บทที่ 3
ปฏิภาคส่วนผสมที่เหมาะสมของมวลรวม

3.1. ขนาดคละมวลรวม

มวลรวมที่จะใช้ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงจำเป็นที่ต้องมีการตรวจสอบและคัดเลือกให้ได้มาตรฐาน เนื่องจากมวลรวมเป็นวัตถุดิบส่วนใหญ่ของคอนกรีตจึงมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งในสภาพเหลวและสภาพแข็งตัว โดยอิทธิพลของมวลรวมสามารถแบ่งรายละเอียดได้คือ

สภาพเหลว (Fresh State) มีผลต่อ ความสามารถในการทำงาน, ความสามารถในการปั๊ม, ปริมาณอากาศ, ระยะเวลาการก่อตัว, การเยิ้มและการแยกตัว เป็นต้น

สภาพแข็งตัว (Harden State) มีผลต่อ ความทึบน้ำ, ความทนทาน, กำลัง, เสถียรภาพเชิงมิติ, การขยายตัว, การหดตัว, ความคืบตัว, หน่วยน้ำหนัก, โมดูลัสยืดหยุ่นและความแกร่งของผิวเป็นต้น

การพิจารณาขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่นำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง ถือเป็นคุณสมบัติสำคัญเบื้องต้นในการพิจารณาออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต มวลรวมที่ใช้ควรมีขนาดลดหลั่นตามมาตรฐานที่กำหนด เพื่อช่วยในการจัดเรียงอนุภาคในเนื้อคอนกรีตได้ดี การศึกษานี้ยึดถือข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C - 33[20] แสดงในตารางที่ 3.1 เป็นมาตรฐานเรียงตามขนาดของมวลรวม 1", 3/4", 3/8" และทราย ตามลำดับ

ขนาดคละของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดตามมาตรฐานที่กำหนด สามารถนำมาพิจารณารวมเข้าด้วยกันเรียกว่า ขนาดคละรวม (Combined Gradation) โดยแบ่งพิจารณาการรวมขนาดคละออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การหาอัตราส่วนของมวลรวมหยาบที่ขนาดต่างกันให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด และการหาอัตราส่วนผสมระหว่างมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยถือปริมาณของมวลรวมละเอียด (ทราย) ต่อมวลรวมทั้งหมด เรียกว่า สัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A Ratio) ซึ่งค่า S/A ที่เหมาะสมจะช่วยลดปริมาณช่องว่างภายในมวลรวมส่งผลให้ลดปริมาณซีเมนต์เพสต์,ปริมาณน้ำและความข้นเหลวของคอนกรีตได้ ขนาดคละที่เหมาะสมกับการใช้งานปั๊มคอนกรีตตามมาตรฐานแนะนำของ ACI 304[28], DIN 1045[33] ได้แสดงในตารางที่ 3.2. เมื่อพิจารณาการรวมขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C - 33 ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสัดส่วนทรายต่อมวลรวมที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.40[14] และขนาดของมวลรวมใหญ่สุด (MSA) ไม่เกิน 20

มม.ในงานวิจัยนี้พิจารณาโดยใช้สัดส่วนทรายต่อมวลรวมเริ่มต้นที่ 0.40 และเลือกใช้มวลรวมขนาด 3/4" (19 มม.) ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ขนาดคละมวลรวมที่พิจารณาทั้ง 3 มาตรฐานแสดงในรูปที่ 3.1. รวมขอบเขตมาตรฐานขนาดคละจากหลายๆมาตรฐานเข้าด้วยกันและกำหนดค่าเฉลี่ยของขอบเขตบนและขอบเขตล่างได้แสดงในรูปที่ 3.2. กราฟเส้นทึบที่เป็นค่าเฉลี่ยจากทั้ง 3 มาตรฐานพิจารณาร่วมกับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความแปรปรวนของมวลรวมประกอบกัน ขอบเขตของขนาดคละมวลรวมที่กำหนดในรูปที่ 3.2. นี้จะใช้เป็นเกณฑ์กำหนดเพื่อการผสมขนาดคละมวลรวมในงานวิจัยนี้ โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนตามสัดส่วน (Proportion Deflection) 5 % เป็นขอบเขตที่กำหนดในการควบคุมขนาดคละมวลรวม ได้แสดงด้วยการแรเงากำหนดขอบเขตของขนาดคละที่เหมาะสม หรืออาจแสดงด้วยตารางที่ 3.4.

3.2. <u>การทดสอบขนาดคละมวลรวม</u>

การทดสอบขนาดคละมวลรวม ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องผ่านการทดสอบหาค่าขนาดลดหลั่นโดยยึดหลักการตามมาตรฐานของ ASTM C - 136 และพิจารณาข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C - 33 การทดสอบร่อนมวลรวมผ่านตะแกรงมาตรฐานแล้วนำน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาคำนวณหาสัดส่วนที่ค้างบนตะแกรงคิดเป็นร้อยละ จากนั้นใช้สัดส่วนค้างสะสมบนตะแกรงมาตรฐานเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C - 33 ตะแกรงมาตรฐานประกอบด้วยขนาด 3", $1^1/_2$", 3/4", 3/8", #4, #8, #16, #30, #50 และ #100 เพื่อใช้หาค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม (Fineness Modulus)

งานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลขนาดคละมวลรวมที่ใช้กับงานคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไปในท้องตลาดโดยแยกพิจารณามวลรวมออกเป็น หิน ขนาด 3/4", 3/8" และ ทราย (ภาคผนวก ก.) ดังผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.3. - 3.5. จากผลการทดสอบพบว่าขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาด 3/4" มีค่าโมดูลัสความละเอียดเฉลี่ยเท่ากับ 6.82 ตามมาตรฐานกำหนดให้ระหว่าง 5.5 - 7.5 ในรูปที่ 3.6. โดยมีขนาดหินที่ค้างบนตะแกรงขนาด 3/8" มากกว่ามาตรฐานที่กำหนด อยู่ในช่วงประมาณ 5 - 20 % ,ค่าการดูดซึม เท่ากับ 0.31 %, ความถ่วงจำเพาะ 2.74 และมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างสม่ำเสมอ, มวลรวมหยาบขนาด 3/8" มีค่าโมดูลัสความละเอียดเฉลี่ยเท่ากับ 5.85 แสดงการทดสอบในรูปที่ 3.7., ค่าการดูดซึม เท่ากับ 0.29 %, ความถ่วงจำเพาะ 2.72 โดยมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนมวลรวมละเอียดมีความแปรปรวนไม่สม่ำเสมอ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าค่อนข้างสูงและค่าโมดูลัสความละเอียดเฉลี่ยเท่ากับ 3.10 ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดให้อยู่ระหว่าง 2.25 - 3.25 ดังแสดงในรูปที่ 3.8. โดยขนาดของทรายที่ร่อนผ่านตะแกรง

ระหว่าง #50 - #100 น้อยกว่ามาตรฐานประมาณ 1 - 20%, การดูดซึม เท่ากับ 1.20 %, ความถ่วงจำเพาะ 2.64 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะต้องนำมาใช้ประกอบการพิจารณาปรุงแต่งส่วนผสมให้ได้มาตรฐานหรือขอบข่ายตามที่กำหนดไว้ จากขอบเขตขนาดคละมวลรวมขนาด 3/4" เมื่อพิจารณารวมกับมวลรวมละเอียด พบว่าขนาดคละของมวลรวมหยาบค่อนข้างใหญ่และขาดมวลรวมหยาบขนาดเล็ก การปรับปรุงขนาดคละมวลรวม จึงจำเป็นต้องใช้มวลรวม ขนาด 3/8" ปรับปรุงขนาดคละโดยการทดสอบผสมเข้ากับมวลรวมขนาด 3/4" เพื่อหาส่วนผสมที่พอเหมาะสมในขอบเขตมาตรฐานของ ASTM C - 33 แสดงการคำนวณในตารางที่ 3.5. และทำการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมในสัดส่วนต่างๆในรูปที่ 3.9. พบว่าค่าของอัตราส่วนของมวลรวมหยาบขนาด 3/8" ต่อ 3/4" มีค่าการผสมอยู่ในช่วงระหว่าง 25:75 - 45:55 หรือ ประมาณ 40:60 โดยเฉลี่ย ทำให้เกิดขนาดคละมวลรวมหยาบอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐานที่พิจารณา และเลือกอัตราส่วน 40:60 ในการศึกษาในงานวิจัยนี้

นอกจากนั้นยังมีการทดสอบคุณสมบัติด้านอื่นของมวลรวมเช่น หน่วยน้ำหนักและช่องว่าง, ความถ่วงจำเพาะ, การดูดซึมน้ำ, ความทนทานต่อการขัดสีและความทนกรดด่าง เป็นต้น

3.3. <u>การออกแบบและการปรับปรุงสัดส่วนขนาดคละมวลรวม</u>

เนื่องจากขนาดคละมวลรวมหินทรายปกติในท้องตลาดมักจะมีขนาดคละไม่เป็นตามมาตรฐานที่กำหนด จึงจำเป็นต้องทำการพิจารณาปรับปรุงส่วนผสมให้ขนาดคละรวมมีความเหมาะสมต่อการที่จะใช้ผสมเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงต่อไป

3.3.1. หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวม (Unit Weight and Void of Aggregate)

การพิจารณาสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A) และปริมาณปูนซีเมนต์ที่เข้าแทรกในช่องว่างของมวลรวมในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้ได้คุณสมบัติที่ดีในสภาพเหลวและแข็งตัวจำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C - 29 ทดสอบโดยการใส่มวลรวมลงในภาชนะทรงกระบอกทำการบรรจุ 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ปาดหน้าให้ใกล้ได้ระดับของปากภาชนะ แล้วชั่งน้ำหนักและเทียบกับปริมาตรของภาชนะ สามารถคำนวณค่าหน่วยน้ำหนักดังสมการ

$$M = (G - T) / V \qquad (3.1.)$$

เมื่อ M = หน่วยน้ำหนักของมวลรวม (กก./ลบ.ม.)

G = น้ำหนักของมวลรวมรวมกับภาชนะ (กก.)

T = น้ำหนักของภาชนะ (กก.)

V = ปริมาตรของภาชนะ (ลบ.ม.)

จากสมการค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมแสดงเป็นค่าของมวลรวมอบแห้ง แต่หากจะพิจารณาในกรณีของสภาพมวลรวมผิวแห้งอิ่มตัว (Saturated surface dry , SSD) สามารถคำนวณหาอัตราการดูดซึมมาพิจารณาร่วม ดังสมการ

$$M_{SSD} = M [1 + \{ A/100 \}] \qquad (3.2.)$$

เมื่อ M_{SSD} = หน่วยน้ำหนักในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (กก./ลบ.ม.)

A = เปอร์เซนต์การดูดซึมของมวลรวม (%)

ปริมาณช่องว่างของมวลรวม คือปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม ถือเป็นค่าตัวแปรในการพิจารณาปริมาณซีเมนต์เพส์ตและสารเพิ่มประเภทอื่นในส่วนผสมคอนกรีต หากอัตราส่วนขนาดคละดีจะทำให้เกิดปริมาณช่องว่างน้อยและต้องการปริมาณซีเมนต์เพส์ตลดลง การคำนวณหาค่าปริมาณช่องว่างของมวลรวมจากหน่วยน้ำหนักและค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม สามารถคำนวณจากสมการ

$$\% V = [1 - M_{SSD} / \gamma_d] \times 100 \qquad (3.3.)$$

เมื่อ $\% V$ = เปอร์เซนต์ปริมาณช่องว่างของมวลรวม (%)

γ_d = ค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพแห้งของมวลรวม

หากพิจารณาแยกระหว่างมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด การทดสอบปริมาณช่องว่างของมวลรวมจากส่วนผสมของมวลรวมหยาบขนาด 3/8":3/4" ในอัตรา 40:60 และทราย จำนวน 4 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณช่องว่างของมวลรวมหยาบมีค่าอยู่ระหว่าง 41 - 44 % หรือ 42.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

% โดยเฉลี่ยและมวลรวมละเอียดระหว่าง 38 - 39 % หรือ 38.5 % โดยเฉลี่ย แสดงในตารางที่ 3.6. การพิจารณาเพื่อลดปริมาณช่องว่างในมวลรวมหยาบโดยการผสมมวลรวมละเอียดเข้ากับมวลรวมหยาบในรูปของสัดส่วนทรายต่อมวลรวมในอัตราส่วน 0.0 - 1.0 แสดงในตารางที่ 3.7. พบว่าสัดส่วนทรายต่อมวลรวมที่ใช้ในการศึกษาควรมีค่ามากกว่าปริมาณช่องว่างในมวลรวมหยาบกล่าวคือมีค่าเกินกว่า 0.42 ขึ้นไป เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดอย่างต่อเนื่องในส่วนผสมมวลรวม โดยค่าสัดส่วนทรายต่อมวลรวมในช่วง 0.42 - 0.50 ทำให้เกิดปริมาณช่องว่างในช่วงน้อยที่สุด แสดงในรูปที่ 3.11. มีค่าในช่วง 26.8 - 27.8 % หรือ 27.5 % โดยเฉลี่ยของน้ำหนักมวลรวม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาการเลือกใช้ปริมาณส่วนผสมอื่นเช่น ปูนซีเมนต์, สารปอซโซลานและผงละเอียด เป็นต้น ในการเข้าแทรกช่องว่างเพื่อลดปริมาณช่องว่างและเพิ่มความหนาแน่นในส่วนผสมของคอนกรีตต่อไป

3.3.2. สัดส่วนทรายต่อมวลรวม (Sand/Aggregate Ratio)

จากการผสมมวลรวมหยาบทั้งสองตามสัดส่วนที่กำหนด ทำการทดสอบหาขนาดคละรวมของมวลรวมหยาบกับมวลรวมละเอียด โดยพิจารณาในรูปสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A) เพื่อหาขนาดคละมวลรวมที่เหมาะสมอยู่ในขอบเขตที่ทำการศึกษาข้างต้น โดยทำการแปรผันค่าสัดส่วนทรายต่อมวลรวมในช่วง 0.40 - 0.50 แสดงตัวอย่างการคำนวณในตารางที่ 3.8. และผลการเปลี่ยนสัดส่วนทรายต่อมวลรวมในรูปที่ 3.12.

จากการคำนวณเปลี่ยนสัดส่วนทรายต่อมวลรวมพบว่าขนาดคละมวลรวมผสมที่อยู่ในขอบเขตแรเงาและพิจารณาจากค่าแตกต่างจากขอบเขตที่กำหนดแสดงผลในตารางที่ 3.9. พบว่าสัดส่วนทรายต่อมวลรวมในช่วง 0.43 - 0.47 หรือ 0.45 โดยเฉลี่ย จะเป็นค่าขนาดคละมวลรวมผสมที่มีค่าใกล้เคียงและอยู่ในขอบเขตที่ทำการศึกษา ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าสัดส่วนทรายต่อมวลรวม เท่ากับ 0.45 ในการพิจารณาคุณสมบัติสำคัญของมวลรวมในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง

3.3.3. ปริมาณปูนซีเมนต์จากการพิจารณามวลรวม

จากขนาดคละมวลรวมในรูปที่ 3.12. พบว่าขนาดคละรวมที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวมต่างๆกัน จะมีขนาดในตะแกรงมาตรฐานบางขนาดออกนอกขอบเขตแรเงาที่พิจารณา แต่ยังอยู่ในขอบเขตรวมที่ศึกษา โดยมวลรวมที่ใช้ขาดมวลรวมละเอียดในส่วนของตะแกรง #50 - #200 การ

ปรับปรุงในส่วนของขนาดคละมวลรวม พิจารณาใช้อนุภาคละเอียดในการปรับปรุงขนาดคละ โดยแบ่งออกได้ ดังนี้: -

1.ปูนซีเมนต์ ในการปรับปรุงขนาดคละแต่จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น พิจารณาจากปริมาณช่องว่างของมวลรวม พบว่าปริมาณช่องว่างของมวลรวมที่ค่าเฉลี่ยที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวม 0.45 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.5 % โดยน้ำหนักมวลรวม สามารถคำนวณกับค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมในตารางที่ 3.6. ได้ค่าของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมควรมีปริมาณไม่น้อยกว่า 440 กก./ลบ.ม.

2.ปูนซีเมนต์รวมกับสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยการเพิ่มสารประเภท สารปอซโซลาน, สแลค เป็นต้น ในส่วนผสมคอนกรีต โดยการเลือกใช้สารเติมต้องพิจารณาถึงผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาในคอนกรีต

3.ปูนซีเมนต์รวมกับหินย่อย โดยการเพิ่มหินย่อยตามขนาดที่ต้องการในการปรับปรุงขนาดคละ ซึ่งหินย่อยจะไม่ผลต่อปฏิกิริยาในคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ปรับปรุงขนาดคละมวลรวมโดยใช้ขบวนการข้อ 1 และ 2 ข้างต้น

3.3.4. โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมในขอบเขตที่พิจารณา

ขอบเขตจากขนาดคละมวลรวม สามารถกำหนดคุณสมบัติของมวลรวมทั้งสองโดยพิจารณาในรูปของค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ซึ่งเป็นค่าดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของวัสดุในมวลรวมที่กำหนดให้ โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมที่พิจารณาในงานวิจัยในขอบเขตที่ศึกษา แสดงค่าในตารางที่ 3.10. และ 3.11. จะได้ค่าโมดูลัสความละเอียดของหินมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6.32 - 6.74 และทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ในช่วงระหว่าง 2.56 - 3.25 ซึ่งเป็นแนวทางในการกำหนดคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมเพื่อใช้ในการเลือกใช้มวลรวมในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง

3.4. <u>การออกแบบส่วนผสมเพื่อทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง</u>

การผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง ส่วนผสมของวัตถุดิบต่างๆจะมีความสำคัญมาก ซึ่งการวิจัยนี้ได้ศึกษาขนาดคละมวลรวมที่มีผลต่อส่วนผสมและคุณภาพของคอนกรีตทั้งในสภาพเหลวและสภาพแข็งตัว การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะยึดถือมาตรฐาน ACI 211.1 สำหรับคอนกรีตทั่วๆไปได้พิจารณาร่วมกับมาตรฐานการออกแบบของ ACI 211.4R สำหรับคอนกรีตกำลังสูงด้วยการเพิ่มสารปอซโซลาน ขี้เถ้าลอย และปรับปรุงให้สอดคล้องกับการออกแบบตามสภาพวัตถุดิบ

และการใช้งานทั่วไป การออกแบบตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดขั้นตอนในการออกแบบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ

3.4.1.คุณสมบัติพื้นฐาน เป็นการกำหนดขอบเขตความต้องการพื้นฐาน โดยแบ่งออกเป็น

-สภาพเหลว พิจารณาจากค่าการยุบตัวหรือค่าการไหลตัว ตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

-สภาพแข็งตัว พิจารณากำลังอัดตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

3.4.2.ส่วนผสมของคอนกรีต เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยพิจารณาขั้นตอนการออกแบบดังนี้

-มวลรวม เลือกใช้มวลรวมหยาบที่มีผสมหินเล็กขนาด 3/8" และหินกลางขนาด 3/4" ในอัตราการผสม 40:60 รวมกับมวลรวมละเอียด โดยพิจารณาจากค่าโมดูลัสความละเอียดของแต่ละมวลรวมในขอบเขตที่กล่าวข้างต้นและขนาดคละมวลรวมอยู่ในขอบเขตที่พิจารณา

-สัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A) มวลรวมที่ได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของมวลรวมทั้งสองในรูปของสัดส่วนทรายต่อมวลรวม โดยใช้ค่าสัดส่วนที่ 0.45 ในการพิจารณา

-ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม การผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ค่อนข้างสูง โดยมีขอบเขตการใช้ที่เหมาะสม Gaynor[34] แนะนำปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ไม่เกิน 564 กก./ลบ.ม. และจากการพิจารณาปริมาณช่องว่างของมวลรวมข้างต้นพบว่า ปริมาณปูนซีเมนต์เริ่มที่ 440 กก./ลบ.ม. ในงานวิจัยนี้เริ่มปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 350, 400, 450, 500 และ 550 กก./ชม. ตามลำดับ. เพื่อครอบคลุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่ศึกษา

-อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในคอนกรีตสมรรถนะสูงกำลังของคอนกรีตที่ต้องการอยู่ในเกณฑ์สูงมีผลให้การกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ จากงานวิจัยอื่น[8] พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงอยู่ในช่วงประมาณ 0.35 - 0.40 ในงานวิจัยนี้เลือกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ในช่วง 0.22 - 0.46 เพื่อครอบคลุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่าง โดยใช้การแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณเป็นตัวควบคุม

-อัตราการใช้น้ำยาเคมีผสมเพิ่ม จากกระบวนการผลิตสำเร็จรูปจากโรงงานการทดสอบใช้ปริมาณโดยยึดตามหลักการใช้ของแต่ละโรงงานผลิต โดยค่าอัตราปริมาณน้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษใช้ในช่วง 2 - 6 %[17] ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ 100 กก. โดยการเพิ่มอัตราการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ในจำนวน 1 % ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ 100

กก. สามารถลดน้ำจากการออกแบบส่วนผสมอยู่ในช่วงประมาณ 10 - 20 % งานวิจัยนี้ใช้อัตราการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษในปริมาณการใช้ 1.20, 1.80 และ 2.40 ลิตรต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ 100 กก. ตามลำดับ.

-สารเติม ใช้สารปอซโซลาน ไมโครซิลิกาและ ขี้เถ้าลอย เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต คือ

1.เพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต โดยพิจารณาใช้สารไมโครซิลิกาตามคำแนะนำการใช้ของ ACI Committee 226[36] ในอัตราการเพิ่มที่ 5 - 20 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

2.เพิ่มความสามารถในการทำงานได้ โดยพิจารณาเพิ่มขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีต จากคำแนะนำการเพิ่มใน ACI 211.4R[29] และงานวิจัยของ กิตติกร[35] โดยการเลือกใช้อัตราการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ในรูปของการยุบตัวและการไหลตัว ในอัตราการเพิ่มที่ 15 - 30 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

จากการพิจารณาสามารถออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงในตารางที่ 3.12. และเพิ่มสารปอซโซลาน ขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกา ในตารางที่ 3.13. และ 3.14. ตามลำดับ.

3.5. <u>การผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง</u>

การผสมคอนกรีตคือการนำส่วนผสมคลุกเคล้าเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะโดยที่ซีเมนต์เพสต์สามารถเคลือบหรือหุ้มผิวของมวลรวมได้อย่างเหมาะสม ทำให้เกิดเนื้อคอนกรีตที่มีความสม่ำเสมอ ส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตสมรรถนะสูง งานวิจัยนี้ใช้เครื่องผสมประเภทแบบนอน (Pan Mixer) ขนาด 0.12 ลบ.ม. ประกอบด้วยเครื่องผสมจานกลม (Circular Pan) ขนาด ϕ 70 ซม. สูง 45 ซม. และมีใบกวนหมุนรอบตัวเองยึดติดกับแกนหมุนตรงกลาง ในการผสมใช้อัตราการหมุนรอบแกน 30 - 35 รอบต่อนาที โดยมีขั้นตอนการผสมเริ่มจากการคิดปริมาตรของส่วนผสมที่ใช้ในการผสม 1 ลบ.ม. หลังจากนั้นทำการปรับแก้ปริมาณน้ำจากความชื้นของมวลรวม ทำการผสมวัตถุดิบ หิน, ทราย, ปูนซีเมนต์ และสารเติม เพื่อให้อนุภาคของส่วนผสมสามารถจัดเรียงตัวให้เข้ากันได้ดี ในเวลาการผสมประมาณ $^1/_2$ นาที หลังจากนั้นทำการเติมน้ำและน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม ทำการผสมจนกระทั่งวัตถุดิบผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยรวมระยะเวลาในการผสมทั้งหมดประมาณ 3 นาที[23] โดยการผสมส่วนของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะใช้ระยะเวลามากกว่าคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงมีตัวแปรในการผลิตมากกว่าคอนกรีตทั่วไปและจัดทำลูกปูนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและการบ่มจัดทำตามมาตรฐาน ASTM C

ตารางที่ 3.1 ขนาดคละมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C - 33

ขนาด ตะแกรง	เปอร์เซนต์ผ่านโดยน้ำหนัก (Percentage of Passing by Weight)			
	1"	3/4" - # 8	3/8" - # 8	ทราย
$1\frac{1}{2}$"	100			
1"	95-100	100		
3/4"		90-100	100	
1/2"	25-60			
3/8"		20-55	85-100	100
# 4	0-10	0-10	10-30	95-100
# 8	0-5	0-5	0-10	80-100
# 16			0-5	50-85
# 30				25-60
# 50				10-30
# 100				2-10

ตารางที่ 3.2. มาตรฐานขนาดคละมวลรวมสำหรับคอนกรีตปั๊ม

ขนาด ตะแกรง	มาตรฐานขนาดคละมวลรวม			
	ACI 304		DIN 1045	ASTM C 33
	MSA = 3/4	MSA = 1"	MSA = 16 มม.	S/A = 0.40
1"		100		100
3/4"	100	80-88	100	94-100
1/2"	75-83	64-75		
3/8"	62-74	55-70	70-91	52-73
# 4	39-56	39-56	43-77	38-46
# 8	28-47	28-47	25-65	32-43
# 16	18-35	18-35	14-52	20-34
# 30	12-25	12-25	8-37	10-24
# 50	7-15	7-15	4-21	4-12
# 100	3-8	3-8	1-5	0.8-4

ตารางที่ 3.3. ขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C - 33 กำหนด S/A = 0.40

ขนาดตะแกรง	ขนาด (มม.)	หิน MSA = 3/4"		ทราย		ขนาดคละรวม
		A	x 60%	B	x 40%	0.6 A + 0.4 B
1"	25	100	60	100	40	100
3/4"	19	90-100	54-60	100	40	94-100
3/8"	9.5	20-55	12-33	100	40	52-73
# 4	4.75	0-10	0-6	95-100	38-40	38-46
# 8	2.36	0-5	0-3	80-100	32-40	32-43
# 16	1.18			50-85	20-34	20-34
# 30	0.6			25-60	10-24	10-24
# 50	0.3			10-30	4-12	4-12
# 100	0.15			2-10	0.8-4	0.8-4

ตารางที่ 3.4. ขอบเขตขนาดคละมวลรวมที่ใช้พิจารณาศึกษา

ขนาดตะแกรง	มาตรฐานขนาดคละรวม		
	ขอบเขตบน	ขอบเขตล่าง	ค่าเฉลี่ย
3/4"	99.9	97.7	99
3/8"	70.9	61.5	66
# 4	45.8	43.8	44
# 8	36.8	32.8	35
# 16	27.8	20.6	24
# 30	19.2	12.4	16
# 50	10.0	6.8	8
# 100	4.3	2.5	3
# 200	0	0	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5. การผสมขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาด 3/8" และ 3/4"

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	เปอร์เซนต์ผ่านโดยน้ำหนัก (%)				
	MSA 3/8" 40 %	MSA 3/4" 60 %	มวลรวมผสม 3/8" / 3/4" 40/60	มาตรฐาน ASTM C - 33	
				ค่าสูงสุด (max.)	ค่าต่ำสุด (min.)
3/4"	99.90	97.77	98.62	90	100
3/8"	94.32	16.79	47.80	20	55
# 4	5.99	1.07	3.04	0	10
# 8	0.82	0.61	0.69	0	5
# 16	0	0	0		
# 30	0	0	0		
# 50	0	0	0		
# 100	0	0	0		
# 200	0	0	0		

ตารางที่ 3.6. หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวม

คุณสมบัติ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3		ตัวอย่างที่ 4		ค่าเฉลี่ย	
	หิน	ทราย	หิน	ทราย	หิน	ทราย	หิน	ทราย	หิน	ทราย
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	1575	1648	1562	1636	1544	1634	1522	1641	*1551*	*1640*
ปริมาณช่องว่าง (%)	41.67	37.81	42.15	38.26	42.63	38.34	43.63	38.08	*42.52*	*38.12*

ตารางที่ 3.7. หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวมตามสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A = 0.0 - 1.0)

S/A Ratio	หน่วยน้ำหนักมวลรวม (กก./ลบ.ม. , M_{SSD})			
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4
0.00	1575	1562	1549	1522
0.10	1732	1698	1712	1675
0.20	1856	1833	1833	1826
0.30	1930	1925	1918	1902
0.40	1955	1952	1942	1929
0.45	1964	1958	1946	1935
0.50	1961	1953	1944	1930
0.60	1921	1912	1907	1910
0.70	1879	1861	1871	1866
0.80	1810	1797	1808	1803
0.90	1745	1752	1746	1742
1.00	1648	1636	1634	1641

S/A Ratio	เปอร์เซนต์ปริมาณช่องว่างของมวลรวม (%)			
	ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3	ตัวอย่างที่4
0.00	41.67	42.15	42.63	43.63
0.10	35.86	37.11	36.59	37.96
0.20	31.00	31.86	31.86	32.12
0.30	28.25	28.44	28.70	29.29
0.40	27.05	27.16	27.54	28.02
0.45	26.72	26.94	27.39	27.80
0.50	26.83	27.13	27.46	27.99
0.60	28.05	28.39	28.58	28.46
0.70	29.63	30.30	29.93	30.11
0.80	31.95	32.44	32.03	32.22
0.90	34.40	34.14	34.36	34.51
1.00	37.81	38.26	38.34	38.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.8. ขนาดคละมวลรวมที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวม

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	เปอร์เซนต์ผ่านโดยน้ำหนัก (%)			
	ขนาดคละของทราย (45 %)	ขนาดคละของหิน 3/8" และ 3/4 " (55 %)	ขนาดคละรวม S/A = 0.45	ค่าเฉลี่ยของขอบเขตที่พิจารณา
3/4"	100	98.62	99.24	99
3/8"	100	47.80	71.29	66
# 4	95.87	3.04	44.81	44
# 8	86.31	0.69	39.22	35
# 16	63.81	0	28.71	24
# 30	31.68	0	14.26	16
# 50	9.54	0	4.29	8
# 100	2.69	0	1.21	3
# 200	0.68	0	0.31	0

ตารางที่ 3.9. ผลต่างของขนาดคละมวลรวมที่ใช้กับขอบเขตที่ศึกษา

ขนาดตะแกรง	ผลต่างของขนาดคละที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวม								
	S/A 0.40	S/A 0.41	S/A 0.43	S/A 0.44	S/A 0.45	S/A 0.46	S/A 0.47	S/A 0.48	S/A 0.50
# 100	2.28	2.26	2.20	2.18	2.15	2.12	2.10	2.07	2.02
# 50	4.58	4.49	4.30	4.20	4.11	4.01	3.92	3.82	3.63
# 30	3.13	2.81	2.18	1.86	1.54	1.23	0.91	-0.59	-0.04
# 16	-1.32	-1.96	-3.24	-3.88	-4.51	-5.15	-5.79	-6.43	-7.71
# 8	-0.14	-0.99	-2.71	-3.56	-4.42	-5.28	-6.13	-6.99	-8.70
# 4	4.23	3.30	1.44	0.51	-0.41	-1.34	-2.27	-3.20	-5.06
3/8"	-2.48	-3.00	-4.05	-4.57	-5.09	-5.61	-6.13	-6.66	-7.70
3/4"	-0.37	-0.39	-0.41	-0.43	-0.44	-0.45	-0.47	-0.48	-0.51
เฉลี่ย	1.24	0.81	-0.04	-0.46	-0.88	-1.31	-1.73	-2.16	-3.01
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.66	2.74	3.04	3.23	3.46	3.71	3.98	4.26	4.86

ตารางที่ 3.10. โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ ที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวมต่างกัน

ขนาดตะแกรง	% น้ำหนักค้างสะสม											
	ขอบเขตล่าง						ขอบเขตบน					
	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45
3/4"	3.8	3.9	3.97	4.04	4.11	4.18	0.2	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18
3/8"	64.2	65.2	66.4	67.5	68.8	70.0	48.5	49.3	50.2	51.1	52.0	53.0
# 4	92.2	93.8	95.3	96.9	98.5	100	87.6	89.0	90.5	92.0	93.5	95.2
# 8	100	100	100	100	100	100	96.2	97.6	99.1	100	100	100
#16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
# 30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
# 50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
#100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F.M.	6.60	6.63	6.66	6.68	6.71	6.74	6.32	6.36	6.40	6.43	6.46	6.48

ตารางที่ 3.11. โมดูลัสความละเอียดของทราย ที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวมต่างกัน

ขนาดตะแกรง	% น้ำหนักค้างสะสม											
	ขอบเขตล่าง						ขอบเขตบน					
	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45
3/8"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
# 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
# 8	19	21	22.9	24.6	26.3	28	9.0	11.2	13.3	15.3	17.2	19.1
#16	48.5	49.8	51	52.1	53.2	54.2	30.5	32.2	33.8	35.3	36.8	38.2
# 30	69.0	69.8	70.5	71.2	71.8	72.4	52.0	53.2	54.3	55.3	56.4	54.3
# 50	3.0	83.4	83.8	84.2	84.5	84.9	75.0	75.6	76.3	76.7	77.3	77.8
#100	93.8	93.9	94.0	94.2	94.3	94.4	89.3	89.5	89.8	90.0	90.2	90.4
F.M.	3.13	3.18	3.22	3.25	3.25	3.25	2.56	2.62	2.67	2.73	2.78	2.83

ตารางที่ 3.12. ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตสมรรถนะสูง

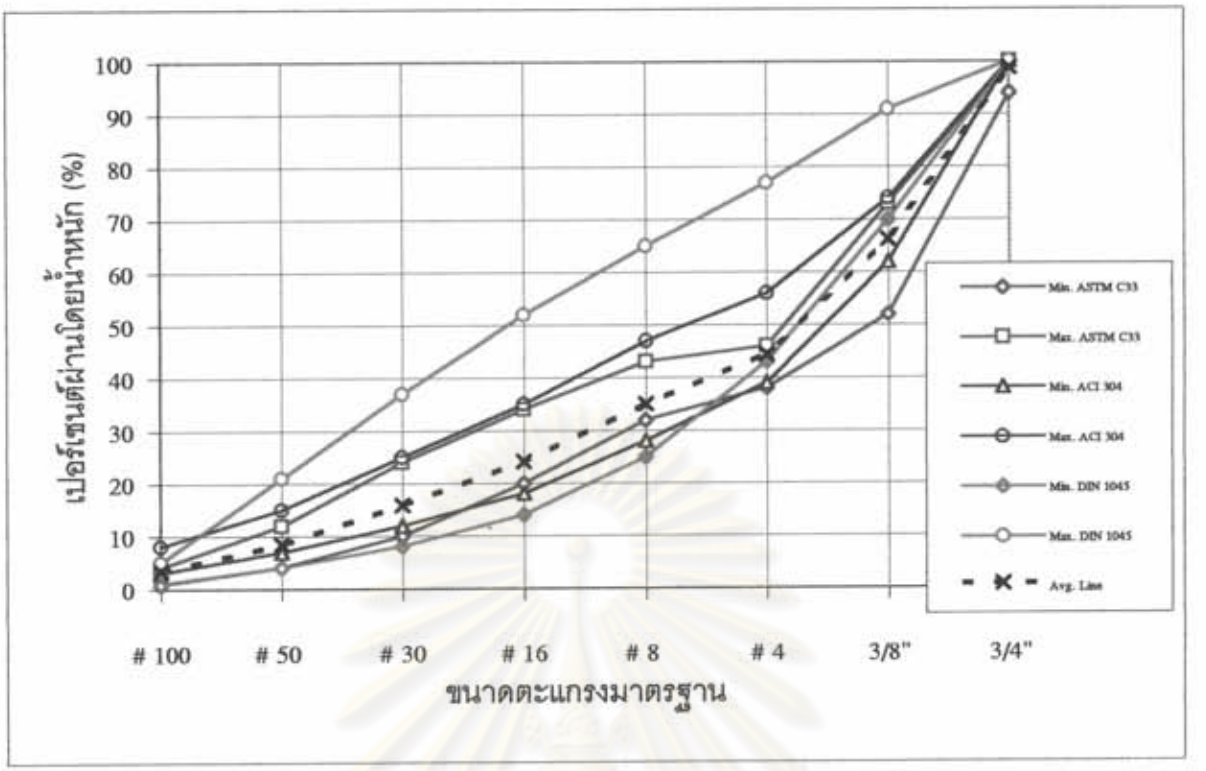
Code	Cement (kgs.)	Water (kgs.)	Sand (kgs.)	Agg. (kgs.)	Admix. (litres)	w/c	S/A
A1	350	120	890	1090	4.20	0.34	0.45
A2	400	120	870	1070	4.80	0.30	0.45
A3	450	120	850	1050	5.40	0.27	0.45
A4	500	120	830	1025	6.00	0.24	0.45
A5	550	120	810	1000	6.60	0.22	0.45
B1	350	140	890	1090	4.20	0.40	0.45
B2	400	140	870	1070	4.80	0.35	0.45
B3	450	140	850	1050	5.40	0.31	0.45
B4	500	140	830	1025	6.00	0.28	0.45
B5	550	140	810	1000	6.60	0.25	0.45
C1	350	160	890	1090	4.20	0.46	0.45
C2	400	160	870	1070	4.80	0.40	0.45
C3	450	160	850	1050	5.40	0.36	0.45
C4	500	160	830	1025	6.00	0.32	0.45
C5	550	160	810	1000	6.60	0.29	0.45
D1	350	120	890	1090	6.30	0.34	0.45
D2	400	120	870	1070	7.20	0.30	0.45
D3	450	120	850	1050	8.10	0.27	0.45
D4	500	120	830	1025	9.00	0.24	0.45
D5	550	120	810	1000	9.90	0.22	0.45
E1	350	140	890	1090	6.30	0.40	0.45
E2	400	140	870	1070	7.20	0.35	0.45
E3	450	140	850	1050	8.10	0.31	0.45
E4	500	140	830	1025	9.00	0.28	0.45
E5	550	140	810	1000	9.90	0.25	0.45
F1	350	160	890	1090	6.30	0.46	0.45
F2	400	160	870	1070	7.20	0.40	0.45
F3	450	160	850	1050	8.10	0.36	0.45
F4	500	160	830	1025	9.00	0.32	0.45
F5	550	160	810	1000	9.90	0.29	0.45
G1	350	120	890	1090	8.40	0.34	0.45
G2	400	120	870	1070	9.60	0.30	0.45
G3	450	120	850	1050	10.80	0.27	0.45
G4	500	120	830	1025	12.00	0.24	0.45
G5	550	120	810	1000	13.20	0.22	0.45
H1	350	140	890	1090	8.40	0.40	0.45
H2	400	140	870	1070	9.60	0.35	0.45
H3	450	140	850	1050	10.80	0.31	0.45
H4	500	140	830	1025	12.00	0.28	0.45
H5	550	140	810	1000	13.20	0.25	0.45
I1	350	160	890	1090	8.40	0.46	0.45
I2	400	160	870	1070	9.60	0.40	0.45
I3	450	160	850	1050	10.80	0.36	0.45
I4	500	160	830	1025	12.00	0.32	0.45
I5	550	160	810	1000	13.20	0.29	0.45

ตารางที่ 3.13. ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตสมรรถนะสูง ผสมขี้เถ้าลอย

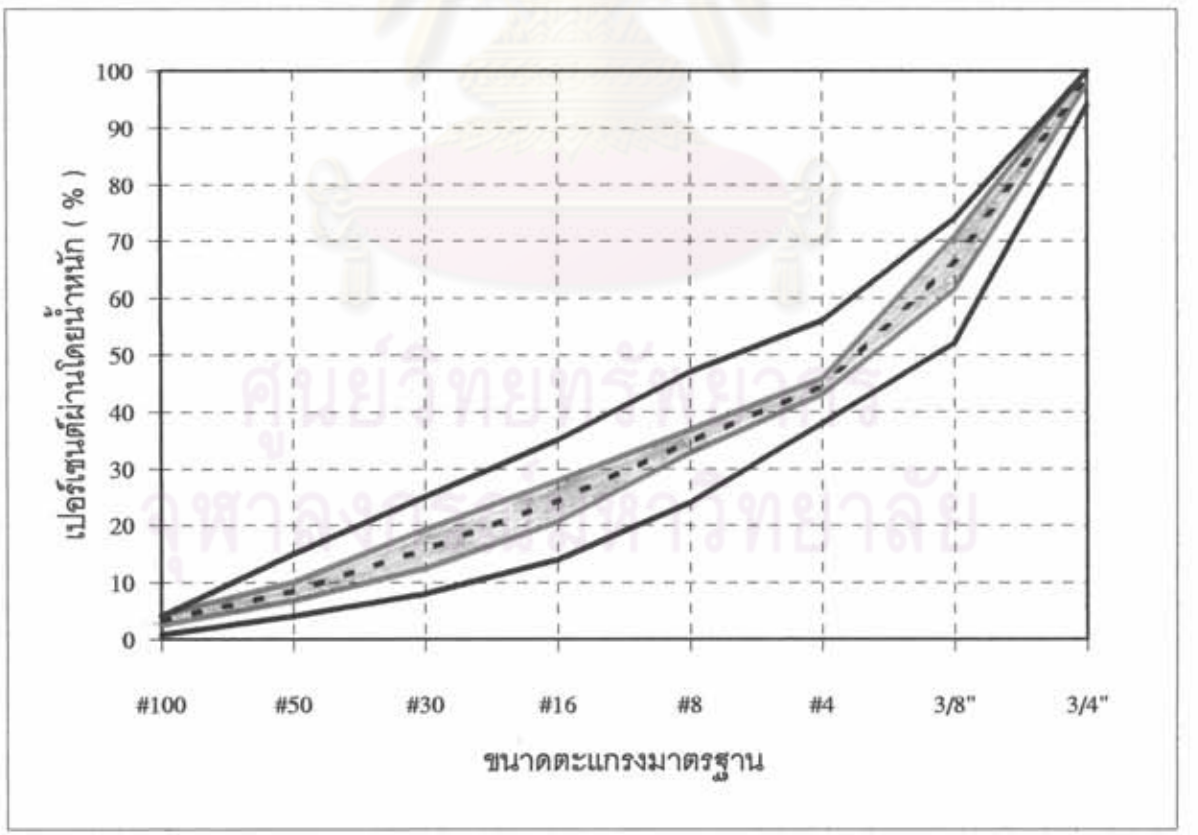
Code	Cement (kgs.)	Fly Ash (kgs.)	Water (kgs.)	Sand (kgs.)	Agg. (kgs.)	Admix. (litres)	w/c+f	S/A
J1	350	53	160	866	1061	7.25	0.40	0.45
J2	400	60	160	843	1037	8.28	0.35	0.45
J3	450	68	160	820	1013	9.32	0.31	0.45
J4	500	75	160	796	984	1035	0.28	0.45
J5	550	83	160	773	955	11.39	0.25	0.45
K1	350	70	160	859	1052	7.56	0.38	0.45
K2	400	80	160	834	1026	8.64	0.33	0.45
K3	450	90	160	810	1001	9.72	0.30	0.45
K4	500	100	160	785	970	10.80	0.27	0.45
K5	550	110	160	761	940	11.88	0.24	0.45
L1	350	88	160	851	1042	7.88	0.37	0.45
L2	400	100	160	825	1015	9.00	0.32	0.45
L3	450	113	160	799	988	10.13	0.28	0.45
L4	500	125	160	774	956	11.25	0.26	0.45
L5	550	138	160	748	924	12.38	0.23	0.45
M1	350	105	160	843	1032	8.19	0.35	0.45
M2	400	120	160	816	1004	9.36	0.31	0.45
M3	450	135	160	789	976	10.53	0.27	0.45
M4	500	150	160	763	943	11.70	0.25	0.45
M5	550	165	160	736	909	12.87	0.22	0.45

ตารางที่ 3.14. ส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูง ผสมไมโครซิลิกา

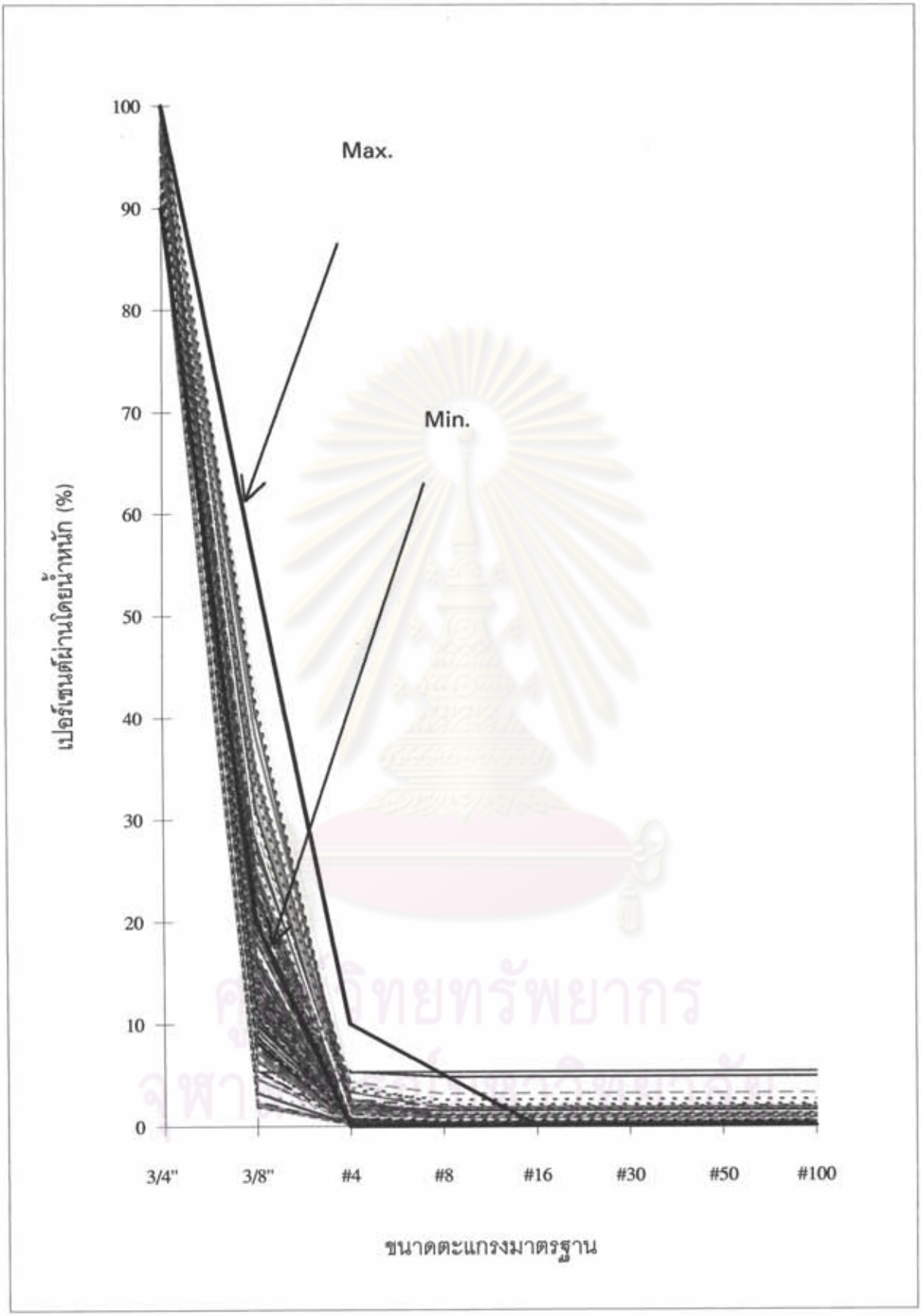
Code	Cement (kgs.)	Microsilics	Water (kgs.)	Sand (kgs.)	Agg. (kgs.)	Admix. (litres)	w/c+s	S/A
N1	350	18	160	882	1080	6.62	0.44	0.45
N2	400	20	160	861	1059	7.56	0.38	0.45
N3	450	23	160	840	1038	8.51	0.34	0.45
N4	500	25	160	819	1011	9.45	0.30	0.45
N5	550	28	160	798	985	10.40	0.28	0.45
O1	350	35	160	874	1071	6.93	0.42	0.45
O2	400	40	160	852	1048	7.92	0.36	0.45
O3	450	45	160	830	1025	8.91	0.32	0.45
O4	500	50	160	808	998	9.90	0.29	0.45
O5	550	55	160	785	970	10.89	0.26	0.45
P1	350	53	160	866	1061	7.25	0.40	0.45
P2	400	60	160	843	1037	8.28	0.35	0.45
P3	450	68	160	820	1013	9.32	0.31	0.45
P4	500	75	160	796	984	10.35	0.28	0.45
P5	550	83	160	773	955	11.39	0.25	0.45
Q1	350	70	160	859	1052	7.56	0.38	0.45
Q2	400	80	160	834	1026	8.64	0.33	0.45
Q3	450	90	160	810	1001	9.72	0.30	0.45
Q4	500	100	160	785	970	10.80	0.27	0.45
Q5	550	110	160	761	940	11.88	0.24	0.45



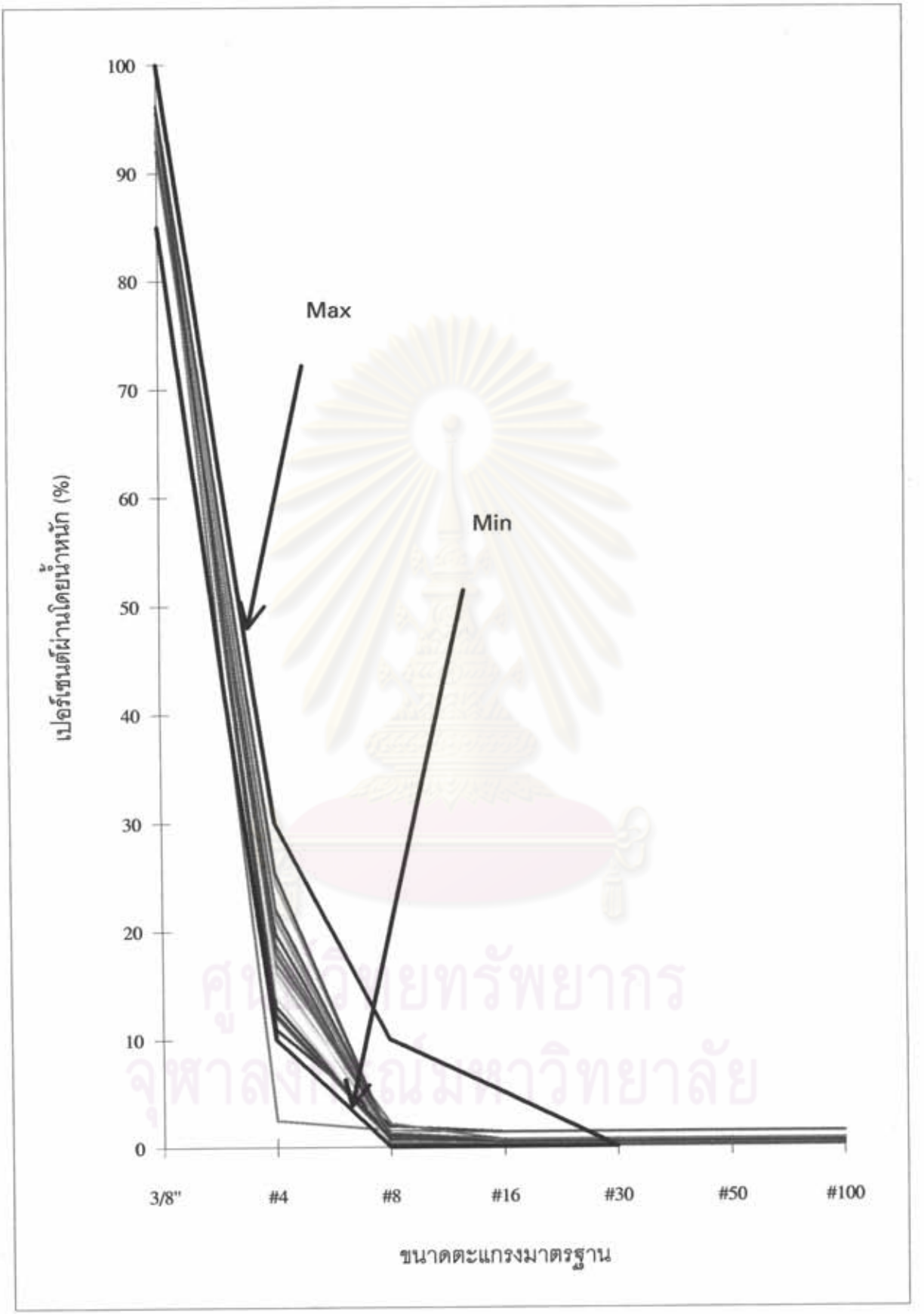
รูปที่ 3.1. ขนาดคละมวลรวมของคอนกรีตปั๊มตามมาตรฐานต่างๆ



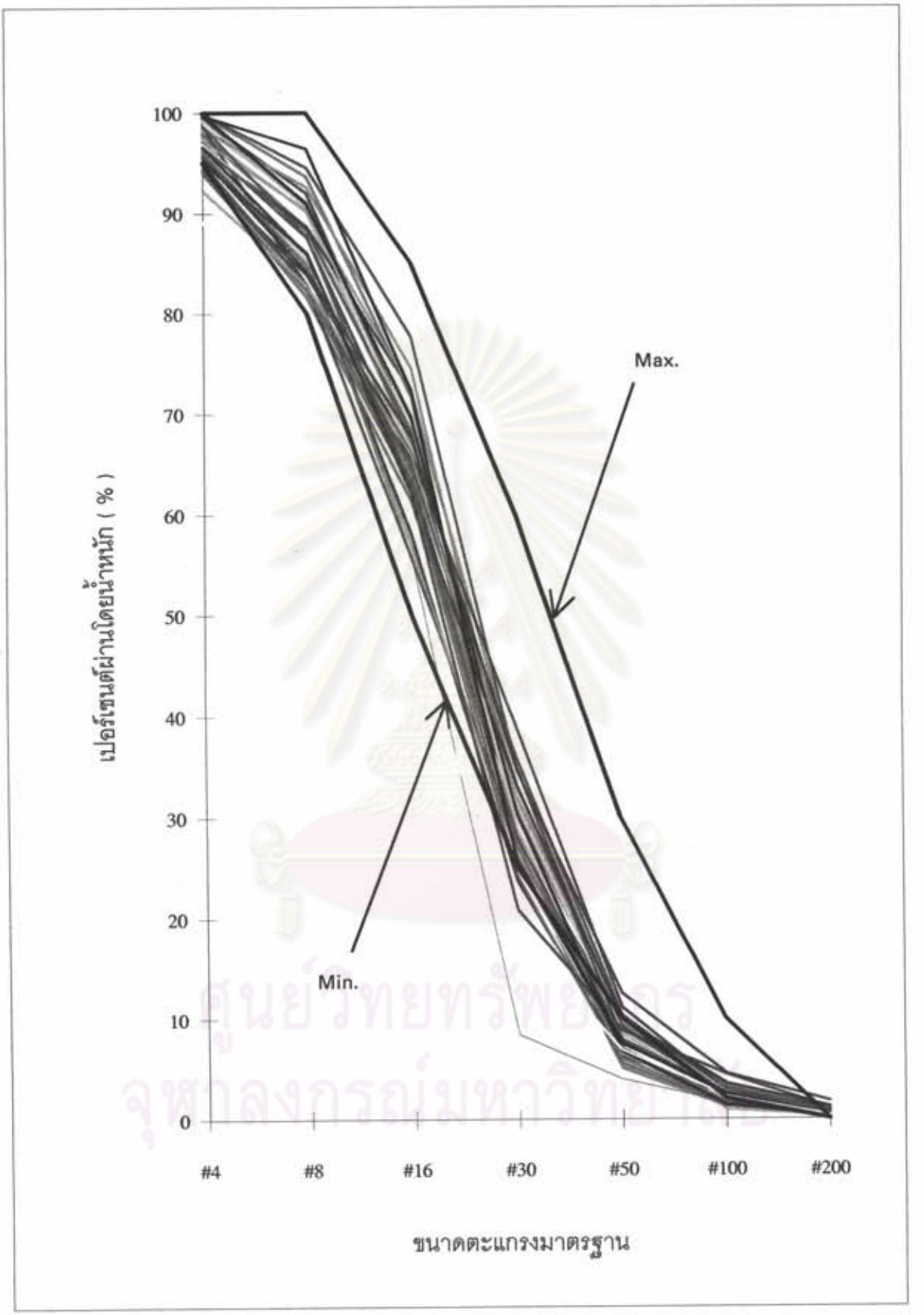
รูปที่ 3.2. ขอบเขตขนาดคละมวลรวมกำหนดสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัยนี้



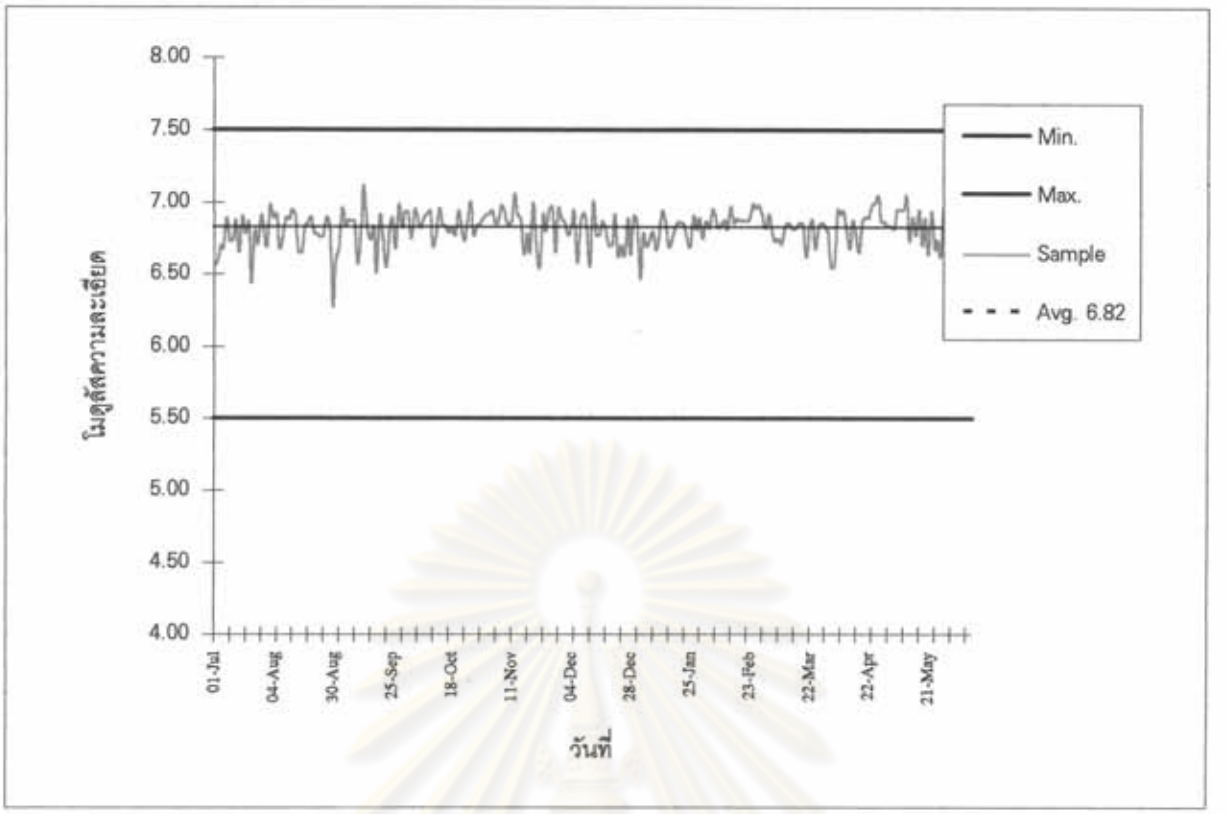
รูปที่ 3.3. ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาด 3/4" เทียบกับมาตรฐาน ASTM C - 33



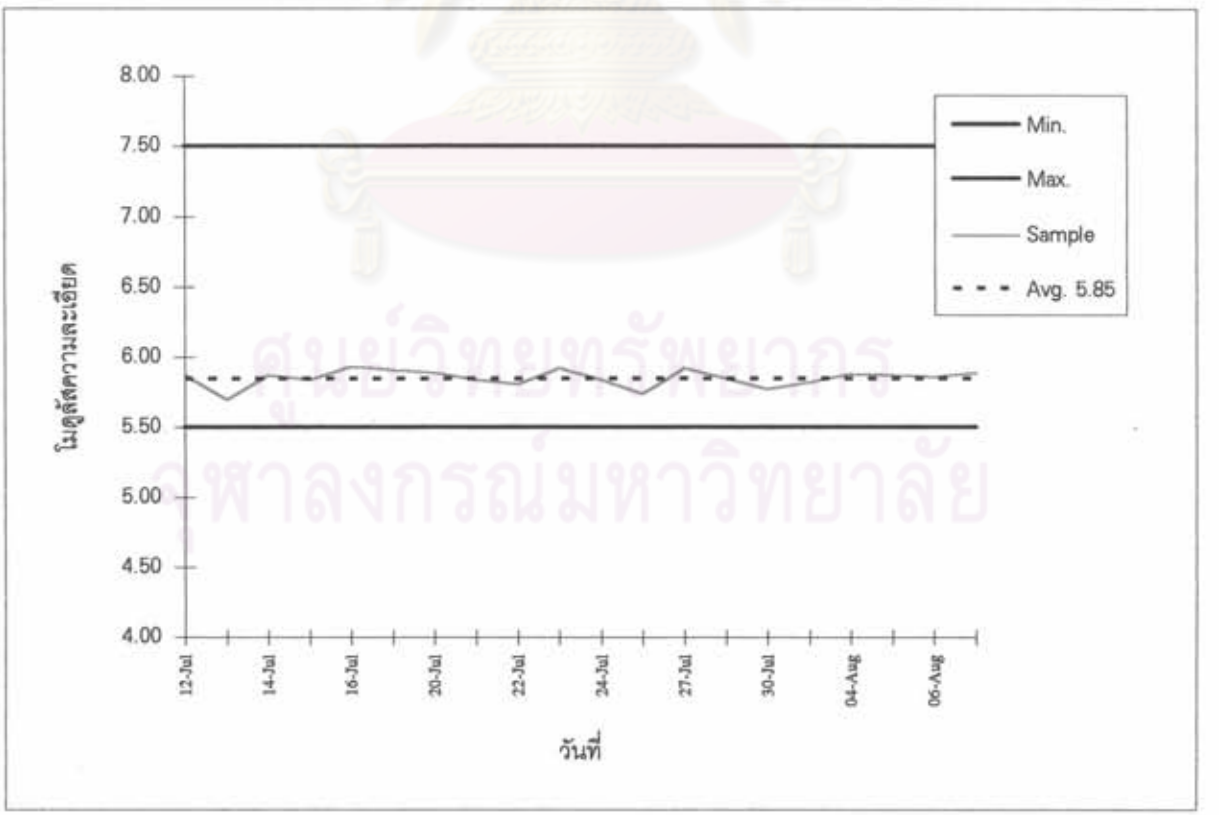
รูปที่ 3.4. ผลการทดสอบขนาดคละมวลรวมหยาบขนาด 3/8" เทียบกับมาตรฐาน ASTM C - 33



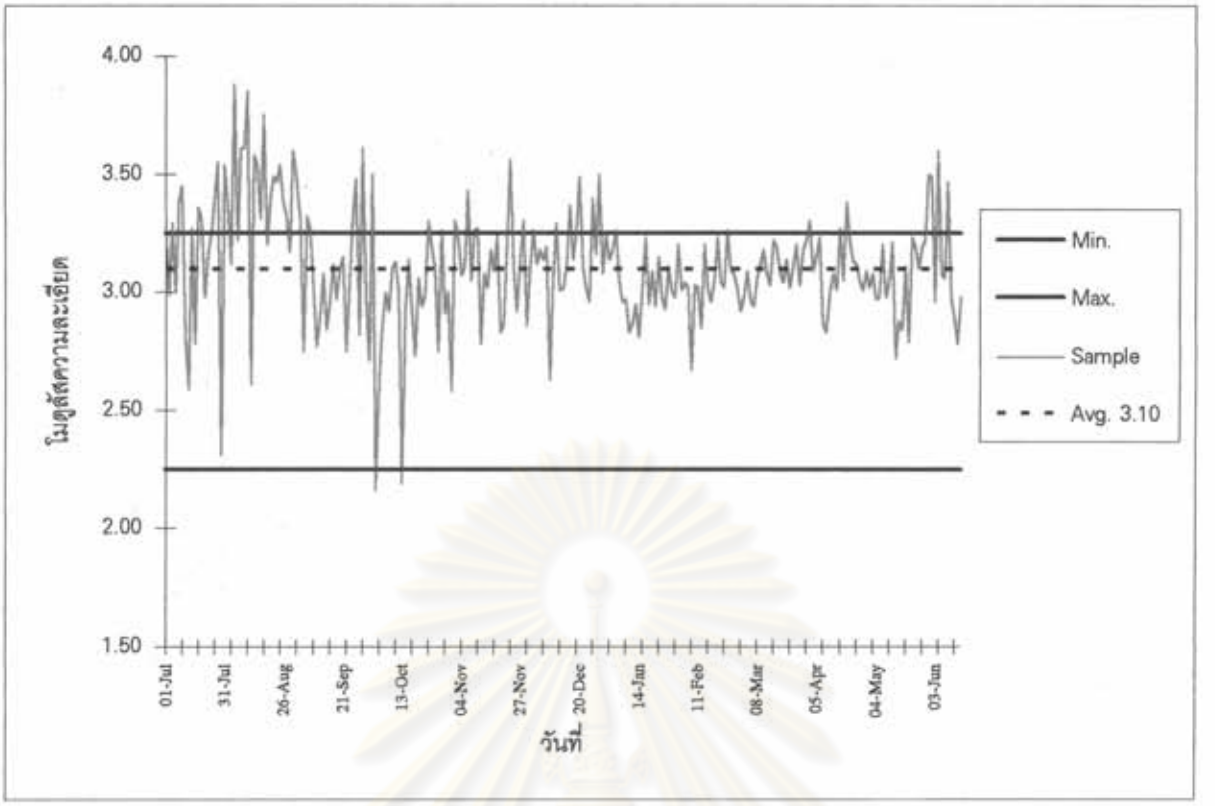
รูปที่ 3.5. ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด (ทราย) เทียบกับมาตรฐาน ASTM C - 33



รูปที่ 3.6. โมดูลัสความละเอียดจากการทดสอบมวลรวมหยาบ ขนาด 3/4"

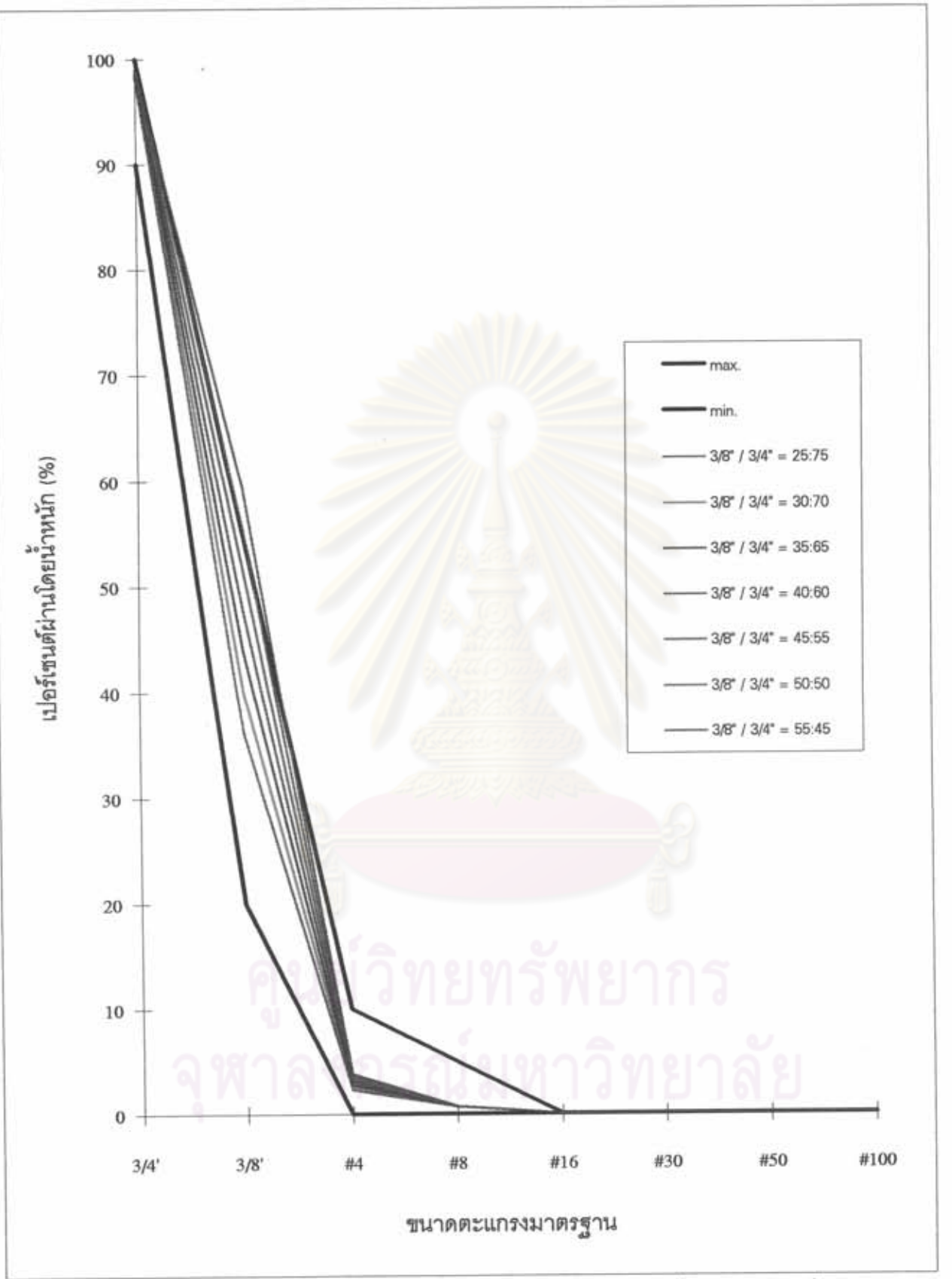


รูปที่ 3.7. โมดูลัสความละเอียดจากการทดสอบมวลรวมหยาบ ขนาด 3/8"

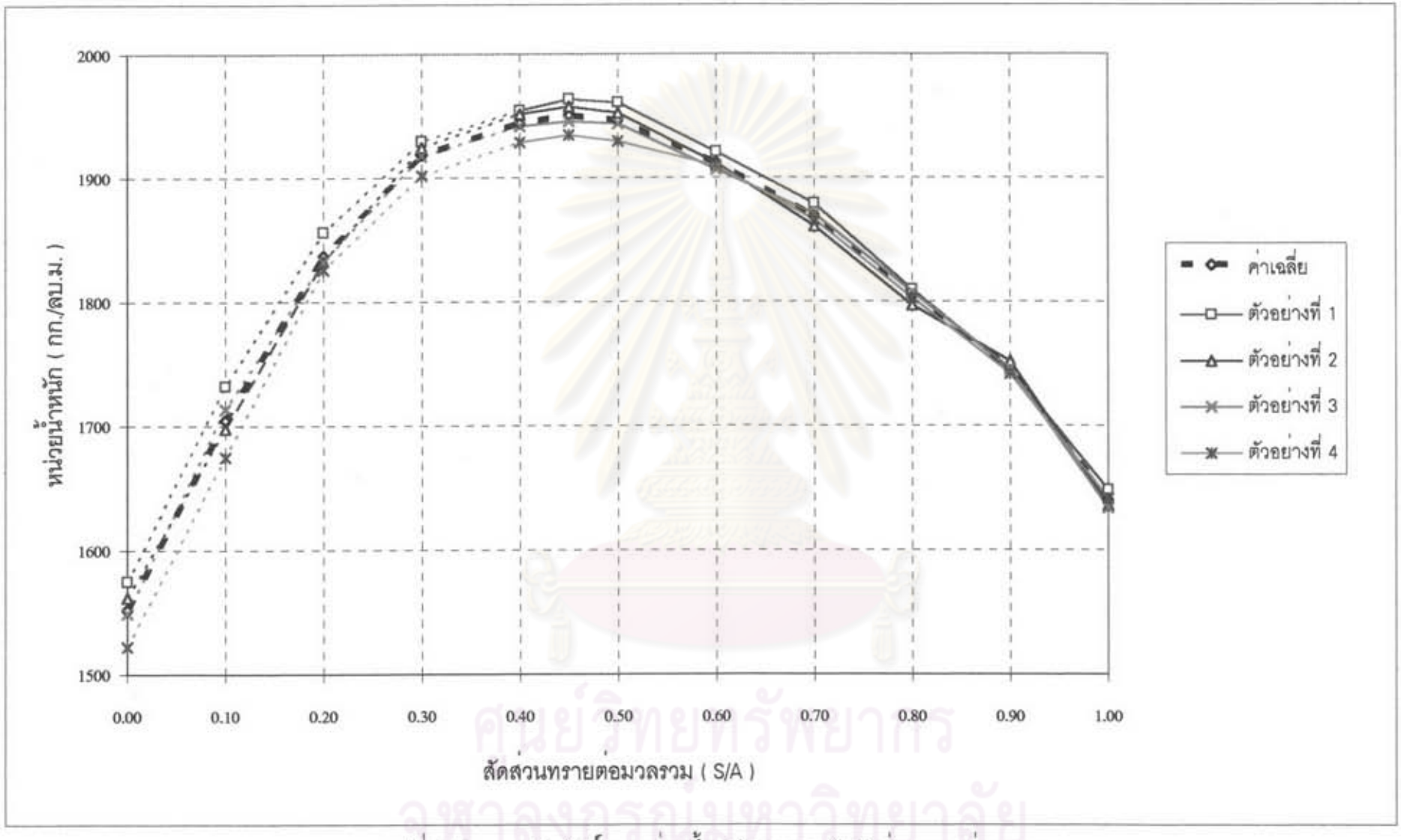


รูปที่ 3.8. โมดูลัสความละเอียดจากการทดสอบมวลรวมละเอียด (ทราย)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



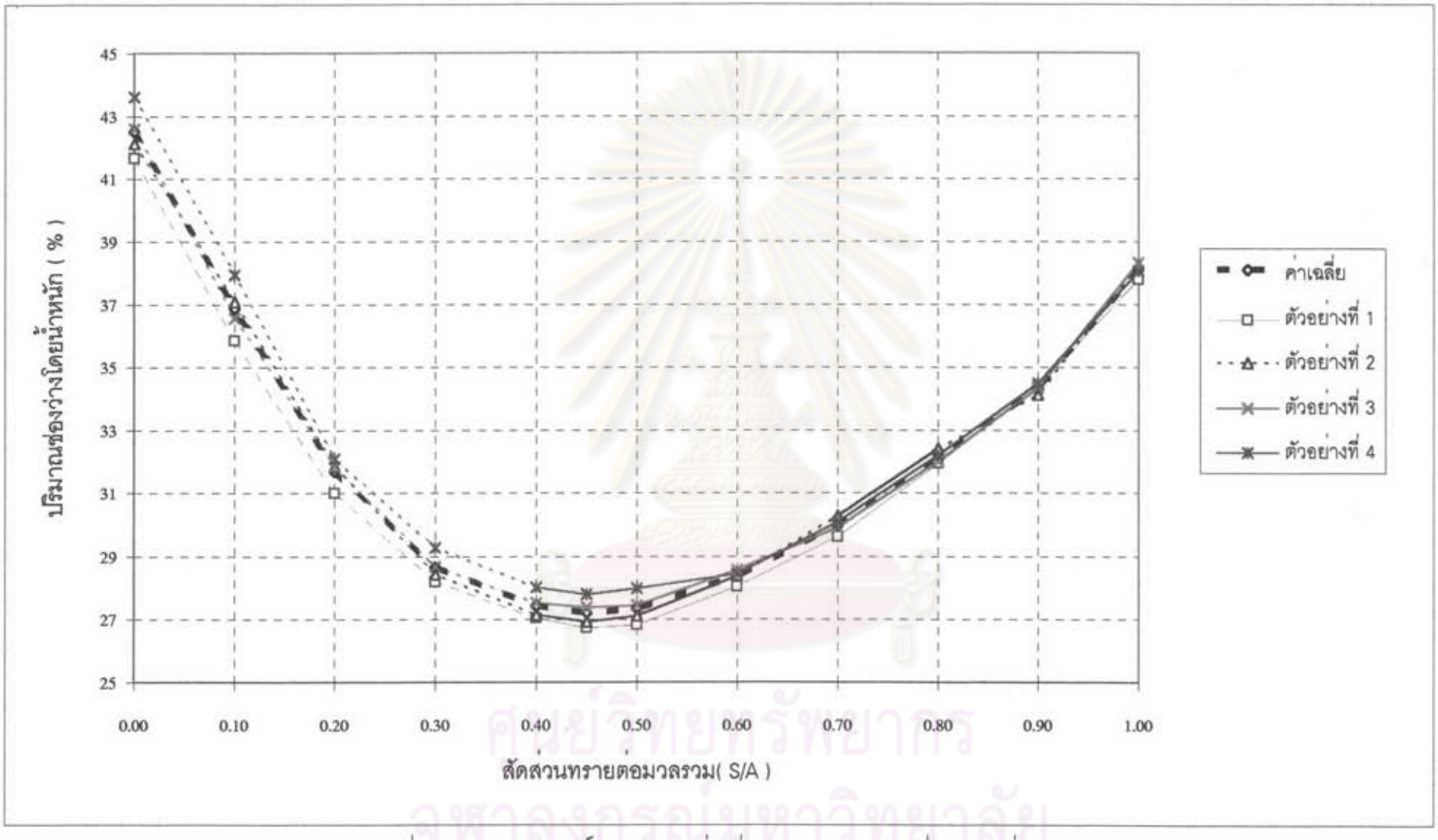
รูปที่ 3.9. การรวมขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาด 3/8" : 3/4" ที่อัตราการผสมต่างกัน



รูปที่ 3.10. ความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักมวลรวมกับสัดส่วนทรายต่อมวลรวม

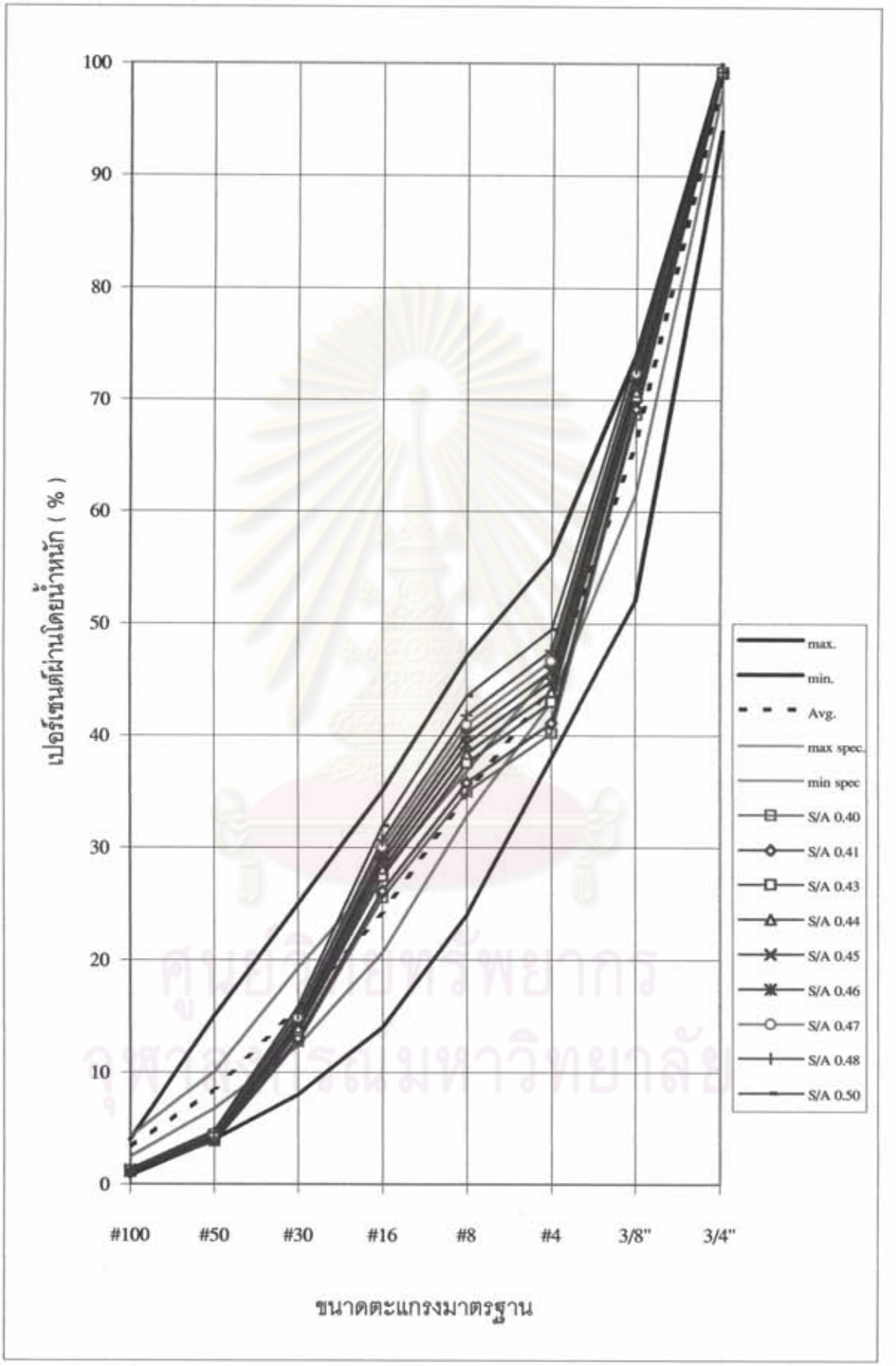
(S/A = 0.0 - 1.0)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.11. ความสัมพันธ์ของปริมาณช่องว่างในมวลรวมกับสัดส่วนทรายต่อมวลรวม

(S/A = 0.0 - 1.0)



รูปที่ 3.12. ขนาดคละมวลรวมตามสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (0.40 - 0.50)