

ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงดอพลังงานการผสมของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต

3.1 บทนำ

พลังงานการผสมคือ พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลาที่เครื่องผสมใช้ในการผสม โดยพลังงานการผสมนั้นพบว่า มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของวัสดุผงดอเป็นหลัก โดยที่ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในส่วนผสมซึ่งปริมาณน้ำที่แตกต่างกันจะทำให้ส่วนผสมอยู่ในสภาวะต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งพบว่าหากปริมาณน้ำน้อยเกินไปก็ไม่สามารถทำให้ส่วนผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ แต่หากปริมาณน้ำมีมากเกินไปส่วนผสมจะอยู่ในสภาวะของเหลวและมีโอกาสแยกตัวสูง

ดังนั้นการจะพิจารณาถึงผลของคุณสมบัติของวัสดุผงดอพลังงานที่ใช้ในการผสม จำเป็นที่จะต้องศึกษาหลักการของปริมาณน้ำอิสระที่มีในส่วนผสม เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระที่แตกต่างกันจะทำให้ส่วนผสมอยู่ในสภาวะที่แตกต่างกันและทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเปลี่ยนไปด้วย

3.2 ปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำในส่วนผสมสามารถแยกออกได้เป็น 2 ชนิดคือ น้ำในภาคของแข็งและน้ำในภาคของเหลว โดยน้ำในภาคของแข็งจะเป็นปริมาณน้ำที่อยู่ติดกับอนุภาคของแข็งและจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคของแข็ง ปริมาณน้ำส่วนนี้จะไม่ช่วยในการหล่อลื่นส่วนผสม ส่วนน้ำในภาคของเหลวจะสามารถพิจารณาแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็งและปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระ คือ ปริมาณน้ำส่วนที่เหลือจากปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็ง โดยปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็งนี้จะประกอบด้วยปริมาณน้ำที่ถูกเก็บไว้ภายในอนุภาคและปริมาณน้ำที่ติดอยู่ที่ผิวอนุภาค ปริมาณน้ำอิสระนี้จึงสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระ ช่วยในการหล่อลื่นส่วนผสมและส่งผลโดยตรงต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตและรวมไปถึงกำลังอัดของคอนกรีตด้วย โดยสามารถเขียนสมการของปริมาณน้ำอิสระได้ดังนี้

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

โดยที่

- W_{free} = ปริมาณน้ำอิสระ
- W_{total} = ปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสม
- $W_{retained}$ = ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บทั้งโดยวัสดุผงดอและมวลรวม

ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ ($W_{retained}$) นี้จะเป็นปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็งทั้งหมดในส่วนผสมซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

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

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

โดยที่

γ_G	=	สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคมวลรวมหยาบ
γ_s	=	สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย
γ_p	=	สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง
W_{hyd}	=	ปริมาณน้ำที่สูญเสียไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์
M_G, M_s, M_p	=	ปริมาณของอนุภาคหยาบ ทรายและวัสดุผง ตามลำดับ
$\alpha_G, \alpha_s, \alpha_p$	=	ร้อยละการดูดซึมของอนุภาคมวลรวมหยาบ ทรายและวัสดุผง ตามลำดับ
$\omega_G, \omega_s, \omega_p$	=	ปริมาณความชื้นของอนุภาคมวลรวมหยาบ ทรายและวัสดุผง ตามลำดับ

เนื่องจากขนาดของอนุภาคมวลรวมหยาบที่ใหญ่กว่าทรายและวัสดุผงมาก ทำให้ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคมวลรวมหยาบมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับทรายและวัสดุผง ดังนั้นจะได้ $\gamma_G = 0$ สำหรับวัสดุผง เนื่องจากอยู่ในสถานะแห้งและปริมาณน้ำที่จะถูกดูดซึมมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ จึงทำให้สามารถตัดค่า α_p และ ω_p ได้ และในช่วงระยะเวลาการผสมซึ่งเป็นระยะเวลาที่สั้น พบว่า ปริมาณน้ำที่จะสูญเสียไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นมีค่าน้อย ดังนั้นค่า W_{hyd} จึงสามารถตัดทิ้งได้เช่นกัน สมการที่ (3.3) จึงสามารถลดรูปเหลือเพียง

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

หากมวลรวมอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) สมการที่ (3.4) จะสามารถลดรูปอีกได้ ดังนี้

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

หากใช้วัสดุผงหลายชนิดในส่วนผสม สมการที่ (3.5) จะเปลี่ยนไปดังนี้

$$W_{retained} = \gamma_s M_s + \sum_{i=1}^n \gamma_{pi} M_{pi} \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \gamma_{pi} &= \text{สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงชนิดที่ } i \\ M_{pi} &= \text{ปริมาณของอนุภาควัสดุผงชนิดที่ } i \\ n &= \text{จำนวนชนิดของวัสดุผง} \end{aligned}$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้แสดงในตารางที่ 2.4 และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2.4) – (2.6) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมนั้น จะใช้ความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะเหมือนกันทั้งทรายและมวลรวมหยาบ ซึ่ง Khunthongkaew^[12] ได้เสนอสมการที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมดังนี้

$$\beta'_a = 0.0012(S_a)^{0.9237} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \beta'_a &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมโดยน้ำหนัก (ไม่รวมค่าการดูดซึมน้ำ)} \\ S_a &= \text{ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม (cm}^2\text{/g)} \end{aligned}$$

โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมนั้น Kitticharoenkiat^[11] ได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณโดยใช้สมมติฐานว่ารูปร่างของมวลรวมเป็นทรงกลม ดังนั้นพื้นที่ผิวจำเพาะจะคำนวณได้จากขนาดคละของมวลรวมดังนี้

$$S_0 = \frac{6}{D_{av} \cdot \rho} \quad (3.8)$$

เมื่อ

$$D_{av} = \frac{\sum D_i M_i}{\sum M_i} \quad (3.9)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} S_0 &= \text{ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม (cm}^2\text{/g)} \\ D_{av} &= \text{ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคมวลรวม (cm)} \\ D_i &= \text{ขนาดเฉลี่ยระหว่างตะแกรงขนาด } i \text{ ที่มีมวลรวมค้างอยู่และตะแกรงอันถัดถัดไป (cm)} \\ M_i &= \text{เปอร์เซ็นต์ค้ำของมวลรวมบนตะแกรงขนาด } i \text{ (\%)} \\ \rho &= \text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} \end{aligned}$$

โดยค่า D_i สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$D_i = \frac{l_i^l + l_i^u}{2} \quad (3.10)$$

เมื่อ

l_i' = ขนาดของช่องเปิดของตะแกรงขนาด i ที่มีมวลรวมค้างอยู่

l_i'' = ขนาดของช่องเปิดของตะแกรงที่ใหญ่กว่าอันดับถัดไปจากตะแกรงขนาด i

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้จากสมการที่ (3.8) เป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมมติฐานที่ให้อนุภาคเป็นทรงกลม แต่หากพิจารณาถึงผลของรูปร่างของอนุภาคด้วย ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะคำนวณใหม่โดยใช้สัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมเป็นตัวคูณดังนี้

$$S_a = \psi \cdot S_0 \quad (3.11)$$

โดย ψ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาคที่หาได้จากสมการที่ (2.1) เช่นเดียวกับกรณีของวัสดุผง

3.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค

แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคนี้มีด้วยกันหลายประเภท สำหรับประเภทที่สำคัญสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

แรงแวนเดอร์วาลส์

แรงแวนเดอร์วาลส์นี้เป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ห่างกันด้วยระยะทางหนึ่ง โดยขนาดของแรงจะลดลงตามกำลังสองของระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้ว อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร ค่าของแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแรงอื่น เช่น แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากของเหลว เป็นต้น

แรงสถิตย์ทางไฟฟ้า

แรงสถิตย์ทางไฟฟ้านี้เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตย์บนอนุภาคซึ่งส่งผลให้อนุภาคเกิดแรงดึงดูดหรือแรงผลักซึ่งกันและกัน แรงสถิตย์ทางไฟฟ้านี้ไม่สามารถตัดทิ้งได้ในกรณีของส่วนผสมที่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มประเภทที่ทำให้เกิดประจุติดบนผิวอนุภาค แต่ถ้าหากไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มประเภทนี้และอนุภาคใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร แรงนี้จะสามารถตัดทิ้งได้

แรงเสียดทานระหว่างอนุภาค

แรงเสียดทานนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ และจะมีผลมากเมื่อทำการผสมในสภาวะแห้งและเมื่อพื้นผิวของอนุภาคมีความขรุขระมาก อย่างไรก็ตาม ในงานคอนกรีต จะมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องกับผลให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากน้ำจะเป็นตัวช่วยหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานนี้ลง

แรงเนื่องจากความชื้น

สำหรับอนุภาควัสดุผงซึ่งมีขนาดเล็ก เช่น ซีเมนต์ ฝ้ายลอย แรงเนื่องจากความชื้นถือเป็นแรงสำคัญที่มีผลทำให้อนุภาคยึดติดกัน เมื่อพิจารณาอนุภาคทรงกลม 2 อนุภาคที่มีขนาดเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2 อนุภาคเกิดการแยกจากกันด้วยระยะคงที่ค่าหนึ่งจากพันธะของของเหลว จากการศึกษาของ Stimannaitum^[35] ได้เสนอแบบจำลองเพื่ออธิบายผลของแรงยึดเหนี่ยวรวมทั้งหมดเนื่องจากความชื้นที่เกิดขึ้นซึ่งประกอบด้วยแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากการบดพร่องของความดันและแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำ ดังนี้

$$H = H_K + H_R \quad (3.12)$$

โดยที่

H = แรงยึดเหนี่ยวรวมทั้งหมดเนื่องจากพันธะของของเหลว

H_K = แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากการบดพร่องของความดัน

H_R = แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำ

เมื่อกำหนดให้อยู่ในรูปไร้มิติจะได้

$$F = \frac{H}{d \cdot T} \quad (3.13)$$

$$F_{HK} = \frac{H_K}{d \cdot T} \quad (3.14)$$

$$F_{HR} = \frac{H_R}{d \cdot T} \quad (3.15)$$

โดยที่

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

T = แรงตึงผิวของน้ำ

โดยแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากการบดพร่องของความดันและแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_{HK} = \frac{\pi}{4} \cdot d \cdot \sin^2 \alpha \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.16)$$

$$F_{HR} = \pi \cdot \sin \alpha \cdot \sin(\alpha + \delta) \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$R_1 = \frac{\left(\frac{d}{2}\right) \cdot (1 - \cos \alpha) + \left(\frac{a}{2}\right)}{\cos(\alpha + \delta)} \quad (3.18)$$

$$R_2 = \frac{d}{2} \cdot \sin \alpha + R_1 [\sin(\alpha + \delta) - 1] \quad (3.19)$$

โดยที่

α = มุมเช็กเคอร์

R_1 = รัศมีความโค้งเนื่องจากการบดพร่องของความดัน

R_2 = รัศมีความโค้งเนื่องจากแรงตึงผิวของของเหลว

δ = มุมสัมผัส

a = ระยะห่างระหว่างอนุภาค

พิจารณาสมการที่ (3.16) และ (3.17) จะพบว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคมีค่าสูงขึ้น และเมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาค (a) มีค่าเท่ากับ 10 เฟอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ($0.1d$) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะลดลงจนเป็นศูนย์ และสามารถคำนวณย้อนกลับหาค่ามุม α ได้เท่ากับ 11.3° ดังรูปที่ 3.3 และจากสมมติฐานที่ว่าอนุภาคทรงกลมทั้งหมดอยู่ในสภาวะเปียก ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่ามุม δ เท่ากับ 0°

Stitmannaitum⁽³⁵⁾ ได้เสนอแบบจำลองที่ใช้หาค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสม ดังนี้

$$\sigma_c = \frac{9(1-\varepsilon)}{8\pi d^2} kH \quad (3.20)$$

$$\sigma_{c,partial} = S\sigma_c \quad (3.21)$$

โดยที่

σ_c = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสม

$\sigma_{c,partial}$ = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวในกรณีที่มีความชื้นบางส่วน

ε = สัดส่วนปริมาตรช่องว่าง

k = ค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชัน

H = แรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยที่จุดสัมผัส

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

S = ระดับชั้นการอิมตัวของช่องว่าง

สมมติฐานที่ใช้สำหรับแบบจำลองในการหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมมีดังนี้

1. เมื่อปริมาณน้ำมีค่าน้อยกว่าปริมาณน้ำในสภาวะอิมตัว อนุภาคส่วนใหญ่จะยังคงติดกัน ด้วยเหตุนี้จึงสมมติให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์
2. ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันจะมีค่าต่ำสุดในกรณีสภาวะแห้งและมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผง

3. กรณีที่ปริมาณน้ำมีค่าสูงกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผง ปริมาณน้ำที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลต่อระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาค นั่นคือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันจะมีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดที่ปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผง

โดยค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่ต่ำสุดของวัสดุผงจะคำนวณได้จากค่าสัดส่วนปริมาตรช่องว่างของวัสดุผงตั้งสมการที่ (2.2) และแสดงดังตารางที่ 2.4 สำหรับค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่สูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$k_{max} = \frac{\pi}{w_s} \left(w_s + \frac{1}{\rho} \right) \quad (3.22)$$

ที่ปริมาณน้ำต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บนั้น ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$k = k_{min} + w \left(\frac{k_{max} - k_{min}}{w_s} \right) \quad (3.23)$$

โดยที่

k_{min} = ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่ต่ำสุดเมื่อส่วนผสมอยู่ในสถานะแห้ง

k_{max} = ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่สูงสุดเมื่อปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ

w_s = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

ρ = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผง

w = ปริมาณน้ำในส่วนผสม

การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันเนื่องจากปริมาณน้ำในส่วนผสมนี้แสดงดังรูปที่ 3.4 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในส่วนผสมจะทำให้ระยะห่างและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเปลี่ยนไป การหาค่าระยะห่างระหว่างอนุภาคและสัดส่วนช่องว่างที่เพิ่มขึ้นนี้ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

ที่สถานะอิ่มตัว นั่นคือ $w = w_c$ ปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ

$$V_{ms} = V_{ss} + V_{vs} \quad (3.24)$$

เมื่อ

$$V_{vs} = V_{ss} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right) \quad (3.25)$$

แทนค่าสมการที่ (2.2) และ (3.25) ลงในสมการที่ (3.24) จะได้

$$V_{ms} = V_{ss} \left(1 + \frac{\pi}{k_{max} - \pi} \right) \quad (3.26)$$

โดยที่

V_{ms} = ปริมาตรทั้งหมดที่สภาวะอิ่มตัว

V_{ss} = ปริมาตรของแข็งที่สภาวะอิ่มตัว

V_{vs} = ปริมาตรช่องว่างที่สภาวะอิ่มตัว

เมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมสูงกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บหรือปริมาณน้ำในสภาวะอิ่มตัว จะส่งผลให้เกิดปริมาณน้ำส่วนเกินซึ่งทำให้ปริมาตรช่องว่างโดยรวมมากขึ้น เมื่อไม่คำนึงถึงปริมาตรของอากาศจะได้

$$\Delta V_w = \Delta V_m = \Delta V_v \quad (3.27)$$

โดยที่

ΔV_w = ปริมาณน้ำส่วนเกินจากปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ

ΔV_m = ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของส่วนผสมเนื่องจาก ΔV_w

ΔV_v = ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของช่องว่างเนื่องจาก ΔV_w

เมื่อสมมติให้ปริมาณน้ำกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งส่วนผสม ดังนั้นระยะห่างระหว่างอนุภาคและสัดส่วนช่องว่างที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำส่วนเกินสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$a = 2 \left(\frac{\Delta V_w}{SSB_t} \right) \quad (3.28)$$

และ

$$\mathcal{E} = \frac{V_{vs} + \Delta V_w}{V_{ms} + \Delta V_w} \quad (3.29)$$

เมื่อ

SSB_t = พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคของแข็ง (cm^2/g)

จากสมการที่ (3.28) เมื่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคเท่ากับ $0.1d$ แล้วจะหาปริมาณน้ำสูงสุดที่ทำให้อนุภาคห่างกัน $0.1d$ ได้ดังนี้

$$w_{max} = w_s + \left(\frac{SSB_t \cdot (d/20)}{M} \right) \quad (3.30)$$

เมื่อ

$$M = \text{น้ำหนักอนุภาคของของแข็งในสภาวะแห้ง}$$

เมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่า w_{max} แล้วให้ถือว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการผสมจะมีค่าเท่ากับพลังงานการผสมในสภาวะแห้ง

3.4 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของวัสดุที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ

เนื่องจากเครื่องผสมแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันทั้งขนาด รูปร่างของใบพาย ความเร็วรอบและลักษณะการหมุนของใบพายขณะทำการผสมซึ่งจะทำให้พลังงานที่ใช้ในการผสมที่ได้จากเครื่องแต่ละชนิดแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะอธิบายถึงผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อพลังงานที่ใช้ในการผสมได้จำเป็นต้องใช้เครื่องผสมชนิดเดียวกันจึงจะสามารถทำการเปรียบเทียบผลได้ โดยเครื่องผสมที่ใช้ในการทำแบบจำลองของซีเมนต์เพสต์นี้เป็นชนิด Paddle Type ความจุ 4 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ถ้ากำหนดให้พลังงานที่ใช้ในการผสมประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนอนุภาคของแข็ง โดยเป็นพลังงานที่เอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค และพลังงานที่เอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากพันธะของเหลวแล้ว โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E = E_s + E_w \quad (3.31)$$

เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของตัวประกอบพลังงานจะได้

$$Q = \frac{E}{E_s} = 1 + \frac{E_w}{E_s} \quad (3.32)$$

โดยที่

Q = ตัวประกอบพลังงาน

E = พลังงานการผสมของอนุภาคของแข็งกับน้ำ

E_s = พลังงานการผสมของอนุภาคของแข็งในสภาวะแห้ง

E_w = พลังงานการผสมเนื่องจากผลของพันธะของเหลว

จากการศึกษาหาค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากพันธะของเหลว พบว่า อนุภาคในสภาวะแห้งเมื่อค่อย ๆ เพิ่มปริมาณน้ำลงไป พลังงานการผสมจะเริ่มเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้น โดยพลังงานการผสมจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็งหรือเรียกว่าอยู่ในสภาวะอิ่มตัว หลังจากนั้น หากเพิ่มปริมาณน้ำอีก พลังงานการผสมจะลดลงเนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณน้ำสูงมาก ๆ พลังงานการผสมจะมีค่าคงที่ไม่ลดลงอีก เนื่องจากอนุภาคอยู่ห่างกันมากเกินไปที่จะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคได้

3.4.1 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างกลม ($\psi = 1$)

เนื่องจาก สมการที่ใช้หาค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดังที่กล่าวมา จะอาศัยสมมติฐานที่ว่าอนุภาคของวัสดุผงมีรูปร่างกลม ดังนั้น การสร้างแบบจำลองทำนายพลังงานการผสมควรเริ่มที่วัสดุผงที่มีรูปร่างกลมก่อนซึ่งจะสามารถอธิบายผลเปรียบเทียบกับสมการที่ผ่านมาได้ โดยวัสดุผงที่ใช้ในขั้นตอนนี้คือ แฉะลอยขนาดดั้งเดิม (OFA) และแฉะลอยที่แยกละเอียดครั้งที่ 1 (FA1) ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.4 นำมาทำการทดลองหาค่าพลังงานการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ โดยกำหนดให้ พลังงานการผสมขึ้นกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและค่าตัวประกอบจากชนิดของเครื่องผสมตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_w = K' \sigma_{c, sphere} \quad (3.33)$$

เมื่อ

E_w = พลังงานการผสมในสภาวะเปียก (Wh/l-min)

K' = ค่าตัวประกอบสำหรับเปลี่ยนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเป็นพลังงานการผสม (Wh/l-min)/(N/cm²) โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามลักษณะ รูปร่างของใบพายและชนิดของเครื่องผสมที่ใช้

$\sigma_{c, sphere}$ = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เป็นทรงกลมจากพันธะของเหลว (N/cm²)

โดยสำหรับการวิเคราะห์หาค่า K' จากเครื่องผสมแบบกระทะ (Pan Type Mixer) จากผลการทดลองของ Stitmannaitum⁽³⁵⁾ ได้ค่า $K' = 0.148$ (Wh/l-min)/(N/cm²) ดังรูปที่ 3.6 สำหรับเครื่องผสมแบบใบพาย (Paddle Type Mixer) ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ซึ่งมีความแตกต่างจากเครื่องผสมแบบกระทะ เนื่องจากลักษณะและการเคลื่อนที่ของใบพายที่ใบพายจะเคลื่อนที่ทั้งรอบแกนหลักและรอบตัวเองจึงทำให้ใบพายไม่เกิดการสัมผัสกับส่วนผสมตลอดหน้าตัดของใบพาย รวมทั้งรูปร่างของใบพายยากต่อการวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่กระทำต่อส่วนผสม ดังนั้น จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบ (K') ที่ใช้ในการแปลงหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมเป็นพลังงานการผสมใหม่ ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ค่า K' ของแฉะลอยขนาดดั้งเดิมและแฉะลอยที่แยกละเอียดครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากันและเป็นค่าคงที่ นั่นคือ $K' = 0.135$ (Wh/l-min)/(N/cm²) ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งอธิบายได้ว่า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ใช้ทำนายเนื่องจากรูปร่างของอนุภาคมีความใกล้เคียงทรงกลมและพฤติกรรมของเพสต์ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ ไม่ส่งผลต่อแรงกระทำและลักษณะการหมุนของใบพายจากเครื่องผสม ค่า K' ซึ่งเป็นผลของเครื่องผสมที่ได้จึงเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึงสามารถทำนายค่าพลังงานในการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ ได้ โดยรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะเป็นค่าพลังงานการผสมจากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองสำหรับแฉะลอยขนาดดั้งเดิมและแฉะลอยที่แยกละเอียดครั้งที่ 1 ตามลำดับ

3.4.2 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม

วัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC-I) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (OPC-III) ปูนซีเมนต์ผสม (MC) ฝุ่นหินปูน (OLP) และผงซิลิกา (SF) ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังทำการทดลองหาพลังงานการผสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง 2 ชนิด

ผสมกัน โดยวัสดุผงชนิดหลักเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้เถ้าลอยขนาดคั้งเดิมและฝุ่นหินปูนมาแทนที่โดยน้ำหนัก ซึ่งจะประกอบด้วยวัสดุผงอีก 3 ประเภทคือ ใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (OFA40) ใช้ฝุ่นหินปูนแทนที่ร้อยละ 10 (OLP10) และใช้ฝุ่นหินปูนแทนที่ร้อยละ 20 (OLP20) แต่ในการวิเคราะห์พลังงานการผสมเพศต์ที่ใช้วัสดุผง 2 ชนิดนั้น จะต้องทำการคำนวณคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผงรวมเช่น ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมใหม่ โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$\text{สำหรับความถ่วงจำเพาะ :} \quad SG = v_1 SG_1 + v_2 SG_2 \quad (3.34)$$

$$\text{สำหรับความละเอียด :} \quad SSB = w_1 SSB_1 + w_2 SSB_2 \quad (3.35)$$

$$\text{สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม :} \quad \psi = v_1 \psi_1 + v_2 \psi_2 \quad (3.36)$$

โดยที่

v_1, v_2 = สัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

w_1, w_2 = สัดส่วนน้ำหนักของวัสดุผงชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

SG, SG_1, SG_2 = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผงรวม วัสดุผงชนิดที่ 1 และ ชนิดที่ 2 ตามลำดับ

SSB, SSB_1, SSB_2 = พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุผงรวม วัสดุผงชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

ψ, ψ_1, ψ_2 = ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผงรวม วัสดุผงชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ทำนายพลังงานการผสมเพศต์ที่มีวัสดุผงที่เป็นเหลี่ยมมุมนั้นจะต้องทำการปรับปรุงแบบจำลองที่ใช้ทำนายพลังงานการผสมในสมการที่ (3.33) ใหม่เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้หาค่า σ_c นั้นอาศัยสมมติฐานที่ว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลมซึ่งทำให้หน่วยแรงจากแบบจำลองมีความแตกต่างไปจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง โดยการวิเคราะห์พฤติกรรมจริงสำหรับเพศต์ที่ใช้วัสดุผงที่เป็นเหลี่ยมมุมนั้นค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนไปกว่าเพศต์ที่ใช้วัสดุผงรูปร่างกลม เนื่องจากพฤติกรรมของเพศต์ที่ส่งผลต่อพลังงานการผสมจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอย่างชัดเจนคือ พฤติกรรมในช่วงปริมาณน้ำต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บและพฤติกรรมในช่วงปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ หากใช้สมมติฐานที่ว่าค่า K' จะคงที่เมื่อใช้เครื่องผสมแบบเดียวกัน ดังนั้น แบบจำลองใหม่สำหรับเพศต์ที่ใช้วัสดุผงที่เป็นเหลี่ยมมุมจึงเป็นดังนี้

$$E_w = K' \sigma_{c,angular} \quad (3.37)$$

และ

$$\sigma_{c,angular} = \alpha_\psi \sigma_{c,sphere} \quad (3.38)$$

เมื่อ

E_w = พลังงานการผสมในสภาวะเปียก (Wh/l-min)

K' = ค่าตัวประกอบสำหรับเปลี่ยนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเป็นพลังงานการผสม (Wh/l-min)/(N/cm²) โดยมีค่าเท่ากับ 0.135 (Wh/l-min)/(N/cm²) จากการทดลองในกรณีของเถ้าลอย

$\sigma_{c,angular}$ = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมจากพันธะของเหลว (N/cm²)

α_ψ = ค่าประกอบที่ใช้แปลงค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคที่เป็นทรงกลมไปเป็นหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมซึ่งขึ้นกับปริมาณน้ำในส่วนผสมและสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาค

โดยที่ค่า α_ψ จะแบ่งเป็น 2 ช่วง ดังนี้

1. เมื่อปริมาณน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ ($w \leq w_s$)

$$\alpha_\psi = 1.167\psi - 0.167 \quad (3.39)$$

2. เมื่อปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ ($w > w_s$)

$$\alpha_\psi = (1.167\psi - 0.167) + 21.185(\psi - 1)(w - w_s) \quad (3.40)$$

เมื่อ

ψ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาค

w = ปริมาณน้ำในส่วนผสม (เป็นสัดส่วนโดยน้ำหนัก)

w_s = ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผง (เป็นสัดส่วนโดยน้ำหนัก)

ค่า α_ψ ที่ได้ดังกล่าว จะสอดคล้องกับพฤติกรรมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่เป็นเหลี่ยมมุมซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อปริมาณน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ ($w \leq w_s$)

ที่สภาวะนี้ ปริมาณน้ำยังไม่เข้าไปเติมเต็มปริมาณช่องว่างทั้งหมดจึงยังคงมีช่องว่างระหว่างอนุภาคอยู่ ส่วนผสมจึงยังไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันและอนุภาคแต่ละอนุภาคยังถือว่าอยู่ติดกัน ดังนั้น นอกจากการผสมจากเครื่องผสมที่เอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแล้วยังต้องเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคด้วย ซึ่งสำหรับวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมนี้หน่วยแรงเสียดทานถือเป็นแรงที่ไม่สามารถตัดทิ้งได้ แต่เนื่องจากการวิเคราะห์หาหน่วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นทำได้ยากเพราะอนุภาคมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาพพื้นผิวของอนุภาคด้วย ดังนั้น จึงใช้วิธีเพิ่มค่าจากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคด้วยตัวคูณ (α_ψ) แทนซึ่งทำให้การสร้างแบบจำลองนั้นง่ายและสะดวกขึ้น และจากสาเหตุที่ว่าอนุภาคแต่ละอนุภาคยังอยู่ติดกันจึงสามารถประมาณได้ว่าค่า α_ψ มีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม (ψ) ของอนุภาค ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากผลการทดลองซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 และสมการที่ (3.39) ข้างต้น

จากสมการที่ (3.39) จะได้ว่าเมื่ออนุภาคมีรูปร่างกลม ($\psi = 1$) ค่า α_ψ จะมีค่าเท่ากับ 1 นั่นคือไม่เกิดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค และสามารถสรุปได้ว่า เมื่ออนุภาคมีค่า ψ เท่ากับ 1.86 จะทำให้ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าสูงจนเท่ากับค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค

2. เมื่อปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ ($w > w_c$)

เมื่อปริมาณน้ำเข้าแทรกเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคแล้วและหากมีปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นอีก ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้อนุภาคแต่ละอนุภาคเริ่มแยกตัวออกจากกัน ที่สภาวะนี้ถือว่าเพสต์มีสถานะเป็น พลาสติกซึ่งเป็นสภาวะที่แตกต่างไปจากกรณีที่มีปริมาณน้ำน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ สำหรับวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ได้จากแบบจำลอง กล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคมากขึ้นหน่วยแรงจากแบบจำลองจะมีค่าลดลงมากกว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าที่สภาวะพลาสติก ส่วนผสมจะมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดแบบพลาสติก ซึ่งความหนืดของส่วนผสมจะขึ้นกับชนิดของอนุภาคของแข็งและปริมาณน้ำเป็นหลัก และจากแบบจำลองที่ใช้ทำนายหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC-I) พบว่าช่วงปริมาณน้ำที่ทำให้อนุภาคเริ่มแยกจากกันจนถึงระยะ 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยนั้นคือ $w/c = 0.24 - 0.33$

จากการศึกษาของ Jones และ Taylor⁽⁴⁴⁾ พบว่าที่ปริมาณน้ำช่วงนี้ซีเมนต์เพสต์ยังมีค่าความหนืดพลาสติกที่สูงและค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 3.11 ดังนั้น ค่าความหนืดที่ยังคงสูงอยู่นี้จะทำให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคไม่ได้ลดลงไปตามแบบจำลองเดิม ในขณะที่การศึกษาของ Brown⁽⁴⁵⁾ พบว่าการใส่เม็ดถ่านหินลงแทนที่ซีเมนต์ทำให้ค่าความหนืดพลาสติกลดลง ดังรูปที่ 3.12 โดยเม็ดถ่านหินนั้นมีคุณสมบัติในการลดน้ำของส่วนผสมลงได้ นั่นคือ เม็ดถ่านหินมีรูปร่างที่กลมกว่าซีเมนต์ จึงทำให้สรุปได้ว่าเพสต์ที่มีวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมากขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดพลาสติกมีค่าสูงขึ้นด้วย

ด้วยเหตุผลข้างต้น ค่า α_ψ ที่ได้จากการทดลองจึงมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงปริมาณน้ำที่ทำให้อนุภาคห่างกัน 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยและยังขึ้นกับรูปร่างของอนุภาคอีกด้วย โดยค่า α_ψ จะมีค่าสูงขึ้นตามค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาค ดังสมการที่ (3.40)

กล่าวโดยสรุป ค่า α_ψ นั้นจะใช้สำหรับเพิ่มค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในกรณีของเพสต์ที่มีวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม โดยค่า α_ψ จะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาค และจะแยกพิจารณาเป็น 2 ช่วง คือ ปริมาณน้ำน้อยกว่าและมากกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยคำนวณได้ดังสมการที่ (3.39) และ (3.40) ตามลำดับ จากลักษณะของสมการจะทำให้ได้กราฟในรูปแบบของเส้นตรง 2 เส้นที่มีจุดตัดกันที่ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ (w_c) ซึ่งเป็นจุดแบ่งช่วงพฤติกรรมของเพสต์ที่ต่างกัน โดยรูปที่ 3.13 จะแสดงค่า α_ψ ที่วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3.39) และ (3.40) เมื่อวัสดุผงมีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมต่าง ๆ กัน โดยจากสมการจะสังเกตได้ว่าค่า α_ψ จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่ออนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม ($\psi = 1$)

เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่า α_ψ ได้แล้ว ดังนั้นจะสามารถทำนายค่าพลังงานในการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ ได้ ในรูปที่ 3.14 จะเป็นรูปที่เปรียบเทียบพลังงานการผสมของเพสต์ OPC-I จากผลการทดลองจริงและจากแบบจำลองทั้ง 2 แบบ คือ แบบจำลองที่สมมติให้อนุภาคเป็นทรงกลมและแบบจำลองที่ใช้ค่าตัวประกอบ α_ψ เพิ่มค่าให้กับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ซึ่งพบว่า ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากกว่าแบบจำลองแบบเดิม ในรูปที่ 3.15 – 3.20 จะเป็นผลเปรียบเทียบระหว่างพลังงานการผสมจริงและพลังงานการผสมจาก

แบบจำลองที่ใช้ค่า α_w ของเพศที่ใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (OPC-III) ซีเมนต์ผสม (MC) ฝุ่นหินปูน (OLP) วัสดุผง OLP10, OLP20 และ OFA40 ตามลำดับ

3.4.3 ผลเปรียบเทียบพลังงานการผสมเพศที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า พลังงานการผสมในกรณีของเพศจะขึ้นกับปริมาณน้ำในส่วนผสม รูปร่างและความละเอียดของวัสดุผงเป็นหลัก โดยที่รูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุมมากขึ้นจะใช้พลังงานการผสมที่สูงขึ้น แต่สำหรับรูปร่างที่เหมือนกัน วัสดุผงที่มีความละเอียดมากกว่าจะใช้พลังงานในการผสมที่มากกว่า โดยค่าพลังงานการผสมในสภาวะแห้งและสภาวะอิมตัวของวัสดุผงต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3.1 พบว่า พลังงานการผสมในสภาวะแห้งและอิมตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผงดังรูปที่ 3.21 และ 3.22

หากพิจารณาพลังงานการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ ของวัสดุผงที่มีรูปร่างเหมือนกัน แต่มีความละเอียดที่ต่างกัน โดยเลือกใช้ถ้ำลอย OFA และ FA1 ซึ่งมีรูปร่างกลมเหมือนกันแต่ถ้ำลอย OFA มีความละเอียดมากกว่าคือมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $2169 \text{ cm}^2/\text{g}$ ในขณะที่ถ้ำลอย FA1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $1733 \text{ cm}^2/\text{g}$ พบว่า ถ้ำลอย OFA ใช้พลังงานการผสมมากกว่าประมาณ 20% ที่ระดับชั้นความอิมตัวเท่ากัน ดังรูปที่ 3.23 ในขณะที่พลังงานการผสมของวัสดุผง OPC-I และ OPC-III ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมเท่ากับ 1.9 และ 2.2 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานการผสมของ OFA ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.24 และเมื่อนำผลของความละเอียดและผลของรูปร่างของวัสดุผงมาวิเคราะห์หาค่าพลังงานการผสมที่สภาวะอิมตัวตามแบบจำลอง จะได้ว่ารูปที่ 3.25 ซึ่งเป็นพลังงานการผสมของเพศที่ใช้วัสดุผงที่มีความละเอียดและค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมต่าง ๆ จากรูปทำให้สรุปได้ว่า ที่ความละเอียดเท่ากันพลังงานการผสมจะมากขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผงสูงขึ้น แต่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมมีค่าสูงคือมากกว่า 1.7 ค่าพลังงานการผสมจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักแต่ยังมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อย

3.5 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ

สำหรับการทดลองหาค่าพลังงานการผสมมอร์ตาร์นั้น จะใช้เครื่องผสมแบบ Paddle Type ความจุ 20 ลิตร ดังรูปที่ 3.26 สำหรับทรายที่ใช้ในการทดลองจะเป็นทรายที่ใช้สัญลักษณ์ว่า ทราย ซึ่งมีขนาดคละตามตารางที่ 3.2 และคุณสมบัติพื้นฐานตามตารางที่ 3.3 สำหรับการสร้างแบบจำลองในการทำนายพลังงานการผสมโดยหลัก ๆ แล้วจะอาศัยวิธีการหาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและการแปลงค่าหน่วยแรงเป็นพลังงานการผสมโดยใช้ค่า α_w เหมือนกับในกรณีของเพศ แต่ค่า K' จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากลักษณะของใบพายที่ใช้ในการผสมและเครื่องผสมแตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองจะได้ค่า K' เท่ากับ $0.1 \text{ (Wh/l-min)/(N/cm}^2)$ ในการหาค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของมอร์ตาร์นั้นจะแยกพิจารณาเพิ่มอีก 2 กรณี จากการศึกษาของ Stitmannaitum⁽³⁵⁾ กล่าวคือ เป็นมอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณสูงและในปริมาณต่ำ โดยจะแบ่งช่วงดังกล่าวที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผงต่ออนุภาคของแข็งทั้งหมด (n_p) เท่ากับ 0.25 ซึ่งจะเป็นปริมาณวัสดุผงที่มากเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคของ

ทรายอยู่ห่างกันเป็นระยะ 10% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย โดยหลักการพิจารณาพลังงานการผสมทั้ง 2 กรณีเป็นดังนี้

3.5.1 มอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณสูง ($n_p > 0.25$)

ในกรณีนี้ถือว่าวัสดุผงมีปริมาณที่มากพอจนถือเป็นตัวแทนของส่วนผสม ดังนั้นวัสดุผงจะเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ส่วนอนุภาคของทรายนั้นถือว่ามีผลน้อยและสามารถตัดทิ้งได้ การเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคนั้นจะเกิดจากปริมาณน้ำอิสระที่มาจากผลของวัสดุผงเพียงอย่างเดียว

โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงประสิทธิผล, $(w/p)_{eff}$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\left(\frac{w}{p}\right)_{eff} = \frac{W_{total} - \Delta W}{M_p} \quad (3.41)$$

โดยที่

W_{total} คือ ปริมาณน้ำในส่วนผสม

ΔW คือ ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็งอื่น ๆ ที่ไม่ใช่วัสดุผง

M_p คือ น้ำหนักของวัสดุผงในส่วนผสม

เมื่อไม่คิดผลของมวลรวมละเอียดที่มีต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ดังนั้น ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เพียงพอจะทำให้อนุภาคอิมมัตว์และปริมาณน้ำสูงสุดที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคหมดไปจะใช้ค่าที่ได้จากวัสดุผงคือ

$$\left(\frac{w}{p}\right)_{eff,s} = \left(\frac{w}{p}\right)_s = \gamma_p \quad (3.42)$$

และ

$$\left(\frac{w}{p}\right)_{eff,max} = \left(\frac{w}{p}\right)_{max} \quad (3.43)$$

สำหรับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุดนั้น ให้พิจารณาจากวัสดุผงซึ่งเป็นตัวแทนของส่วนผสม

3.5.2 มอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณต่ำ ($n_p < 0.25$)

ในกรณีนี้มีมอร์ตาร์จะมีปริมาณของทรายนมาก การพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจึงต้องพิจารณาทั้งผลของทรายและวัสดุผงร่วมกัน โดยเริ่มจากปริมาณน้ำที่สภาวะอิมมัตว์จะมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$V_{ws} = \gamma_s M_s + \gamma_p M_p \quad (3.44)$$

โดยที่

V_{ws} = ปริมาณน้ำที่จะทำให้อนุภาคของแข็งอึดตัว

M_s = น้ำหนักของทรายในส่วนผสม

ในการคำนวณหาค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันต่ำสุดและพื้นที่ผิวของส่วนผสมนั้น จะใช้ทรายเป็นตัวแทนของส่วนผสม ดังนี้

$$k_{min} = \frac{\pi \rho_s}{\rho_s - W_{us}} \quad (3.45)$$

$$SSB_t = \frac{6}{\rho \cdot d_{av}} \quad (3.46)$$

เมื่อ

ρ_s = ความถ่วงจำเพาะของทราย

W_{us} = หน่วยน้ำหนักของทราย

โดยมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดลองจะประกอบด้วยมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุผง PCI, OFA และ OLP ซึ่งมีสัดส่วนผสมตามตารางที่ 3.4 โดยวัสดุผงทั้งหมดจะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในส่วนผสมที่ค่า $n_p = 0.31$ เพื่อหาพลังงานในการผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ โดยผลการทดลองที่ได้เทียบกับแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.27–3.29 ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า n_p ต่ำ ๆ ทำการทดลองโดยใช้วัสดุผง OFA ซึ่งใช้ค่า $n_p = 0.23$ ผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายแสดงดังรูปที่ 3.30 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดลองจริงของวัสดุผงทั้ง 3 ชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

3.6 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ

สำหรับการผสมคอนกรีต จะใช้เครื่องผสมแบบกระเทาะขนาดความจุประมาณ 150 ลิตร ดังรูปที่ 3.31 ดังนั้นหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากพันธะของของเหลวจะส่งผลต่อแรงต้านที่กระทำกับใบพายที่ใช้ผสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากรูปร่างและลักษณะการวางตัวของใบพาย โดยที่สมมติให้ปริมาตรการผสมไม่ส่งผลต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค แต่ทั้งนี้ปริมาตรการผสมต้องมีปริมาณมากพอที่ทำให้ส่วนผสมทั้งหมดมีความสูงเกินความสูงในแนวตั้งของใบพายแต่ต้องไม่เกินความสูงสูงสุดของเครื่องผสมที่จะรับได้ ซึ่งจะทำให้แรงต้านที่กระทำต่อใบพายมีค่าคงที่ในทุกปริมาตรการผสม

พิจารณารูปที่ 3.32 แสดงถึง แรงที่กระทำกับใบพายประกอบด้วย 2 ส่วนคือ แรงที่กระทำกับใบพายในทิศทางของแรงเฉือน

$$S_i = \frac{\sigma}{2} \sin(180 - 2\omega_i) A_i = \frac{\sigma}{2} \sin(2\omega_i) A_i \quad (3.47)$$

แรงที่กระทำกับใบพายในทิศทางตั้งฉาก

$$N_i = \frac{\sigma}{2} (1 - \cos(180 - 2\omega_i)) A_i = \frac{\sigma}{2} (1 + \cos(2\omega_i)) A_i \quad (3.48)$$

โดยที่

S_i = แรงเฉือนที่กระทำบนใบพาย i

N_i = แรงตั้งฉากที่กระทำบนใบพาย i

A_i = พื้นที่สัมผัสระหว่างใบพาย i กับส่วนผสม

ω_i = มุมเอียงของใบพาย i จากแนวตั้ง

σ = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสม

เครื่องผสมจะก่อให้เกิดแรงบิดในการเคลื่อนใบพาย เท่ากับ

$$T_i = \sum_{j=1}^2 (S_{ij} + N_{ij}) l_{ij} \quad (3.49)$$

เมื่อ l_{ij} คือ ความยาวแขนของใบพาย i

สำหรับแรงเฉือนและแรงตั้งฉากที่สัมพันธ์กับแต่ละความยาวแขนเป็นดังนี้

$$S_{ij} = \frac{\sigma}{2} \sin(2\omega_i) A_i \varphi_{ij} \quad (3.50)$$

$$N_{ij} = \frac{\sigma}{2} (1 + \cos(2\omega_i)) A_i \mathcal{G}_{ij} \quad (3.51)$$

โดยที่

i คือ ใบพายที่ i

j คือ ความยาวแขนหลัก(1) และความยาวแขนรอง(2)ของใบพาย

φ_{ij} คือ ค่าการกระจายแรงของแรงเฉือนซึ่งขึ้นกับลักษณะของใบพาย

\mathcal{G}_{ij} คือ ค่าการกระจายแรงของแรงตั้งฉากซึ่งขึ้นกับลักษณะของใบพาย

ดังนั้น แรงบิดทั้งหมดจะเท่ากับ

$$T = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 (S_{ij} + N_{ij}) l_{ij} \quad (3.52)$$

หากเครื่องผสมมีความเร็วรอบซึ่งถือเป็นความเร็วเชิงมุมของใบพายเท่ากับ Ω จะคำนวณหางานทั้งหมดจากแรงบิดได้เท่ากับ

$$P = T\Omega \quad (3.53)$$

โดยที่

P คือ งานจากแรงบิด มีหน่วยเป็น N-m/sec

Ω คือ ความเร็วรอบของเครื่องผสม

ทั้งนี้ งานจากแรงบิดสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้จากสูตร $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ N-m/sec}$ ดังนั้นเมื่อทราบลักษณะการเรียงตัวและขนาดต่าง ๆ ของใบพายจะสามารถทำนายพลังงานการผสมของส่วนผสมใด ๆ ได้ สำหรับการผสมคอนกรีตนั้น พลังงานที่ใช้ผสมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานในการเคลื่อนอนุภาคของแข็งในสภาวะแห้งกับพลังงานในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่อยู่ในส่วนของมอร์ตาร์ โดยพลังงานการผสมในส่วนของมอร์ตาร์นั้นสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองในกรณีของมอร์ตาร์ที่ผ่านมา การผสมในกรณีของคอนกรีตนี้พลังงานการผสมในสภาวะแห้งจะมีค่ามากกว่าพลังงานในการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวในส่วนของมอร์ตาร์ กล่าวคือ พลังงานการผสมในสภาวะแห้งจะมีค่าประมาณ 50% ถึง 75% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด เทียบกับพลังงานการผสมในสภาวะแห้งของมอร์ตาร์ที่มีค่าเพียง 10% ถึง 40% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด จึงสามารถกล่าวได้ว่าการผสมคอนกรีตนั้น พลังงานที่ใช้ในการผสมส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่อนุภาคมากกว่าพลังงานที่เอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ดังนั้น แบบจำลองในการหาพลังงานการผสมจึงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{wm,conc} = E_{m,conc} + n_m E_{w,mortar} \quad (3.54)$$

เมื่อ

$E_{wm,conc}$ = พลังงานทั้งหมดในการผสมคอนกรีต

$E_{m,conc}$ = พลังงานในการผสมคอนกรีตในสภาวะแห้ง

$E_{w,mortar}$ = พลังงานการผสมเพิ่มเติมเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในส่วนของมอร์ตาร์

n_m = สัดส่วนปริมาตรของแข็งของมอร์ตาร์ในคอนกรีต

สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองจะใช้วัสดุ OPC-I, OPC-III และ OFA40 ที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 3.4 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ว่า C1, C2 และ C3 ตามลำดับ แต่ใช้ค่า $(w/c)_{eff} = 0.31$ เหมือนกัน โดยผลการทดลองของพลังงานการผสมในสภาวะแห้งและพลังงานเฉลี่ยของส่วนผสมดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 3.5 ซึ่งพลังงานการผสมที่ได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองในสมการที่ (3.54) แสดงดังรูปที่ 3.33 - 3.35 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพลังงานการผสมที่ได้จากแบบจำลองสามารถทำนายพลังงานการผสมจริงได้ โดยพลังงานการผสมของคอนกรีต OPC-III มีค่ามากที่สุดคือเท่ากับ 0.889 Wh/l-min ในขณะที่พลังงานการผสมคอนกรีต OPC-I และ OFA40 จะมีค่ารองลงมาคือเท่ากับ 0.582 Wh/l-min และ 0.451 Wh/l-min ตามลำดับ นั่นคือ รูปร่างและความละเอียดของวัสดุส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการผสมทั้งกรณีของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต

3.7 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของส่วนผสมที่ใสสารลดน้ำอย่างมาก

ในงานคอนกรีต สารลดน้ำอย่างมากจะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. ช่วยลดปริมาณน้ำในส่วนผสมลงได้ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตยังคงเดิม
2. ทำให้ค่าการยุบตัวมากขึ้นเมื่อใช้สัดส่วนการผสมเดียวกัน
3. ทำให้ต้องการใช้ปริมาณซีเมนต์น้อยลงในขณะที่ค่ากำลังอัดยังคงเดิม

สำหรับส่วนผสมที่มีสารลดน้ำอย่างมายนั้น พบว่า สารลดน้ำอย่างมากมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลงเนื่องจากโครงสร้างที่เกาะยึดกันเป็นกลุ่มถูกทำลายลงซึ่งจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผง ขนาดคละ ลักษณะรูปร่างรวมไปถึงความเข้มข้นและประจุที่เกิดจากตัวอิเล็กโตรไลต์ของสารลดน้ำอย่างมากที่ใช้ สำหรับสาเหตุที่แรงยึดเหนี่ยวลดลงนั้นประกอบด้วยผลของการลดลงของค่าแรงดึงผิวของน้ำและผลเนื่องจากแรงผลักทางไฟฟ้าที่เกิดจากสารลดน้ำอย่างมากโดยตรง สำหรับผลของค่าแรงดึงผิวของน้ำที่ลดลงนั้น จากการทดลองหาค่าแรงดึงผิวของน้ำที่มีสารลดน้ำอย่างมากรชนิดเบสแลมินิกพอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (ชื่อทางการค้าคือ SIKAMENT FF) ด้วยเครื่องมือ Du Nuoy Ring Tensiometer ดังรูปที่ 3.36 พบว่า แรงดึงผิวของน้ำมีค่าลดลงไม่มากนักคือประมาณ 15% ด้วยเหตุนี้ Aitcin, P.C.⁽⁴⁶⁾ จึงสรุปว่า การลดลงของแรงดึงผิวนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้าที่เกิดจากสารลดน้ำอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่พิจารณาการลดลงของแรงดึงผิวของน้ำ

ส่วนผลจากแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้านั้น สารลดน้ำอย่างมากจะทำให้เกิดแรงผลักอยู่ 2 ชนิด คือ

1. แรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้า แรงผลักนี้เกิดจากค่าศักย์ที่ผิวของอนุภาคซีเมนต์ซึ่งเป็นผลจากการดูดติดของสารลดน้ำอย่างมากบนผิวอนุภาคซีเมนต์ โดยอนุภาคของสารลดน้ำอย่างมากจะหันด้านที่มีขั้วลบซึ่งเป็นส่วนหางของสารลดน้ำอย่างมากไปยังผิวอนุภาคซีเมนต์และจะดูดติดหนาแน่นด้วยความหนาในระดับโมเลกุล ชั้นนี้จะถูกเรียกว่าชั้นเสตริ่น การคำนวณหาแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ Flatt⁽⁴⁷⁾ ได้เสนอสูตรที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

$$F_{ES} \cong -2\pi\epsilon\epsilon_0\bar{a}\psi^2 \frac{Ke^{-\kappa h}}{(1+e^{-\kappa h})} \quad (3.55)$$

โดยที่

ϵ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ชั้นคู่ทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของน้ำ

ϵ_0 คือ สภาพยอมของสูญญากาศ

$\bar{a} = \frac{2a_k a_1}{a_k + a_1}$ คือ รัศมีเฉลี่ยแบบฮาร์โมนิคของอนุภาคระหว่างรัศมี a_k และ a_1

ψ คือ ค่าศักย์สถิตย์ทางไฟฟ้า

κ' คือ ความยาวของเด็บ

h คือ ระยะห่างระหว่างอนุภาค

เมื่อความยาวของเด็บ สามารถคำนวณได้จาก

$$K^{-1} = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 k_B T}{2e^2 z_+^2 z_-^2 n_+}} \quad (3.56)$$

โดยที่

- k_B คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์
- T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
- e คือ ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
- z คือ ค่าวาเลนซ์ของอิเล็กโตรไลต์ที่สมมาตร
- h คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กโตรไลต์

ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งในการคำนวณหาค่าแรงผลักระหว่างไอออนคือ การหาค่าศักย์ไฟฟ้า (ψ) ซึ่งตามทฤษฎีจะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขอบนอกของชั้นสเตรนแต่ในด้านการทดลองไม่สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณนี้ได้ โดยสามารถหาได้ที่บริเวณระยะนาบที่เกิดแรงเฉือนหรือค่าศักย์เซต้า ซึ่งอยู่ห่างจากชั้นสเตรนออกไป ดังนั้นจะทำให้ค่าแรงผลักระหว่างไอออนมีค่าต่ำกว่าความจริง

2. แรงผลักระหว่างไอออน แรงนี้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างชั้นที่ดูดติดกันเองของสารลดน้ำอย่างมาบนอนุภาคซีเมนต์ โดยจะเกิดขึ้นทันทีที่มีการซ้อนทับกันของชั้นที่ดูดซึมเหล่านี้ Uchikawa Hanehara และ Sawaki⁽⁴⁸⁾ พบว่าแรงผลักระหว่างไอออนจะมีค่ามากสำหรับสารลดน้ำอย่างมาบที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นโพลีคาร์บอเนต ซึ่งสารประกอบหลักเป็นกรดอะคริลิก แต่ในกรณีที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นเมลามีนหรือแนฟทาลินฟอร์มาลดีไฮด์คอนเดนเสทจะมีผลเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสารลดน้ำชนิดที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นอะคริลิกนั้นจะประกอบด้วยกลุ่มของคาร์บอกซิลซึ่งเป็นกลุ่มที่มีประจุลบเพียงเล็กน้อยและที่สำคัญคือ โครงสร้างโมเลกุลเป็นลักษณะโซ่ตรงยาวของอะตอมคาร์บอนและมีโซ่แตกแขนงไปด้านข้าง การแตกแขนงของโซ่ด้านข้างนี้ส่งผลให้เกิดชั้นที่มีความหนาแน่นสูงเหลื่อมล้ำกันที่ผิวของอนุภาคซีเมนต์ โดยการเหลื่อมล้ำกันจะส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างไอออน อย่างไรก็ตามแรงผลักระหว่างไอออนนี้สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_{Ste} = \bar{a} \frac{6\pi k_B T}{s^2} \left[\left(\frac{2L}{h} \right)^{5/3} - 1 \right] \quad (3.57)$$

โดยที่

- L คือ ความหนาแน่นสูงสุดของชั้นที่ดูดติดสารลดน้ำอย่างมาบ
- s คือ ระยะห่างระหว่างโครงสร้างรูปเห็ดของกรดโพลีอะคริลิกที่เกิดจากการดูดซึมสารลดน้ำอย่างมาบ

จะเห็นได้ว่า การคำนวณแรงผลักระหว่างไอออนเนื่องจากสารลดน้ำอย่างมาบนั้นค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน และการใช้สารลดน้ำอย่างมาบคนละชนิดกันจะทำให้ค่าแรงผลักระหว่างไอออนไม่เท่ากันด้วย ด้วยเหตุนี้ นิพนธ์⁽³⁶⁾ จึงเสนอผลของสารลดน้ำอย่างมาบต่อการลดลงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในรูปของค่าตัวประกอบแรง

