

บทที่ 3

พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก



3.1 บทนำ

กระบวนการผสมเป็นการทำให้ส่วนผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่แยกตัวออกจากกัน ส่วนใหญ่การผสมจะใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง โดยปริมาณของเหลวที่แตกต่างกันจะเปลี่ยนสภาพส่วนผสมเป็นสภาวะต่าง ๆ กัน เช่น สภาวะของเหลวซึ่งเป็นสภาวะการไหลอย่างอิสระ หรือ สภาวะที่มีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน เป็นต้น

สำหรับงานคอนกรีต น้ำเป็นตัวการที่จะทำให้ส่วนผสมเกิดแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน รวมเป็นกลุ่มก้อน และเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณน้ำที่แตกต่างกันมีผลให้ส่วนผสมอยู่ในสภาวะที่ต่างกัน ถ้าปริมาณน้ำมีมากเกินไปส่วนผสมจะอยู่ในสภาวะของเหลวและมีโอกาสแยกตัวสูง แต่ถ้าปริมาณน้ำมีน้อยเกินไปก็ไม่สามารถทำให้ส่วนผสมรวมเป็นกลุ่มก้อนและเป็นเนื้อเดียวกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวและส่งผลให้พลังงานการผสมต่างกันได้

Stitmannathum^[1] นิยามพลังงานการผสมไว้ดังนี้ พลังงานการผสมคือพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลาที่ถูกใช้ไปในการผสม และพบว่าพลังงานการผสมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค โดยที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในส่วนผสมหรือปริมาณน้ำอิสระ

ดังนั้นก่อนที่จะพิจารณาพลังงานการผสม ควรทำการศึกษาหลักการของปริมาณน้ำอิสระ โดยปริมาณน้ำอิสระที่แตกต่างกันจะให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและสภาวะการทำงานที่ต่างกัน

3.2 ปริมาณน้ำอิสระ

พบว่าน้ำในส่วนผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก ๆ คือ น้ำในภาคของแข็ง และน้ำในภาคของเหลว น้ำในภาคของแข็งคือปริมาณน้ำที่อยู่ติดกับอนุภาคของแข็งและสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยกันกับอนุภาคของแข็ง ซึ่งประกอบไปด้วย น้ำที่ถูกใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันและน้ำที่ถูกดูดซึม (Absorb) โดยอนุภาคของแข็ง โดยปกติแล้วน้ำส่วนนี้ไม่สามารถถูกขจัดออกได้นอกจากวิธีการระเหย ส่วนน้ำในภาคของเหลวนั้นสามารถพิจารณาแบ่งได้เป็นอีก 2 ส่วน คือน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็ง และปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระ คือ ปริมาณน้ำส่วนที่เหลือจากการถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็ง ซึ่งปริมาณน้ำส่วนนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และส่งผลต่อคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีต โดยที่สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำอิสระและปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็งได้ดังสมการที่ (3.1)^[1]

$$W_{free} = W_{total} - W_{retained} \quad (3.1)$$

โดยที่

W_{free} คือ ปริมาณน้ำอิสระ

W_{total} คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสม

$W_{retained}$ คือ ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ

เมื่อพิจารณา $W_{retained}$ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$W_{retained} = W_{retained,liquid} + W_{retained,solid} \quad (3.2)$$

$$W_{retained} = \gamma_G M_G + \gamma_s M_s + \gamma_p M_p + (\alpha_G - \omega_G) M_G + (\alpha_s - \omega_s) M_s + (\alpha_p - \omega_p) M_p + W_{hyd} \quad (3.3)$$

โดยที่

γ_G คือ สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคหยาบ

γ_s คือ สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย

γ_p คือ สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

W_{hyd} คือ ปริมาณน้ำที่สูญเสียในปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

M_G, M_s, M_p คือ น้ำหนักของอนุภาคหยาบ ทราย และวัสดุผง ตามลำดับ

$\alpha_G, \alpha_s, \alpha_p$ คือ ค่าการดูดซึมของอนุภาคหยาบ ทราย และวัสดุผง ตามลำดับ

$\omega_G, \omega_s, \omega_p$ คือ ปริมาณความชื้นของอนุภาคหยาบ ทราย และวัสดุผง ตามลำดับ

เนื่องจากขนาดอนุภาคของมวลรวมหยาบ ดังนั้นปริมาณน้ำที่จะถูกกักเก็บโดยอนุภาคมวลรวมหยาบมีค่าน้อยมีค่าน้อยมาก จะได้ $\gamma_G = 0$

สำหรับวัสดุผง เนื่องจากผิวอนุภาคจะอยู่ในสถานะแห้งและปริมาณน้ำที่จะถูกดูดซึมมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับค่าการกักเก็บน้ำ จึงทำให้ค่า α_p และ ω_p สามารถตัดทิ้งได้ และในช่วงระยะเวลาการผสมพบว่า ปริมาณน้ำที่จะสูญเสียในปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นมีค่าน้อย ดังนั้น W_{hyd} จึงสามารถตัดทิ้งได้เช่นกัน ด้วยเหตุนี้สมการที่ (3.3) จึงสามารถลดรูปได้ดังนี้

$$W_{retained} = \gamma_s M_s + \gamma_p M_p + (\alpha_G - \omega_G) M_G + (\alpha_s - \omega_s) M_s \quad (3.4)$$

เมื่อมวลรวมอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) สมการที่ (3.4) สามารถลดรูปอีกได้ดังนี้

$$W_{retained} = \gamma_s M_s + \gamma_p M_p \quad (3.5)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของแต่ละวัสดุนั้นสามารถหาได้จากวิธีเซนตริฟิวส์ โดยมีหลักการว่า ที่ค่าความเร่งประมาณ 500 เท่าของค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (500 G) น้ำที่ถูกกักเก็บที่ผิวของอนุภาคของแข็งสามารถหลุดออกไปได้หมด และเมื่อประมาณความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่าความสามารถในการกักเก็บ

และระดับความแรงจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำได้ โดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำจาก ค่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บที่ความแรงเท่ากับแรงโน้มถ่วงโลก (1 G) สำหรับตัวอย่างผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคทราย, แอสลิก (slag) และ ซีเมนต์ ที่ทดสอบโดยวิธีเซนตริฟิวส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1^[1]

สำหรับงานวิจัยนี้จะหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำตามวิธีของ Pongporncharoen^[24] และ Kitticharoenkiat^[25] ซึ่งหาโดยใช้การทดสอบค่ายุบตัวขนาดเล็ก (mini - slump test) โดยมีหลักการว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผสมสามารถคำนวณได้จากค่าปริมาณน้ำต่ำสุดที่เพียงพอให้เริ่มเกิดค่ายุบตัว

สำหรับผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะได้สมการที่ (3.6)

$$Slump = 322.81\left(\frac{w}{c}\right) - 73.35 \quad (3.6)$$

จาสมการที่ (3.6) เมื่อคำนวณย้อนกลับจะคำนวณสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคซีเมนต์ได้ = 22.7%

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมนั้น Kitticharoenkiat^[25] เสนอความสัมพันธ์ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ย้อนกลับของผลการทดลองหาค่ายุบตัวที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ของคอนกรีต ดังนี้

$$\beta'_{agg} = 2 \times 10^{-6} (S_{agg})^{0.9237} \quad (3.7)$$

โดยที่

β'_{agg} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมโดยน้ำหนัก ซึ่งไม่รวมน้ำที่ถูกดูดซึมในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง
 S_{agg} คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม (ตร.ซม./ กก.) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสมมติของมวลรวมที่สมมติว่าเป็นทรงกลมดังสมการที่ (3.8)

$$S_{agg} = \frac{1}{\psi_s \rho_s} S_{s0} \quad (3.8)$$

โดยที่

ρ_s คือ ค่าความด่างจำเพาะของทราย
 $\frac{1}{\psi_s}$ คือ ตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวม
 S_{s0} คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของทรงกลมสมมติของทราย

สำหรับค่าตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหาได้จากสมการที่เสนอโดย Power^[34] ดังนี้

$$\frac{1}{\psi_s} = 1 + 4.44(\mathcal{E} - 0.42) \quad (3.9)$$

โดยที่ \mathcal{E} คือ ปริมาณช่องว่างในมวลรวม

Pongporncharoen^[24] หาปริมาณช่องว่างในสภาวะหลวมของทรายแม่น้ำได้ = 47.40% ซึ่งคำนวณหาค่าตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมได้ = 1.24

สำหรับค่า S_{s0} คำนวณได้จากสมการ

$$S_{s0} = \frac{6}{D'_{av}} \quad (3.10)^{[34]}$$

โดยที่

D'_{av} คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยสมมติ ซึ่งสมการที่ (3.7) และ (3.10) คำนวณมาจากการประมาณค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยสมมติดังนี้

$$D'_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (3.11)$$

เมื่อ

M_i คือ เปอร์เซนต์คั่งค้างของมวลรวมบนตะแกรงขนาด i

D_i คือ ขนาดเฉลี่ยของกลุ่มขนาด i ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$D_i = \frac{l'_i + l''_i}{2} \quad (3.12)$$

โดยที่ l'_i, l''_i คือ ขนาดของช่องเปิดที่เป็นขอบเขตล่างและขอบเขตบนของกลุ่มขนาดลำดับที่ i ตามลำดับ โดยกลุ่มขนาดและค่าขนาดเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มขนาดแสดงในตารางที่ 3.3

3.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค

อนุภาคที่อยู่ใกล้กันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นเสมอ แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นมีหลายชนิดด้วยกัน ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงแรงที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคของแข็ง อันได้แก่ การรวมตัวที่เกิดจากการเผา, ปฏิกิริยาเคมี, การหลอมละลายเข้าด้วยกัน เป็นต้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่จะกล่าวถึงสรุปได้ดังนี้

แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force)

แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลซึ่งอยู่ห่างกันด้วยระยะทางหนึ่ง ซึ่งระยะนี้มีค่ามากเมื่อเทียบกับขนาดมิติของมัน ขนาดของแรงจะลดลงเป็นกำลังสองของระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้น มีค่ามากสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก และมีค่าลดลงจนใกล้ศูนย์อย่างรวดเร็วตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่เพียงแต่ระยะห่างระหว่างอนุภาค ความขรุขระที่ผิวก็ส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคให้ลดลงได้เช่นกัน โดยทั่วไปแล้วอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร ค่าของแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคอื่น เช่น แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากของเหลว (Liquid Bridge Bonding)

แรงสถิตย์ทางไฟฟ้า (Electrostatic force)

แรงสถิตย์ทางไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตย์บนอนุภาคซึ่งส่งผลให้อนุภาคเกิดแรงดึงดูดหรือแรงผลักซึ่งกันและกัน แรงนี้จะเกี่ยวข้องกับอนุภาคของแข็ง และความขรุขระที่ผิว โดยเฉพาะที่ขอบและมุม อย่างไรก็ตาม กรณีนี้ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม และอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร แรงนี้จะตัดทิ้งได้ แต่สำหรับกรณีมีสารเคมีผสมเพิ่มนั้น แรงนี้ไม่สามารถตัดทิ้งได้

แรงเนื่องจากพันธะเคมี (Chemical bonding force)

แรงเนื่องจากพันธะเคมีอาจเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอนุภาค หรือโดยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งโดยปกติแล้วในขณะผสมคอนกรีต แรงนี้มักจะไม่มีจึงตัดทิ้งได้

แรงเสียดทานและแรงขัดกัน (Friction and interlocking force)

แรงเสียดทานและแรงขัดกันจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ แรงเสียดทานและแรงขัดกันจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อความขรุขระที่ผิวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สำหรับงานคอนกรีต จะมีความชื้นเกี่ยวข้อง เป็นผลให้ไม่ค่อยมีผลของแรงเสียดทานและแรงขัดกัน เนื่องจากจากความชื้นจะเป็นตัวหล่อลื่นลดขนาดของแรงดังกล่าว

แรงเนื่องจากพันธะแม่เหล็ก (Magnetic bonding force)

แรงเนื่องจากพันธะแม่เหล็กจะส่งผลที่สำคัญเฉพาะอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นเหล็ก ซึ่งสำหรับอนุภาคที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นเหล็กแล้วสามารถตัดทิ้งได้

แรงเนื่องจากความชื้น (Bonding force due to moisture)

สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก เช่น อนุภาคซีเมนต์ แรงเนื่องจากความชื้นจะเป็นแรงสำคัญที่มีผลทำให้อนุภาคยึดติดกัน โดยStitmannathum^[1] เสนอแบบจำลองอธิบายผลของแรงยึดเหนี่ยวจากความชื้นซึ่งเป็นผลทำให้เกิดพันธะสะพานของเหลว (Liquid Bridge Bonding) ดังนี้

$$H = H_K + H_R \quad (3.13)$$

โดยที่

H คือ แรงยึดเหนี่ยวรวมทั้งหมดเนื่องจากพันธะสะพานของเหลว

H_K คือ แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากความบกพร่องของแรงดัน (pressure deficiency)

H_R คือ แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำ

เมื่อกำหนดให้อยู่ในรูปไร้มิติจะได้

$$F = \frac{H}{d \cdot T} \quad (3.14)$$

$$F_{HK} = \frac{H_{HK}}{d \cdot T} \quad (3.15)$$

$$F_{HR} = \frac{H_{HR}}{d \cdot T} \quad (3.16)$$

เมื่อ

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

T คือ แรงตึงผิวของน้ำ

แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากความบกพร่องของแรงดันและแรงตึงผิวของน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_{HK} = \frac{\pi}{4} \cdot d \cdot \sin^2 \alpha \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.17)$$

$$F_{HR} = \pi \cdot \sin \alpha \cdot \sin(\alpha + \delta) \quad (3.18)$$

โดยที่

$$R_1 = \frac{\left(\frac{d}{2}\right) \cdot (1 - \cos \alpha) + \left(\frac{a}{2}\right)}{\cos(\alpha + \delta)} \quad (3.19)$$

$$R_2 = \frac{d}{2} \cdot \sin \alpha + R_1 [\sin(\alpha + \delta) - 1] \quad (3.20)$$

เมื่อ

α = มุมเซ็กเตอร์ (Sector angle)

R_1 = รัศมีความโค้งเนื่องจากความบกพร่องของแรงดัน

R_2 = รัศมีความโค้งเนื่องจากแรงดึงผิวของของเหลว

δ = มุมสัมผัส (Contact Angle)

a = ระยะห่างระหว่าง 2 อนุภาค

พิจารณาสมการ (3.17) และ (3.18) จะเห็นได้ว่า ถ้าระยะห่างระหว่างอนุภาคมากขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง กำหนดให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลงจนเป็นศูนย์ที่ระยะห่างระหว่างอนุภาค (a) มีค่าเท่ากับ 10 เปรอ์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (0.1d) สามารถคำนวณย้อนกลับหาค่ามุม α ได้เท่ากับ 11.3° ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และโดยสมมติฐานที่ว่าอนุภาคทรงกลมทั้งหมดอยู่ในสภาวะเปียก ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่ามุม δ เท่ากับ 0°

Stitmannaitum^[1] เสนอแบบจำลองซึ่งพิจารณาควบคู่กับรูปร่างการจัดเรียงตัว (Contact Geometry) เพื่ออธิบายหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสม (ในกรณีนี้คือซีเมนต์เฟส) ดังนี้

$$\sigma_z = \frac{9(1-\varepsilon)}{8\pi d^2} kH \quad (3.21)$$

$$\sigma_{z,partial} = S\sigma_z \quad (3.22)$$

โดยที่

σ_z คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสม (ในกรณีนี้คือซีเมนต์เฟส)

$\sigma_{z,partial}$ คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวกรณีที่มีความชื้นบางส่วน

ε คือ สัดส่วนปริมาตรช่องว่าง (Void Volume fraction)

k คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชัน (co-ordination number)

H คือ แรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยที่จุดสัมผัส

d คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

S คือ ระดับขั้นการอิ่มตัวของช่องว่าง (degree of saturation of void)

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันและสัดส่วนปริมาตรช่องว่างนั้น Gray^[26] เสนอความสัมพันธ์ดังนี้

$$k\varepsilon \cong 3.1 \cong \pi \quad (3.23)$$

3.3.1 สมมติฐานสำหรับแบบจำลองหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวรวมของซีเมนต์เฟส

Stitmannaitum^[1] เสนอแบบจำลองหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวรวมของซีเมนต์เฟส โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. เมื่อปริมาณน้ำมีค่าน้อยกว่าปริมาณน้ำที่เพียงพอจะทำให้อนุภาคซีเมนต์อิมมัตว อนุภาคส่วนใหญ่ยังคงติดกัน ด้วยเหตุนี้จึงสมมติให้กรณีนี้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์
2. ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชัน (co-ordination number) จะมีค่าต่ำสุดในกรณีสภาวะแห้งและมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณน้ำเท่ากับสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์
3. กรณีที่ปริมาณน้ำมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์นั้น จะสมมติให้รูปร่างการจัดเรียงตัวของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันจะมีค่าคงที่ และมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดที่ปริมาณน้ำเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ โดยปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อระยะห่างระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น

จากสมมติฐานที่ 2 จะเขียนความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันดังนี้

$$k_{\min} = \frac{\pi\rho}{\rho - W_u} \quad (3.24)$$

$$k_{\max} = \frac{\pi}{w_s} \left(w_s + \frac{1}{\rho} \right) \quad (3.25)$$

Stitmannaitum ^[1] แนะนำ ให้ประมาณค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นได้ว่า

$$k = k_{\min} + w \left(\frac{k_{\max} - k_{\min}}{w_s} \right) \quad (3.26)$$

โดยที่

k_{\min} คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันต่ำสุด (สำหรับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองคำนวณได้ = 4.83 โดยที่รายละเอียดการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข.)

k_{\max} คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุด (สำหรับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองคำนวณได้ = 7.54 โดยที่รายละเอียดการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข.)

W_u คือ หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ของอนุภาคของแข็ง

w_s คือ ปริมาณน้ำที่เพียงพอจะทำให้อนุภาคอิมมัตวซึ่งมีค่าเท่ากับ สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

ρ คือ ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

w คือ ปริมาณน้ำ

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า เมื่อปริมาณน้ำน้อยกว่าปริมาณน้ำอิมมัตว จะสมมติให้อนุภาคอยู่ติดกัน มีระยะห่างระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะเป็นผลจากความชื้นเพียงอย่างเดียว ดังสมการที่ (3.21) และ (3.22) ทำนองกลับกัน ที่ปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำอิมมัตว จะส่งผลให้ระยะห่าง

ระหว่างอนุภาคและสัดส่วนช่องว่างเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง ดังแสดงในสมการที่ (3.17) สำหรับระยะห่างระหว่างอนุภาคและสัดส่วนช่องว่างที่เพิ่มขึ้นนั้น เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ที่สภาวะอิ่มตัว คือ $w = w_s$ ปริมาตรของทั้งหมดคือ

$$V_{ms} = V_{ss} + V_{vs} \quad (3.27)$$

$$V_{vs} = V_{ss} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right) \quad (3.28)$$

แทนค่า สมการที่ (3.23) และ (3.28) ในสมการที่ (3.27) จะได้

$$V_{ms} = V_{ss} \left(1 + \frac{\pi}{k_{\max} - \pi} \right) \quad (3.29)$$

โดยที่

V_{ms} คือ ปริมาตรทั้งหมดที่สภาวะอิ่มตัว

V_{ss} คือ ปริมาตรของแข็งที่สภาวะอิ่มตัว

V_{vs} คือ ปริมาตรช่องว่างที่สภาวะอิ่มตัว

ในกรณีที่ปริมาณน้ำในส่วนผลสมสูงกว่าปริมาณน้ำที่เพียงพอจะทำให้อนุภาคอิ่มตัว จะส่งผลให้เกิดปริมาณน้ำส่วนเกิน ซึ่งทำให้ปริมาตรช่องว่างโดยรวมมากขึ้น เมื่อไม่คำนึงถึงผลของปริมาตรอากาศจะได้

$$\Delta V_w = \Delta V_m = \Delta V_v \quad (3.30)$$

เมื่อ

ΔV_w คือ ปริมาตรน้ำส่วนเกินจากปริมาณที่จะกักเก็บได้โดยอนุภาคของแข็ง

ΔV_m คือ ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของส่วนผลสมเนื่องจาก ΔV_w

ΔV_v คือ ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของช่องว่างเนื่องจาก ΔV_w

จากสมมติฐานที่ว่า ปริมาณน้ำกระจายสม่ำเสมอทั้งส่วนผลสม ดังนั้นระยะห่างระหว่างอนุภาคและสัดส่วนช่องว่างที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำส่วนเกินสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$a = 2 \left(\frac{\Delta V_w}{SSB_t} \right) \quad (3.31)$$

$$\varepsilon = \frac{V_{vs} + \Delta V_w}{V_{ms} + \Delta V_w} \quad (3.32)$$

โดยที่

SSB_i คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคของแข็ง

จากสมการที่ (3.31) ถ้ากำหนดให้ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคเท่ากับ $0.1d$ แล้ว จะหาปริมาณน้ำสูงสุดที่ทำให้อนุภาคห่างกัน $0.1d$ ได้ดังนี้

$$w_{\max} = w_s + \left(\frac{SSB_i \cdot (d/20)}{M} \right) \quad (3.33)$$

เมื่อ M คือ น้ำหนักอนุภาคของแข็งในสภาวะแห้ง

จากสมการที่ (3.33) คำนวณหา $\left(\frac{w}{c}\right)_{\max} = 0.32$ สำหรับ $\frac{w}{c}$ ที่สูงกว่าค่านี้นั้น ให้พิจารณาว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ ดังนั้นพลังงานการผสมจึงมีค่าเท่ากับพลังงานการผสมในสภาวะแห้ง

3.4 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

3.4.1 พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

พลังงานการผสมคือ พลังงานไฟฟ้าในขณะผสมที่เพิ่มขึ้นจากพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนไม่เปล่า และเพื่อขจัดผลของชนิดเครื่องผสมและเปรียบเทียบกับพลังงานการผสมในสภาวะแห้งได้ง่าย จึงถูกทำไว้หน่วยด้วยพลังงานการผสมในสภาวะแห้ง และถูกเรียกว่า ค่าตัวคูณพลังงาน (Energy Factor) ดังนี้

$$Q = \frac{E_w}{E_s} \quad (3.34)$$

โดยที่

E_w คือ พลังงานการผสมในสภาวะเปียก (Wh/l-min)

E_s คือ พลังงานการผสมในสภาวะแห้ง (Wh/l-min)

ถ้ากำหนดให้ พลังงานที่ใช้ในการผสมประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนอนุภาคของแข็ง (เป็นพลังงานที่ใช้ในการเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค) และที่ใช้ในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากพันธะของเหลวแล้ว จะเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E_{wm} = E_s + E_w \quad (3.35)$$

เมื่อเขียนในรูปค่าตัวประกอบพลังงาน (Energy Factor, Q)

$$Q = \frac{E_{wm}}{E_s} = 1 + \frac{E_w}{E_s} \quad (3.36)$$

โดยที่

E_{wm} คือ พลังงานการผสมระหว่างอนุภาคของแข็งกับน้ำ

E_s คือ พลังงานการผสมของอนุภาคของแข็งในสภาวะแห้ง

E_w คือ พลังงานการผสมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของพันธะของเหลว

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานการผสมในสภาวะเปียกนั้นเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคซึ่งอธิบายได้ว่า ซีเมนต์ในสภาวะแห้งเมื่อถูกเติมน้ำลงไปปริมาณน้อย ๆ พลังงานการผสมจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพลังงานการผสมนี้เชื่อว่าเป็นผลจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มสูงสุดที่ปริมาณน้ำค่าหนึ่ง หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำต่อไปพลังงานการผสมจะลดลง ซึ่งเป็นผลจากระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณน้ำสูงมาก ๆ พลังงานการผสมมีแนวโน้มคงที่ไม่ลดลงอีก ทั้งนี้เป็นเพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคหมดไป

จากผลการศึกษาของ Stitmannaitum^[1] ซึ่งทำการทดลองโดยใช้เครื่องผสมชนิดกระทะ (Pan Type Mixer) พบว่า หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสัมพันธ์กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสม ดังนี้ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากพันธะของเหลวจะส่งผลต่อแรงต้านที่กระทำบนใบพายผสม (Mixing Blade) ซึ่งคำนวณได้จากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมและมุมเอียงของใบพาย โดยที่สมมติให้ปริมาตรการผสมไม่มีผลต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสม ดังนั้นแรงต้านที่กระทำต่อใบพายจึงคงที่ที่ทุกปริมาตรการผสม^[1]

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.4 พบว่า แรงที่กระทำบนใบพาย เป็นดังนี้

แรงที่กระทำบนใบพายในทิศทางของแรงเฉือน (Shear Force)

$$S_i = \frac{\sigma}{2} \sin(180 - 2\omega_i) A_i = \frac{\sigma}{2} \sin(2\omega_i) A_i \quad (3.37)$$

แรงที่กระทำบนใบพายในทิศทางของแรงตั้งฉาก (Normal Force)

$$N_i = \frac{\sigma}{2} (1 - \cos(180 - 2\omega_i)) A_i = \frac{\sigma}{2} (1 + \cos(2\omega_i)) A_i \quad (3.38)$$

โดยที่

S_i คือ แรงเฉือนที่กระทำบนใบพาย i

N_i คือ แรงตั้งฉากที่กระทำบนใบพาย i

A_i คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างใบพาย i และส่วนผสม

ω_i คือ มุมเอียงของใบพาย i จากแนวตั้ง

σ คือ หน่วยแรงยืดหยุ่นของส่วนผสม

สำหรับแรงบิดจากเครื่องผสมเพื่อที่จะเคลื่อนใบพาย คือ

$$T_i = \sum_{j=1}^2 (S_{ij} + N_{ij}) l_{ij} \quad (3.39)$$

เมื่อ l_{ij} คือ ความยาวแขนของใบพาย i

สำหรับแรงเฉือนและแรงดัดฉากที่สัมพันธ์กับแต่ละความยาวแขนเป็นดังนี้

$$S_{ij} = \frac{\sigma}{2} \sin(2\omega_i) A_i \varphi_{ij} \quad (3.40)$$

$$N_{ij} = \frac{\sigma}{2} (1 + \cos(2\omega_i)) A_i \vartheta_{ij} \quad (3.41)$$

โดยที่

i คือ ใบพายที่ i

j คือ ความยาวแขนหลักและความยาวแขนรอง

φ_{ij} คือ ค่าการกระจายแรง (Force Distribution Factor) ของแรงเฉือนซึ่งขึ้นกับลักษณะของใบพาย

ϑ_{ij} คือ ค่าการกระจายแรง (Force Distribution Factor) ของแรงดัดฉากซึ่งขึ้นกับลักษณะของใบพาย
ดังนั้นแรงบิดเพื่อจะเอาชนะแรงต้านจากส่วนผสมทั้งหมดจึงเป็น

$$T = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (S_{ij} + N_{ij}) l_{ij} \quad (3.42)$$

เมื่อความเร็วรอบของเครื่องผสมคือ Ω จะคำนวณหาทั้งหมดจากแรงบิดได้ดังนี้

$$P = T\Omega \quad (3.43)$$

โดยที่

P คือ งานจากแรงบิด มีหน่วยเป็น N – m / sec

Ω คือ ความเร็วรอบของเครื่องผสม

งานจากแรงบิดสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมดังนี้ $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ N – m / sec}$

สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ พลังงานการผสมคือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมต่อหน่วยเวลา จากสมการที่ (3.37) – (3.43) จะเห็นได้ว่า พลังงานการผสมจะสัมพันธ์กับหน่วยแรงยืดหยุ่นระหว่างอนุภาคดังนี้

$$E_w = K' \sigma_z \quad (3.44)$$

โดยที่

E_w คือ พลังงานการผสมในสถานะเปียก

K' คือ ค่าตัวประกอบที่ใช้สำหรับปรับเปลี่ยนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นพลังงานการผสม ดังนั้น K' จึงมีหน่วยเป็น $(Wh/l \cdot \min)/(N/cm^2)$

สำหรับผลการวิเคราะห์หาค่า K' ของเครื่องผสมชนิดกระทะดังรูปที่ 3.5 จากรูปที่ 3.5 พบว่า ภายใต้อัตราความเชื่อมั่น 92% จะสามารถประมาณค่า K' ด้วยค่าคงที่ ซึ่งอธิบายได้ว่า เป็นเพราะใบพายสัมผัสกับส่วนผสมตลอดทั้งหน้าตัดของใบพาย และใบพายเคลื่อนที่รอบแกนหลักเพียงอย่างเดียว จากการวิเคราะห์ถดถอย ผลการทดลองของ Stitmannathum^[1] ได้ค่า $K' = 0.148 (Wh/l \cdot \min)/(N/cm^2)$ (ดังรูปที่ 3.5)

สำหรับเครื่องผสมชนิดใบพาย (Paddle Type Mixer) ซึ่งมีลักษณะและการเคลื่อนที่ของใบพายที่ต่างจากเครื่องผสมชนิดกระทะ กล่าวคือ ใบพายเคลื่อนที่รอบแกนหลักและรอบตัวเอง อีกทั้งการสัมผัสระหว่างใบพายและส่วนผสมไม่เกิดขึ้นตลอดทั้งหน้าตัดของใบพาย ดังนั้นค่า K' ของเครื่องผสมชนิดใบพายจึงไม่เป็นค่าคงที่ จากการวิเคราะห์หย้อนกลับ พบว่า ภายใต้อัตราสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) = 0.93 สามารถประมาณค่า K' ได้ด้วยสมการพหุนามกำลังสอง ดังนี้ (ดังรูปที่ 3.6)

$$K' = 22.48(w/c)^2 - 5.10(w/c) + 0.65 \quad (3.45)$$

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6 จะพบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ ค่าตัวประกอบ K' มีค่าคงที่ และค่าตัวประกอบ K' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำมากหรือน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์แตกต่างกัน คือ ซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ ซีเมนต์เพสต์ส่วนใหญ่ไม่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและเนื้อเดียวกัน ในขณะที่ ซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ ซีเมนต์เพสต์จะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและจะอยู่ในสถานะพลาสติก ด้วยเหตุนี้ จึงประมาณค่าตัวประกอบ K' ด้วยสมการเชิงเส้นคู่ (Bi-linear) (ดังแสดงในรูปที่ 3.6) ดังนี้

$$K' = 0.466 \quad ; w/c \leq 0.23 \quad (3.46)$$

$$K' = 8.82(w/c) - 1.53 \quad ; w/c \geq 0.23 \quad (3.47)$$

สำหรับค่าตัวประกอบ K' ที่จะใช้ในการคำนวณขั้นต่อไปคือค่าตัวประกอบ K' จากสมการที่ (3.46) และ (3.47) ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำมากหรือน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์แตกต่างกันดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตาม ทั้งการประมาณค่าตัวประกอบ K' ด้วยสมการพหุนามกำลังสองและสมการเชิงเส้นคู่ให้ผลการคำนวณพลังงานการผสมแทบไม่ต่างกันที่ปริมาณน้ำมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ ในขณะที่กรณีปริมาณน้ำต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำให้ผลการคำนวณพลังงานการผสมต่างกันเล็กน้อยดังรูปที่ 3.10

3.4.2 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

Stitmannathum ^[1] เสนอแบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของส่วนผสมที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก โดยพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ ส่วนผสมที่มีวัสดุผงในปริมาณสูง และในปริมาณต่ำ โดยค่าวิกฤตที่จะแบ่งช่วงดังกล่าวคือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผงต่ออนุภาคทั้งหมดเท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นปริมาณซีเมนต์ที่มากเพียงพอจะทำให้อนุภาคมวลรวมห่างกันเป็นระยะ 10% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมวลรวม

3.4.2.1 ส่วนผสมที่มีวัสดุผงในปริมาณสูง

กรณีนี้จะพิจารณาให้วัสดุผงเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ส่วนอนุภาคที่หยากกว่าให้พิจารณาว่ามีผลน้อยและสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นการเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เป็นผลจากปริมาณน้ำอิสระนั้นจึงสมมติว่าส่งผลต่อวัสดุผงเพียงอย่างเดียว

กำหนดให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงประสิทธิภาพ (Effective water to powder ratio, $(w/p)_{eff}$) แทนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนี้

$$\left(\frac{w}{p}\right)_{eff} = \frac{W_{total} - \Delta W}{M_p} \quad (3.48)$$

โดยที่

W_{total} คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสม

ΔW คือ ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็งอื่น ๆ ที่ไม่ใช่วัสดุผง

M_p คือน้ำหนักของวัสดุผงในส่วนผสม

ด้วยเหตุที่ไม่คิดผลของมวลรวมละเอียดที่มีต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ดังนั้น ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เพียงพอจะทำให้อนุภาคอิมิตัวนั้น และปริมาณน้ำสูงสุดที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคหมดไป ยังคงใช้ค่าจากวัสดุผง คือ

$$\left(\frac{w}{p}\right)_{eff,s} = \left(\frac{w}{p}\right)_s = \gamma_p \quad (3.49)$$

$$\left(\frac{w}{p}\right)_{eff,max} = \left(\frac{w}{p}\right)_{max} \quad (3.50)$$

โดยที่

$\left(\frac{w}{p}\right)_{eff}$ คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงประสิทธิภาพ

γ_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

สำหรับค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยและค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุดนั้น ให้พิจารณาจากวัสดุผงซึ่งถือว่าเป็นตัวแทนของส่วนผสม

3.4.2.2 ส่วนผสมที่มีวัสดุผงในปริมาณต่ำ

เนื่องจากมีอนุภาคยาบซึ่งในกรณีนี้คือทรายมีปริมาณมาก ดังนั้นอนุภาคยาบจึงมีผลค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้จึงพิจารณาผลของทั้งทรายและวัสดุผงร่วมกัน ดังนี้

$$V_{ws} = \gamma_s M_s + \gamma_p M_p \quad (3.51)$$

โดยที่

V_{ws} คือ ปริมาณน้ำที่จะทำให้อนุภาคของแข็งอัดตัว

M_s คือ น้ำหนักของทรายในส่วนผสม

สำหรับค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยนั้น จะคำนวณโดยใช้สูตรของ Power^[34] โดยพิจารณาว่าวัสดุผงเป็นเพียงขนาด 1 ขนาดและใช้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุผงที่ได้จากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบเลน สำหรับสูตรของ Power คือ

$$d_{av} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i d_i^{-3}} \right)^{1/3} \quad (3.52)$$

โดยที่

p_i คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งของกลุ่มขนาดที่ i

d_i คือ $(2/3)$ ของขนาดช่องเปิดของตะแกรงที่อยู่เหนือตะแกรง i หรือค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุผง

Stitmannaitum^[1] เสนอให้ใช้ทรายเป็นตัวแทนในการคำนวณค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันต่ำสุดและพื้นที่ผิวของส่วนผสม ดังนั้นจะได้

$$k_{\min} = \frac{\pi \rho_s}{\rho_s - W_{us}} \quad (3.53)$$

$$SSB_t = \frac{6}{\rho d_{av}} \quad (3.54)$$

เมื่อ

ρ_s คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย

W_{us} คือ ค่าน้ำหนักของทราย

3.5 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ของเครื่องผสมชนิดกระแทกดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากรูปที่ 3.7 พบว่า ค่าทำนายจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ปริมาณน้ำสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก ส่วนผสมสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ในขณะที่กรณีปริมาณน้ำต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์นั้น ค่าทำนายจะให้ผลที่ต่างกับผลการทดลอง โดยมีทั้งที่สูงและต่ำกว่าจากผลการทดลอง อย่างไรก็ตาม ในงานคอนกรีตจะไม่นิยมใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ สำหรับผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและการทดลองที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ โดยมีสัดส่วนผสมดังตารางที่ 3.3 แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 และ 3.9

ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดใบพาย แสดงในรูปที่ 3.10 จากรูปที่ 3.10 พบว่า ค่าทำนายจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ปริมาณน้ำสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับกรณีเครื่องผสมชนิดกระแทก

สำหรับรูปที่ 3.11 จะเป็นผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดต่าง ๆ

3.6 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมายนั้น พลังงานการผสมจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกิดจากพันธะของเหลว แต่สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมายนั้น พบว่า สารลดน้ำอย่างมากมีผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง ซึ่งสาเหตุที่ลดลงนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกันคือการลดลงของค่าแรงตึงผิวของน้ำ และผลเนื่องจากแรงผลักรังสีไฟฟ้าจากสารลดน้ำอย่างมากโดยตรง

3.6.1 ปัจจัยเนื่องจากการลดลงของค่าแรงตึงผิวของน้ำ

ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมายนั้น จะมีค่าแรงตึงผิวของน้ำคงที่ ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมายนั้นพบว่าแรงตึงผิวของน้ำจะมีแนวโน้มลดลง Rosen^[27] อธิบายการลดลงของแรงตึงผิวไว้ดังนี้

พิจารณาสมการที่ (3.54)

$$\gamma = \gamma_a + \gamma_b - 2\gamma_{ab} \quad (3.55)$$

โดยที่

γ_a คือ พลังงานอิสระที่ผิวต่อหน่วยพื้นที่ของของเหลว a (แรงตึงผิวของของเหลว a)

γ_b คือ พลังงานอิสระที่ผิวต่อหน่วยพื้นที่ของของเหลว b (แรงตึงผิวของของเหลว b)

γ_{ab} คือ พลังงานปฏิกิริยา a-b ต่อหน่วยพื้นที่ตรงรอยต่อระหว่างของเหลว a และ b

ค่าของ γ_{ab} จะสูงเมื่อลักษณะความเป็นขั้วของของเหลว a และ b เหมือนกัน

ให้ของเหลว b เป็นอากาศ จะได้ว่า $\gamma_b = \gamma_{ab} = 0$ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของกรณีที่มีสารลดน้ำอย่างมาก พบว่าโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างมากจะจัดเรียงตัว โดยหันส่วนหัวซึ่งเป็นด้านที่เป็นขั้วไปทางด้านน้ำ และหันส่วนหางที่ไม่เป็นขั้วเข้าสู่อากาศ^[27] ด้วยเหตุนี้เอง ค่า γ_{ab} จะมีค่าสูง เนื่องจากความมีขั้วของทั้งสารลดน้ำอย่างมากและน้ำ จากสมการที่ (3.55) จะพบว่า แรงตึงผิวของน้ำจะมีค่าลดลง สำหรับผลการทดลองหาค่าแรงตึงผิวของน้ำที่มีสารลดน้ำอย่างมากชนิดเบสเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (ชื่อทางการค้าของผลิตภัณฑ์คือ Sikament FF) ด้วยเครื่องมือ Du Nuoy Ring Tensiometer เป็นดังรูปที่ 3.12

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.12 จะพบว่า แรงตึงผิวของน้ำมีค่าลดลงไม่มากนักคือประมาณ 15% ซึ่งส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม Aitcin,P.C.^[28] สรุปว่า การลดลงของแรงตึงผิวนั้นไม่เป็นนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแรงผลักรังสีทางไฟฟ้าที่เกิดจากสารลดน้ำอย่างมากดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์และทำให้อนุภาคซีเมนต์เกิดประจุชนิดเดียวกัน ซึ่งประจุชนิดเดียวกันจะออกแรงผลักรังสีกันและกัน ด้วยเหตุนี้จึงไม่พิจารณาการลดลงของแรงตึงผิวของน้ำ

3.6.2 ปัจจัยเนื่องจากแรงผลักรังสีทางไฟฟ้าจากสารลดน้ำอย่างมาก

สารลดน้ำอย่างมากจัดเป็นสารกระจายตัว (Dispersing agent) ที่มีคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิวของน้ำและช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค รวมทั้งมีส่วนช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคด้วย สำหรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่ลดลงนั้น Uchikawa^[29,30] สรุปว่าเป็นเพราะแรงผลักรังสี 2 ชนิดคือ

1. แรงผลักรังสีทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsive force) แรงนี้เกิดจากค่าศักย์ที่ผิวของอนุภาคซีเมนต์พิจารณารูปที่ 3.13 ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่ออนุภาคซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะมีโอกาสเกิดประจุชั้นที่ผิวอนุภาค โดยประจุที่เกิดขึ้นจะเป็นบวกเล็กน้อย ซึ่งแทบไม่มีผลต่อการกระจายตัว แต่กรณีที่มีสารลดน้ำอย่างมาก พบว่า อนุภาคสารลดน้ำอย่างมากจะหันด้านที่มีขั้วลบซึ่งเป็นส่วนหางของสารลดน้ำอย่างมากไปยังผิวอนุภาคซีเมนต์และจะดูดติดหนาแน่นด้วยความหนาในระดับโมเลกุล ชั้นนี้จะถูกเรียกว่าชั้นสเตอริน (Stern layer) และเนื่องจากการที่มีประจุลบจึงส่งผลให้ต้องมีประจุบวกเพื่อจะทำให้สมดุล ดังนั้นประจุบวกที่กระจายอยู่ในสารละลายจะมาดูดติดกันอีกชั้น ชั้นนี้จะถูกเรียกว่าชั้นแพร่ (Diffuse layer) การเกิดของชั้นสเตอรินและชั้นแพร่จะเรียกรวมว่าชั้นดับเบิลเลเยอร์ทางไฟฟ้า (Electrical double layer)^[31] การดูดติดของสารลดน้ำอย่างมากบนผิวอนุภาคซีเมนต์ ส่งผลให้ค่าศักย์ที่ผิวซึ่งเป็นลบมีค่าสูงขึ้น (ค่าสัมบูรณ์) และทำให้เกิดแรงผลักรังสีทางไฟฟ้า แรงนี้สามารถคำนวณได้จากการวัดค่าศักย์เซต้า (Zeta potential) ของสารละลายสารลดน้ำอย่างมากกับซีเมนต์

2. แรงผลักรังสีสเตอริก (Steric repulsive force) แรงนี้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างชั้นที่ดูดติดกันเองของสารลดน้ำอย่างมากบนอนุภาคซีเมนต์ แรงนี้เป็นผลทางเคมีของสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในสารลดน้ำอย่างมาก

Uchikawa Hanehara และ Sawaki^[30] กล่าวว่า แรงผลักรวมจะมีค่ามากสำหรับสารลดน้ำอย่างมากที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate base) ซึ่งสารประกอบหลักเป็นกรดอะคริลิก (Acrylic acid) แต่กรณีที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นเมลามีนหรือเนฟทาซีนฟอรัลดีไฮด์คอนเดนเสทจะมีผลเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 3.14ก. และ 3.14ข. แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมากชนิดเมลามีนและเนฟทาซีนฟอรัลดีไฮด์คอนเดนเสทตามลำดับ) สำหรับสาเหตุนี้ Uchikawa Hanehara และ Sawaki^[30] สรุปว่าเป็นเพราะสารลดน้ำอย่างมากชนิดที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นเมลามีนและเนฟทาซีนฟอรัลดีไฮด์คอนเดนเสทนั้น ประกอบด้วยกลุ่มของ SO_4^{2-} ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นประจุลบและส่งผลให้ค่าศักย์เซต้ามีค่าสูง (ค่าสัมบูรณ์) ในขณะที่สารลดน้ำอย่างมากชนิดที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นอะคริลิกนั้นจะประกอบด้วยกลุ่มของคาร์บอกซิล (Carboxyl group) ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีประจุลบเพียงเล็กน้อย และที่สำคัญคือโครงสร้างโมเลกุลเป็นลักษณะโซ่ตรงยาวของอะตอมคาร์บอนและมีโซ่แตกแขนงไปด้านข้าง (ดังแสดงในรูปที่ 3.14ค.) การแตกแขนงของโซ่ด้านข้างส่งผลให้เกิดชั้นที่มีความหนาแน่นสูงเหลื่อมล้ำกันที่ผิวของอนุภาคซีเมนต์ การเหลื่อมล้ำกันส่งผลให้เกิดแรงผลักรวม

พิจารณารูปที่ 3.13 อนุภาคซีเมนต์ซึ่งถูกแขวนลอยอยู่ในน้ำที่ประกอบด้วยสารผสมเพิ่มนั้นจะเกิดเป็นชั้นสเตอร์น (Stern layer) ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดจากการดูดติดของสารผสมเพิ่มบนอนุภาคซีเมนต์ และชั้นแพร่ (Diffuse layer) เป็นชั้นที่อยู่ด้านนอกของชั้นสเตอร์น ซึ่งมีความเข้มข้นของประจุที่เครื่องหมายตรงข้ามกับชั้นสเตอร์นและลดลงตามลำดับกับระยะทางที่ห่างจากอนุภาคซีเมนต์ ผิวที่ไถล (Slipping surface) ระหว่างอนุภาคและของเหลวโดยปกติจะเกิดในชั้นแพร่ เนื่องจากค่าศักย์ที่ผิวและค่าศักย์สเตอร์นที่อยู่ด้านนอกสุดของชั้นสเตอร์นไม่สามารถที่จะวัดได้ ดังนั้นค่าศักย์บนผิวที่ไถลหรือที่เรียกว่าค่าศักย์เซต้า (Zeta potential) จะถูกใช้แทนที่สำหรับค่าศักย์ที่ผิวของอนุภาคของแข็งในสารแขวนลอยของแข็งกับน้ำ^[31] ด้วยเหตุนี้ ค่าศักย์เซต้าจะมีค่าต่ำกว่าค่าศักย์ที่ผิวและมีค่าสูงกว่าค่าศักย์สเตอร์นและจะถูกใช้ในการคำนวณหาแรงผลักรวมทางไฟฟ้า

