซิลิกาฟูมอ่อนลงด้วย แต่สำหรับเตาเผาที่มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนต่ำ ปริมาณคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้จะน้อยซึ่งจะเหลือปริมาณคาร์บอนมาก และสีของซิลิกาฟูมก็จะเข้ม

ผลิตภัณฑ์ของซิลิกอนอัลลอยด์ ซึ่งมี Non-ferrous metals, ferrochromium, ferromanganese และ ferromagnesism รวมถึงซิลิกาฟูม ก็ยังไม่แน่นอนสำหรับการใช้ในคอนกรีตที่ยังไม่ก่อตัวปกติ Ferrosilicon alloys จะมีซิลิกอนอยู่ 50, 75 และ90 เปอร์เซ็นต์

ค่าความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมปกติมีค่าเท่ากับ 2.20 ซึ่งสามารถผสมกับความถ่วงจำเพาะของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.15 ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูมจะละเอียดและเล็กมากซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.03 - 0.3 ไมโครเมตร ค่าเฉลี่ยส่วนมากจะอยู่ต่ำกว่า 0.1 ไมโครเมตร

ซิลิกาฟูม โดยปกติจะถูกผสมอยู่ในส่วนผสม บางประเทศได้ผสมซีเมนต์และซิลิกาฟูมเข้าด้วยกัน 6.5 - 8 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนากำลังของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม

ในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ระหว่างอสัณฐานซิลิกาในซิลิกาฟูม และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไอเดรชั่นของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซิลิกาฟูมจะช่วยพัฒนาปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การพัฒนานี้เกิดขึ้นจากอนุภาคที่ละเอียดของซิลิกาฟูมทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอครอกไซด์จึงทำให้เกิดการพัมนากำลังอย่างรวดเร็ว

การละลายซิลิกาฟูมในกระบวนการอิ่มตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นภายในไม่กี่นาที ดังนั้นในเวลาที่เป็นไปได้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะถูกละลายจนอิ่มตัวด้วยน้ำกับแคลเซียมไอดรอกไซด์ หลังจากนั้นก็จะเกิดการสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ผิวของอนุภาคซิลิกาฟูม ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายในเวลาที่รวดเร็วมาก ยกตัวอย่างเช่น เมื่อมวลของซิลิกาฟูมเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของมวลทั้งหมดของวัสดุซีเมนต์ 1 ใน 2 ของซิลิกาฟูม จะถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาภายใน 1 วัน และ 1 ใน 3 ภายใน 3 วันแรก อย่างไรก็ตามในส่วนที่เหลือของซิลิกาฟูมจะทำปฏิกิริยาช้ามาก คือที่ 90 วัน

การเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในคอนกรีตซึ่งประกอบดวยซิลิกาฟูมสสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ การพัฒนาความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดขึ้นสูงเมื่อใช้ปอร์แลนด์ซีเมต์ประเภทที่ 3 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ประกอบด้วยซิลิกาฟูมสามารถบอกได้โดยที่อายุ 3 เดือนของคอนกรีตซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาวะกการบ่มคอนกรีตจนกระทั่งเมื่อคอนกรีตมีอายุ 3 ½ ปี ผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังอาจจะน้อยมาก เมื่อคอนกรีตเก็บไว้ในที่เปียกชื้น โดยที่ใช้ ซิลิกาฟูม 10 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.40 ภายใต้สภาวะการเก็บคอนกรีตในที่แห้งจะเกิดการเสื่อมถอยของกำลังในปริมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้จุดสูงสุดของค่าที่ 3 เดือน ซึ่งถูกตรวจสอบด้วยการกดก้อนตัวอย่าง อย่างไรก็ตามกำลังของคอนกรีตที่ผสมโดยใช้ซิลิกาฟูมสามารถตรวจสอบได้จนกระทั่งคอนกรีตอายุได้ 10 ปี ซึ่งสามารถที่จะแสดงให้ชัดเจนได้ว่าจะไม่เกิดการเสื่อมลดของกำลังของคอนกรีต การค้นพบนี้เป็นความสำคัญอย่างยิ่งเพราะพฤติกรรมของการทดสอบตัวอย่างทดสอบก็จะขึ้นอยู่กับอัตราความชื้นหรือการบ่มก้อนตัวอย่าง