ผลึก โดยศึกษาในกรณีที่ใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างเดียว ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงระหว่างอนุภาคจะเป็นดังนี้

$$\sigma_{c.sp} = \left(\frac{1}{\phi_{rep}} \right) \sigma_c \quad (3.58)$$

โดยที่

$\sigma_{c.sp}$ = ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเมื่อมีสารลดน้ำอย่างมาก

ϕ_{rep} = ค่าตัวประกอบแรงผลึก

σ_c = ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากพันธะของเหลว

แต่สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมกนั้น ค่า σ_c จะคำนวณโดยใช้ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุดใหม่ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์มีค่าลดลงดังนั้นค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันจะมีค่าสูงขึ้นซึ่งสามารถคำนวณได้โดยปรับปรุงสมการที่ (3.22) ใหม่เป็นดังนี้

$$k_{max} = \frac{\pi}{(\phi_{sp} w_s)} \left(\phi_{sp} w_s + \frac{1}{\rho} \right) \quad (3.59)$$

เมื่อ

k_{max} = ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุด

ϕ_{sp} = ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

w_s = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่สูงขึ้นนี้เป็นผลจากการที่สารลดน้ำอย่างมกมีคุณสมบัติในการกระจายอนุภาคซีเมนต์จึงทำให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นและส่งผลให้ปริมาตรช่องว่างโดยรวมต่ำลง นั่นคือทำให้ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงขึ้น จากผลการวิเคราะห์ของนิพนธ์⁽³⁶⁾ ซึ่งใช้สารลดน้ำอย่างมกชนิดเมลามีนพอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท พบว่า ค่าตัวประกอบแรงผลึกจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมกและอัตราส่วนน้ำอิสระต่อซีเมนต์ดังนี้

$$\phi_{rep} = \left(1 + a \left(\frac{w}{c} \right)_{free}^m \right) \quad (3.60)$$

โดยที่

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

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

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

เมื่อ X_{SP} = ปริมาณสารลดน้ำอย่างมก (% โดยน้ำหนักของซีเมนต์)

สมการที่ (3.60) นี้สามารถใช้ได้ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ไม่เกิน 10% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคซีเมนต์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบแรงผลึกของซีเมนต์เพสต์ที่ปริมาตรสารลดน้ำอย่างมากเท่ากับ 0.3%, 0.4% และ 1.2% กับปริมาณน้ำอิสระต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.37 จากรูปจะพบว่าเมื่อปริมาณน้ำอิสระสูงขึ้น ค่าตัวประกอบแรงผลึกมีค่าลดลงซึ่งอธิบายได้ว่าที่ปริมาณน้ำอิสระสูง ๆ นี้ พลังงานการผสมจะมีค่าที่ต่ำมากอยู่แล้ว การใส่สารลดน้ำอย่างมากจึงช่วยลดพลังงานการผสมได้อีกเพียงเล็กน้อยซึ่งต่างจากในสภาวะที่ปริมาณน้ำอิสระมีค่าต่ำ พลังงานการผสมจะมีค่าสูงดังนั้นการใส่สารลดน้ำอย่างมากจะช่วยลดพลังงานการผสมได้มาก ค่าตัวประกอบแรงผลึกในกรณีนี้จึงมีค่าสูง โดยการใส่สารลดน้ำอย่างมากในปริมาณที่มากขึ้นจะช่วยลดพลังงานการผสมลงได้ แต่กรณีที่ใส่ในปริมาณที่มากเกินไปกว่า 0.4% พบว่า ประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างมากในการลดพลังงานการผสมจะไม่ขึ้นตรงกับปริมาณที่ใส่ซึ่งจะเห็นได้จากค่าตัวประกอบการลดลงของพลังงานการผสมมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับเพสต์ที่ใช้วัสดุผงชนิดอื่นจะศึกษาเพียงการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์เท่านั้นซึ่งเถ้าลอยถือเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน จากหัวข้อที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อพลังงานการผสมพบว่า การใส่เถ้าลอยสามารถลดพลังงานการผสมลงได้ทั้งในกรณีของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต แต่ในหัวข้อนี้จะศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อพลังงานการผสมของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอย โดยแบบจำลองในการทำนายพลังงานการผสมจะเหมือนกับในกรณีที่ใช้ซีเมนต์อย่างเดียวกวาคือเป็นดังสมการที่ (3.58) และ (3.59) จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับเพสต์ที่ใช้เถ้าลอยอย่างเดียว (OFA) และเพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (OFA40) พบว่าค่า ϕ_{rep} ที่มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า ϕ_{rep} ของซีเมนต์อย่างเดียวที่คำนวณจากสมการที่ (3.60) ดังแสดงในตารางที่ 3.6 โดยเพสต์ที่ใช้เถ้าลอยอย่างเดียวจะได้ค่า ϕ_{rep} ที่มีแนวโน้มต่ำกว่าค่าที่ได้จากกรณีของซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ดังนั้นค่า ϕ_{rep} จากสมการที่ (3.60) สามารถนำมาใช้ทำนายพลังงานการผสมส่วนผสมที่มีสารลดน้ำอย่างมากเมื่อใช้วัสดุผงประเภทอื่น ๆ ได้

สำหรับแบบจำลองทำนายพลังงานการผสมในกรณีของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีสารลดน้ำอย่างมากนั้นจะมีลักษณะเดียวกับแบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากซึ่งอาศัยพลังงานการผสมในกรณีของเพสต์เป็นหลัก โดยในกรณีของมอร์ตาร์จะทำการพิจารณามอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากเป็น 2 กรณีคือ มอร์ตาร์ที่มีวัสดุผงในปริมาณสูงและในปริมาณต่ำ โดยใช้ค่าสัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 0.25 เป็นค่าที่แบ่งช่วงดังกล่าว ซึ่งการคำนวณพลังงานการผสมจะอาศัยสมการที่ (3.41) – (3.46) และสำหรับกรณีของคอนกรีตจะคำนวณพลังงานการผสมตามสมการที่ (3.54) โดยผลเปรียบเทียบพลังงานการผสมของส่วนผสมที่มีสารลดน้ำอย่างมากในปริมาณต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.38 ซึ่งพบว่า ค่าทำนายให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงในทุกส่วนผสม

3.8 สรุป

จากผลการทดลองในการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานการผสมเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากและใช้วัสดุผงประเภทต่าง ๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. พลังงานการผสมคือ พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลาที่เครื่องผสมใช้ในการผสม จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาครวมไปถึงชนิดและลักษณะของเครื่องผสม
2. หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคจะขึ้นกับปริมาณน้ำในส่วนผสม โดยปริมาณน้ำที่สภาวะอิ่มตัวจะทำให้เกิดหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่มากที่สุด ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นกว่านี้จะมีผลทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นจึงทำให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง นอกจากนี้ยังขึ้นกับรูปร่างและความละเอียดของอนุภาคที่ใช้ด้วย
3. พลังงานที่ใช้ในการผสมจะขึ้นกับชนิดและรูปร่างของเครื่องผสมและใบพายที่ใช้ โดยพลังงานการผสมสามารถแบ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่อนุภาคในสภาวะแห้งรวมกับพลังงานที่เอาชนะหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ดังนั้นในกรณีการผสมคอนกรีตจึงสามารถแบ่งเป็นการผสมมอร์ตาร์และหินเนื่องจากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคนั้นจะเกิดขึ้นเฉพาะส่วนของมอร์ตาร์เท่านั้น
4. พลังงานการผสมของส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงรูปร่างกลมจะมีค่าที่ต่ำกว่าพลังงานการผสมของส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่ปริมาณน้ำอิสระเท่ากันเนื่องจากรูปร่างที่กลมสามารถลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคและความหนืดแบบพลาสติกได้ และสำหรับกรณีที่อนุภาคมีรูปร่างเหมือนกัน อนุภาคที่มีความละเอียดมากกว่าจะใช้พลังงานในการผสมมากกว่าที่ปริมาณน้ำอิสระเท่ากัน
5. ส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากจะมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นส่งผลให้ปริมาณช่องว่างโดยรวมลดลง นั่นคือทำให้ค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันมีค่าสูงขึ้น
6. สำหรับส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมากจะมีผลของแรงผลักระหว่างไฟฟ้าที่ทำให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากพันธะของเหลวลดลง ดังนั้นพลังงานการผสมจะลดลงด้วย โดยขนาดของแรงผลักระหว่างอนุภาคจะขึ้นกับชนิดและปริมาณสารลดน้ำอย่างมากรวมไปถึงปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสมซึ่งขนาดของแรงผลักระหว่างอนุภาคมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อปริมาณน้ำอิสระมีค่าสูงขึ้น แต่ขนาดของแรงผลักระหว่างอนุภาคจะไม่ขึ้นกับประเภทของวัสดุผงที่ใช้ โดยผลที่ได้จากการทดลองที่ใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์และแก้วลอยพบว่า ขนาดของแรงผลักระหว่างอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3.1 พลังงานการผสมในสภาวะแห้งและสภาวะอิมตัวของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงต่างๆ

ชนิดของวัสดุผง	สัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม, ψ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm^2/g)	พลังงานเฉลี่ยในสภาวะแห้ง, E_{dry} (Wh/l-min)	สัดส่วนพลังงานในสภาวะแห้งเมื่อเทียบกับ OFA	พลังงานเฉลี่ยในสภาวะอิมตัว, E_{wet} (Wh/l-min)	สัดส่วนพลังงานในสภาวะอิมตัวเมื่อเทียบกับ OFA
OFA	1.00	2169	0.028	1.00	0.60	1.00
FA1	1.00	1733	0.023	0.82	0.48	0.65
OFA40	1.44	2953	0.044	1.59	1.06	1.45
OLP	1.70	3981	0.057	2.05	2.26	3.08
MC	1.70	4056	0.055	1.97	2.01	2.74
OLP20	1.85	3577	0.061	2.18	2.34	3.19
OLP10	1.88	3527	0.065	2.33	2.38	3.24
OPC-I	1.90	3476	0.072	2.57	2.60	3.54
OPC-III	2.20	5084	0.100	3.59	3.20	4.36
SF	2.50	18100	0.105	3.76	4.61	6.29

ตารางที่ 3.2 ขนาดคละของหินและทรายที่ใช้ในการทดลอง

Sieve No.	Sieve opening, mm	%retain cumulative	
		หิน	ทราย
3/4"	18.750	5.20	-
3/8"	9.375	85.20	-
4	4.750	100.00	-
8	2.360	-	-
16	1.180	-	-
20	0.850	-	-
30	0.600	-	3.34
40	0.425	-	21.63
50	0.300	-	54.21
100	0.150	-	96.25
Pan	0.000	-	100.00

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติพื้นฐานของหินและทรายที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติพื้นฐาน	หิน	ทราย
ความถ่วงจำเพาะ (SSD)	2.73	2.60
ความถ่วงจำเพาะ (Dry)	2.71	2.58
ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	0.60	0.60
สัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม, $\psi^{(1)}$	1.60	1.40
ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ ⁽²⁾	-	0.09
พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm ² /g) ⁽³⁾	2.30	107.21
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mm) ⁽⁴⁾	13.43	0.29

(1) คำนวณจากสมการที่ (2.1);

$$\psi = 1 + 4.44(\epsilon_s - 0.42)$$

(2) คำนวณจากสมการที่ (3.7);

$$\beta'_a = 0.0012(s_a)^{0.9237}$$

(3) คำนวณจากสมการที่ (3.8);

$$S_0 = \frac{6}{D_{av} \cdot \rho}, \quad S_a = \psi \cdot S_0$$

(4) คำนวณจากสมการที่ (3.9);

$$D_{av} = \frac{\sum D_i M_i}{\sum M_i}$$

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

Mix No.	หิน (กก.)	ทราย (กก.)	ซีเมนต์ (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	ฝุ่นหินปูน (กก.)	น้ำ (กก.)	%SP	หมายเหตุ
M1-OPC-I	-	2.9	1.6	-	-	varied	-	Rich Mix
M2-OFA	-	3.4	-	1.2	-	varied	-	Rich Mix
M3-OLP	-	1.7	-	-	0.8	varied	-	Rich Mix
M4-OFA	-	4.1	-	0.9	-	0.6	-	Lean Mix
C1-OPC-I	18.4	15.0	9.9	-	-	4.3	-	(w/c)= 0.43
C2-OPC-III	18.4	15.0	9.5	-	-	4.1	-	(w/c)= 0.43
C3-OFA40	18.4	15.0	5.4	3.6	-	3.9	-	(w/c)= 0.43
MS1-OFA	-	5.2	-	1.8	-	0.9	0.5%	Rich Mix
CS1-OPC-I	29.9	25.0	16.0	-	-	5.0	0.5%	(w/c)= 0.31
CS2-OFA40	29.9	25.0	9.6	6.4	-	4.7	0.5%	(w/c)= 0.29

ตารางที่ 3.5 พลังงานการผสมของส่วนผสมต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง

Mix No.	(w/c)	พลังงานเฉลี่ย ในสถานะแห้ง, (Wh/l-min)	พลังงานการผสมเฉลี่ย ที่ได้จากการทดลอง (Wh/l-min)	พลังงานการผสม ที่ได้จากแบบจำลอง (Wh/l-min)
M1-OPC-I	0.40*	0.053	0.717	1.019
M2-OFA	0.45*	0.042	0.281	0.339
M3-OLP	0.42*	0.057	0.853	1.135
C1-OPC-I	0.43	0.375	0.741	0.582
C2-OPC-III	0.43	0.382	0.711	0.889
C3-OFA40	0.43	0.301	0.562	0.451
MS1-OFA	0.50	0.039	0.178	0.119
CS1-OPC-I	0.31	0.411	0.983	1.266
CS2-OFA40	0.29	0.295	0.862	1.016

* เท่ากับปริมาณน้ำในสถานะอิ่มตัว

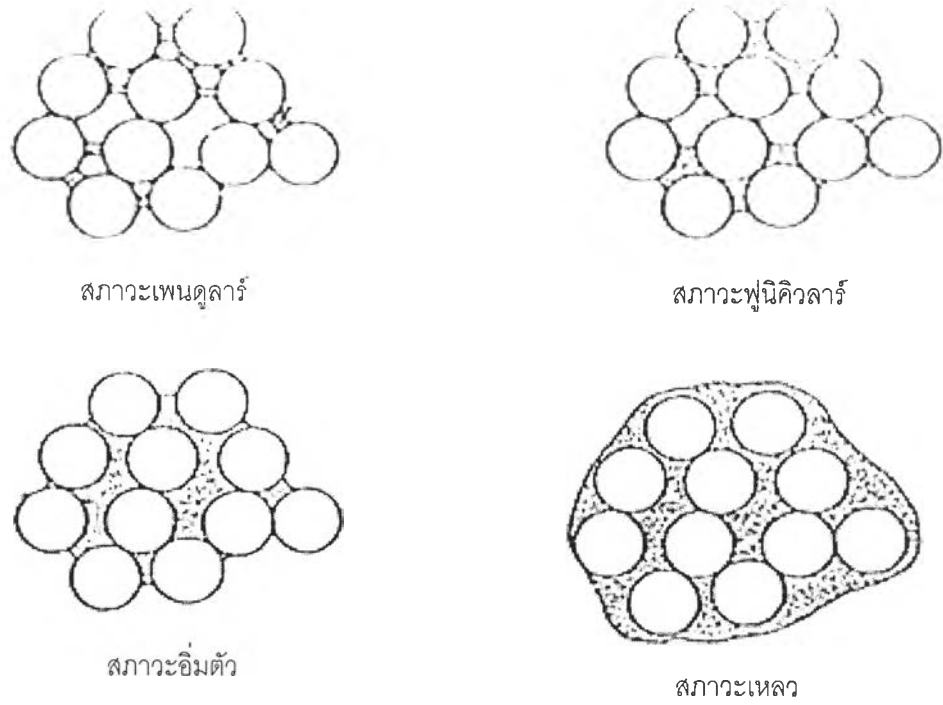
ตารางที่ 3.6 ค่าตัวประกอบแรงผลึก (ϕ_{rep}) ของเฟสซีที่ใช้วัสดุผสมต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง

ชนิดวัสดุผสม	%SP	(w/c) _{free}	ϕ_{rep} จากการทดลอง	ϕ_{rep} จากแบบจำลอง*
OFA	0.5%	0.018	1.294	1.318
		0.038	1.025	1.192
		0.058	1.003	1.144
		0.108	1.006	1.095
	1.0%	0.022	1.053	1.240
		0.042	1.062	1.168
		0.062	1.008	1.135
		0.112	1.046	1.098
OFA40	0.5%	0.041	1.057	1.182
		0.091	1.118	1.106
	1.0%	0.047	1.075	1.158
		0.097	1.173	1.106

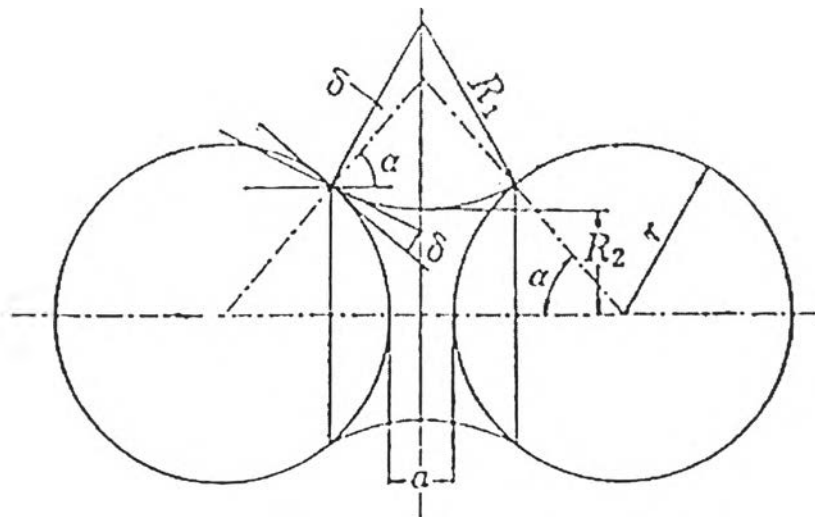
$$\text{เมื่อ } \phi_{rep} = \left(1 + a \left(\frac{w}{c}\right)_{free}^m\right)$$

และ

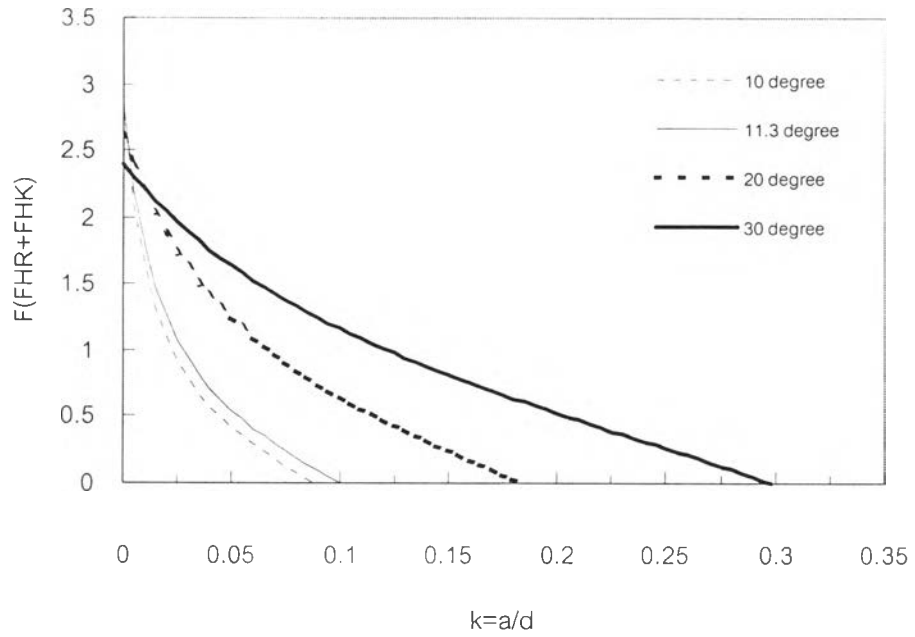
$$a = -0.05 + 0.22 X_{SP} - 0.13 X_{SP}^2, \quad m = -1.46 + 2.23 X_{SP} - 1.33 X_{SP}^2$$



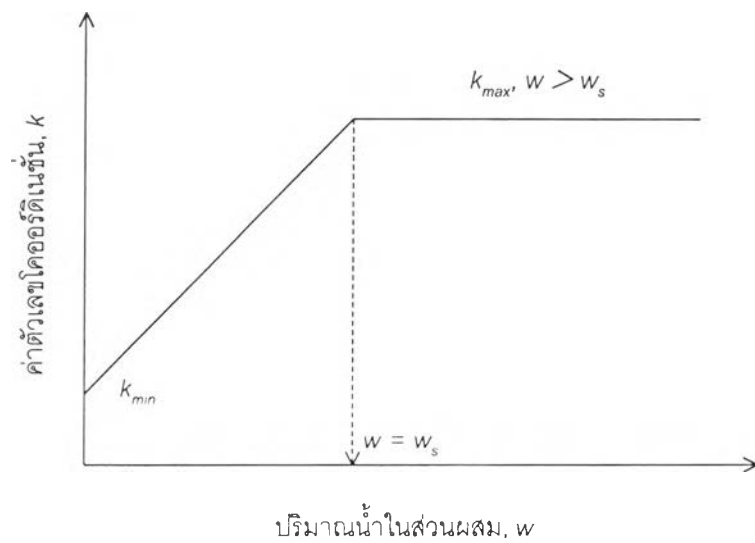
รูปที่ 3.1 สภาวะของส่วนผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



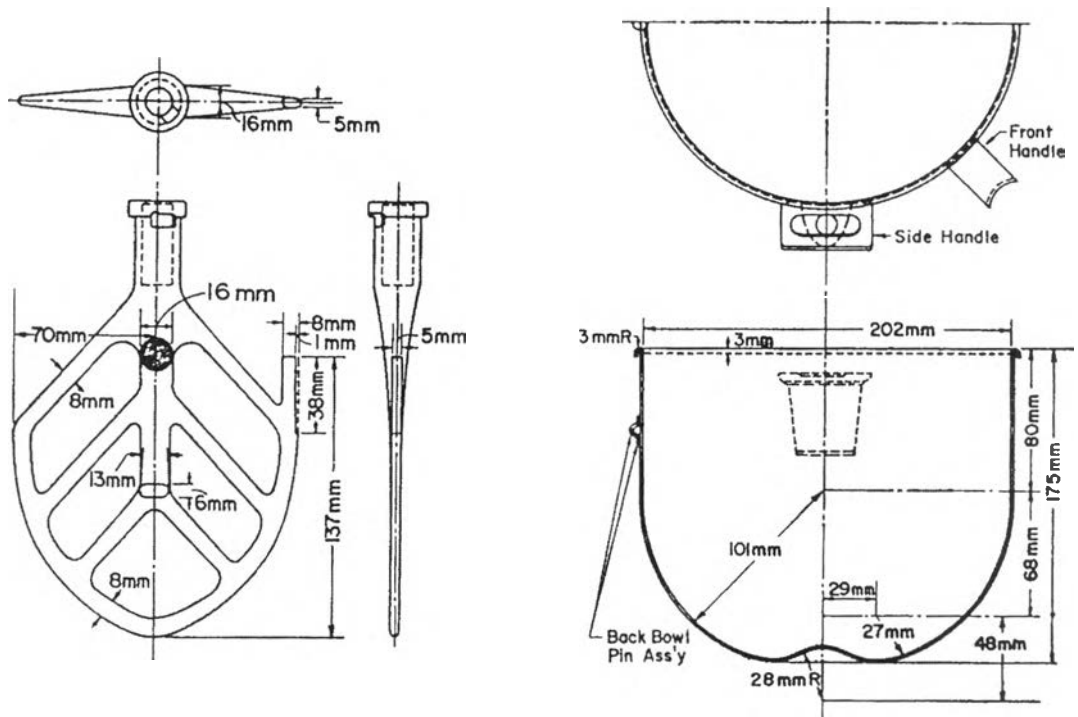
รูปที่ 3.2 แบบจำลองในการคำนวณหาค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากความชื้น



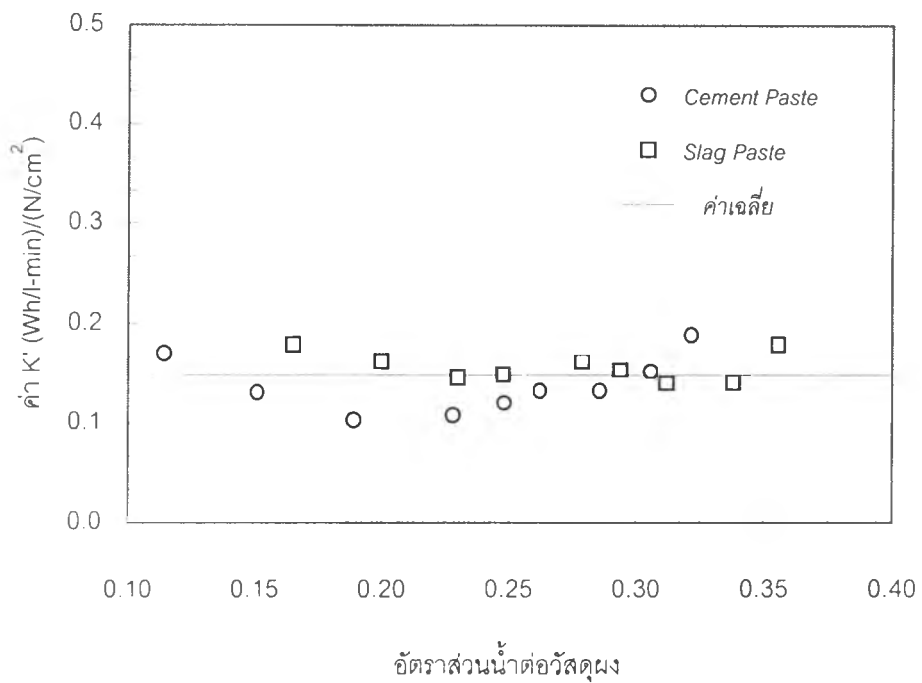
รูปที่ 3.3 ผลของระยะห่างระหว่างอนุภาคต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค



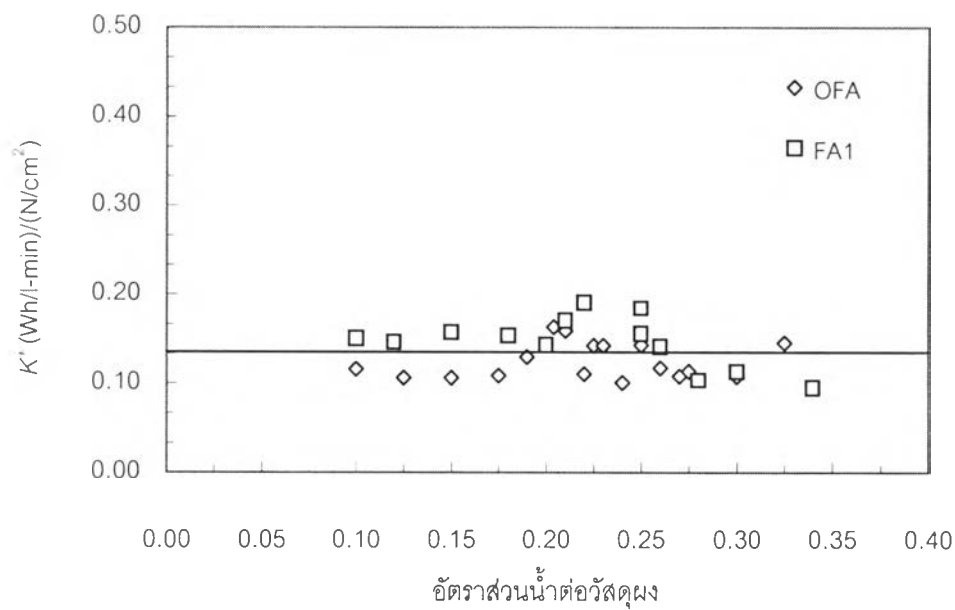
รูปที่ 3.4 ผลของปริมาณน้ำในส่วนผสมต่อค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชัน



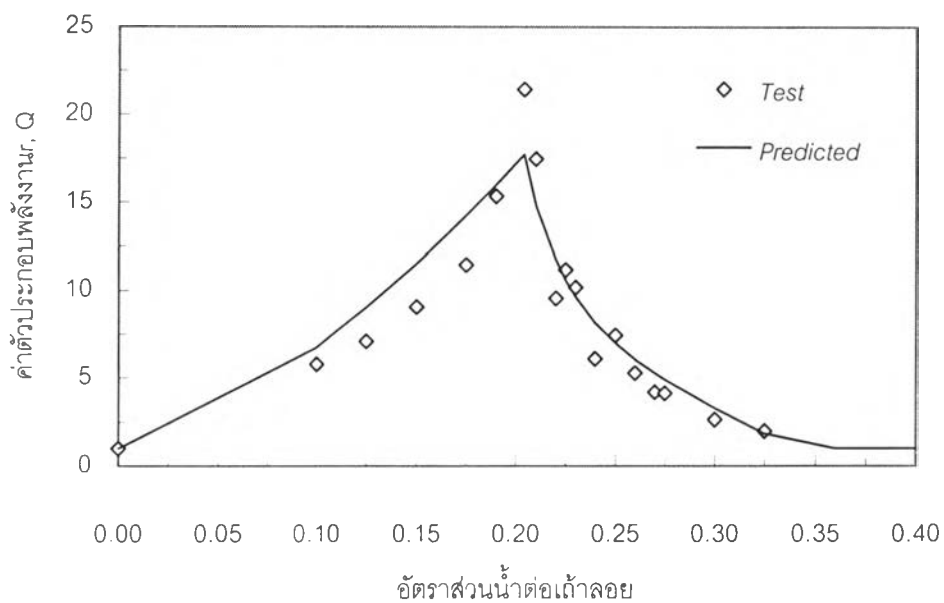
รูปที่ 3.5 เครื่องผสมชนิด Paddle Type ความจุ 4 ลิตร



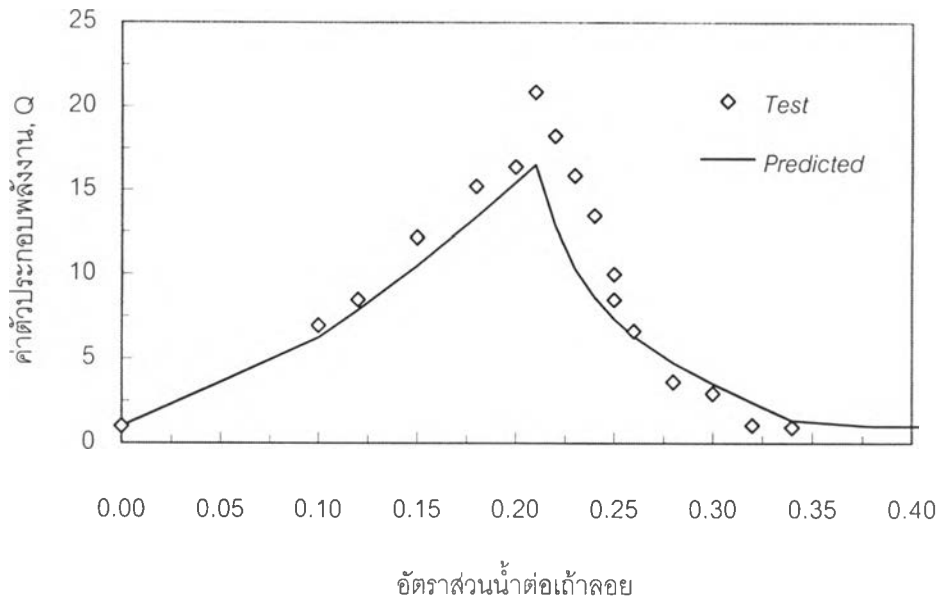
รูปที่ 3.6 ค่า K' สำหรับเปลี่ยนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นพลังงานการผสมของ
 เพลสต์ที่ใช้เครื่องผสมชนิดกระทะ (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum^[35])



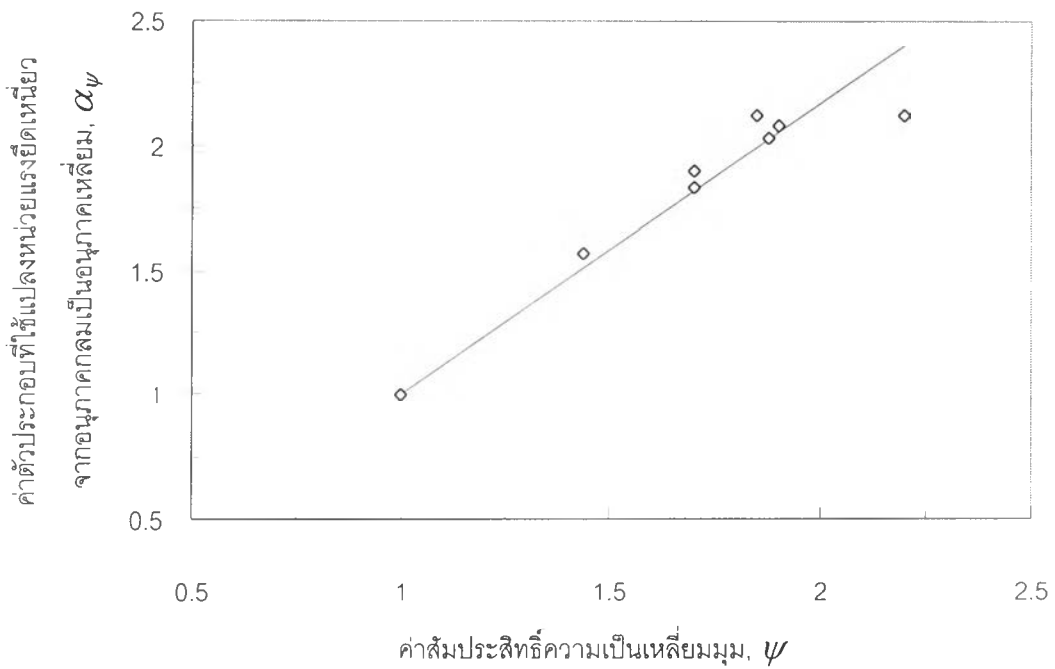
รูปที่ 3.7 ค่า K' ของเกล็ดลอยทั้ง 2 ชนิดจากเครื่องผสมแบบ Paddle Type



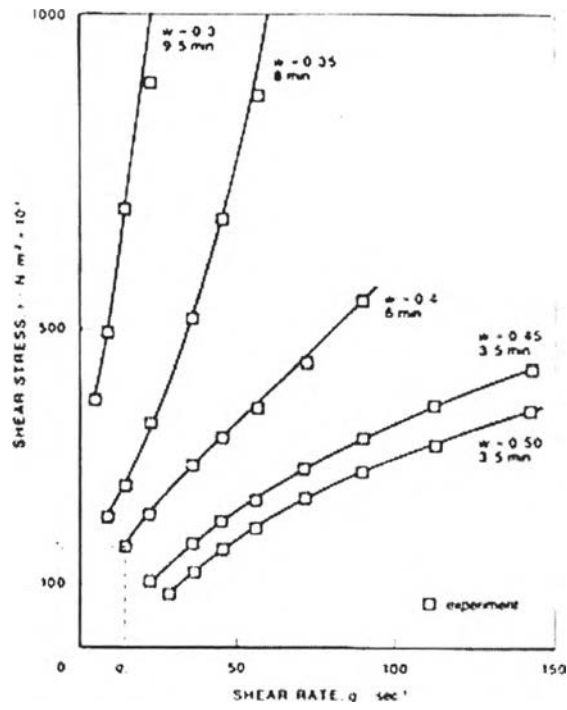
รูปที่ 3.8 พลังงานการผสมของเกล็ดลอยขนาดดั้งเดิมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



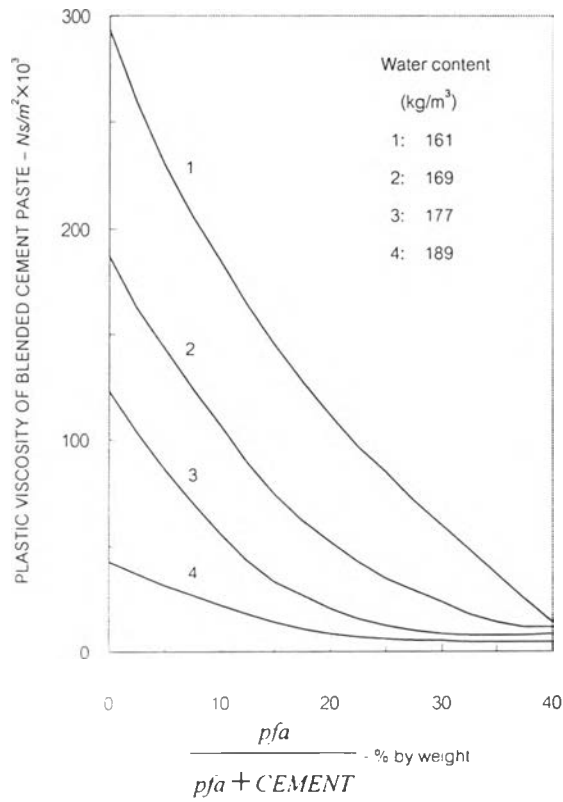
รูปที่ 3.9 พลังงานการผสมของเถ้าลอยที่แยกละเอียดครั้งที่ 1 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



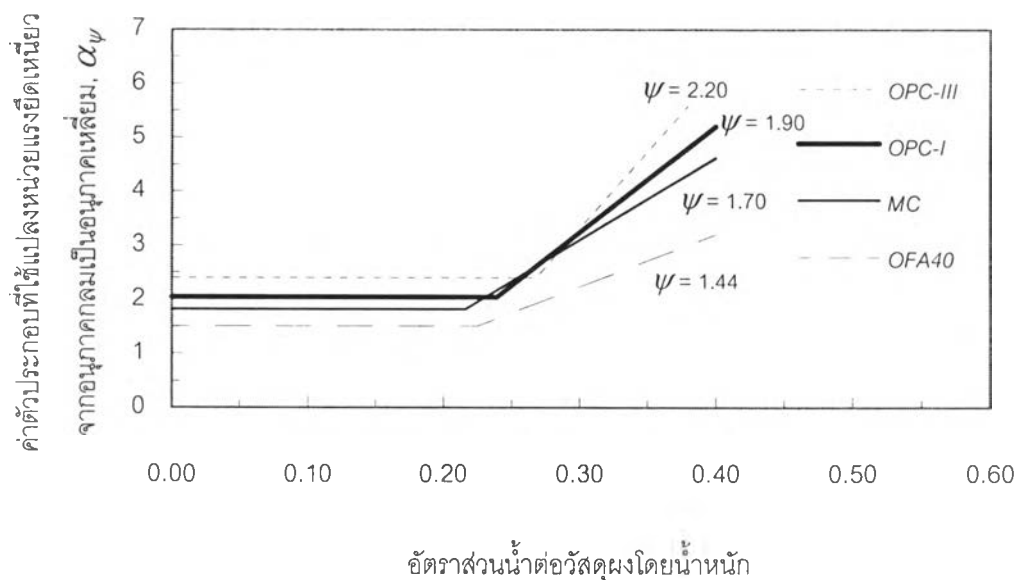
รูปที่ 3.10 ค่าตัวประกอบที่ใช้แปลงหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากอนุภาคกลมเป็นอนุภาคเหลี่ยม เมื่อปริมาณน้ำต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ ($w \leq w_c$)



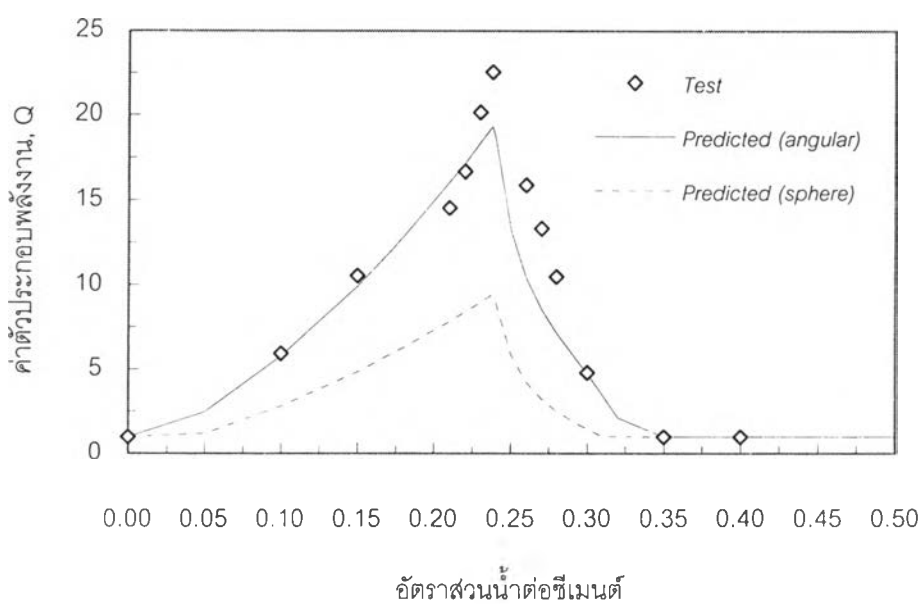
รูปที่ 3.11 หน่วยแรงเฉือนของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วน w/c และ ระยะเวลาการผสมต่าง ๆ^[44]



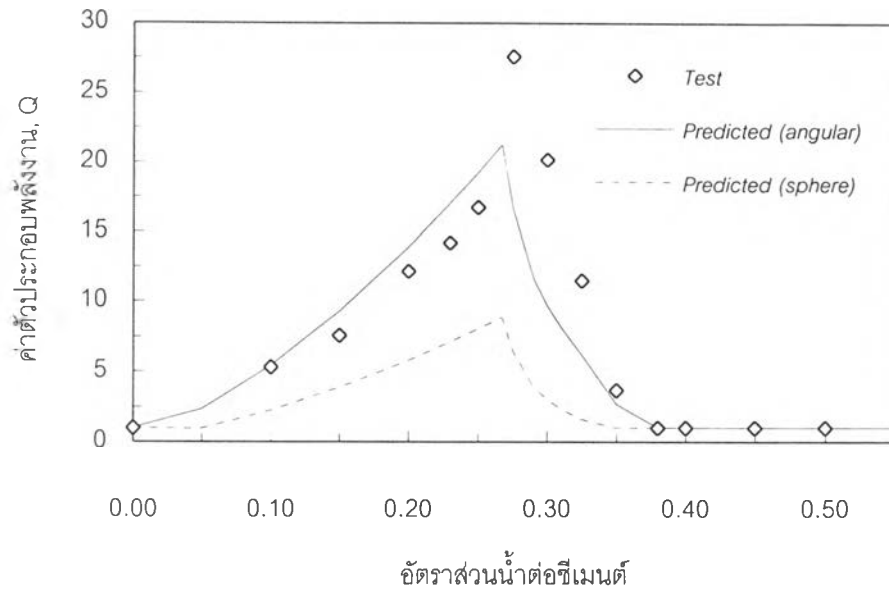
รูปที่ 3.12 ผลของปริมาณเถ้าดำหิน (pfa) ในซีเมนต์เพสต์ต่อค่าความหนืดพลาสติกของคอนกรีตเมื่อสัดส่วนปริมาตรของมวลรวมเท่ากับ 0.71 และปริมาณมวลรวมเท่ากับ 1880 kg/m³^[45]



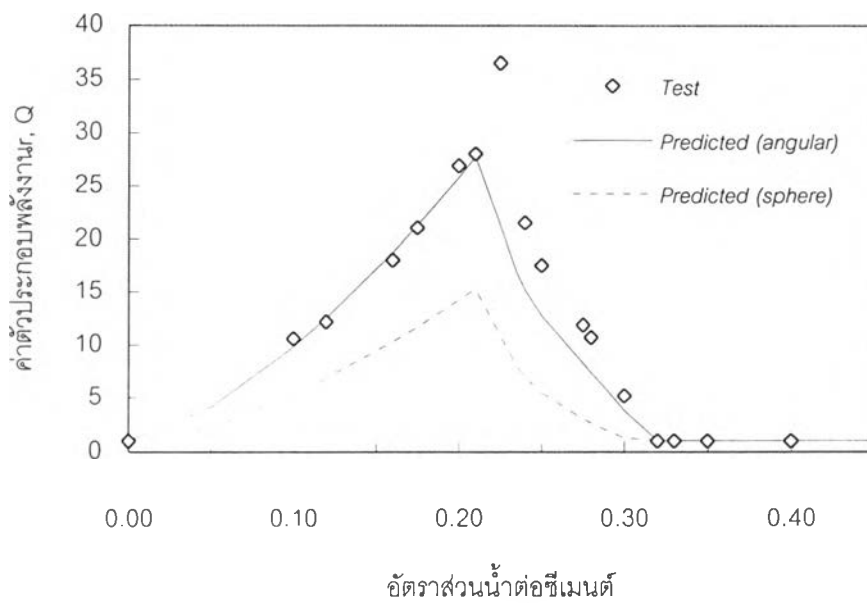
รูปที่ 3.13 ค่าตัวประกอบที่ใช้แปลงหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากอนุภาคกลมเป็นอนุภาคเหลี่ยมของเพสต์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมและปริมาณน้ำต่าง ๆ



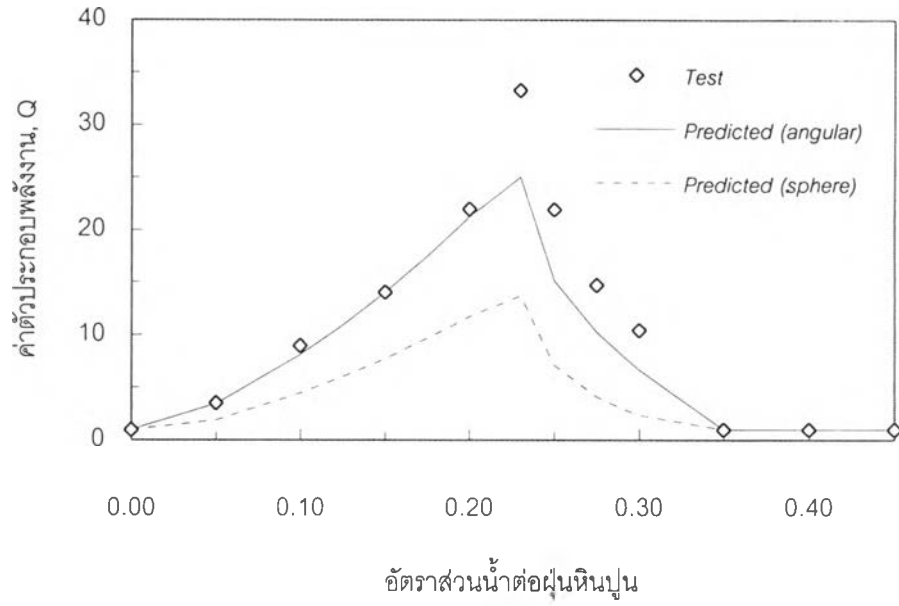
รูปที่ 3.14 พลังงานการผสมของเพสต์ OPC-I ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ



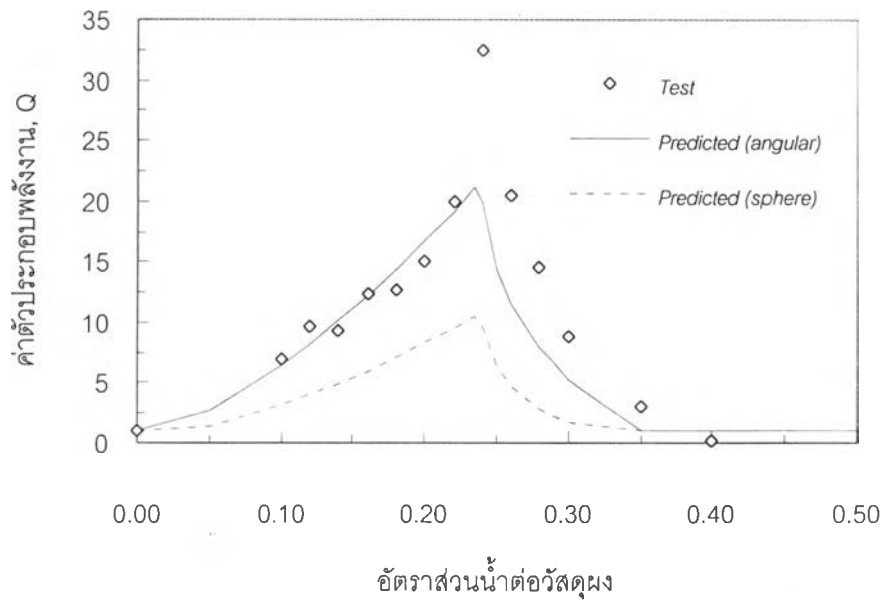
รูปที่ 3.15 พลังงานการผสมของเพสต์ OPC-III ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ



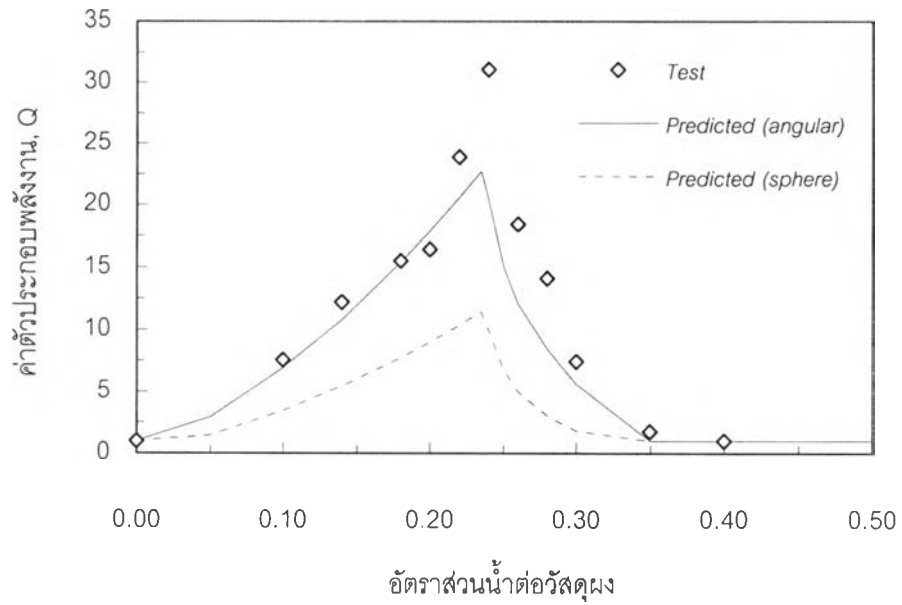
รูปที่ 3.16 พลังงานการผสมของเพสต์ MC ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ



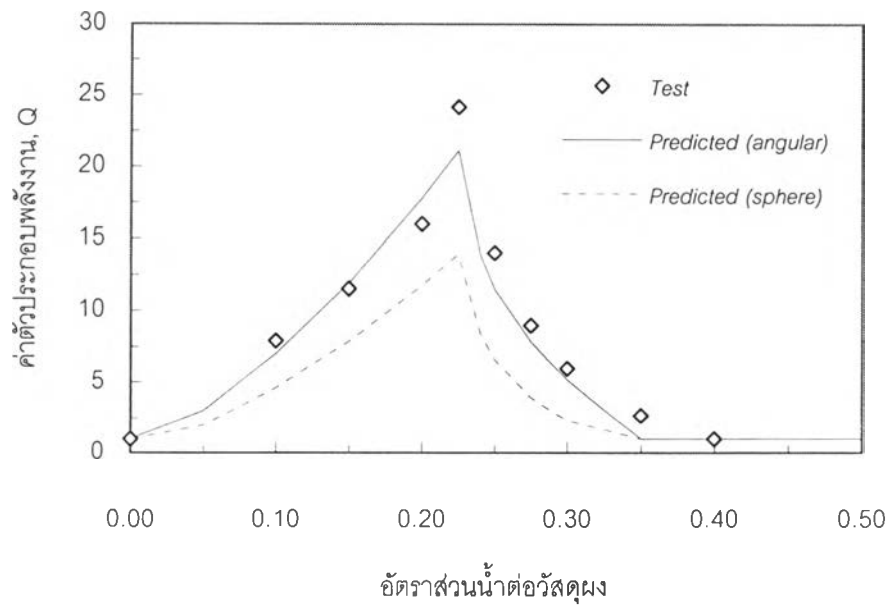
รูปที่ 3.17 พลังงานการผสมของเพสต์ OLP ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ



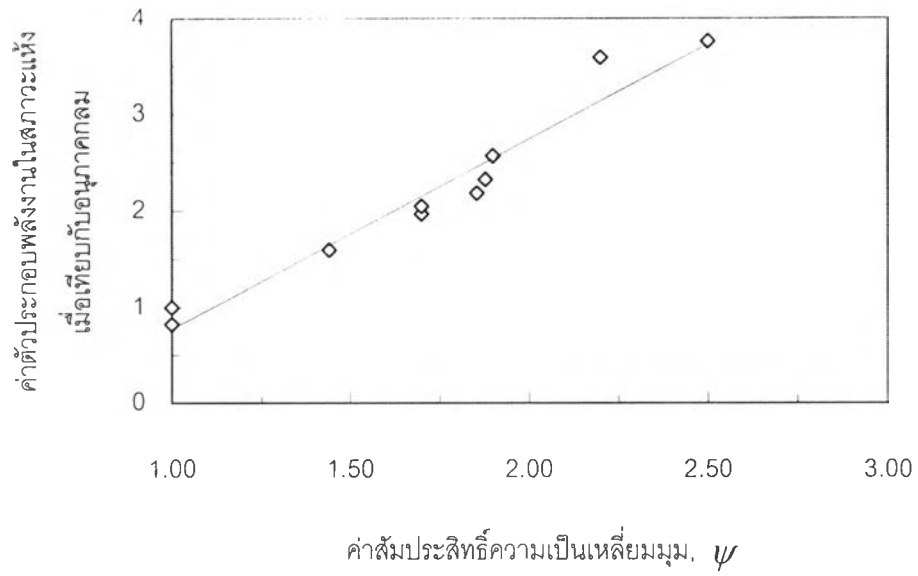
รูปที่ 3.18 พลังงานการผสมของเพสต์ OLP10 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ



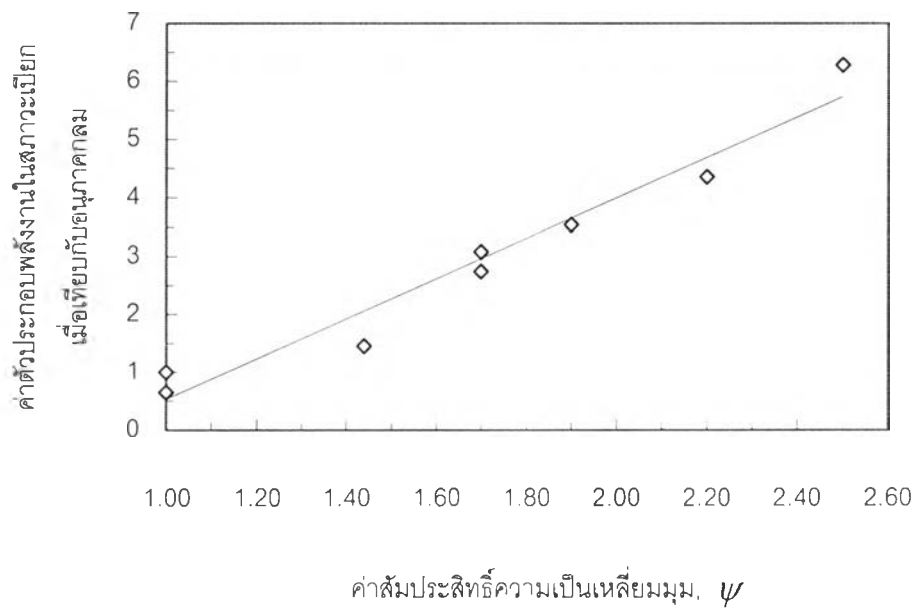
รูปที่ 3.19 พลังงานการผสมของเพสต์ OLP20 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ



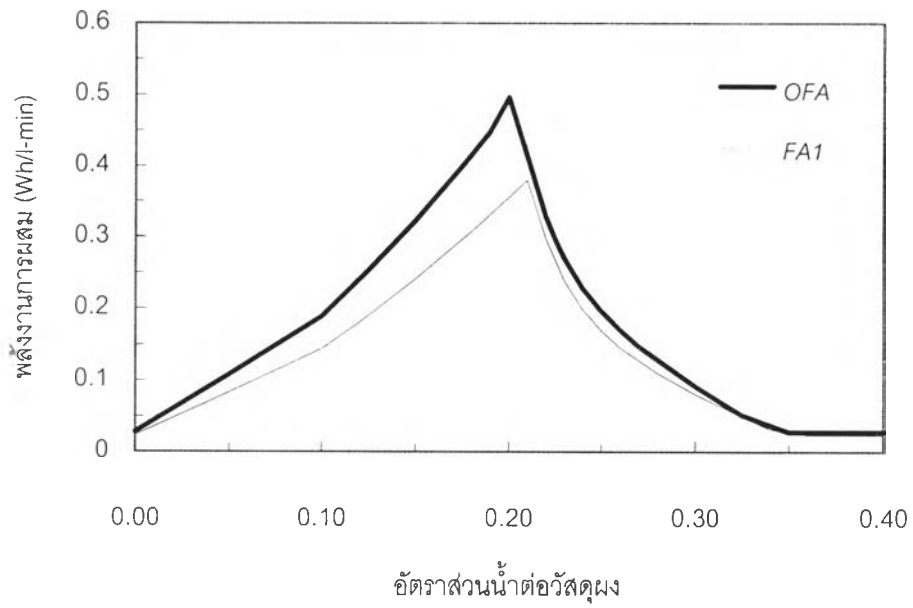
รูปที่ 3.20 พลังงานการผสมของเพสต์ OFA40 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ



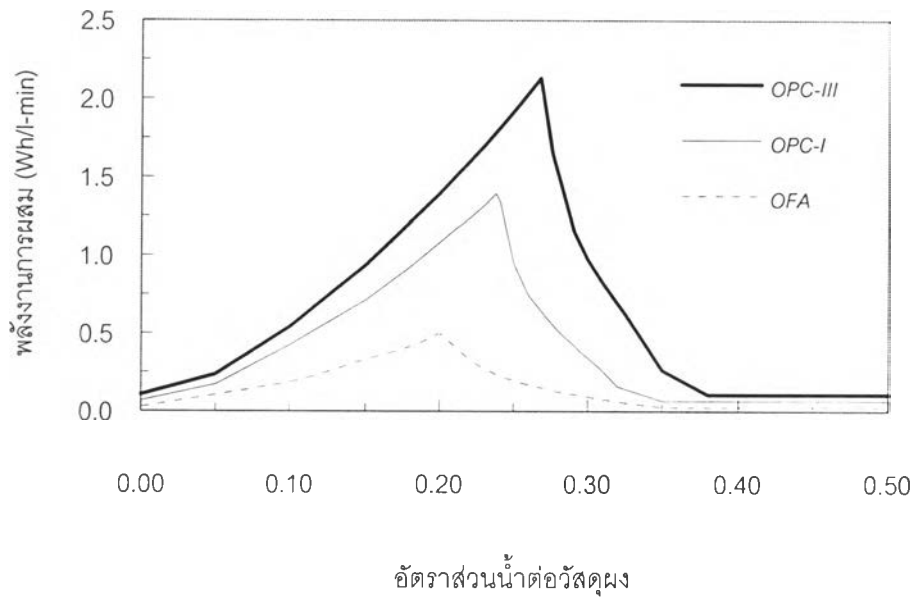
รูปที่ 3.21 พลังงานการผสมในสภาวะแห้งของวัสดุผงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมต่าง ๆ เทียบกับถั่วลอ



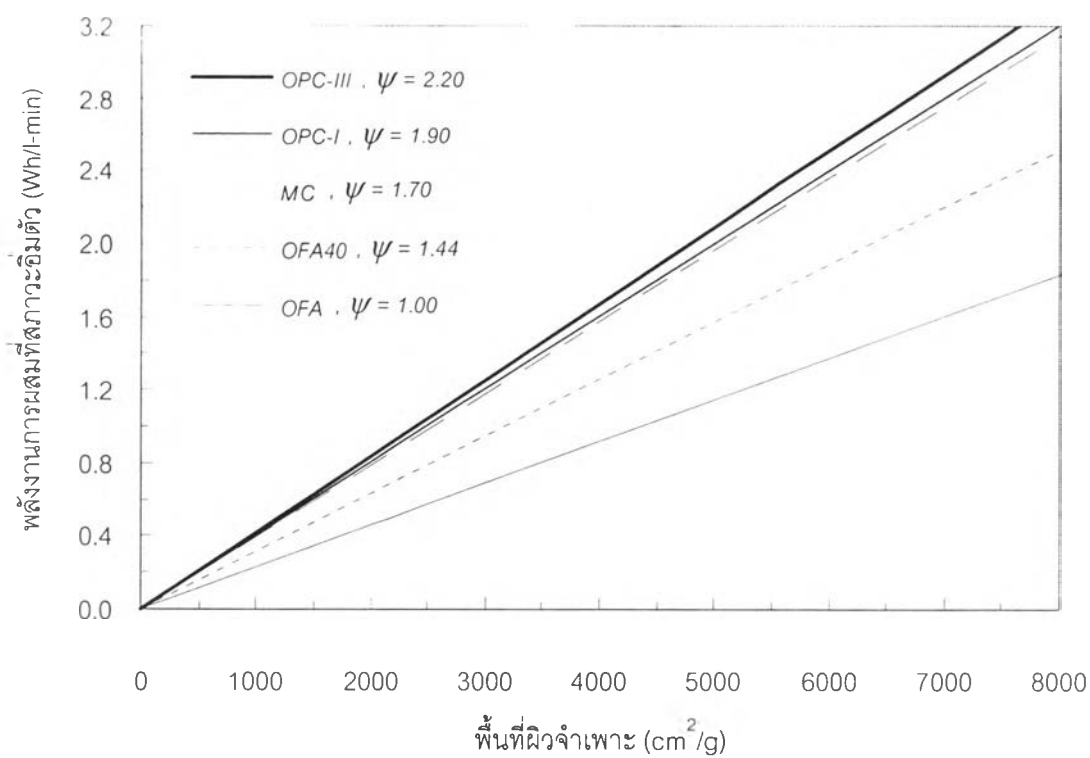
รูปที่ 3.22 พลังงานการผสมของเพศที่สภาวะอิมตัวของวัสดุผงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมต่าง ๆ เทียบกับถั่วลอ



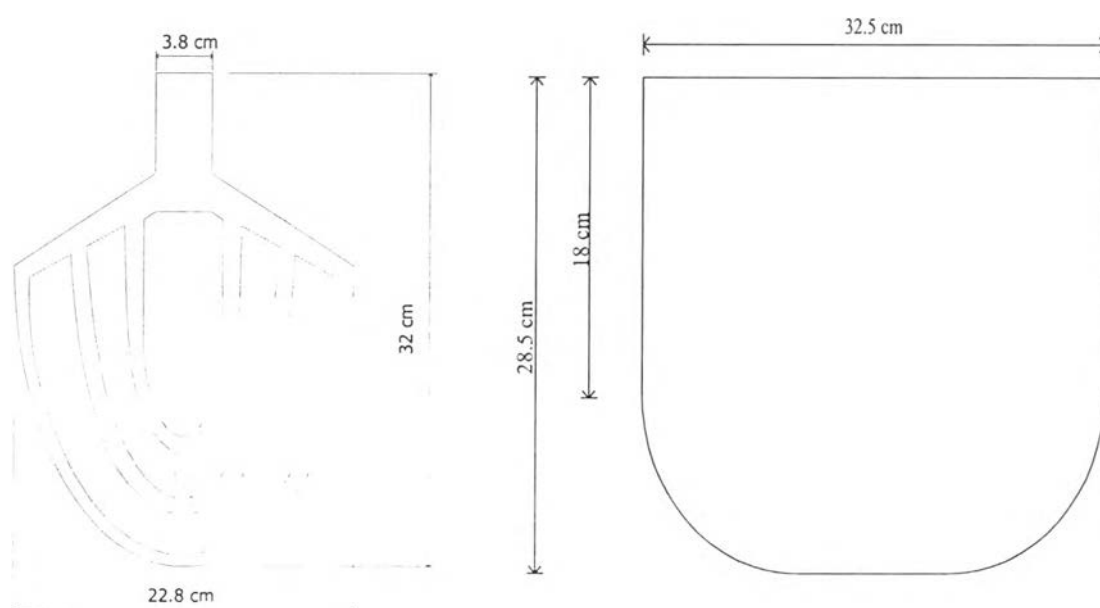
รูปที่ 3.23 แบบจำลองพลังงานการผสมของถ้ำลอย OFA เปรียบเทียบกับ FA1



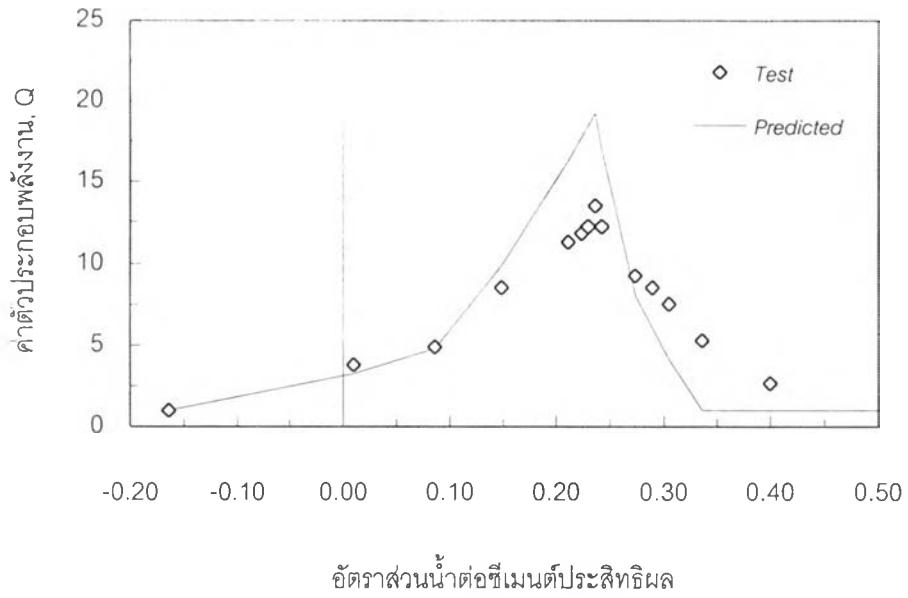
รูปที่ 3.24 แบบจำลองพลังงานการผสมของ OPC-III และ OPC-I เปรียบเทียบกับถ้ำลอย OFA



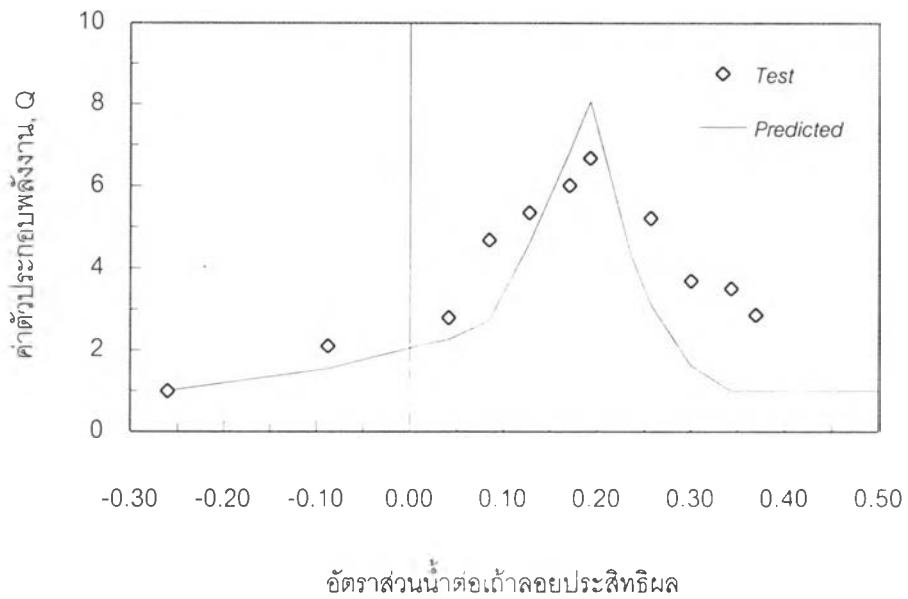
รูปที่ 3.25 พลังงานการผสมของเพสต์ที่มีความละเอียดและค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมต่าง ๆ



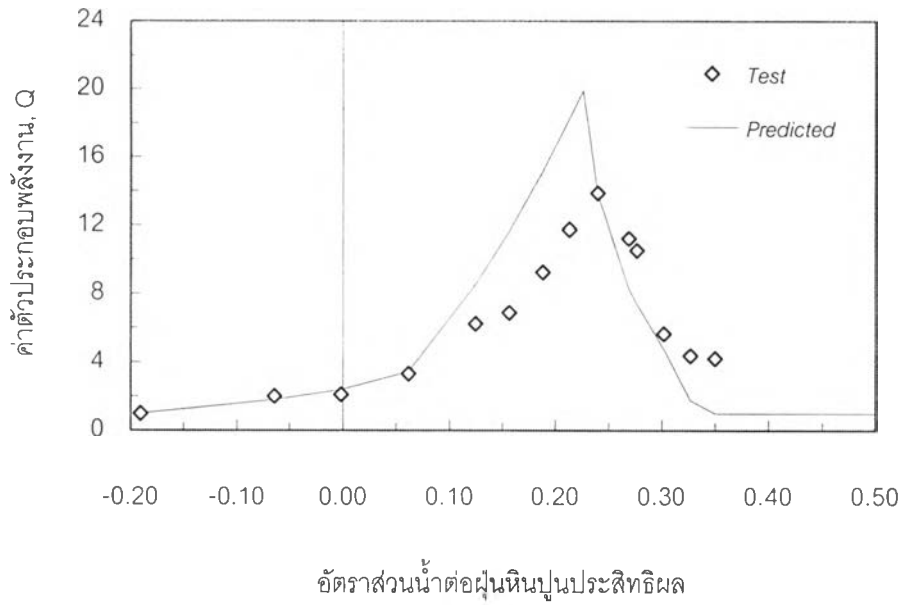
รูปที่ 3.26 รูปร่างและขนาดของใบพายและภาชนะของเครื่องผสมแบบ Paddle Type ความจุ 20 ลิตร



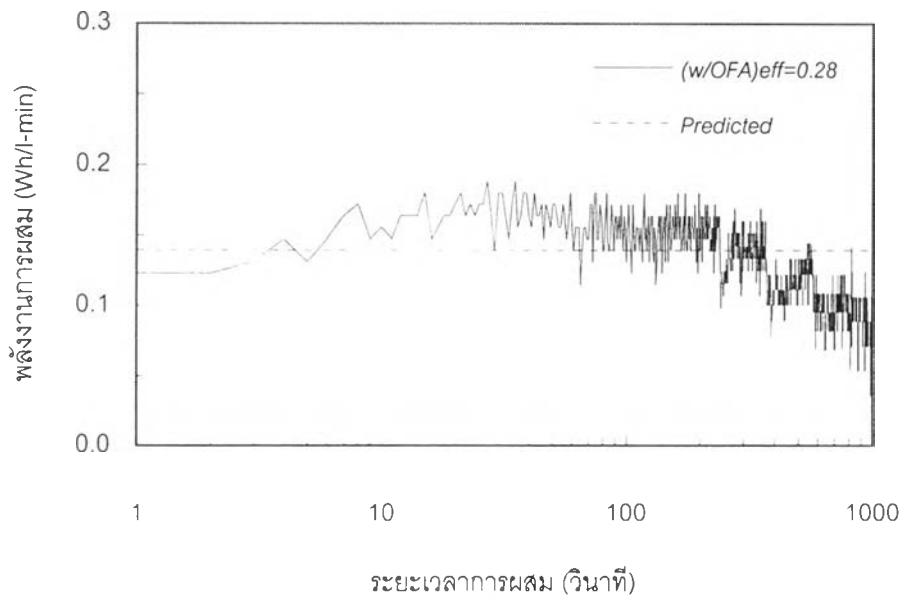
รูปที่ 3.27 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ M1 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลอง



รูปที่ 3.28 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ M2 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลอง



รูปที่ 3.29 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ M3 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลอง



รูปที่ 3.30 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ M4 จากการทดลองและแบบจำลอง

ระยะและมุมต่าง ๆ ของใบพายของเครื่องผสมที่ใช้ในการทดลอง

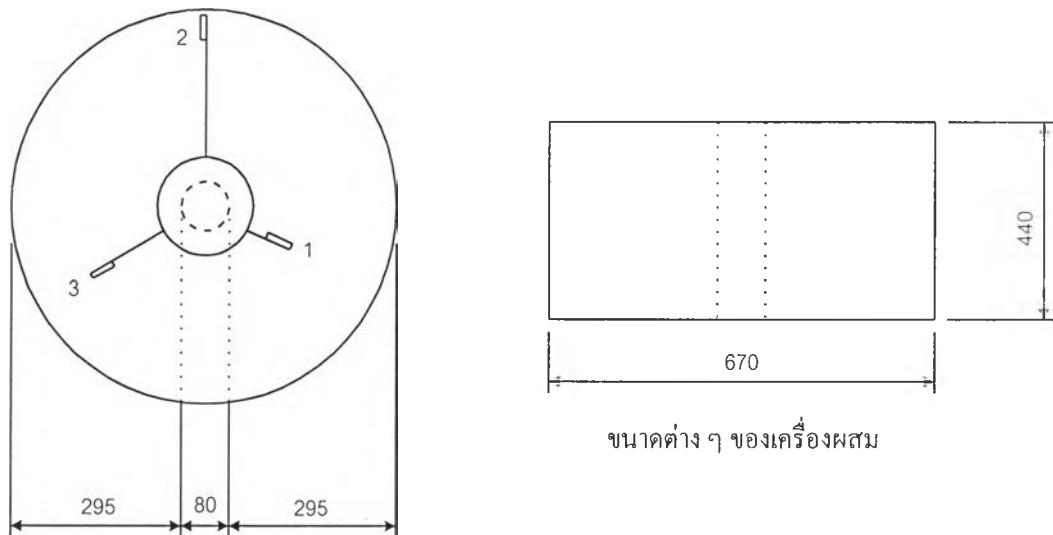
ใบพายที่	พื้นที่ (มม. ²)	ω (องศา)	θ (องศา)	l_1 (มม.)	l_2 (มม.)	รูปร่างของใบพาย
1	12000	+32	0	95	0	สี่เหลี่ยมคางหมู
2	9200	+35	+44	315	40	สี่เหลี่ยมคางหมู
3	10725	+34	-23	220	25	สี่เหลี่ยมคางหมู

ω = มุมเอียงของใบพายวัดจากแนวตั้ง

θ = มุมเอียงของใบพายวัดจากแนวราบ

l_1 = ความยาวแกนหลักของใบพาย

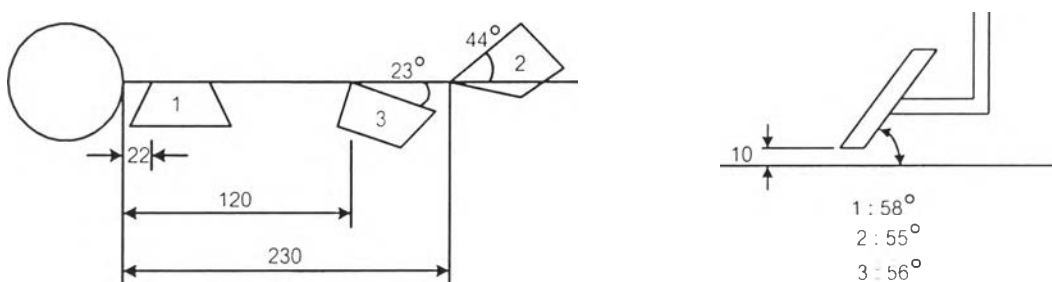
l_2 = ความยาวแกนรองของใบพาย



ขนาดต่าง ๆ ของเครื่องผสม

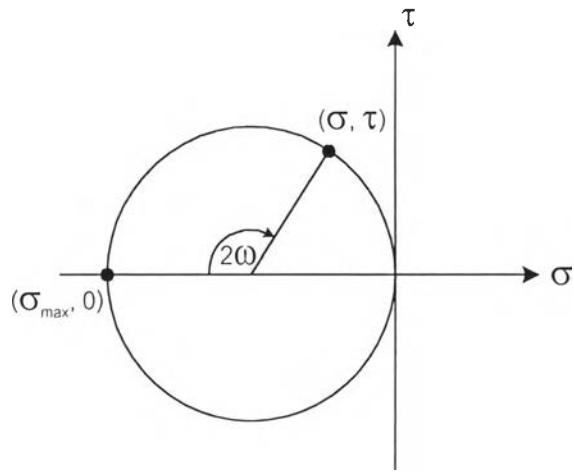
ความเร็วรอบของเครื่องผสม : 60 rpm

ระยะต่าง ๆ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

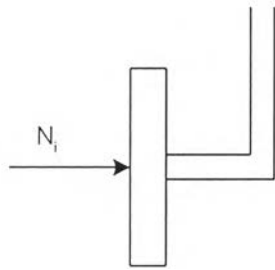


มุมลาดเอียงต่าง ๆ ของใบพาย

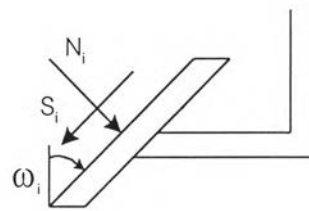
รูปที่ 3.31 ขนาดต่าง ๆ ของใบพายและเครื่องผสมแบบกระทะขนาดความจุ 150 ลิตรที่ใช้ในการทดลอง



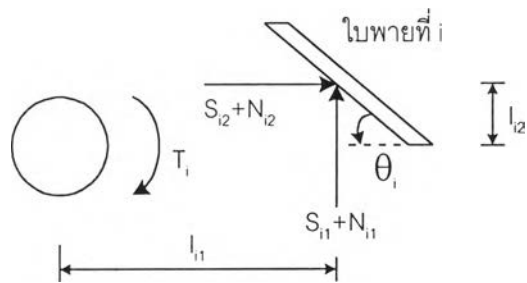
หน่วยแรงที่กระทำกับใบพายขณะผสม



แรงที่กระทำกับใบพายในแนวตั้ง

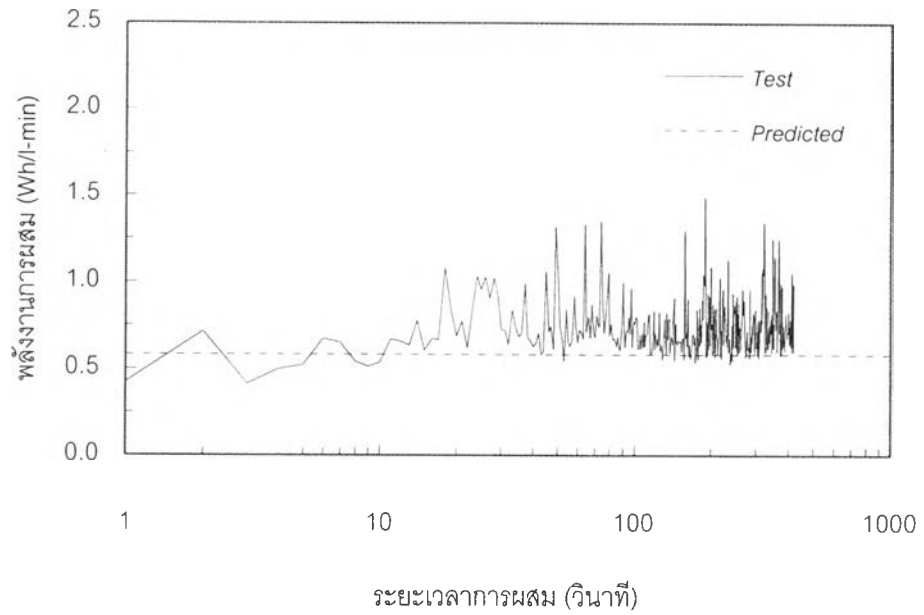


แรงที่กระทำกับใบพายในแนวเฉียง

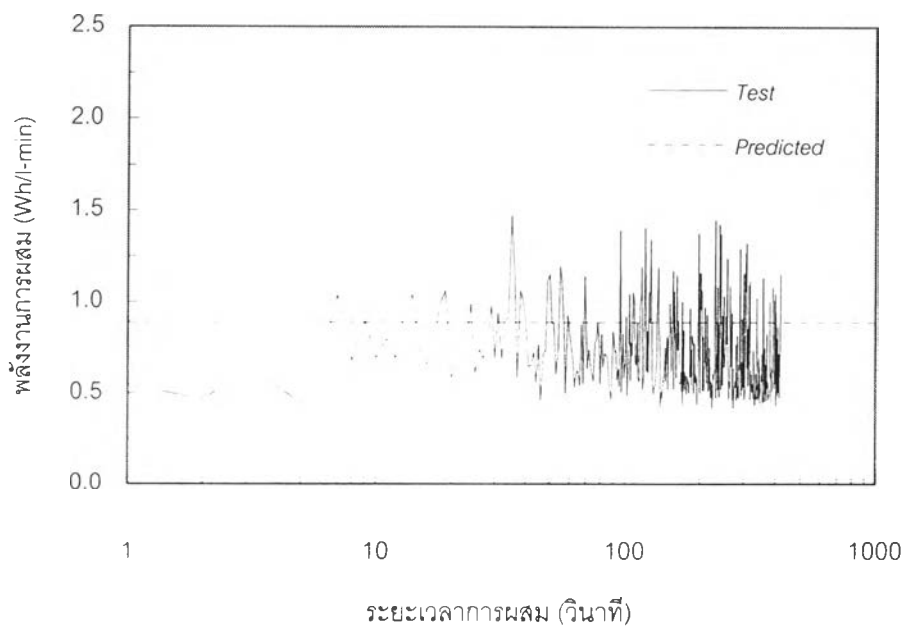


การคำนวณหาแรงบิดที่เกิดขึ้น

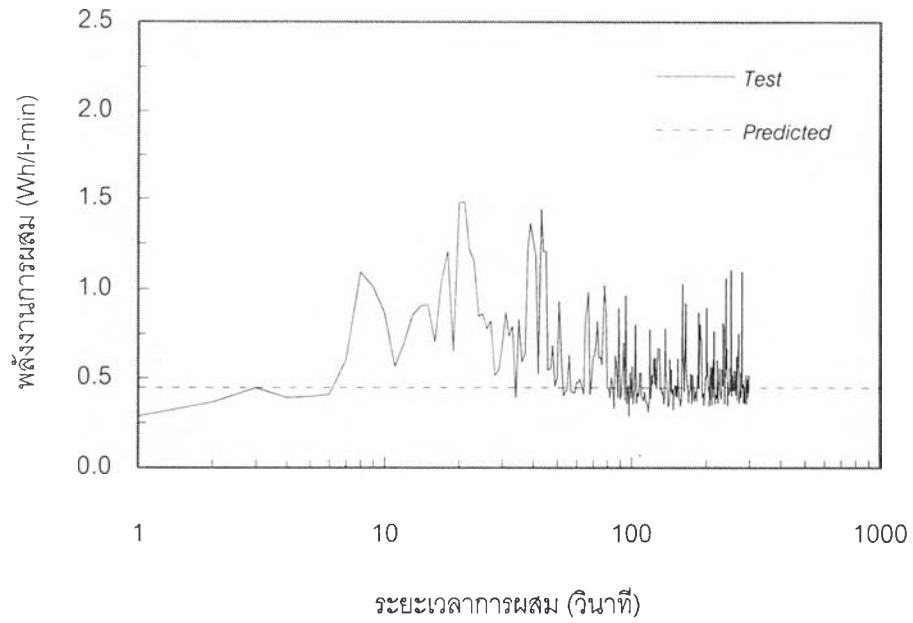
รูปที่ 3.32 แรงต้านเนื่องจากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมที่กระทำกับใบพายขณะผสม



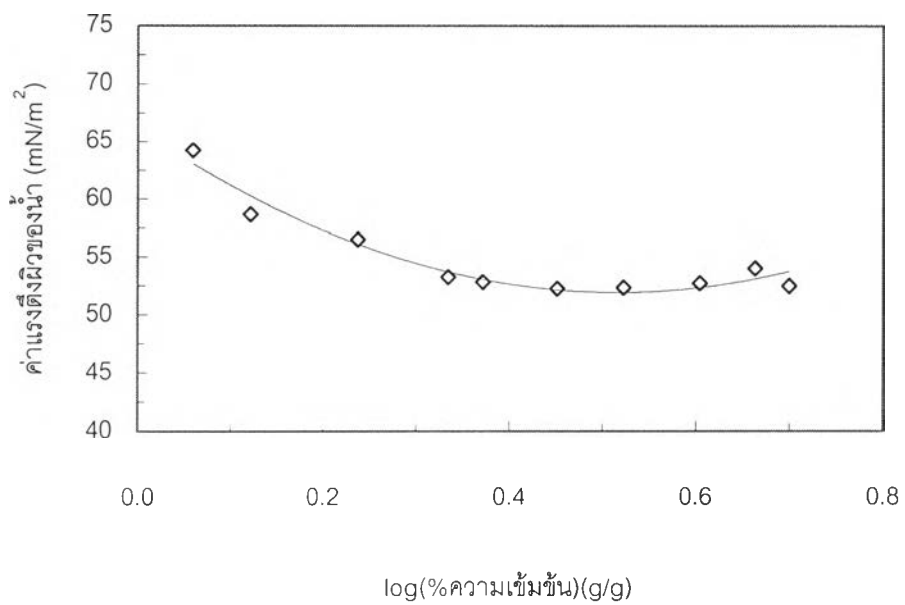
รูปที่ 3.33 พลังงานการผสมคอนกรีต OPC-I ที่ $(w/c)_{eff} = 0.31$ จากการทดลองและแบบจำลอง



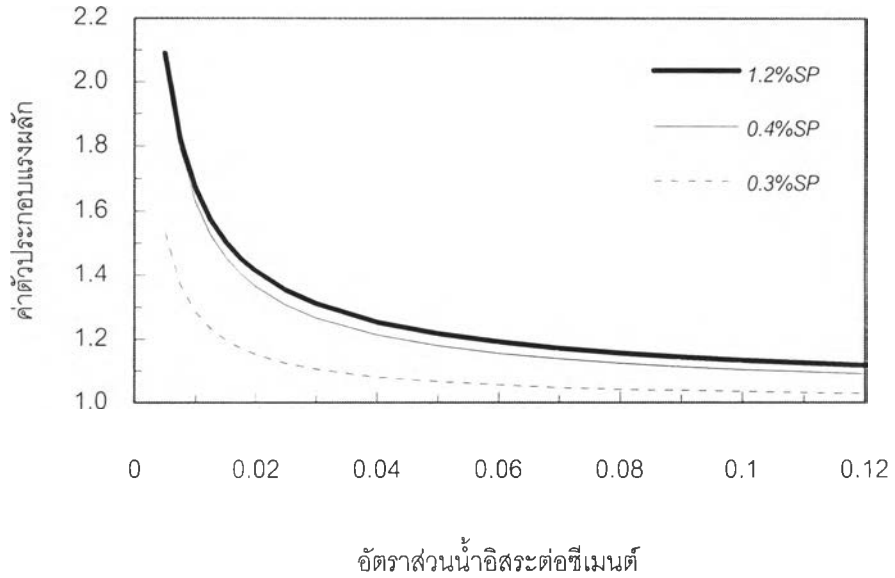
รูปที่ 3.34 พลังงานการผสมคอนกรีต OPC-III ที่ $(w/c)_{eff} = 0.31$ จากการทดลองและแบบจำลอง



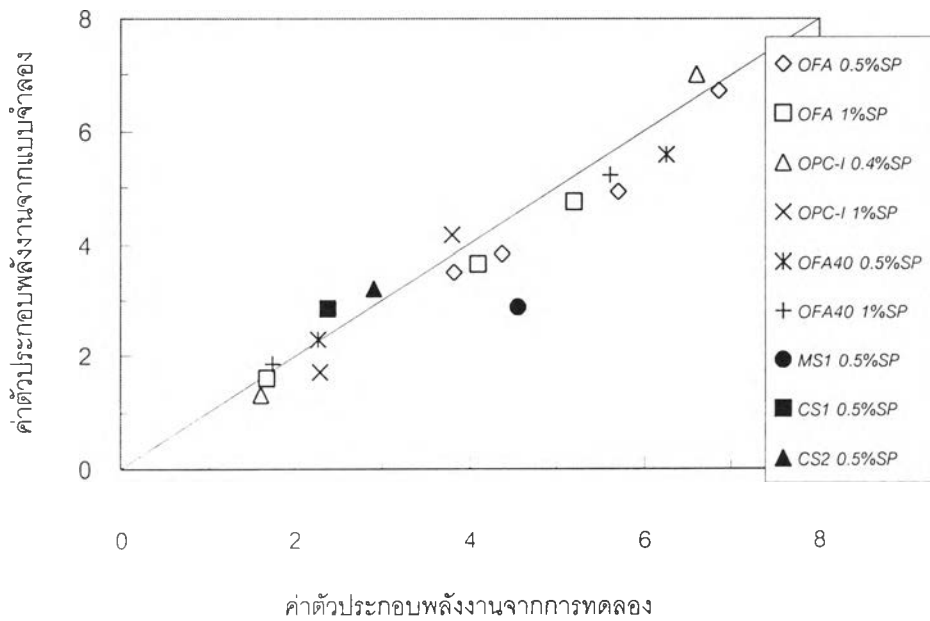
รูปที่ 3.35 พลังงานการผสม สมคอนกรีต OFA40 ที่ $(w/c)_{crit} = 0.31$ ที่ได้จาการทดลองและแบบจำลอง



รูปที่ 3.36 ค่าแรงตึงผิวของน้ำที่ได้จาการทดลองด้วยเครื่อง Du Nouy Ring Tensiometer ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารลดน้ำอย่างมาชนิดเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์คอนเดนเสทต่าง ๆ



รูปที่ 3.37 ค่าตัวประกอบแรงผลึกของเพสต์ OPC-I ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก 0.3%, 0.4% และ 1.0% ที่อัตราส่วนน้ำอิสระต่าง ๆ



หมายเหตุ OFA, OPC-I และ OFA40 เป็นเพสต์และเพสต์ OPC-I อ้างอิงจากผลการทดลองของนิพนธ์¹³⁶⁾

รูปที่ 3.38 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต ที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก