บทที่ 4

ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม ของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต

4.1 บทนำ

การผสมจัดเป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่งในการผลิตคอนกรีต โดยการผสมที่เหมาะสมจะทำให้อนุภาคของส่วนผสมทั้งหมดมีความเป็นเนื้อเดียวกันและกระจายตัวอย่างเหมาะสมไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อน แต่กระบวนการผสมคอนกรีตในปัจจุบันที่ส่วนใหญ่จะใช้ระยะเวลาเป็นดัชนีในการควบคุมการผสมนั้นพบว่า เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากหากสัดส่วนผสมหรือเครื่องผสมเปลี่ยนแปลงไประยะเวลาการผสมที่เหมาะสมย่อมเปลี่ยนแปลงด้วย จากการศึกษาของ Stitmannaithum[35] ที่พบว่า คุณสมบัติของส่วนผสมจะเปลี่ยนแปลงตามค่าระดับความเข้มของการผสม (Mixing Intensity) ซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในการผสมต่อปริมาตรของแข็งในส่วนผสม (มีหน่วยเป็น Wh/l) โดยผลของชนิดเครื่องผสมและปริมาตรการผสมที่มีต่อค่าระดับความเข้มของการผสมนั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้น จึงเป็นการเหมาะสมที่จะใช้ค่าระดับความเข้มของการผสมเป็นดัชนีที่ใช้ควบคุมการผสม

ในงานคอนกรีต เมื่ออนุภาคของวัสดุผงเริ่มสัมผัสน้ำ อนุภาคจะยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากพันธะของน้ำ หากมีการผสมเกิดขึ้น แรงยึดเหนี่ยวเหล่านี้จะถูกทำลายและทำให้อนุภาคแยกออกจากกันดังรูปที่ 4.1 เมื่ออนุภาคแยกออกจากกันแล้ว Tattersall[13] เสนอว่ากระบวนการนี้จัดเป็นกระบวนการแตกตัวที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ กล่าวคือ จะมีแรงผลักเล็ก ๆ ทำให้อนุภาคไม่สามารถอยู่ติดกันได้อีก หากพิจารณารูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในขณะที่ระดับความเข้มของการผสมต่ำ ๆ อนุภาคบางส่วนยังอยู่ติดกันและจะมีช่องว่างอยู่ภายในซึ่งน้ำบางส่วนจะติดอยู่ทำให้ไม่สามารถช่วยหล่อลื่นส่วนผสมได้ โดยคุณสมบัติด้านการไหลจะดีที่สุดเมื่อทำการผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม ซึ่งทำให้อนุภาคแต่ละอนุภาคไม่อยู่ติดกันจึงทำให้น้ำไม่ถูกกักอยู่ภายใน ในขณะที่ระดับความเข้มของการผสมสูง ๆ ค่าการไหลจะลดลงเนื่องจากแต่ละอนุภาคเริ่มเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นจึงเหมือนเป็นพันธะอ่อน ๆ ที่ทำให้น้ำไม่สามารถทำการหล่อลื่นได้เต็มที่

ดังนั้น ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจึงเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้ส่วนผสมมีค่าการไหลที่มากที่สุด และเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของวัสดุผงมีค่าสูงกว่าอนุภาคของทรายและหินมาก จึงต้องใช้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่สูงสำหรับเพสต์เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์และคอนกรีต จากผลการทดลองที่ผ่านมา Stitmannaithum[35] ได้เสนอความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมดังนี้

$$E_{in} = \left(\frac{V_{sp}}{V_{st}}\right) E_{in,sp} = n_p E_{in,sp} \tag{4.1}$$

โดยที่

E_{in} = ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสม

V_{sp} = ปริมาตรของแข็งของวัสดุผงในส่วนผสม

V_{st} = ปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม

n_p = สัดส่วนปริมาตรของแข็งของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด

$E_{in,sp}$ = ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

จากสมการที่ (4.1) จะพบว่า สำหรับส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงชนิดเดียวกัน หากว่ามีค่าสัดส่วนปริมาตรวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดเท่ากันแล้วจะทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเท่ากันด้วย จากหลักการนี้จะทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตเป็นดังนี้

เนื่องจาก

$$n_{p,conc} < n_{p,mortar} < 1 \tag{4.2}$$

ดังนั้น

$$E_{in,conc} < E_{in,mortar} < E_{in,sp} \tag{4.3}$$

เมื่อ

$n_{p,conc}$ = สัดส่วนปริมาตรวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดในคอนกรีต

$n_{p,mortar}$ = สัดส่วนปริมาตรวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดในมอร์ตาร์

$E_{in,conc}$ = ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีต

$E_{in,mortar}$ = ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในการผสมมอร์ตาร์

$E_{in,sp}$ = ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในการผสมเพสต์

สำหรับค่าระยะเวลาในการผสมที่เหมาะสม จะพิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\int_{t=0}^{t=t_m} E_{mix} \cdot dt = E_{in} \tag{4.4}$$

เนื่องจากค่าพลังงานการผสม (E_{mix}) สามารถคำนวณได้และจะเท่ากับค่าคงที่สำหรับส่วนผสมหนึ่ง ๆ ดังนั้นจะสามารถหาค่าระยะเวลาในการผสมที่เหมาะสมได้ดังนี้

$$t_{mix} = \frac{E_{in}}{E_{mix}} \tag{4.5}$$

เมื่อ

t = ระยะเวลาในการผสม

t_{mix} = ระยะเวลาในการผสมที่เหมาะสม

E_{mix} = พลังงานที่ใช้ในการผสมของส่วนผสมนั้น ๆ

E_{in} = ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมนั้น ๆ

จากสมการที่ผ่านมาเบื้องต้น จะเห็นว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์จะมีความสำคัญมากสำหรับการหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีต และรวมไปถึงการหาค่าระยะเวลาในการผสมที่เหมาะสม ดังนั้นการศึกษาหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมใด ๆ ควรเริ่มจากการหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีค่า $n_p = 1$ ก่อนจึงจะสามารถทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่มี n_p ใด ๆ ได้

4.2 ผลการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ

4.2.1 กรณีของเพสต์

การทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์นี้ จะหาค่าการไหลของส่วนผสมโดยใช้วิธีโต๊ะการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230-90 โดยหาค่าการไหลของเพสต์ที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ซึ่งค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้ส่วนผสมมีค่าการไหลที่มากที่สุด Stitmannaithum[35] เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลและระดับความเข้มของการผสมในการผสมซีเมนต์เพสต์เป็นแบบพาราโบลาหรือพหุนามกำลังสอง ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุดของส่วนผสมแต่ละชนิดได้

สำหรับการทดลองจะใช้เครื่องผสมแบบ Paddle Type ขนาดเล็กที่มีความจุ 4 ลิตร ดังรูปที่ 3.3 และขนาดใหญ่ที่มีความจุ 20 ลิตร ดังรูปที่ 3.26 เพื่อพิจารณาผลของปริมาตรการผสมและชนิดของเครื่องผสมต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม การทดลองจะเริ่มจากเพสต์ที่ใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC-I) ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตั้งแต่ 0.239 – 0.4 เพื่อศึกษาถึงผลของปริมาณน้ำต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม สำหรับผลการทดลองหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลของซีเมนต์เพสต์ (OPC-I) ที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.3ก จะพบว่าปริมาณน้ำไม่ส่งผลให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเท่านั้นแต่ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคยังเหมือนเดิมนั่นคือค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชั่นยังมีค่าเท่าเดิมเมื่อปริมาณน้ำมีค่ามากกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ

ดังนั้น Stitmannaithum[35] จึงเสนอวิธีขจัดผลของปริมาณน้ำในส่วนผสมด้วยการทำค่าการไหลให้เป็นบรรทัดฐานด้วยค่าการไหลสูงสุดของแต่ละชุดการทดลอง ด้วยวิธีนี้จะสามารถหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุผงหนึ่ง ๆ ได้ เมื่อนำค่าการไหลจากรูปที่ 4.3ก มาทำให้เป็นบรรทัดฐานจะได้รูปที่ 4.3ข จากผลการทดลองในรูปที่ 4.3ข เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดจะได้สมการพหุนามกำลังสองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 0.93 ดังนี้

$$Fl_r = 0.6448 + 0.7953(log\ MI) - 0.4691(log\ MI)^2 \qquad (4.6)$$

โดยที่

Fl_r = ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน

MI = ค่าระดับความเข้มของการผสม

จากสมการที่ (4.6) สามารถคำนวณหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม (Optimum Mixing Intensity) ซึ่งทำให้เกิดค่าการไหลสูงสุดได้เท่ากับ 7.04 Wh/l สำหรับผลการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงประเภทอื่น ๆ ที่แยกตามรูปร่างของวัสดุผงมีดังนี้

4.2.1.1 เพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างกลม ($\psi = 1$)

ในกรณีนี้วัสดุผงที่ใช้คือ เถ้าลอยขนาดดั้งเดิม (OFA) และเถ้าลอยที่ผ่านการแยกละเอียดครั้งที่ 1 (FA1) ที่มีคุณสมบัติพื้นฐานตามตารางที่ 2.4 โดยผลการทดลองของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ จากรูปจะได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ OFA และ FA1 ที่ได้ทำค่าการไหลให้เป็นบรรทัดฐานแล้วเท่ากับ 2.1 Wh/l และ 2.26 Wh/l โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 0.93 และ 0.97 ตามลำดับ สำหรับสมการพหุนามกำลังสองของค่าการไหลที่เป็นบรรทัดฐานของเพสต์ทั้งสองชนิดนั้นจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

4.2.1.2 เพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ($\psi > 1$)

ในกรณีนี้จะประกอบด้วยวัสดุผงเพียงชนิดเดียวและวัสดุผง 2 ชนิดรวมกันที่สามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานรวมได้ดังสมการที่ (3.34) – (3.36) โดยวัสดุผงชนิดเดียวในการทดลองนี้ประกอบด้วยซีเมนต์ผสม (MC) ฝุ่นหินปูน (OLP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (OPC-III) ได้ผลการทดลองของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 4.6 – 4.8 ตามลำดับ จากรูปจะได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ MC, OLP และ OPC-III เท่ากับ 5.31 Wh/l 5.35 Wh/l และ 7.49 Wh/l โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 0.96, 0.96 และ 0.95 ตามลำดับ

สำหรับวัสดุผง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนั้นจะแบ่งเป็น 2 ชุดคือ ชุดแรกเป็นการนำเถ้าลอยขนาดดั้งเดิมมาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักตั้งแต่แทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และร้อยละ 40 ซึ่งให้สัญลักษณ์เป็น OFA10, OFA20, OFA30 และ OFA40 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ทำค่าการไหลให้เป็นบรรทัดฐานแล้วแสดงดังรูปที่ 4.9 – 4.12 ซึ่งได้ค่าระดับความเข้ม

ของการผสมที่เหมาะสมเท่ากับ 6.04 Wh/l, 5.15 Wh/l, 4.54 Wh/l และ 3.97 Wh/l โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 0.98, 0.96, 0.94 และ 0.97 ตามลำดับ สำหรับวัสดุผงชุดที่ 2 จะเป็นการนำฝุ่นหินปูนมาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักตั้งแต่แทนที่ร้อยละ 5,10, 15 และร้อยละ 20 ซึ่งให้สัญลักษณ์เป็น OLP5, OLP10, OLP15 และ OLP 20 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ทำค่าการไหลให้เป็นบรรทัดฐานแล้วแสดงดังรูปที่ 4.13 – 4.16 ซึ่งได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเท่ากับ 7.04 Wh/l, 6.97 Wh/l, 6.96 Wh/l และ 6.96 Wh/l โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 0.96, 0.98, 0.98 และ 0.95 ตามลำดับ สำหรับสมการพหุนามกำลังสองของค่าการไหลที่เป็นบรรทัดฐานของเพสต์ทุกชนิดนั้นจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

โดยค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า การผสมตามมาตรฐานที่ใช้ระยะเวลาการผสมคงที่นั้นจะได้ค่าระดับความเข้มของการผสมแตกต่างจากค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในทุกวัสดุผง โดยเพสต์ที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างเดียว ซีเมนต์ผสมและซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยในปริมาณต่าง ๆ นั้น การผสมตามมาตรฐานจะได้ค่าระดับความเข้มของการผสมน้อยกว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม แต่สำหรับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมฝุ่นหินปูนและซีเมนต์ประเภทที่ 3 เมื่อผสมตามมาตรฐานจะได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่สูงกว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม นั่นคือสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงต่าง ๆ ได้เมื่อใช้การผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมแทนที่การผสมตามมาตรฐานเดิม

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงผลของระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้วัสดุผงแต่ละชนิดซึ่งทดสอบตามาตรฐาน ASTM C191-92 เทียบกับการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 ได้ผลดังตารางที่ 4.2 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะช่วยลดทั้งระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของเซีเมนต์พสต์ได้ทุกชนิดของวัสดุผง เนื่องจากที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม อนุภาคซีเมนต์จะเกิดการกระจายตัวอย่างเหมาะสมส่งผลให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ที่รวดเร็วกว่าซึ่งจะเห็นผลของการลดลงของระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายที่ชัดเจนเมื่อใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์อย่างเดียว สำหรับผลของเถ้าลอยต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายนั้น พบว่า เมื่อใส่เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์จะทำให้เกิดการหน่วงระยะการก่อตัวและระยะเวลาจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อใส่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ในขณะที่เมื่อใส่ฝุ่นหินปูนแทนที่ซีเมนต์จะช่วยเร่งระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ แต่เมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้นระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.2.2 กรณีของมอร์ตาร์

การทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของมอร์ตาร์นี้ จะหาค่าการไหลของส่วนผสมโดยใช้วิธีโต๊ะการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230-90 เช่นเดียวกับกรณีของเพสต์ โดยมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุผง OPC-I และ OFA โดยมีสัดส่วนการผสมดังตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนปริมาตรวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด (n_p)เท่ากับ 0.31 แต่สำหรับมอร์ตาร์ M2-PC1 ซึ่งมีค่า n_p เท่ากับ 0.23 จะอ้างอิงจากผลการทดลองของนิพนธ์[36] โดยผลการทดลองที่ได้ของมอร์ตาร์ OPC-I และ OFA แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งพบว่า ค่าการไหลมีความสัมพันธ์แบบพาราโบลากับระดับความเข้มของการผสม

เช่นเดียวกับในกรณีของเพสต์ และได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ M1-OPC-I, M2-OPC-I และ M3-OFA เท่ากับ 2.34 Wh/l, 1.06 Wh/l และ 0.66 Wh/l ตามลำดับโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 0.98, 0.97 และ 0.98 ตามลำดับ สำหรับสมการพหุนามกำลังสองของค่าการไหลและค่าระดับความเข้มของการผสมแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่า วัสดุผงมีผลสำคัญต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของมอร์ตาร์ และสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือ ส่วนผสมที่มีสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงที่สูงกว่าจะมีแนวโน้มที่ต้องใช้ระยะเวลาในการผสมที่นานขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่มีปริมาตรของวัสดุผงต่ำ ๆ

4.2.3 กรณีของคอนกรีต

การทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของคอนกรีตนี้ จะหาค่าระยะการยุบตัวแทนค่าการไหล โดยทดสอบหาค่าระยะการยุบตัวตามมาตรฐาน ASTM C143 โดยค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้คอนกรีตเกิดการยุบตัวมากที่สุด สำหรับเครื่องผสมที่ใช้จะเป็นเครื่องผสมแบบกระทะที่มีขนาดความจุ 150 ลิตร และคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองจะเน้นคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผงแทนที่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพื่อให้สอดคล้องกับงานคอนกรีตจริงในปัจจุบัน โดยจะใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC-I), เถ้าลอยขนาดดั้งเดิมแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 (OFA40), เถ้าลอยแยกละเอียดครั้งที่ 1 หรือเถ้าลอยขนาดหยาบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 (FA140) และ เถ้าลอยแยกละเอียดครั้งที่ 2 หรือเถ้าลอยละเอียดสูงแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 (FA240) และออกแบบส่วนผสมโดยใช้สัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากมุ่งเน้นศึกษาถึงผลของชนิดวัสดุผง โดยสัดส่วนผสมที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.3 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองนั้นจะใช้ปริมาณของหิน ทราย รวมไปถึงปริมาณน้ำประสิทธิผลคงที่จะแตกต่างเพียงชนิดของวัสดุผงที่ใช้ โดยมีเพียงคอนกรีตที่ใช้วัสดุผง OPC-I ที่ใช้สัดส่วนการผสมที่แตกต่างกัน 2 สัดส่วนการผสมคือ C1-OPC-I และ C2-OPC-I และภายหลังจากทำการเทส่วนผสมทั้งหมดลงในเครื่องผสมแล้วจึงเปิดเครื่องผสมและเริ่มทำการวัดค่าระดับความเข้มของการผสม สำหรับการทดสอบค่ากำลังอัดนั้นจะทำการทดสอบคอนกรีตที่มีอายุ 28 และ 90 วัน โดยทำการบ่มในห้องบ่มที่มีความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 90 และใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

ผลการทดลองที่ได้ของคอนกรีตทุกประเภท พบว่า ระยะการยุบตัวมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าระดับความเข้มของการผสม และจะสามารถหาค่าระยะการยุบตัวที่มากที่สุดได้ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมได้ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นการหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีต C1 และ C2 ที่ใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างเดียว พบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากสมการพหุนามกำลังสองซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ของคอนกรีต C1 และ C2 มีค่าเท่ากับ 1.70 Wh/l และ 1.33 Wh/l ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากคอนกรีต C1 มีค่าสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงสูงกว่าคอนกรีต C2 คือมีค่าเท่ากับ 0.20 ซึ่งมากกว่าในกรณีของคอนกรีต C2 ที่มีค่าเพียง 0.14 เท่านั้น เมื่อคอนกรีตมีสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงที่สูง จะทำให้อนุภาคของวัสดุผงมีรอยต่อเกาะติดกันมากขึ้นจึงต้องใช้แรงภายนอกมากขึ้นในการผสมให้อนุภาคเกิดการกระจายตัว ดังนั้น ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจึงสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าระยะการยุบตัวของคอนกรีต C1 และ C2 พบว่า คอนกรีต C2 จะมีระยะการยุบตัวที่สูงกว่าเนื่องจากมีสัดส่วนของปริมาณน้ำที่สูงกว่า สำหรับค่ากำลังอัดนั้นพบว่า ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการ

ผสมที่ระดับความเข้มของการผสมสูง ๆ ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันและ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีต C1 มีค่าที่สูงกว่าคอนกรีต C2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า คอนกรีต C1 มีอัตราส่วนน้ำประสิทธิผลที่ต่ำกว่าจึงทำให้คอนกรีตมีความแน่นและมีความพรุนน้อยลง ค่ากำลังอัดจึงสูงขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นการหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยเถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอยที่มีความละเอียด 3 ขนาดคือ เถ้าลอยที่ผ่านการแยกละเอียดครั้งที่ 1 (FA1) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1733 ซม.^{2}/ก. เถ้าลอยขนาดดั้งเดิม (OFA) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2169 ซม.^{2}/ก. และเถ้าลอยที่ผ่านการแยกละเอียดครั้งที่ 2 (FA2) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3734 ซม.^{2}/ก. จากผลการทดลองได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต C3-FA140, C4-OFA40 และ C5-FA240 เท่ากับ 1.12 Wh/l, 1.23 Wh/l และ 1.42 Wh/l ตามลำดับ คอนกรีตทั้ง C3, C4 และ C5 เป็นคอนกรีตที่มีสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงสูงใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 0.22 แต่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้เมื่อเทียบกับคอนกรีต C1 ที่มีสัดส่วนปริมาตรวัสดุผงเท่ากับ 0.20 แล้วพบว่ามีค่าต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าการใส่เถ้าลอยจะช่วยลดค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลงได้ซึ่งได้ผลทั้งการผสมในส่วนของเพสต์และมอร์ตาร์ดังผลการทดลองที่ผ่านมา จากผลการทดลอง คอนกรีต C5 จะมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่สูงกว่าคอนกรีต C3 และ C4 เนื่องจากเถ้าลอย FA2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมากขึ้น การกระจายตัวอย่างเหมาะสมจึงต้องใช้ระดับความเข้มของการผสมที่สูงขึ้น โดยสำหรับคอนกรีต C4 และ C3 ที่มีความละเอียดใกล้เคียงกัน จะพบว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าที่ใกล้เคียงกันด้วย

สำหรับผลของระยะการยุบตัวของคอนกรีตนั้น C5 เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมจะพบว่า คอนกรีต C5 จะใช้ปริมาณน้ำไม่เท่ากับคอนกรีต C4 และ C3 เนื่องจากที่ปริมาณน้ำนั้นจะทำให้คอนกรีต C5 มีระยะการยุบตัวที่มากเกินจนการทดสอบด้วยวิธีหาระยะการยุบตัวอาจจะไม่เหมาะสมและอาจจะลำบากต่อการหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม จึงต้องทำการลดปริมาณน้ำลง และเป็นที่น่าสังเกตว่า คอนกรีต C5 มีสัดส่วนปริมาณน้ำที่ต่ำที่สุดแต่มีระยะการยุบตัวที่สูงที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากคอนกรีต C5 ใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง โดยเถ้าลอยที่มีความละเอียดมาก ๆ นี้จะสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างของอนุภาคซีเมนต์และมีผลทำให้สามารถไล่น้ำที่ถูกขังอยู่ได้ ปริมาณน้ำอิสระจึงมากขึ้นกว่าเดิม ปรากฏการณ์นี้เรียกได้ว่า ผลของการแทรกตัวของอนุภาคขนาดเล็ก (microfiller effect) โดยจะเกิดขึ้นเมื่อใช้วัสดุผงขนาดเล็ก ๆ เช่น เถ้าลอยหรือซิลิกาฟูม ผสมกับซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต การใช้วัสดุผงขนาดเล็กนี้จะช่วยลดปริมาณน้ำลงได้และก่อให้เกิดค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นตามมา ซึ่งผลของกำลังอัดที่ได้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า คอนกรีต C5 มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด รองลงมาจะเป็นคอนกรีต C4 และ C3 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากขนาดของเถ้าลอยทั้งสิ้น เป็นที่ทราบกันแล้วว่าเถ้าลอยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งจะส่งให้กำลังอัดในระยะยาวมีค่าสูงขึ้น จากผลการทดลองเมื่อใช้เถ้าลอยทั้ง 3 ขนาดจะพบว่า กำลังอัดที่อายุ 90 วันมีค่าสูงกว่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันประมาณ 100 ksc หรือเพิ่มอีกประมาณร้อยละ 20 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นนี้เห็นผลอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์อย่างเดียวที่กำลังอัดที่อายุ 90 วันมีค่าสูงกว่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันเพียงเล็กน้อย

4.3 แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ

4.3.1 กรณีของเพสต์

จากผลการทดลองจะพบว่า ค่าการไหลของเพสต์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความเข้มของการผสมซึ่งทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเปลี่ยนแปลงด้วยโดยการกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าการไหลของเพสต์สูงสุดเกิดขึ้นเมื่อทำการผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม โดยค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมนี้จะไม่ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงสำหรับส่วนผสมใด ๆ แต่จะขึ้นกับชนิดของวัสดุผงในส่วนของรูปร่างของอนุภาคเป็นหลัก สำหรับวัสดุผงที่มีรูปร่างกลม และผิวลื่น เช่น เถ้าลอยจะมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมต่ำกว่าวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมทั้งนี้เป็นเพราะพลังงานการผสมที่ใช้มีค่าต่ำกว่าและรูปร่างที่กลมมีคุณลักษณะในการกระจายตัวที่ดีกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีสัดส่วนช่องว่างที่ต่ำ แต่หากพิจารณาในด้านระยะเวลาการผสมที่เหมาะสมนั้นไม่เห็นผลของการลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากทั้งค่าพลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าลดลงทั้งคู่ จากผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 4.1 ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาควัสดุผงกับค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยรูปร่างที่กลม เช่น เถ้าลอย ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมเท่ากับ 1 จะมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ต่ำที่สุด และค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อรูปร่างของวัสดุผงเป็นเหลี่ยมมุมมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างใด ๆ จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_{in,sp} = \alpha_{sh} E_{in,sphere} \tag{4.7}$$

เมื่อ

$$\alpha_{sh} = 2.44\psi - 1.44 \tag{4.8}$$

โดยที่

$E_{in,sp}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงใด ๆ

α_{sh} = ค่าตัวประกอบที่เพิ่มขึ้นของระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเนื่องจากผลของรูปร่างของวัสดุผง

ψ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผง

$E_{in,sphere}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างกลมซึ่งจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.10 Wh/l

แบบจำลองในสมการที่ (4.7) และ (4.8) นี้เหมาะสำหรับเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมอยู่ในช่วงระหว่าง 1.0 – 2.0 และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงนักคือไม่เกิน 6000 ซม.^{2}/ก. ซึ่งตามปกติจะเป็นวัสดุผงสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป โดยการใช้วัสดุผงที่มีความละเอียดสูงมาก ๆ ที่อาจพบในคอนกรีตพิเศษบางประเภทอาจจะทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าสูงขึ้นได้เนื่องจากจะ

ต้องใช้พลังงานการผสมที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามผลของรูปร่างของวัสดุผงถือเป็นประเด็นหลักที่ส่งผลต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์

4.3.2 กรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีต

แบบจำลองที่ใช้ในกรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันนั้นยังคงอาศัยพื้นฐานจากแบบจำลองเดิมที่เสนอโดย Stitmannaithum[35] ดังสมการที่ (4.1) คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะขึ้นกับค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์และสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด แต่สำหรับแบบจำลองในกรณีของคอนกรีต Stitmannaithum[35] พบว่า สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์อย่างเดียวและใช้หินที่มีขนาดระหว่าง 10 – 40 มม. การเคลื่อนที่ของหินในส่วนผสมระหว่างการผสมมีผลต่อการช่วยกระจายอนุภาคซีเมนต์ในมอร์ตาร์ได้อีกทางหนึ่ง ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจึงมีค่าที่ลดลงอีกประมาณ 20% ดังนั้นเมื่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์เป็นดังสมการที่ (4.7) และ (4.8) แบบจำลองที่ใช้ในกรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีตจะเป็นดังนี้

แบบจำลองในกรณีของมอร์ตาร์

$$E_{in} = n_p E_{in,sp} = n_p \left(\alpha_{sh} E_{in,sphere}\right) \tag{4.9}$$

เมื่อ

E_{in} = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสม

n_p = สัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดในส่วนผสม

$E_{in,sp}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์สำหรับวัสดุผงรูปร่างใด ๆ

แบบจำลองในกรณีของคอนกรีต

$$E_{in} = 0.8 n_p E_{in,sp} = 0.8 n_p \left(\alpha_{sh} E_{in,sphere}\right) \tag{4.10}$$

จากผลการทดลองที่ได้ในกรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีต พบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะได้จากการหาค่าการไหลหรือระยะการยุบตัวสูงสุดจากสมการพหุนามกำลังสองหรือสมการพาราโบลาระหว่างค่าการไหลหรือระยะการยุบตัวกับระดับความเข้มของการผสม โดยผลเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองจากสมการที่ (4.7) – (4.10) แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งพบว่า แบบจำลองให้ผลที่ใกล้เคียงสำหรับในกรณีของมอร์ตาร์ แต่ในกรณีของคอนกรีตแล้วแบบจำลองที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าผลการทดลองจริงทั้งแบบจำลองจากสมการที่ (4.9) และ (4.10) ที่ลดค่าของระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลงเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของหิน อย่างไรก็ตาม ผลของรูปร่างของวัสดุผงต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของคอนกรีตยังเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกรณีของเพสต์และมอร์ตาร์ กล่าวคือ การใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างกลมจะทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าต่ำลง การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการเคลื่อนที่ของหินในมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุผงต่าง ๆ ที่มีความหนืดพลาสติกแตกต่างกันจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาแบบจำลองต่อไป

4.4 ผลการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก (HRWRA)

4.4.1 กรณีของเพสต์

สำหรับเพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากนั้น พบว่า ในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง ๆ ค่าความหนืดจะมีค่าลดลงอย่างมาก แต่ในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ๆ ค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำนั้น การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของเพสต์ที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ด้วยโต๊ะการไหลตามวิธีของเพสต์ปกติจึงไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงใช้วิธีกรวยการไหลซึ่งเป็นวิธีการทดลองหาค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM C939-94a เพื่อหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม โดยค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้เพสต์มีระยะเวลาการไหลต่ำที่สุดเมื่อใช้ปริมาตรของเพสต์ 1 ลิตร การทดลองของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสมที่เสนอโดยนิพนธ์[36] ดังนี้

$$Fl_{time} = A \cdot exp\left(-\left(B(MI)^2 + C \cdot MI\right)\right) \tag{4.11}$$

เมื่อ

Fl_{time} = ระยะเวลาการไหล

MI = ระดับความเข้มของการผสม

A, B, C = ค่าคงที่สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณสารลดน้ำอย่างมากหนึ่ง ๆ

สำหรับเพสต์ที่ใช้วัสดุผงประเภทอื่นทำการศึกษาเพียงใช้เถ้าลอยขนาดดั้งเดิมแทนที่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 (OFA40) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.25 และ 0.30 และใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากเท่ากับ 0.50%, 0.75% และ 1.00% โดยน้ำหนักของวัสดุผง ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 สำหรับสมการความสัมพันธ์ของค่าการไหลแสดงอยู่ในภาคผนวก ค. โดยผลการทดลองที่ได้และการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบกับผลของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากผลการทดลองจะได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ OFA40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.25 และที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากเท่ากับ 0.50%, 0.75% และ 1.00% คือ 1.90 Wh/l, 1.90 Wh/l และ 1.50 Wh/l ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.30 และที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากเท่ากับ 0.50%, 0.75% และ 1.00% คือ 1.00 Wh/l, 1.00 Wh/l และ 0.60 Wh/l ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจากเดิมในกรณีที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากของเพสต์ OFA40 ที่มีค่าเท่ากับ 3.97 Wh/l สำหรับในกรณีของเพสต์ที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 เช่นกัน ซึ่งพบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำและปริมาณสารลดน้ำอย่างมากเพิ่มขึ้นโดยปริมาณการลดลงจะต่ำกว่าในกรณีของเพสต์ OFA40 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะขึ้นกับทั้งปริมาณน้ำและปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่ใส่ในส่วนผสมรวมไปถึงชนิดของวัสดุผงที่ใช้ด้วย

4.4.2 กรณีของคอนกรีต

การทดลองในกรณีของคอนกรีตจะทำการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 (CS1-OPC-I), เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 (CS2-OFA20) และเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 (CS3-OFA40) ซึ่งมีสัดส่วนการผสมดังตารางที่ 4.3 และใส่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากเท่ากับ 0.50% โดยน้ำหนักของวัสดุผง ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23 โดยสมการพหุนามกำลังสองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการยุบตัวและระดับความเข้มของการผสมแสดงไว้ในภาคผนวก ก.3 จากผลการทดลองจะได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต CS1, CS2, CS3(0.5%SP) และ CS3 (1.0%SP) เท่ากับ 1.14 Wh/l, 0.93 Wh/l, 0.88 Wh/l และ 0.93 Wh/l ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงตามร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอย เมื่อทำการเปรียบเทียบผลกับคอนกรีตที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากแล้วจะเห็นว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าที่ลดลง โดยจะลดลงมากในกรณีที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์มากขึ้นซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกรณีของเพสต์ สำหรับผลของระยะการยุบตัว จะพบว่า คอนกรีตมีระยะการยุบตัวเพิ่มขึ้นมากกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากทั้งที่ลดปริมาณน้ำลงซึ่งเป็นผลมาจากการใส่สารลดน้ำอย่างมากที่ทำให้อนุภาคซีเมนต์ไม่เกาะตัวกัน และการใส่เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์จะช่วยลดปริมาณน้ำลงได้อีกที่ระยะการยุบตัวเท่ากับคอนกรีตธรรมดา เมื่อพิจารณาคอนกรีต CS3-OFA40 จะพบว่า การใส่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากเท่ากับ 1.0% จะทำให้คอนกรีตมีระยะการยุบตัวน้อยลงกว่าใส่ที่ปริมาณ 0.5% เล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงปริมาณการใส่ที่มากเกินปริมาณที่เพียงพอที่จะดูดติดบนอนุภาคของวัสดุผง การใส่ในปริมาณที่มากเกินไปบางครั้งอาจส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวและจะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติอื่น ๆ และในกรณีนี้การใส่ในปริมาณ 1.0% ไม่ได้ทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลดลงไปมากกว่าการใส่ในปริมาณ 0.5%

ผลของระดับความเข้มของการผสมจะมีผลอย่างมากต่อคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก โดยการผสมเกินกว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะทำให้ระยะการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าลดลงและลดลงจนเกือบไม่มีระยะการยุบตัวเมื่อค่าระดับความเข้มของการผสมยังมีค่าสูงขึ้นอีก ผลที่ได้นี้เกิดขึ้นทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ใส่เถ้าลอย จึงเป็นข้อควรระวังสำหรับการทำการผสมคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากซึ่งโดยทั่วไปจะต้องการระยะการยุบตัวที่สูง นั่นคือ ต้องไม่ทำการผสมเกินกว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมากเกินไป

สำหรับผลของระดับความเข้มของการผสมต่อค่ากำลังอัด พบว่า ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อระดับความเข้มของการผสมมากขึ้น หากทำการเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากจะพบว่า เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมากจะทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นทั้งคอนกรีต CS1, CS2 และ CS3 เนื่องจากคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น และเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น สำหรับค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันพบว่า คอนกรีต CS3 มีค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์มากที่สุดซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากเถ้าลอยยังเกิดขึ้นไม่เต็มที่ ค่ากำลังอัดจึงยังคงมีค่าต่ำ แต่หากทำการบ่มที่ระยะเวลามากขึ้น ค่ากำลังอัดจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นด้วย

4.5 แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก (HRWRA)

4.5.1 กรณีของเพสต์

เนื่องจากสารลดน้ำอย่างมากทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า สารลดน้ำอย่างมากจะทำให้เกิดแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้า แรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้านี้จะทำหน้าที่ผลักอนุภาคซีเมนต์ให้กระจายตัวออกและทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ด้วยเหตุนี้ จำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคบางส่วนจึงสลายไป การป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนนี้จะทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคลดลงและทำให้เกิดการหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค เป็นผลให้ใช้พลังงานการผสมต่ำลง

ด้วยเหตุนี้ นิพนธ์[36] ได้เสนอแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากดังนี้

$$E_{in,\%SP} = \alpha_{red} E_{in,sp} \tag{4.12}$$

$$\alpha_{red} = \beta_1 \beta_2 \tag{4.13}$$

โดยที่

$E_{in,\%SP}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก

α_{red} = ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

$E_{in,sp}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก

β_1 = ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคที่ลดลงและจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น

β_2 = ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากสารลดน้ำอย่างมากทำหน้าที่เสมือนม่านป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค

โดยค่า β_1 จะประกอบด้วย 2 พจน์ดังนี้

$$\beta_1 = \gamma_k \gamma_c \tag{4.14}$$

เมื่อ

γ_k = ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจากผลของค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชั่นที่สูงขึ้น ซึ่งจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก

γ_c = ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อที่ลดลงจากผลของแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้าของสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก

ค่า γ_k มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\gamma_k = \frac{\pi}{k\left(\phi_{sp} \cdot w_s\right)}\left(\phi_{sp} \cdot w_s + \frac{1}{\rho}\right) \tag{4.15}$$

เมื่อ

k = ค่าตัวเลขโดออร์ดิเนชั่นของเพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

ϕ_{sp} = ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงเนื่องจากสารลดน้ำอย่างมาก

w_s = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

ρ = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผง

จากการวิเคราะห์ย้อนกลับจะได้ว่า γ_c มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารลดน้ำอย่างมากดังนี้

$$\gamma_c = 1 - 0.38\omega_{SP}^{0.22} \tag{4.16}$$

เมื่อ ω_{SP} คือ ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่ใช้ (โดยน้ำหนักของซีเมนต์)

ค่า β_1 ที่ได้จะทำการวิเคราะห์จากกรณีที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ สำหรับค่า β_2 สามารถวิเคราะห์ได้จาก กรณีที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคไม่เป็นศูนย์ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ ค่า β_2 จะเท่ากับ 1.0 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\beta_2 = 1 - a \cdot \omega_{SP}^{b} \tag{4.17}$$

โดยที่

$$a = -1.33 + 9.00\left(w/c\right) - 12.09\left(w/c\right)^2$$

$$b = -2.93 + 21.57\left(w/c\right) - 32.88\left(w/c\right)^2$$

สำหรับในกรณีของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงอื่น ๆ นอกจากซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งจากการทดลองจะใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 (OFA40) แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมยังใช้พื้นฐานตามแบบจำลองในสมการที่ (4.12) และ (4.13) แต่ค่า γ_k จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุผงและค่า γ_c จะเปลี่ยนแปลงไปจากสมการที่ (4.16) เช่นเดียวกับค่า β_2 ที่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากสมการที่ (4.17) เนื่องจากผลของรูปร่างกลมของเถ้าลอยที่มีคุณสมบัติในการกระจายตัวที่ดี จะช่วยลดระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลงได้อีก โดยค่า γ_c จะเปลี่ยนไปดังนี้

$$\gamma_c = \left(\psi/1.9\right)\left(1 - \left(\frac{0.722\omega_{SP}^{0.22}}{\psi}\right)\right) \tag{4.18}$$

เมื่อ

ψ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผง

และค่า β_2 จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\beta_2 = \left(1 - \left(\frac{a\omega_{SP}^{b}}{\psi}\right)\right) \tag{4.19}$$

โดยที่

$$a = -2.53 + 17.1\left(w/c\right) - 22.97\left(w/c\right)^2$$

$$b = -2.93 + 21.57\left(w/c\right) - 32.88\left(w/c\right)^2$$

จะเห็นว่าค่า γ_c และ β_2 ในสมการที่ (4.18) และ (4.19) จะมีค่าเหมือนเดิมสำหรับกรณีที่ใช้พสต์ที่มีวัสดุผงเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่จะเปลี่ยนไปเมื่อนำเถ้าลอยมาแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณต่าง ๆ

4.5.2 กรณีของคอนกรีต

แบบจำลองในกรณีของคอนกรีตนี้เป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากสมการที่ (4.1) คือค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะขึ้นกับค่าสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงและค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์ ดังนั้นสำหรับส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากจะได้แบบจำลองที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_{in} = n_p E_{in,\%SP} \tag{4.20}$$

จะได้

$$E_{in} = n_p \alpha_{red} E_{in,sp} \tag{4.21}$$

เมื่อรวมกับผลของรูปร่างของวัสดุผงและการเคลื่อนที่ของหินจะได้

$$E_{in} = 0.8 n_p \alpha_{red} \left(\alpha_{sh} E_{in,sphere}\right) \tag{4.22}$$

โดยที่

E_{in} = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสม

$E_{in,\%SP}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากโดยการแทนค่า w/c ด้วย $(w/c)_{eff}$

$E_{in,\ sphere}$ = ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างทรงกลม

α_{red} = ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเนื่องจากผลของสารลดน้ำอย่างมาก

α_{sh} = ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเนื่องจากผลของรูปร่างของวัสดุผง

n_p = สัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด

สำหรับผลเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่ได้กับค่าที่ได้จากแบบจำลองของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า ในกรณีของคอนกรีตนั้นค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจากแบบจำลองจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยค่าจากแบบจำลองจะต่ำมากในกรณีของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมาก ๆ แต่สำหรับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์อย่างเดียวค่าจากแบบจำลองจะใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การที่ผลการทดลองมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่สูงเป็นเพราะในการผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมาก ๆ การเคลื่อนที่ของหินอาจไม่ได้ส่งผลในการช่วยกระจายอนุภาคมากเหมือนในกรณีคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากสภาพความหนืดของมอร์ตาร์แตกต่างกัน ลักษณะการเคลื่อนที่ของหินจึงแตกต่างกันไปด้วย อีกทั้งในส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยมาก ๆ จะมีคุณสมบัติในการกระจายตัวที่ดีอยู่แล้วแม้จะใช้พลังงานการผสมต่ำ ๆ ดังผลการทดลองที่ได้จากกรณีของเพสต์ การเคลื่อนที่ของหินในสภาพความหนืดต่ำ ๆ เช่นนี้ จะทำให้หินเกิดการเสียดสีกันมากกว่าปกติและเป็นเหตุให้พลังงานการผสมและค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมสูงขึ้นได้ ดังนั้น การศึกษาเพิ่มเติมสำหรับผลของการเคลื่อนที่ของหินในสภาพความหนืดของมอร์ตาร์ที่แตกต่างกันจะสามารถทำให้เข้าใจพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้มากขึ้น และจะทำให้สร้างแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงได้ต่อไป

4.6 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มจากโรงงานผสม

ที่ผ่านมาจะเป็นการศึกษาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากห้องปฏิบัติการ การนำผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการไปสู่การใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้งานวิจัยเกิดประโยชน์มากขึ้น ในหัวข้อนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากการผสมในโรงงานผสมจริงมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการเพื่อทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น อันจะนำไปสู่การเข้าใจพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในทุกระดับการใช้งานในภายหลัง จากการศึกษาของสุดารัตน์[37] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสม 5 โรงงานที่มีกระบวนการผสมแตกต่างกันดังตารางที่ 4.6 ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของคอนกรีตได้เป็น 3 ประเภทตามส่วนผสมที่ใช้คือ คอนกรีตที่ไม่ใส่ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มซึ่งได้จากโรงงานผสม ก. คอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่มซึ่งได้จากโรงงานผสม ข. ค. และ ง. และคอนกรีตที่ใส่ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มซึ่งได้จากโรงงานผสม ค. ง. และ จ. สำหรับน้ำยาผสมเพิ่มที่ใช้จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ สารลดปริมาณน้ำ (ใช้สัญลักษณ์ว่า A) สารหน่วงการก่อตัว (ใช้สัญลักษณ์ว่า D) และสารลดปริมาณน้ำและหน่วงการก่อตัว (ใช้สัญลักษณ์ว่า A+D) สำหรับผลการทดสอบการผสมจะแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานซึ่งเป็นสัดส่วนของค่าการยุบตัวต่อค่าการยุบตัวสูงสุดของสัดส่วนผสมหนึ่ง ๆ โดยค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานจะคำนวณได้ดังสมการที่ 4.23 ดังนี้

$$NSlm = \frac{Slm_r}{Slm_{max}} \tag{4.23}$$

เมื่อ

$NSlm$ = ค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน

Slm_r = ค่าการยุบตัวจริงที่ทดสอบได้

Slm_{max} = ค่าการยุบตัวสูงสุดที่สัดส่วนผสมนั้นซึ่งเป็นค่าการยุบตัวที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

โดยผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลจะแยกตามประเภทของคอนกรีตดังนี้

4.6.1 คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

โรงงาน ก. เป็นเพียงโรงงานผสมเดียวที่ทำการผสมคอนกรีตชนิดนี้ สำหรับสัดส่วนการผสมคอนกรีตนี้แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นคอนกรีต mix 1 ที่มีค่า n_p=0.12 โดยความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มของการผสมและค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งพบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.30 Wh/l

4.6.2 คอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่ม

สำหรับสัดส่วนการผสมคอนกรีตจะเป็นคอนกรีต mix 2-4 ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งทำการผสมโดยโรงงาน ข. ค. และ ง. ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มของการผสมและค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแสดงดังรูปที่ 4.26 – 4.28 ซึ่งพบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต mix 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 0.336, 0.295 และ 0.219 Wh/l ตามลำดับ การวิเคราะห์ผลสำหรับคอนกรีตประเภทนี้นั้นค่อนข้างยากเนื่องจากเป็นคอนกรีตที่ได้จากคนละโรงงานที่มีลักษณะเครื่องผสมและลำดับการใส่ส่วนผสมแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง โดยโรงงาน ข.และ ค. ต่างเป็นเครื่องผสมแบบ Pan Mixer เหมือนกัน แต่มีลำดับการใส่ส่วนผสมที่แตกต่างกัน ส่วนโรงงาน ง. นั้นใช้เครื่องผสมแบบ Drum Mixer ซึ่งจากผลการทดลองนั้นค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากเครื่องผสมแบบ Drum Mixer มีแนวโน้มที่ต่ำกว่าเครื่องผสมแบบ Pan Mixer

4.6.3 คอนกรีตที่ใส่ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม

สำหรับสัดส่วนการผสมคอนกรีตจะเป็นคอนกรีต mix 5 - 13 ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งทำการผสมโดยโรงงาน จ. ค. และ ง. โดยค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้สำหรับคอนกรีตแต่ละสัดส่วนการผสมแสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งจากข้อมูลในตารางสามารถวิเคราะห์แยกเป็นประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

สำหรับผลที่ได้จากโรงงานผสม พบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนการผสมส่วนใหญ่จะใช้ปริมาณน้ำที่ค่อนข้างสูงและมีค่าสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงที่ต่ำ โดยการวิเคราะห์ผลที่ได้นั้นจะแยกเป็นส่วน ๆ ดังนี้

สำหรับผลของปริมาณเถ้าลอยต่อระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาคอนกรีต mix 7 เทียบกับ mix 10 ซึ่งได้จากโรงงานผสม ค. เหมือนกันและใส่ปริมาณน้ำยาผสมเพิ่มใกล้เคียงกัน แต่ mix 7 จะแทนที่ปริมาณเถ้าลอยมากกว่าคือร้อยละ 0.16 เทียบกับร้อยละ 0.05 พบว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต mix 7 ซึ่งเท่ากับ 0.20 Wh/l มีค่าต่ำกว่า mix 10 ซึ่งเท่ากับ 0.25 Wh/l นอกจากนี้สำหรับคอนกรีตที่ได้จากโรงงาน ง. ซึ่งแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากกว่าโรงงานอื่น ๆ พบว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จะมีค่าที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากโรงงานอื่นด้วยทำให้สรุปได้ว่า การแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นเป็นปัจจัยหลักในการช่วยลดค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลงได้

สำหรับผลของปริมาณน้ำยาผสมเพิ่มต่อระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม จากผลการทดลองซึ่งใช้น้ำยาผสมเพิ่ม 3 ชนิดด้วยกันพบว่า การใส่น้ำยาผสมเพิ่มมีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลดลง แต่สำหรับผลของชนิดของน้ำยาผสมเพิ่มที่มีต่อการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมนั้นยังไม่ชัดเจนซึ่งจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากการทำวิจัยเพิ่มเติมจึงจะสามารถสรุปได้

สำหรับผลของชนิดเครื่องผสมต่อระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม จากผลการทดลองที่ได้พบว่าการใช้เครื่องผสมแบบ Drum Mixer มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าลดลงแต่ผลที่ได้ยังไม่ชัดเจนนักเมื่อเทียบกับผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลดลงได้มาก

สำหรับการนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองนั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมอีกหลายประการจึงจะสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้อย่างถูกต้อง โดยปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจส่งผลต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมยังเป็นสิ่งที่ต้องทำการวิจัยเพิ่มเติม เช่น ผลของชนิดของน้ำยาผสมเพิ่มที่ใช้ การเคลื่อนที่ของหินและสำหรับการผสมในปริมาตรมาก ๆ อาจมีผลของลำดับการใส่ส่วนผสมต่อการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมด้วย

4.7 สรุป

ผลของวัสดุผงในด้านรูปร่างนั้นถือว่ามีบทบาทสำคัญต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมทั้งจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและโรงงานผสมจริง โดยจะส่งผลต่อการผสมทั้งในกรณีของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก จากผลการทดลองที่ได้จะสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของส่วนผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความเข้มของการผสม โดยคุณสมบัติในด้านการไหลเช่น ค่าการไหล ระยะเวลาการไหลและระยะการยุบตัว จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมนี้จะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่ทำให้ส่วนผสมมีค่าการไหลมากที่สุด โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับระดับความเข้มของการผสมจะมีความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสองหรือแบบพาราโบลา

2. สำหรับเพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก พบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะขึ้นกับรูปร่างของวัสดุผงเป็นหลักและไม่ขึ้นกับปริมาณน้ำในส่วนผสม เนื่องจากถือว่าเพสต์ยังมีลักษณะการเรียงตัวของวัสดุผงเหมือนเดิม เพียงแต่ระยะห่างระหว่างอนุภาคสูงขึ้น โดยวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมเช่น เถ้าลอย จะมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมต่ำที่สุด คือเท่ากับ 2.10 Wh/l ในขณะที่ซีเมนต์ประเภทที่ 1 จะมีค่าเท่ากับ 7.04 Wh/l ดังนั้นการเลือกใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน นอกจากจะได้ผลดีทั้งทางด้านกำลังอัดระยะยาวที่สูงเพิ่ม ระยะการขุบตัวที่ดีขึ้นแล้วในด้านการผสม จะช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในการผสมลงได้อย่างมากอีกด้วย การที่วัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมต่ำที่สุดนั้นเป็นเพราะมีสัดส่วนช่องว่างที่ต่ำ จึงมีคุณสมบัติในการกระจายตัวที่ดีรวมไปถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคมีค่าที่ต่ำอีกด้วย
3. การผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีแนวโน้มที่จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายเร็วขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาคซีเมนต์มีการกระจายตัวอย่างเหมาะสมจึงมีพื้นที่ผิวที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมากขึ้น
4. สำหรับเพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก พบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะมีค่าลดลงไปอีก ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้าจากสารลดน้ำอย่างมากที่ช่วยสลายรอยต่อระหว่างอนุภาค รวมทั้งป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ดังนั้นเพสต์จึงมีการกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ผลของการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมนี้จะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ คือ ชนิดของวัสดุผงที่ใช้ โดยการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์จะมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลดลงได้มากกว่าการใช้ซีเมนต์อย่างเดียว นอกจากนี้ยังขึ้นกับปริมาณน้ำในส่วนผสม รวมไปถึงชนิดและปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่ใช้
5. ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีตทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากจะขึ้นกับสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงในส่วนผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์
6. ผลของรูปร่างของวัสดุผงและน้ำยาผสมเพิ่มที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากโรงงานผสมจริงมีแนวโน้มเดียวกันกับผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ แต่การวิเคราะห์อย่างละเอียดจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยอีกหลายประการประกอบ เช่น ผลการเคลื่อนที่ของหินในมอร์ตาร์ที่มีสภาพความหนืดต่าง ๆ ผลของชนิดของน้ำยาผสมเพิ่มที่ใช้รวมไปถึงผลของลำดับการใส่ส่วนผสม

ตารางที่ 4.1 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมและระดับความเข้มของการผสมที่ได้จากการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 ของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุผง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm^2/g)	ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม, ψ	water/binder	Standard Mixing Intensity (Wh/l)	Optimum Mixing Intensity (Wh/l)
OPC-I	3476	1.90	0.238	6.28	7.04
			0.260	5.19	
OPC-III	5084	2.20	0.278	10.54	7.49
			0.290	8.18	
MC	4056	1.70	0.226	3.98	5.31
			0.240	2.17	
OFA	2169	1.00	0.196	1.77	2.10
			0.210	1.59	
OFA10	3345	1.77	0.231	4.35	6.04
OFA20	3215	1.63	0.227	4.54	5.15
OFA30	3084	1.53	0.222	4.00	4.54
OFA40	2953	1.44	0.218	3.00	3.97
FA1	1733	1.00	-	-	2.26
OLP	3981	1.70	0.232	7.84	5.35
			0.260	6.43	
OLP5	3501	1.89	0.238	7.35	7.04
OLP10	3527	1.88	0.240	8.55	6.97
OLP15	3552	1.87	0.240	8.27	6.96
OLP20	3577	1.85	0.241	7.56	6.96

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ชนิดต่าง ๆ เมื่อผสมตามมาตรฐาน ASTM C305 และผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

ชนิดของวัสดุผง	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (นาที)		ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (ชั่วโมง:นาที)	
	Standard Mixing	Optimum Mixing	Standard Mixing	Optimum Mixing
OPC-I	77	73	2:38	2:22
OFA10	85	81	2:58	2:46
OFA20	96	92	3:05	2:56
OFA30	98	97	3:08	3:03
OFA40	111	109	3:55	3:42
OLP5	68	68	2:17	2:11
OLP10	72	70	2:25	2:22
OLP15	79	74	2:37	2:36
OLP20	80	75	2:39	2:35

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนการผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

Mix No.	หิน (กก.)	ทราย (กก.)	ซีเมนต์ (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	w/p	%SP	n_p	หมายเหตุ
M1-OPC-I	-	5.8	3.2	-	1.4	0.43	-	0.31	Rich Mix
M2-OPC-I	-	7.4	2.7	-	1.3	0.49	-	0.23	อ้างอิงผลของนิพนธ์[36]
M3-OFA	-	6.0	-	2.1	1.1	0.52	-	0.31	Rich Mix
C1-OPC-I	36.8	30.0	19.8	-	8.6	0.42		0.20	$(w/c)_{eff}$=0.38
C2-OPC-I	58.1	41.8	19.5	-	11.3	0.58	-	0.14	$(w/c)_{eff}$=0.49
C3-FA140	36.8	30.0	10.8	7.2	7.8	0.43	-	0.22	$(w/c)_{eff}$=0.37
C4-OFA40	36.8	30.0	10.8	7.2	7.8	0.43	-	0.22	$(w/c)_{eff}$=0.37
C5-FA240	36.8	30.0	11.8	7.8	7.6	0.39	-	0.22	$(w/c)_{eff}$=0.34
CS1-OPC-I	29.9	25.0	16.0	-	5.0	0.31	0.5%	0.20	$(w/c)_{eff}$=0.27
CS2-OFA20	29.9	25.0	12.8	3.2	4.7	0.29	0.5%	0.21	$(w/c)_{eff}$=0.25
CS3-OFA40	29.9	25.0	9.6	6.4	4.7	0.29	0.5%, 1.0%	0.23	$(w/c)_{eff}$=0.25

ตารางที่ 4.4 ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองในแต่ละส่วนผสม

Mix No.	ปริมาตรของแข็ง (ลิตร)				n_p	E_{in} จากการทดลอง (Wh/l)	E_{in} จากแบบจำลอง* (Wh/l)	E_{in} จากแบบจำลอง+ (Wh/l)
	V_{sc}	V_{sf}	V_{sp}	V_{st}				
M1-OPC-I	-	2.2	1.0	3.2	0.31	2.34	2.08	-
M2-OPC-I	-	2.8	0.8	3.7	0.23	1.06	1.54	-
M3-OFA	-	0.7	0.3	1.0	0.31	0.66	0.65	-
C1-OPC-I	13.5	11.5	6.2	31.2	0.20	1.70	1.34	1.07
C2-OPC-I	21.3	16.1	6.1	43.5	0.14	1.33	0.94	0.75
C3-FA140	13.5	11.5	7.0	32.0	0.22	1.12	0.96	0.77
C4-OFA40	13.5	11.5	7.0	32.0	0.22	1.23	0.96	0.77
C5-FA240	13.5	11.5	7.2	32.2	0.22	1.42	0.96	0.77
CS1-OPC-I	11.0	9.6	5.0	25.6	0.20	1.14	0.92	0.74
CS2-OFA20	11.0	9.6	5.6	26.2	0.21	0.93	0.65	0.52
CS3-OFA40 (0.5%SP)	11.0	9.6	6.2	26.8	0.23	0.88	0.37	0.30
CS3-OFA40 (1.0%SP)	11.0	9.6	6.2	26.8	0.23	0.93	0.32	0.26

หมายเหตุ : V_{sc} = ปริมาตรของหินในส่วนผสม

V_{sf} = ปริมาตรของทรายในส่วนผสม

V_{sp} = ปริมาตรของวัสดุผงในส่วนผสม

V_{st} = ปริมาตรของแข็งทั้งหมดในส่วนผสม

* = เมื่อไม่ใส่ HRWRA คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.9) เมื่อใส่ HRWRA คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.21)

\+ = เมื่อไม่ใส่ HRWRA คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.10) เมื่อใส่ HRWRA คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.22)

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของผลการทดลองและค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ

สมการเอ็มพิริคัล, $Fl_{time} = A \cdot exp(-(B(MI)^2 + C \cdot MI)$						
ชนิดของวัสดุผง	w/p	%SP	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอย			OMI (Wh/l)
			A	B	C	
OPC-I*	0.26	0.40	302.44	3.12	-4.64	5.04
		0.80	230.61	3.36	-4.54	3.92
		1.00	218.78	3.35	-4.49	3.67
	0.30	0.60	42.59	0.57	-1.01	3.83
		0.80	42.72	0.61	-1.09	3.44
		1.00	40.01	0.69	-1.02	3.23
OFA40	0.25	0.50	3592.88	-1.11	4.14	1.90
		0.75	3380.18	-1.03	3.92	1.90
		1.00	1769.75	-1.31	3.96	1.50
	0.30	0.50	83.29	-1.02	1.94	1.00
		0.75	92.37	-1.25	2.47	1.00
		1.00	163.85	-5.03	5.89	0.60

*อ้างอิงผลการทดลองของนิพนธ์[36]

ตารางที่ 4.6 รายละเอียดเครื่องผสมและลำดับการใส่ส่วนผสมของแต่ละโรงงาน

รายละเอียด	โรงงาน ก.	โรงงาน ข.	โรงงาน ค.	โรงงาน ง.	โรงงาน จ.
ประเภทเครื่องผสม	Force Type (Pan Mixer)	Force Type (Pan Mixer)	Force Type (Pan Mixer)	Force Type (Drum Mixer)	Gravity Type (Drum Mixer)
ความจุมากสุด	0.7 ลบ.ม.	1.5 ลบ.ม.	1.5 ลบ.ม.	3 ลบ.ม.	2 ลบ.ม.
ลำดับการใส่ส่วนผสม	1. สเปรย์น้ำให้ทั่ว 2. เทหินและทรายลงครึ่งส่วน 3. เป่าซีเมนต์ลงครึ่งส่วน 4. เทหินและทรายส่วนที่เหลือลง 5. เป่าซีเมนต์ส่วนที่เหลือลง ปิดน้ำ	1. เทหินและทราย 2. เทน้ำและน้ำยาและเป่าปูนซีเมนต์ลงพร้อม ๆ กัน	1. เทหินและทราย 2. ปล่อยน้ำยาผสมเพิ่ม 3. ปล่อยน้ำลงครึ่งส่วน 4. ปล่อยซีเมนต์ลงพร้อม ๆ กับน้ำส่วนที่เหลือ	1. เทหิน ทราย ซีเมนต์ เถ้าลอย และน้ำลงพร้อมกัน 2. เติมน้ำยาผสมเพิ่ม	1. เทหินและทราย 2. เป่าซีเมนต์และเถ้าลอย 3. เทน้ำและน้ำยาผสมเพิ่ม

ตารางที่ 4.7 สัดส่วนการผสมคอนกรีตแต่ละประเภทจากโรงงานผสม

Mix No.	ประเภทคอนกรีต	โรงงาน	ซีเมนต์ (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน (กก.)	น้ำยาผสมเพิ่ม (ซม.^{3})	n_p	สัดส่วนปริมาตรผสม
1	1	ก.	200	-	80	500	800	-	0.12	0.94
2	2	ข.	225	-	190	960	1100	1000(A+D)	0.08	0.67
3	2	ค.	344	-	153	1130	1380	800(A)	0.10	0.83
4	2	ง.	1156	-	295	2100	3155	3375(D)	0.15	0.83
5	3	ค.	334	42	148	1130	1370	1800(D)	0.12	0.83
6	3	ง.	636	161	317	2385	2500	3975(A+D)	0.12	0.83
7	3	ค.	342	64	159	1090	1360	900(A)	0.13	0.83
8	3	จ.	320	50	137	1300	1280	1000(D)	0.13	0.59
9	3	ค.	346	64	173	1070	1370	1800(D)	0.13	0.83
10	3	ค.	508	24	162	1010	1360	1200(A)	0.15	0.83
11	3	ง.	731	193	323	2095	3120	4813(A+D)	0.15	0.83
12	3	ง.	720	180	394	2150	2760	4508(A+D)	0.15	0.83
13	3	จ.	450	75	207	1280	1670	1800(D)	0.15	0.75

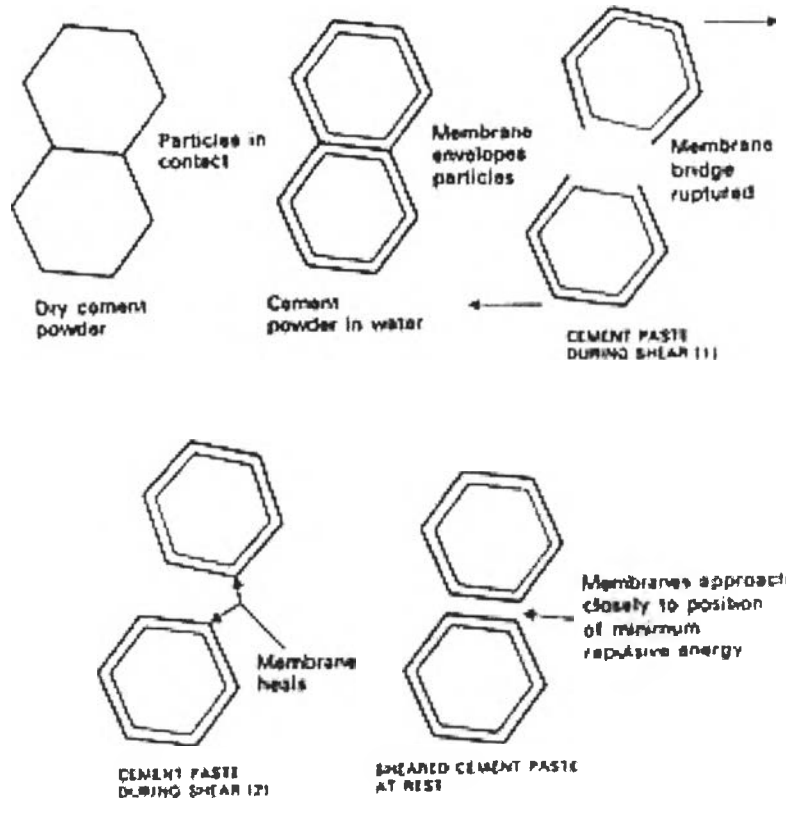
ตารางที่ 4.8 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตแต่ละประเภทที่ได้จากโรงงานผสม

Mix No.	ประเภทคอนกรีต	โรงงาน	ร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยโดยน้ำหนัก	n_p	ชนิดน้ำยาผสมเพิ่ม	%SP โดยน้ำหนักของวัสดุผง (โดยประมาณ)	ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม (Wh/l)
1	1	ก.	-	0.12	-	-	0.30
2	2	ข.	-	0.08	A+D	0.44%	0.34
3	2	ค.	-	0.10	A	0.23%	0.30
4	2	ง.	-	0.15	D	0.30%	0.22
5	3	ค.	0.11	0.12	D	0.48%	0.25
6	3	ง.	0.20	0.12	A+D	0.49%	0.06
7	3	ค.	0.16	0.13	A	0.25%	0.20
8	3	จ.	0.14	0.13	D	0.27%	0.23
9	3	ค.	0.16	0.13	D	0.44%	0.19
10	3	ค.	0.05	0.15	A	0.23%	0.25
11	3	ง.	0.21	0.15	A+D	0.44%	0.10
12	3	ง.	0.20	0.15	A+D	0.45%	0.11
13	3	จ.	0.14	0.15	D	0.51%	0.05

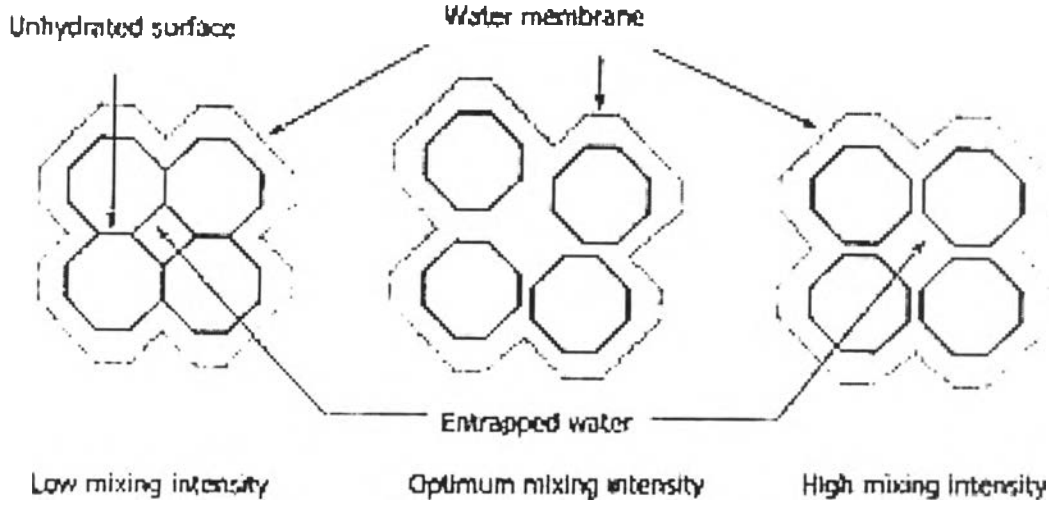
หมายเหตุ 1 = คอนกรีตที่ไม่ใส่ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม

2 = คอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่ม

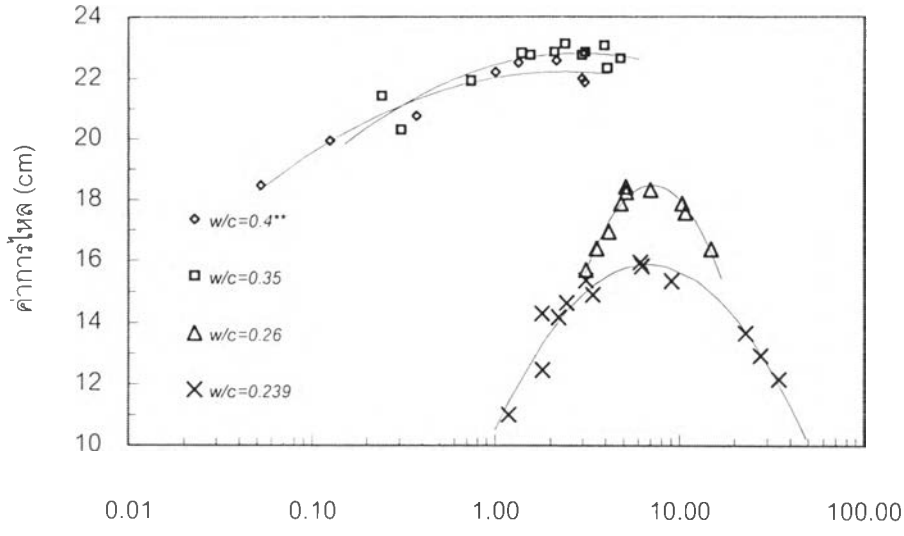
3 = คอนกรีตที่ใส่ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม



รูปที่ 4.1 กระบวนการแตกตัวของอนุภาคซีเมนต์ที่เกิดย้อนกลับไม่ได้[13]

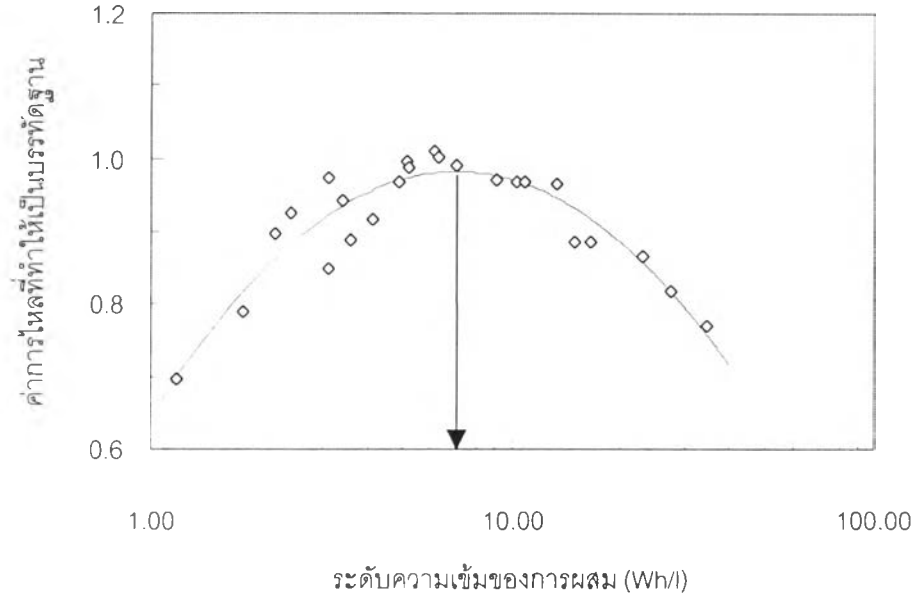


รูปที่ 4.2 การเรียงตัวของอนุภาคที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ[35]



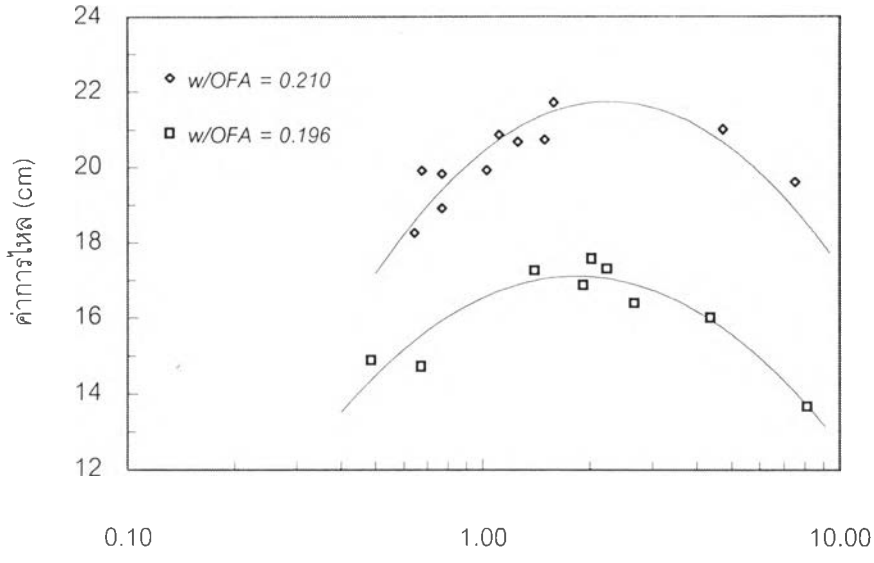
** ที่ w/c = 0.4 หาค่าการไหลจากการเคาะโต๊ะ 10 ครั้ง

(ก) ค่าการไหลและค่าระดับความเข้มของการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ

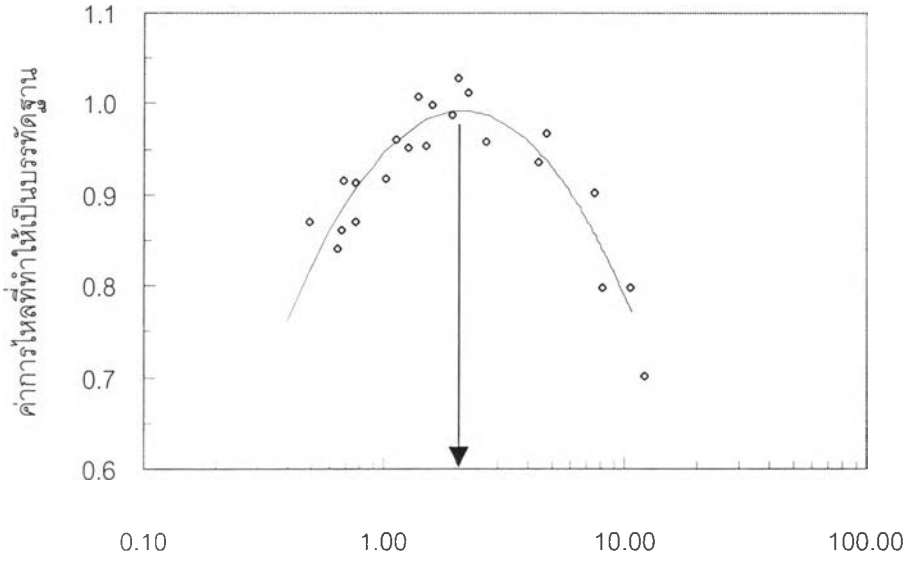


(ข) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ 4.3 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OPC-I

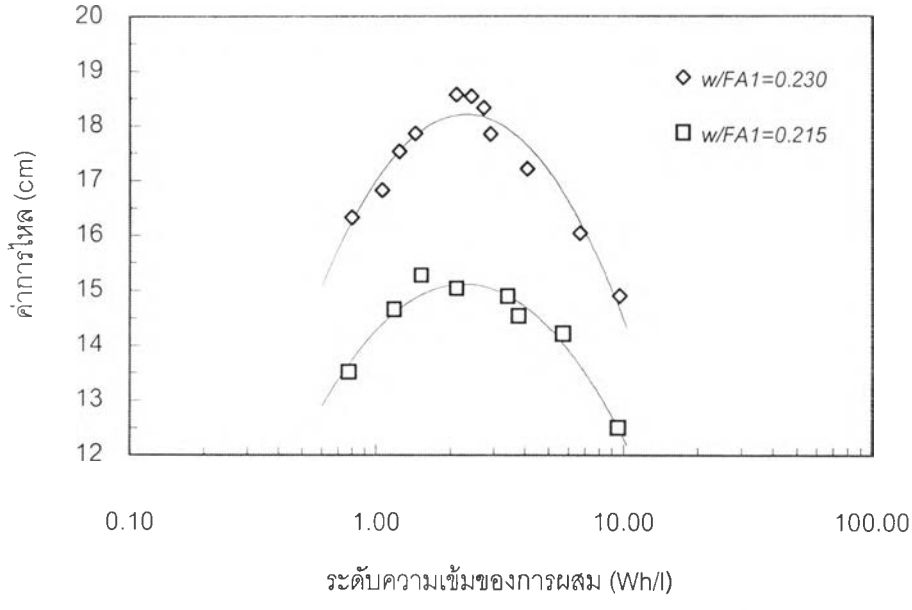


(ก) ค่าการไหลและค่าระดับความเข้มของการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ

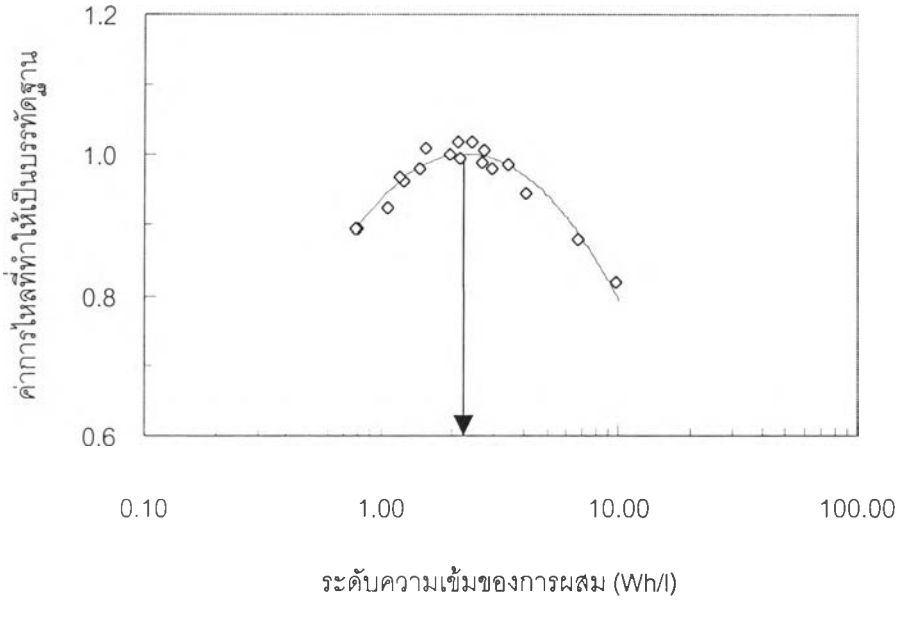


(ข) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ 4.4 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA

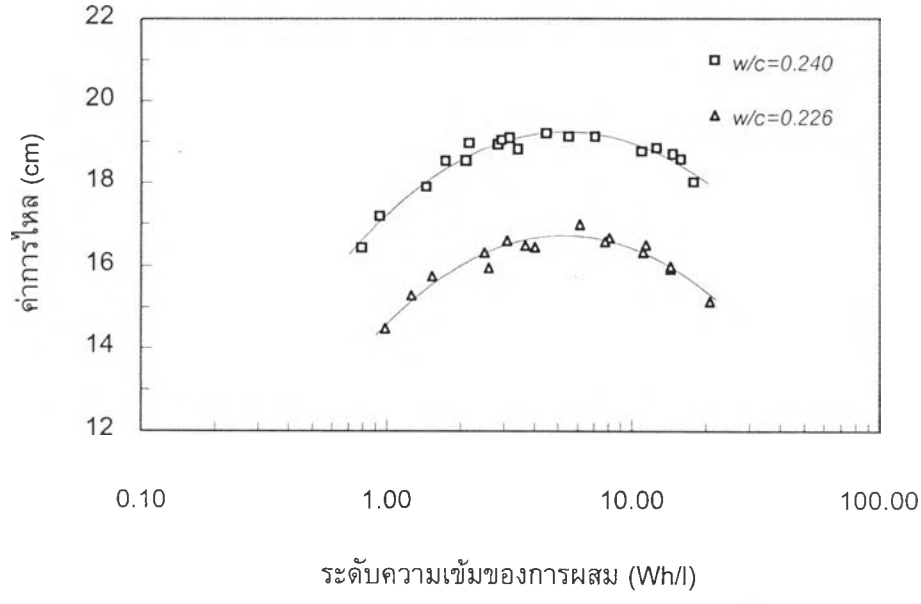


(ก) ค่าการไหลและค่าระดับความเข้มของการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ

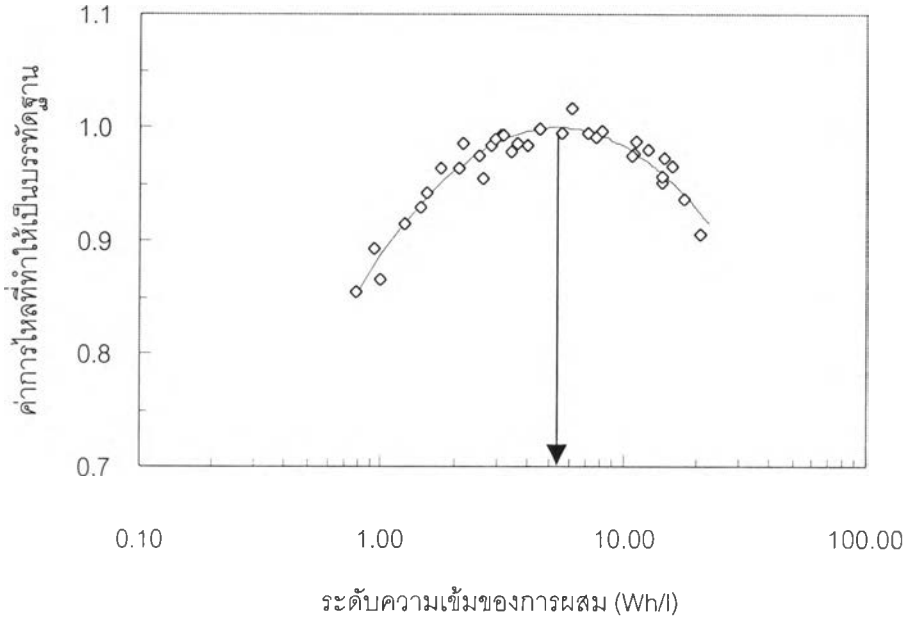


(ข) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ 4.5 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง FA1

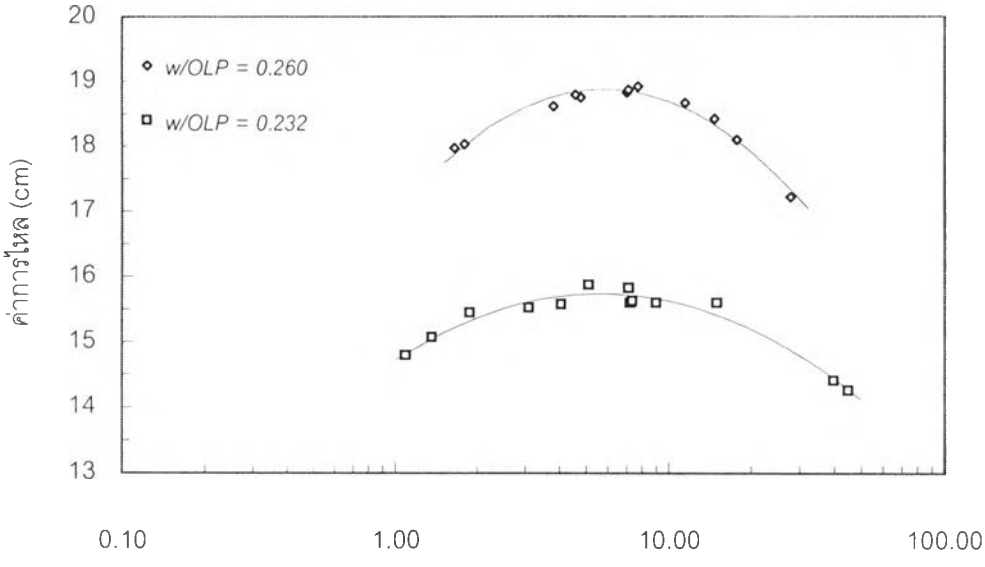


(ก) ค่าการไหลและค่าระดับความเข้มของการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ

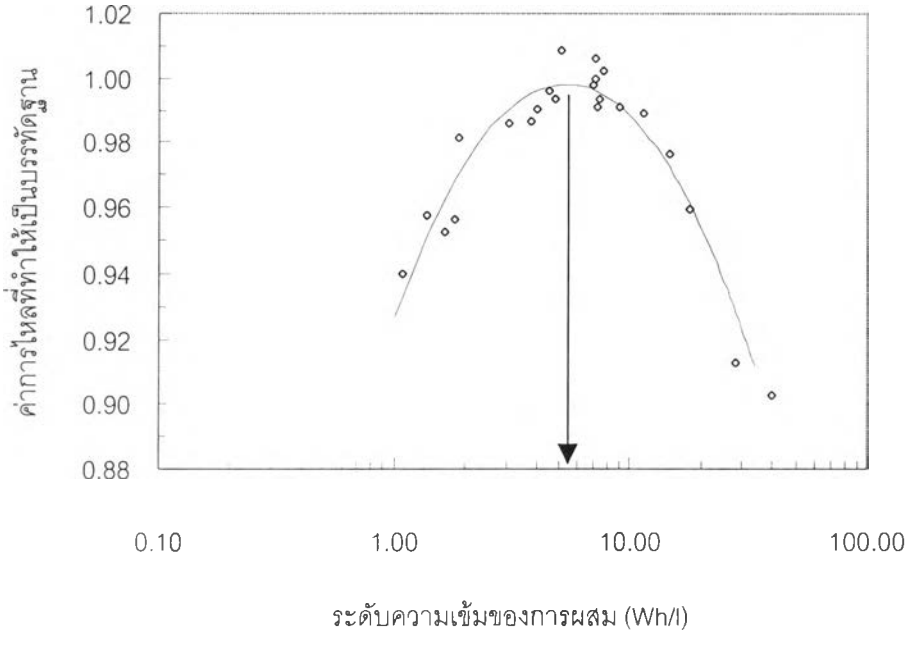


(ข) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ 4.6 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง MC

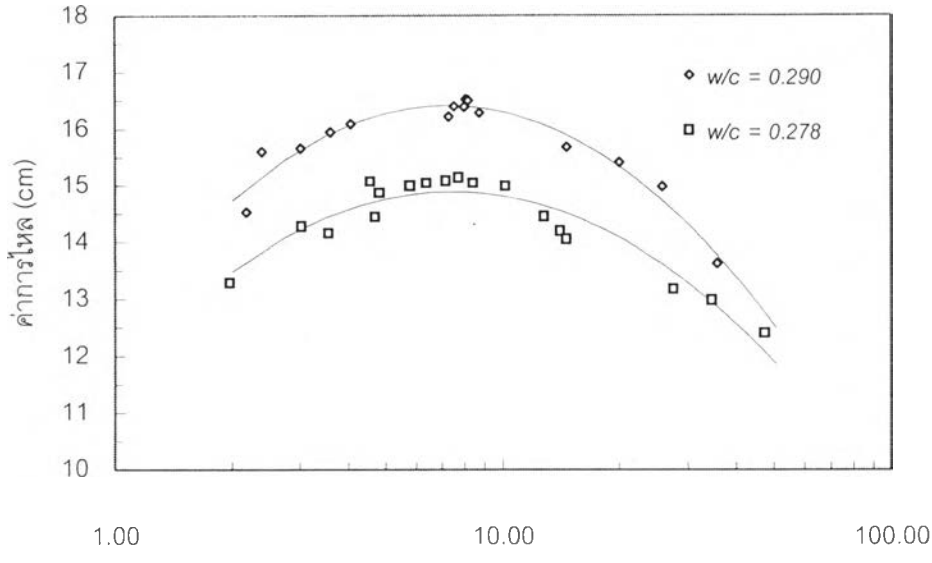


(ก) ค่าการไหลและค่าระดับความเข้มของการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ

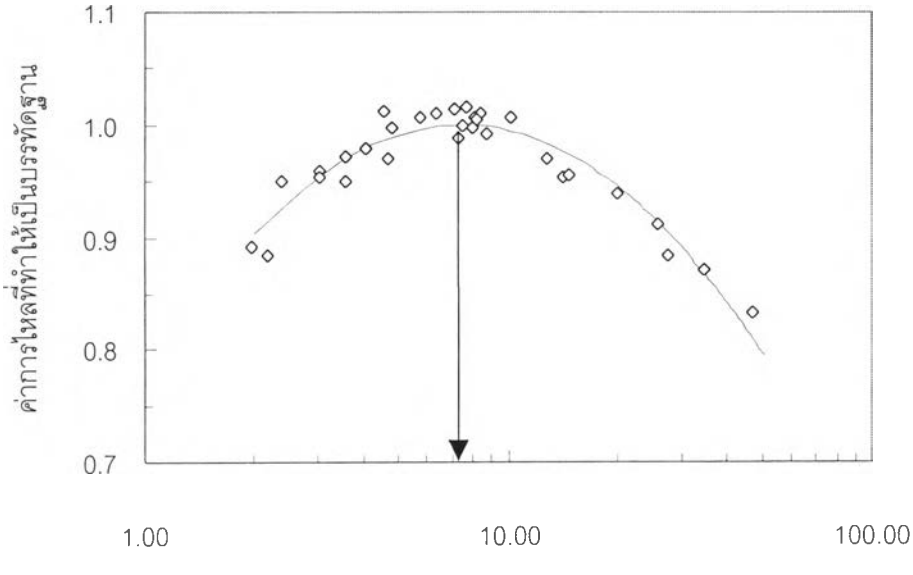


(ข) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ 4.7 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP

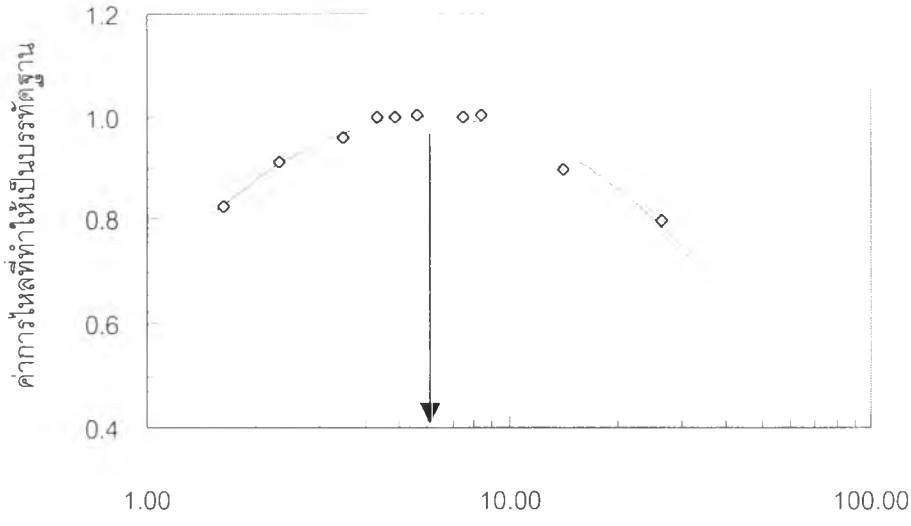


(ก) ค่าการไหลและค่าระดับความเข้มของการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ

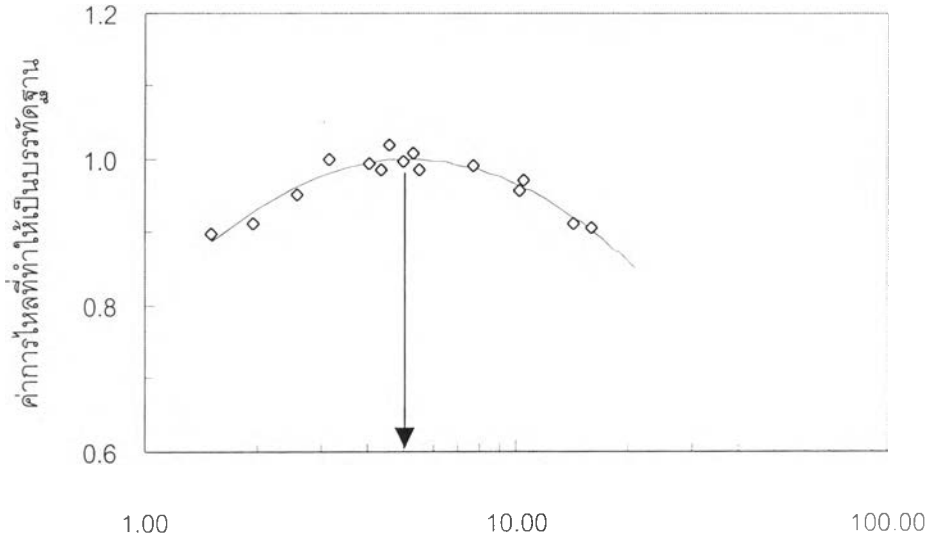


(ข) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มของการผสม

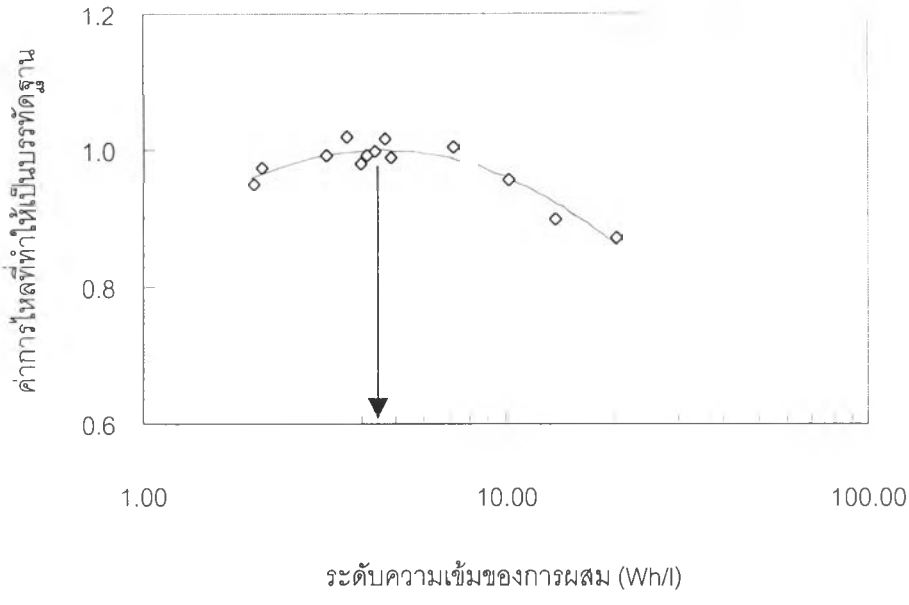
รูปที่ 4.8 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OPC-III



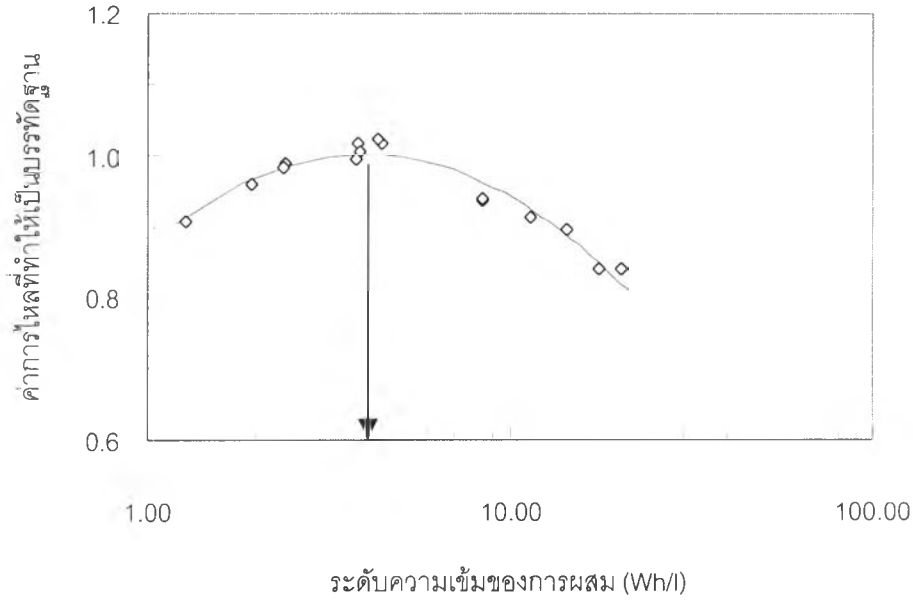
รูปที่ 4.9 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA10



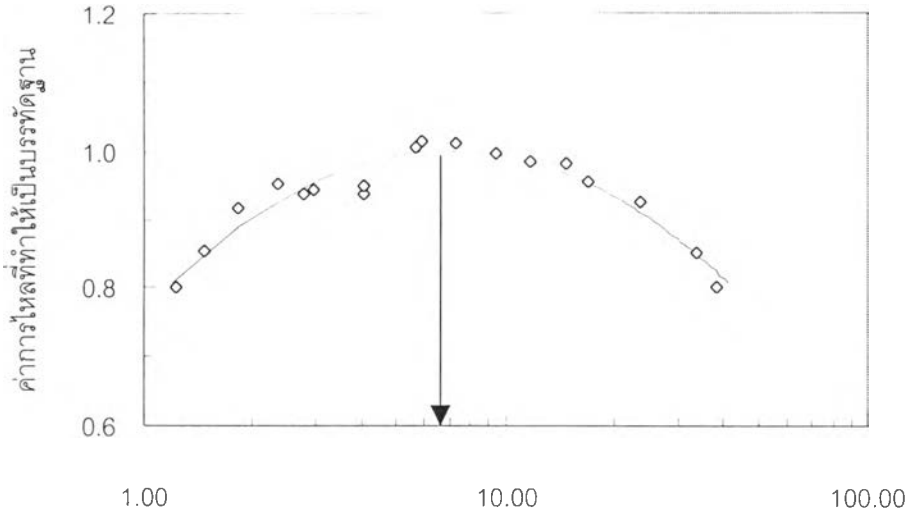
รูปที่ 4.10 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA20



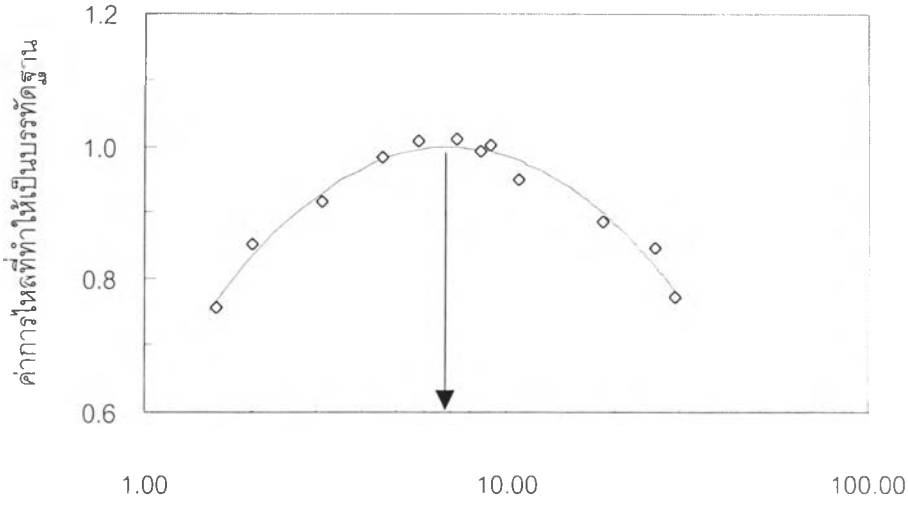
รูปที่ 4.11 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA30



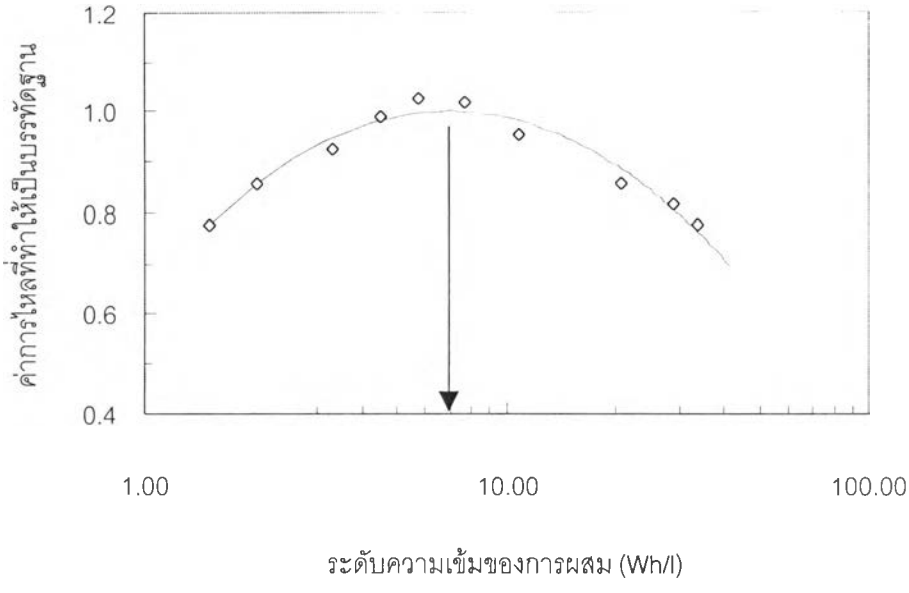
รูปที่ 4.12 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA40



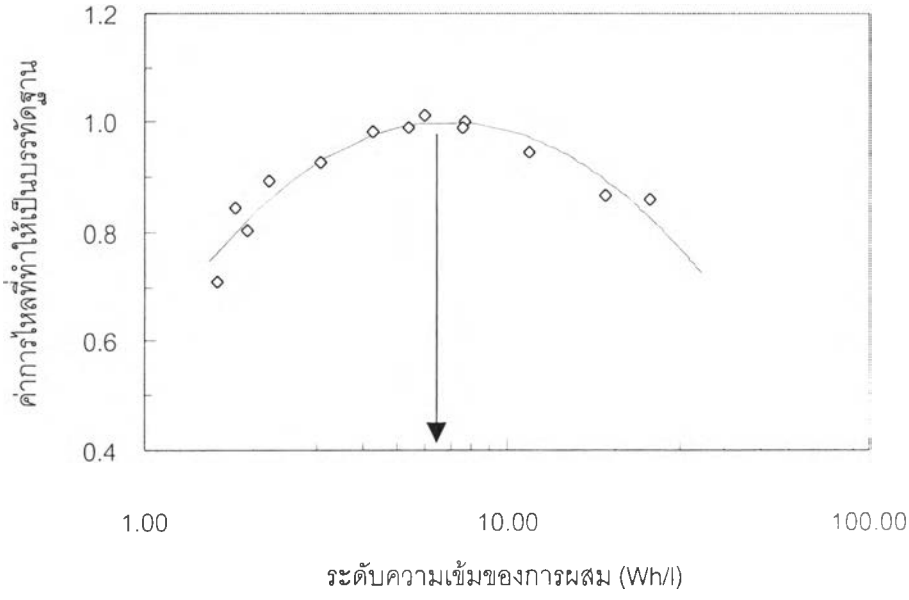
รูปที่ 4.13 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP5



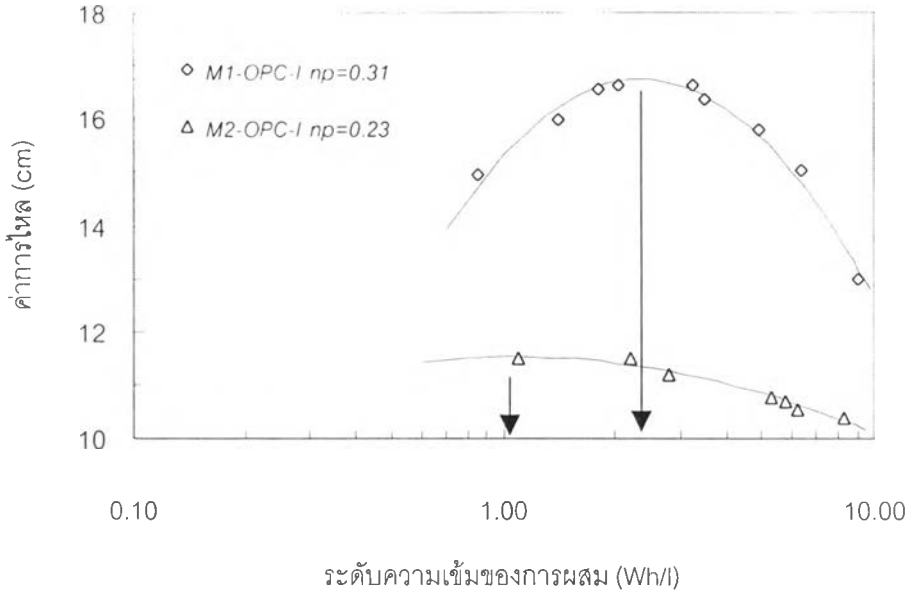
รูปที่ 4.14 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP10



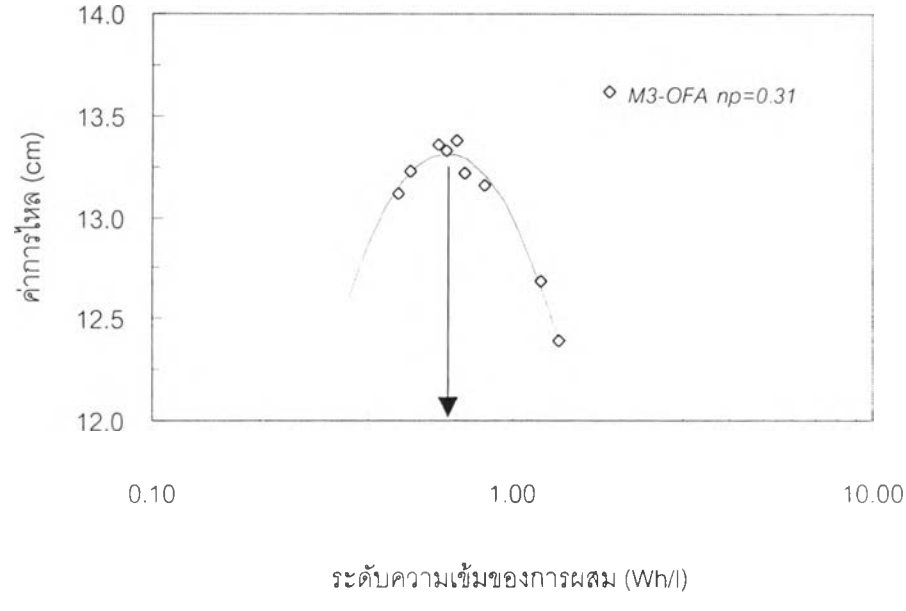
รูปที่ 4.15 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP15



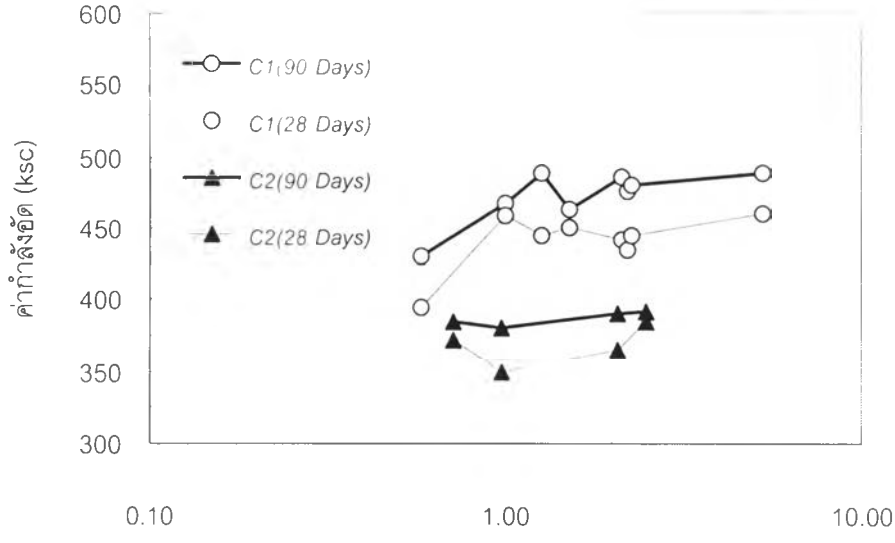
รูปที่ 4.16 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP20



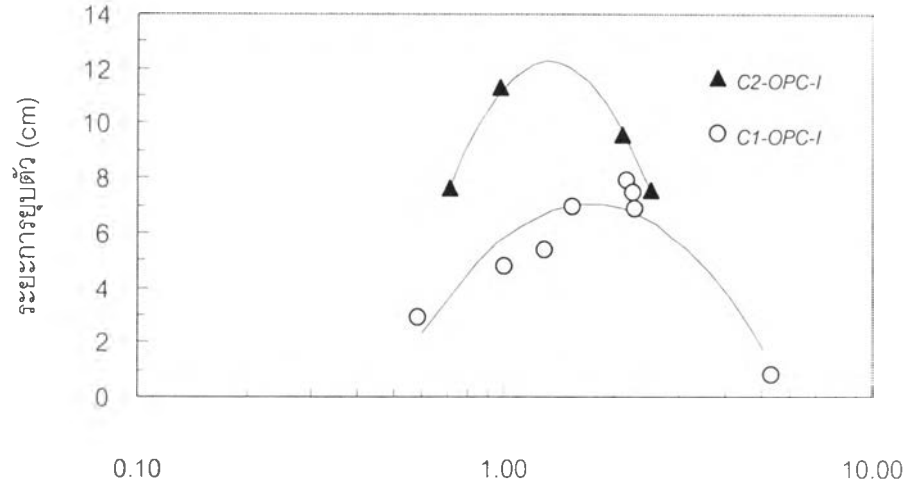
รูปที่ 4.17 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ M1-OPC-I และ M2-OPC-I



รูปที่ 4.18 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ M3-OFA

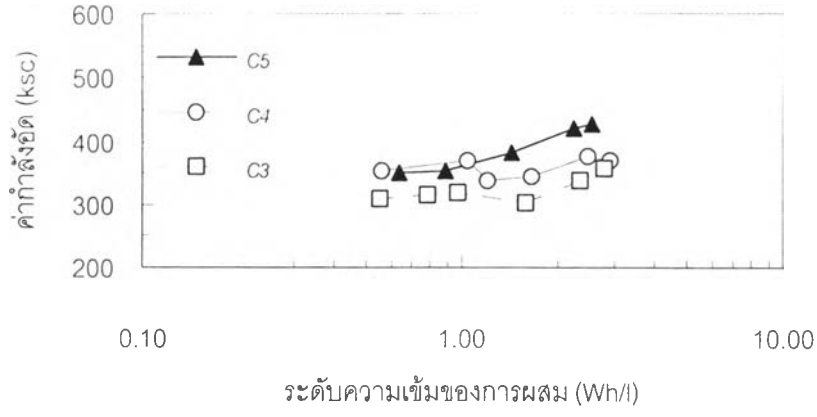


ก) ค่าระดับความเข้มของการผสมและค่ากำลังอัดของคอนกรีต

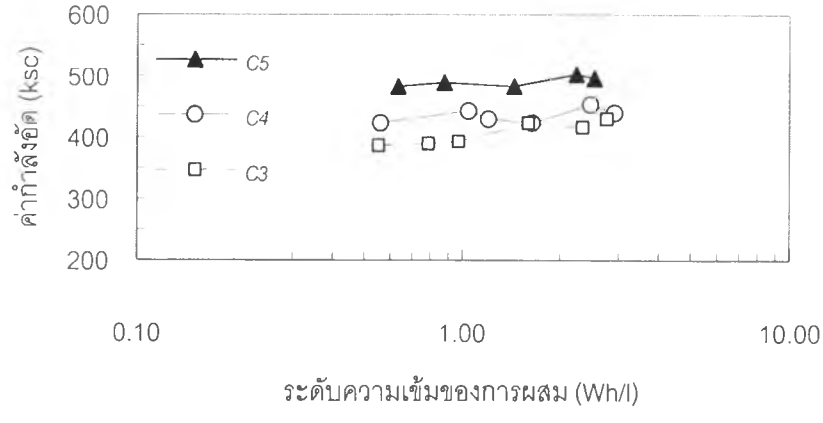


ข) ค่าระดับความเข้มของการผสมและระยะการยุบตัวของคอนกรีต

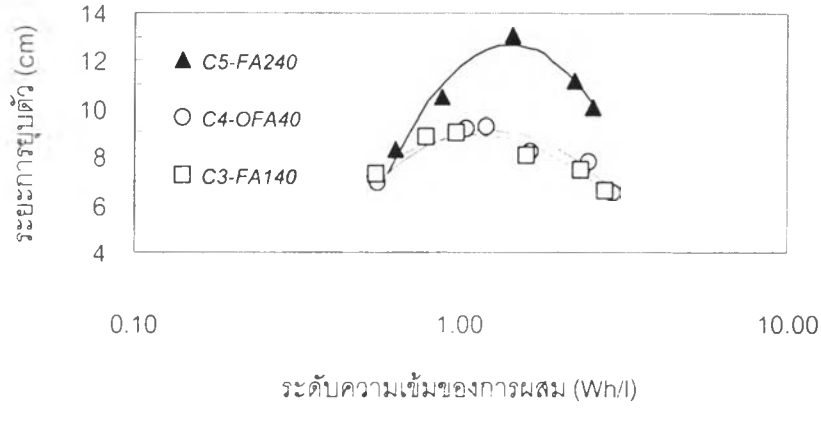
รูปที่ 4.19 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต C1 และ C2



ก) ค่าระดับความเข้มของการผสมและค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

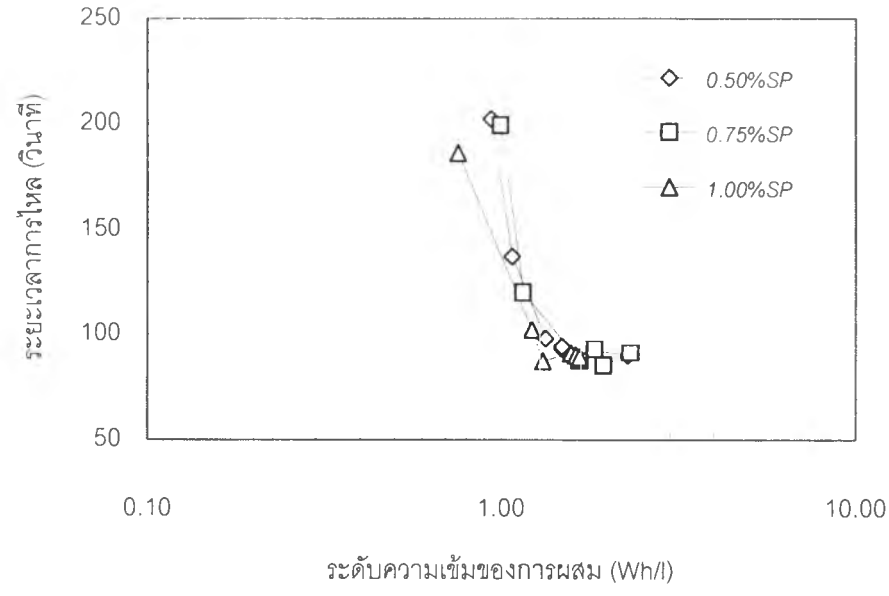


ข) ค่าระดับความเข้มของการผสมและค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน

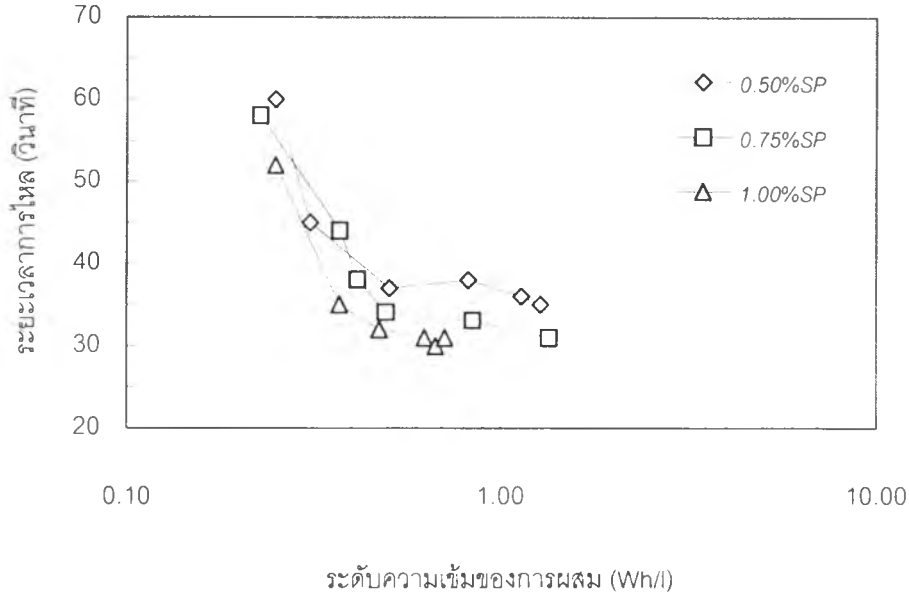


ค) ค่าระดับความเข้มของการผสมและระยะการยุบตัวของคอนกรีต

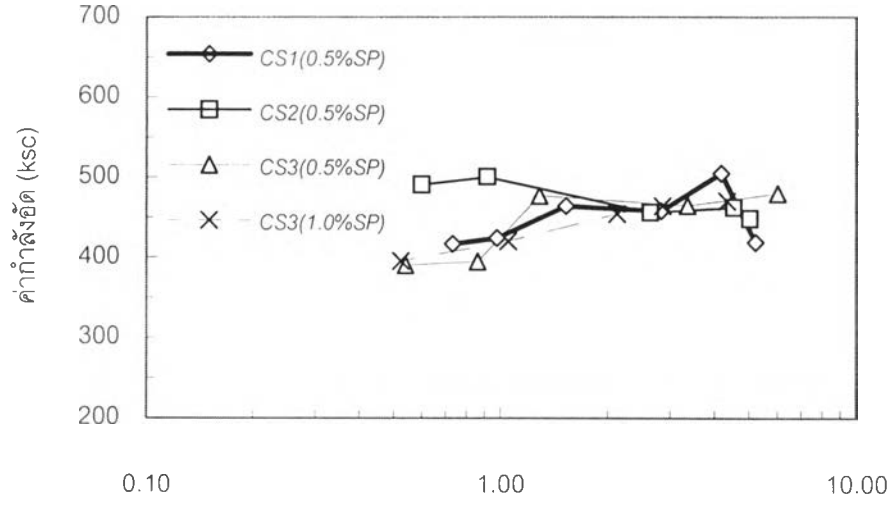
รูปที่ 4.20 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต C3 C4 และ C5



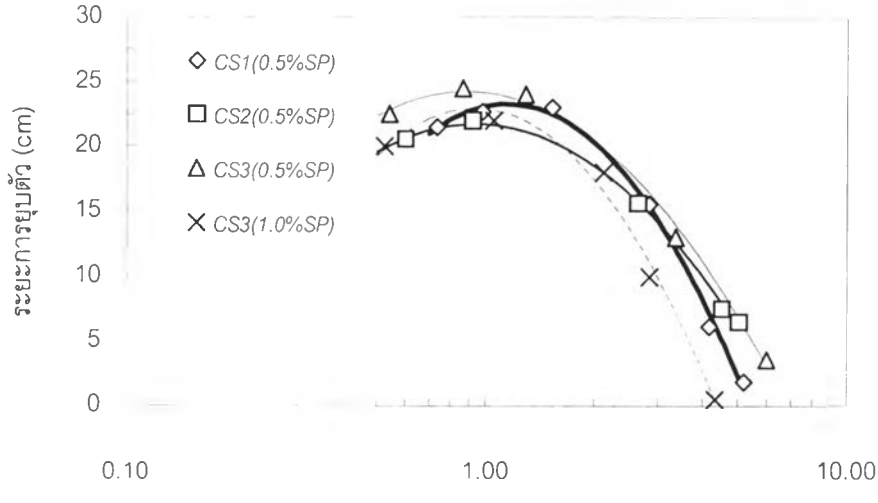
รูปที่ 4.21 ระยะเวลาการไหลกับค่าระดับความเข้มของการผสมของเพสต์ OFA40 ที่ w/p = 0.25 ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ



รูปที่ 4.22 ระยะเวลาการไหลกับค่าระดับความเข้มของการผสมของเพสต์ OFA40 ที่ w/p = 0.30 ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ

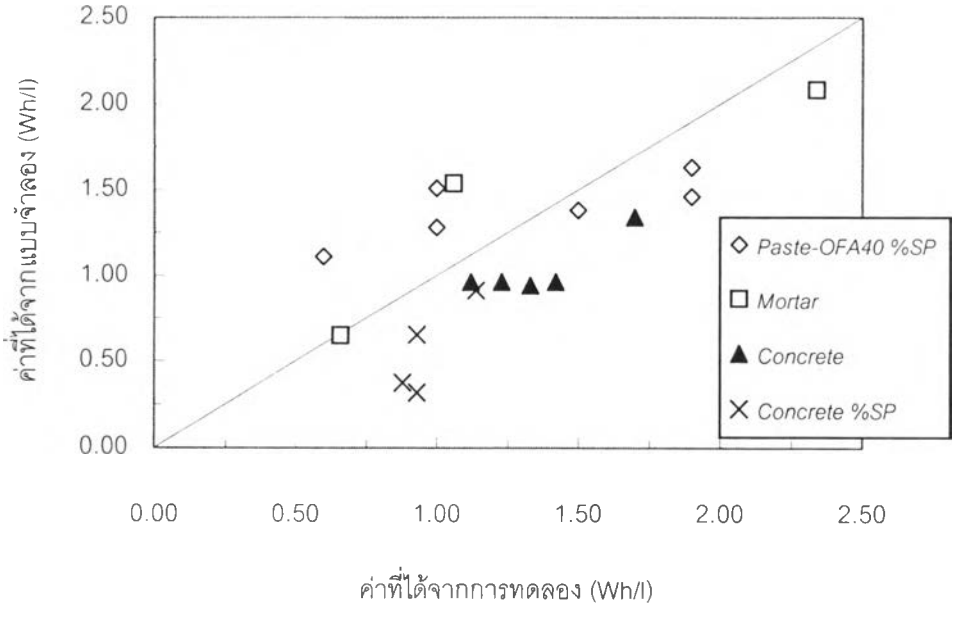


ก) ค่าระดับความเข้มของการผสมและค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

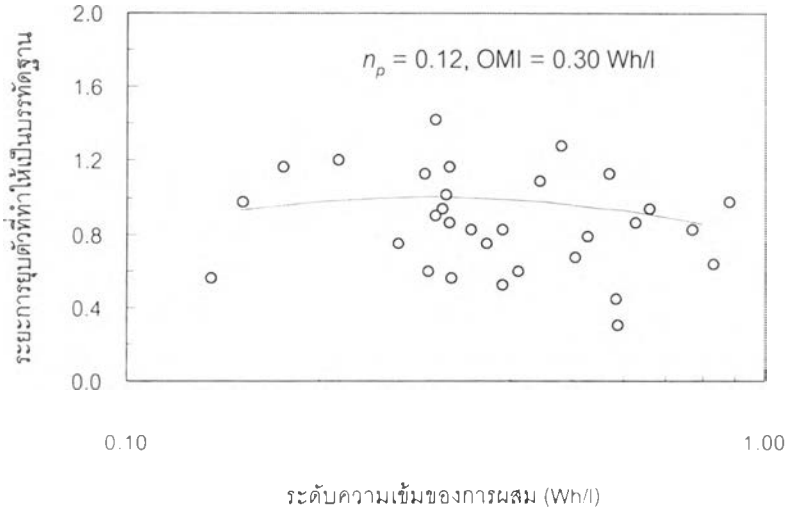


ข) ค่าระดับความเข้มของการผสมและระยะการยุบตัวของคอนกรีต

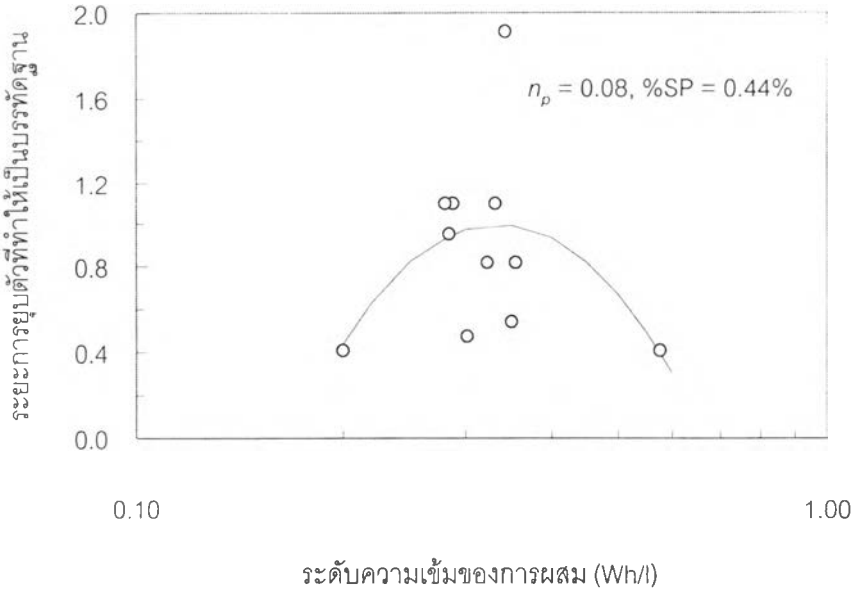
รูปที่ 4.23 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต CS1, CS2 และ CS3



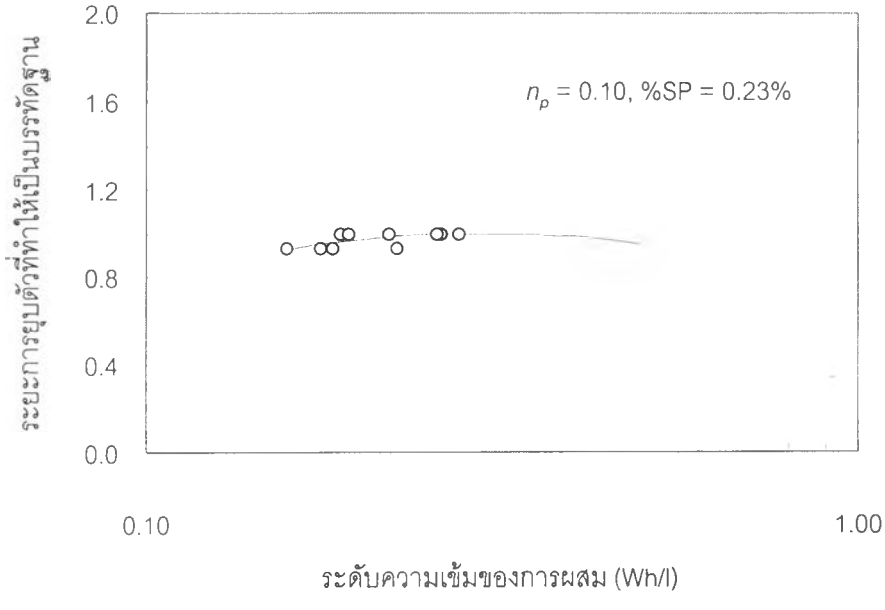
รูปที่ 4.24 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองที่ใช้ทำนายของส่วนผสมต่าง ๆ ทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก



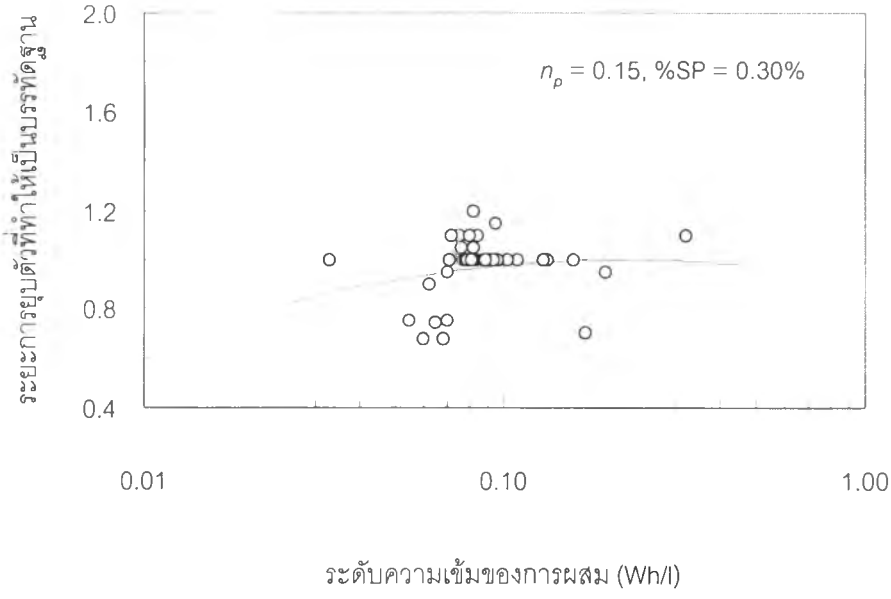
รูปที่ 4.25 ค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน n. mix 1 (คอนกรีตไม่ใส่ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม)



รูปที่ 4.26 ค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ข. mix 2 (คอนกรีตไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่ม)



รูปที่ 4.27 ค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ค. mix 3 (คอนกรีตไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่ม)



รูปที่ 4.28 ค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ง. mix 4 (คอนกรีตไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่ม)