

## บทที่ 2

### ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

#### 2.1 บทนำ

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงคือ ค่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้โดยวัสดุผงเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนเทียบกับปริมาณของวัสดุผงที่ใช้ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนัก โดยน้ำส่วนนี้จะไม่สามารถเคลื่อนที่และใช้ในการหล่อลื่นได้ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งในการพิจารณาหาค่าปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสมคอนกรีตซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้ทั้งในสถานะสดและสถานะแข็งตัว ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำนั้นสามารถหาได้จากวิธีเซนตริฟิวส์โดยอาศัยหลักการว่า ที่ค่าความเร่งเท่ากับ 500 เท่าของค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (500 G) โดยน้ำที่ถูกกักเก็บที่ผิวอนุภาคของของแข็งสามารถหลุดออกไปได้หมด และเมื่อประมาณความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำและระดับความเร่งจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำได้ โดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำจากค่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บที่ความเร่งเท่ากับแรงโน้มถ่วงโลก (1 G) โดยตัวอย่างผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย แสล็ก(slag) และซีเมนต์ ที่ทดสอบโดยวิธีเซนตริฟิวส์แสดงในรูปที่ 2.1<sup>[35]</sup>

สำหรับงานวิจัยนี้จะหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงตามวิธีที่เสนอโดย Pongporncharoen<sup>[38]</sup> และ Kitticharoenkiat<sup>[11]</sup> ซึ่งใช้การทดสอบหาค่าการยุบตัวขนาดเล็ก โดยมีหลักการว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงคือค่าปริมาณน้ำต่ำสุดที่ทำให้ส่วนผสมเริ่มมีการยุบตัว ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความพรุนภายในอนุภาค อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม สภาพพื้นผิว ลักษณะรูปร่างและขนาดคละของวัสดุผง เป็นต้น

#### 2.2 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงนี้ จะใช้วัสดุผงตามสัญลักษณ์ต่าง ๆ ดังนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1(OPC-I) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3(OPC-III) ปูนซีเมนต์ผสม(MC) เถ้าลอย(OFA) ฟูนหินปูน(OLP)และผงซิลิกา(SF) โดยองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยขนาดดั้งเดิมที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.1 สำหรับตารางที่ 2.2 จะแสดงถึงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของเถ้าลอยที่ใช้กับเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 สำหรับวัสดุผงเถ้าลอยนั้นจะทำการใช้เถ้าลอย 4 ขนาดเนื่องจากขนาดของเถ้าลอยส่งผลต่อความพรุนหรือช่องว่างภายในอนุภาคของเถ้าลอยกล่าวคือ จะใช้เถ้าลอยขนาดดั้งเดิม(OFA) เถ้าลอยแยกละเอียด 1(FA1)เถ้าลอยแยกละเอียด 2(FA2) และเถ้าลอยที่ได้จากการร่อนแบบแห้งผ่านตะแกรงเบอร์ 100(150  $\mu\text{m}$ )และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 200(75  $\mu\text{m}$ ) ซึ่งให้สัญลักษณ์เป็น FA3 โดยการแยกขนาดของเถ้าลอยเป็น FA1 และ FA2 จะใช้เครื่อง Air Classifier ซึ่งกระบวนการแยกขนาดแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นจะมี

วัสดุผงทั้งหมด 9 ประเภทที่ใช้ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ ซึ่งผลการทดลองที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยน้ำหนักของวัสดุผงดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.3 – 2.11

### 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์เกี่ยวกับลักษณะรูปร่างของวัสดุผง

ลักษณะรูปร่างของวัสดุผงถือเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำ วัสดุผงที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมย่อมจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ดีกว่าวัสดุผงที่มีรูปร่างกลม อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานที่เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการวัดลักษณะรูปร่างออกมาเป็นตัวเลขที่มีค่าชัดเจน ที่ผ่านมามีเพียง Loudon<sup>[39]</sup> ได้เสนอค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม (Angularity Factor,  $\psi$ ) ซึ่งใช้แทนอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมกับพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในกลุ่มเดียวกัน นั่นคือ หากอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมนี้จะสัมพันธ์กับค่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคดังรูปที่ 2.12 และสมการต่อไปนี้

$$\psi = 1 + 4.44(\varepsilon_s - 0.42) \quad (2.1)$$

โดยที่

$\varepsilon_s$  = สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคในช่วงขนาดคละที่แน่นอนและอยู่ในสภาวะแห้งและเกาะตัวอย่างหลวม

นอกจากนี้ German<sup>[40]</sup> พบว่าค่าสัดส่วนช่องว่างของวัสดุผงจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างของวัสดุผง เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาในกรณีที่วัสดุผงมีขนาดอยู่ในกลุ่มเดียวกัน ดังรูปที่ 2.13 กล่าวคือ วัสดุผงที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับทรงกลมจะมีค่าสัดส่วนช่องว่างที่น้อยกว่าหรือมีค่าสัดส่วนความหนาแน่นมากกว่าคือประมาณ 0.65 ส่วนวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและไม่แน่นอนจะมีค่าสัดส่วนช่องว่างมากขึ้นหรือค่าสัดส่วนความหนาแน่นต่ำคือประมาณ 0.4 รูปที่ 2.14 จะเป็นตัวอย่างที่แสดงเปรียบเทียบให้เห็นถึงสัดส่วนช่องว่างที่เกิดขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีรูปร่างกลมและเป็นเหลี่ยมมุม ดังนั้นค่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคจะสามารถบอกได้ถึงลักษณะรูปร่างของวัสดุผงที่แตกต่างกันได้

สำหรับค่าสัดส่วนช่องว่างของวัสดุผงที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ที่ได้จากช่วงขนาดของอนุภาคต่าง ๆ กันและค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมที่คำนวณจากสมการที่ (2.1) แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งพบว่า ทุกช่วงขนาดของอนุภาควัสดุผงชนิดเดียวกันจะมีรูปร่างเหมือนกันและถ้าลดยจะมีอนุภาคที่ใกล้เคียงทรงกลมมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม,  $\psi$  เท่ากับ 1 สำหรับวัสดุผงอื่น ๆ ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและเป็นเหลี่ยมมุมจะมีค่า  $\psi$  มากกว่า 1.7 จึงทำให้ค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่าสูงขึ้นโดยภาพถ่ายจากกล้องที่มีกำลังขยายสูงของวัสดุผงชนิดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 และ 2.20 ซึ่งเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่กำลังขยาย 1000 เท่าและ 3500 เท่า ถ้วยลยขนาดดั้งเดิมที่กำลังขยาย 900 เท่า ถ้วยลยที่แยกละเอียดครั้งที่ 2 ที่กำลังขยาย 3500 เท่า ฝุ่นหินปูนที่กำลังขยาย 3500 เท่าและผงซิลิกาที่กำลังขยาย 7500 เท่า ตามลำดับ

### 2.3.1 ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination Number) ของวัสดุผงแต่ละชนิด

จากการหาค่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุผงที่เกาะตัวกันอย่างหลวม ๆ ในสถานะแห้งนั้น นอกจากจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างของวัสดุผงแล้ว ยังสัมพันธ์กับค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันอีกด้วย โดยค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันนั้นหมายถึงจำนวนอนุภาคที่สัมผัสกับอนุภาคหนึ่ง ๆ ทุกผิวสัมผัส ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นตัวอย่างของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียวกันที่มีค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 6 และ 12 ซึ่งสรุปได้ว่า ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่สูงจะทำให้เกิดการเรียงตัวของอนุภาคที่แน่น นั่นคือ ค่าสัดส่วนช่องว่างจะน้อยลง ตารางที่ 2.4<sup>[40]</sup> จะแสดงถึงค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันของอนุภาคทรงกลมที่สัดส่วนช่องว่างต่าง ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันและค่าสัดส่วนช่องว่างนี้มีผู้สนใจศึกษาและเสนอสมการทางคณิตศาสตร์มากมายดังแสดงในตารางที่ 2.5<sup>[40]</sup> และรูปที่ 2.22<sup>[40]</sup> อย่างไรก็ตาม Melmore<sup>[41]</sup> เสนอว่าค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียวกันจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 4 เนื่องจากเป็นค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดความเสถียรภาพทางรูปร่าง

จากรูปที่ 2.22 และตารางที่ 2.5 พบว่า สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ที่ใช้วัสดุผงที่มีสัดส่วนช่องว่างตั้งแต่ 0.4-0.7 สมการที่ 2 ซึ่งเสนอโดย Ben Aim และ Le Goff<sup>[42]</sup> จะสอดคล้องมากที่สุด นั่นคือ

$$k = \frac{\pi}{\mathcal{E}} \quad (2.2)$$

โดยที่

$k$  = ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชัน

$\mathcal{E}$  = ค่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาค

สำหรับการหาขนาดของวัสดุผงซึ่งมีขนาดเล็กมาก สามารถใช้สมมติฐานในการพิจารณารูปร่างของอนุภาคให้เป็นทรงกลมและขนาดของอนุภาคจะใช้สมมติฐานให้อนุภาคมีขนาดเดียวกัน ดังนั้นขนาดของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและความถ่วงจำเพาะดังนี้

$$d_{av} = \frac{6}{\rho_p \cdot SSB_p} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$d_{av}$  = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

$\rho_p$  = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผง

$SSB_p$  = พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุผงเมื่อทดสอบด้วยวิธีของเบลน

ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันจึงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.2) โดยค่าสัดส่วนช่องว่างของวัสดุผงจะทดสอบคล้ายกับกรณีการหารูปร่างของอนุภาคแต่ไม่ได้ทำการแยกขนาด โดยยังใช้ขนาดคละหลายขนาดที่เป็น

ขนาดคละดั้งเดิมของวัสดุผงซึ่งจะทำให้ค่าสัดส่วนช่องว่างลดลงเล็กน้อย สำหรับค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันและคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผงชนิดต่าง ๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

## 2.4 แบบจำลองทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

ที่สภาวะอิ่มตัวหรือที่ปริมาณน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผง ปริมาณน้ำจะเข้าไปเติมเต็มทั้งช่องว่างภายในและช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุผง ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่เป็นสัดส่วน โดยปริมาตรจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคซึ่งเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรเช่นกัน นั่นคือ เมื่อสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำมีค่ามากขึ้นด้วยเนื่องจากมีช่องว่างที่จะกักเก็บน้ำได้มากกว่านั่นเอง

ดังนั้น แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยปริมาตรจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกว่าแบบจำลองที่ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยน้ำหนักดังเหตุผลที่กล่าวมา สำหรับวัสดุผงที่มีความพรุน เช่น ถ้ำลอย นั้น จะทำให้มีการกักเก็บน้ำมากขึ้นเพราะนอกจากจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคแล้วยังมีช่องว่างภายในอนุภาคที่สามารถกักเก็บน้ำได้อีก แต่เนื่องจากค่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างของอนุภาค ดังนั้น จะสามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่เป็นสัดส่วน โดยปริมาตรจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ผลจากรูปร่างของวัสดุผงและความพรุนภายในดังนี้

$$\beta_{p.vol} = \beta_{p.vol. (shape)} + \beta_{p.vol (porosity)} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \beta_{p.vol} &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง โดยปริมาตร} \\ \beta_{p.vol (shape)} &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงจากผลของรูปร่าง} \\ \beta_{p.vol (porosity)} &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงจากผลของความพรุน (ถ้ำลอย)} \end{aligned}$$

### 2.4.1 ผลของรูปร่างต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

จากผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงทั้ง 9 ประเภท เมื่อไม่คำนึงถึงผลของความพรุนภายในอนุภาคพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่เป็นสัดส่วน โดยปริมาตรจะขึ้นกับค่าสัดส่วนช่องว่างของวัสดุผงในสภาวะแห้งและรูปร่างของวัสดุผงเป็นหลัก เมื่อพิจารณารูปที่ 2.23 จะพบว่า วัสดุผงจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นหากมีสัดส่วนช่องว่างที่สูงขึ้นและรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุมมากขึ้น สำหรับวัสดุผงที่มีรูปร่างกลมซึ่งในงานวิจัยนี้คือถ้ำลอยนั้น พบว่า จะกักเก็บน้ำได้น้อยกว่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีอยู่เดิมในสภาวะแห้งทั้งนี้เนื่องจากลักษณะรูปร่างที่กลมนั้นกักเก็บน้ำได้น้อยมาก แต่สำหรับวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมนั้นจะสามารถกักเก็บน้ำได้มากกว่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างวัสดุผงในสภาวะแห้ง เนื่องจากรูปร่างที่ไม่แน่นอนและเป็นเหลี่ยมมุมมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ดีกว่ารูปร่างที่กลมทำให้ช่วยในการกักเก็บน้ำได้เพิ่มขึ้น

ในกรณีของถ้ำลอยซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ถ้ำลอยรูปร่างกลมเหมือนกัน แต่มีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ต่างกัน 4 ประเภทนั้น พบว่ามีเพียงถ้ำลอย FA2 ที่มีขนาดเล็กสุดชนิดเดียวที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรเป็นลักษณะเดียวกับวัสดุผงรูปร่างอื่น ๆ คือเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ในขณะที่ถ้ำลอยขนาดอื่น ๆ ไม่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของถ้ำลอยไม่ใช่มีเพียงสัดส่วนช่องว่างของวัสดุผงและรูปร่างเท่านั้นยังขึ้นกับความพรุนภายในซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของถ้ำลอยอีกด้วย โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป เมื่อพิจารณารูปที่ 2.23 ใหม่โดยตัดถ้ำลอยประเภทอื่น ๆ ทิ้ง เหลือเพียงถ้ำลอย FA2 จะได้ว่ารูปที่ 2.24 ซึ่งได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่มีค่า  $R = 96\%$  ระหว่างอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรกับสัดส่วนช่องว่าง ( $\beta_{p,vol}/\mathcal{E}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม ( $\psi$ ) ดังนั้น สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่เป็นผลจากรูปร่างของวัสดุผงได้ดังนี้

$$\beta_{p,vol} (shape) = 0.349 \cdot \mathcal{E}(\psi + 1.644) \quad (2.5)$$

โดยที่

$\mathcal{E}$  = สัดส่วนช่องว่างโดยปริมาตรของวัสดุผงที่ไม่ได้ทำการแยกขนาด

$\psi$  = สัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผง

สมการที่ (2.5) นี้จะใช้ได้กับวัสดุผงทั่วไปที่ไม่มีความพรุนภายในอนุภาค หากวัสดุผงที่ใช้มีความพรุนสูง เช่น ถ้ำลอย จะมีการคูดน้ำมากทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำสูงขึ้นอีก จำเป็นต้องเพิ่มผลของความพรุนไปในสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำดังสมการที่ (2.4) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.4.2 ผลของความพรุนของถ้ำลอยต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ

จากตารางที่ 2.4 ถ้ำลอยทั้ง 4 ประเภทซึ่งมีขนาดเท่ากับ 7.1 13.9 17.6 และ 24.2  $\mu\text{m}$  พบว่า ขนาดของถ้ำลอยที่ใหญ่ขึ้นทำให้ความว่างจำเพาะมีค่าต่ำลง แสดงว่า ถ้ำลอยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีความพรุนภายในมากขึ้นจึงทำให้มีน้ำหนักเบา ดังนั้น จึงใช้สมมติฐานว่า ความพรุนของถ้ำลอยจะขึ้นกับขนาดของถ้ำลอย เนื่องจากค่า  $\beta_{p,vol}(shape)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) ดังนั้นจึงสามารถหาค่า  $\beta_{p,vol}(porosity)$  ได้ ซึ่งพบว่าค่า  $\beta_{p,vol}(porosity)$  ของถ้ำลอยมีความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ที่มีค่า  $R = 88\%$  กับขนาดของถ้ำลอย ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งจากรูปจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของถ้ำลอยที่เป็นผลจากความพรุนที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0078 หรือ 0.78% โดยปริมาตร และค่าจะสูงขึ้นหากใช้ถ้ำลอยขนาดใหญ่ขึ้น สาเหตุที่ไม่ใช่ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงเนื่องจากค่า  $\beta_{p,vol}(porosity)$  จะมีค่าเป็นลบเมื่อถ้ำลอยมีขนาดเล็ก ๆ ซึ่งหมายถึงถ้ำลอยมีการคายน้ำจึงไม่สอดคล้องกับความจริง โดยสามารถสร้างแบบจำลองทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำที่เป็นผลจากความพรุนของถ้ำลอยได้ดังนี้

$$\beta_{p,vol} (porosity) = 0.0078 \exp(0.0802 \cdot d_m) \quad (2.6)$$

เมื่อ

$d_{av}$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดลอย

สรุปได้ว่า ในกรณีของเม็ดลอย การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำต้องใช้สมการที่ (2.5) และ (2.6) ประกอบกัน และหากใช้วัสดุผงประเภทอื่นที่มีความพรุนภายใน สมการที่ (2.6) อาจมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้สอดคล้องกับวัสดุผงประเภทนั้น ๆ อนึ่ง หากต้องการแปลงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำจากโดยปริมาตรให้เป็นโดยน้ำหนักสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2.7) ดังนี้

$$\beta_{p.wt.} = \frac{\beta_{p.vol.}}{\rho} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$\beta_{p.wt.}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง โดยสัดส่วนน้ำหนัก

$\rho$  = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผง

## 2.5 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่ได้จากงานวิจัยนี้ ดังสมการที่ (2.4)-(2.6) เป็นแบบจำลองที่แตกต่างไปจากแบบจำลองที่ผ่าน ๆ มาที่มักคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่เป็นสัดส่วนโดยน้ำหนัก โดยแบบจำลองของ Khunthongkaew<sup>(12)</sup> ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยน้ำหนักจากความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\beta_{p.wt.} = \xi_c \xi_s \left[ \frac{0.116 S_p^{0.166}}{\rho_p^{1.034}} \right] \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$\xi_s = 1 + [0.056 \cdot S_p^{0.35}] (\psi - 1) \quad (2.9)$$

โดยที่

$\beta_{p.wt.}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงซึ่งเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนัก

$\xi_c$  = ค่าประกอบที่ขึ้นกับขนาดคละของวัสดุผง กล่าวคือ

มีค่าเท่ากับ 1.5 เมื่อวัสดุผงถูกแยกขนาดให้อยู่ในช่วงขนาดเดียว

มีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่อวัสดุผงมีขนาดคละตามปกติ

$\xi_s$  = ค่าประกอบที่ขึ้นกับความละเอียดและรูปร่างของวัสดุผง

$S_p$  = พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุผง ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

$\rho_p$  = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผง

$\psi$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผง

จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยใช้แบบจำลองในสมการที่ (2.5) สำหรับวัสดุผงที่ไม่มี ความพรุนและสมการที่ (2.4) (2.5) และ (2.6) สำหรับถ้ำลอย เปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Khunthongkaew<sup>(12)</sup> ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้และวัสดุ ผงจากงานวิจัยของ Khunthongkaew<sup>(12)</sup> แสดงดังตารางที่ 2.7 ซึ่งพบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรดังสมการที่ (2.4)-(2.6) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากกว่า ซึ่งผลเปรียบ เทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากผลการทดลองจริงแสดงดังรูปที่ 2.26

เมื่อพิจารณาแบบจำลองในสมการที่ (2.8) และ (2.9) พบว่ามีข้อบกพร่องอยู่หลายประการ เช่น ค่าประกอบที่ ขึ้นกับขนาดคละของวัสดุผงที่ใช้ เป็นเพียงค่าโดยประมาณที่ไม่สามารถระบุถึงขนาดคละที่แท้จริงของวัสดุผง และในกรณีที่วัสดุผงมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงแต่มีสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคต่ำ เช่น วัสดุผง FA2 ค่าที่ได้จาก แบบจำลองจะมีค่าสูงกว่าผลการทดลองจริงมาก เป็นต้น ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ น้ำของวัสดุผงโดยปริมาตร ดังสมการที่ (2.4)-(2.6) จะมีความเหมาะสมและถูกต้องมากกว่าแบบจำลองที่ใช้ ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยน้ำหนัก จากสมการที่ (2.8) และ (2.9)

## 2.6 ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมากลงในเพศจะเกิดประจุลบติดอยู่ตามอนุภาคของวัสดุผง ประจุลบเหล่านี้จะก่อให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคจึงทำให้อนุภาคไม่จับกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งมีผลให้สามารถขับน้ำที่ถูกขังใน ช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ ส่วนผสมจึงมีลักษณะที่ลื่นไหลได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงจากผลของสารลดน้ำอย่างมากได้ดังนี้

$$\beta'_{p,wt.} = \phi_{sp} \beta_{p,wt.} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$\beta'_{p,wt.}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก(โดยน้ำหนัก)

$\beta_{p,wt.}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่ไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก(โดยน้ำหนัก)

$\phi_{sp}$  = ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำเมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาก

ดังนั้น ค่า  $\phi_{sp}$  จะมีค่าไม่เกินหนึ่งเสมอซึ่งจากผลการทดลองเมื่อใช้วัสดุผงเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 ถ้ำลอย และถ้ำลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้สัญลักษณ์เป็น OFA10, OFA20 และ OFA40 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.8 พบว่าผลของสารลดน้ำอย่างมากในการลดค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุ ผงทั้งสองมีค่าที่แตกต่างกันเนื่องจากวัสดุผงทั้งสองมีรูปร่างและลักษณะพื้นผิวที่ไม่เหมือนกัน โดยผลส่วนนี้ แสดงดังรูปที่ 2.27 ซึ่งจะได้ว่า สารลดน้ำอย่างมากจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่มีรูปร่าง เป็นเหลี่ยมมุมได้ดีกว่าวัสดุผงที่มีรูปร่างกลมทั้งนี้เนื่องจากวัสดุผงที่เป็นเหลี่ยมมุมจะมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน มากกว่าวัสดุผงที่มีรูปร่างกลม นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณสารลดน้ำอย่างมากจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ

น้ำมีค่าลดลงไปอีกแต่เมื่อใส่ในปริมาณที่มากกว่า 1.0% โดยน้ำหนักของวัสดุผงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Wangchuk<sup>(43)</sup> ที่พบว่า ค่า  $\phi_{sp}$  ขึ้นกับชนิดของวัสดุผงรวมไปถึงชนิดและปริมาณของสารลดน้ำอย่างมากที่ใช้ ซึ่งทำการทดลองโดยใช้สารลดน้ำอย่างมาก 3 ชนิดคือ สารลดน้ำอย่างมากชนิดโพลีคาร์บอกซิลิก สารลดน้ำอย่างมากชนิดที่มีเนฟทาซีน และสารลดน้ำอย่างมากประเภทลิกโนซัลโฟเนต และใช้วัสดุผง 3 ชนิดคือ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและฝุ่นหินปูน พบว่า สำหรับวัสดุผงชนิดเดียวกัน สารลดน้ำอย่างมากชนิดโพลีคาร์บอกซิลิกจะทำให้ค่า  $\phi_{sp}$  มีค่าต่ำสุดหรือช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำได้มากที่สุด ในขณะที่เมื่อใช้สารลดน้ำอย่างมากชนิดเดียวกัน ค่า  $\phi_{sp}$  ในกรณีของซีเมนต์และฝุ่นหินปูนจะมีค่าต่ำกว่าในกรณีของเถ้าลอย สำหรับสารลดน้ำอย่างมากที่มีสารเคมีพื้นฐานเป็นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทที่ใช้ในการทดลองจะสามารถสร้างสมการที่ใช้หาค่า  $\phi_{sp}$  สำหรับวัสดุผงที่มีรูปร่างต่าง ๆ ได้ดังนี้

สารลดน้ำอย่างมากชนิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท

$$\phi_{sp} = 1 - 0.08\psi(1 - e^{-1.4\psi\omega_*}) \quad (2.11)$$

เมื่อ

$\phi_{sp}$  = ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำเมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาก

$\psi$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผง

$\omega_*$  = ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุผง)

จากสมการที่ (2.11) จะสามารถสรุปได้ว่า ในกรณีของเถ้าลอยที่มีค่า  $\psi$  เท่ากับ 1 ค่า  $\phi_{sp}$  จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.92 ในขณะที่กรณีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีค่า  $\psi$  เท่ากับ 1.9 ค่า  $\phi_{sp}$  จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.85 แสดงว่าสารลดน้ำอย่างมากจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงลงได้ถึงค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงว่ามีปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่มากเพียงพอแล้วในการดูดซับบนผิวอนุภาคของวัสดุผง

สำหรับสารลดน้ำอย่างมากชนิดอื่น ๆ จะใช้ข้อมูลจากการทดลองของ Wangchuk<sup>(43)</sup> สำหรับผลของสารลดน้ำอย่างมากชนิดที่มีเนฟทาซีน สารลดน้ำอย่างมากชนิดโพลีคาร์บอกซิลิกและสารลดน้ำอย่างมากประเภทลิกโนซัลโฟเนตต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.28 - 2.30 ดังนั้นสามารถสร้างสมการที่ใช้หาค่า  $\phi_{sp}$  สำหรับสารลดน้ำอย่างมากแต่ละชนิดและรูปร่างของวัสดุผงต่าง ๆ ได้ดังนี้

สารลดน้ำอย่างมากชนิดเนฟทาซีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท

$$\phi_{sp} = 1 - 0.12\psi(1 - e^{-1.24\psi\omega_*}) \quad (2.12)$$



สารลดน้ำอย่างมาฆนิกโพลีคาร์บอกซิลิก

$$\phi_{sp} = 1 - 0.15\psi \left(1 - e^{-1.62\psi\omega_*}\right) \quad (2.13)$$

สารลดน้ำอย่างมาฆนิกคลิกโนซัลโฟเนต

$$\phi_{sp} = 1 - 0.08\psi \left(1 - e^{-0.95\psi\omega_*}\right) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.11) - (2.14) จะพบว่า สารลดน้ำอย่างมาฆนิกโพลีคาร์บอกซิลิกจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงได้มากที่สุดเมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากันทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลของอะตอมคาร์บอนที่มีโซ่แตกแขนงไปด้านข้างส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างมาฆนิกต่าง ๆ ที่มีต่อค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2.31

## 2.7 ผลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

ปัญหาที่สำคัญสำหรับงานคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงคือ การสูญเสียความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตในสภาวะสด กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมสูงขึ้น คอนกรีตจะมีอัตราการสูญเสียน้ำที่มากกว่าปกติทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงที่ปริมาณน้ำเท่าเดิม ด้วยเหตุผลนี้ วัสดุผงจะมีความต้องการน้ำที่มากขึ้นจึงเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยแต่จะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมลดลง จากการศึกษาของ Khunthongkaew<sup>(12)</sup> ซึ่งได้เสนอสมการที่ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงซึ่งเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนัก สำหรับช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 10-50°C โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำที่อุณหภูมิ 28°C เป็นตัวอ้างอิงดังสมการต่อไปนี้

$$\beta_{p.wt.}(T^\circ C) = \xi_T \times \beta_{p.wt.}(28^\circ C) \quad (2.15)$$

$$\text{และ} \quad \xi_T = 0.04T^{0.62} + 0.684 \quad (2.16)$$

เมื่อ

$\beta_{p.wt.}(T^\circ C)$  = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ (T°C)

$\xi_T$  = ค่าประกอบที่ขึ้นกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

$\beta_{p.wt.}(28^\circ C)$  = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 28°C

ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป จะต้องมีการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงซึ่งอาจจะใช้แบบจำลองจากสมการที่ (2.5) และ (2.16) ประกอบเพิ่มเติม

## 2.8 สรุป

จากการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง สามารถสรุปผลต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. วัสดุผงประเภทเดียวกันจะมีรูปร่างที่เหมือนกันในทุกช่วงขนาดของอนุภาค
2. วัสดุผงรูปร่างทรงกลมจะมีสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคในสถานะแห้งที่น้อยที่สุด ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมมีค่าเท่ากับ 1 โดยเด็กลอยจึกได้ว่ามีรูปร่างที่เป็นทรงกลม ในขณะที่ผงซิลิกาจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมที่สูงที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 2.5
3. ค่าสัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคในสถานะแห้งนอกจากจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างแล้วยังขึ้นกับค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันอีกด้วย โดยค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่สูงจะหมายถึงการเรียงตัวของอนุภาคที่แน่นจึงทำให้ค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่าน้อยลง
4. วัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมจะสามารถกักเก็บน้ำได้มากกว่าสัดส่วนช่องว่างในสถานะแห้ง ขณะที่เด็กลอยที่มีรูปร่างกลมจะกักเก็บน้ำได้น้อยกว่าสัดส่วนช่องว่างนี้ เนื่องจากลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนและเป็นเหลี่ยมมุมจะช่วยให้เกิดการกักเก็บน้ำได้มากขึ้นกว่าลักษณะรูปร่างที่กลม
5. สำหรับวัสดุผงที่ไม่มีความพรุนภายในหรือน้อยมาก ซึ่งทราบได้โดยค่าความถ่วงจำเพาะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของอนุภาค ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและสัดส่วนช่องว่างในสถานะแห้งของวัสดุผงนั้น ๆ
6. สำหรับเด็กลอยซึ่งมีความพรุนภายใน ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรจะเป็นผลจาก 2 ส่วนคือ รูปร่างและความพรุนซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของเด็กลอย
7. ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเด็กลอยที่เป็นผลจากความพรุนจะมีความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับขนาดของเด็กลอย โดยมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.78% โดยปริมาตรของเด็กลอย
8. แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่คำนวณเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากกว่าแบบจำลองเดิมที่ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่เป็นสัดส่วนโดยน้ำหนัก เนื่องจากสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงที่น้ำจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เป็นสัดส่วนโดยปริมาตรเช่นกัน
9. สารลดน้ำอย่างมากมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงมีค่าลดลงโดยขึ้นกับปริมาณและชนิดสารลดน้ำอย่างมากรวมไปถึงรูปร่างของวัสดุผงที่ใช้ โดยจากผลการทดลองพบว่า สารลดน้ำอย่างมากชนิดโพลีคาร์บอกซิลิกจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงได้มากที่สุดเมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากัน และสำหรับวัสดุผงที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สารลดน้ำอย่างมากจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำได้มากกว่าวัสดุผงที่มีรูปร่างกลม
10. อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงเปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำมีค่าสูงขึ้นด้วย การนำแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของอุณหภูมิสภาพแวดล้อมประกอบด้วยจะทำให้ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากที่สุด

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลอง\*

สารประกอบ	ซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	21.45	41.69
Aluminium oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.35	22.08
Ferric oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.01	9.15
Calcium oxide (CaO)	67.33	10.06
Magnesium oxide (MgO)	1.52	2.99
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.33	2.57
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.11	0.18
Sulphur trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.31	1.25
Loss on ignition (%)	0.58	1.24

\* ข้อมูลจากงานวิจัยของ Khunthongkaew<sup>(12)</sup>

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลองและเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

Component Property	Class N	Class F	Class C	Mae-Moh Fly Ash
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , min%	70.0	70.0	50.0	72.92
So <sub>3</sub> , max%	4.0	5.0	5.0	1.25
CaO%	-	<10%	>10%	10.06
Moisture Content, Max%	3.0	3.0	3.0	0.12
Loss of ignition, Max%	10.0	6.0-12.0	6.0	1.24

ตารางที่ 2.3 ค่าสัดส่วนช่องว่างและสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผงประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิด	ช่วงขนาด	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, $\rho$ )	สัดส่วนช่องว่าง Porosity, $\epsilon_p$	สัดส่วนความหนาแน่น Fractional Density, $1-\epsilon_p$	Angularity Factor, $\psi$
ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1(OPC-I)	150 – 300 $\mu\text{m}$	3.18	0.63	0.37	1.93
	75 – 150 $\mu\text{m}$	3.18	0.62	0.38	1.89
	45 – 75 $\mu\text{m}$	3.18	0.63	0.37	1.93
ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3(OPC-III)	150 – 300 $\mu\text{m}$	3.09	0.70	0.3	2.24
	75 – 150 $\mu\text{m}$	3.09	0.69	0.31	2.20
	45 – 75 $\mu\text{m}$	3.09	0.69	0.31	2.20
ซีเมนต์ผสม(MC)	150 – 300 $\mu\text{m}$	2.96	0.58	0.42	1.71
	75 – 150 $\mu\text{m}$	2.96	0.58	0.42	1.71
	45 – 75 $\mu\text{m}$	2.96	0.57	0.43	1.67
เถ้าลอย(OFA)	150 – 300 $\mu\text{m}$	1.48	0.43	0.57	1.04
	75 – 150 $\mu\text{m}$	1.94	0.41	0.59	0.96
	45 – 75 $\mu\text{m}$	2.15	0.43	0.57	1.04
ฝุ่นหินปูน(OLP)	150 – 300 $\mu\text{m}$	2.73	0.58	0.42	1.71
	75 – 150 $\mu\text{m}$	2.73	0.59	0.41	1.75
	45 – 75 $\mu\text{m}$	2.73	0.59	0.41	1.75

ตารางที่ 2.4 ค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันและสัดส่วนช่องว่างของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียว

<u>packing type</u>	<u>coordination number</u>	<u>packing density</u>	<u>porosity</u>
face-centered cubic	12	0.7405	0.2595
	11	0.7120	0.2880
tetragonal-sphenoidal	10	0.7081	0.3019
	9	0.6134	0.3866
body-centered cubic orthorhombic	8	0.6802	0.3198
	8	0.6046	0.3954
simple cubic	7	0.5612	0.4388
	6	0.5236	0.4764
diamond	5	0.4031	0.5969
	4	0.3401	0.6599

ตารางที่ 2.5 สมการต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณหาค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียว

Mathematical Expressions for the Packing Density  
and Average Coordination Number for Monosized Spheres

$f$  = fractional density  
 $N_c$  = coordination number

Equation 1:

$$f = -0.072 + 0.1193 N_c - 0.00431 N_c^2$$

Equation 2:

$$N_c = \pi / (1 - f)$$

Equation 3:

$$N_c = 26.49 - 10.73 / f$$

Equation 4:

$$N_c = 2 \exp(2.4 f)$$

Equation 5:

$$f = ((N_c - 1) / N_c)^3$$

Equation 6:

$$f = 0.4696 + 0.02539 N_c$$

Equation 7:

$$N_c = 16 f - 2$$

Equation 8:

$$N_c = 19.7 f - 2.5$$

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของวัสดุผงและค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของวัสดุผง	ความด่างจำเพาะ	พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลม (cm <sup>2</sup> /g)	ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (μm)	Angularity Factor, $\psi$	สัดส่วนช่องว่าง, $\epsilon$	Coordination Number, $k$	สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ (โดยน้ำหนัก)	สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ (โดยปริมาตร)
OPC-I	3.18	3476	5.4	1.90	0.60	5.2	0.24	0.76
OPC-III	3.09	5084	3.8	2.20	0.63	5.0	0.27	0.83
MC	2.96	4056	5.0	1.70	0.56	5.6	0.22	0.64
OFA	1.99	2169	13.9	1.00	0.42	7.5	0.20	0.41
OLP	2.73	3981	5.5	1.70	0.56	5.6	0.23	0.63
SF	2.21	18100	1.5	2.50	0.74	4.2	0.50	1.10
FA1	1.97	1733	17.6	1.00	0.41	7.7	0.21	0.42
FA2	2.25	3734	7.1	1.00	0.50	6.3	0.21	0.48
FA3	1.94	1228	24.2	1.00	0.41	7.7	0.22	0.44

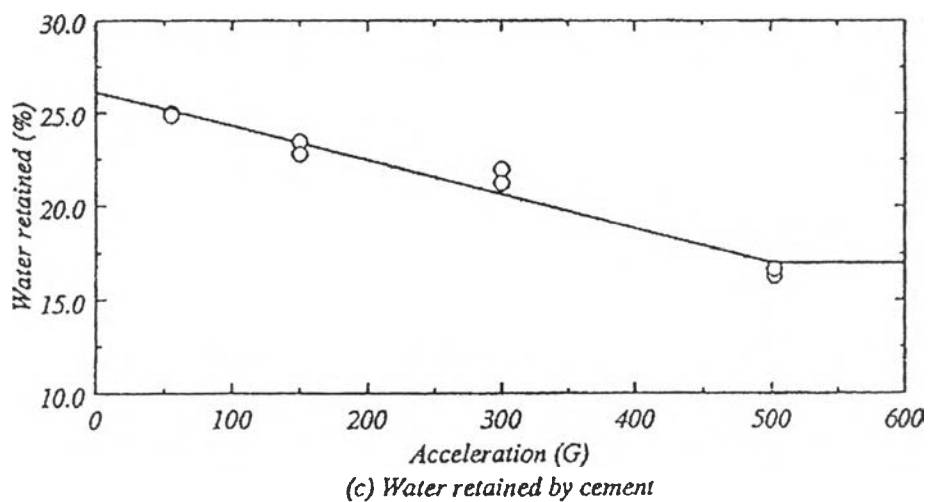
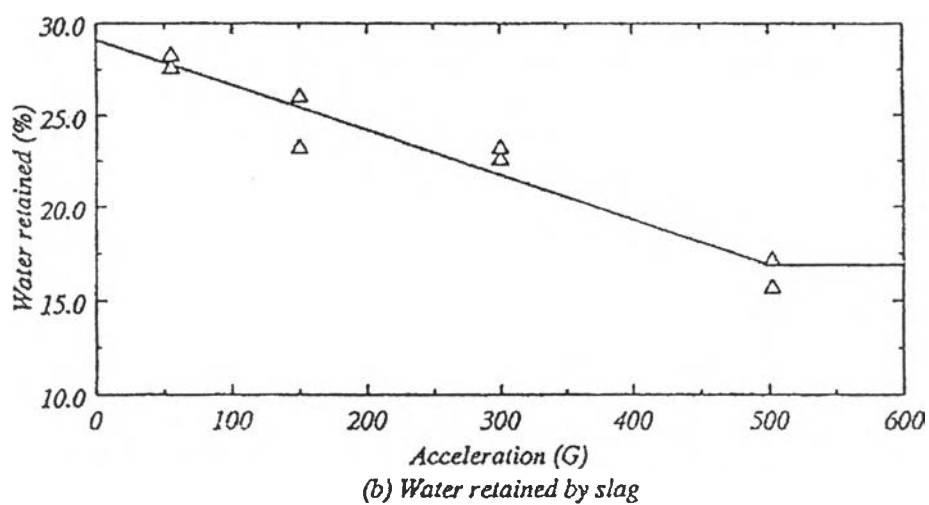
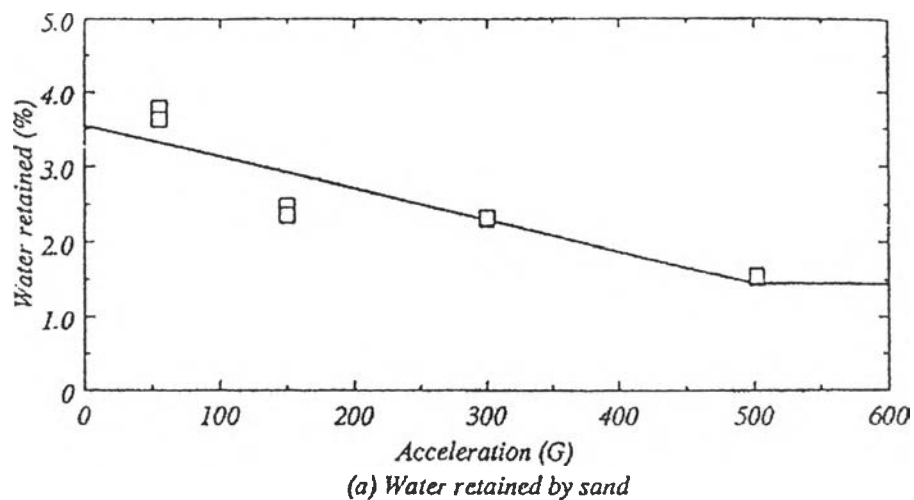
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของวัสดุผงและค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่ได้จากแบบจำลอง

ชนิดของวัสดุผง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm <sup>2</sup> /g)	ความถี่จำเพาะ	$\beta_{p,vol}$ จากการทดลอง	$\beta_{p,vol}$ จากสมการที่ (2.4)-(2.6)	$\beta_{p,vol}$ จากสมการที่ (2.8)-(2.9)	% error จากสมการที่ (2.4)-(2.6)	% error จากสมการที่ (2.8)-(2.9)
OPC-I	3476	3.18	0.76	0.74	0.80	-2.63	5.26
OPC-III	5084	3.09	0.83	0.85	1.08	2.41	30.12
MC	4056	2.96	0.65	0.65	0.77	0.00	18.46
OFA	2169	1.99	0.40	0.41	0.40	2.50	0.00
OLP	3981	2.73	0.63	0.65	0.76	3.17	20.63
SF	18100	2.21	1.11	1.07	2.08	-3.60	87.39
FA1	1733	1.97	0.41	0.41	0.59	0.00	43.90
FA2	3734	2.25	0.47	0.47	0.65	0.00	38.30
FA3	1288	1.94	0.43	0.43	0.56	0.00	30.23
NFA*	2014	1.90	0.40	0.41	0.48	2.50	20.00
NFA*	1824	1.90	0.40	0.42	0.46	5.00	15.00
NFA*	2076	1.93	0.41	0.41	0.48	0.00	17.07
NFA*	2347	2.28	0.43	0.41	0.51	-4.65	18.60
NFA*	1646	2.16	0.39	0.42	0.45	7.69	15.38
NFA*	1498	1.88	0.39	0.43	0.43	10.26	10.26
LP*	4520	2.72	0.60	0.62	0.74	3.33	23.33
LP*	2670	2.66	0.56	0.56	0.57	0.00	1.79
LP*	4100	2.67	0.67	0.62	0.70	-7.46	4.48
LP*	6670	2.68	0.72	0.70	0.94	-2.78	30.56

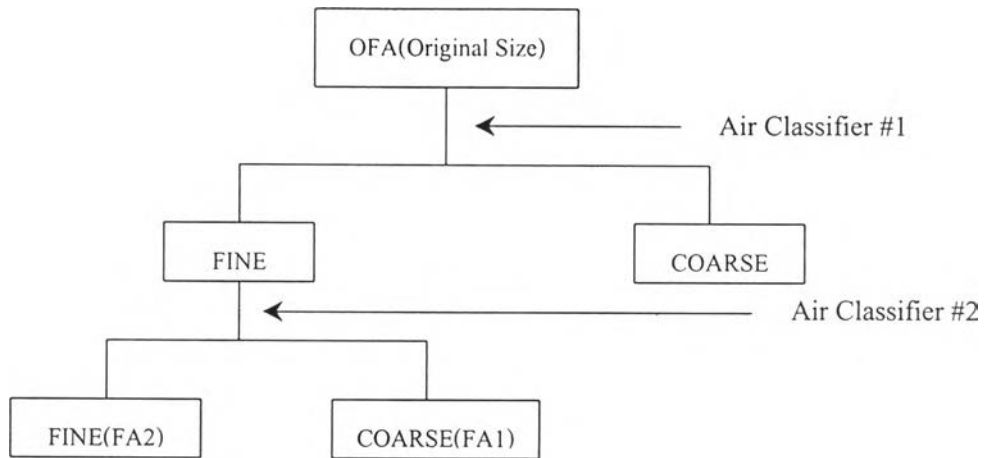
\*ข้อมูลจากงานวิจัยของ Khunthongkaew<sup>(12)</sup>, NFA = Non-Classified Fly Ash, LP = Limestone Powder

ตารางที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลองเมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาจนชนิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทในปริมาณต่าง ๆ

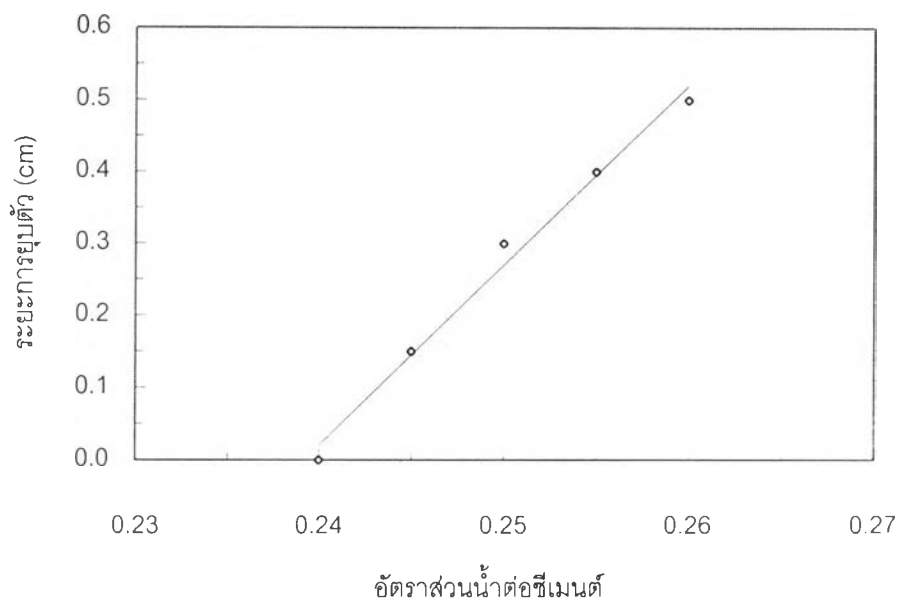
ชนิดของวัสดุผง	ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาจน (% โดยน้ำหนัก)			
	0%	0.5%	1.0%	1.5%
OPC-I	0.240	0.212	0.208	0.203
OFA10	0.236	0.208	0.204	0.198
OFA20	0.232	0.203	0.202	0.195
OFA40	0.224	0.203	0.194	0.191
OFA	0.200	0.192	0.187	0.185



รูปที่ 2.1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย แอสล็ก(Slag) และซีเมนต์โดยวิธีเซนตริฟิวส์<sup>[35]</sup>

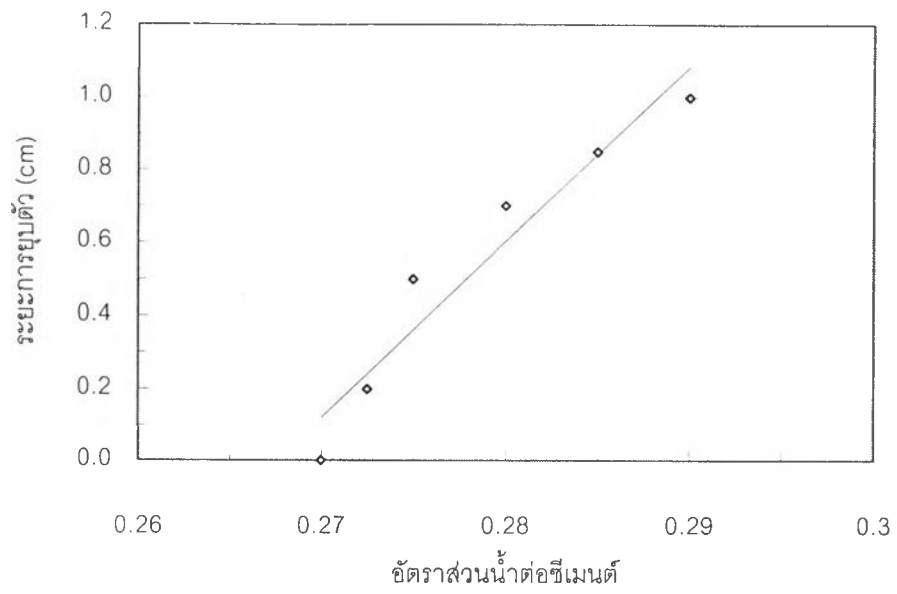


รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการแยกแ่ลลยที่ใช้ในงานวิจัย

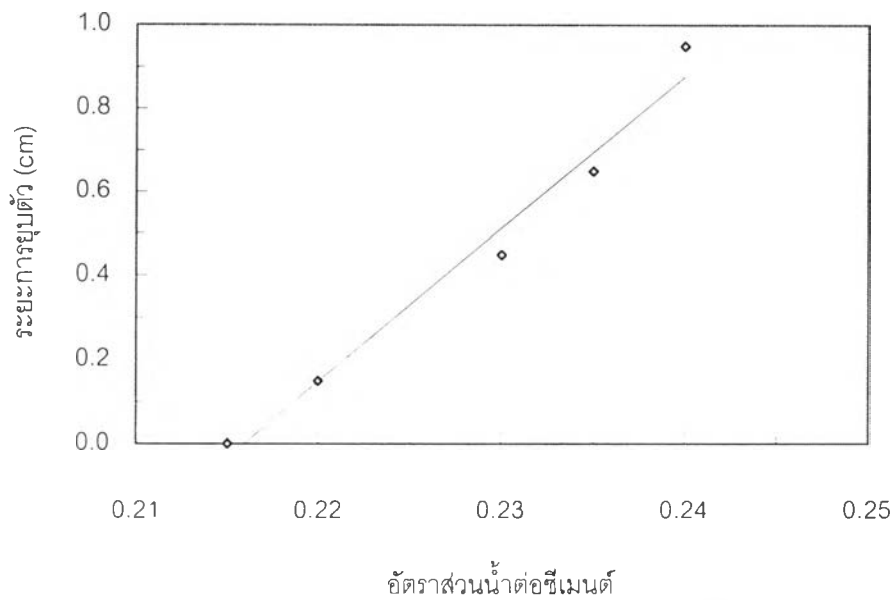


รูปที่ 2.3 ค่าการดูดตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ

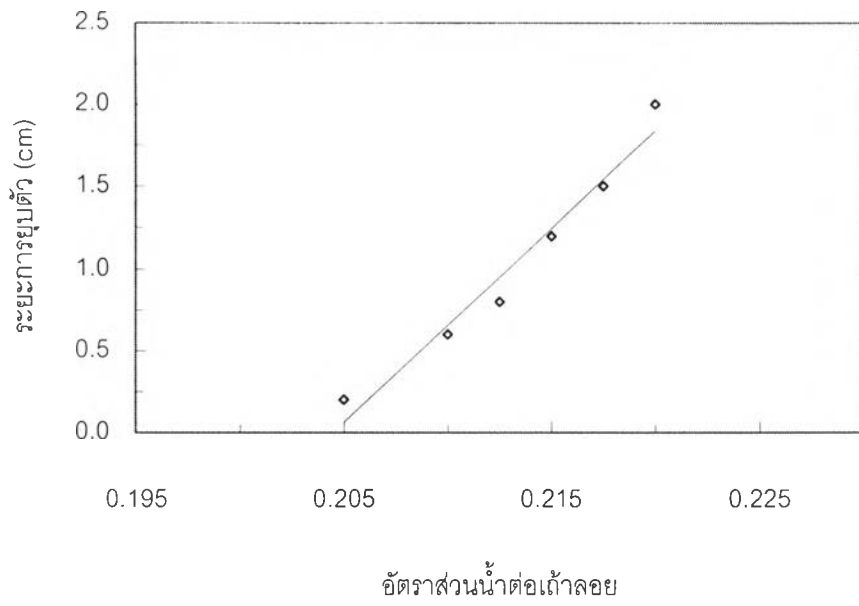




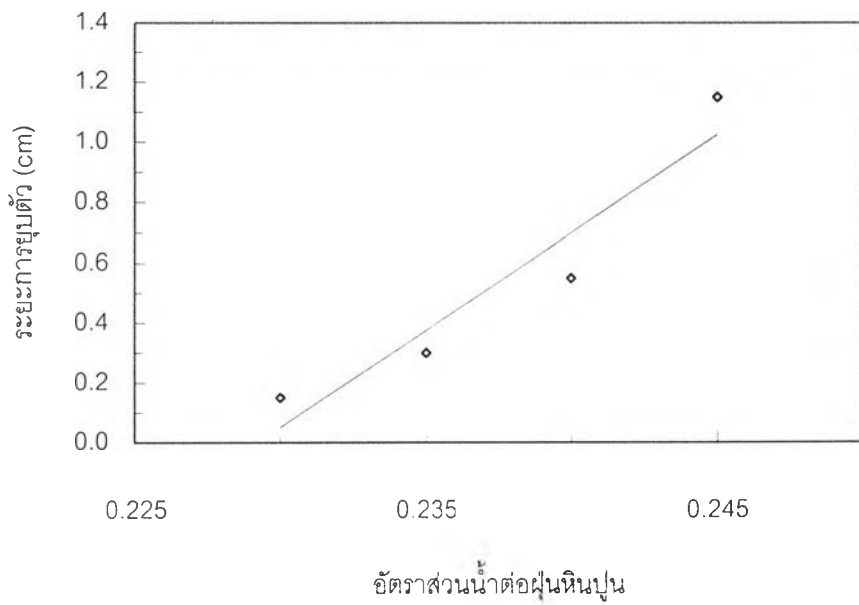
รูปที่ 2.4 ค่าการยู่บตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



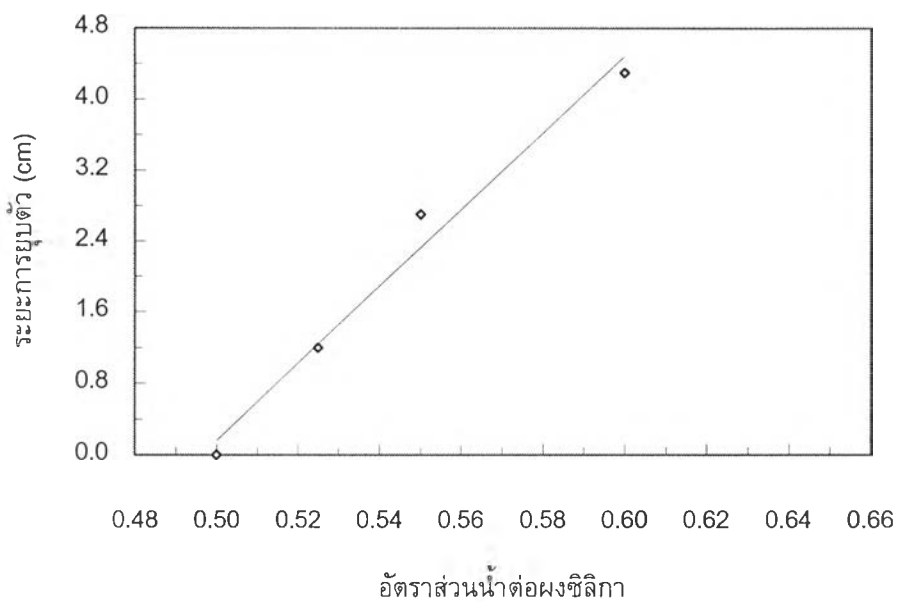
รูปที่ 2.5 ค่าการยู่บตัวของปูนซีเมนต์ผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



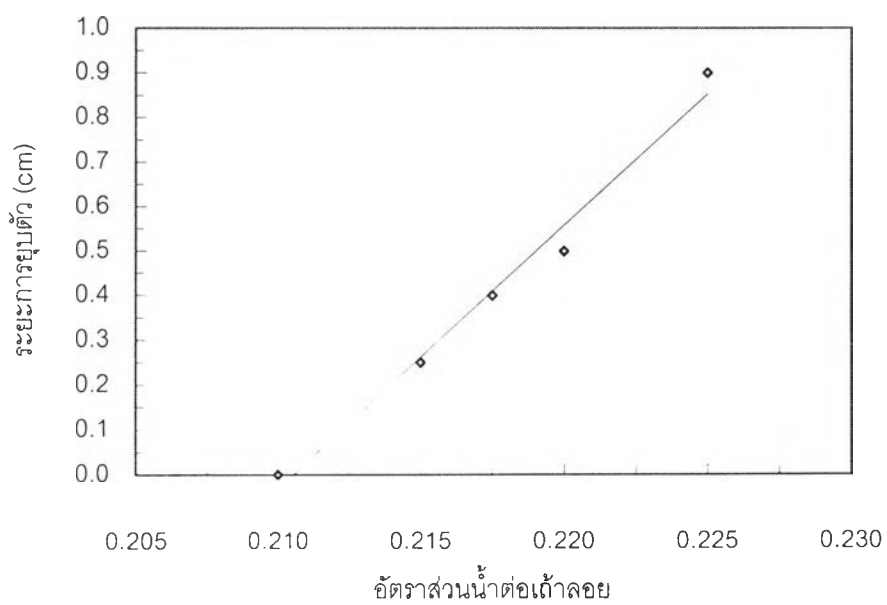
รูปที่ 2.6 ค่าการดูดตัวของถั่วลอ่ยขนาดดั้งเดิมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



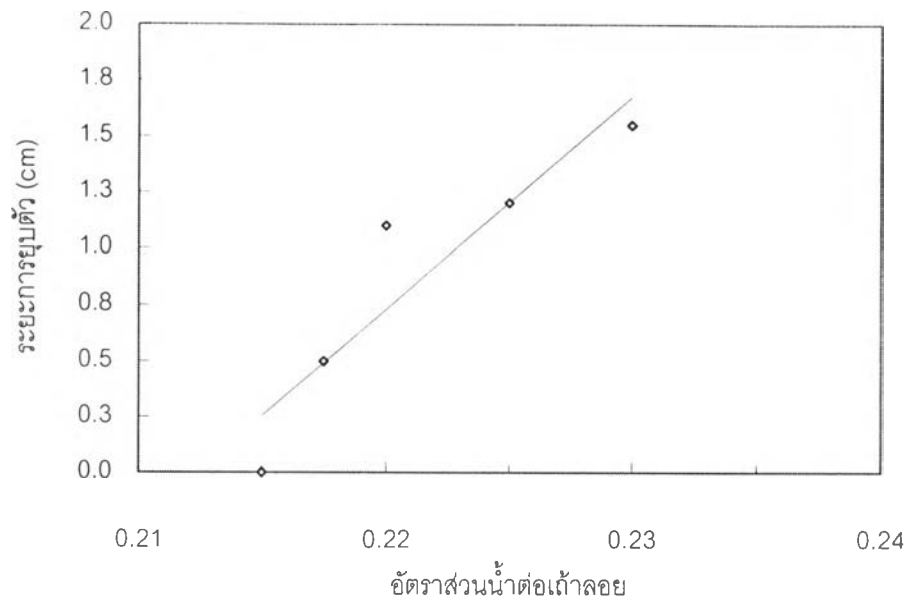
รูปที่ 2.7 ค่าการดูดตัวของฝู่นหินปูนที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



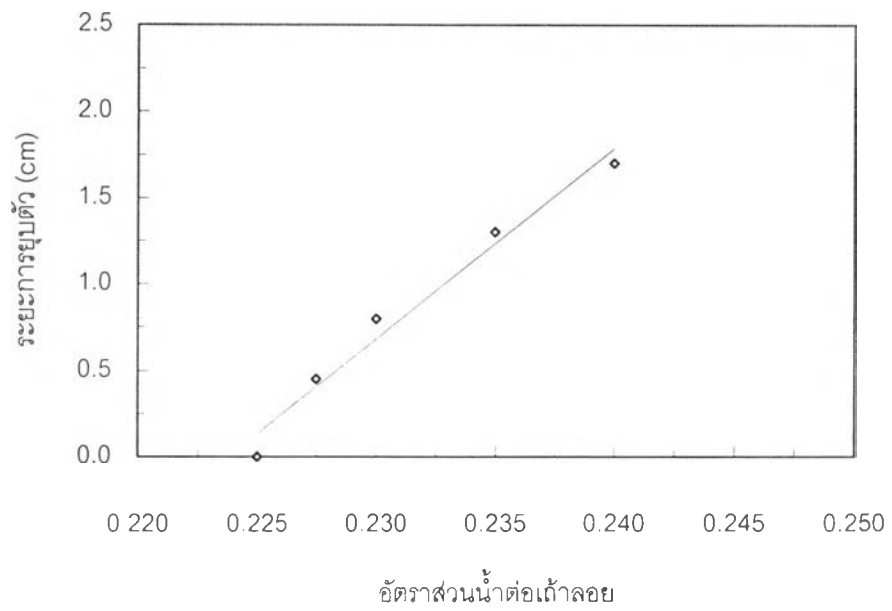
รูปที่ 2.8 ค่าการยุบตัวของผงซิลิกาที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



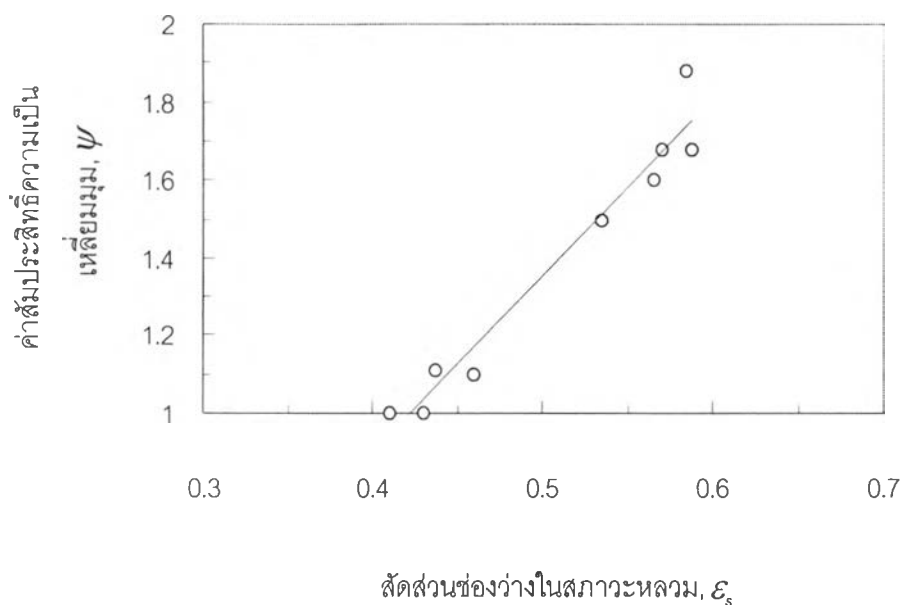
รูปที่ 2.9 ค่าการยุบตัวของเถ้าลอยแยกละเอียดครั้งที่ 1 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



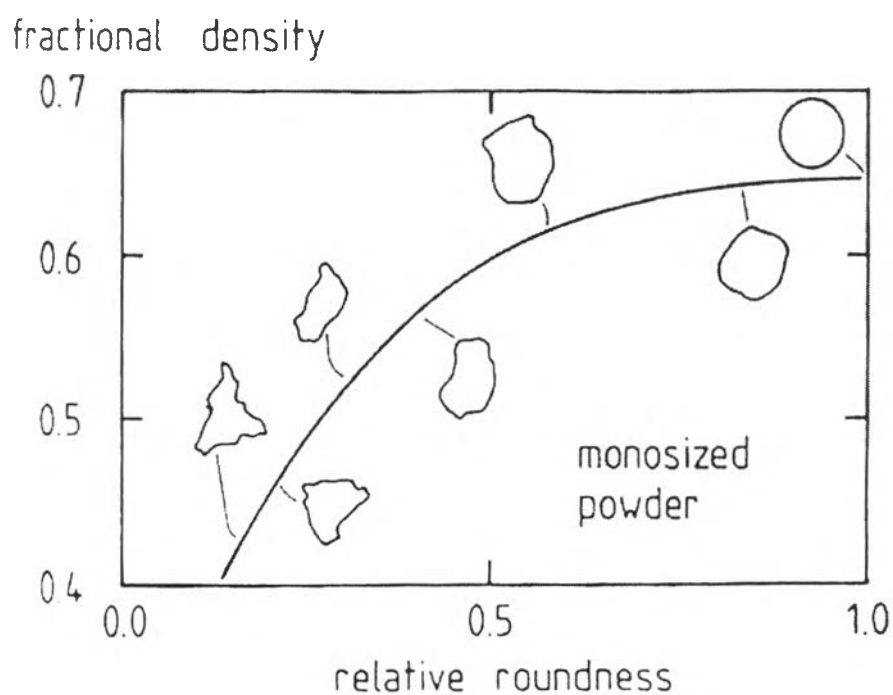
รูปที่ 2.10 ค่าการยุบตัวของแฉะลอยแยกละเอียดครั้งที่ 2 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



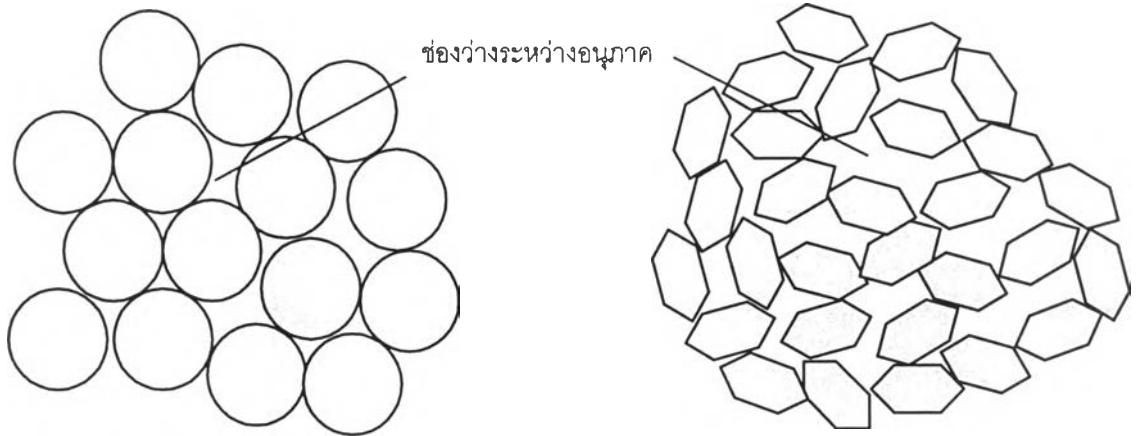
รูปที่ 2.11 ค่าการยุบตัวของแฉะลอยที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 และค้ำเบอร์ 200 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ



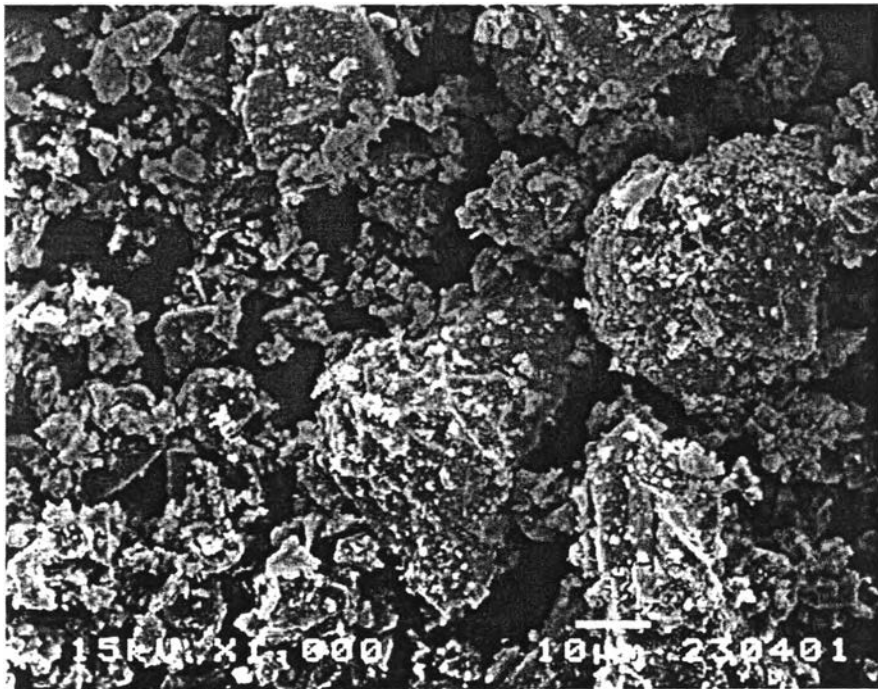
รูปที่ 2.12 ผลของสัดส่วนช่องว่างในสถานะหลวมต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม<sup>[39]</sup>



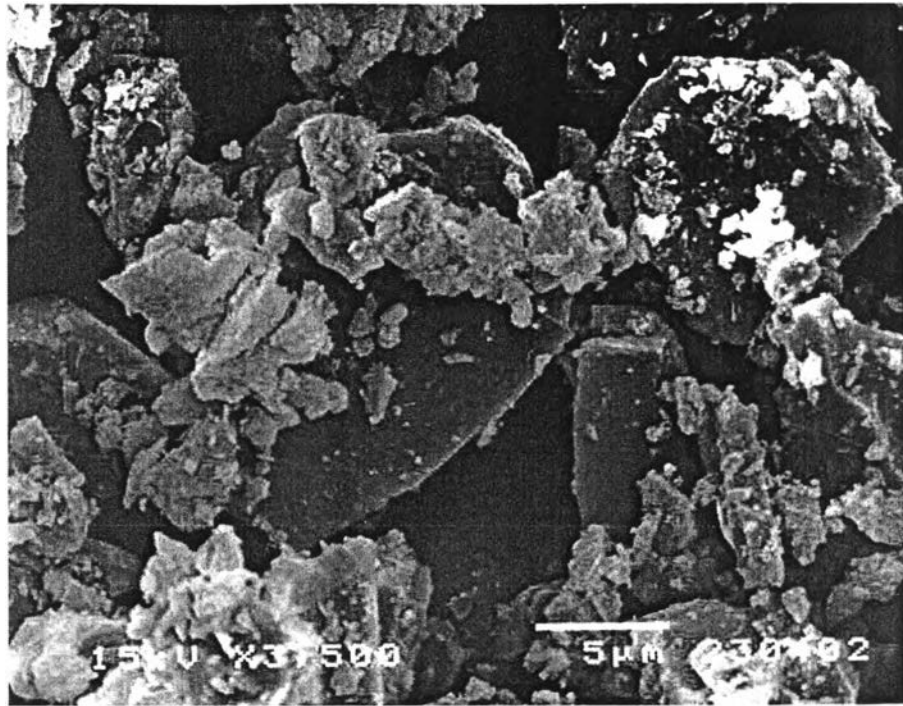
รูปที่ 2.13 ผลของสัดส่วนความหนาแน่นต่อลักษณะรูปร่างของวัสดุผงที่มีขนาดเดียวกัน<sup>[40]</sup>



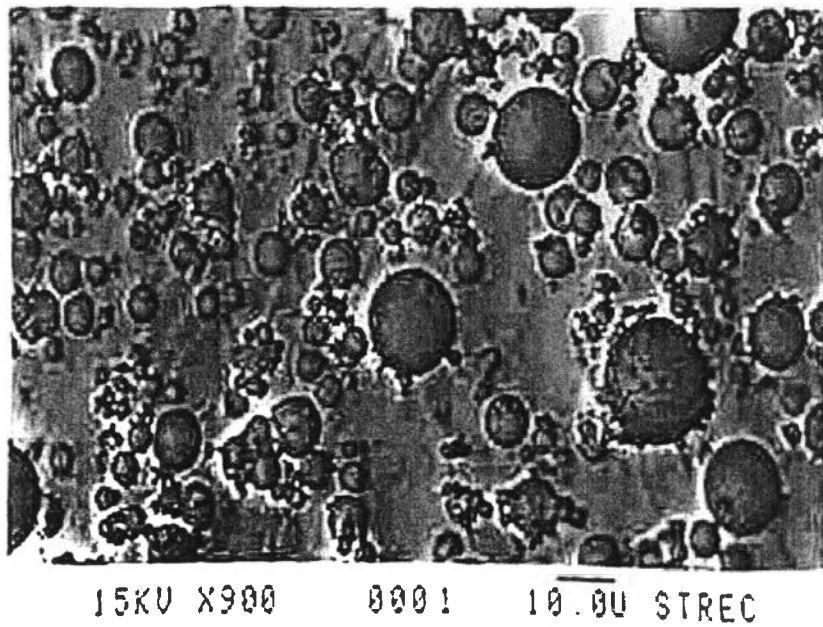
รูปที่ 2.14 สัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคเปรียบเทียบระหว่างรูปร่างกลมและมีเหลี่ยมมุม



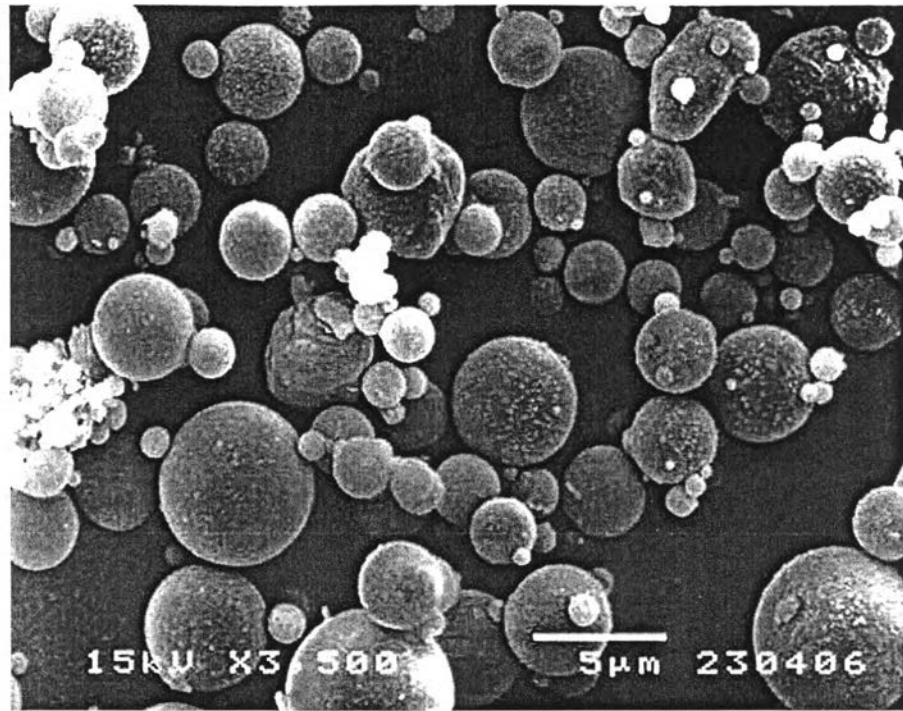
รูปที่ 2.15 ลักษณะรูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากกล้องขยายกำลังขยาย 1000 เท่า



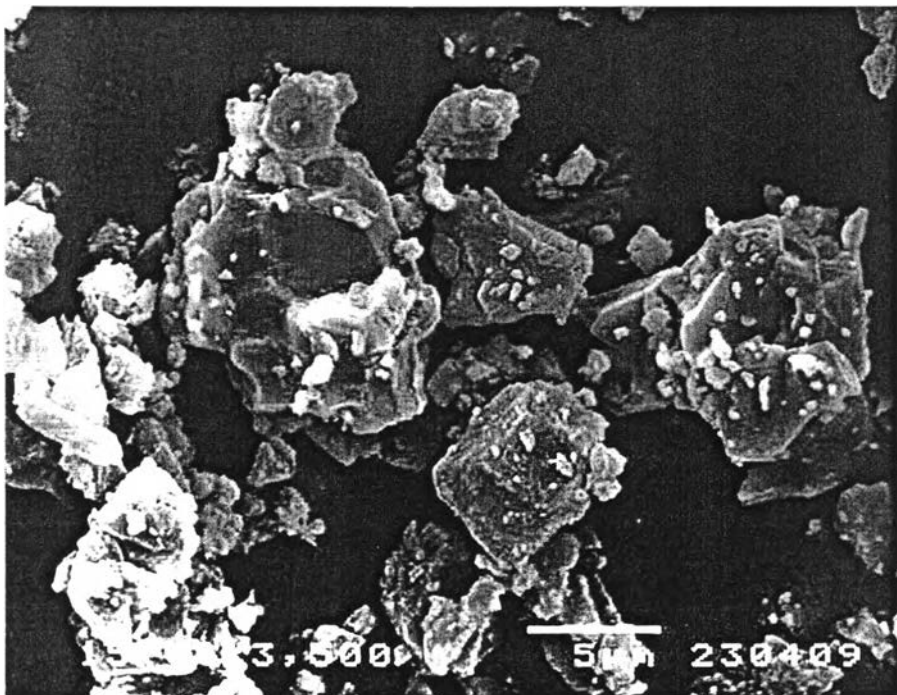
รูปที่ 2.16 ลักษณะรูปร่างของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากกล้องขยายกำลังขยาย 3500 เท่า



รูปที่ 2.17 ลักษณะรูปร่างของเม็ดลอยขนาดดั้งเดิมจากกล้องขยายกำลังขยาย 900 เท่า

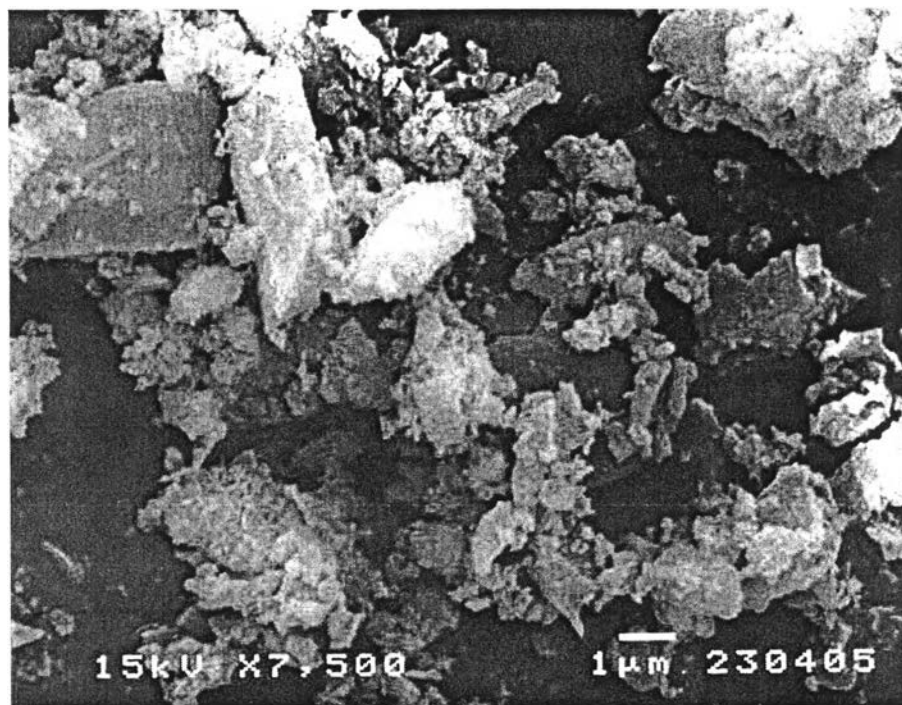


รูปที่ 2.18 ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยที่แยกละเอียดครั้งที่ 2 จากถลุงขยาขกำลังขยาข 3500 เหว

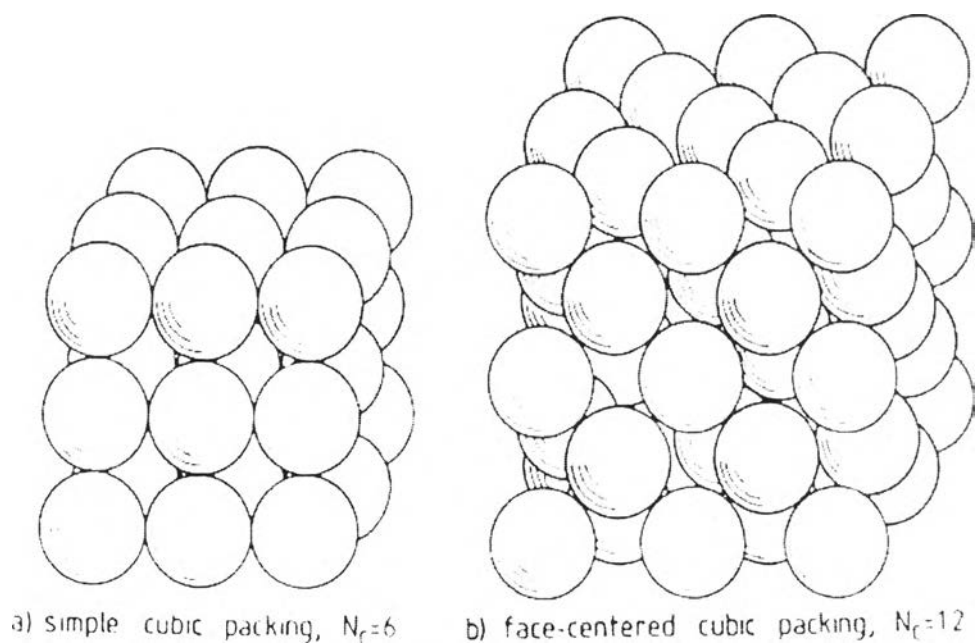


รูปที่ 2.19 ลักษณะรูปร่างของฝุ่นหินปูนจากถลุงขยาขกำลังขยาข 3500 เหว

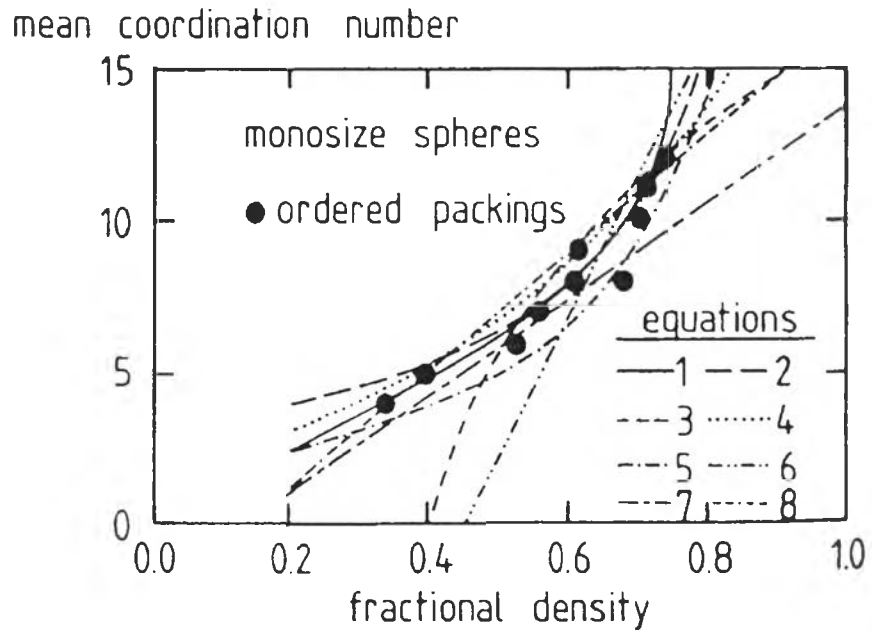




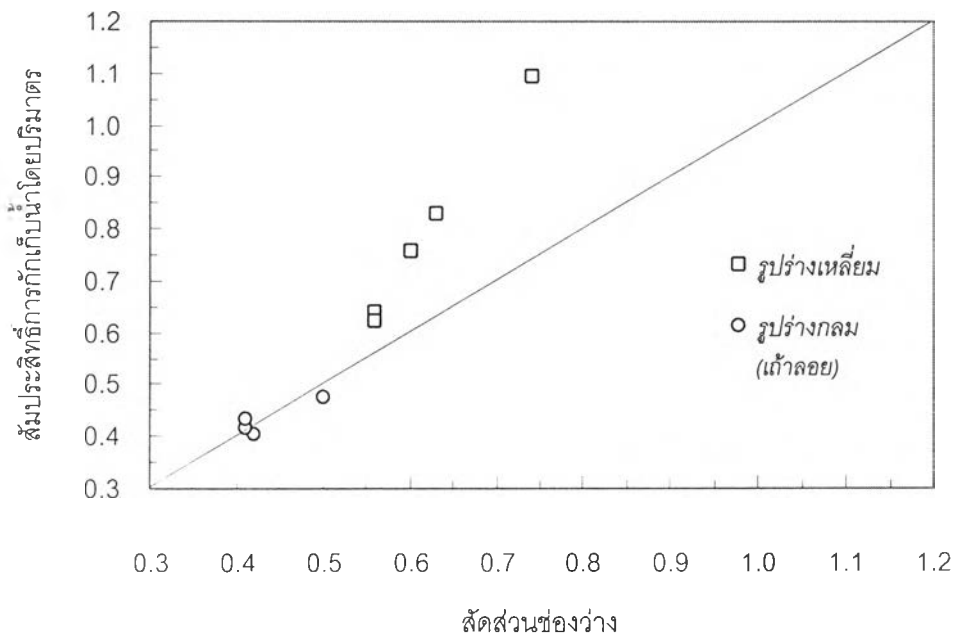
รูปที่ 2.20 ลักษณะรูปร่างของผงซิลิกาจากกล้องขยายกำลังขยาย 7500 เท่า



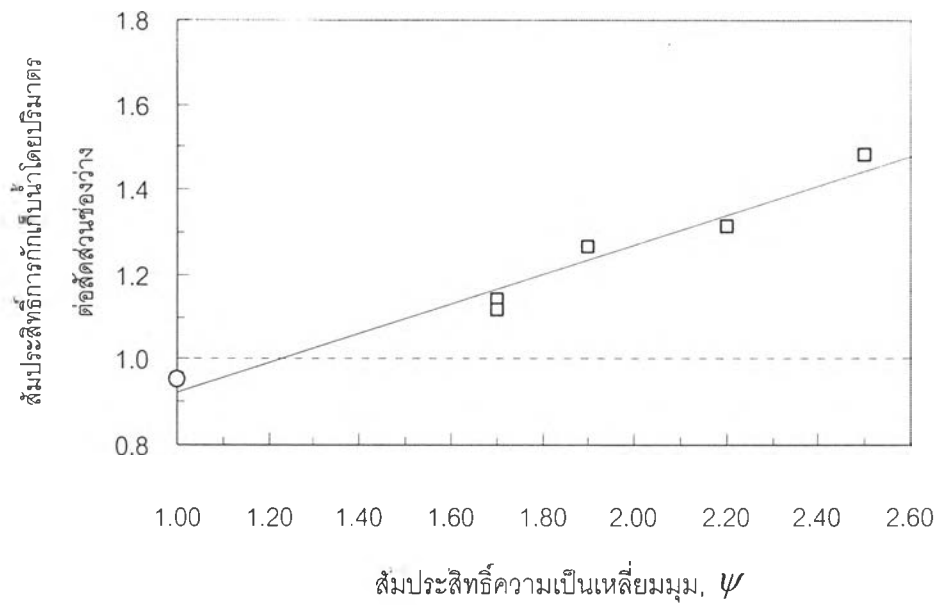
รูปที่ 2.21 การเรียงตัวของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียวกันที่ค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันเท่ากับ 6 และ 12



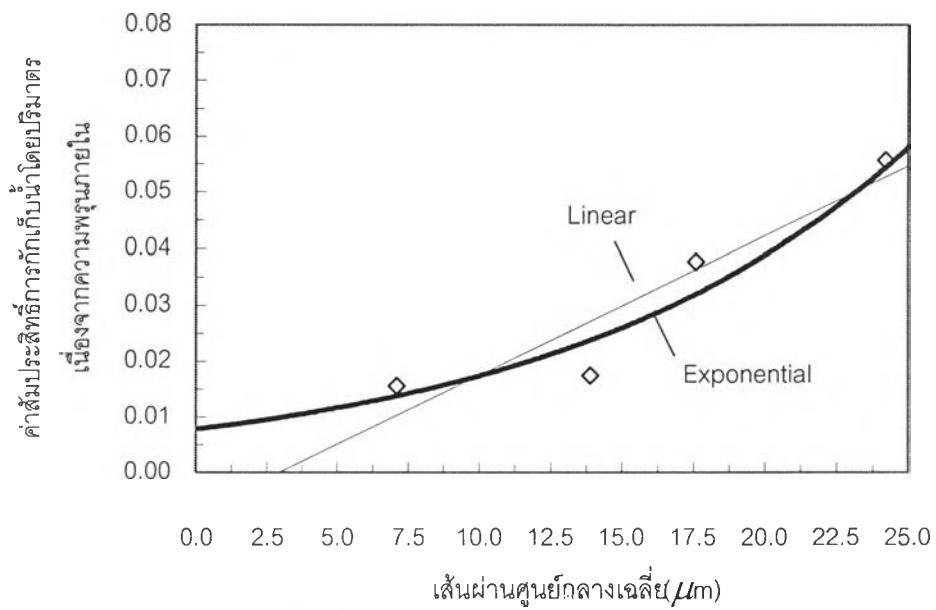
รูปที่ 2.22 ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียว<sup>[40]</sup>



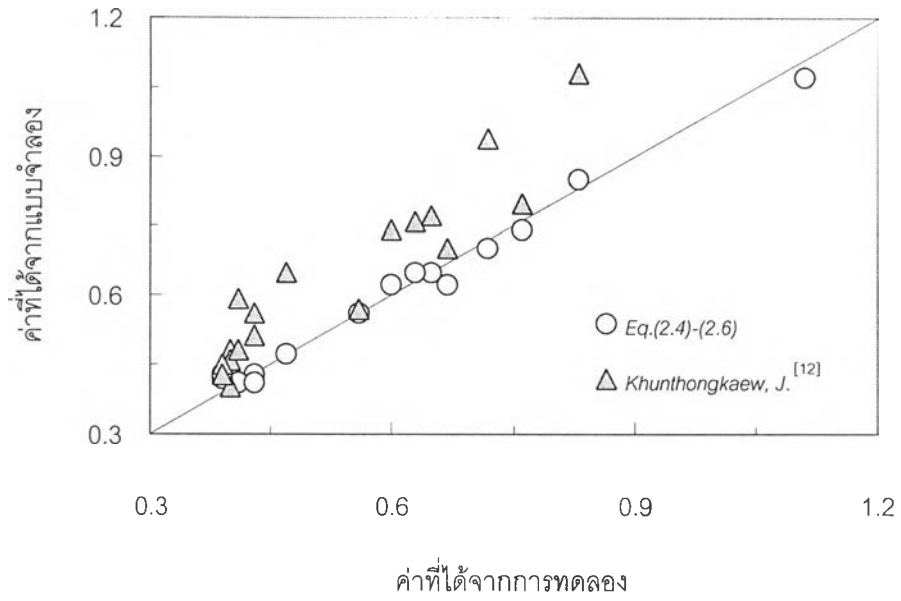
รูปที่ 2.23 ผลของสัดส่วนช่องว่างต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยปริมาตร



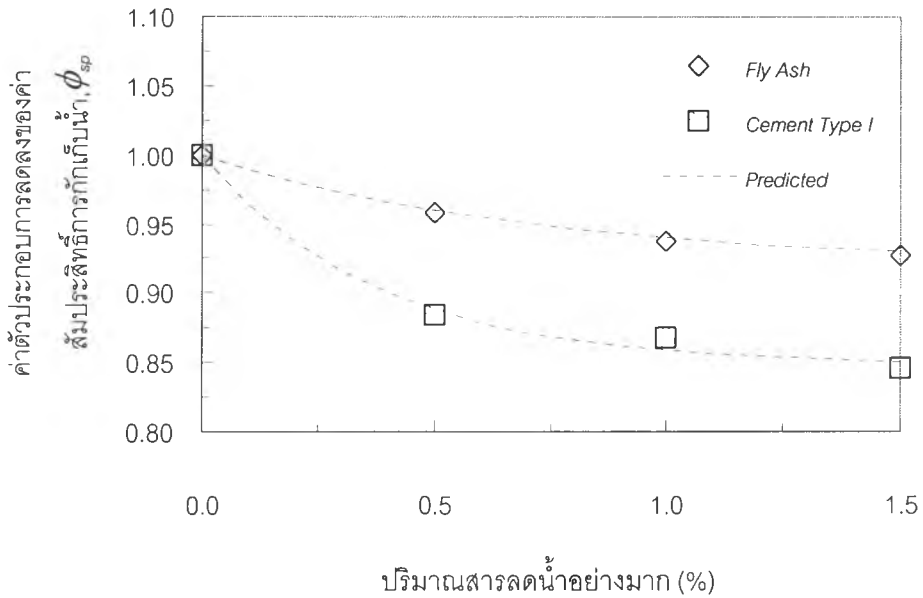
รูปที่ 2.24 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรต่อสัดส่วนช่องว่างของวัสดุผงชนิดต่าง ๆ



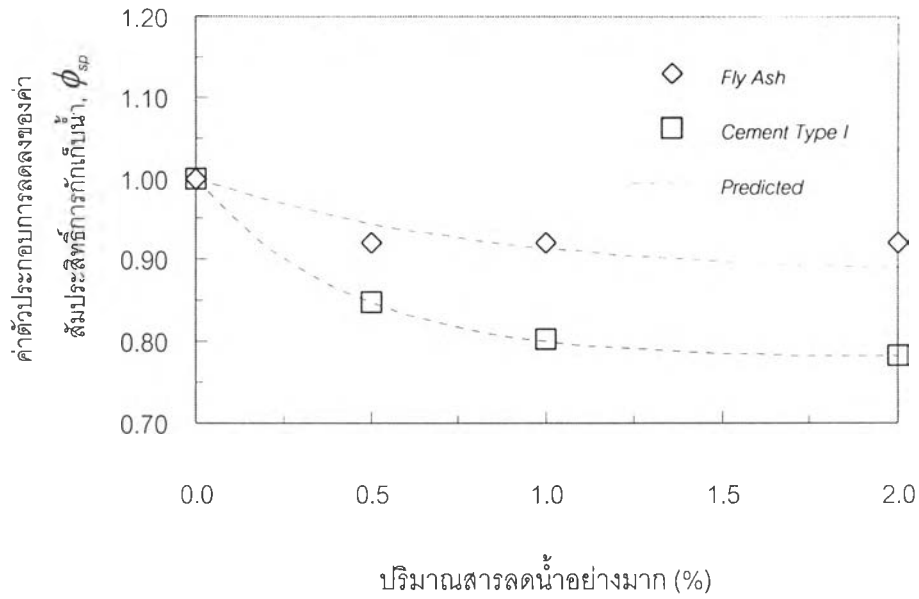
รูปที่ 2.25 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรเนื่องจากความพรุนภายในของถ้ำลอย



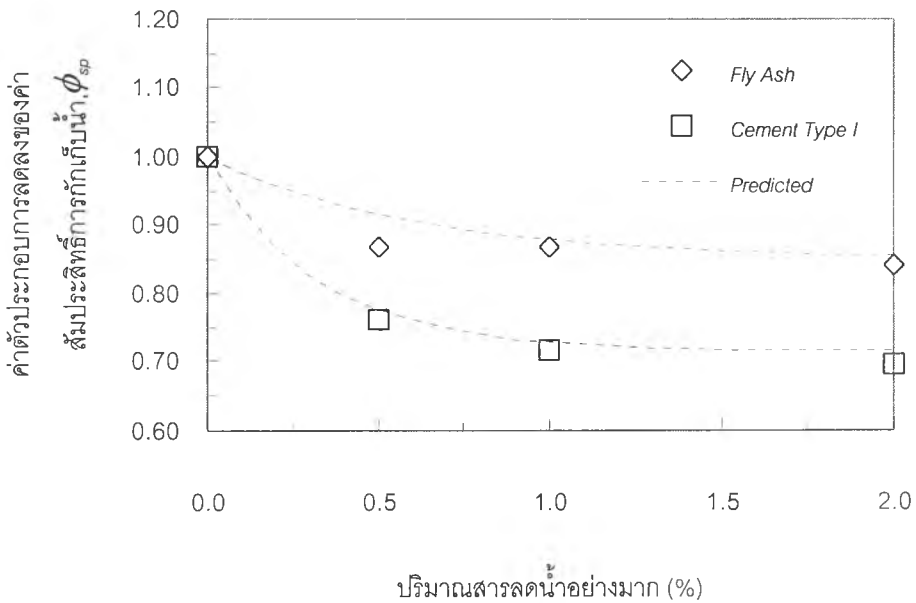
รูปที่ 2.26 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตร ที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลองจริง



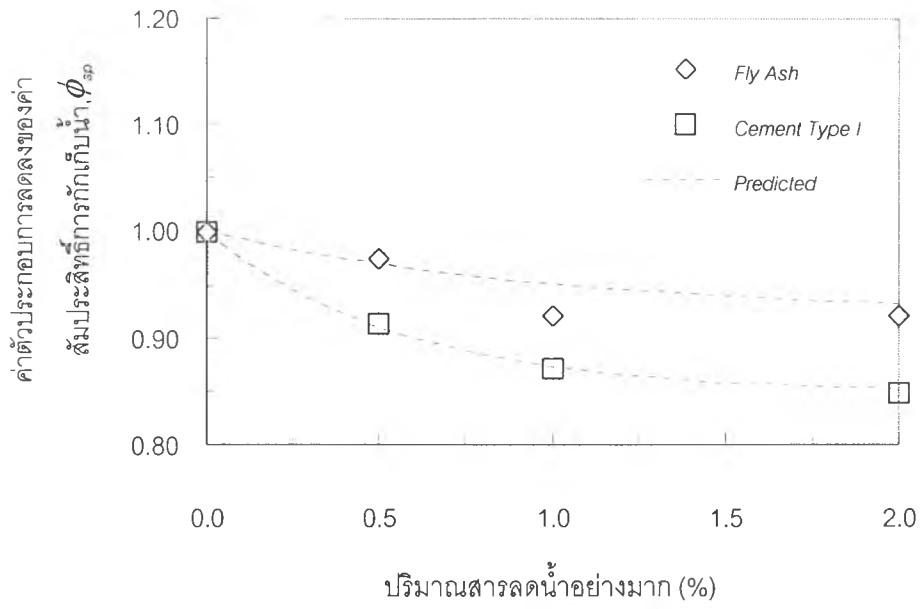
รูปที่ 2.27 ค่าตัวประกอบลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยและซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมากชนิดเมลามีนฟอรั่มัลดีไฮด์คอนเดนเสท



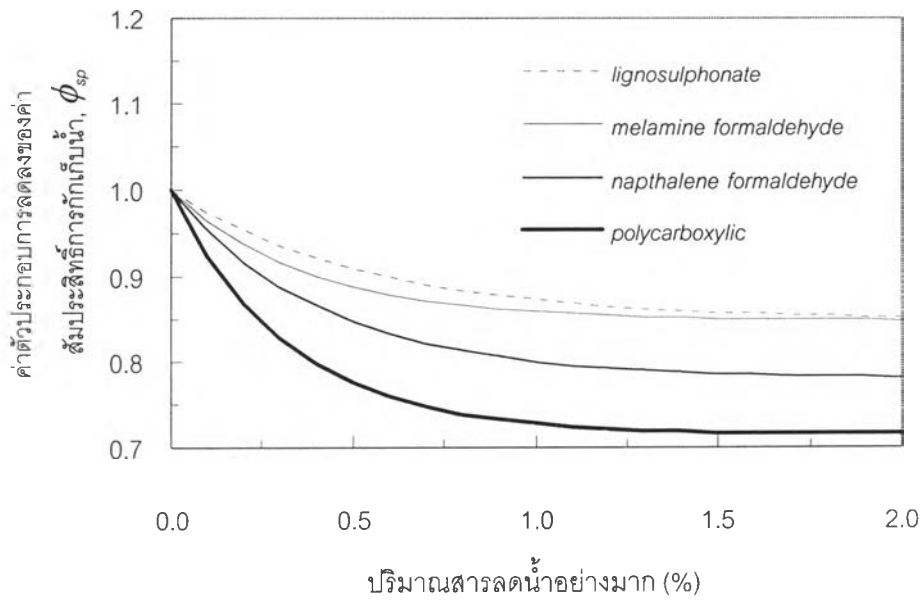
รูปที่ 2.28 ค่าตัวประกอบารลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยและซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาชนิดแนฟทาลินฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท



รูปที่ 2.29 ค่าตัวประกอบารลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยและซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาชนิดโพลีคาร์บอกซิลิก



รูปที่ 2.30 ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยและซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาชนิดลิกโนซัลโฟเนต



รูปที่ 2.31 ผลเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาชนิดต่าง ๆ