ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

คอนกรีตกำลังสูงมาก

คอนกรีตกำลังสูงมาก หมายถึงคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 550 กก/ซม^2. ขึ้นไป ซึ่งคอนกรีตกำลังสูงมากนี้มีประโยชน์ต่อการก่อสร้างมากในแง่ของการลดน้ำหนักชิ้นส่วนของโครงสร้างให้เบาลงและใช้งานได้อย่างกว้างขวาง คุณลักษณะพิเศษเกี่ยวกับกำลังอัดที่สูงมากนี้ สามารถใช้ในงานประเภท คอนกรีตอัดแรง การก่อสร้างอาคารสูง ๆ และการหล่อชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูปต่าง ๆ

คอนกรีตกำลังสูงมากมีหลายประเภท เช่น ประเภทที่ให้สารที่มีกำลังสูงซึมเข้าไปแทรกในช่องว่างอากาศในเนื้อคอนกรีต เช่น Polymer Impregnated Concrete[44, 45], Sulfure Impregnated Concrete อีกประเภทหนึ่งคือ คอนกรีตที่มีตัวเชื่อม (Cementing Agent) ที่มีกำลังสูง เช่น Epoxy Modified Concrete, Latex Concrete, Polymer Concrete และประเภทสุดท้าย คือ คอนกรีตที่ผลิตโดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้น้อยลง แล้วเติมน้ำยาผสมคอนกรีตเพื่อช่วยให้เกิดการไหลได้โดยสะดวก ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้คอนกรีตในประเภทหลังสุด ทั้งนี้เพราะ มีความยุ่งยากในกรรมวิธีการผลิตไม่มากนัก และสามารถใช้วัสดุก่อสร้างที่ใช้กันในท้องตลาดโดยทั่วไป ซึ่งจะทำให้ผลการวิจัยสามารถนำไปพัฒนาใช้ได้อย่างกว้างขวางต่อไป

การคัดเลือกวัสดุ

ในการคัดเลือกวัสดุผสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงมากตามที่ต้องการในการวิจัยนี้ ได้ทำการคัดเลือกวัสดุผสมต่าง ๆ ตามที่สามารถหาได้จากท้องตลาดโดยทั่ว ๆ ไป โดยนำมาทำการตรวจสอบเปรียบเทียบในขั้นต้น เพื่อหาชนิดและสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่จะให้กำลังอัดสูงสุดโดยพิจารณาจากคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

ก. ซีเมนต์ (Cement)

ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type 3 ในการหล่อตัวอย่างทดสอบทั้งหมดและใช้น้ำยาผสมคอนกรีตแบบให้การไหลสูง (Super Plasticizer) ที่มี Lignosulfonate Acid และ Napthelene เป็นสารเคมีพื้นฐาน เหตุที่เลือกใช้ซีเมนต์ชนิดนี้เพราะศึกษาพบว่า

1. ให้กำลังสูงกว่าในช่วงเวลาอันสั้น ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลสัดส่วนผสมของคอนกรีตว่า สัดส่วนใดจะให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าได้รวดเร็ว และในการทดลองนี้ยังต้องการให้คอนกรีตมีกำลังสูงมากในระยะเวลาอันสั้น เพื่อใช้กับการอัดแรงมากกว่าคอนกรีตธรรมดาถึงประมาณเท่าตัว โดยจะทำการตัดลวดอัดแรงในระยะเวลา 3 วัน หลังจากทำการหล่อคาน

2. มีความละเอียดกว่าทำให้ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ดีกว่าการใช้ซีเมนต์ Type 1 โดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ

3. สามารถรวมตัวเข้ากับน้ำยาผสมคอนกรีตได้ทั่วถึงมากกว่า ช่วยให้การกระจายของ Cement Paste ในมวลคอนกรีตเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้น้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น Lignosulfonate Acid Base จะมีสารบางอย่างช่วยในการหน่วงปฏิกริยาอยู่ด้วย ซึ่งจะแทรกซึมเข้าผสมกับซีเมนต์ Type 3 ได้ดีกว่า

อย่างไรก็ดี ซีเมนต์ Type 3 ก็ยังมีคุณสมบัติที่เป็นอุปสรรคอยู่บ้างสำหรับการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก กล่าวคือ

1. ทำให้คอนกรีตที่ผสมมี workability ต่ำกว่าซีเมนต์ Type 1 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน

2. คอนกรีตกำลังสูงมากที่ผสมซีเมนต์ Type 3 จะมีการแข็งตัวเร็วมาก โดยเฉพาะในกรณีที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง

สำหรับคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมในส่วนที่เกี่ยวกับ Workability สามารถแก้ไขโดยการใช้สารผสมช่วยในการไหล[15] ส่วนในคุณสมบัติเกี่ยวกับการแข็งตัวเร็วเกินไป อาจแก้ปัญหาได้โดยการผสมน้ำแข็งลงไปในคอนกรีตเพื่อช่วยลดอุณหภูมิลง รวมทั้งการผสมสารหน่วงปฏิกริยาด้วย[20]

ข. หิน (Coarse Aggregate)

ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมากนั้น หินนับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่มีปริมาณมากที่สุดในมวลคอนกรีต และคุณสมบัติของหินมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมาก โดยเฉพาะกำลังอัด

สำหรับคอนกรีตธรรมดานั้น กำลังรับแรงจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับแรงของ Cement Paste แต่ในคอนกรีตกำลังสูงมากนั้น ความแกร่งของหินและความสามารถในการยึดเกาะของ Cement Paste ต่อหินจะมีผลมากกว่า[15] ซึ่งในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงมาก ปรากฏว่า แท่งคอนกรีตทรงกระบอก 2 ชุดที่หล่ออายุเท่ากัน ด้วยส่วนผสมเท่ากันนั้น แท่งคอนกรีตชุดที่ใช้หินที่มี strength สูงกว่าจะมีกำลังอัดสูงกว่า ซึ่งเมื่อสังเกตุรอยแตกของแท่งคอนกรีตจะพบว่า มีระนาบของการแตก (plane of failure) ราบเรียบผ่านหิน จึงสรุปได้ว่า กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงมากชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความแกร่งของหินอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม หินที่มีความแกร่งสูงกว่า ใช่ว่าจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าเสมอไป ทั้งนี้ ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของหิน ขนาดและช่องว่างอีกด้วย

ตามปกติหินที่มีขนาดใหญ่จะต้องการน้ำในการผสมน้อยลงและคอนกรีตจะมีกำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำจะมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนคละของหิน แต่จากการทดลองของ Walkerและ Bloem[4] ได้ชี้ให้เห็นชัดว่า กำลังอัดของคอนกรีตจะสูงขึ้นเมื่อลดขนาดหินลง ทั้งนี้เนื่องจากขนาดพื้นที่ผิวทั้งหมดของหินเพิ่มขึ้นยังผลให้พื้นที่ยึดเกาะระหว่างหินกับ Cement Paste เพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับหินที่มีขนาดเท่ากัน ลักษณะรูปร่าง พื้นที่ผิวและสิ่งต่าง ๆ ที่เคลือบอยู่จะมีส่วนต่อกำลังอัดของคอนกรีตด้วย หินที่มีผิวขรุขระหรือมีแง่มุมมากกว่าจะต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่า

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลผลการทดลองผสมคอนกรีตด้วยหินขนาดต่าง ๆ กัน

ส่วนผสมที่	หิน กก./ม^3.	ทราย %	ซีเมนต์ กก./ม^3.	W/C โดยน้ำหนัก	สารผสมคอนกรีต ชนิด	สารผสมคอนกรีต ซีซี/ม^3.	ขนาดโตสุดของหิน	กำลังอัดของคอนกรีต (28 วัน)
3-1	1400	35	500	0.40	-	-	3/4"	413
3-2	1400	35	500	0.40	-	-	1/2"	454
3-3	1400	35	500	0.40	-	-	3/8"	461
9-1	1400	33	550	0.32	C	1000	3/4"	555
9-2	1400	33	550	0.32	C	1000	1.2"	654
9-3	1400	33	550	0.32	C	1000	3/8"	632
11-1	1300	40	550	0.30	A	1500	3/4"	588
11-2	1300	40	550	0.30	A	1500	1/2"	753
11-3	1300	40	550	0.30	A	1500	3/8"	761
15-1	1500	40	500	0.28	C	-	3/4"	603
15-2	1500	40	500	0.28	C	-	1/2"	950
15-3	1500	40	500	0.28	C	-	3/8"	867

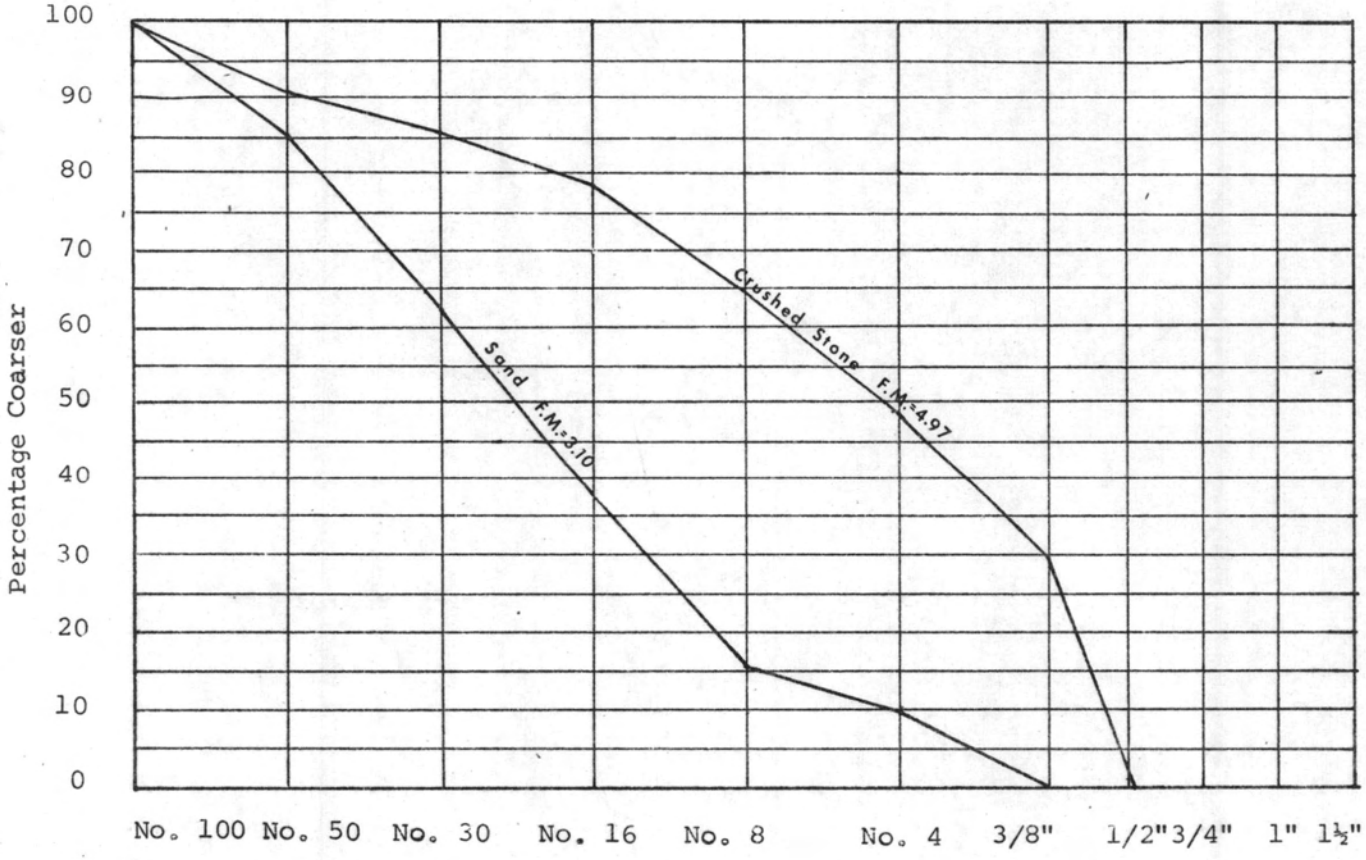
หินที่มีผิวเรียบและกลม และทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง แต่ในทางกลับกันหินที่มีผิวขรุขระและมีแง่มีมุมมากจะเพิ่มการยึดเกาะกันระหว่างหินและ Cement Paste ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต[15]

ในการคัดเลือกหินที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้นำหินย่อยซึ่งมีแหล่งจากจังหวัดสระบุรี ขนาด 3/4" 1/2" และ 3/8" โดยใช้หินแต่ละขนาดผสมคอนกรีตด้วยอัตราการผสมเดียวกัน แต่ให้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เป็นตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในสัดส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำต่ำนั้น สัดส่วนผสมที่ใช้หินขนาด 1/2" จะให้กำลังอัดสูงกว่าสัดส่วนผสมที่ใช้หินขนาด3/4"มาก และถ้าแม้ว่าหินขนาด 3/8"จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับหินขนาด 1/2" ดูจากส่วนผสมที่ 15 แต่ความสามารถในการไหลก็ไม่ดีเท่า จากการทดลองหาสัดส่วนคละของหินขนาด 1/2"และ 3/8" พบว่า หินขนาด 3/8" จะมีการกระจายสัดส่วนคละไม่ค่อยแน่นอนและมีหินฝุ่นเจือปนมาก ซึ่งจะทำให้ยากต่อการควบคุมคุณภาพ ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงใช้หินขนาด 1/2" เพียงขนาดเดียว

ค. <u>ทราย (Fine Aggregate)</u>

ทรายเป็นส่วนที่จะเสริมในช่องว่างของหินและเป็นส่วนประกอบอันสำคัญของ Cement Paste ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะหินเข้าด้วยกัน ลักษณะรูปร่างของทรายมีผลต่อปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมคอนกรีตมากกว่าหิน เนื่องจากพื้นผิวสัมผัสของทรายมากกว่าของหิน จากการวิจัยของ Wills[46] ได้สรุปไว้ว่า ในการผสมคอนกรีตกำลังสูงมากสามารถคาดคะเนปริมาณน้ำที่จะใช้ได้จากปริมาณช่องว่างของทรายที่ใช้ในการผสมคอนกรีต สัดส่วนคละของทรายมีความสำคัญไม่มากนักสำหรับกำลังอัดของคอนกรีต แต่ในทางปฏิบัติแล้ว สัดส่วนคละของทรายจะมีผลต่อ Workability ของคอนกรีตมาก จากผลของ Saucier, Smith และ Types[3] เกี่ยวกับคอนกรีตกำลังสูงมาก พบว่า โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของทรายระหว่าง 2.70 ถึง 3.20 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