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเกิดจากซิลิกาฟูม จะมีอัตราซีเมนต์ต่อซิลิกาต่ำกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างเดียว ค่าของอัตราของซีเมนต์ต่อซิลิกาในผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซิลิกาฟูม จะถูกพบว่ามันจะน้อยมากถ้าอัตราซีเมนต์ต่อซิลิกาน้อยที่สภาวะซิลิกาฟูมเป็นวัสดุประสาน

อีกลำดับหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาที่สูงมากของซิลิกาฟูม คือ การผสมกับน้ำอย่างรวดเร็ว ในเวลาเดียวกันโครงสร้างของอนุภาคที่เล็กมากของไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ จะทำให้เกิดความลำบาก สำหรับน้ำถ้าหากใช้ประโยชน์ของการเจาะไปข้างหน้าของวัสดุที่ไม่เกิดการไฮเดรตของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์หรืออนุภาคของซิลิกาฟูม

ในลำดับต่อมาการพัฒนากำลังจะเร็วกว่าการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างเดียว ซึ่งสามารถแสดงได้โดยตารางที่ 2 จากตารางเราสังเกตุได้ว่าจะไม่มีการเพิ่มกำลังของคอนกรีตภายใน 96 วัน ข้อมูลจากตารางที่ 2 หมายถึงอัตราผสมของอัตราส่วนวัสดุประสาน 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 4 ปริมาณซิลิกาฟูม 10,15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัสดุผสมซีเมนต์ทั้งหมดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.36 คอนกรีตจะอยู่ภายใต้สภาวะการบ่ม

การช่วยให้เกิดการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วของซิลิกาฟูม (ในระยะเวลา 7 วัน) น่าจะทำให้ดีในการผสมนั่นคือ การกระทำของสารที่ผสมเข้ามาและการพัฒนาพื้นที่ระหว่างมวลรวม พันธะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม โดยอนุภาคที่ใหญ่ควรได้รับการปรับปรุงเพราะมวลรวมที่ดีจะสามารถถ่ายแรงได้ดีกว่า

การแนะนำในการใช้จำนวนของซิลิการฟูม สำหรับพัฒนากำลังของคอนกรีตเกิดขึ้นจากการผสมและผลกระทบของผิวสัมผัส ควรจะคงที่ตามค่าของเวลา ที่กล่าวมานี้จะไม่เหมือนกับผลกระทบของกิจกรรมของวัสดุ Pozzolanic ในปริมาณที่คงที่ของซิลิกาฟูม การเพิ่มกำลังของคอนกรีตระหว่าง 7 และ 28 วัน ถูกพบว่าจะมีอิทธิพลต่อกำลังที่ 7 วัน สำหรับข้อเสนอแนะที่จะเพิ่มซิลิกาฟูมอย่างไรที่จะทำให้กำลังที่ 28 วันมีค่าเท่าใดก็ตาม การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูมเข้าไปในส่วนผสม(เพิ่มขนกว่าค่าจะแน่นอน) สำหรับค่าที่พบของคอนกรีตอายุ 28 วัน กำลังจะอยู่ในช่วงประมาณ 204-815 ksc การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเป็น 71 ksc สำหรับ 10 เปอร์เซ็นต์ , 103 ksc สำหรับ 20 เปอร์เซ็นต์ ของซิลิกาฟูม

ความสำพันธ์ระหว่างปริมาณของซิลิกาฟูมในส่วนผสม และผลของกำลังที่ต้องกล่าวถึงคือค่าประสิทธิภาพของซิลิกาฟูมสำหรับกำลัง ค่าประสิทธิภาพอื่น ๆ ของคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม คือ ความสามารถในการซึมได้ ความหลากหลายของปัจจัยต่าง ๆ แตกต่างกันไปตามคุณสมบัติสำหรับเหตุผลนี้ผลกระทบของซิลิกาฟูมจเกิดขึ้นจากคุณสมบัติของการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ตารางที่ 2 การพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

อายุของคอนกรีต	กำลังอัด (ksc) ของส่วนผสมที่มีซิลิกาฟูม (%)			
	0	10	15	20
1 วัน	265	255	285	275
7 วัน	459	612	642	663
28 วัน	588	723	764	754
56 วัน	652	754	775	744
91 วัน	642	795	744	754
182 วัน	744	744	723	795
1 ปี	805	785	713	815
2 ปี	877	836	723	836
3 ปี	897	917	866	897
5 ปี	877	815	682	713

2.3 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ในขั้นตอนการคำนวณอัตราส่วนผสมคอนกรีต จำเป็นต้องทราบข้อมูลพื้นฐานบางอย่างจากวัสดุที่จะนำมาเป็นส่วนผสม ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมหยาบและละเอียดด้วยตะแกรง
2. ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ
3. ค่า Bulk specific gravity และค่าดูดซึมของมวลรวมคละ
4. ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้สำหรับการผสมคอนกรีต
5. ความสัมพันธ์ระหว่างการแข็งแรงกับอัตราส่วนน้ำกับซีเมนต์

2.3.1 การออกแบบส่วนผสมที่ผสมที่เหมาะสำหรับประเทศไทย

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยนี้ เป็นวิธีการออกแบบที่นำมาตราฐานการออกแบบของประเทศอเมริกา และของประเทศอังกฤษ มาประยุกต์ให้เข้ากับสภาพของวัตถุดิบที่มีใช้ในประเทศไทย คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในตารางที่ 3

วัตถุดิบ	ค่าความถ่วงจำเพาะ (Sp.gr.)	ค่าการดูดซึม (%)
ปูนซีเมนต์	3.15	-
หินย่อย	2.70	0.50
ทรายแม่น้ำ	2.65	0.70

ตารางที่ 3 ค่ามาตราฐานที่ใช้ในการออกแบบ

ปริมาณน้ำและค่ายุบตัว

ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวมาตราฐานเมื่อใช้หินย่อยและทรายแม่น้ำที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) แสดงไว้ในตารางที่ 4

ค่ายุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต	
	หินย่อยขนาด 1" - # 4	หินย่อยขนาด3/4" - # 4
7.5 ± 2.5	180	190
10.0 ± 2.5	190	200
12.5 ± 2.5	200	210

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามต้องการ

ปริมาณส่วนละเอียด

จากการประยุกต์การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตราฐานต่าง ๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อใช้หินย่อย และทรายแม่น้ำ เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในประเทศไทย ปริมาณส่วนละเอียดอันได้แก่ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณทรายที่เหมาะสมที่จะทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ ไม่แยกตัว และได้กำลังอัดตามต้องการ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 5

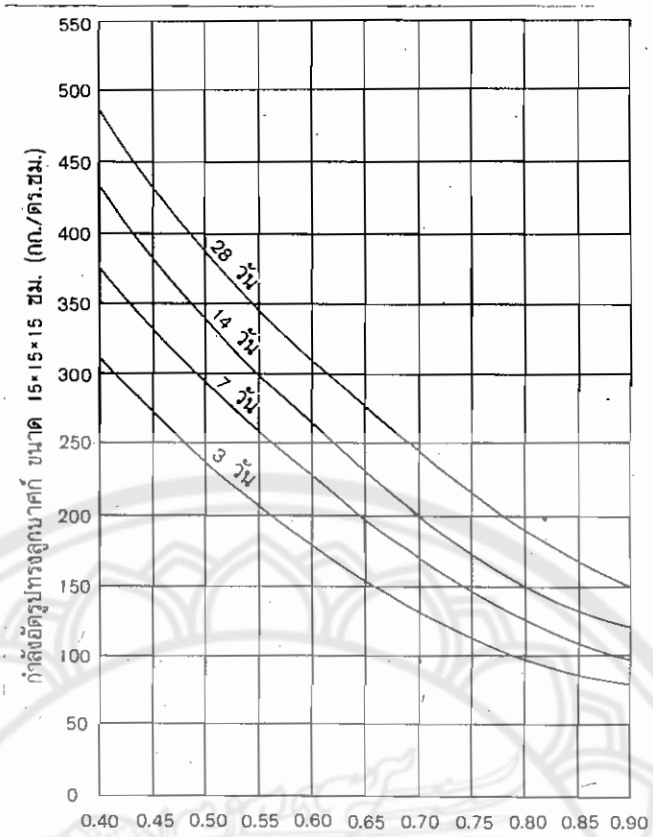
ขนาดหิน	ปริมาตรปูนซีเมนต์+ปริมาตรทราย
1" - # 4	38% โดยปริมาตร หรือ 380 ลิตร
3/4" - # 4	40% โดยปริมาตร หรือ 400 ลิตร

ตารางที่ 5 ปริมาณส่วนละเอียดเมื่อใช้หินขนาดใหญ่สุดแตกต่างกัน

สำหรับงานพิเศษบางประเภทเช่น งานคอนกรีตเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ที่ค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. ในการออกแบบอาจจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณส่วนละเอียดขึ้นไปเป็น 42-45% โดยปริมาตร เพื่อป้องกันปัญหาการแยกตัวของคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีต เป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ความสัมพันธ์ดังกล่าวสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผลิตใช้ในประเทศไทย แสดงในกราฟรูปที่ 2



รูปที่ 2 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และค่ากำลังอัดคอนกรีต

ผลของน้ำยาต่อการออกแบบส่วนผสม

น้ำยาผสมคอนกรีตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. ลดน้ำในส่วนผสม
2. ยืดเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทลดน้ำนี้ เมื่อผสมเข้าไปในส่วนผสมจะส่งผลให้ลดปริมาณน้ำได้ 5.10% ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

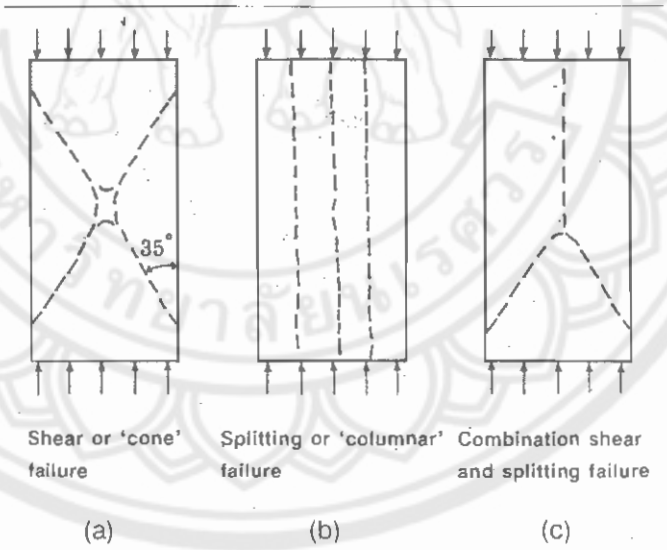
ค่ายุบตัว	ปริมาณน้ำต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีตเมื่อใส่น้ำยาประเภทน้ำ	
	หินย่อยขนาด 1" - # 4	หินย่อยขนาด3/4" - # 4
7.5 ± 2.5	170	180
10.0 ± 2.5	180	190
12.5 ± 2.5	190	200

ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามต้องการเมื่อใส่น้ำยาประเภทลดน้ำ

นอกจากนี้ในปัจจุบันยังนิยมใช้น้ำยาประเภทลดน้ำจำนวนมาก หรือน้ำยา Superplasticizer ซึ่งสามารถลดน้ำได้ 15-30% ดังนั้นปริมาณน้ำที่จะใช้เพื่อให้ได้ค่ายุบตัวมาตราฐานจะลดลงไปด้วย

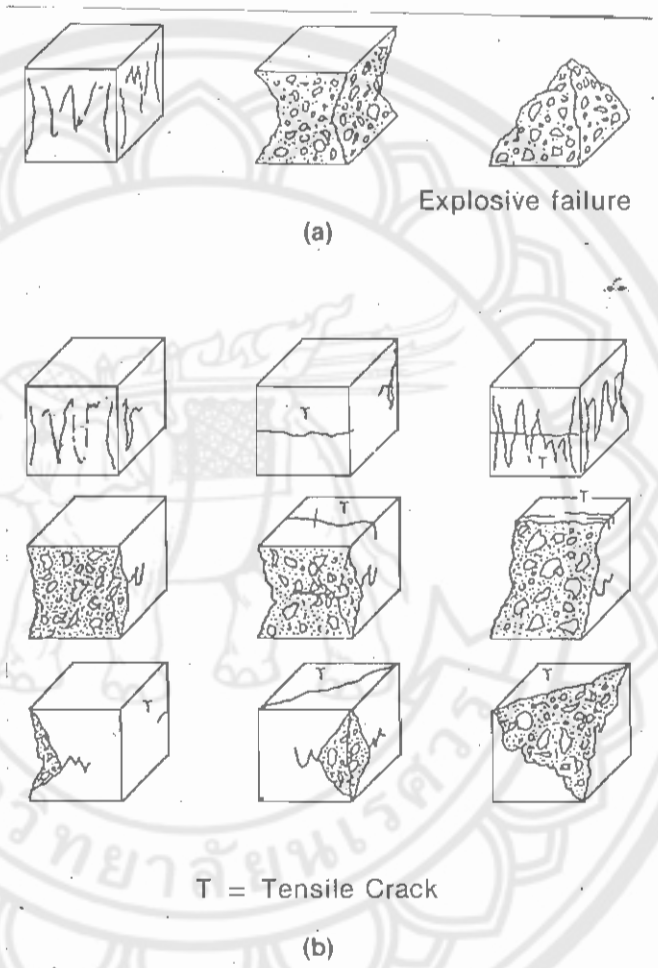
2.3.2 ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างคอนกรีต

ลักษณะการชำรุดแตกหักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่รับแรงอัด มักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear Failure) โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 3 (a) โดยเกิดจากการถูกเฉือนในระนาบที่เอียงกับแรงกด อันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง วัสดุผสมและความเสียดทานภายใน ดังนั้นมุมของการแตกหัก จึงมีค่าเท่ากับ $45^{\circ} - \varnothing/2$ เมื่อ $\varnothing$ เป็นมุมของความเสียดทานภายใน ของคอนกรีตซึ่งมีค่าประมาณ 20 องศา ดังนั้นระนาบของความเสียหายของตัวอย่างคอนกรีตจึงเบี่ยงประมาณ 35 องศา ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่าง อาจเป็นการแตกแบบแยกออก (Splitting Failure) ดังรูปที่ 3 (b) หรืออาจเป็นการรวมของลักษณะการแตกของทั้ง 2 แบบ (Combination Shear and Splitting Failure) ดังรูปที่ 3 (c)



รูปที่ 3 การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก

ส่วนลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้องจะแตกเป็นรูปปิรามิด ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 (a) ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้องและ
(b) การแตกที่ไม่ถูกต้อง

2.4 กำลังอัดของคอนกรีต

2.4.1 ความหมายของกำลังอัด

กำลังอัดมีบทบาทอย่างมากต่อความแข็งแรงของคอนกรีต โดยกำลังของคอนกรีตนี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อเนื้อคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังและความพรุน จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่อย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ, ปริมาณ, กำลัง, ลักษณะผิว, ขนาดใหญ่สุด, และแร่ธาตุต่าง ๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดึงน้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้หินมากขึ้นทำให้แรงอัดยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าลดลง

ขนาดของมวลรวม จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง

การเพิ่มปริมาณของมวลในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

2.4.2 การคำนวณกำลังอัด

การคำนวณหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต สามารถหาค่ากำลังอัดได้จากสมการดังนี้

$$\sigma = P / A$$

โดย σ คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีต

P คือ แรงอัดที่ใช้ในการกดก้อนตัวอย่างคอนกรีต

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงอัดในแนวตั้งฉาก

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง

คุณสมบัติของวัสดุผสม

ปูนซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์นอกจากนี้ แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกัน แต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างไปด้วยคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะทำให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

มวลรวม มวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ดีมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็กสำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดคละของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีส่วนขนาดคละไม่เหมาะสม คือมีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนคละที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่า ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต เช่นกัน

น้ำ น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูงน้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่ จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

การทำคอนกรีต

- การชั่งตวงส่วนผสม หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

- อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อ

2.4.4 การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตจะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้น้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้เต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น

จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะ หากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะลำเลียง หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

2.4.5 การบ่มคอนกรีต

ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ถ้าซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตไม่มีความชื้นอยู่ คอนกรีตก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักจะบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะบ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้ยิ่งนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2.4.6 การทดสอบ

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำในรูปของการชักตัวอย่างคอนกรีตสดมาทำก้อนตัวอย่าง โดยถือว่ากำลังของก้อนตัวอย่างเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้าง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตดังต่อไปนี้

<u>ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ</u> การใช้แท่งทดสอบที่ต่างขนาดและต่างลักษณะกันจะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตเกิดความแตกต่าง ดังแสดงในตารางที่ 7

ขนาดตัวอย่าง รูปทรงลูกบาศก์ (ซม.)	กำลังอัดสัมพัทธ์	ขนาดตัวอย่าง รูปทรงกระบอก (ซม.)		กำลังอัดสัมพัทธ์
		เส้นผ่าศูนย์กลาง	ส่วนสูง	
7.5	106	5	10	109
10	104	705	15	106
15	100	15	30	100
20	95	20	40	97
25	92	30	60	91
		45	90	87
		60	120	84
		90	180	82

ตารางที่ 7 ผลของขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่างต่อค่ากำลังอัด

นอกจากนี้ ความสูงของก้อนตัวอย่างจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 8

สัดส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D)	ค่าปรับแก้ของกำลัง
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

ตารางที่ 8 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ต่อกำลังอัด

วิธีการทำตัวอย่าง การทำให้คอนกรีตแน่น โดยการกระทุ้งด้วยเหล็ก จะให้ค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่นด้วยเครื่องเขย่า

ความชื้นในแท่งทดลอง ในขณะที่จะทำการทดสอบถ้าหากแท่งทดสอบมีความชื้นก็จะทำให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าแท่งทดสอบที่แห้งกว่า

อัตราการกด การทดสอบกำลังอัด ถ้าใช้อัตราการกดสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามที่มาตราฐานกำหนดไว้

2.4.7 ความผันแปรของกำลังอัด

กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการควบคุมทั้งวัตถุดิบ ขบวนการผลิต และขบวนการทดสอบ ซึ่งเมื่อสรุปจะได้ว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต มีค่าผันแปรอันเนื่องมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ

1) การผันแปรเนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีต (ผันแปรในขบวนการผลิต)
2) การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ (ผันแปรในขบวนการควบคุมคุณภาพ) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9

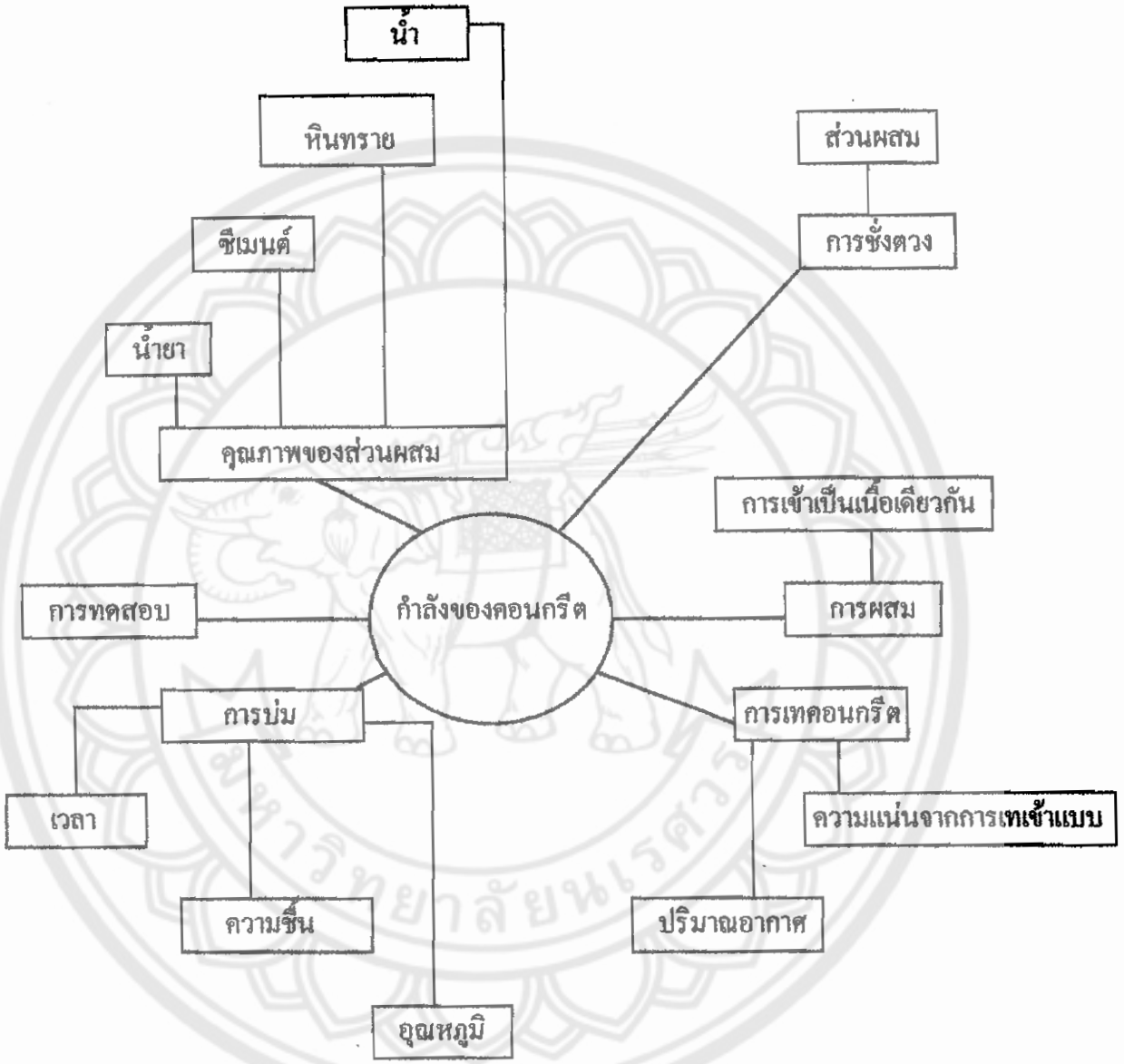
การผันแปรในสมบัติของคอนกรีตเอง	การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ
การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ - ควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมไม่ดีพอ - ความชื้นในหินและทรายมีมาก การผันแปรในปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสม - ขนาดคละของหินและทราย - วัสดุผสมมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ **การผันแปรในคุณภาพและอัตราส่วนผสมของวัสดุ** **- หิน, ทราย** **- ซีเมนต์**	**วิธีการสุ่มตัวอย่างไม่เหมาะสม** **วิธีการเตรียมตัวอย่างไม่แน่นอน** - ปริมาณการกระทุ้ง - การเคลื่อนย้ายตัวอย่าง - การดูแลตัวอย่างคอนกรีตสด **การเปลี่ยนแปลงจากการบ่ม** - อุณหภูมิ - ความชื้น **วิธีดำเนินการทดสอบไม่ดี** **- การหล่อฝา** **- การทดสอบกำลังอัด**

ตารางที่ 9 สรุปความผันแปรของกำลังอัด

2.4.8 สาเหตุที่กำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

การที่กำลังอัดของคอนกรีต ได้ค่าต่ำกว่าที่มาตราฐานกำหนดนี้ อาจมีสาเหตุมาจากหลาย ๆ ประการอันได้แก่

1) ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม
2) ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
3) ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดีพอ
4) การผสมไม่ดีพอ
5) มีสารอินทรีย์ต่าง ๆ มากเกินข้อกำหนด
6) ใช้หินทรายที่สกปรก
7) ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
8) ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม
9) การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
10) การบ่มไม่เพียงพอ
11) การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
12) อุณหภูมิผันแปรไป



รูปที่ 5 สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต