

บทที่ 4

ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์

4.1 ทัวไป

การผสมเป็นกระบวนการสำคัญที่จะทำให้ส่วนผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ในงานคอนกรีต การผสมมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ ระยะเวลาการผสมนั้นขึ้นกับเครื่องผสม และประสบการณ์ของผู้ผลิต ซึ่งจัดว่าไม่เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจาก ระยะเวลาการผสมที่เหมาะสมนั้นไม่เพียงแต่ขึ้นกับเครื่องผสมหรือความเร็วของเครื่องผสม แต่ยังขึ้นกับสัดส่วนผสมด้วย

Stitmannaitum^[1] พบว่า คุณสมบัติของสัดส่วนผสมหนึ่ง ๆ จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามระดับความเข้มของการผสม (Mixing Intensity) ซึ่งนิยามว่า พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ไปในการผสม โดยที่ ส่วนผสมที่ผสมด้วยระดับความเข้มของการผสมเดียวกัน จะมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน ดังนั้น จึงเป็นการเหมาะสมที่จะใช้ระดับความเข้มของการผสมเป็นตัวควบคุมการผสม

สำหรับงานคอนกรีต เมื่ออนุภาคซีเมนต์สัมผัสน้ำ อนุภาคซีเมนต์จะยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากของเหลว แต่เมื่อการผสมเกิดขึ้น อนุภาคที่เดิมยึดติดกันจะเริ่มแตกตัวออก โดยที่การแตกตัวจะขึ้นกับระดับความเข้มของการผสม ผลการแตกตัวของอนุภาคซีเมนต์ที่ยึดติดกันนี้เอง เป็นผลให้น้ำที่ถูกยึดติดภายในโครงสร้างการจัดเรียงตัวถูกปล่อยเป็นอิสระ ซึ่งผลที่ตามมาคือค่าความหนืดลดลง ยิ่งไปกว่านั้น ฝวอนุภาคซีเมนต์มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น เป็นผลให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าผสมด้วยระดับความเข้มของการผสมที่สูงมากเกินไป ค่าความหนืดจะมีค่าสูงขึ้นอีกซึ่งส่งผลให้การทำงานได้ลดลง แต่ถ้าผสมด้วยระดับความเข้มของการผสมที่ต่ำเกินไป แม้ว่าอนุภาคจะกระจายตัวสม่ำเสมอ แต่โครงสร้างที่รวมเป็นกลุ่มก้อนอาจแตกตัวไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงต้องมีค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

4.2 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

การผสมมีวัตถุประสงค์ไม่เพียงแต่เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว ยังเพื่อกระจายอนุภาคที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคด้วย สำหรับการผสมซีเมนต์เพสต์นั้น Lapasin^[3,4] สรุปว่า ซีเมนต์เพสต์จะแสดงพฤติกรรมที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Thixotropic behavior) สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หนึ่ง ๆ ทั้งค่าความหนืด (Viscosity) และหน่วยแรงคลาก (Yield Stress) จะมีค่าลดลงเมื่อผสมนานขึ้น Stitmannaitum^[1] พบว่า ค่าการไหลจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มการผสมจนถึงค่าค่าหนึ่งหลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ซึ่งพฤติกรรมนี้อธิบายได้ว่าค่าการไหลที่เพิ่มขึ้นช่วงแรกเนื่องจากโครงสร้างของอนุภาคซีเมนต์กระจายตัวออกซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระที่ถูกกักภายในโครงสร้างการเรียงตัวของอนุภาคซีเมนต์หลุดออกมาและส่งผลให้ค่าการไหลเพิ่มขึ้น สำหรับการลดลงของค่าการไหลหลังจากมีค่าสูงสุดนั้นเป็นผลจากอนุภาคซีเมนต์จัดเรียงตัวอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กันมากขึ้นอีกครั้งโดยทั้งนี้ไม่ได้เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ค่าการไหลทั้งค่าระดับความเข้มของการผสมต่ำและสูงที่เท่ากันจะมีโครงสร้างต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการที่ทำให้อนุภาคซีเมนต์แตกจากกันนั้น Tattersall^[36] สรุปว่าเป็นกระบวนการแตกตัวของโครงสร้างที่เกิดย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible structural breakdown process) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1

Stitmannaitum^[1] นิยามค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ให้ค่าการไหลสูงสุดว่าเป็นค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม (Optimum Mixing Intensity)

เนื่องจากอนุภาคซีเมนต์มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับมวลรวม ดังนั้นเมื่ออนุภาคซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ อนุภาคซีเมนต์จะจับตัวเป็นก้อน ดังนั้นจึงต้องใช้ระดับความเข้มข้นของการผสมค่อนข้างสูงเพื่อกระจายอนุภาคซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพลีจึงมีค่าสูงกว่าอัตราและคอนกรีตตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ Stitmannaitum^[1] เสนอความสัมพันธ์ดังนี้

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

โดยที่

| | |
|--------------|--|
| $E_{in,mix}$ | คือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสม |
| V_{sp} | คือ ปริมาตรของแข็งของวัสดุผงในส่วนผสม |
| V_{st} | คือ ปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม |
| $E_{in,sp}$ | คือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพลี |
| n_p | คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด |

จากสมการที่ (4.1) พบว่า การหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมควรพิจารณาเริ่มจากซีเมนต์โพลี ซึ่งเป็นกรณีที่สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผง = 1.0

4.3 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพลีที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

การทดลองหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพลี จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ค่าความชื้นเหลวปกติคือ 0.26 และเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จึงเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงระหว่าง 0.23 - 0.30

สำหรับวิธีการทดลองหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมนั้น จะใช้วิธีการทดสอบด้วยโต๊ะการไหล ซึ่งมีรายละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C230-90 โดยที่จะหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ สำหรับผลการทดลองหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของซีเมนต์โพลีที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ เป็นดังรูปที่ 4.2ก.

Stitmannaitum^[1] เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสมด้วยพหุนามกำลังสอง ดังนั้น สามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลสูงสุดของผลการทดลองแต่ละชุดได้ Stitmannaitum^[1] เสนอวิธีจัดผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ด้วยการหาค่าการไหลให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalized

flow value) ด้วยค่าการไหลสูงสุดของแต่ละชุดการทดลอง ด้วยวิธีนี้จึงสามารถหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมได้

นิยามให้ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมคือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุด

สำหรับค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method) จะได้สมการพหุนามกำลังสอง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficient of variation) = 0.93 ดังนี้

$$Fl_r = -0.465(\text{Log}(MI))^2 + 0.779(\text{Log}(MI)) + 0.662 \quad (4.2)$$

โดยที่

Fl_r คือ ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน

MI คือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสม

จากสมการที่ (4.2) คำนวณหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ให้ค่าการไหลสูงสุดดังนี้

$$\frac{d(Fl_r)}{d(MI)} = 0 \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) คำนวณหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม (Optimum mixing intensity, OMI) = 6.90 วัตต์ชั่วโมง / ลิตร ในขณะที่ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่เสนอโดย Stitmannaitum^[1] คือ 7.38 วัตต์ชั่วโมง / ลิตร เมื่อเปรียบเทียบค่าทั้งสองพบว่า ในงานวิจัยนี้ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำกว่าค่าที่เสนอโดย Stitmannaitum^[1] = 6.5% ซึ่งมีสาเหตุจากความแตกต่างของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนด์ สำหรับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนด์ของซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยนี้มีค่า = 2900 ตร.ซม./ กรัม ในขณะที่ซีเมนต์ของ Stitmannaitum^[1] มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนด์ = 3350 ตร.ซม./กรัม

4.4 การทดลองหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากนั้น พบว่า ในกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง ๆ ค่าความหนืดจะมีค่าลดลงค่อนข้างมาก แต่กรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ๆ ค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นวิธีการทดลองหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของทั้ง 2 กรณีจึงแตกต่างกันดังนี้ ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ และซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

4.4.1 ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

กรณีนี้ สารลดน้ำอย่างมากจะลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคด้วยแรงผลักระหว่างไฟฟ้าค่อนข้างมากซึ่งส่งผลให้ค่าความหนืดของซีเมนต์เพสต์ต่ำมาก การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของซีเมนต์เพสต์ที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ ด้วยโตะการไหลตามวิธีของซีเมนต์เพสต์ปกติจึงไม่เหมาะสม Marshall^[37] พิจารณาค่าความหนืดของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากด้วยวิธีการหวนการไหล (Flow Cone Method) ซึ่งเป็นวิธีการทดลองหาค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM C939-94a (โดยที่มีรายละเอียดต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ค.) ดังนั้นจึงใช้การทดลองวิธีการหวนการไหลเพื่อหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม

Popovic^[38] กล่าวว่า ปริมาณน้ำในซีเมนต์เพสต์ที่สูงขึ้นมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูงขึ้นเนื่องจากแรงดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) มีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าสูงสุดโดยประมาณที่ปริมาณน้ำที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลวเท่ากับค่าความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ปริมาณน้ำที่สูงกว่านี้อีก จะมีผลทำให้แรงดันคาพิลลารีลดลงอย่างรวดเร็ว สาเหตุที่ลดลงเป็นผลจากระยะห่างระหว่างอนุภาคมากขึ้น สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากและปริมาณน้ำสูงกว่าที่ต้องการให้มีค่าความชื้นเหลวปกตินั้นจะมีค่าความหนืดต่ำมาก ทั้งนี้เป็นผลจากแรงผลักระหว่างไฟฟ้าเนื่องจากสารลดน้ำอย่างมาก ค่าความหนืดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามระดับความเข้มข้นของการผสม ซึ่งต่างกับซีเมนต์เพสต์ปกติที่ค่าความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างมากซึ่งขึ้นกับระยะห่างระหว่างอนุภาค การผสมที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่ำ ๆ อนุภาคส่วนใหญ่จะอยู่ติดกัน เป็นผลให้ประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างมากต่ำ แต่เมื่อระดับความเข้มข้นของการผสมสูงขึ้นอนุภาคส่วนใหญ่จะกระจายตัวดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างมากสูงตามไปด้วย Roy and Asaka^[5] กล่าวว่า สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่กระจายตัวดีค่าความหนืดจะมีค่าต่ำสุดและเปลี่ยนแปลงไม่ค่อนมากตามระดับความเข้มข้นของการผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Masood and Agarwal^[11] และที่ระดับความเข้มข้นของการผสมมากกว่านี้ ค่าความหนืดจะมีค่าสูงขึ้นอีกเล็กน้อย สำหรับระดับความเข้มข้นของการผสมที่ทำให้ความหนืดต่ำสุดจะนิยามว่าค่าระดับความเข้มข้นของการผสม

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองจะอยู่ในช่วง 0.26 - 0.35 และสารลดน้ำอย่างมากที่ใช้มีสารเคมีพื้นฐานเป็นเมลามีนฟอรัลดีไฮด์คอนเดนเสท (ชื่อทางการค้า Sikament FF) โดยที่การทดลองจะเป็นการหาระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ ตัวอย่างผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 จะพบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของการผสมต่ำ ระยะเวลาการไหลมีค่าค่อนข้างมาก แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของการผสมอีกเพียงเล็กน้อย ระยะเวลาการไหลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจาก ในช่วงที่ระดับความเข้มข้นของการผสมเป็นศูนย์นั้น อนุภาคซีเมนต์ส่วนใหญ่ยังคงติดกันและรวมเป็นกลุ่มก้อน สารลดน้ำอย่างมากไม่สามารถกระจายและดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์ได้ ดังนั้นแรงผลักระหว่างไฟฟ้าจึงมีค่าต่ำ ในทำนองกลับกัน เมื่อระดับความเข้มข้นของการผสมสูงขึ้น อนุภาคซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีระยะห่างเพิ่มขึ้น สารลดน้ำอย่างมากจึงสามารถดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์ได้ ดังนั้นแรงผลักระหว่างไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามาก ด้วยเหตุนี้ เมื่อระดับความเข้มข้นของการผสมสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ระยะเวลาการไหลจึงลดลงอย่างมาก และเมื่ออนุภาคกระจายตัวดีแล้ว พบว่าระยะเวลาการไหลมีแนวโน้มคงที่ และเมื่อระดับความเข้มข้นของการผสมสูงมาก ระยะเวลาการไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เล็กน้อย กำหนดให้ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมคือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เริ่มให้ระยะเวลาการไหลคงที่ต่ำสุด

สำหรับที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณสารลดน้ำอย่างมากราคาหนึ่ง จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการไหล และ ระดับความเข้มข้นของการผสม โดยอาศัยสมมติฐานว่า เมื่ออนุภาคซีเมนต์มีระยะห่างระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สารลดน้ำอย่างมากรสามารถกระจายตัวและดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์มากขึ้นตามไปด้วย ผลที่ตามมาคือ ค่าความหนืดของซีเมนต์เพสต์ลดลง ด้วยเหตุนี้ จึงเสนอสมการเอมพิริคัลประมาณความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการไหลและระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังนี้

$$Fl_{time} = A \cdot \exp(-Ba) \quad (4.4)$$

โดยที่

A, B คือ ค่าคงที่สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณสารลดน้ำอย่างมากราคาหนึ่ง ๆ

a คือ ระยะห่างระหว่างอนุภาค

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1ก. จะได้ว่า ระยะห่างระหว่างอนุภาคเปลี่ยนแปลงตามระดับความเข้มข้นของการผสม กล่าวคือ ที่ระดับความเข้มข้นของการผสมเป็นศูนย์อนุภาคทั้งหมดยังคงติดกัน และระยะห่างระหว่างอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของการผสมสูงขึ้น โดยมีระยะห่างสูงสุดที่ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของการผสมที่สูงกว่านี้ อนุภาคซีเมนต์จะเรียงตัวอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันอีก

จากซีเมนต์เพสต์ปกติที่ประมาณความสัมพันธ์ระหว่างค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสมด้วยพหุนามกำลังสอง ทำนองเดียวกัน ถ้าประมาณความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างอนุภาคและระดับความเข้มข้นของการผสมด้วยพหุนามกำลังสอง ดังนั้นสมการที่ (4.4) จะเป็น

$$Fl_{time} = A \cdot \exp\left(-\left(B(MI)^2 + C \cdot MI\right)\right) \quad (4.5)$$

โดยที่ A, B, C คือ ค่าคงที่สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณสารลดน้ำอย่างมากราคาหนึ่ง ๆ

สำหรับช่วงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารลดน้ำอย่างมากราคาหนึ่งที่แนะนำโดยผู้ผลิต เป็นดังตารางที่ 4.2 ซึ่งปริมาณสารลดน้ำอย่างมากรที่ใช้ในการทดลองจะอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ดังกล่าว

สำหรับการทดลองทั้งหมดนั้น จะทำภายในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 1800 วินาที ซึ่ง Stitmannaitum^[1] พบว่าภายในช่วงระยะเวลานี้ สามารถตัดผลของปริมาณน้ำที่จะสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ จากการทดลองพบว่า ภายในช่วงระยะเวลาการทดสอบ 1800 วินาที ระยะเวลาการไหลลดลงตามระดับความเข้มข้นของการผสมจนถึงค่า ๆ หนึ่ง จากนั้นระยะเวลาการไหลจะคงที่ ถ้ากำหนดให้ การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด $\pm 5\%$ ตามระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ ถูกพิจารณาว่าคงที่ จากผลการทดลองของ Murata and Suzuki^[38] พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า

ความหนืด $\pm 5\%$ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ทดสอบด้วยกรวยทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C939-94a ± 0.5 วินาที ด้วยเหตุนี้ ถ้าการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลอยู่ในช่วงดังกล่าว ให้พิจารณาว่าระยะเวลาการไหลคงที่

ถ้าประมาณความสัมพันธ์ของระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสมด้วยความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.5) และกำหนดให้ ที่ระยะเวลาการไหลคงที่เริ่มต้น คือค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม จะสามารถหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.4 – 4.5 และผลทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ง. โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

4.4.2 ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

กรณีนี้ นอกจากจะหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมแล้ว ยังสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการลดน้ำของสารลดน้ำอย่างมากได้ กล่าวคือ สารลดน้ำอย่างมากจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีปริมาณน้ำอิสระสูงขึ้น ดังนั้น เพื่อให้ปริมาณน้ำอิสระเป็นศูนย์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จึงมีค่าลดลงตามปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงสมมติให้ไม่มีระยะห่างระหว่างอนุภาค ค่าความหนืดของซีเมนต์เพสต์จึงมีค่าค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ จึงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ ด้วยโต๊ะการไหล ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับซีเมนต์เพสต์ปกติได้ โดยที่นิยามค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ให้ค่าการไหลสูงสุดว่าเป็นค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และตัวอย่างผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำมาก ดังนั้นซีเมนต์เพสต์จึงมีพฤติกรรมทำนองเดียวกับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก ดังนั้นจึงประมาณความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสมด้วยพหุนามกำลังสองเช่นเดียวกัน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.7 ในขณะที่ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

เมื่อทำการวิเคราะห์ถดถอยผลการทดลองของซีเมนต์เพสต์ที่ w/c และ $\%_{sp}$ ต่าง ๆ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก.2

เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในมาตราส่วนเดียวกัน จึงจัดรูปผลการทดลองให้อยู่ในรูปค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับที่กล่าวมาในซีเมนต์เพสต์ปกติ ผลการทดลองเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า แม้ว่าปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่างกัน แต่ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์เหมือนกัน การเปลี่ยนแปลงค่าการไหลที่ระดับความเข้มข้นของการผสมจะไม่ต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม หลังจากซีเมนต์เพสต์มีค่าการไหลสูงสุดแล้ว พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณสารลดน้ำอย่างมากสูงกว่า (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า) จะมีการลดลงของค่าการไหลอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างมาก

พิจารณาตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ได้จากการผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM C305-94 และค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม จากตารางที่ 4.5

จะเห็นได้ว่า การผสมซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์นั้น การผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 ให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่สูงกว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมไม่มากนัก ในทำนองกลับกัน การผสมซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์นั้น การผสมตามมาตรฐานให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่ต่ำกว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การผสมซีเมนต์เพสต์ตามวิธีการในมาตรฐาน ASTM C305-94 เหมาะสมสำหรับซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นี้จะใกล้เคียงกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ให้ค่าความชื้นเหลวปกติ^[37]

นอกจากนี้ ยังศึกษาผลของระดับความเข้มของการผสมต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191-92 สำหรับผลของระดับความเข้มของการผสมต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นนั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6

จากตารางที่ 4.6 พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำนั้น การผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 มีแนวโน้มที่ให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเร็วกว่าการผสมที่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจาก การผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 ให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่สูงกว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม ในขณะที่ ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์นั้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของการผสมที่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมเร็วกว่าการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 ทั้งนี้เป็นเพราะ การผสมตามมาตรฐาน ให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่ต่ำกว่าการผสมที่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมาก (ตามมาตรฐาน ASTM C191-92 กำหนดให้ การหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์กระทำที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับค่าความชื้นเหลวปกติ ซึ่งประมาณว่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์^[38])

4.5 แบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

4.5.1 แบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

ถ้ากำหนดให้ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมสัมพันธ์กับพลังงานที่ต้องการใช้เพื่อสลายรอยต่อระหว่างอนุภาค ดังนั้น ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ปกติจะไม่ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลต่อรูปร่างการเรียงตัวของอนุภาค (บทที่ 3) กล่าวคือค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันคงที่ โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลเพียงแต่ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากรุนั้น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์มีค่าลดลง (จากบทที่ 3) ดังสมการที่ 4.6 และส่งผลให้ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันมีค่าสูงขึ้น ดังสมการที่ 4.7

$$\varphi_{red} = 1 - 0.13 X_{SP}^{0.66} \quad (4.6)$$

$$k_{max} = \frac{\pi}{w_s} \left(w_s + \frac{1}{\rho} \right) \quad (4.7)^{(1)}$$

โดยที่

φ_{red} คือ ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

X_{SP} คือ ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์)

k_{max} คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุด

w_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์กรณีมีสารลดน้ำอย่างมาก

ρ คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์

เนื่องจากค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากสูงขึ้น ดังนั้นจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคจึงสูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากจึงสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงผลึกสถิตยทางไฟฟ้าจากสารลดน้ำอย่างมากช่วยสลายรอยต่อ และยังช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคด้วย ดังนั้น ซีเมนต์เพสต์จึงต้องการพลังงานกลภายนอกเพื่อให้ได้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลดลง

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายผลของสารลดน้ำอย่างมายนั้น มี 2 ทฤษฎีหลัก ๆ คือ ทฤษฎี DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey, and Overbeek) ^[31] และทฤษฎีไตรโบโลยี (Tribology Theory) ^[41]

ทฤษฎี DLVO อธิบายว่า เมื่อสารลดน้ำอย่างมากซึ่งมีประจุเป็นลบดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์ จะทำให้อนุภาคซีเมนต์เกิดประจุชนิดเดียวกัน ประจุชนิดเดียวกันทำให้เกิดแรงผลึกสถิตยทางไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับค่าศักย์เซต้าที่ผิวอนุภาคซีเมนต์ขึ้น และเป็นผลให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัวออก

ทฤษฎีไตรโบโลยี อธิบายว่า เมื่อสารลดน้ำอย่างมากดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์แล้ว จะช่วยลดแรงเสียดทานและช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค และเป็นผลให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัว

จากทฤษฎีทั้งสองนี้ จะอธิบายการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมได้ว่า สารลดน้ำอย่างมากจะทำให้เกิดแรงผลึกสถิตยทางไฟฟ้า แรงผลึกสถิตยทางไฟฟ้านี้จะทำหน้าที่ผลักอนุภาคซีเมนต์ให้กระจายตัวออก และทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ด้วยเหตุนี้ จำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคบางส่วนจึงสลายตัว เป็นผลให้ต้องการพลังงานภายนอกเพื่อที่จะสลายรอยต่อน้อยลง ส่วนผลของการหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานที่ผิวระหว่างอนุภาคซีเมนต์นั้น เมื่อสารลดน้ำอย่างมากดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์แล้ว สารลดน้ำอย่างมากจะทำหน้าที่เสมือนมาปกป้องการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคซีเมนต์ โดยมาทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานและหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค เป็นผลให้ต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการผสมน้อยลง

ด้วยเหตุนี้จึงเสนอแบบจำลอง ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ดังนี้

$$E_{in, \%SP} = \alpha_{red} (E_{in, sp}) \quad (4.8)$$

$$\alpha_{red} = \beta_1 \beta_2 \quad (4.9)$$

โดยที่

$E_{in,sp}$ คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

α_{red} คือ ค่าตัวประกอบการลดลง (Reduction factor) ของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

$E_{in,%SP}$ คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

β_1 คือ ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคที่ลดลงและจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น

β_2 คือ ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากสารลดน้ำอย่างมากทำหน้าที่เสมือนมาน ป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน และช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค

สำหรับค่า β_1 สามารถวิเคราะห์ได้จากกรณีที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ กรณีนี้ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคจะสูงสุด ด้วยเหตุนี้จึงสมมติให้ค่า $\beta_2 = 1.0$

เนื่องจากค่า β_1 คือค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคที่ลดลงและจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น β_1 จึงประกอบด้วย 2 พจน์ดังนี้

$$\beta_1 = \gamma_k \cdot \gamma_c \quad (4.10)$$

โดยที่

γ_k คือ ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจากผลของค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่สูงขึ้น ซึ่งค่าตัวประกอบนี้จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ โดยจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก

γ_c คือ ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อที่ลดลง จากผลของแรงผลักรังสีทางไฟฟ้าของสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก

จากสมการที่ (4.6) และ (4.7) ร่วมกัน จะหาค่า γ_k ได้ดังนี้

$$\gamma_k = \frac{\pi}{k \cdot (\phi_{red} \cdot w_{s,no})} \left(\phi_{red} \cdot w_{s,no} + \frac{1}{\rho} \right) \quad (4.11)$$

โดยที่

k คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

$w_{s,no}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ พบว่าค่า γ_c มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารลดน้ำอย่างมากดังนี้

$$\gamma_c = 1 - 0.38 X_{SP}^{0.22} \quad (4.12)$$

เมื่อ X_{SP} คือ ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์)

สำหรับค่า β_2 สามารถวิเคราะห์ได้จาก กรณีที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคไม่เป็นศูนย์ ซึ่งได้แก่ กรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ จากการวิเคราะห์ย้อนกลับจะได้

$$\beta_2 = 1 - a \cdot X_{SP}^b \quad (4.13)$$

โดยที่

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

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

เมื่อพิจารณาการทำงานของสารลดน้ำอย่างมาก พบว่า ถ้าสารลดน้ำอย่างมากดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์มากเพียงพอแล้ว ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่สูงกว่านี้จะไม่ผลต่อการกระจายตัว และมีแนวโน้มจะทำให้ส่วนผสมแยกตัว ดังนั้น จึงพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือ ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากน้อยกว่าและมากกว่าปริมาณที่จะเพียงพอดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงเสนอสมการของ β_2 ในรูปของสมการเชิงเส้นคู่ (Bilinear)

จากการวิเคราะห์ย้อนกลับพบว่า

$$\beta_2 = 1 - a \cdot X_{SP} \quad ; X_{SP} \leq 1.1\% \quad (4.14)$$

$$\beta_2 = 1 - 1.1a \quad ; X_{SP} \geq 1.1\% \quad (4.15)$$

โดยที่

$$a = 0.89 - 4.08 \cdot (w/c) \quad ; (w/c) \leq 0.32$$

$$a = -0.41 \quad ; (w/c) \geq 0.32$$

สำหรับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก 1.1% คือปริมาณสารลดน้ำอย่างมากสูงสุดที่แนะนำให้ใช้โดยผู้ผลิต (ตารางที่ 4.2) ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ = 0.32 คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มากเพียงพอจะทำให้อนุภาคซีเมนต์ห่างกัน = 10% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคซีเมนต์

4.5.2 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายจากแบบจำลอง และผลการทดลองของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพสท์

สำหรับผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายจากแบบจำลองและผลการทดลองค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพสท์ที่ปริมาณสารลดน้ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยที่ β_2 ได้จากสมการที่ (4.13) จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง $\pm 5\%$

สำหรับรูปที่ 4.10 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายจากแบบจำลองและผลการทดลองค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพสท์ที่ปริมาณสารลดน้ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ โดยที่ β_2 ได้จากสมการเชิงเส้นคู่ (สมการที่ (4.14)) จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง $\pm 7.5\%$

4.6 ผลการทดลองและแบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์

4.6.1 ผลการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์

สัดส่วนผสมต่าง ๆ ของมอร์ตาร์นั้นจะใช้ปริมาณซีเมนต์เป็นตัวกำหนด คือ สัดส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำ (Lean Mix) และปริมาณซีเมนต์สูง (Rich Mix) โดยมีค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งซีเมนต์ต่อของแข็งทั้งหมด = 0.25 เป็นค่าแบ่งเกณฑ์ดังกล่าว

สำหรับมอร์ตาร์ที่มีปริมาณซีเมนต์น้อย (Lean mix) นั้นจะเลือกใช้สัดส่วนผสมมอร์ตาร์เป็นไปตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C109-95 (สัดส่วนผสม M1 ของตารางที่ 4.1) โดยที่วิธีการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมนั้น จะใช้โต๊ะการไหล ซึ่งเป็นวิธีหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลของมาตรฐาน ASTM C109-95

ในขณะที่ มอร์ตาร์ที่มีปริมาณซีเมนต์สูง (สัดส่วนผสม M2 , M3 และ M4 ของตารางที่ 4.1) นั้น ใช้วิธีโต๊ะการไหลเช่นกัน Jeff and Hamid^[40] เสนอว่า สำหรับมอร์ตาร์ที่มีความข้นเหลวสูง ๆ แนะนำให้ทดสอบด้วยวิธีโต๊ะการไหล แต่ให้เปลี่ยนจำนวนเคาะจาก 25 ครั้งเหลือเพียง 5 ครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะตามมาตรฐาน ASTM C939-94a

นอกจากนี้ การทดลองยังเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ด้วย โดยที่ผลการทดลองทั้งค่าการไหลและกำลังอัดดังแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.14

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 – 4.14 พบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระดับความเข้มของการผสม ทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับความเข้มของการผสมสูงขึ้น พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของอนุภาคซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากขึ้น และเมื่อระดับความเข้มของการผสมสูงกว่าค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม อนุภาคส่วนใหญ่จะค้ำกันมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคยึดติดกันด้วยโครงสร้างที่แข็งแรง เป็นผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระดับความเข้มของการผสม นอกจากนี้ กำลังอัดยังมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเพราะสารลดน้ำอย่าง

มากช่วยกระจายอนุภาคซีเมนต์ และทำให้พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของอนุภาคซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก 1.6% พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มต่ำกว่าที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากน้อยกว่าค่านี้ ทั้งนี้เป็นเพราะส่วนผสมมีแนวโน้มแยกตัว เนื่องมาจากการใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากสูงกว่าปริมาณที่เพียงพอจะถูกดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์ (ผู้ผลิตแนะนำไม่ให้ใช้เกิน 1.1%) ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่า การใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่สูงเกินกว่าปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำ จะทำให้ส่วนผสมมีแนวโน้มแยกตัวและส่งผลเสียต่อกำลังอัดได้

สำหรับค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ พบว่ามีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์คือ ค่าการไหลมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่งตามระดับความเข้มข้นของการผสม และเมื่อระดับความเข้มข้นของการผสมสูงขึ้นกว่าค่าค่านั้น ค่าการไหลจะมีค่าลดลง ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดให้ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ให้ค่าการไหลสูงสุดคือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม

4.6.2 แบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์

Stitmannaitum^[1] เสนอ แบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ ดังสมการที่ (4.1) ซึ่งใช้สำหรับกรณีที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก จากการศึกษา พบว่าแบบจำลองเดิมสามารถใช้กับมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากได้ โดยการแทนที่ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมากด้วยค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก ($E_{in, \%SP}$) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4.8) ดังนั้น สมการที่ (4.1) จะเป็น

$$E_{in, mix} = \left(\frac{V_{sp}}{V_{st}} \right) E_{in, \%SP} = n_p E_{in, \%SP} \quad (4.16)$$

โดยที่

$E_{in, mix}$ คือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสม

V_{sp} คือ ปริมาตรของแข็งของวัสดุผงในส่วนผสม

V_{st} คือ ปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม

$E_{in, \%SP}$ คือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่คำนวณจากสมการที่ (4.8) โดยการแทน

$$\text{ค่า } \frac{w}{c} \text{ ด้วย } \frac{w}{c_{eff}}$$

n_p คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผง

สำหรับผลเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมที่คำนวณจากสมการ (4.16) และผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.17 สำหรับตารางที่ 4.7 แสดงค่าจากการคำนวณหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมด้วยสมการ (4.16)

4.7 ผลการทดลองของค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต

จากการศึกษาของ Stitmannaitnum^[1] พบว่า สำหรับคอนกรีตที่มีขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบอยู่ในช่วง 10 มม.- 40 มม. ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมมีค่าต่ำกว่าค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ 80% ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบมีส่วนช่วยกระจายอนุภาคซีเมนต์

สำหรับคอนกรีตที่มีสารลดน้ำอย่างมาก พบว่า ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมลดลงอีก ทั้งนี้เนื่องจากสารลดน้ำอย่างมากช่วยกระจายอนุภาคซีเมนต์ เมื่อนำผลการทดลองของ Stitmannaitnum^[1] ซึ่งมีสัดส่วนการผสมดังตารางที่ 4.1 มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าทำนายค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก (สมการที่ 4.16) ได้ผลดังรูปที่ 4.18

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่มีสารลดน้ำอย่างมากมีค่าลดลง จากการประมาณค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตด้วยสมการที่ (4.16) ซึ่งแสดงด้วยลูกศรทึบในรูปที่ 4.18 พบว่า ค่าที่ได้มีแนวโน้มสูงกว่าค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม ซึ่งเป็นเพราะผลของการเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบมีส่วนช่วยกระจายอนุภาคซีเมนต์

จากการศึกษาของ Stitmannaitnum^[1] พบว่า ที่สัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์เท่ากัน ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตมีค่าเป็น 80% ของค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ ดังนั้น เมื่อประมาณผลของการเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบต่อค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์เป็น 80% พบว่า ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมที่ได้ใกล้เคียงกับค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม สำหรับความผิดพลาดจากค่าทำนายที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นผลจากสารลดน้ำอย่างมากของ Stitmannaitnum^[1] มีสารเคมีพื้นฐานคือซิลิเฟนเตนเพทาไลน์ฟอรั่มลิตไฮด์คอนเดนเสท อย่างไรก็ตาม ผลของการเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบยังไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจน จึงควรได้รับการศึกษาต่อไป

4.8 สรุป

จากผลการทดลองและศึกษาเกี่ยวกับผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ สรุปพอสังเขปได้ดังนี้

1. ระดับความเข้มข้นของการผสมคือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ไปโดยเครื่องผสม ระดับความเข้มข้นของการผสมสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งบอกคุณภาพของการผสมได้ดีกว่าระยะเวลาการผสม
2. ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมคือ ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ให้ค่าการไหลสูงสุด หรือเรียกกล่าวได้อีกนัยว่า ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ให้ค่าความหนืดต่ำสุด

3. ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพลิงที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในขณะที่ กรณีมีสารลดน้ำอย่างมากพบว่า ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณสารลดน้ำอย่างมากมีผลต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

4. ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ทั้งมีและไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก พบว่า เป็นฟังก์ชันกับทั้งสัดส่วนปริมาตรของแข็งซีเมนต์และค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพลิง



ตารางที่ 4.1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

| Mix No. | หิน (g) | Sand (g) | Cement (g) | Water (g) | w/c | V_{sp}/V_{st} | w/c_{eff} | $\%_{SP}$ | Remark |
|---------|------------|-------------|---------------|--------------|-------|-----------------|-------------|-----------|--|
| M1 | - | 7440.1 | 2705.5 | 1312.2 | 0.485 | 0.23 | 0.28 | Vary | Standard Mortar (Lean Mix) |
| M2 | - | 6298.6 | 3464.2 | 1505.4 | 0.43 | 0.31 | 0.30 | Vary | Rich Mix |
| M3 | - | 6087.7 | 3348.2 | 1622.4 | 0.48 | 0.31 | 0.35 | Vary | Rich Mix |
| M4 | - | 6980.4 | 2869.7 | 1434.9 | 0.50 | 0.26 | 0.32 | Vary | Rich Mix |
| C3 | 930 | 836 | 413 | 165 | 0.40 | 0.16 | 0.29 | Vary | อ้างอิงผลของ Stitmannaitum ⁽¹⁾ |

ตารางที่ 4.2 ช่วงปริมาณการใช้งานของสารลดน้ำอย่างมากเบสเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์คอนเดนเสทที่แนะนำโดยผู้ผลิต
(ชื่อทางการค้า Sikament FF)

| ประเภทของงาน คอนกรีต | ปริมาณที่แนะนำของผู้ผลิต (% โดยน้ำหนักของซีเมนต์) รวมน้ำหนักน้ำในสารลดน้ำ อย่างมาก | ปริมาณที่แนะนำของผู้ผลิต (% โดยน้ำหนักของซีเมนต์) หักน้ำหนักน้ำในสารลดน้ำ อย่างมาก |
|-------------------------|---|---|
| คอนกรีตไหล | 0.6% - 0.8% | 0.21% - 0.28% |
| คอนกรีตกำลังสูง | 0.7% - 3% | 0.25% - 1.1% |

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของผลการทดลองที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ

| สมการเอมพิริคัล, $Fl_{time} = A \cdot \exp\left(-\left(B(MI)^2 + C \cdot MI\right)\right)$ | | | | | |
|--|-----------|---|-------|--------|---------------|
| w/c | $\%_{SP}$ | ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอย | | | OMI (Wh/l) |
| | | A | B | C | |
| 0.26 | 0.4 | 302.439 | 3.122 | -4.636 | 5.04 |
| | 0.6 | 285.610 | 2.878 | -4.476 | 4.79 |
| | 0.8 | 230.613 | 3.358 | -4.542 | 3.92 |
| | 1.0 | 218.781 | 3.354 | -4.489 | 3.67 |
| | 1.2 | 263.681 | 4.054 | -5.233 | 3.63 |
| | 1.4 | 293.100 | 4.124 | -5.430 | 3.78 |
| 0.28 | 0.4 | 112.522 | 2.110 | -2.886 | 4.83 |
| | 0.6 | 83.340 | 1.452 | -2.175 | 4.12 |
| | 0.8 | 87.504 | 1.293 | -2.206 | 3.68 |
| | 1.0 | 85.561 | 2.085 | -2.724 | 3.73 |
| | 1.2 | 81.158 | 0.828 | -1.947 | 3.59 |
| | 1.4 | 78.496 | 2.239 | -2.661 | 3.63 |
| 0.30 | 0.6 | 42.593 | 0.565 | -1.006 | 3.83 |
| | 0.8 | 42.715 | 0.606 | -1.086 | 3.44 |
| | 1.0 | 40.009 | 0.687 | -1.016 | 3.23 |
| | 1.2 | 40.300 | 0.665 | -1.063 | 3.08 |
| | 1.4 | 38.975 | 0.675 | -1.022 | 3.04 |
| 0.35 | 1.0 | 23.437 | 0.075 | -0.499 | 3.13 |
| | 1.2 | 23.273 | 0.139 | -0.557 | 2.86 |
| | 1.4 | 22.987 | 0.379 | -0.646 | 2.89 |

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาต่าง ๆ

| | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| %SP | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 |
| w/c | 0.227 | 0.220 | 0.212 | 0.204 | 0.199 | 0.195 | 0.193 | 0.193 |

ตารางที่ 4.5 ผลเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มของการผสมระหว่างการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 และ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

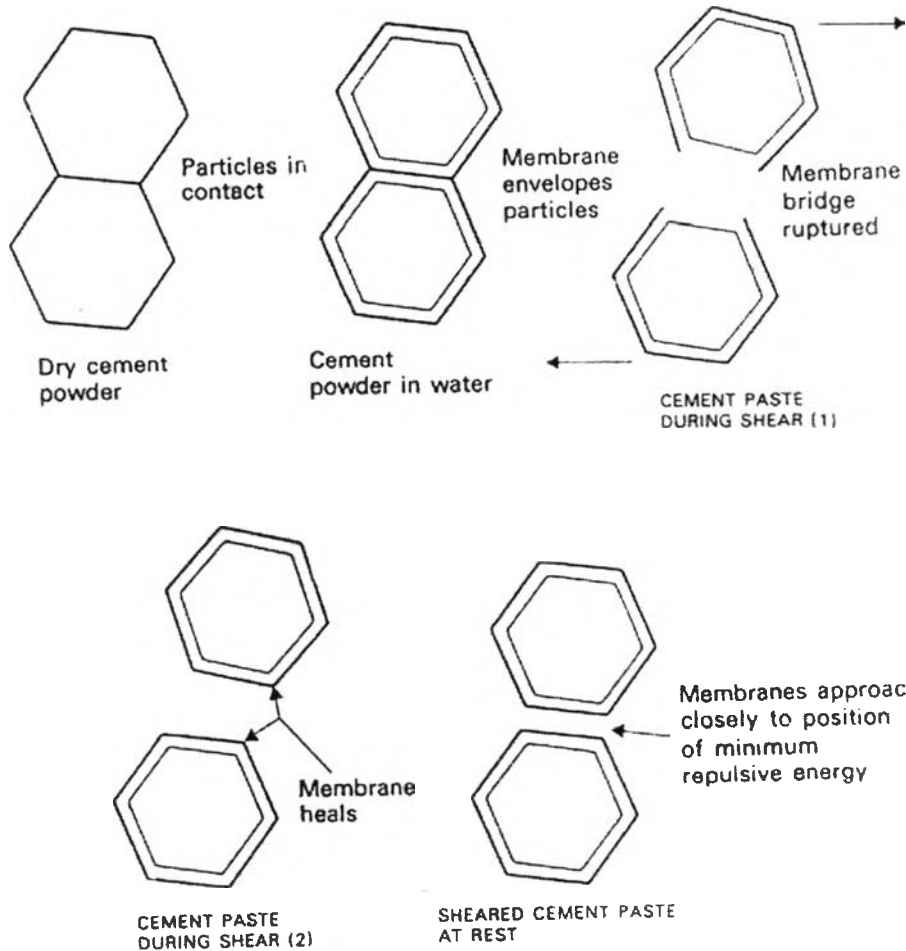
| w/c | % _{SP} โดยน้ำหนักซีเมนต์ | ค่าระดับความเข้มของการ ผสมที่ผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 (Wh/l) | ค่าระดับความเข้มของ การผสมที่เหมาะสม (Wh/l) |
|-------|--------------------------------------|---|---|
| 0.26 | 0 | 5.53 | 6.90 |
| 0.26 | 0.4 | 1.79 | 5.04 |
| 0.26 | 0.6 | 2.20 | 4.79 |
| 0.26 | 0.8 | 2.30 | 3.92 |
| 0.26 | 1.0 | 2.04 | 3.67 |
| 0.26 | 1.2 | 2.19 | 3.63 |
| 0.26 | 1.4 | 1.89 | 3.78 |
| 0.212 | 0.4 | 7.10 | 4.98 |
| 0.204 | 0.6 | 7.42 | 4.43 |
| 0.199 | 0.8 | 5.97 | 4.59 |
| 0.195 | 1.0 | 6.24 | 4.62 |
| 0.193 | 1.2 | 5.37 | 4.61 |
| 0.193 | 1.4 | 6.82 | 4.72 |

ตารางที่ 4.6 ผลเปรียบเทียบระยะเวลาการแข็งตัวเริ่มต้นและสุดท้ายระหว่างการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 และการผสมที่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม

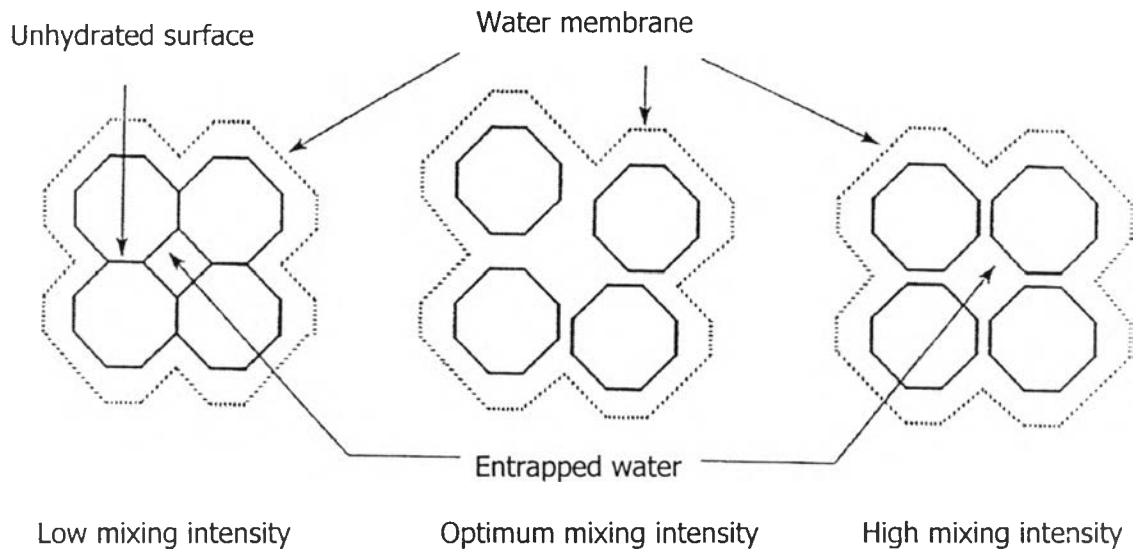
| w/c | $\%_{SP}$ | ระยะเวลาการแข็งตัวเริ่มต้น (นาที) | |
|-------|-----------|-----------------------------------|--|
| | | การผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 | การผสมที่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม |
| 0.260 | 0 | 75 | 67 |
| 0.220 | 0.2 | 76 | 88 |
| 0.212 | 0.4 | 79 | 90 |
| 0.204 | 0.6 | 100 | 143 |
| 0.199 | 0.8 | 118 | 127 |
| 0.195 | 1.0 | 128 | 132 |
| 0.193 | 1.2 | 133 | 139 |
| 0.193 | 1.4 | 134 | 141 |
| 0.26 | 0.6 | 207 | 189 |
| 0.26 | 0.8 | 245 | 234 |

ตารางที่ 4.7 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

| Mix No. | $\%_{SP}$ | w/c_{eff} | V_{sp}/V_{st} | $E_{in, \%SP}$ (จากสมการที่ 4.8) | E_{in} (จากสมการที่ 4.14) |
|---------|-----------|-------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| M1 | 0 | 0.28 | 0.23 | 6.90 | 1.59 |
| | 0.4 | 0.28 | 0.23 | 4.23 | 0.97 |
| | 1.2 | 0.28 | 0.23 | 3.39 | 0.78 |
| M2 | 0 | 0.30 | 0.31 | 6.90 | 2.14 |
| | 0.4 | 0.30 | 0.31 | 4.09 | 1.27 |
| | 1.2 | 0.30 | 0.31 | 3.17 | 0.98 |
| M4 | 0 | 0.32 | 0.26 | 6.90 | 1.79 |
| | 0.4 | 0.32 | 0.26 | 4.07 | 1.06 |
| | 1.2 | 0.32 | 0.26 | 3.01 | 0.78 |

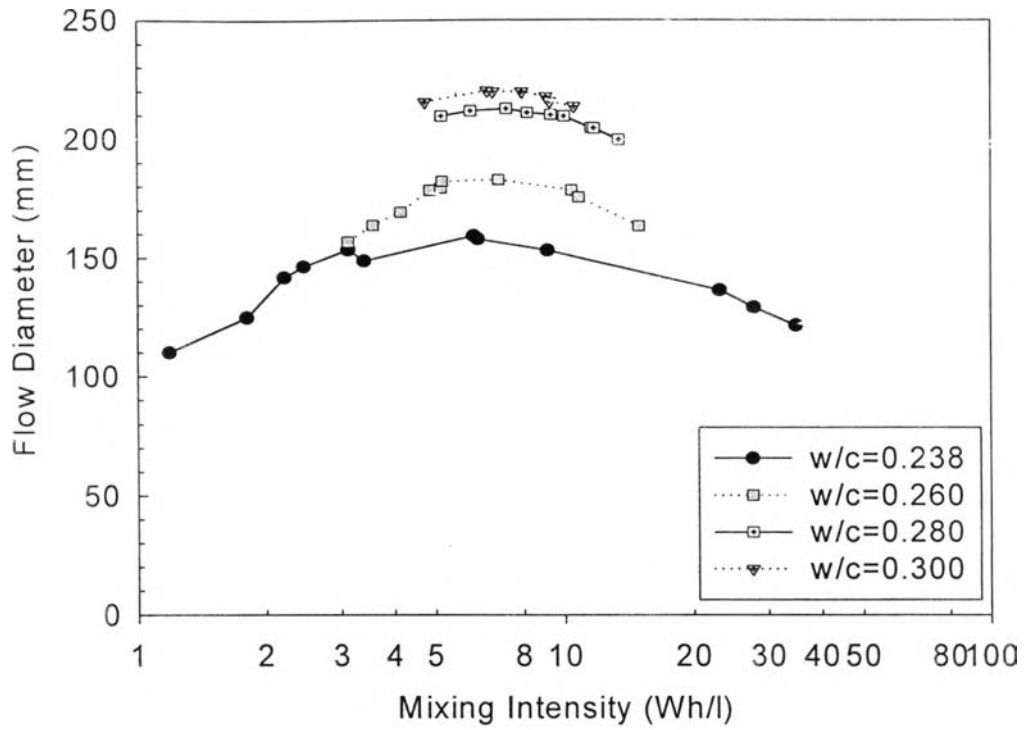


(ก.) กระบวนการแตกตัวของโครงสร้างที่เกิดย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible structural breakdown process)^[4]

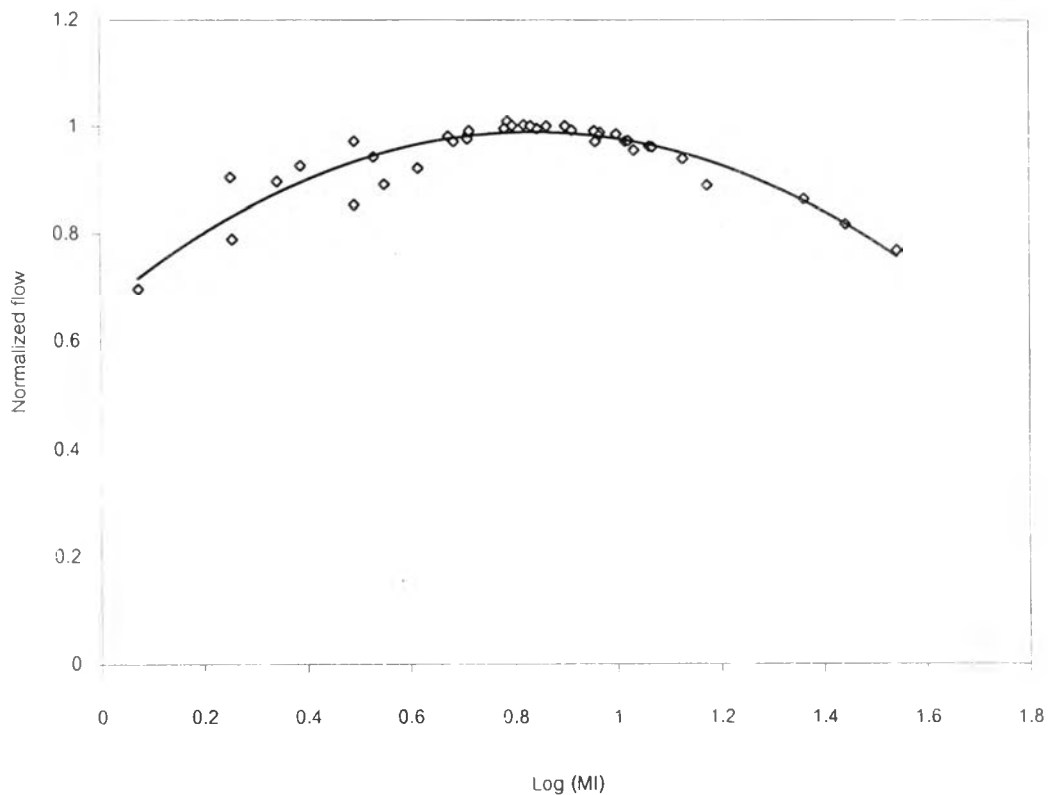


(ข.) เงื่อนไขการกระจายตัวของอนุภาคที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ^[1]

รูปที่ 4.1 กระบวนการแตกตัวของโครงสร้างที่เกิดย้อนกลับไม่ได้และเงื่อนไขการกระจายตัวที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ

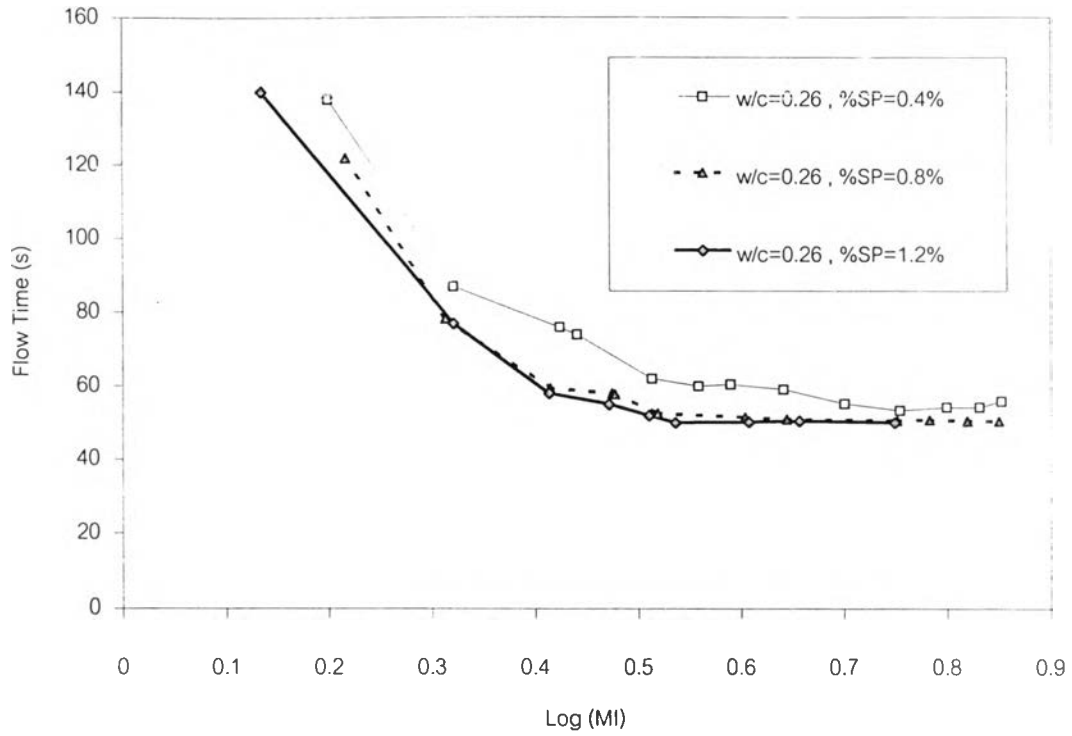


(ก.) ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

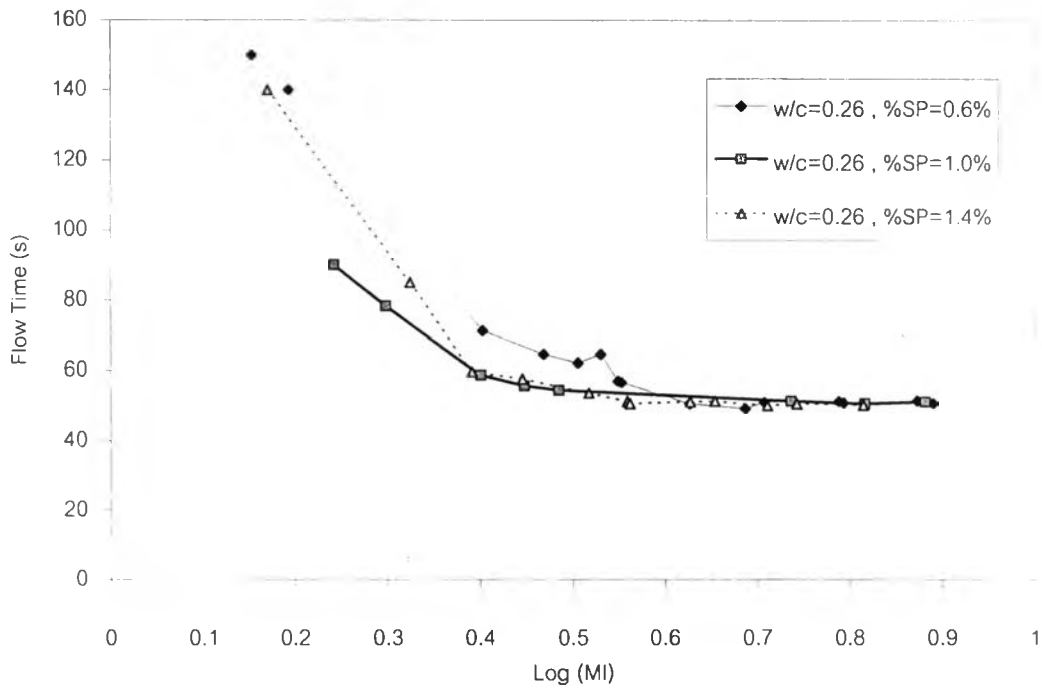


(ข.) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ 4.2 ผลการทดลองผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติสภาพะเหลวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

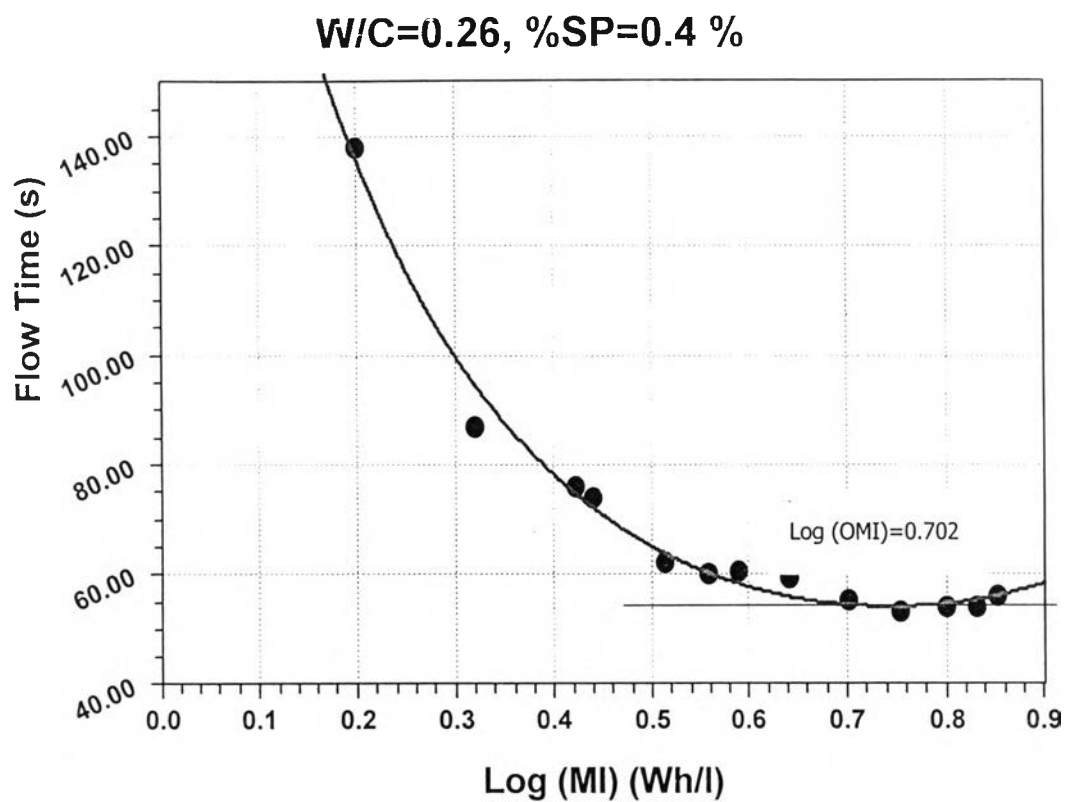


(ก.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสม

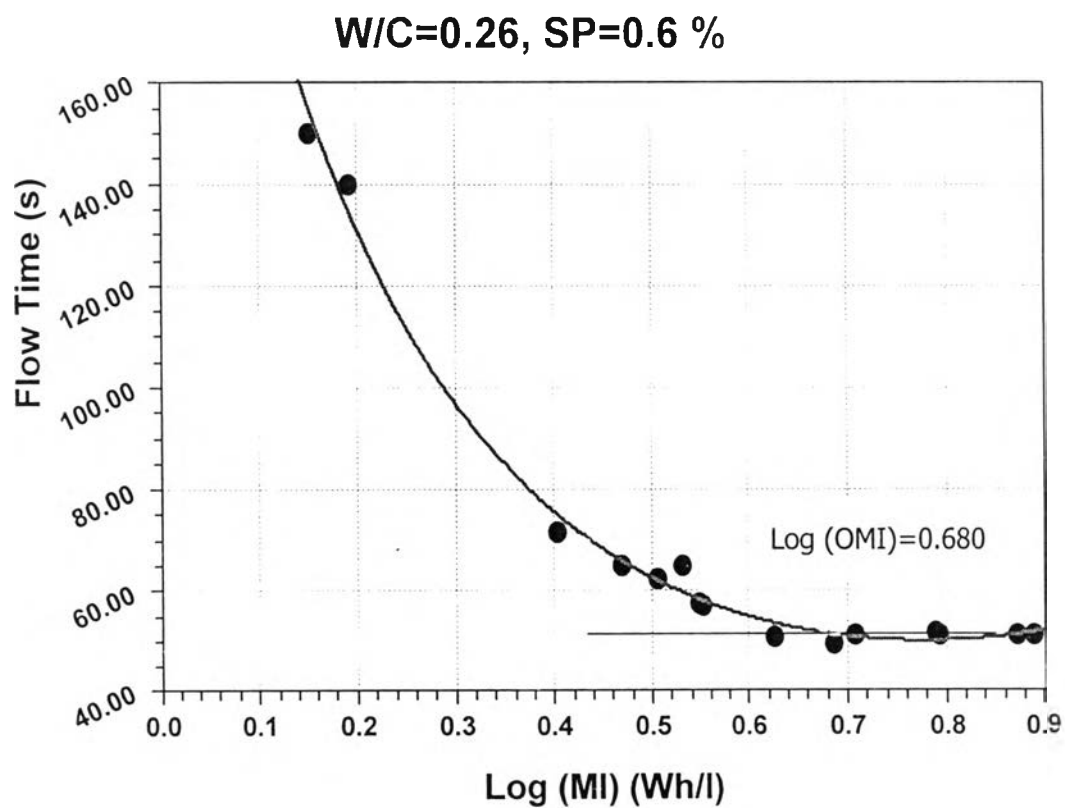


(ข.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสม

รูปที่ 4.3 ผลการทดลองหาระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ ของซีเมนต์เฟสค์



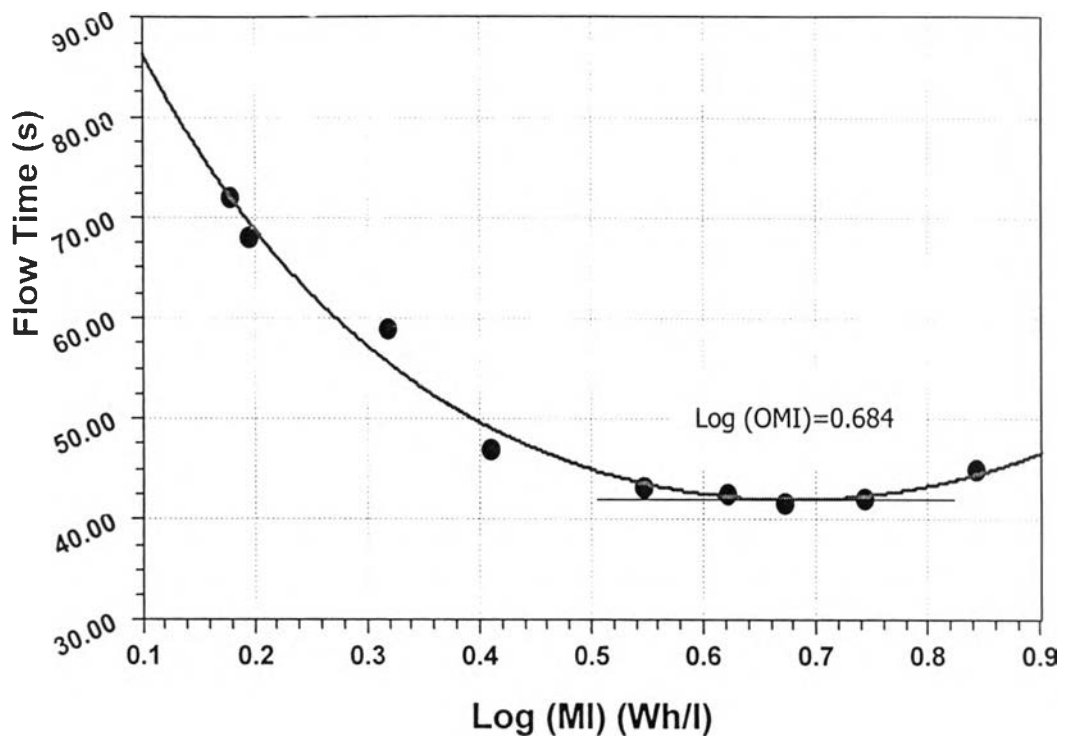
(ก.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม



(ข.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

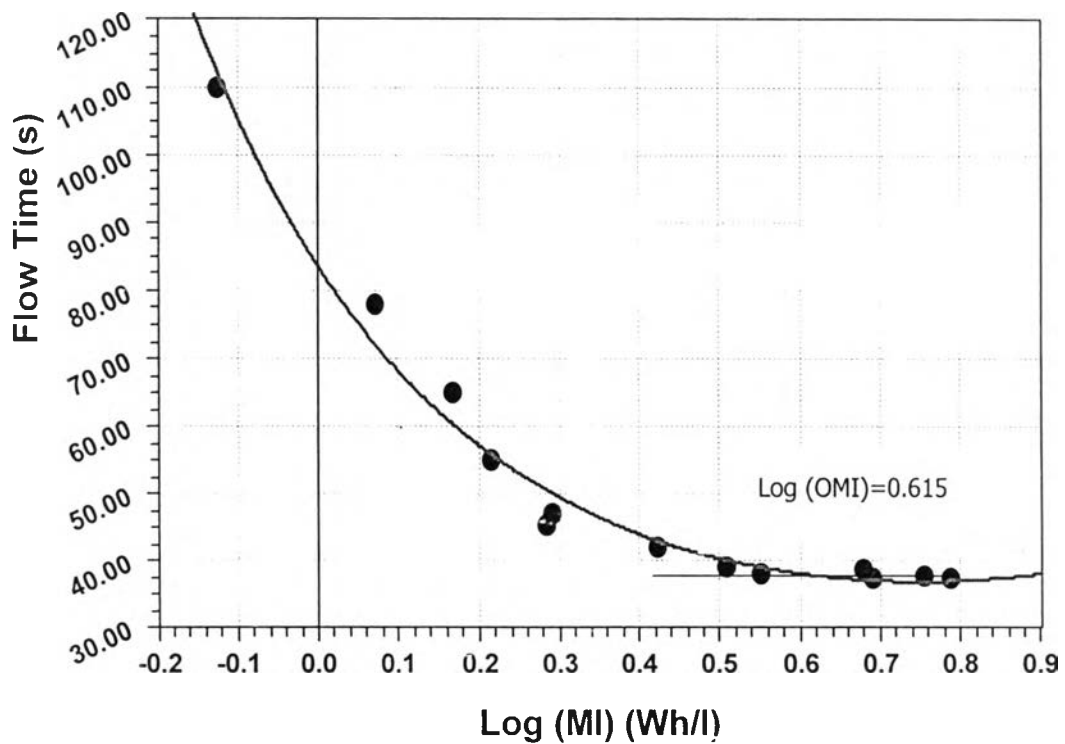
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ($w/c = 0.26$)

W/C=0.28, SP=0.4 %



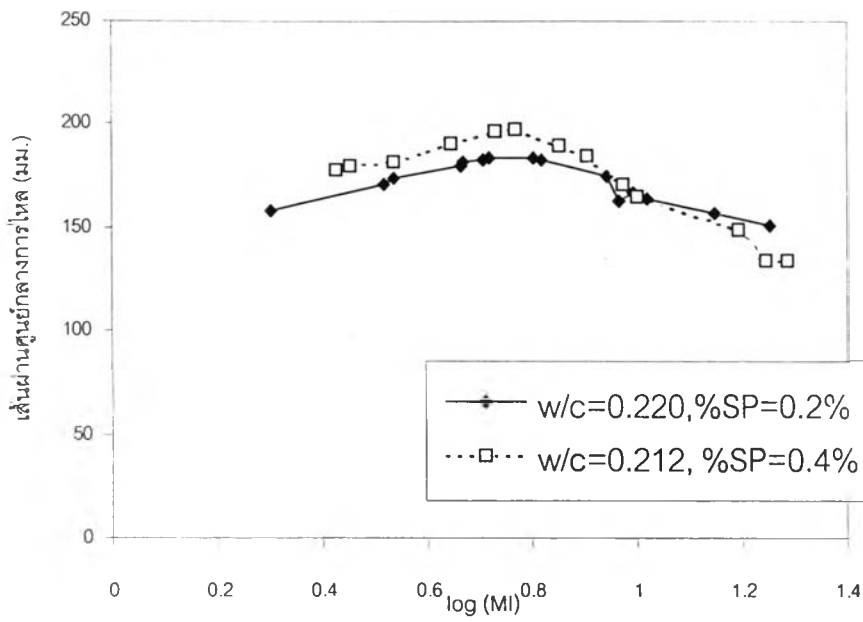
(ก.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสม

W/C=0.28, SP=0.6 %

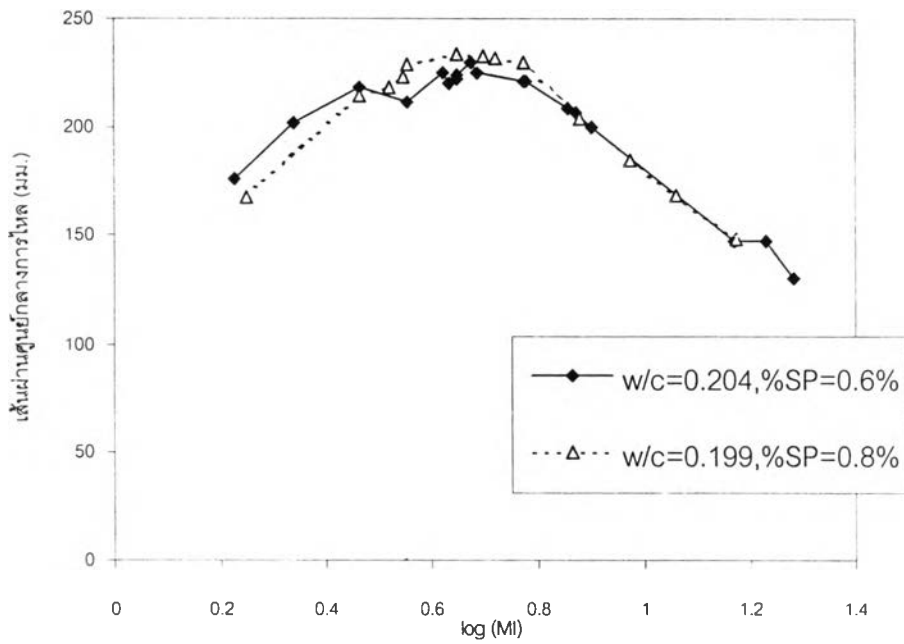


(ข.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสม

รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ ($w/c = 0.28$)

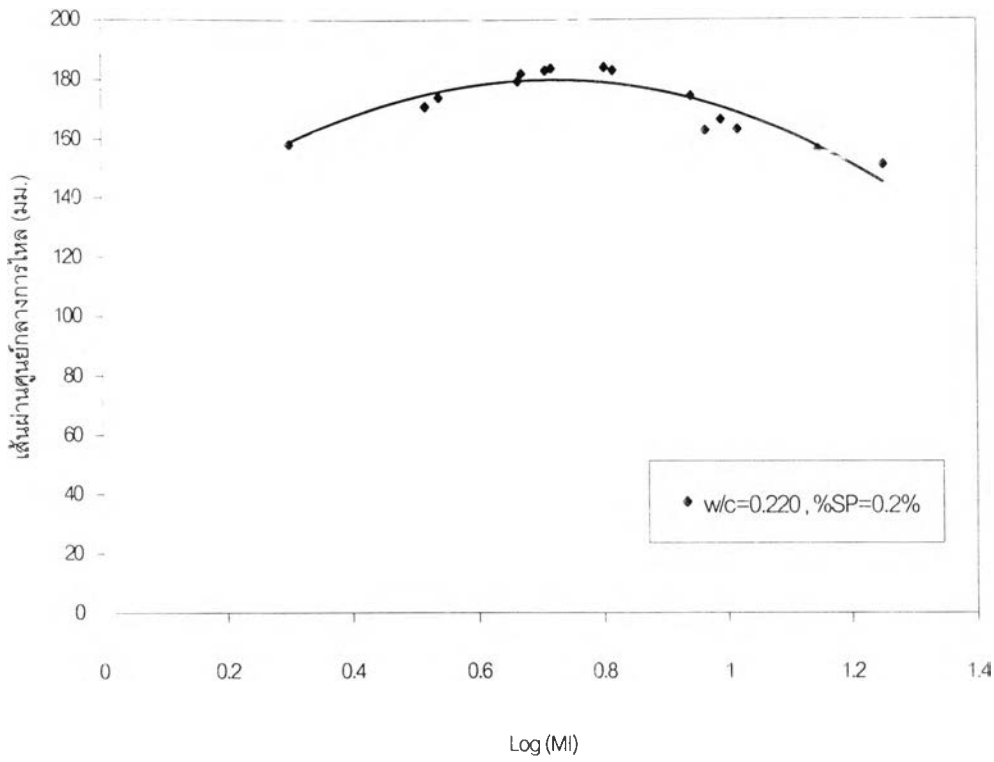


(ก.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสม

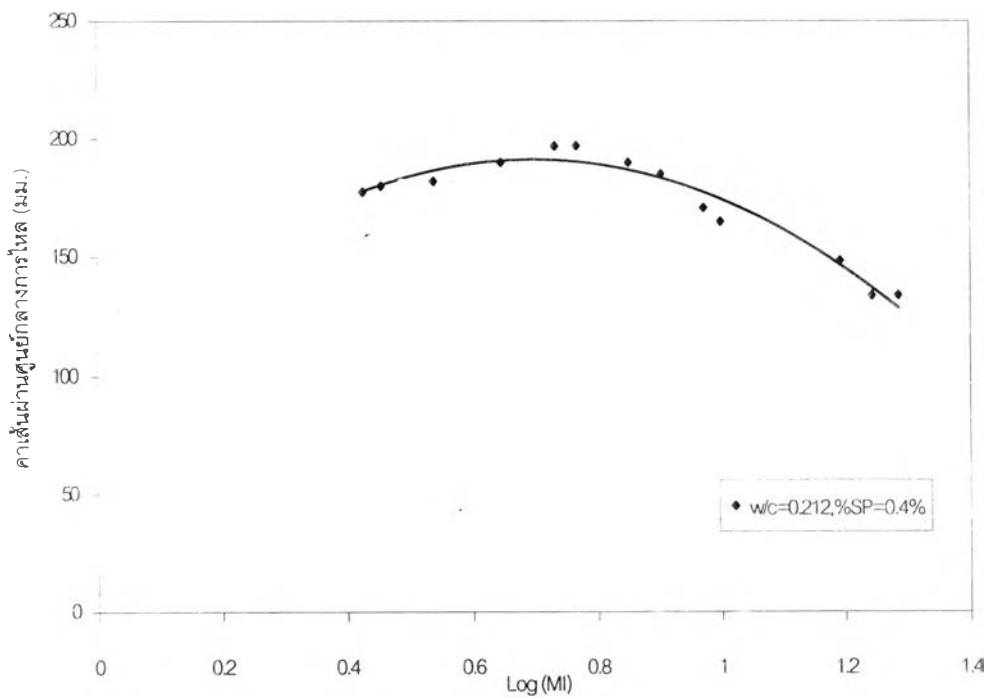


(ข.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มข้นของการผสม

รูปที่ 4.6 ผลการทดลองผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อค่าการไหลของซีเมนต์โพสดี

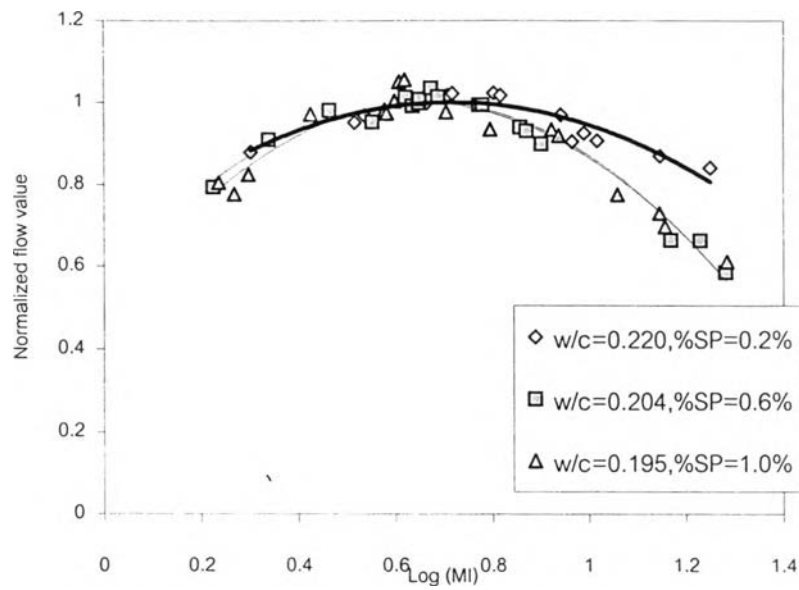


(ก.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

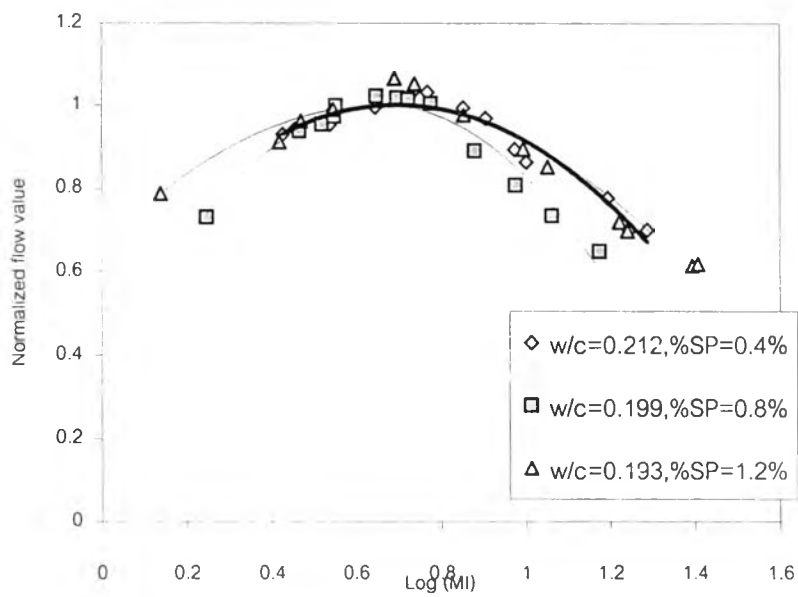


(ข.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ 4.7 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์

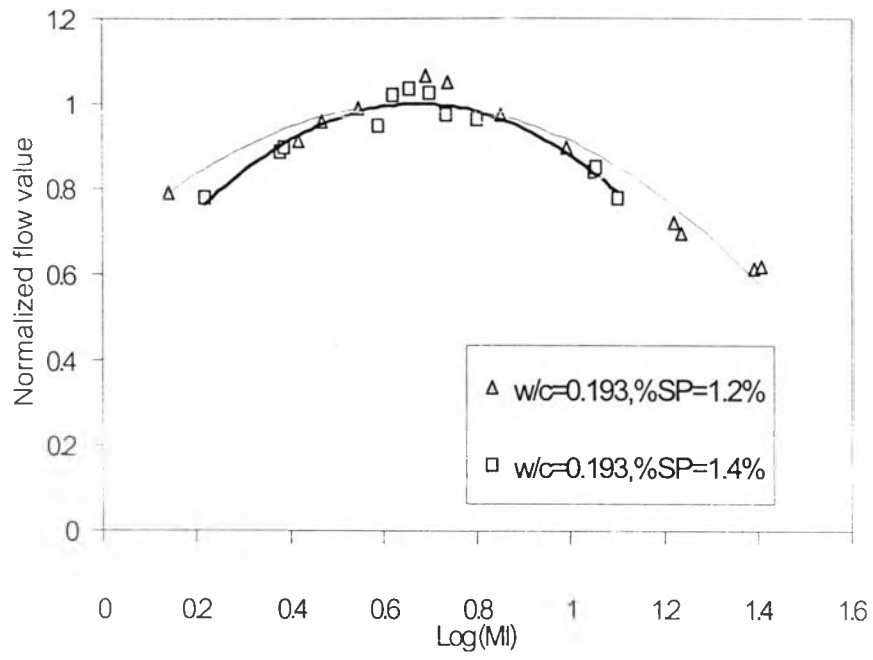


(ก.) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มข้นของการผสม



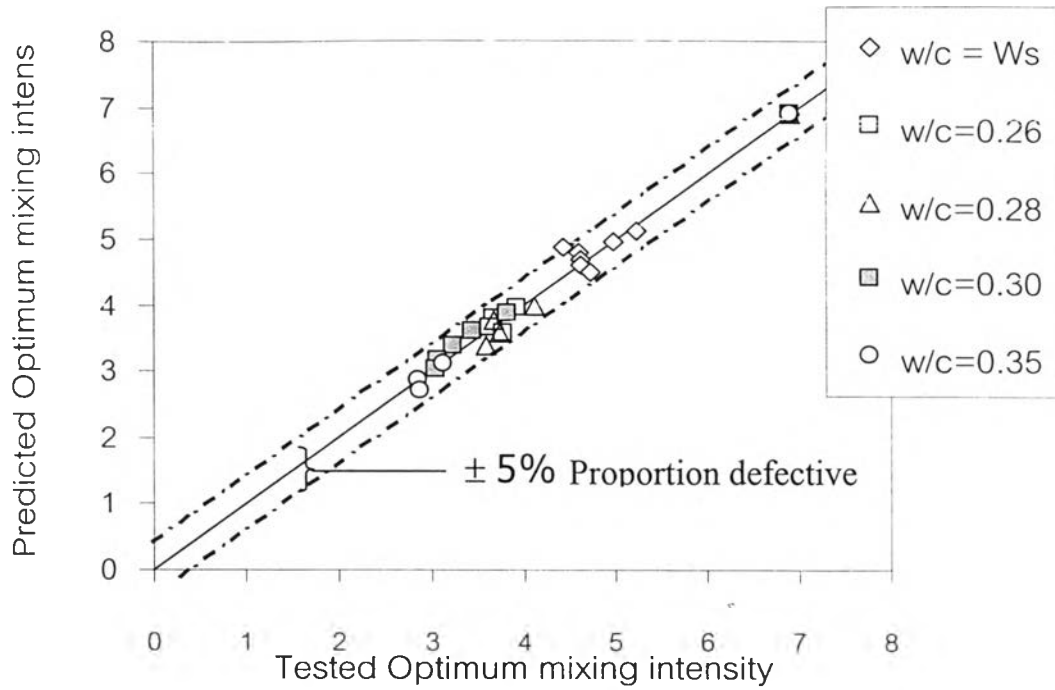
(ข.) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มข้นของการผสม

รูปที่ 4.8 ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่าง
มาก



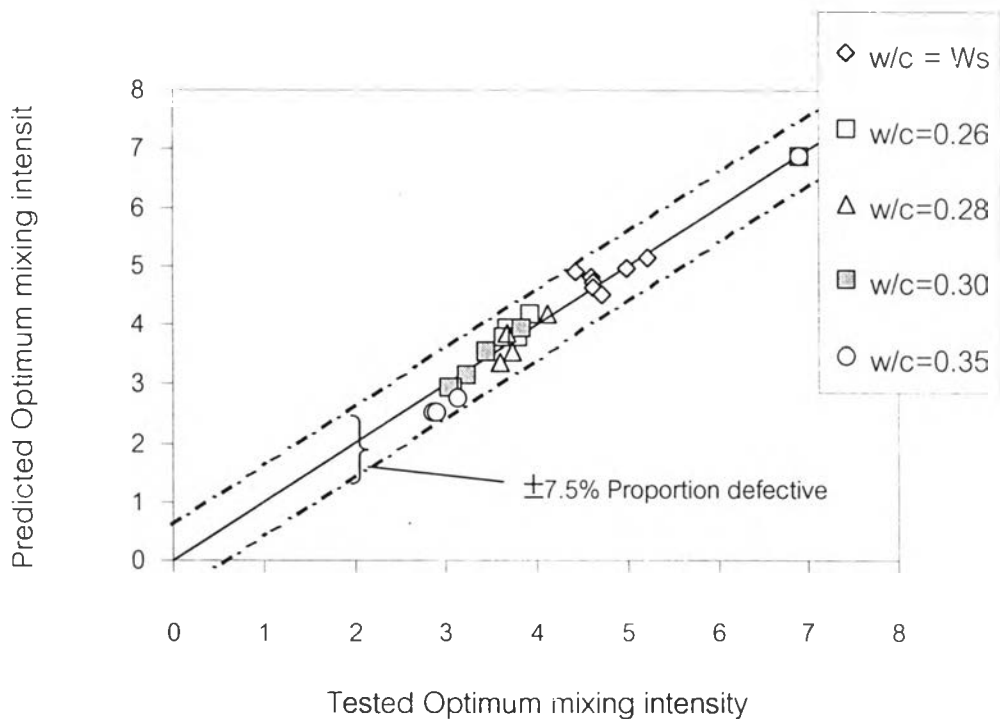
(ค.) ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ 4.8 (ต่อ)



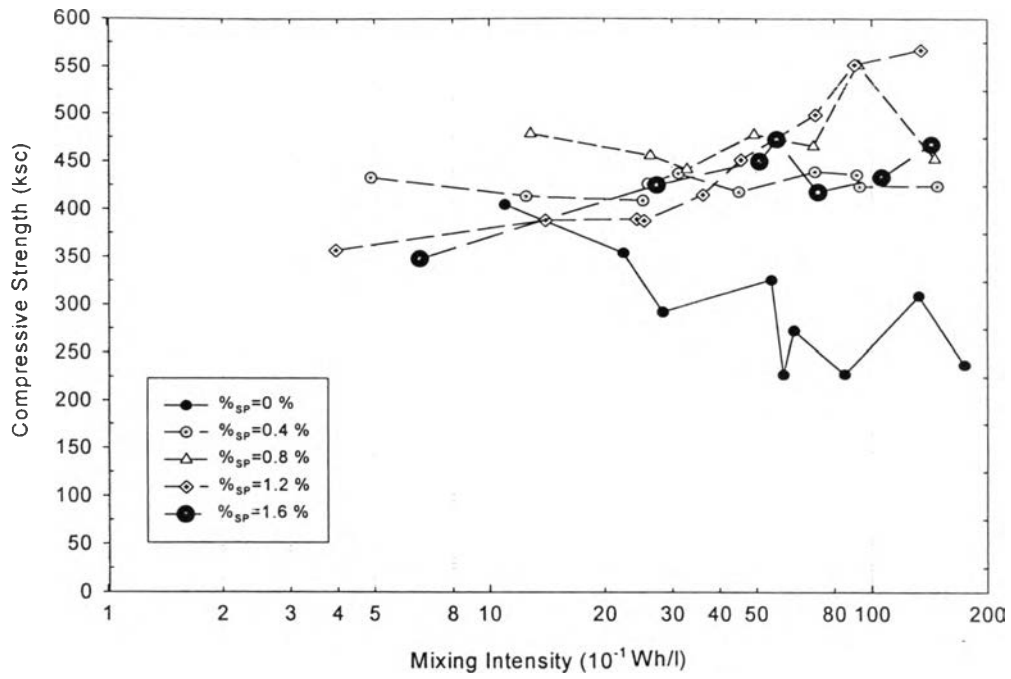
หมายเหตุ W_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

รูปที่ 4.9 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์พิเศษที่มีสารลดน้ำอย่างมากมายปริมาณต่าง ๆ (คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.13))

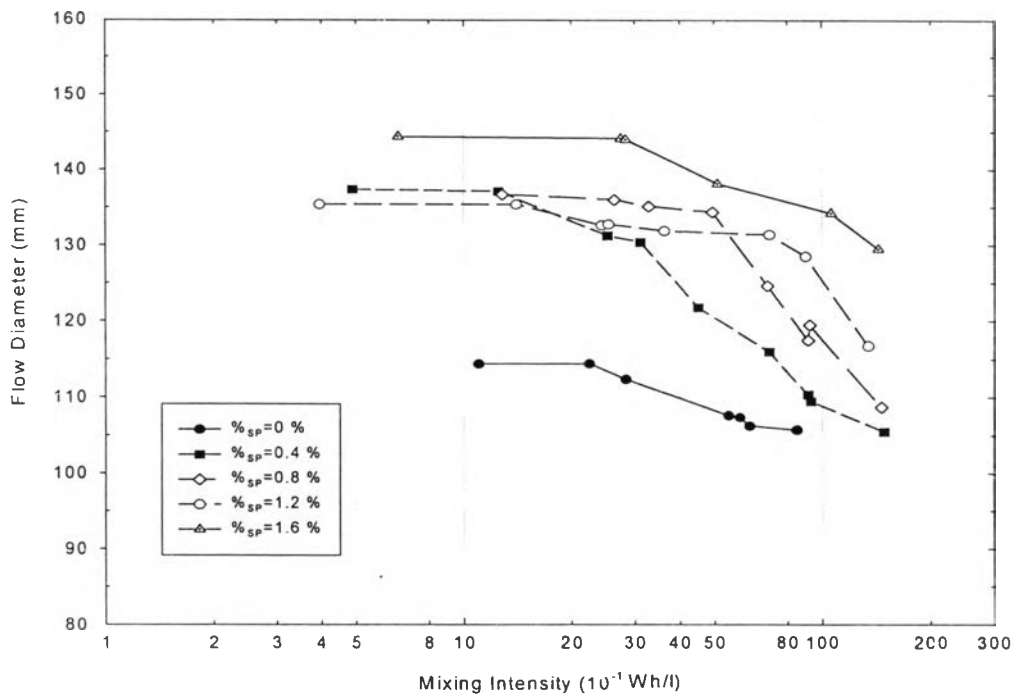


หมายเหตุ W_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

รูปที่ 4.10 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์พิเศษที่มีสารลดน้ำอย่างมากมายปริมาณต่าง ๆ (คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.14))

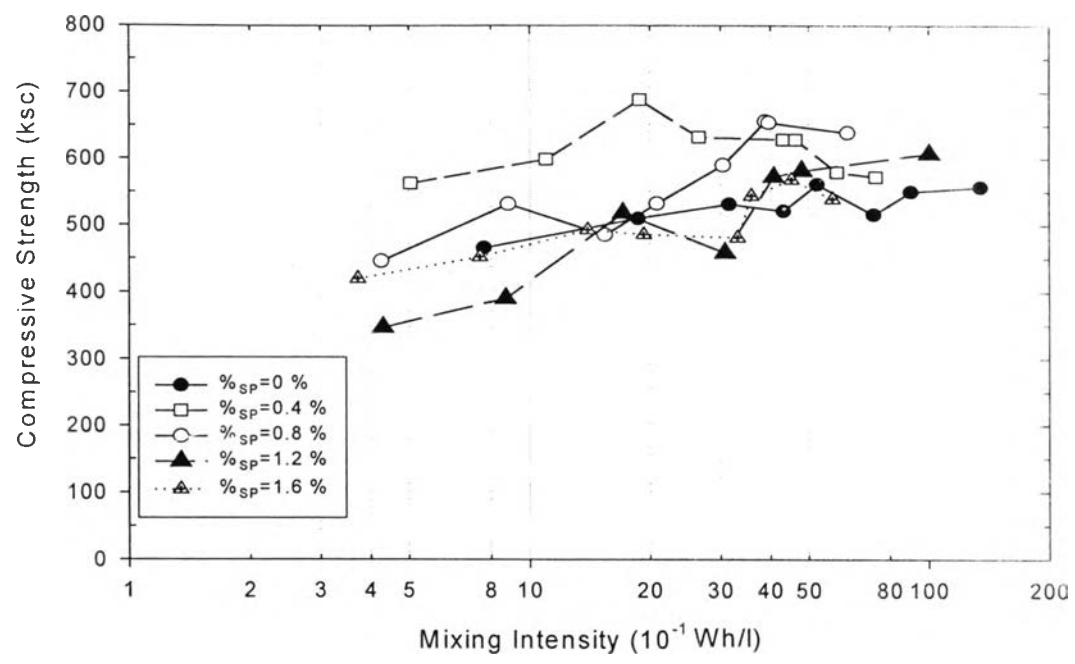


(ก.) ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมและกำลังอัด

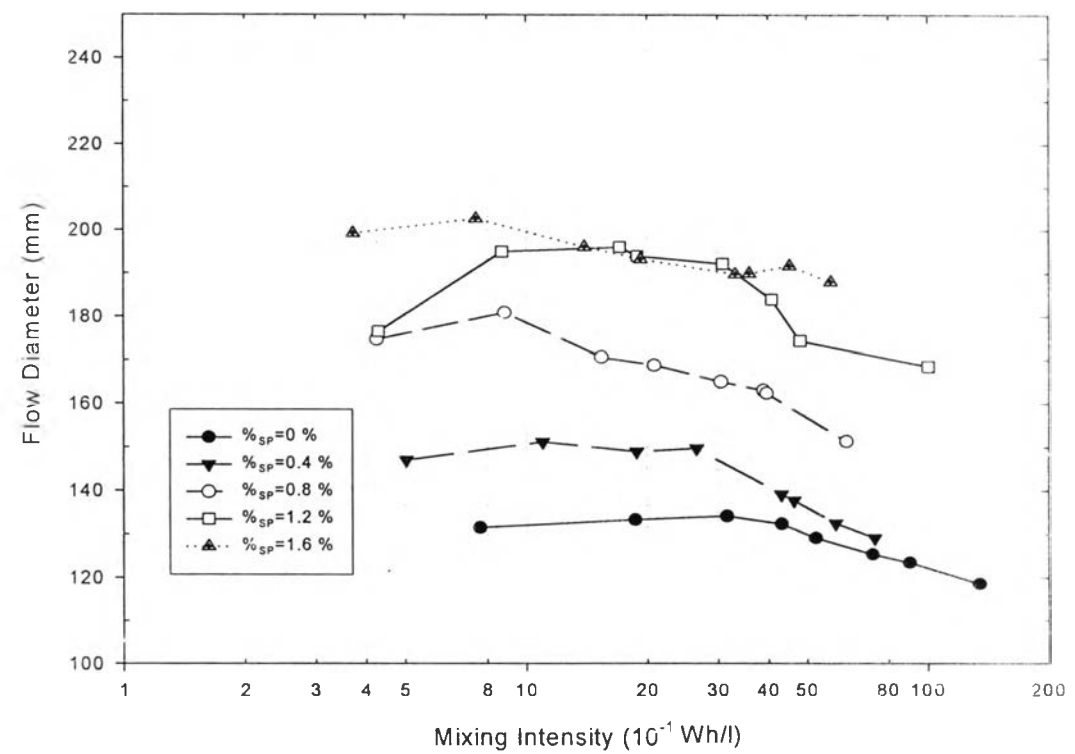


(ข.) ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมและเส้นผ่านศูนย์กลางการไหล

รูปที่ 4.11 ผลการทดลองผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อมอร์ตาร์ M1

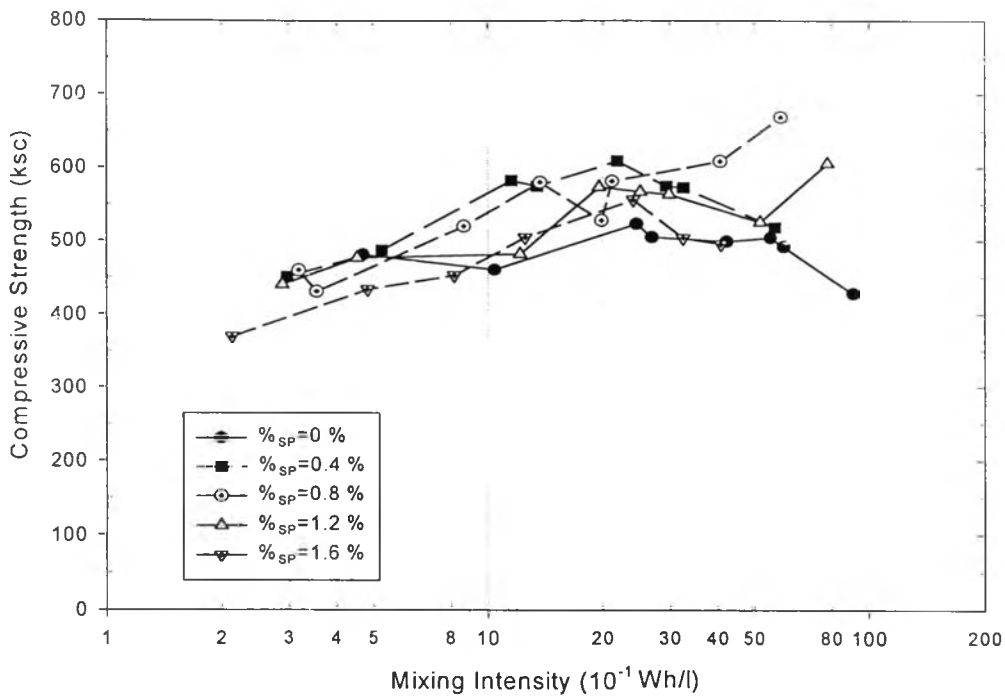


(ก.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและกำลังอัด

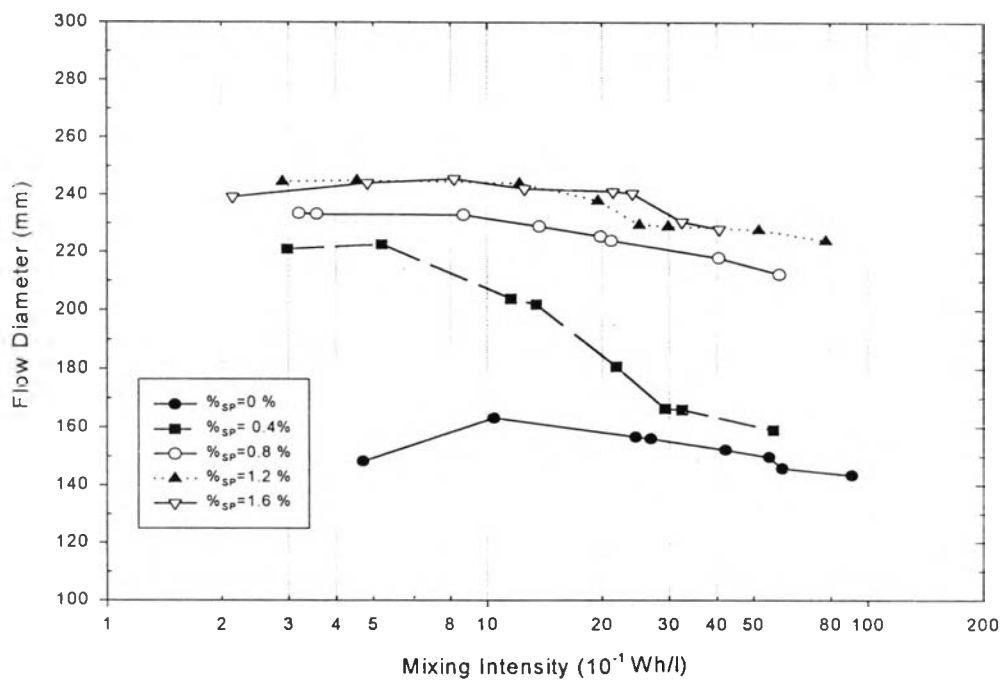


(ข.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและเส้นผ่านศูนย์กลางการไหล

รูปที่ 4.12 ผลการทดลองผลของระดับความเข้มของการผสมต่อมอร์ตาร์ M2

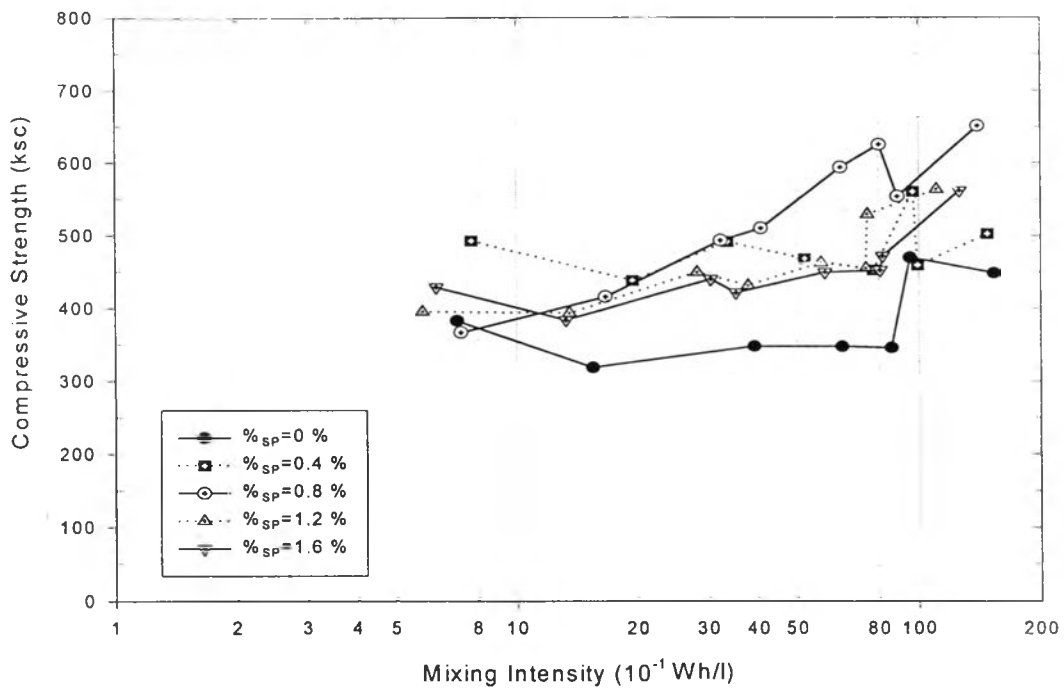


(ก.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและกำลังอัด

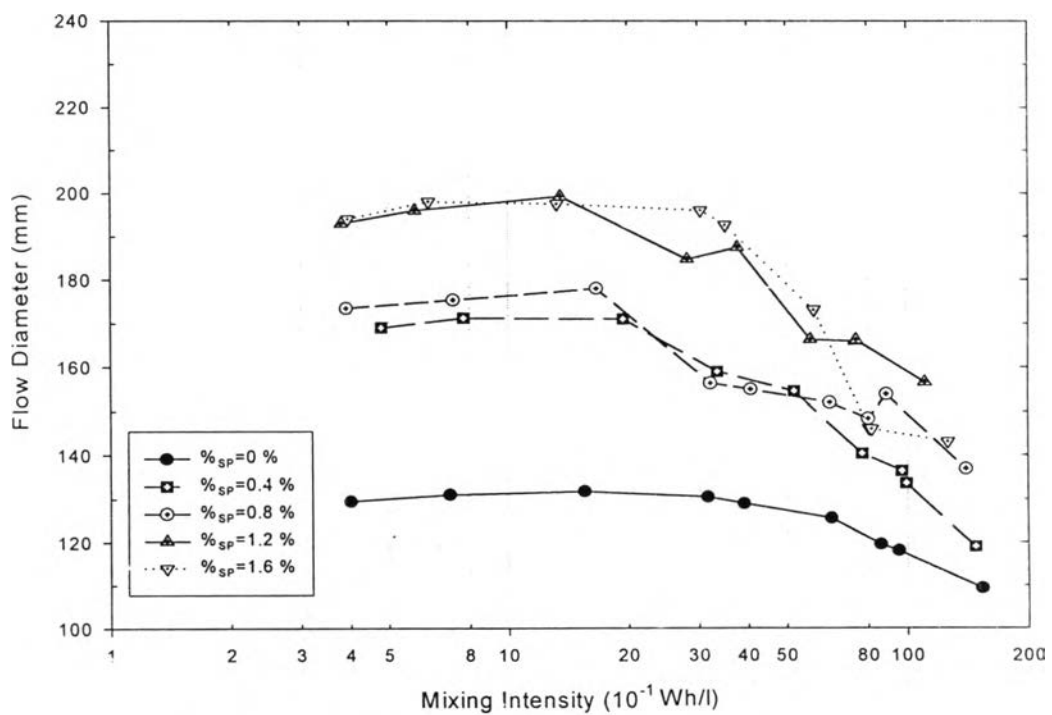


(ข.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและเส้นผ่านศูนย์กลางการไหล

รูปที่ 4.13 ผลการทดลองผลของระดับความเข้มของการผสมต่อมอร์ตาร์ M3

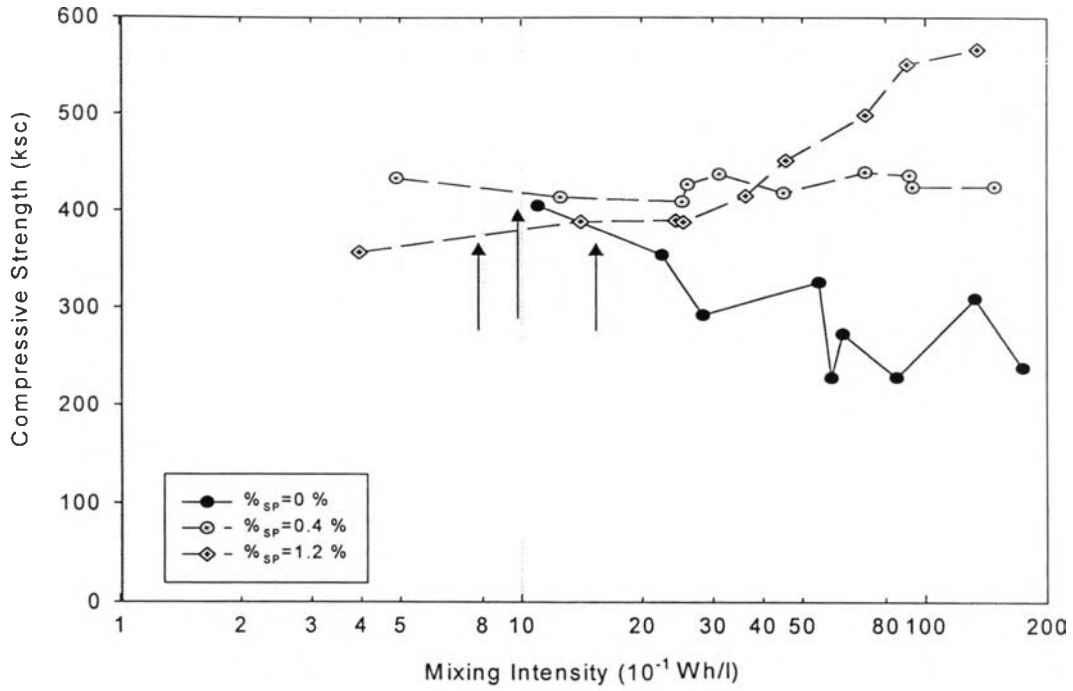


(ก.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและกำลังอัด

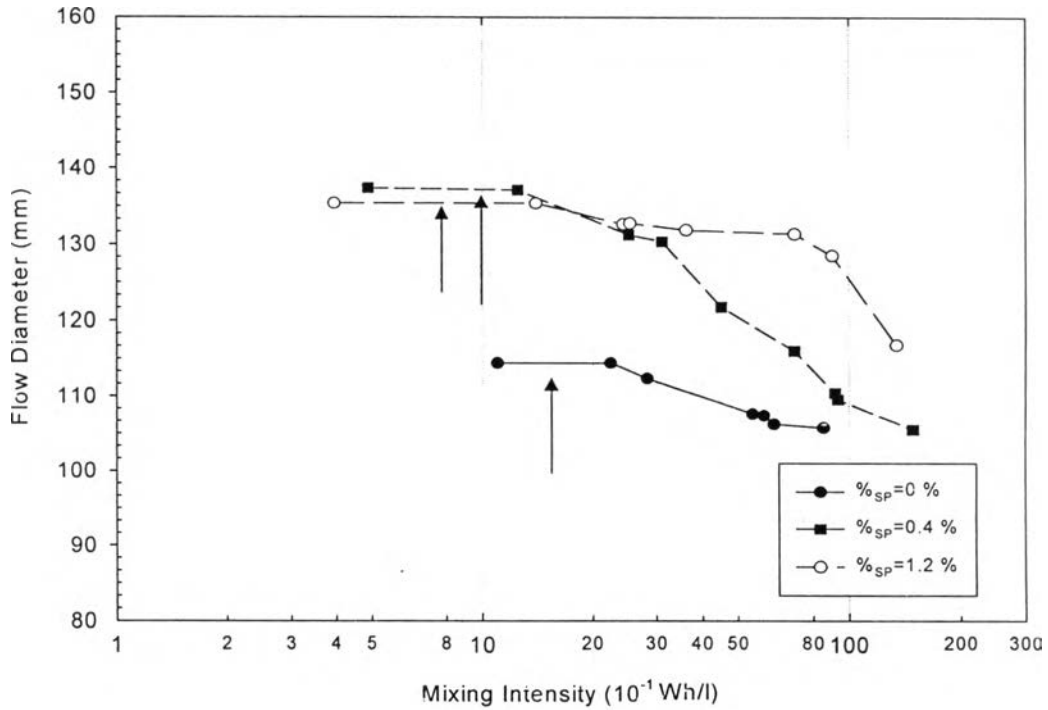


(ข.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและเส้นผ่านศูนย์กลางการไหล

รูปที่ 4.14 ผลการทดลองผลของระดับความเข้มของการผสมต่อมอร์ตาร์ M4

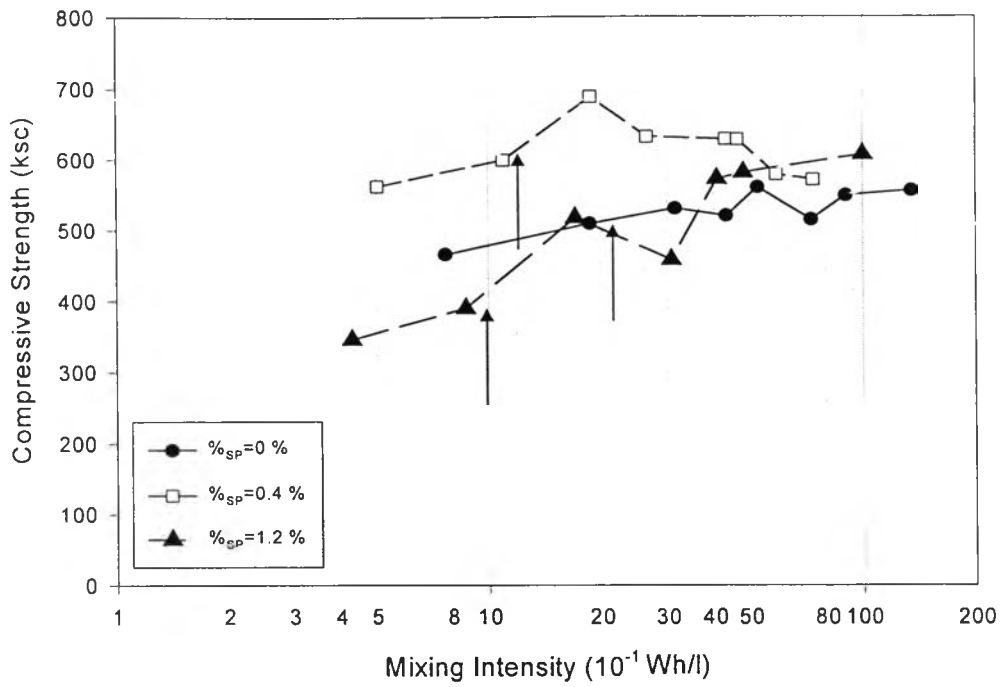


(ก.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและกำลังอัด

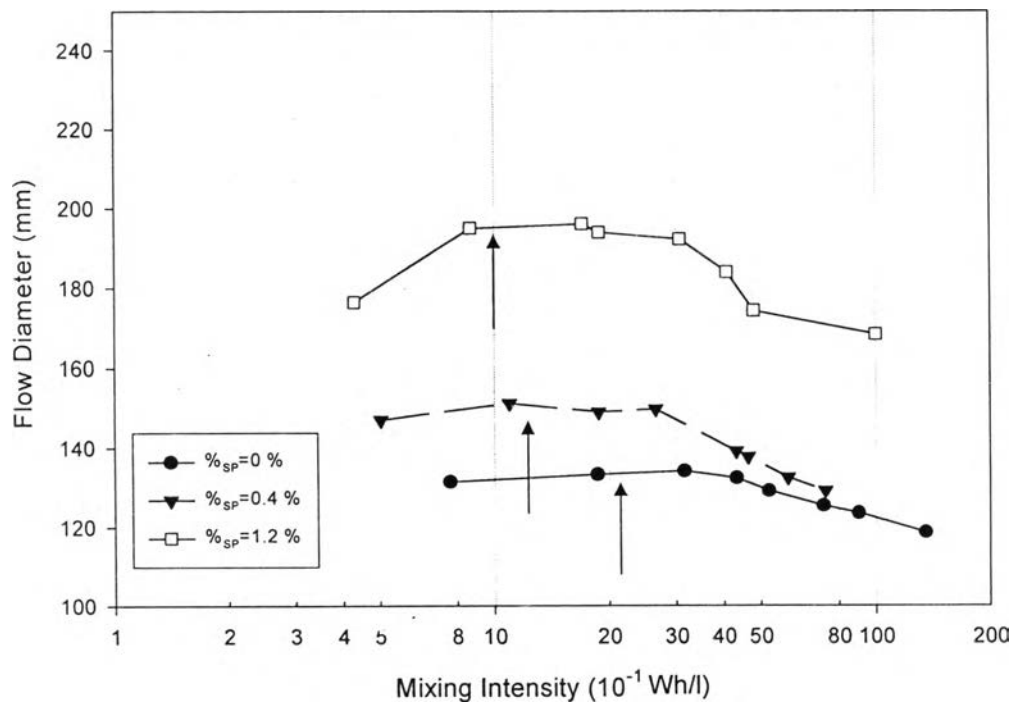


(ข.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและเส้นผ่าศูนย์กลางการไหล

รูปที่ 4.15 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ M1 (ลูกศรแสดงค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.16)

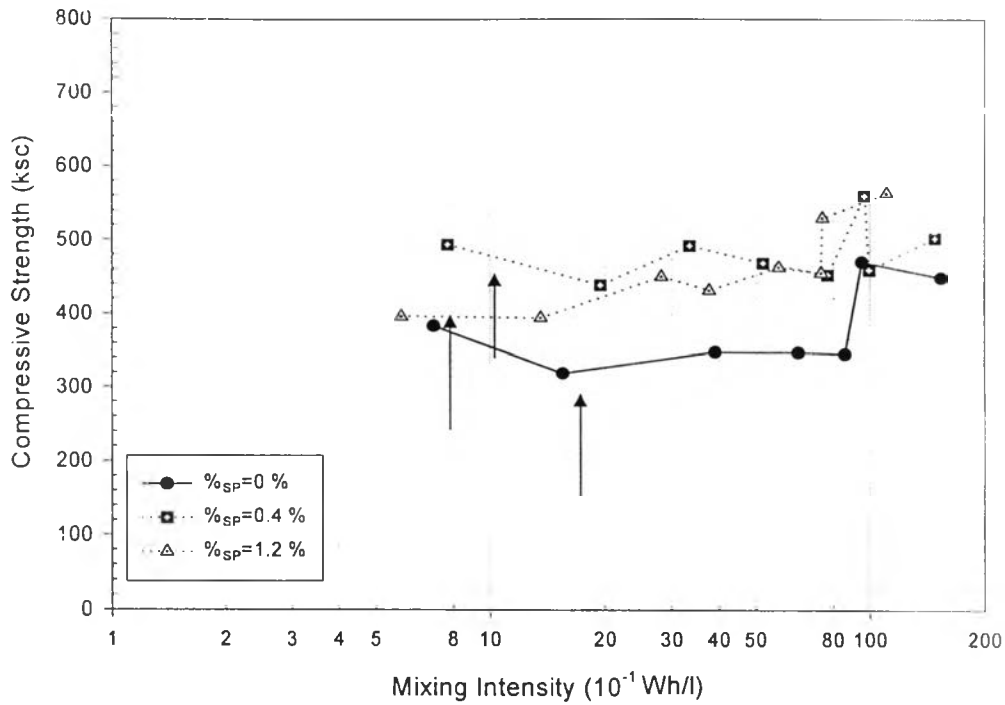


(ก.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและกำลังอัด

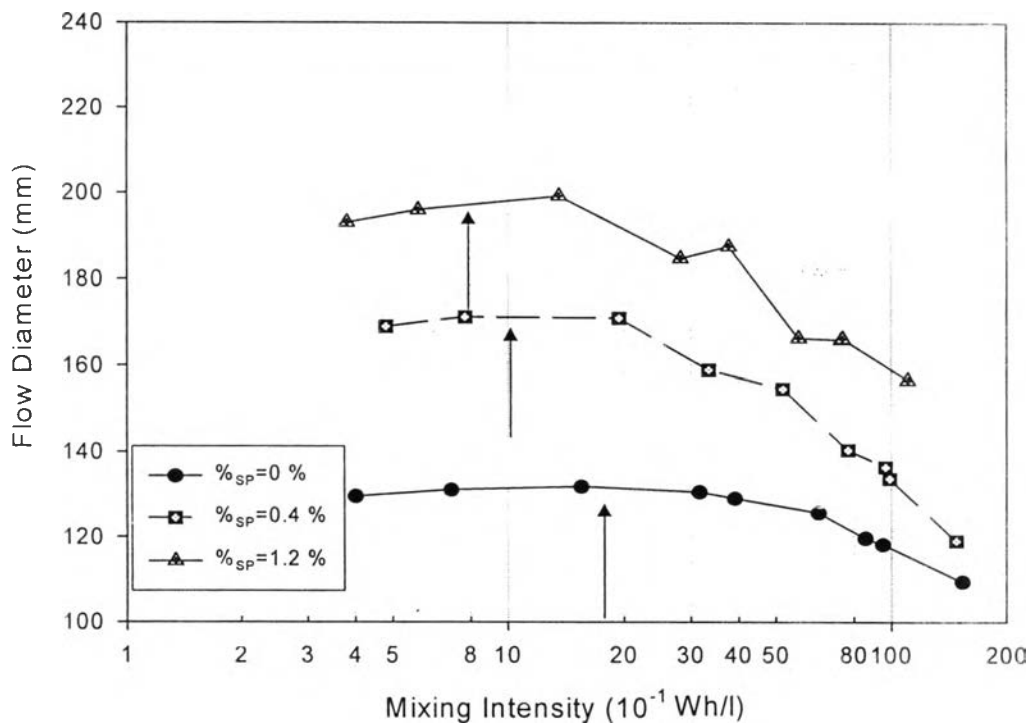


(ข.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและเส้นผ่าศูนย์กลางการไหล

รูปที่ 4.16 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ M2 (ลูกศรแสดงค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.16)

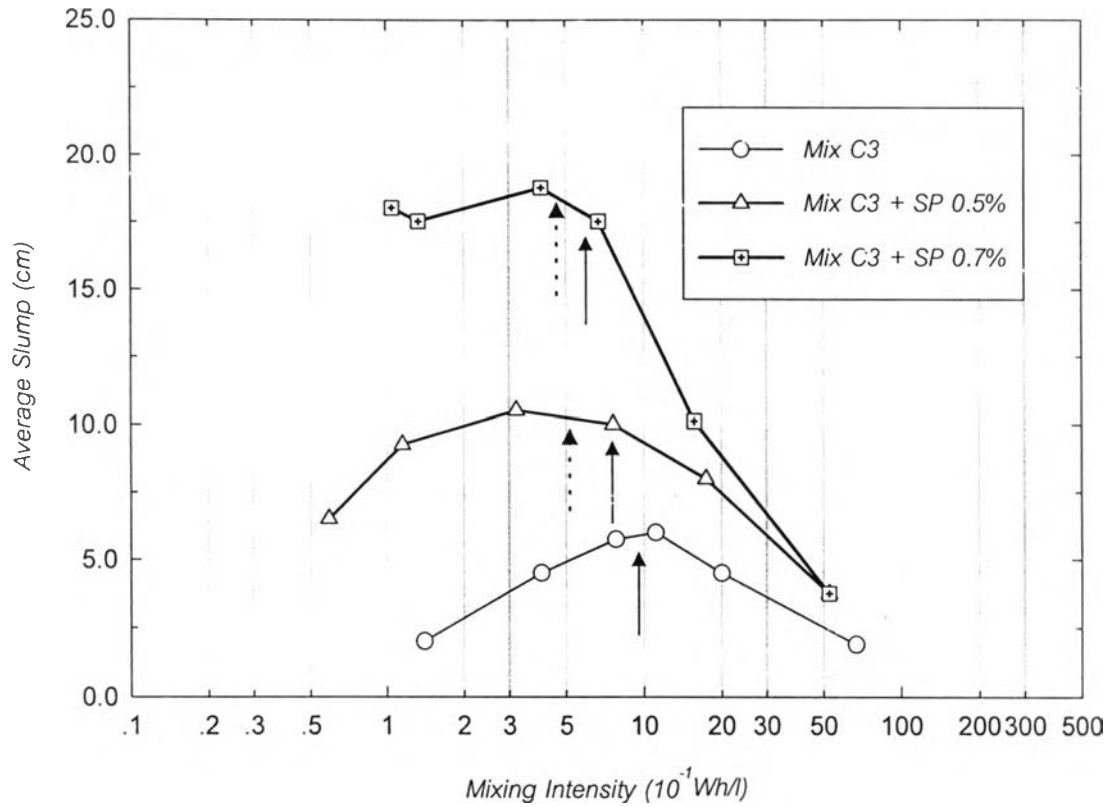


(ก.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและกำลังอัด



(ข.) ค่าระดับความเข้มของการผสมและเส้นผ่าศูนย์กลางการไหล

รูปที่ 4.17 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ M4 (ลูกศรแสดงค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.16)



รูปที่ 4.18 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต (ลูกศรที่บ่งชี้ค่าทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมด้วยสมการที่ (4.16) , ลูกศรประแสดงค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมซึ่งประมาณผลของการเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบ =80% ของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์)