อนึ่ง จากตัวอย่างของทรายที่ใช้ในการทดสอบนี้มีสัดส่วนคละดังแสดงในรูปที่ 8 หรือมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.10 และก่อนจะใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องล้างเพื่อลดฝุ่นออกและให้สะอาดยิ่งขึ้นโดยมีสิ่งเจือปนน้อยที่สุด เนื่องจากฝุ่นละอองและสิ่งเจือปนจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงมากนี้ลดลงอย่างมาก ทรายซึ่งใช้ในการทดลองนี้ได้จากแหล่งในจังหวัดสิงห์บุรี



รูปที่ 8 แสดงแผนภูมิส่วนคละของหินและทรายที่ใช้ในการทดลอง

ง. น้ำ (Mixing Water)

จำนวนน้ำในส่วนผสมคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงมาก สำหรับสัดส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดได้ก็ต่อเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมน้อยที่สุด แต่ก็เพียงพอที่จะทำให้ปฏิกริยาเคมีสมบูรณ์[2]

การไหลของคอนกรีตโดยทั่วไป สามารถเทียบได้กับการทดสอบการยุบตัว (Slump Test) แต่สำหรับในคอนกรีตกำลังสูง การยุบตัวเกิดขึ้นน้อยมาก การเพิ่มน้ำในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตมีการไหลที่ดีขึ้น แต่จะทำให้กำลังอัดลดลงมาก จึงต้องใช้สารผสมเพื่อการไหลลื่นช่วย

อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการผสมประมาณ $5^{\circ}C$ เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมคอนกรีตกำลังสูง เพราะจะช่วยให้การไหลลื่นดีขึ้นมาก[20] ในการวิจัยนี้ได้ทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตโดยผสมก้อนน้ำแข็งและพยายามรักษาอุณหภูมิของน้ำไว้ที่ $5^{\circ}C$ เมื่อทดลองผสมคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 23 ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.25 ผลปรากฏว่า คอนกรีตมีการไหลที่ดีมาก และการแข็งตัวจะไม่รวดเร็วมากเหมือนกับสัดส่วนที่ผสมน้ำในอุณหภูมิปกติ

จ. สารผสมคอนกรีต (Concrete Admixture)

จุดประสงค์ของการใช้สารผสมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก เพื่อเพิ่มการไหลลื่นของคอนกรีตและสามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยที่พยายามให้มีความหนาแน่น (Density) มากขึ้นด้วยซึ่งจะมีผลโดยตรงกับการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต สารผสมเพื่อการไหลลื่นชนิดที่ทำให้เกิดฟองอากาศในคอนกรีต (Air-Entraining Admixtures) ไม่เหมาะสำหรับคอนกรีตกำลังสูงเพราะฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตจะลดกำลังของคอนกรีต จากการทดลองของ Gaynor[8] พบว่า คอนกรีตกำลังสูงมากควรจะมีปริมาณฟองอากาศอยู่ระหว่าง 1-2 % ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงในอัตราที่สูงมาก

สารผสมคอนกรีตที่ช่วยลดน้ำในคอนกรีต (Water-Reducing Agents) ช่วยคอนกรีตให้มีการไหลลื่นได้ดี สารผสมคอนกรีตแบบนี้เรียกว่า Super Plasticizer ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารพื้นฐาน คือ

1. เกลือของ Sulfonated Lignin
2. เกลือของ Hydroxy Acids
3. Hydroxylated Polymers
4. Napthelene

ซึ่งสารประกอบดังกล่าวนี้นอกจากจะช่วยในการไหลของคอนกรีตแล้ว ยังเป็นตัวหน่วงปฏิกริยาอีกด้วย ฟองอากาศในคอนกรีตจากเกลือของ Sulfonated Lignin อยู่ในอัตราประมาณ 1-3 % ดังนั้น ในคอนกรีตกำลังสูงมากจึงมักใช้เกลือของ Hydroxy Acids หรือ Hydroxylated Polymers หรือ Napthelene แทน ทั้งนี้เพราะสารผสมสามตัวนี้ ปราศจากฟองอากาศ[15] สำหรับในการวิจัยนี้ได้ทำสารผสมคอนกรีตที่มีสารพื้นฐาน คือเกลือของ Sulfornated Lignin และ Napthelene มาใช้ในการทดลอง โดยใช้กับสัดส่วนผสมเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบ ซึ่งพบว่า ในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วง 0.30-0.35 คอนกรีตที่ผสมด้วยสารประกอบ Lignosulfonate จะมีการไหลที่ดี แต่จะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยสารประกอบ Napthelene เนื่องจากปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต และเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วง 0.28-0.30 สารทั้ง 2 ชนิดจะช่วยในการไหลได้ดีพอกัน แต่คอนกรีตที่ผสมสารประกอบ Lignosulfonate ก็ยังคงให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าและดูเหมือนว่า เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงอีก กำลังอัดก็จะไม่สามารถเพิ่มสูงเกิน 800 กก./ตร.ซม. เช่นที่ใช้สารประกอบ Napthelene ดูตารางที่ 3

ในการทดลองลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงไปเรื่อย ๆ พบว่า มีความจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารผสมคอนกรีตลงไปเพื่อช่วยในการไหลลื่นสูงถึง 2-3 เท่าที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำเอาไว้และปริมาณสารผสมคอนกรีตที่มากจนเกินไปทำให้คอนกรีตไม่แข็งตัว ซึ่งจากการวิจัยนี้ คอนกรีตที่ผสมด้วยสารประกอบ Napthelene ในอัตรา 2.6 % โดยน้ำหนักของน้ำที่ใช้ผสมยังคงมีการไหลลื่นที่ดีและให้กำลังอัดที่สูงถึง 1151 กก./ตร.ซม. ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้สารประกอบ Lignosulfonate สูงเพียง 2 % มีผลต่อการแข็งตัวของคอนกรีต ส่วนผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต Saucier, Smith และ Tynes[3] ได้สรุปผลการวิจัยว่า ปริมาณสารผสมคอนกรีตที่สูงเกินไป จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงแรกลดลง แต่อาจมีผลหรือไม่ต่อกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตก็ได้

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลผลการทดลองผสมคอนกรีตโดยสารผสมคอนกรีตต่างชนิดกัน

ส่วนผสมที่	หิน กก./ม^3.	ทราย %	ซีเมนต์ กก./ม^3.	W/C โดยน้ำหนัก	สารผสมคอนกรีต		ขนาดโตสุดของหิน	กำลังอัดของคอนกรีต	
					ชนิด	ซีซี/ม^3.		7 วัน	28 วัน
9	1400	33	500	0.32	A	1000	1/2"	532	617
	1400	33	550	0.32	C	1000	1/2"	603	654
11	1300	40	550	0.30	A	1500	1/2"	496	653
	1300	40	550	0.30	B	1500	1/2"	482	611
	1300	40	550	0.30	C	1500	1/2"	557	732
14	1400	42	500	0.28	A	2000	1/2"	584	759
	1400	42	500	0.28	B	2000	1/2"	502	733
	1400	42	500	0.28	C	2000	1/2"	578	867
23	1500	38	550	0.25	A	3000	1/2"	-	-
	1500	38	550	0.25	B	3000	1/2"	-	-
	1500	38	550	0.25	C	3000	1/2"	715	972
25	1500	40	550	0.23	C	3500	1/2"	803	1151
	1500	40	550	0.23	C	4000	1/2"	724	909

A - Lignosulfonate

B - Lignosulfonate + Retarder

C - Napthelene Base

ขั้นตอนในการใช้สารผสมช่วยในการไหลลื่นก็มีผลต่อคอนกรีตกำลังสูง โดยการผสมสารประกอบพวก Lignosulfonate เร็วเกินไปจะทำให้เกิดฟองอากาศในปริมาณสูง นอกจากนี้ระยะเวลาในการแข็งตัวของคอนกรีตกำลังสูงจะกินเวลาประมาณ 15-20 นาทีเท่านั้น ดังนั้น ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการผสมสารช่วยในการไหลลื่นคือก่อนหน้าจะเทจากโม่ผสมคอนกรีตประมาณ 5 นาที โดยผสมกับน้ำจำนวนหนึ่งเพื่อให้สารช่วยในการไหลลื่นกระจายได้ทั่วถึง

การทดลองผสมคอนกรีต

ในการทดลองผสมเพื่อหาสัดส่วนผสมที่สามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงพอที่จะใช้ในการวิจัยนี้ได้ทดลองผสมคอนกรีตสัดส่วนต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งความเหมาะสมนี้จะไม่พิจารณาในแง่ของกำลังอัดเพียงอย่างเดียว แต่จะต้องพิจารณาถึงความยากง่ายในการผสมและการเทแบบด้วย

ก. สัดส่วนผสมของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่จะนำไปใช้ในการหล่อคานคอนกรีตอัดแรงตามที่ต้องการได้ตั้งจุดประสงค์ไว้ว่า ส่วนผสมคอนกรีตจะต้องให้กำลังอัดที่ 28 วันได้ไม่ต่ำกว่า 800 กก./ตร.ซม. และจะต้องมีสภาวะการไหลที่ดีเพียงพอ สัดส่วนผสมที่ได้จัดเตรียมขึ้นมีทั้งหมด 25 ชุด แต่ละชุดหล่อขึ้น 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่ากำลังอัดเฉลี่ยเมื่อคอนกรีตอายุ 7 วันและ 28 วัน ไว้เปรียบเทียบกัน

การทดลองนี้ทำให้การลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตั้งแต่ 0.40 ลงไปจนกระทั่งน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตกับปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งปรากฏว่า คอนกรีตจะมีความหนาแน่นสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อลดปริมาณน้ำลงและกำลังอัดของคอนกรีตจะสูงขึ้นตามไปด้วย ดูจากตารางที่ 4 และ 5 จะเห็นได้ชัดว่า การลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงจาก 0.40-0.23 จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเพิ่มขึ้นจาก 353 กก./ซม^2. เป็น 1151 กก./ตร.ซม. ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก จึงจำเป็นที่จะต้องควบคุม

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลผลการทดลองผสมคอนกรีตโดยสัดส่วนผสมแตกต่างกัน

ส่วนผสมที่	หิน กก./ม^3.	ทราย %	ซีเมนต์ กก./ม^3.	w/C โดยน้ำหนัก	สารผสมคอนกรีต		ขนาดโตสุดของหิน	กำลังอัดของคอนกรีต	
					ชนิด	ซีซี/ม^3.		7 วัน	28 วัน
1	1350	48	350	0.40	-	-	1/2"	-	353
2	1400	43	400	0.40	-	-	3/8"	354	416
3	1400	35	500	0.40	-	-	1/2"	332	454
4	1400	43	400	0.38	-	-	1/2"	-	523
5	1300	43	500	0.38	-	-	1/2"	396	509
6	1400	36	500	0.35	-	-	1/2"	515	624
7	1400	33	550	0.35	-	-	1/2"	502	647
8	1300	57	450	0.32	-	-	1/2"	387	529
9	1400	33	550	0.32	C	1000	1/2"	503	654
10	1200	43	500	0.30	-	-	1/2"	-	593
11	1300	40	550	0.30	A	1500	1/2"	596	753
12	1400	36	550	0.30	-	-	1/2"	637	795

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลผลการทดลองผสมคอนกรีตโดยสัดส่วนผสมแตกต่างกัน

ส่วนผสมที่	หิน กก./ม^3.	ทราย %	ซีเมนต์ กก./ม^3.	W/C โดยน้ำหนัก	สารผสมคอนกรีต		ขนาดโตสุดของหิน	กำลังอัดของคอนกรีต	
					ชนิด	ซีซี/ม^3.		7 วัน	28 วัน
13	1350	44	550	0.28	A	2000	1/2"	540	774
14	1400	42	500	0.28	C	2000	1/2"	578	867
15	1500	40	500	0.28	B	2000	1/2"	703	950
16	1600	36	500	0.28	C	2000	3/4"	641	794
17	1400	46	550	0.26	C	2500	1/2"	762	890
18	1450	42	550	0.26	C	2500	1/2"	794	932
19	1500	37	550	0.26	C	2500	1/2"	761	925
20	1400	46	550	0.25	C	3000	1/2"	-	764
21	1450	42	550	0.25	C	3000	1/2"	622	782
22	1450	39	600	0.25	C	3000	1/2"	702	850
23	1500	38	550	0.25	C	3000	1/2"	715	972
24	1450	40	600	0.23	C	3500	1/2"	812	1019
25	1500	40	550	0.23	C	3500	1/2"	803	1151

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำ ซึ่งจะเป็นผลให้การไหลของคอนกรีตไม่ดีพอ จึงต้องนำสารช่วยในการไหลลื่น (Super Plasticizer) เข้ามาใช้

ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่คงที่ยังได้ทดลองเปลี่ยนอัตราส่วนของวัสดุผสมและซีเมนต์ เพื่อหาความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณหินจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ดูจากตารางที่ 4 เปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมที่ 10, 11, 12 หรือ 17, 18, 19 แต่ทั้งนี้ ปริมาณหินที่มากเกินไปก็อาจทำให้คอนกรีตนั้นมีปริมาณ Cement Paste ไม่เพียงพอที่ยึดหินเข้าด้วยกันได้อย่างแข็งแรง ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง ดังนั้น การพิจารณาปริมาณหินที่ใช้จึงจำเป็นต้องศึกษาจากสัดส่วนคละ โมดูลัสความละเอียด และทำการทดลองผสมประกอบด้วยส่วนปริมาณทรายที่เหมาะสมซึ่งพบจากการทดลองจะอยู่ระหว่าง 35-45 % ของหิน ถ้ามีปริมาณสูงกว่าหรือต่ำกว่าจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลง เช่น ในส่วนผสมที่ 1 และ 8 ดังตารางที่ 4 ส่วนปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 500-550 กก./ม^3 เมื่อพิจารณาปริมาณทรายและซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกันในรูปของ CementMortar ปริมาณจะต้องไม่น้อยเกินกว่าที่จะยึดเกาะหินเข้าด้วยกันและไม่มากจนเกินไปจนทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงอันเป็นผลโดยตรงให้กำลังอัดลดลงด้วย ซึ่งปริมาณ Cement Mortarที่จะทำให้ได้คอนกรีตกำลังสูงมากนี้ จากการทดลองพบว่า มีค่าประมาณ 70-85 % ของหินโดยน้ำหนัก ดูตารางที่ 6 สำหรับปริมาณซีเมนต์ใน Cement Mortar จะมีผลต่อความแกร่งของ Cement Mortar ในทำนองเดียวกับที่ Cement Mortar มีผลต่อคอนกรีต ซึ่งปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม ซึ่งพบจากการทดลองจะมีค่าระหว่าง 45-50 % ของ Cement Mortar โดยน้ำหนัก ดูตารางที่ 6

ในการทดลองหาสัดส่วนผสมนี้ พบว่า ส่วนผสมที่ 23 เหมาะที่จะนำมาใช้ที่สุด เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตเมื่ออายุ 28 วัน เท่ากับ 972 กก./ซม.^{2} ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่ใช่ส่วนผสมที่ให้กำลังอัดเฉลี่ยได้สูงสุดเท่าที่ทำการทดลองผสม แต่เป็นส่วนผสมที่มีการไหลลื่นดีพอที่จะเทลงในแบบหล่อคาน ซึ่งมีขนาดแคบและยาวได้โดยสะดวก ซึ่งจากการทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกหล่อพร้อมคานตัวอย่างเมื่ออายุ 3 วันจะมีค่าระหว่าง 327-452 กก./ซม.^{2} ซึ่งประมาณ 40 % ของกำลังอัดเมื่ออายุ 28 วัน ส่วนกำลังอัดเมื่ออายุ7 วันจะมีค่า

ตารางที่ 6 แสดงเปรียบเทียบอัตราส่วนของวัสดุผสมในคอนกรีต

ส่วนผสมที่	หิน กก./ม^3.	ซีเมนต์มอร์ต้า กก./ม^3.	ซีเมนต์มอร์ต้า / หิน	ซีเมนต์ กก./ม^3.	ซีเมนต์ / ซีเมนต์มอร์ต้า	กำลังอัดของคอนกรีต 28 วัน
13	1350	1144	0.85	550	0.48	774
14	1400	1088	0.78	500	0.46	867
15	1500	1100	0.73	500	0.45	950
16	1600	1076	0.67	500	0.46	794
17	1400	1194	0.85	550	0.46	890
18	1450	1159	0.80	550	0.47	932
19	1500	1105	0.74	550	0.50	925
20	1400	1194	0.85	550	0.46	764
21	1450	1159	0.80	550	0.46	782
22	1450	1165.5	0.80	600	0.51	850
23	1500	1120	0.75	550	0.49	972
24	1450	1180	0.81	600	0.51	1019
25	1500	1150	0.77	550	0.48	1151

ระหว่าง 536-904 กก./ซม.^{2} โดยจะมีค่าประมาณ 80 % ของกำลังอัดเมื่ออายุ 28 วัน ซึ่งมีค่าระหว่าง 819-1096 กก./ซม.^{2} ส่วนค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของ Secant Modulus ที่หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแท่งคอนกรีตตามรูปที่ 9-14 จะมีค่าระหว่าง $3.20 \times 10^5 - 5.10 \times 10^5$ กก./ซม.^{2} โดยจะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 2-3 เท่า

ข. การผสม การเทและการบ่ม

1. การผสม (Mixing)

ในการผสมคอนกรีตซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยกว่า 0.35 นั้น จากการทดลองพบว่า วิธีที่เหมาะสมที่สุด คือ การผสมแห้ง โดยใส่หินและทรายลงไปในโม่ผสมกันก่อนแล้วจึงใส่ซีเมนต์ลงไปจนสัดส่วนทั้งหมดกระจายเข้ากันดีแล้วจึงค่อยใส่น้ำลงไป ส่วนผสมคอนกรีตจะมีลักษณะข้นเหนียวมาก การผสมแห้งจะทำให้สัดส่วนเข้ากันดีและทำให้เนื้อคอนกรีตสม่ำเสมอ การผสมน้ำควรจะพ่นออกเป็นละออง (Spray) ให้กระจายทั่วถึงทั้งโม่ ในการผสมคอนกรีตกำลังสูงนี้ โม่ที่ใช้ในการผสมคอนกรีตธรรมดาไม่สามารถจะเหวี่ยงมวลคอนกรีตเหลวที่มีปริมาณน้ำน้อยได้แรงพอที่จะทำให้คอนกรีตผสมเข้ากันเป็นอย่างดี เพราะมีความเร็วน้อยไป ดังนั้น โม่ที่ใช้ควรจะเป็นชนิดที่มีความเร็วสูงและมีลักษณะรูปทรงกระบอกนอน จะให้ผลในการผสมได้ดีที่สุด

ระยะเวลาที่ใช้ในการผสมคอนกรีตในการทดลองพบว่า หลังจากที่ผสมน้ำลงไปในโม่แล้วประมาณ 5 นาที สัดส่วนจะเริ่มเข้ากันดีและมีลักษณะเป็นก้อนเดียวกันคล้ายดินเหนียว จึงเติมน้ำส่วนสุดท้ายที่มีสารผสมคอนกรีตลงไป จากนั้นส่วนผสมคอนกรีตจะค่อย ๆ อ่อนตัวลงและเริ่มไหลไปตามแรงเหวี่ยงของโม่ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 5-8 นาทีจึงจะไหลได้โดยสะดวกทั้งหมด ซึ่งเป็นเวลาที่สมควรนำออกจากโม่ไปเทลงแบบ เนื่องจากคอนกรีตจะแข็งตัวหลังจากนี้ไปประมาณ 15-20 นาที เร็วกว่าคอนกรีตธรรมดามาก

การวัดการไหลของคอนกรีตในการทดลองพบว่า การใช้วิธีทดสอบการยุบตัว (Slump Test) จะให้ค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากคอนกรีตแห้งมาก จึงต้องอาศัยการสังเกตและเปรียบเทียบความแตกต่าง ดังนั้น อาจจำเป็นต้องหาวิธีการที่เหมาะสมมาใช้ในการวัดต่อไป

2. การเท (Placing)

การเทคอนกรีตกำลังสูงมาก ซึ่งมีความข้นเหนียวสูงลงในแบบหล่อยากลำบากกว่าคอนกรีตธรรมดามาก ซึ่งจากการทดลองพบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 0.30 ลงไป ปัญหาที่สำคัญก็คือ การเกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่ในเนื้อคอนกรีต การใช้เครื่องเขย่า (Vibrator) จะช่วยให้คอนกรีตกระจายออกและต้องใช้เวลานานจึงจะได้ผลดี จากการทดลองพบว่า การใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตตั้งแต่เริ่มเทจนสิ้นสุดการเทตลอดเวลาไม่มีผลต่อการแยกตัวของส่วนผสมคอนกรีตเลย แต่ปัญหาที่เกิดจากการเขย่าคอนกรีตแบบนี้ คือ หลังจากดึงหัวจี้ออกจากเนื้อคอนกรีตแล้วจะเกิดเป็นโพรงขึ้นโดยคอนกรีตที่อยู่โดยรอบไม่ไหลเข้าไปแทนที่ การดึงหัวจี้ออกจึงต้องกระทำอย่างช้า ๆ นอกจากนี้ เครื่องเขย่าไม่สามารถทำให้คอนกรีตแผ่กระจายเต็มแบบได้ เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจะกระจายออกในรัศมีจำกัด เนื่องจากความข้นเหนียวของคอนกรีต การใช้เครื่องสั่นแบบ (Formed Vibrator) จึงจำเป็นสำหรับการเทคอนกรีตกำลังสูงมาก อีกทั้งความแรงของเครื่องเขย่าและจำนวนต้องมากพอจึงจะทำให้การเทประสบผลดี

3. การบ่ม (Curing)

ในการวิจัยนี้ได้แยกแท่งคอนกรีตออกบ่มด้วยวิธีต่าง ๆ กันคือ ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง บ่มในห้องพ่นละอองน้ำและแช่ไว้ในน้ำ เมื่อนำไปทดสอบกำลังอัดดู ปรากฏว่า ความแตกต่างของกำลังอัดซึ่งสืบเนื่องมาจากสภาพการบ่มแตกต่างกัน มีผลมาก ดูตารางที่ 7 คอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกัน เมื่อบ่มโดยแช่น้ำเอาไว้จะมีกำลังอัดสูงถึง 867 กก./ตร.ซม. ส่วนแท่งที่บ่มไว้ในห้องพ่นละอองน้ำจะมีกำลังอัดเท่ากับ 703 กก./ตร.ซม. ในขณะที่แท่งคอนกรีตที่ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้องจะมีกำลังอัดเพียง 411 กก./ตร.ซม. ดังนั้น จะเห็นได้ว่า วิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับบ่มคอนกรีตกำลังสูงมากก็คือ การบ่มไว้ในน้ำ จึงจะทำให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตสูงตามความต้องการ

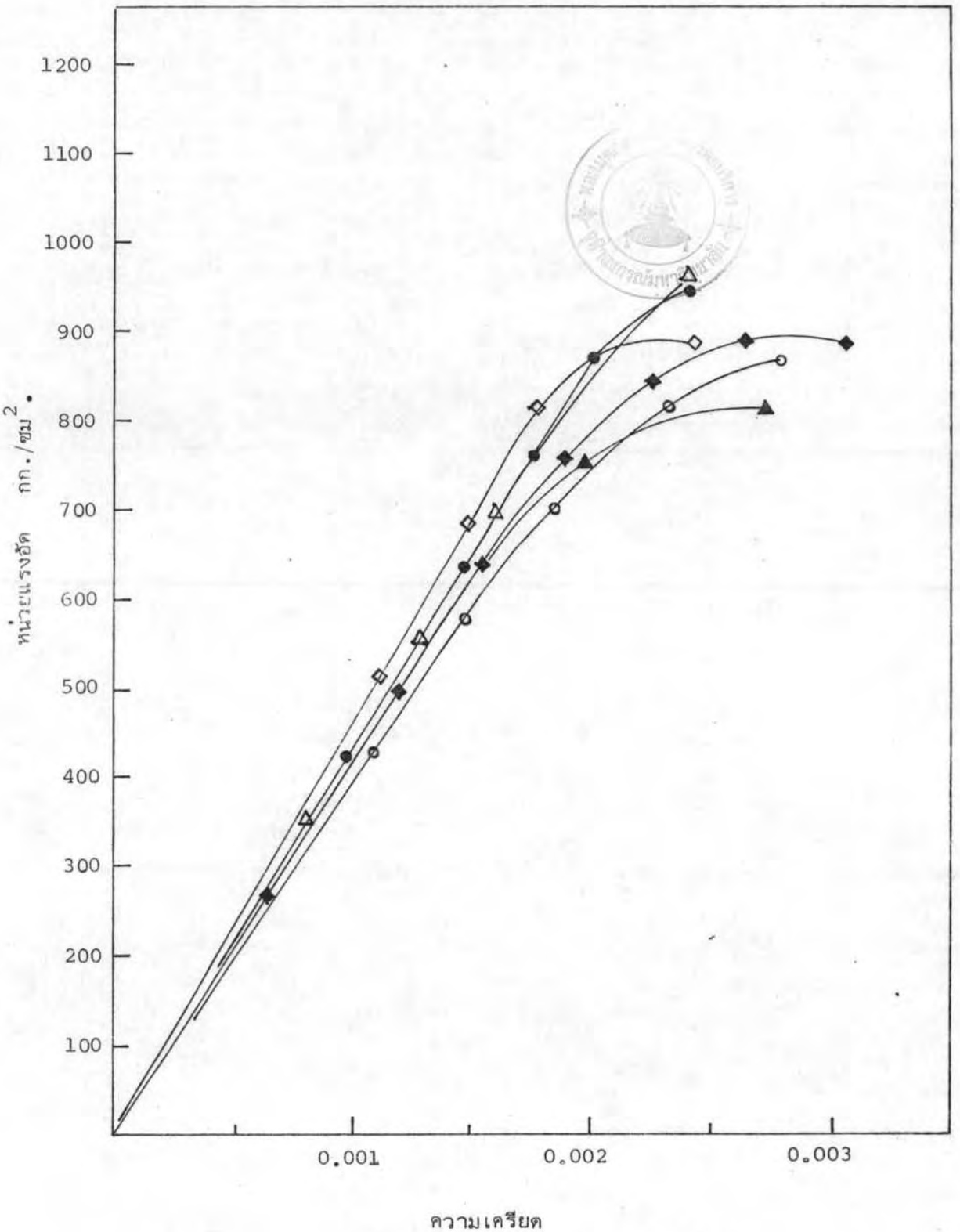
ค. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ

ในการทดลองได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นขณะผสมพบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ $30^{\circ}C$ คอนกรีตกำลังสูงจะมีการแข็งตัวเร็วขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 15 นาทีและที่อุณหภูมิประมาณ

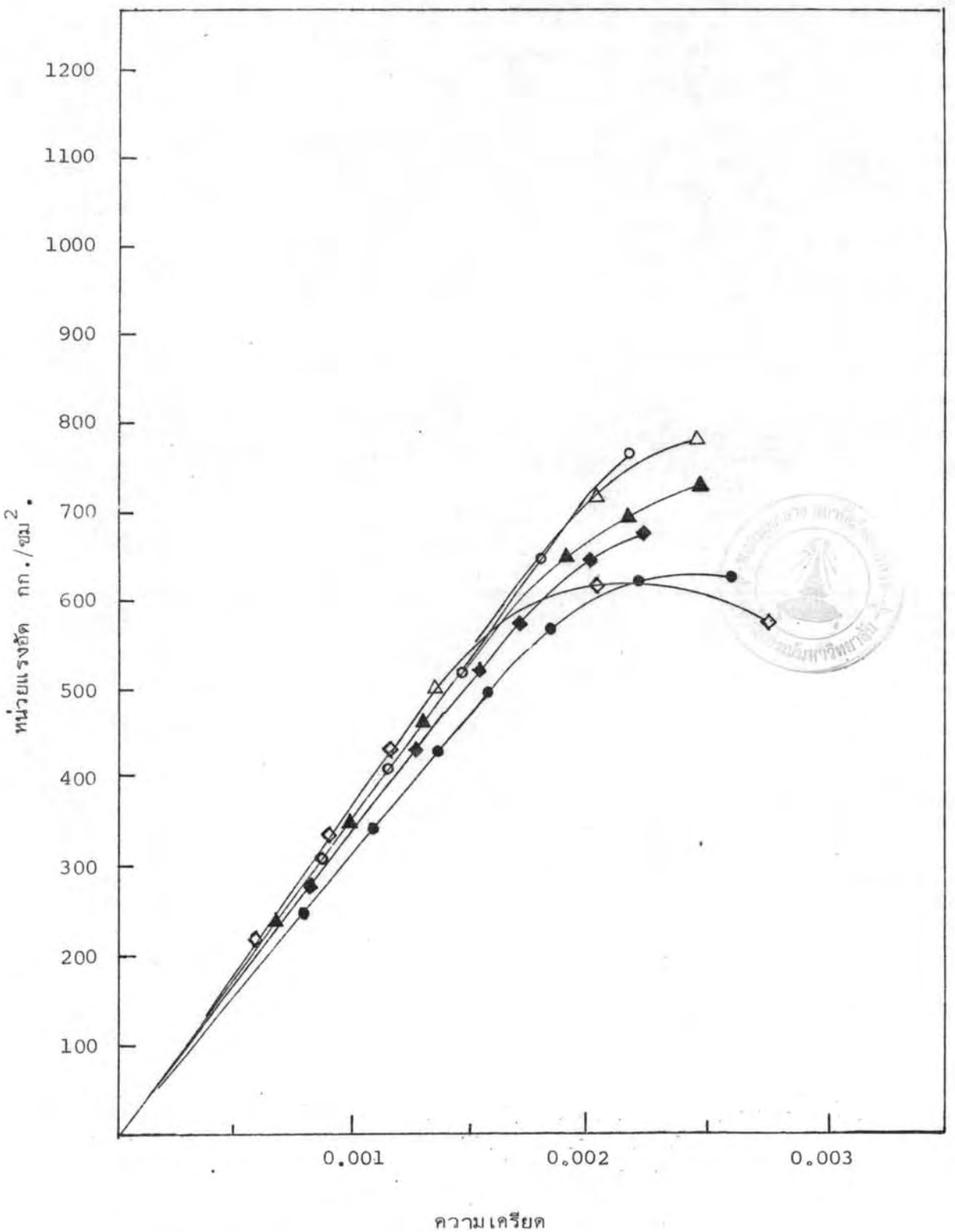
$24^{\circ}C$ จะใช้เวลาประมาณ 20 นาที นอกจากนี้ การผสมในขณะที่มีอุณหภูมิสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะต่ำกว่าการผสมในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ ในกรณีของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ต่ำก็มีผลทำให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วขึ้นและกำลังอัดลดลง

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันเนื่องจากกรรมวิธีการบ่ม

ตัวอย่างที่	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก	การบ่ม		
		แห้ง	พ่นละอองน้ำ	ใต้น้ำ
8	0.28	411	703	867

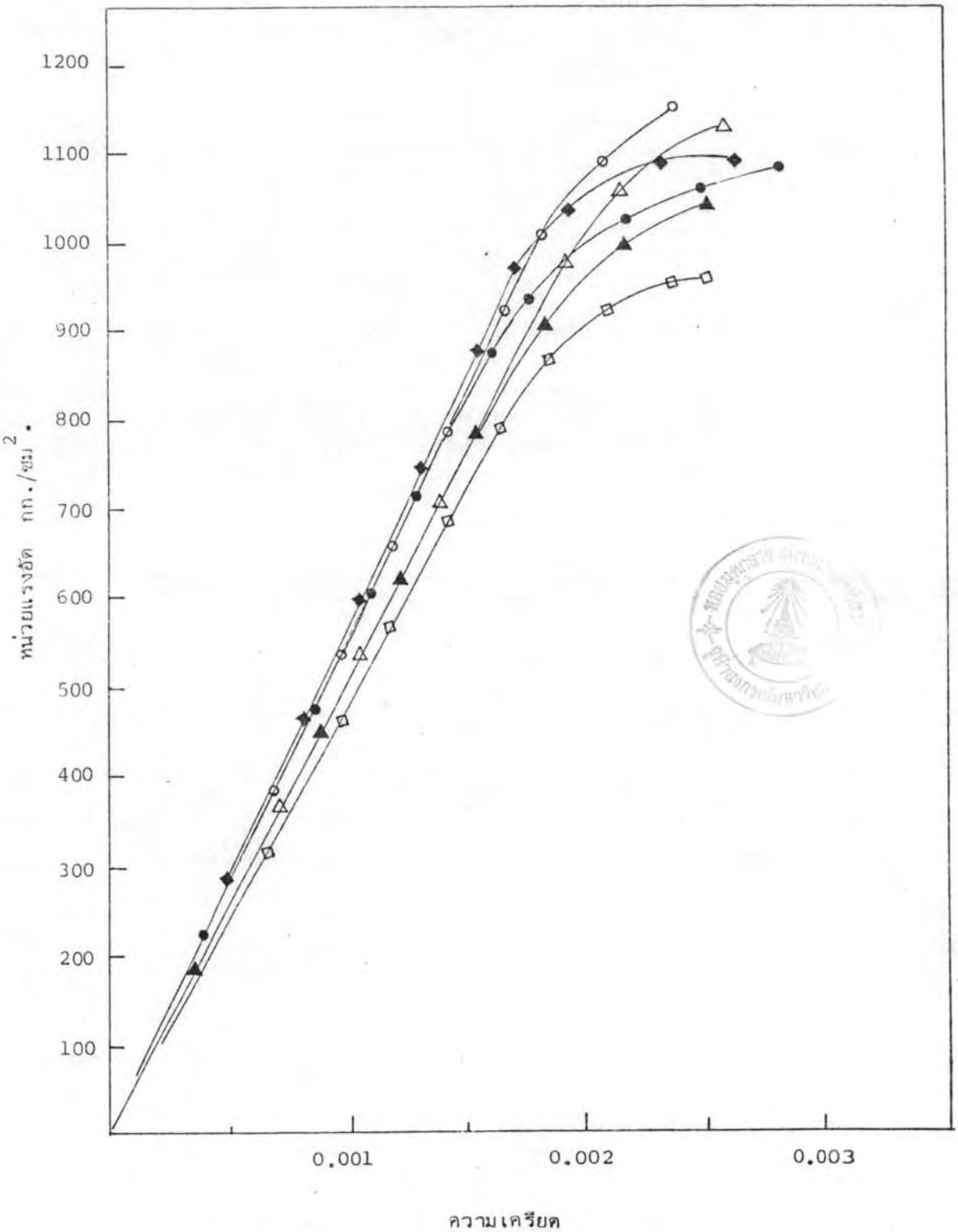


รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด
ของแท่งคอนกรีตตัวอย่างหล่อพร้อมคาน B1



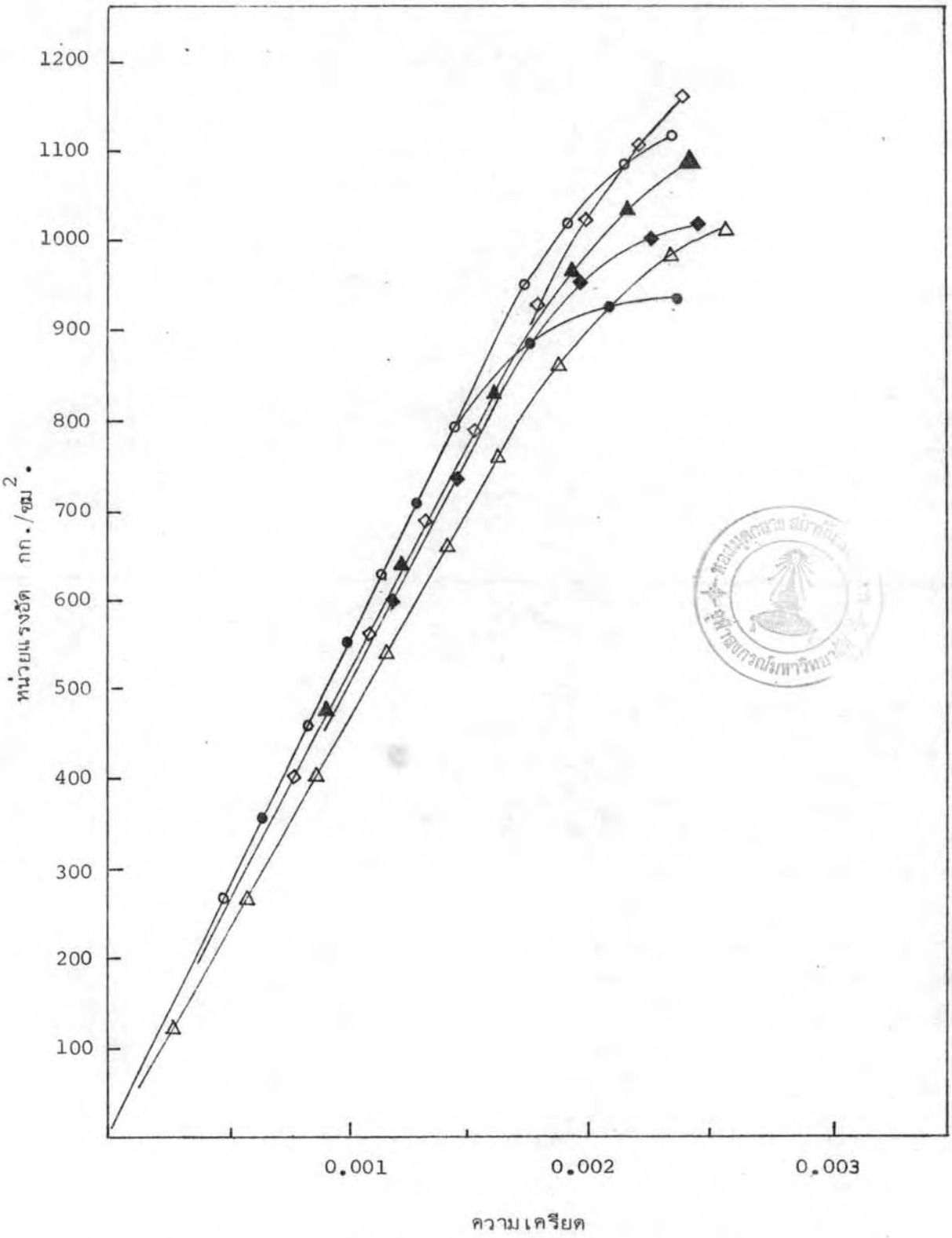
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด

ของแท่งคอนกรีตตัวอย่างหล่อพร้อมคาน B2

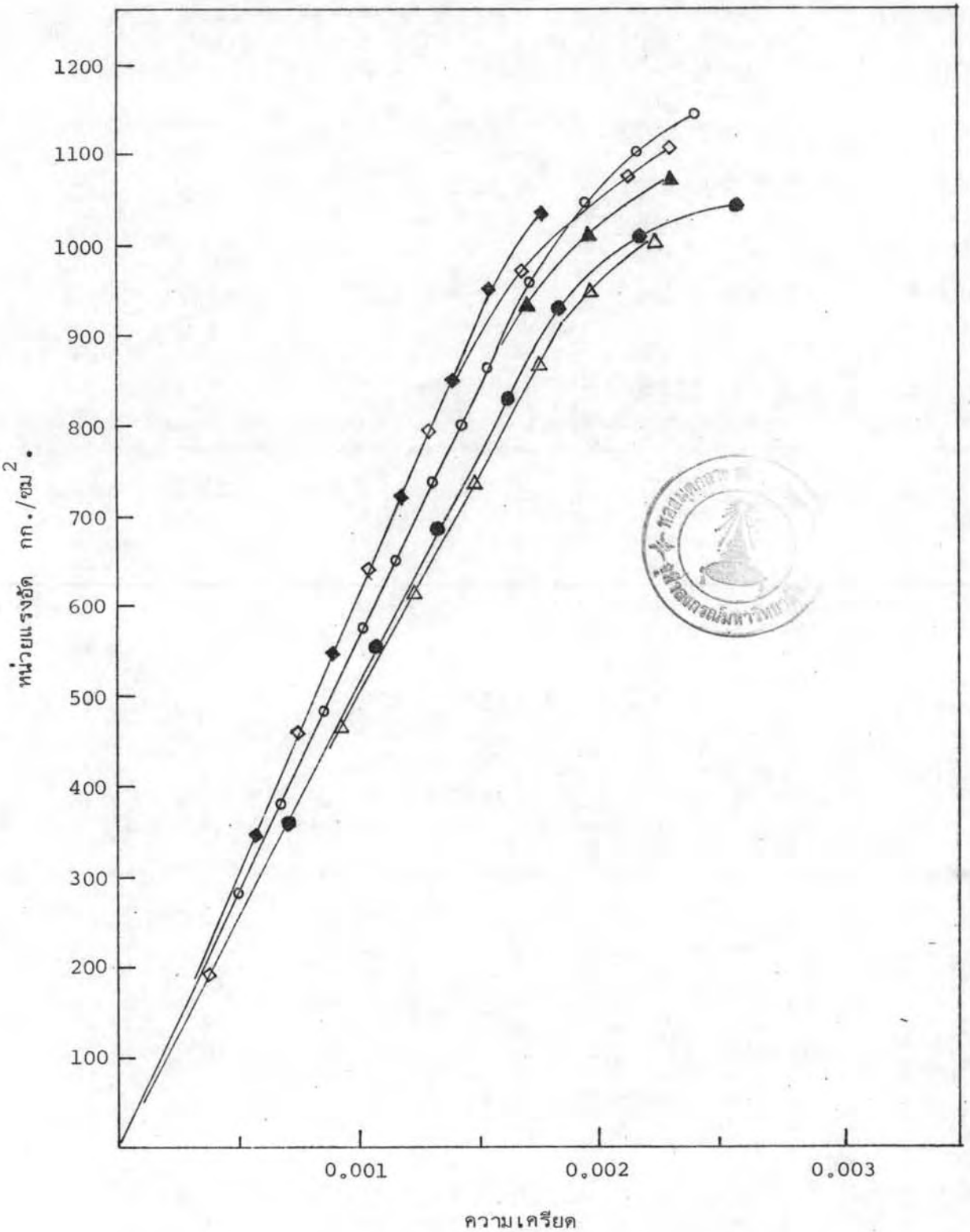


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด

ของแท่งคอนกรีตตัวอย่างหล่อพร้อมคาน B3



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด
ของแท่งคอนกรีตตัวอย่างหล่อพร้อมคาน B4



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด
ของแท่งคอนกรีตตัวอย่างหล่อพร้อมคาน B5