สำหรับค่าศักย์เซต้าของซีเมนต์เฟสที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมายนั้น Nagele^[32] พบว่าจะมีค่าศักย์เซต้าเป็นบวกเล็กน้อยคือน้อยกว่า +5 มิลลิโวลต์ ในขณะที่กรณีที่มีสารลดน้ำอย่างมายนั้น Hattori^[16], Daimon and Roy^[17] และ Anderson and Roy^[33] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าศักย์เซต้ากับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารลดน้ำอย่างมายนับกับซีเมนต์ สรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำอย่างมายนี้นำผลให้ค่าศักย์เซต้ามีค่าเป็นลบน้อยลง (ค่าสัมบูรณ์สูงขึ้น) จนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำอย่างมายนี้นั้นไม่ทำให้ค่าศักย์เซต้ามีค่าสูงขึ้นอีก โดยจะมีแนวโน้มคงที่หรือต่ำลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.15

สำหรับซีเมนต์เฟสที่มีสารลดน้ำอย่างมายนี้นั้น ค่าศักย์เซต้ามีค่าลดลงจากซีเมนต์เฟสปกติประมาณ 8 - 10 เท่า แม้ว่ากรณีที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมายนี้นั้นจะมีค่าศักย์เซต้าเป็นบวกและอาจส่งผลให้เกิดแรงผลักรวมทางไฟฟ้า แต่ความเป็นจริงแล้วพบว่า ค่าศักย์เซต้าที่เป็นบวกเพียงเล็กน้อยนั้นส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคซีเมนต์น้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของประจุบนผิวอนุภาคซีเมนต์ ดังนั้นแรงผลักรวมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงน้อยมาก ในขณะที่กรณีที่มีสารลดน้ำอย่างมายนี้นั้น ผิวอนุภาคซีเมนต์เกิดประจุลบที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงก่อให้เกิดแรงผลักรวมทางไฟฟ้าและส่งผลต่อการกระจายตัวมาก

3.6.3 การคำนวณหาแรงผลักรวมทางไฟฟ้าเนื่องจากผลของค่าศักย์เซต้า

การคำนวณหาแรงผลักระหว่างไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ใช้แบบจำลองของ Gouy and Chapman^[31] ซึ่งแบบจำลองนี้มีสมมติฐานดังนี้

1. ประจุบนผิวอนุภาคของแข็งถูกพิจารณาว่ากระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
2. ประจุบนชั้นแพร่ถูกพิจารณาว่าเป็นประจุแบบจุด (Point Charges)
3. ผิวของอนุภาคถูกพิจารณาว่าเป็นระนาบ
4. ตัวทำละลายจัดเป็นตัวกลางที่ไม่มีโครงสร้าง (Structureless)

จากสมมติฐานข้างต้น Gouy and Chapman จึงเสนอสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ที่ผิวและคุณสมบัติของตัวทำละลายดังนี้ (รายละเอียดในภาคผนวก ก.)

$$-\sigma_d = (8RT\varepsilon_0\varepsilon_r n)^{1/2} \sinh\left(\frac{vF\phi_d}{2RT}\right) \quad (3.56)$$

โดยที่

R คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์

F คือ ประจุไฟฟ้าเบื้องต้น (Elementary electric charge)

ε_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศ (Permittivity of the vacuum)

ε_r คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นคู่อทางไฟฟ้าของตัวกลาง (Relative dielectric permittivity of the medium)

ϕ_d คือ ศักย์ของชั้นแพร่ (Potential of the diffuse layer)

n คือ ความเข้มข้นโดยรวม (Bulk concentration)

v คือ จำนวนของประจุที่ผิวซึ่งมีศักย์เป็น ϕ_d

Uchikawa, Hanehara และ Sawaki^[30] และ Dobias and Bohuslav^[31] กล่าวว่า ศักย์ของชั้นแพร่ (ϕ_d) สามารถประมาณด้วยศักย์เซต้า (ϕ_z) ได้ และจากความหนาแน่นของประจุที่ผิวจะสามารถหาแรงผลักระหว่างไอออนที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคทรงกลม 2 อนุภาคได้ดังสมการที่ (3.57)

$$F_{RE} = \left[\frac{(2\pi\sigma_d^2 r)}{(\varepsilon_r \varepsilon_0 \kappa)} \right] \exp(-\kappa a) \quad (3.57)$$

เมื่อ

F_{RE} คือ แรงผลักระหว่างไอออน (Electrostatic repulsive force)

r คือ รัศมีของอนุภาคทรงกลม

a คือ ระยะห่างระหว่างอนุภาค

3.6.4 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

จากสมการที่ 3.21 ซึ่งเป็นสมการอธิบายหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกรณีไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก แต่เมื่อมีสารลดน้ำอย่างมาก พบว่า แรงผลักระหว่างไอออนจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง อย่างไรก็ตาม

ตาม การคำนวณแรงผลักระหว่างไฟฟ้าโดยอาศัยสมการที่ 3.56 ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยาก และที่สำคัญคือ ใช้ได้กับสารลดน้ำอย่างมากชนิดเบสเนห์ทาลีนและเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท แต่ไม่สามารถใช้กับสารลดน้ำอย่างมากชนิดเบสอะโครลิคได้ ดังนั้น เพื่อให้สามารถใช้กับสารลดน้ำอย่างมากชนิดอื่นได้ จึงเสนอผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในรูปของค่าตัวประกอบแรงผลักระหว่าง (Repulsion factor) ด้วยเหตุที่ค่าตัวประกอบแรงผลักระหว่างสูง หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีค่าต่ำ และในทำนองกลับกัน ค่าตัวประกอบแรงผลักระหว่างต่ำ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีค่าสูง ดังนั้นจึงเสนอสมการดังนี้

$$\sigma_z = \left(\frac{1}{\phi_{rep}} \right) \frac{9(1-\varepsilon)}{8\pi d^2} kH \quad (3.58)$$

โดยที่

ϕ_{rep} คือ ค่าตัวประกอบแรงผลักระหว่าง (Repulsion factor)

ε คือ สัดส่วนปริมาตรช่องว่าง (Void Volume fraction)

H คือ แรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยที่จุดสัมผัส

k คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชัน (co-ordination number)

สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากนั้น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์มีค่าลดลง โดยที่ผลการทดลองหาค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.16 เมื่อทำการวิเคราะห์ย้อนกลับ จะได้สมการเอมพิริคัลที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.99 ดังนี้

$$\phi_{red} = 1 - 0.13X_{SP}^{0.66} \quad (3.59)$$

โดยที่

ϕ_{red} คือ ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

X_{SP} คือ ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์)

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ลดลง ดังนั้นค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันมีค่าสูงขึ้น (จากสมการที่ (3.25)) เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.25) ร่วมกับสมการที่ (3.59) จะได้

$$k_{max} = \frac{\pi}{(\phi_{red} \cdot w_{s,no})} \left(\phi_{red} \cdot w_{s,no} + \frac{1}{\rho} \right) \quad (3.60)$$

โดยที่

$w_{s,no}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ลดลง ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของซีเมนต์เฟสที่มีสารลดน้ำอย่างมาก กล่าวคือ สารลดน้ำอย่างมากมีคุณสมบัติในการกระจายอนุภาคซีเมนต์ ทำให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัวอย่างเป็นระเบียบและเป็นผลให้ปริมาตรช่องว่างโดยรวมของซีเมนต์เฟสต่ำลง ซึ่งก็คือมีค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงขึ้น

จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ พบว่า ค่าตัวประกอบแรงผลึกจะเป็นฟังก์ชันกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมากและอัตราส่วนน้ำอิสระต่อซีเมนต์ ดังนี้

$$\phi_{rep} = \left(1 + a \left(\frac{w}{c} \right)_{free}^m \right) \quad (3.61)$$

โดยที่ $\left(\frac{w}{c} \right)_{free}$ คือ อัตราส่วนน้ำอิสระต่อซีเมนต์

เมื่อวิเคราะห์ย้อนกลับจะได้

$$a = -0.05 + 0.22X_{SP} - 0.13X_{SP}^2$$

$$m = -1.46 + 2.23X_{SP} - 1.33X_{SP}^2$$

สำหรับสมการที่ (3.61) นั้นสามารถใช้ได้ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ไม่เกิน 10% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคซีเมนต์

สำหรับความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบแรงผลึกที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากและอัตราส่วนน้ำอิสระต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 จากรูปที่ 3.18 จะพบว่า เมื่อปริมาณน้ำอิสระสูงขึ้น ค่าตัวประกอบแรงผลึกมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Khunthongkeaw^[35] และค่าตัวประกอบแรงผลึกจะมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณน้ำมากเพียงพอจะทำให้อนุภาคซีเมนต์ห่างกัน = 10% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคซีเมนต์

3.6.5 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

สำหรับแบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของมอร์ตาร์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมากนั้น สามารถใช้ได้กับมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากด้วย ซึ่งจะพิจารณามอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากเป็น 2 กรณีคือ มอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณสูง และในปริมาณต่ำ โดยค่าวิกฤตที่จะแบ่งช่วงดังกล่าวคือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผงต่ออนุภาคทั้งหมดเท่ากับ 0.25

3.6.5.1 มอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณสูง

มอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณสูง คือมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผงต่ออนุภาคทั้งหมดมากกว่า 0.25 กรณีนี้ จะพิจารณาให้วัสดุผงและสารลดน้ำอย่างมากเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ส่วนอนุภาคที่หยากกว่าให้พิจารณาว่าส่งผลน้อยมากและสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นการเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เป็นผลจากปริมาณน้ำอิสระนั้นจึงสมมติว่าส่งผลต่อวัสดุผงเพียงอย่างเดียว

ด้วยเหตุ สมการที่ (3.47) – (3.49) ยังคงสามารถใช้ได้กับมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก โดยที่ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสามารถคำนวณจากแบบจำลองพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากได้

3.6.5.2 มอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณต่ำ

มอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณต่ำ คือมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผงต่ออนุภาคทั้งหมดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 กรณีนี้จำเป็นต้องคิดถึงผลของมวลรวมด้วย โดยจะคิดคำนวณพลังงานการผสมเช่นเดียวกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก กล่าวคือ ปริมาณมวลรวมมีผลต่อปริมาณน้ำที่จะทำให้อนุภาคของแข็งอิมมัตว์ และมีผลต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ย

3.7 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากรวมกันซึ่งแสดงในลักษณะของตัวประกอบพลังงาน (Energy Factor) ดังรูปที่ 3.19 อย่างไรก็ตาม ค่าพลังงานการผสมที่ได้จากการคำนวณจะเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งในสภาพความเป็นจริงแล้วพบว่า พลังงานการผสมเปลี่ยนแปลงตามเวลาการผสม ทั้งนี้เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง โดยที่ เมื่อระยะเวลาการผสมสั้น ๆ อนุภาคส่วนใหญ่ยังกระจายตัวไม่ดี และน้ำไม่สามารถเคลือบอนุภาคทั้งหมดได้ ด้วยเหตุนี้ พลังงานการผสมจึงมีค่าสูง แต่เมื่อระยะเวลาผสมนานขึ้น อนุภาคส่วนใหญ่จะกระจายตัวดีขึ้น ดังนั้นพลังงานการผสมจึงมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ถ้าผสมด้วยระยะเวลาที่นานเกินไป อนุภาคของแข็งอาจจะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและเป็นผลให้พลังงานการผสมสูงขึ้นอีก

ถ้านิยามให้ ระดับความเข้มของการผสมคือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ถูกใช้ไปในการผสม ดังนั้นการหาระดับความเข้มของการผสม! เป็นดังนี้

$$\int_{t=0}^{t=t_{mix}} E_{mix} \cdot dt = E_{in} \quad (3.62)$$

เนื่องจากค่าพลังงานการผสมที่ได้จากการคำนวณในบทนี้นั้นจะเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งคงที่สำหรับสัดส่วนการผสมหนึ่ง ๆ ด้วยเหตุนี้จึงได้

$$E_{in} = E_{mix} t_{mix} \quad (3.63)$$

โดยที่

t คือ ระยะเวลาการผสม

t_{mix} คือ ระยะเวลาที่ถูกใช้ในการผสม

E_{mix} คือ พลังงานการผสม

E_{in} คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ไปในการผสม (ระดับความเข้มของการผสม)

สำหรับผลเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มของการผสมที่ได้จากการอินทิเกรตพื้นที่ได้กราฟรูปที่ 3.20 กับที่ได้จากวิธีประมาณด้วยค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เมื่อพิจารณารูปที่ 3.21 พบว่า ในช่วงประมาณ 600 วินาทีแรก ค่าระดับความเข้มของการผสมที่ได้จากค่าเฉลี่ยจะใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่ที่เวลามากกว่า 600 วินาที ค่าระดับความเข้มของการผสมที่ได้จากค่าเฉลี่ยจะสูงกว่าผลการทดลอง เนื่องมาจากอนุภาคส่วนใหญ่กระจายตัวดีขึ้นและส่งผลให้พลังงานการผสมลดลงเล็กน้อย

3.8 สรุป

จากผลการทดลองและศึกษาเกี่ยวกับพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ สรุปพอสังเขปได้ดังนี้

1. ค่าแรงตึงผิว (Surface tension) ของน้ำ กรณีมีสารลดน้ำอย่างมกนั้นจะมีค่าลดลง แต่ไม่เป็นนัยสำคัญต่อการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค
2. แรงผลักรังสีทางไฟฟ้าเป็นแรงสำคัญที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกิดจากพันธะของเหลว (Liquid Bonding) ลดลง
3. พลังงานการผสมคือ พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลาที่ถูกใช้ไปในการผสม ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค
4. สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมก จะสมมติให้ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคซีเมนต์จะกระจายตัวสม่ำเสมอซึ่งส่งผลให้ปริมาณช่องว่างโดยรวมลดลง
5. พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมกมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงผลักรังสีทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาค โดยขนาดของแรงผลักรังสีจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมสูงขึ้น
6. พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ทั้งกรณีมีและไม่มีสารลดน้ำอย่างมกสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือ กรณีที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์ต่ออนุภาคของแข็งทั้งหมดสูงและต่ำกว่า 0.25
 - 6.1 มอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์ต่อของแข็งทั้งหมดสูงกว่า 0.25 นั้น พบว่าพลังงานการผสมกรณีมีสารลดน้ำอย่างมกมีค่าลดลงค่อนข้างมก และสามารถคำนวณโดยให้ซีเมนต์เป็นตัวแทนทั้งหมดได้
 - 6.2 มอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์ต่อของแข็งทั้งหมดต่ำกว่า 0.25 นั้น กรณีนี้ให้คิดทั้งผลของวัสดุผงและมวลรวมร่วมกัน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

	ทรายที่ใช้ในการ ทดลอง	ซีเมนต์ที่ใช้ในการ ทดลอง	ซีเมนต์ ^(ก)	แอสล็ก (slag) ^(ก)
พื้นที่ผิวจำเพาะเบลนด์ (ซม ² /ก)	-	2900	3350	3940
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (มม.)	0.24 ^(ก)	0.00657 ^(ข)	0.00567 ^(ข)	0.00525 ^(ข)
หน่วยน้ำหนัก(กก./ลิตร)	1.50	1.10	1.05	1.05
ความถ่วงจำเพาะ, ρ (ก/ซม ³)	2.63	3.15	3.16	2.90
สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ(%)	6.3	22.7	26.14	29.09
ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	1.1	-	-	-

(ก) คำนวณจากสมการที่แนะนำโดย Power^[34]

$$Av.dia = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i d_i^{-3}} \right)^{1/3}$$

เมื่อ p_i คือ สัดส่วนปริมาตรของแข็งของกลุ่มขนาด i

d_i คือ (2/3) ของขนาดช่องเปิดที่อยู่เหนือขึ้นไป

(ข) คำนวณจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนด์ (SSB)

$$Av.dia = \left(\frac{6}{\rho \times SSB} \right)^{1/3}$$

(ค) ผลการทดลองที่อ้างอิงจากการทดลองของ Stitmannaitum^[1]

ตารางที่ 3.2 ขนาดคละของทรายที่ใช้ในการทดลองเทียบกับขนาดคละของทรายตามมาตรฐาน ASTM C778-92a

ขนาดตะแกรง	% คงค้างสะสมของ ทรายที่ใช้ในการ ทดลอง	% คงค้างสะสมของ ทรายตามมาตรฐาน ASTM C778-92a
# 30	4	0 – 4
# 40	32	25 – 35
# 50	72	70 – 80
# 100	98	96 – 100
Pan	100	100
Fineness Modulus	2.06	1.91 - 2.19
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (มม.)	0.24	0.22 – 0.27

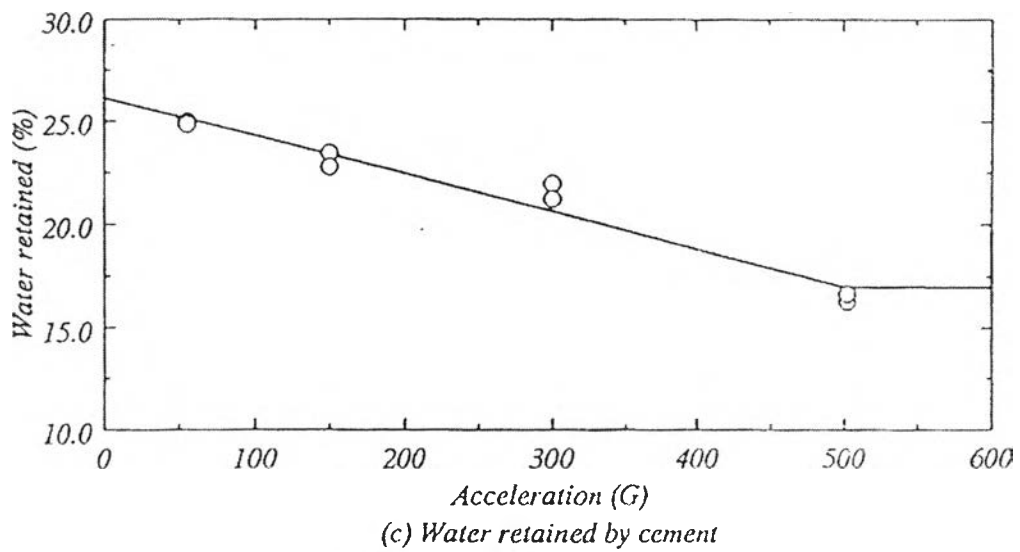
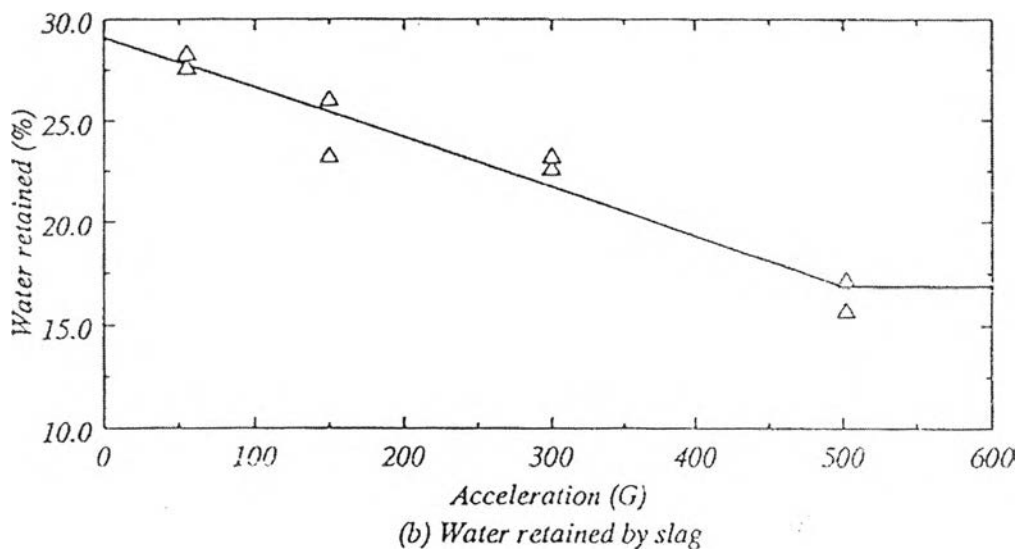
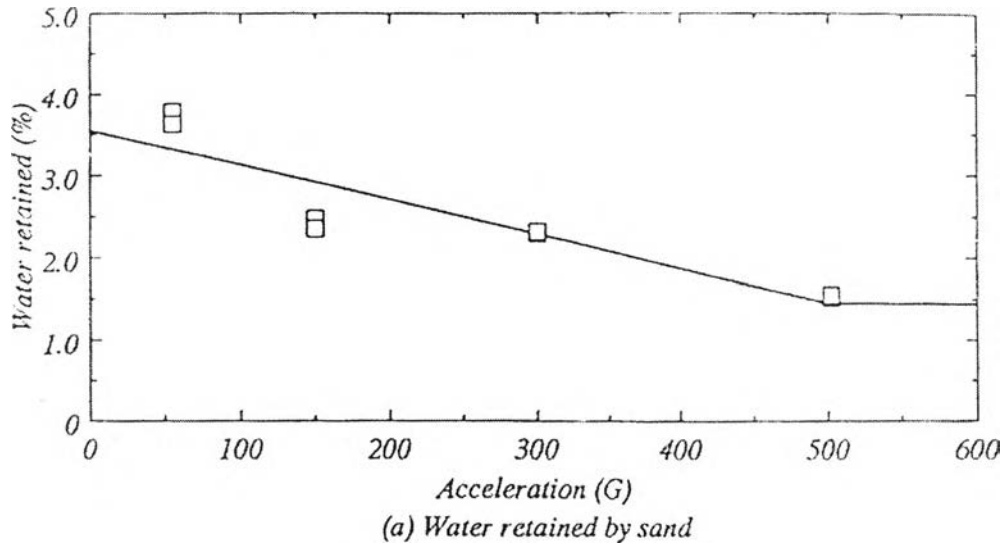
ตารางที่ 3.3 ค่าเฉลี่ยของกลุ่มขนาด (Size group) คำนวณโดยสมการที่ (3.12)

กลุ่มขนาด	ค่าขนาดเฉลี่ย (มม.)
#200 - #100	0.11
#100 - #50	0.22
#50 - #40	0.36
#40 - #30	0.51
#30 - #16	0.90

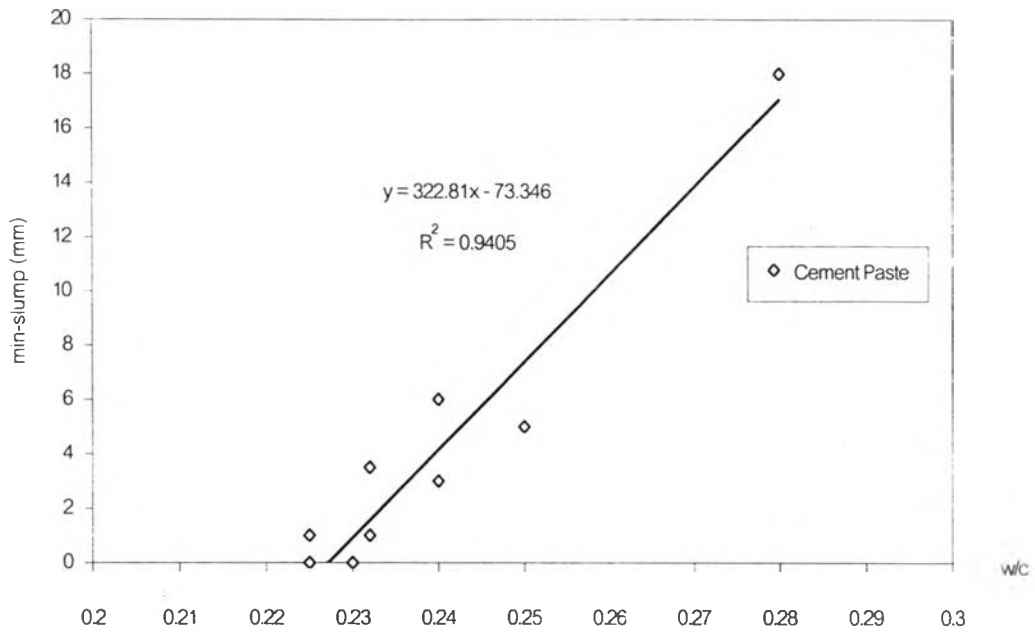
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนการผสมของส่วนผสมต่าง ๆ

Mix No.	ทราย (กก.)	ซีตะกรัน (กก.)	ซีเมนต์	น้ำ (กก.)	% _{SP}	Remark
1	36.4	5.0	-	เปลี่ยนแปลง	-	อ้างอิง ⁽ⁿ⁾
2	36.4	10.0	-	เปลี่ยนแปลง	-	อ้างอิง ⁽ⁿ⁾
3	36.4	20.0	-	เปลี่ยนแปลง	-	อ้างอิง ⁽ⁿ⁾
4	36.4	30.0	-	เปลี่ยนแปลง	-	อ้างอิง ⁽ⁿ⁾
M1	7.4	-	2.7	1.3	เปลี่ยนแปลง	Standard Mortar (Lean Mix)
M2	5.2	-	4.3	1.7	เปลี่ยนแปลง	Rich Mix
M3	6.3	-	3.5	1.5	เปลี่ยนแปลง	Rich Mix

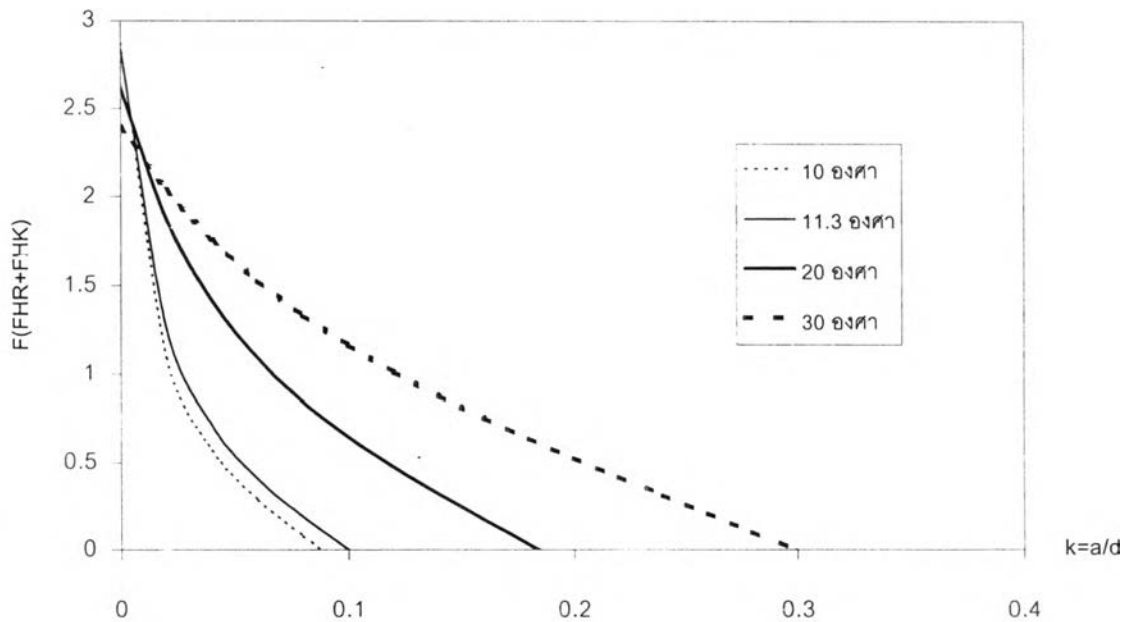
⁽ⁿ⁾ อ้างอิงจากผลการทดลองของ Stitmannaitum



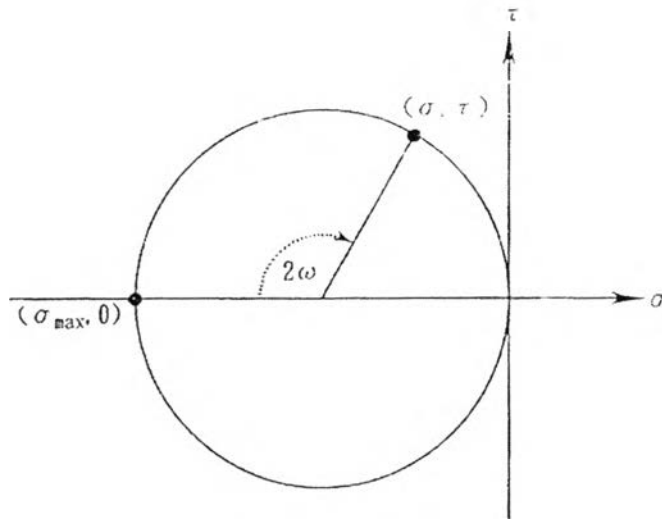
รูปที่ 3.1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย แคล็ก (Slag) และ ซีเมนต์โดยวิธีเซนตริฟิวส์⁽¹⁾



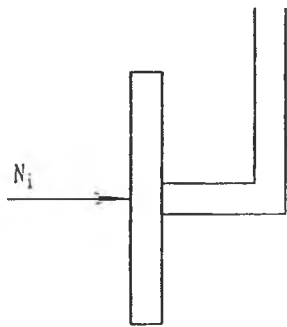
รูปที่ 3.2 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์โดยวิธีทดสอบค่ายุบตัวขนาดเล็ก



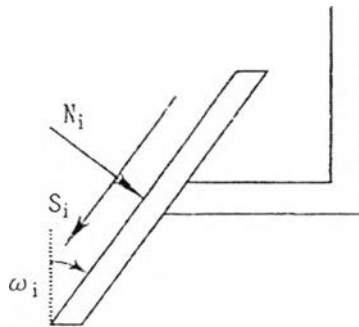
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (F) และสัดส่วนระยะห่างระหว่างอนุภาค (k)



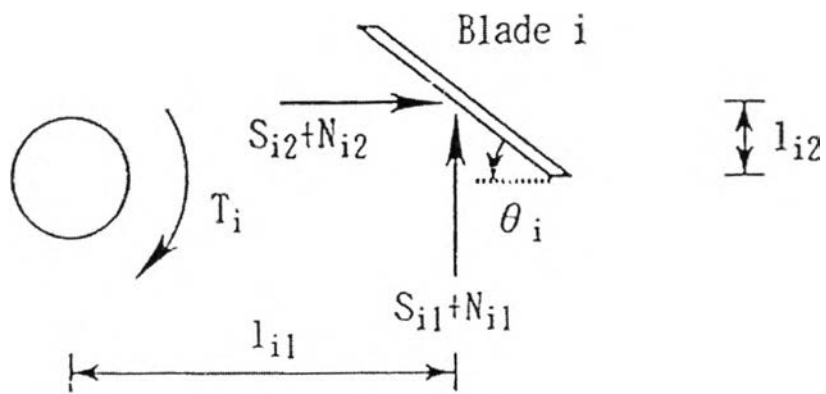
หน่วยแรงที่กระทำบนใบมีดผสม



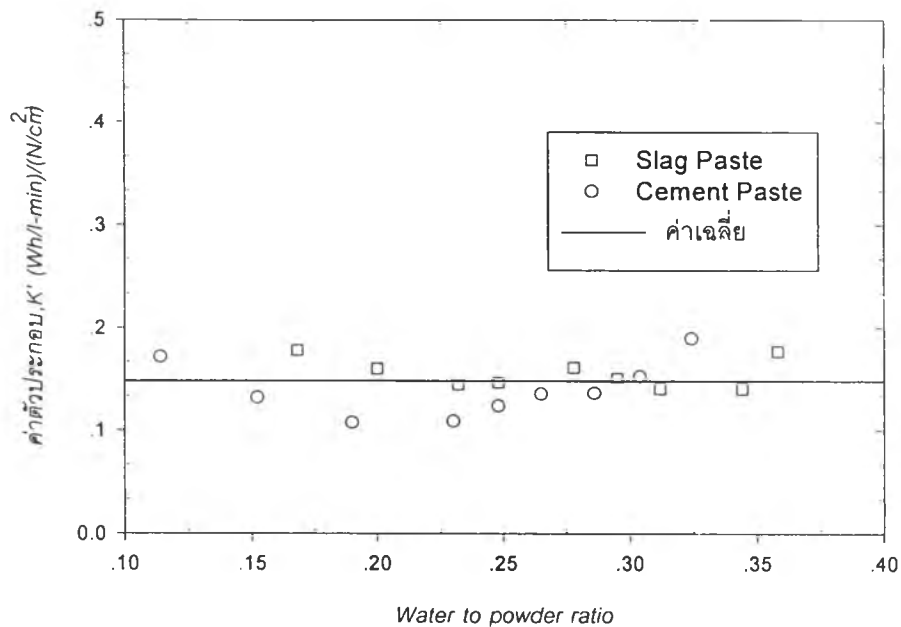
แรงที่กระทำบนใบมีดแนวตั้ง *i*



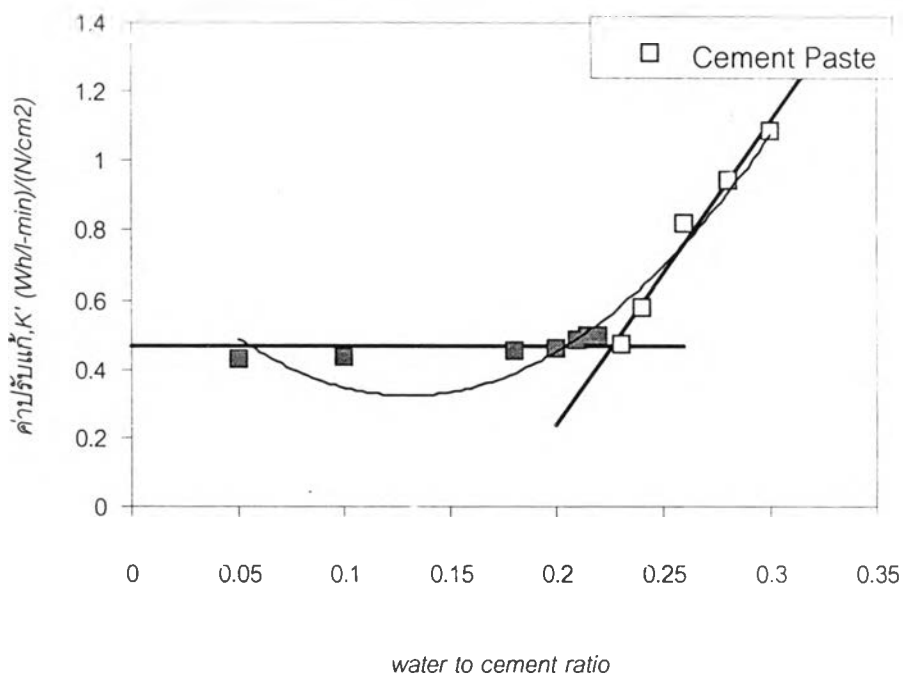
แรงที่กระทำบนใบมีดแนวเอียง *i*



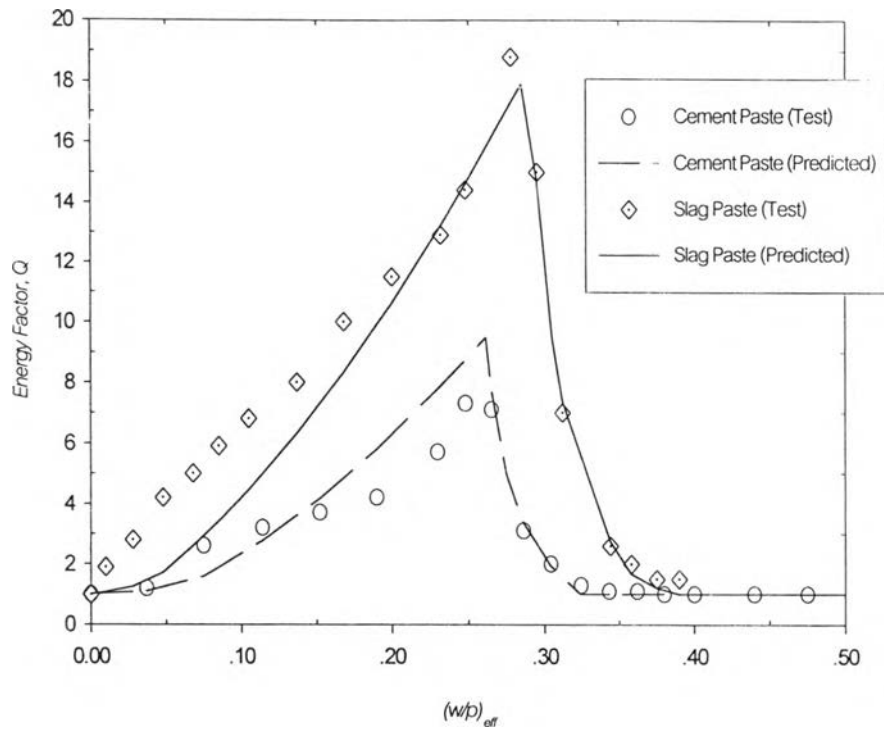
รูปที่ 3.4 แรงต้านของส่วนผสมที่กระทำต่อใบมีดผสม⁽¹⁾



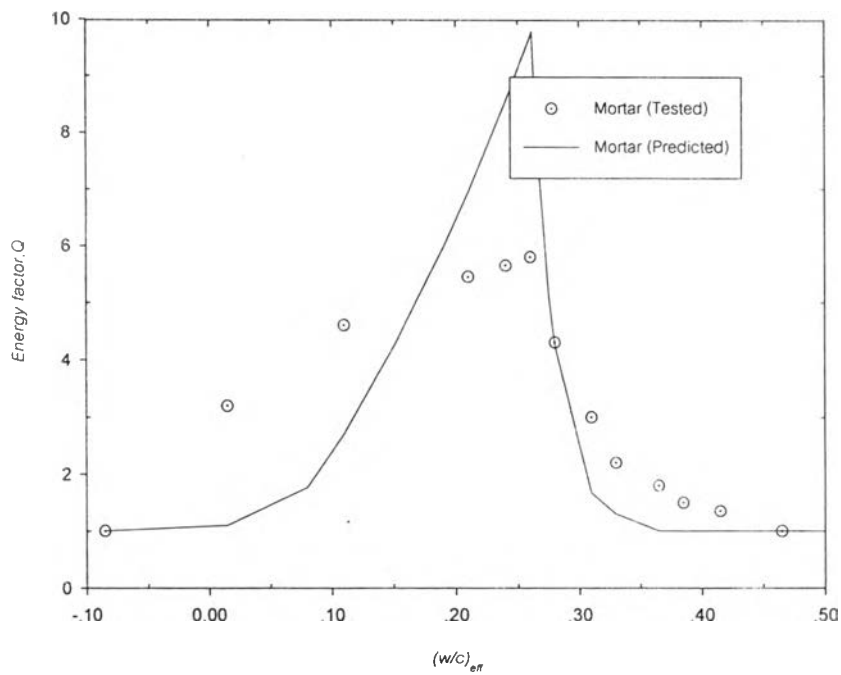
รูปที่ 3.5 ค่าตัวประกอบสำหรับปรับเปลี่ยนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นพลังงานการผสมของ เพลสต์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดกระทะ (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum⁽¹⁾)



รูปที่ 3.6 ค่าตัวประกอบสำหรับปรับเปลี่ยนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นพลังงานการผสมของ เพลสต์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดใบพาย

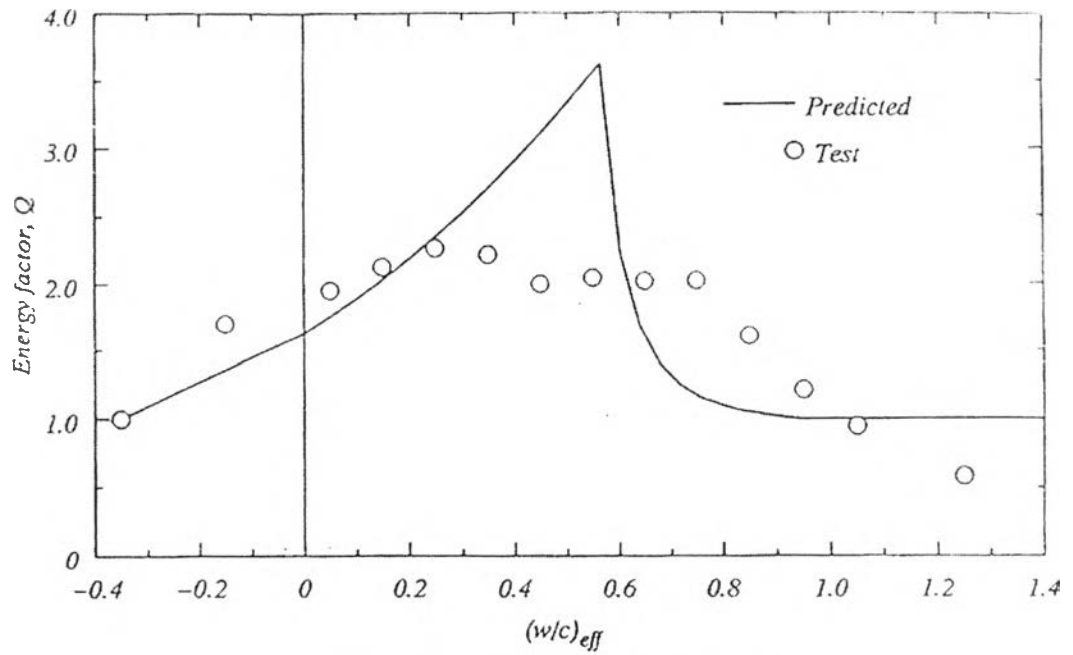


(ก.) พลังงานการผสมของเพสต์

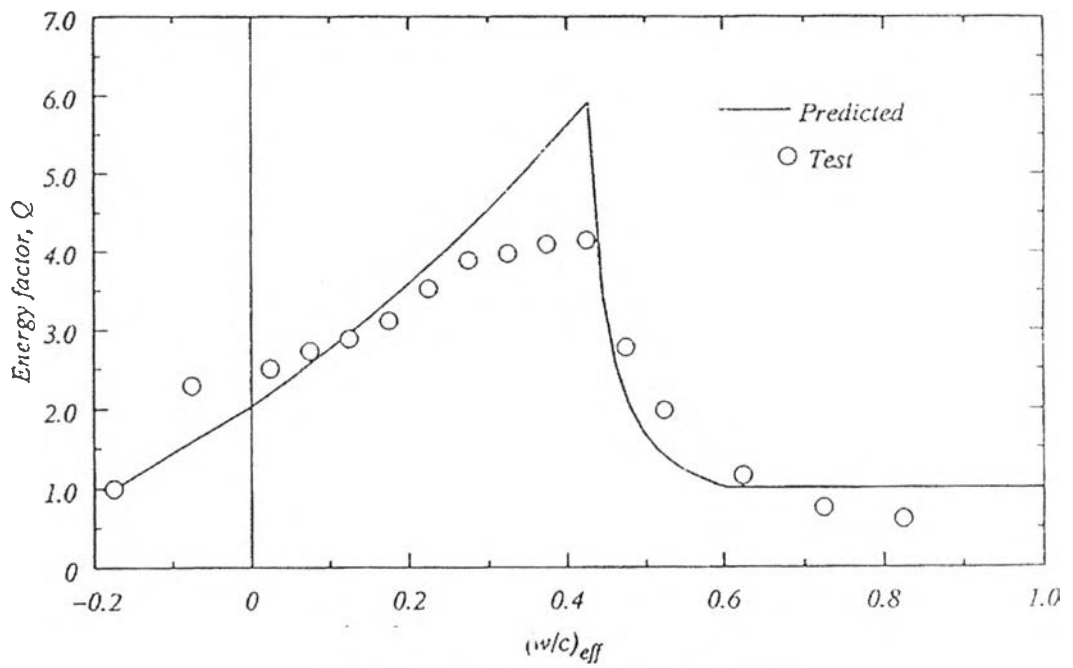


(ข.) พลังงานการผสมของมอร์ตาร์

รูปที่ 3.7 พลังงานการผสมของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดกระทะ (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum^[1])

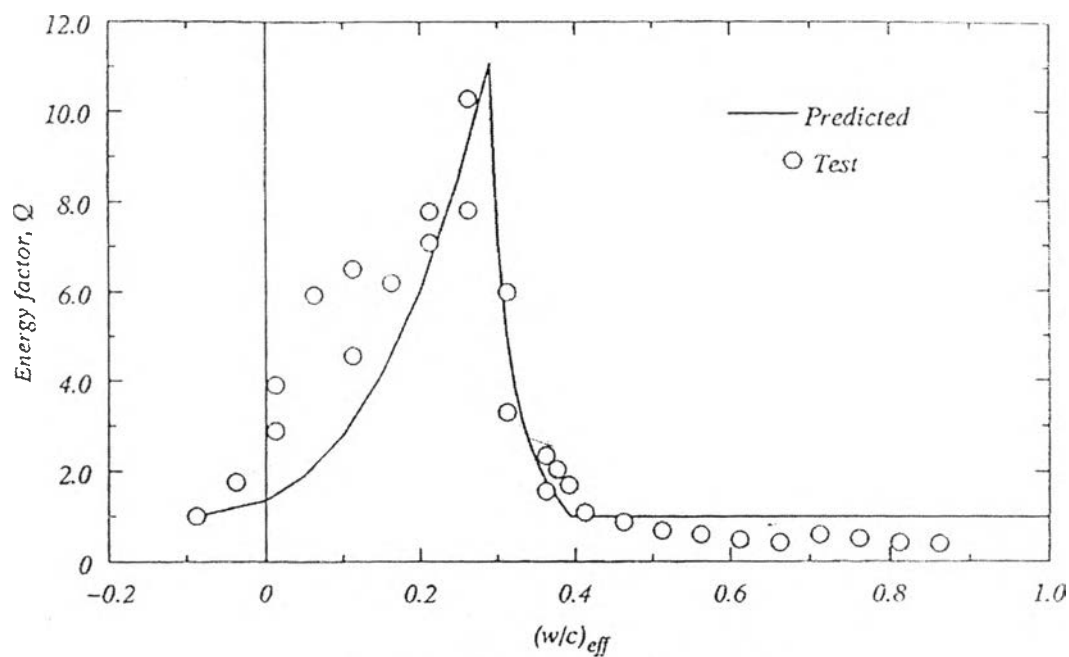


(a) Mixture of sand + slag (Mix 1)

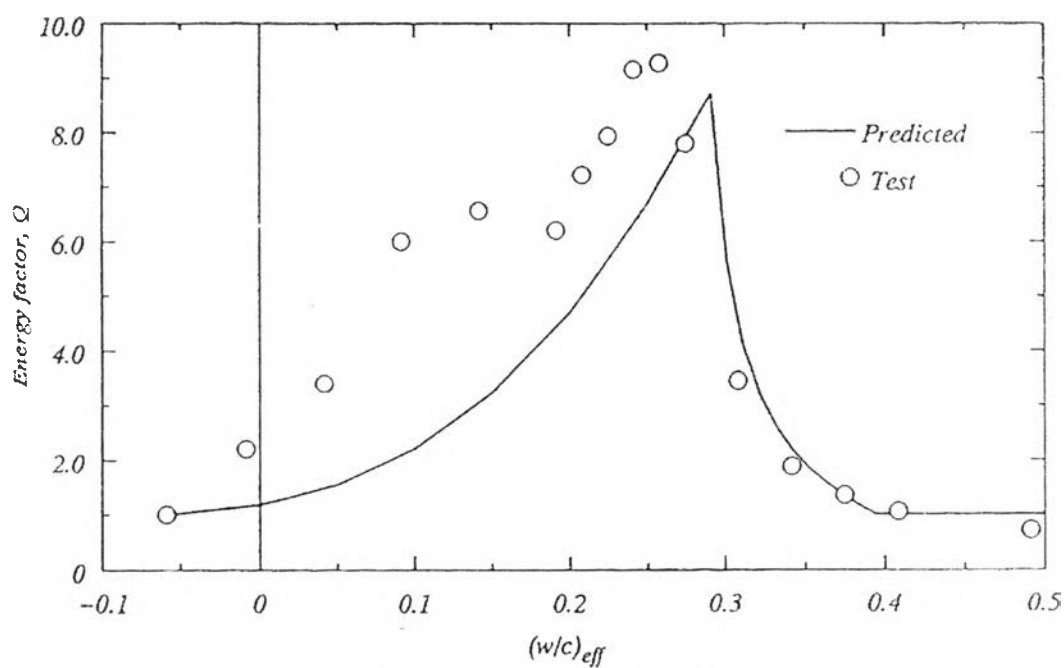


(b) Mixture of sand + slag (Mix 2)

รูปที่ 3.8 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของพลังงานการผสมของส่วนผสมแอสลั๊กและทราย (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum^[11])

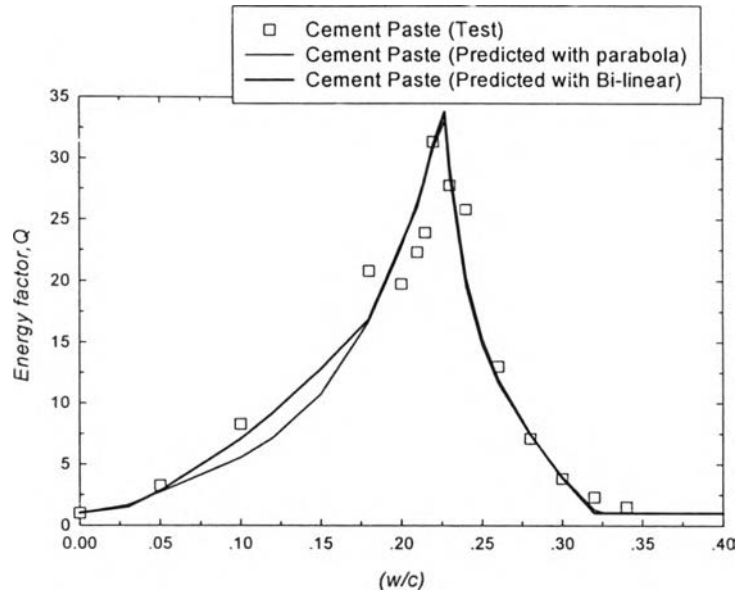


(a) Mixture of sand + slag (Mix 3)

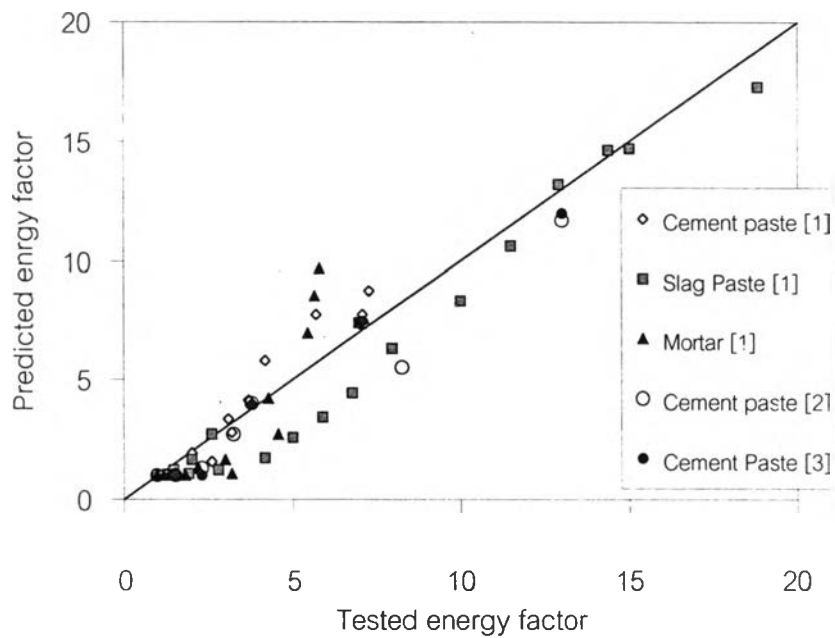


(b) Mixture of sand + slag (Mix 4)

รูปที่ 3.9 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของพลังงานการผสมของส่วนผสมแอสลิกและทราย (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum⁽¹⁾)



รูปที่ 3.10 พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดใบพาย

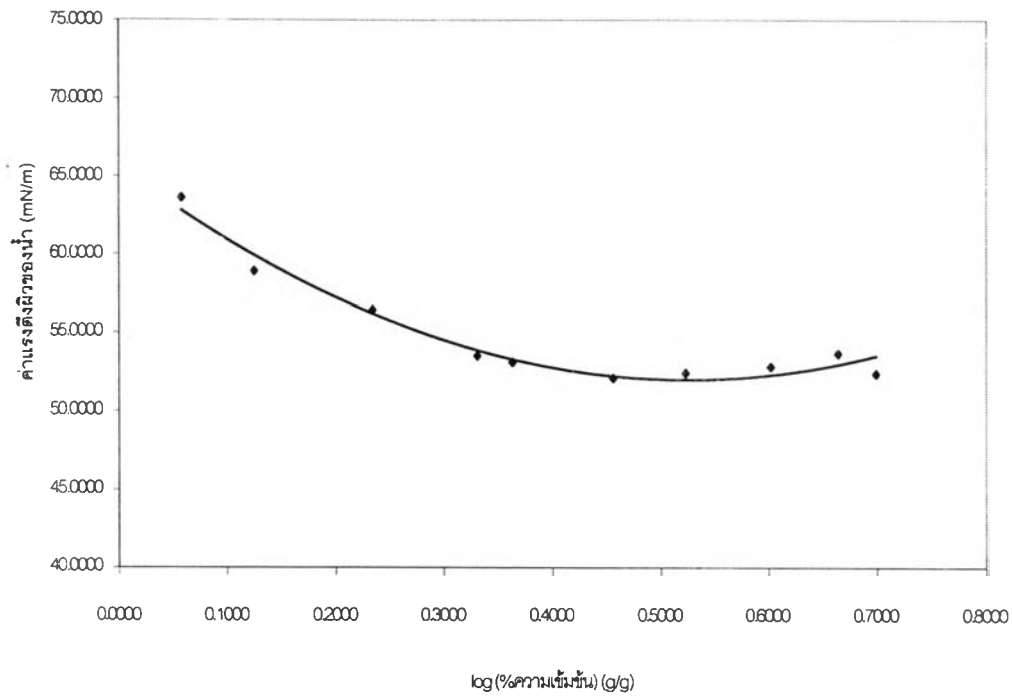


[1] อ้างอิงผลการทดลองพลังงานการผสมของ Stitmannaitum^[1] ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดกระทะ

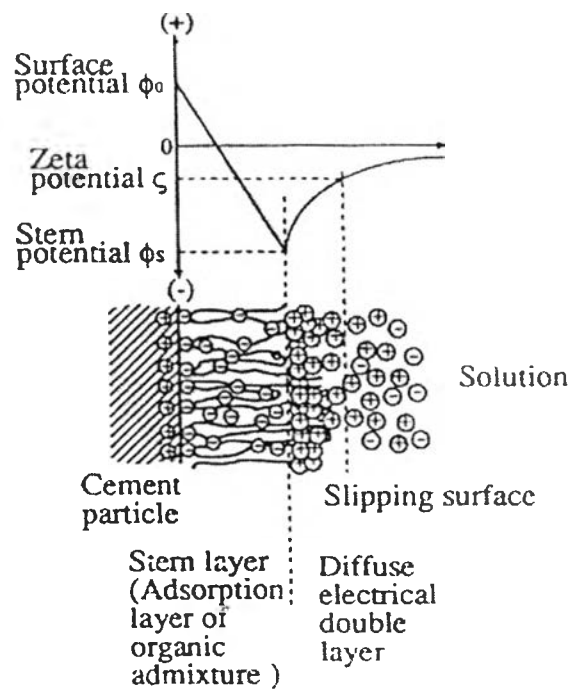
[2] ผลการทดลองพลังงานการผสมที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดใบพาย (ใช้สมการที่ (3.45))

[3] ผลการทดลองพลังงานการผสมที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดใบพาย (ใช้สมการที่ (3.46))

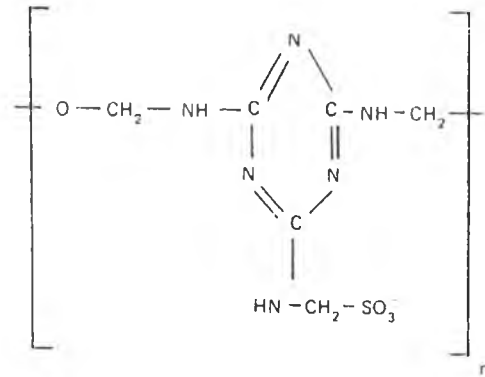
รูปที่ 3.11 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดต่าง ๆ



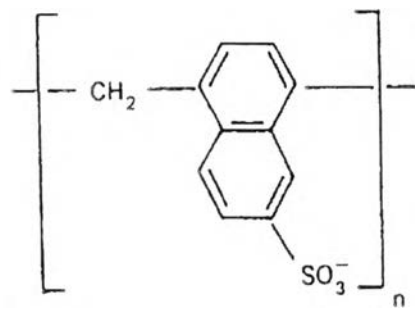
รูปที่ 3.12 ค่าแรงตึงผิวของน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Du Nouy Ring Tensiometer ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารลดน้ำอย่างมาชนิดเบสเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (ชื่อทางการค้า Sikament FF) ต่าง ๆ



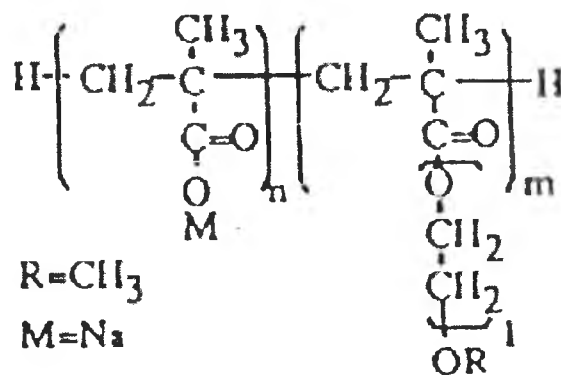
รูปที่ 3.13 การเกิดขึ้นคู่ทางไฟฟ้าบนผิวอนุภาคซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของสารลดน้ำอย่างมา ^[30]



(ก.) โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมกที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็น เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท^[9]

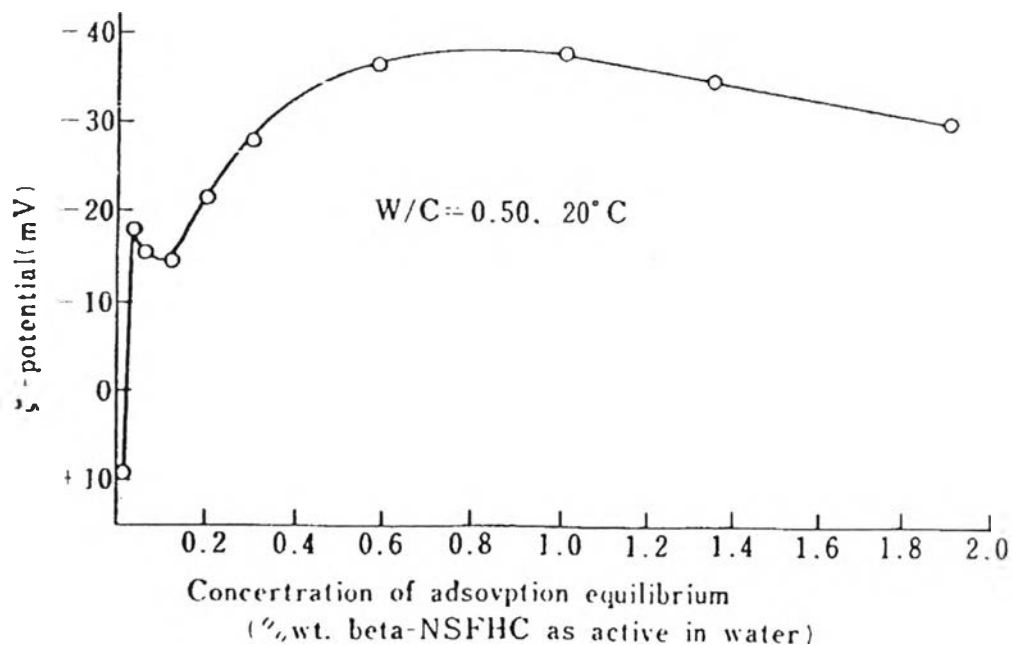


(ข.) โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมกที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท^[9]

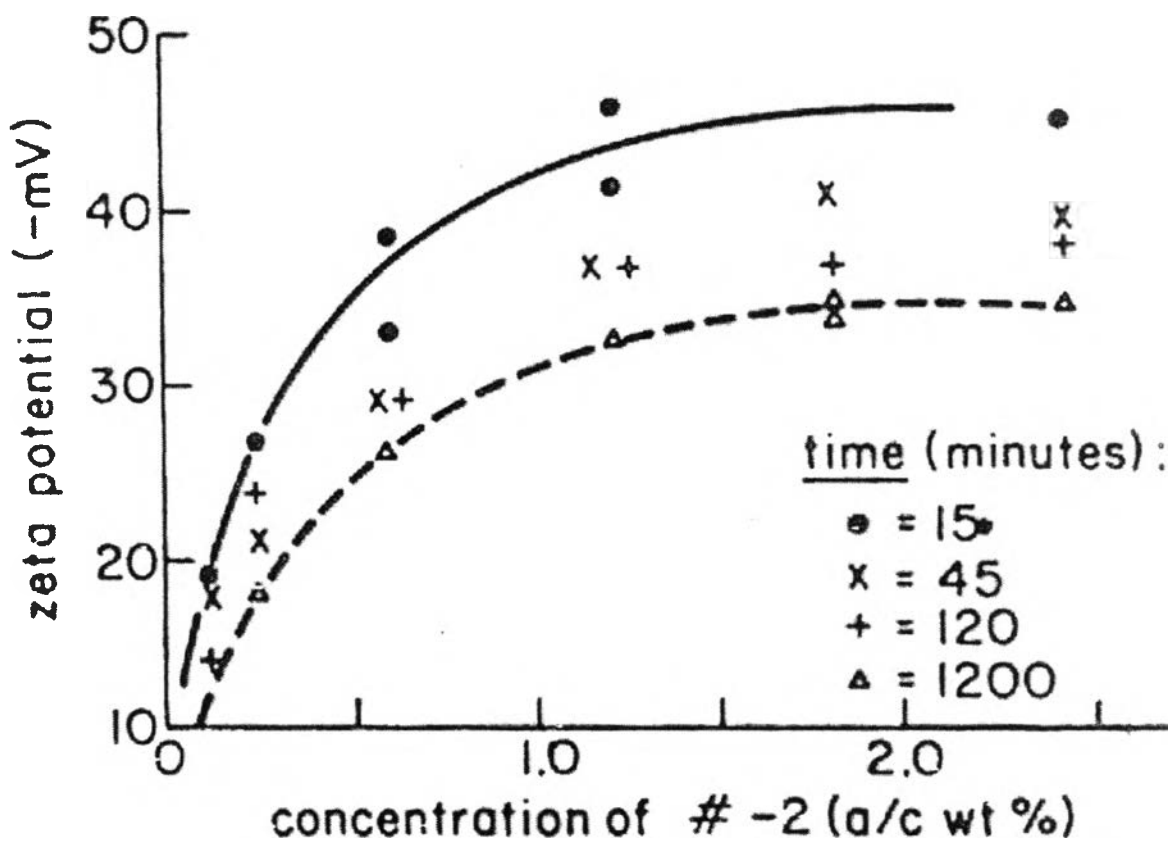


(ค.) โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมกที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นกรดอะไครลิก^[30]

รูปที่ 3.14 โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมก

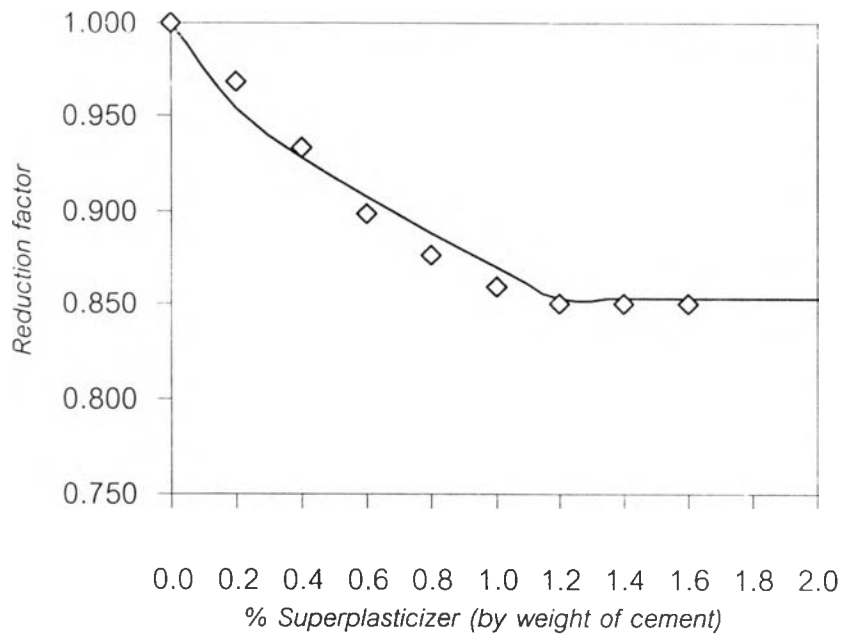


(ก.) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำอย่างมากกับค่าศักย์เซต้า^[16]

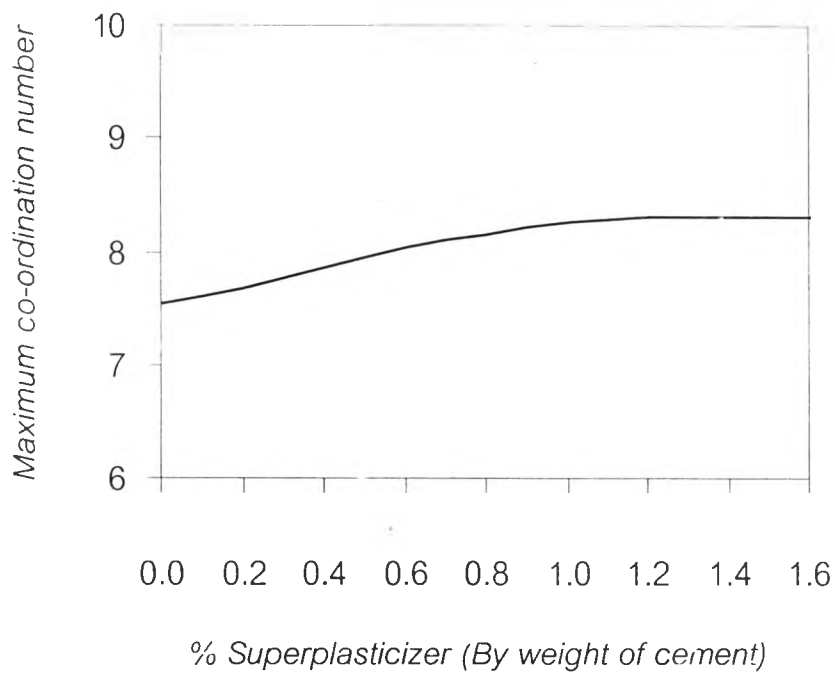


(ข.) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำอย่างมากกับค่าศักย์เซต้า^[32]

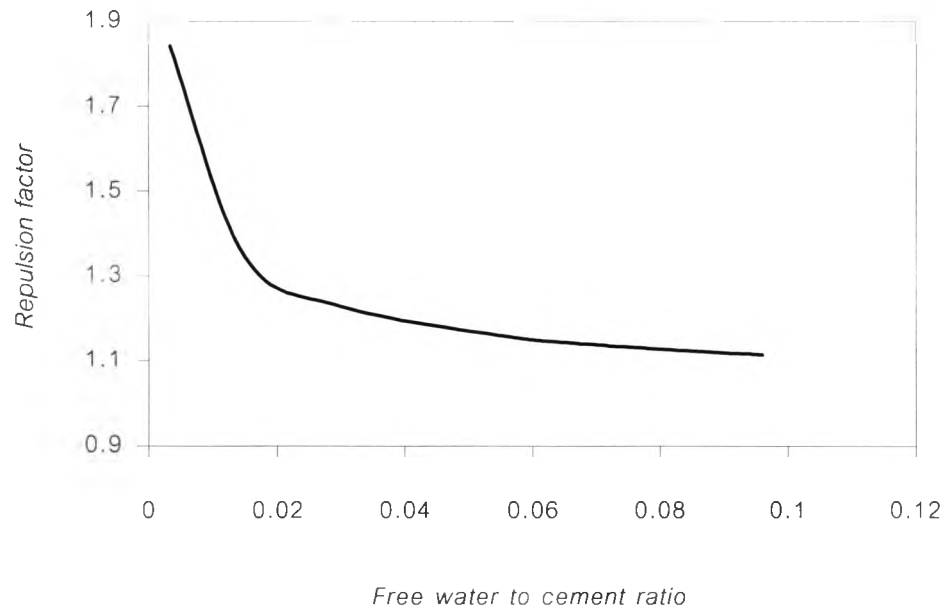
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำอย่างมากกับค่าศักย์เซต้า



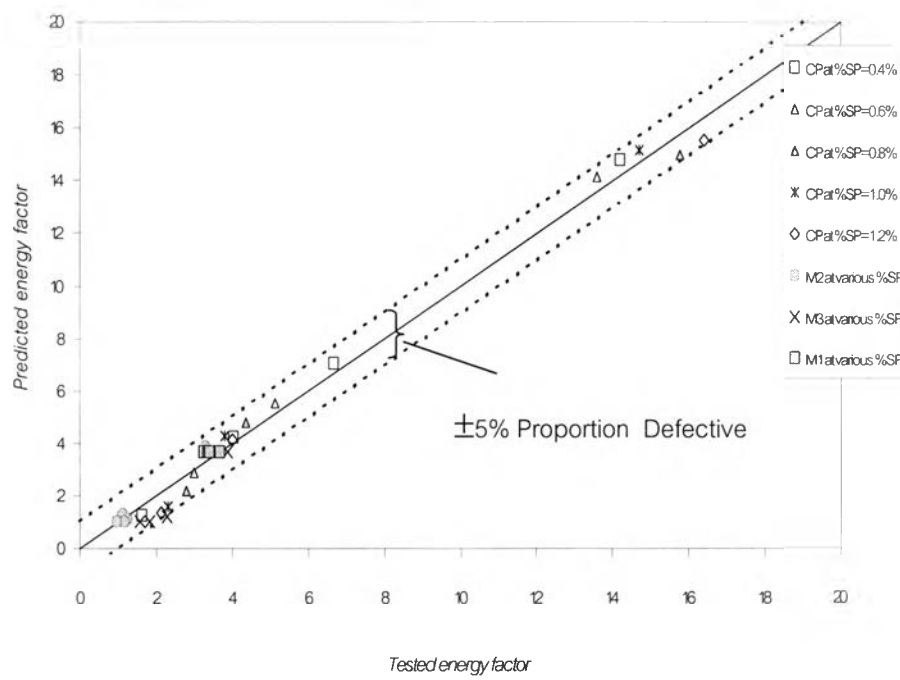
รูปที่ 3.16 ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์



รูปที่ 3.17 ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุดที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ

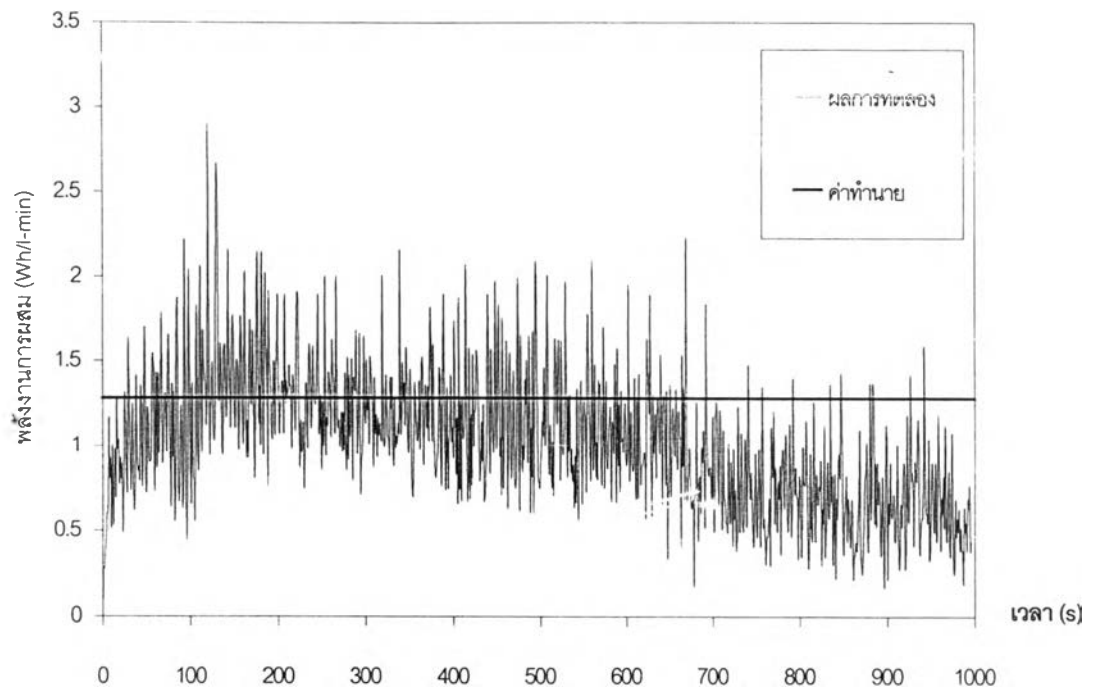


รูปที่ 3.18 ค่าตัวประกอบแรงผลึกที่ปริมาณ HRWRS = 0.6% และอัตราส่วนน้ำอิสระต่อซีเมนต์ต่าง ๆ

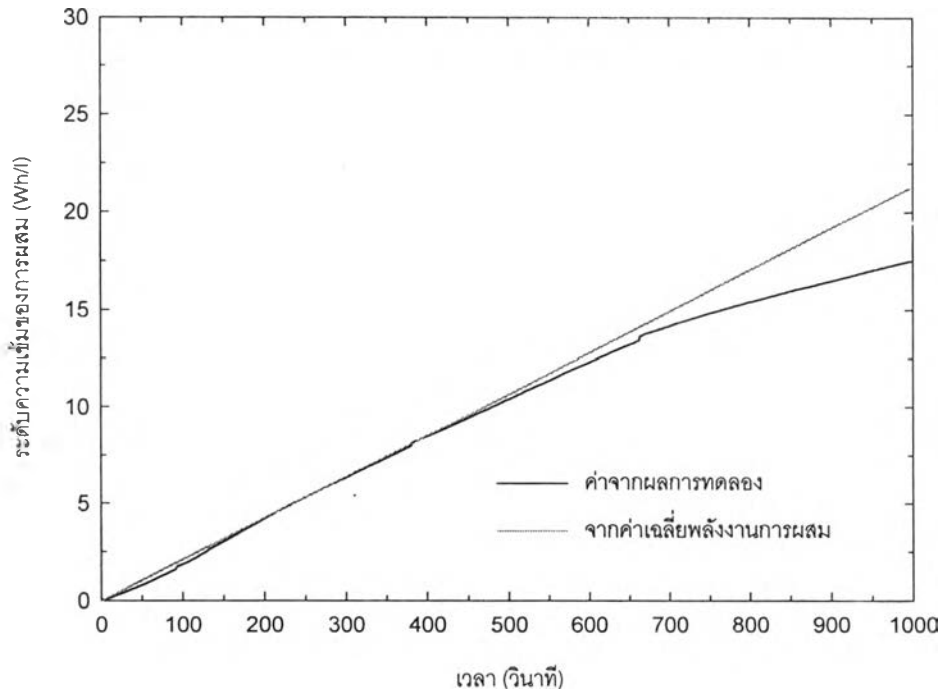


หมายเหตุ CP คือ ซีเมนต์โพลีสต์, M1 M2 และ M3 คือมอร์ตาร์สัดส่วนผสมที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

รูปที่ 3.19 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของซีเมนต์โพลีสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก



รูปที่ 3.20 พลังงานการผสมของซีเมนต์เฟสต์ที่ $w/c=0.2180$, $\%SP=0.4\%$



รูปที่ 3.21 ผลเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มของการผสมระหว่างค่าจากผลการทดลอง และค่าประมาณที่ได้จากค่าเฉลี่ยพลังงานการผสม