

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 ทัวไป

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงในปัจจุบัน ยังคงใช้การทดลองผสมเพื่อกำหนดสัดส่วนการผสมของวัสดุที่จัดหาได้ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน การนำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยเหลือในกระบวนการดังกล่าว นับเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง เนื่องจากผู้ออกแบบสามารถคำนวณออกแบบส่วนผสมได้ในเวลาอันรวดเร็วด้วยความถูกต้องแม่นยำขึ้น รวมทั้งในกรณีที่วัสดุผสมมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ผู้ออกแบบสามารถปรับแก้ส่วนผสมได้โดยง่าย ด้วยองค์ความรู้ในด้านคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงผลของปัจจัย ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงได้มากขึ้น ซึ่งทำให้สามารถออกแบบส่วนผสมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับความต้องการมากกว่าการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม นับเป็นการลดความยุ่งยาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในขั้นตอนการทดลองผสมได้มาก นอกจากนี้ประโยชน์ของการใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบ ทำให้ผู้ออกแบบสังเกตการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทั้งจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการ หรือจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุผสมได้โดยง่าย ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้ส่วนผสมที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 การคำนวณออกแบบส่วนผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบส่วนผสมจะกำหนดขั้นตอนต่าง ๆ ให้ทำงานผ่านโปรแกรมย่อยซึ่งจะควบคุมการทำงานตามลำดับขั้นตอน โดยมีรายละเอียดของวิธีการคำนวณในขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

3.2.1 การผสมมวลรวมหยาบ และ มวลรวมละเอียด

การควบคุมขนาดคละของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่เหมาะสมตามข้อกำหนดเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง ในทางปฏิบัติเป็นการไม่สะดวกอย่างยิ่งที่ทำการลองผิดลองถูกเพื่อหามวลคละที่เหมาะสม ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถใช้ในการคำนวณอย่างเป็นระบบโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square Method) ซึ่งผลลัพธ์จะเป็นมวลคละที่มีความเบี่ยงเบนจากค่ากลางของเส้นโค้งการกระจายขนาดคละตามข้อกำหนดน้อยที่สุด และวิธีการซิมเพลกซ์ (Simplex Method) ที่คำนึงถึงผลในเชิงเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย โดยรายละเอียดของวิธีการคำนวณมีดังต่อไปนี้

3.2.1.1. การคำนวณสัดส่วนผสมของมวลรวมด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้มวลคละที่มีผลรวมของผลต่างกำลังสองของอัตราผ่านตะแกรงมาตรฐานมีค่าต่ำที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือจะได้มวลคละที่มีขนาดคละใกล้เคียงกับค่ากลางของข้อกำหนดสำหรับการผลิต

คอนกรีตสมรรถนะสูงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้สำหรับกลุ่มมวลรวมที่นำมาใช้ โดยผลต่างกำลังสองระหว่างขนาดคละและค่ากลางตามข้อกำหนดแสดงได้ดังสมการ

$$S_r = \sum_{i=1}^m e_i^2 = \sum_{i=1}^m \left(\bar{P}_i - \sum_{j=1}^n x_j P_{ji} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ e_i คือ ผลต่างของร้อยละผสมที่ผ่านตะแกรงมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยตามข้อกำหนด

\bar{P}_i คือ ค่าเฉลี่ยของร้อยละผสมที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานตามข้อกำหนดของตะแกรงมาตรฐาน i

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, m$

P_{ji} คือ ร้อยละผสมที่ผ่านตะแกรงขนาด i ของมวลรวมกลุ่ม j เมื่อ $j = 1, 2, \dots, n$

x_j คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของมวลรวมกลุ่มต่าง ๆ เมื่อ $j = 1, 2, \dots, n$

ในการคำนวณจะสมมติค่าสัดส่วนผสมเริ่มต้นของมวลรวมประเภทต่าง ๆ และทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมอย่างเป็นระบบจนกระทั่งได้ค่าของ S_r มีค่าต่ำที่สุด แล้ววนรอบทำซ้ำจนกระทั่งค่าดังกล่าวไม่ลดลง ภายใต้อำนาจรอบที่กำหนด จึงสามารถสรุปได้ว่าสัดส่วนดังกล่าวมีความเหมาะสมที่สุดหรือมีค่าเข้าใกล้ค่ากลางมากที่สุด โดยลำดับของการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 (ก)

3.2.1.2. การคำนวณสัดส่วนผสมของมวลรวมด้วยวิธีการซิมเพล็กซ์

ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตแบบดั้งเดิม มวลคละได้รับความสนใจน้อยเนื่องจากมวลรวมที่ใช้สามารถหาจากแหล่งผลิตในพื้นที่ซึ่งมีราคาถูก และมีข้อกำหนดขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ตามมาตรฐานของมอก 566 หรือ ASTM C33 ซึ่งไม่เข้มงวดนัก แต่ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงแล้ว ข้อกำหนดขนาดคละของมวลรวมที่ใช้มีความเข้มงวดมาก ในบางกรณีหน่วยผลิตจำเป็นต้องจัดนามวลรวมที่มีขนาดคละพิเศษเพิ่มเติมจากแหล่งนอกพื้นที่เพื่อใช้ปรับปรุงขนาดคละของมวลรวมที่มีอยู่ ด้วยเหตุนี้การพิจารณาถึงผลในทางเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วยจึงเป็นการเหมาะสม ด้วยแนวคิดนี้ จะนำไปสู่ส่วนผสมของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่มีการกระจายขนาดคละอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด ในขณะที่จะมีต้นทุนต่อหน่วยปริมาตรต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

วิธีการที่เหมาะสมในการคำนวณได้แก่วิธีการซิมเพล็กซ์ โดยที่ตัวแปรของการคำนวณ คือ สัดส่วนผสมโดยปริมาตรของมวลรวมกลุ่มต่าง ๆ เงื่อนไขควบคุมของการคำนวณ คือ ค่าขีดจำกัดบนและล่างของร้อยละผสมที่ผ่านตะแกรงย่อยแต่ละขนาดที่เป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง ดังแสดงในสมการที่ (3.2) และ (3.3) ตามลำดับ และ สมการปริมาตรสัมบูรณ์ ซึ่งเป็นสมการกำหนดให้ผลรวมของปริมาตรของมวลรวมที่ทำการคำนวณเป็น 1 หน่วย ดังสมการที่ (3.4)

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j \leq p_i^{Upper} \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j \geq p_i^{Lower} \quad (3.3)$$

และ

$$\sum_{j=1}^n x_j = 1 \quad (3.4)$$

โดยที่ b_{ij} = ร้อยละสะสมโดยน้ำหนักของมวลรวมกลุ่ม j ที่ผ่านตะแกรงย่อยขนาด i เมื่อ $j = 1, \dots, n$ และ

$$i = 1, \dots, m$$

x_j = สัดส่วนโดยปริมาตรของมวลรวมกลุ่ม j

p_i^{Upper} = ค่าขีดจำกัดบนของร้อยละสะสมโดยน้ำหนักที่ผ่านตะแกรงย่อยขนาด i

p_i^{Lower} = ค่าขีดจำกัดล่างของร้อยละสะสมโดยน้ำหนักที่ผ่านตะแกรงย่อยขนาด i

งานวิจัยได้ทำการกำหนดประเภทมวลรวมที่ใช้สูงสุดได้ 4 ประเภทโดยพิจารณาจากความเหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง ได้แก่ มวลรวมหยาบขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว (20 มม.) และ 3/8 นิ้ว (10 มม.) และมวลรวมละเอียดที่มีความละเอียดต่างกันได้ 2 ชนิด ซึ่งมีความเพียงพอต่อการใช้งานในทางปฏิบัติ และเพื่อให้สัดส่วนของมวลรวมที่คำนวณได้มีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ ฟังก์ชันเป้าหมายของการวิเคราะห์จะถูกกำหนดให้เป็นผลรวมของค่าตัวประกอบความสามารถหาได้ของมวลรวมคูณกับสัดส่วนของมวลรวมในแต่ละกลุ่มย่อย ซึ่งต้องทำให้มีค่าต่ำที่สุดดังสมการ

$$\text{Min}(z) = \text{Min} \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j \right) \quad (3.5)$$

เมื่อ a_j คือตัวประกอบความสามารถในการหาได้สัมพัทธ์ ของมวลรวมกลุ่ม j โดยมวลรวมที่สามารถทำการจัดหาได้ง่ายจะมีค่าต่ำ ในขณะที่มวลรวมที่จัดหาได้ยากจะมีค่าที่สูงขึ้น โดยทำการกำหนดระดับความสามารถในการหาได้ของมวลรวมเป็น 2 ระดับ ได้แก่ มวลรวมที่มีระดับความสามารถหาได้ปกติ ใช้ค่า $a_j = 1$ และมวลรวมที่มีระดับความสามารถหาได้ต่ำ ใช้ค่า $a_j = 100$ เนื่องจากข้อจำกัดขนาดคละของคอนกรีตสมรรถนะสูงมีความเข้มงวดมาก ซึ่งจะพบว่าในบางกรณีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบความสามารถในการจัดหาของมวลรวมบางชนิดอาจจะไม่สามารถทำให้สัดส่วนผสมที่ได้เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติขนาดคละของมวลรวมแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีข้อกำหนดไม่เข้มงวดดังเช่นในคอนกรีตธรรมดา ใช้หลักการนี้ร่วมกับการปรับเปลี่ยนค่า a_j สำหรับระดับความสามารถในการจัดหาต่าง ๆ มากขึ้นนับว่าเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทางหนึ่ง ในรูปที่ 3.1 (ข) แสดงลำดับการคำนวณโดยวิธีซิมเพล็กซ์ในการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของมวลรวม

3.2.2 การหาปริมาณน้ำพอเพียงต่อการยุบตัวเริ่มต้น

ถึงแม้งานวิจัยที่ผ่านมาจะแสดงให้เห็นว่า การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงไม่จำเป็นต้องให้ส่วนผสมมีปริมาณน้ำเพียงพอสำหรับการยุบตัว เนื่องจากสามารถปรับแต่งคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีตได้ด้วยการใช้สารลดน้ำพิเศษ อย่างไรก็ตามการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงให้มีค่ายุบตัวเริ่มต้นเล็กน้อยจะเป็นผลดีกับคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของขบวนการผสม รวมทั้งประสิทธิภาพของสารลดน้ำพิเศษ จากการศึกษาของ Hewlett^[36] พบว่า การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีปริมาณน้ำน้อยเกินไปและใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณสูงจะทำให้คอนกรีตมีอัตราสูญเสียค่ายุบตัวสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปฏิบัติงานเทคอนกรีตในสภาพอากาศร้อน Meyer^[36] พบว่า การเติมสารลดน้ำพิเศษที่น้อยจนก่อให้เกิดการเติมขณะผสมที่หน่วยผลิต จะ

เพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมคุณสมบัติสภาวะเหลวของคอนกรีต โดยจะทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต สมรรถนะสูงมีค่ายุบตัวเริ่มต้นไม่เกิน 5 เซนติเมตร สำหรับคอนกรีตกำลังสูง และไม่เกิน 10 เซนติเมตร สำหรับคอนกรีตไหล เพื่ออำนวยความสะดวกในการขนส่งและการผสมคอนกรีตในรถไม่ขณะเดิมสารลดน้ำพิเศษ ในการที่จะทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงมีความชื้นเหลือที่พอเพียงต่อการเกิดค่ายุบตัวเริ่มต้นนั้น ต้องมีปริมาณน้ำในส่วนผสมที่พอเพียง ในงานวิจัยนี้ได้นำหลักการของน้ำอิสระมาใช้ ซึ่งจะให้ผลที่ถูกต้องกว่าการประมาณโดยวิธีการดั้งเดิม เนื่องจากได้คำนึงถึงผลของขนาดผลรูปร่าง ช่องว่างในการจัดเรียงตัวของมวลรวม รวมทั้งผลของการกักเก็บน้ำเนื่องจากวัสดุผงในส่วนผสม

3.2.2.1 น้ำอิสระ และน้ำที่ถูกกักเก็บ

โดยนิยามแล้ว น้ำอิสระของส่วนผสม คือน้ำส่วนที่เหลือจากที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็ง ซึ่งน้ำส่วนนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และมีผลต่อคุณสมบัติสภาวะเหลวของคอนกรีต โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำอิสระ ทั้งหมดในส่วนผสม และน้ำที่ถูกกักเก็บ ได้ดังสมการ^[37]

$$W_{free} = W_{total} - W_{retained} \quad (3.6)$$

$$W_{retained} = \beta_G M_G + \beta_s M_s + \beta_p M_p + (\alpha_G - w_G) M_G + (\alpha_s - w_s) M_s + (\alpha_p - w_p) M_p + W_{hyd} \quad (3.7)$$

เมื่อ

β_G = สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคหยาบ

β_s = สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ หรือความสามารถในการกักเก็บน้ำของทราย

β_p = สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ หรือความสามารถในการกักเก็บน้ำของวัสดุผงได้แก่ ซีเมนต์, เถ้าลอย เป็นต้น

W_{hyd} = ปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

M_G, M_s, M_p = น้ำหนักของอนุภาคหยาบ ทราย และ วัสดุผง ตามลำดับ

$\alpha_G, \alpha_s, \alpha_p$ = ค่าการดูดซึมของอนุภาคหยาบ ทราย และวัสดุผงตามลำดับ

w_G, w_s, w_p = ปริมาณความชื้นรวมของอนุภาคหยาบ ทราย และวัสดุผง ตามลำดับ

ปริมาณน้ำเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยซีเมนต์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสม จึงสามารถละเว้นได้ และหากพิจารณาให้วัสดุมวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง สมการที่ (3.7) สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$W_{retained} = \beta_G M_G + \beta_s M_s + \beta_p M_p \quad (3.8)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุทดสอบได้จากวิธีเซนตริฟิวส์ โดยกำหนดให้เป็น น้ำหนักของน้ำที่ถูกเก็บกักต่อน้ำหนักแห้งของวัสดุแห้ง โดยจากผลทดสอบพบว่า ที่ระดับความเร่งสูงประมาณ 500 เท่าของค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก น้ำที่ถูกเก็บกักที่ผิวของวัสดุแห้งนี้จะหลุดออกไปได้ รูปที่ 3.2 แสดงผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำสำหรับทราย แอสลิก และ ซีเมนต์ ที่ทดสอบโดยวิธีเซนตริฟิวส์ .

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคผง และอนุภาคละเอียด มีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแบบเบรนท์ของอนุภาคผง และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคละเอียดตามลำดับ โดยสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคหยาบมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคละเอียดและอนุภาคผง ซึ่งตระเวนได้ในการคำนวณ ในตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงหลายชนิด ซึ่ง Kitticharoenkiat^[36] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคผง (โดยน้ำหนัก) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแบบเบรนท์แสดงได้ดังสมการ

$$\beta_p (\text{by weight}) = \frac{1}{\sigma_p} 0.0015 SS_p^{0.75} \quad (3.9)$$

เมื่อ β_p คือ สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคผง โดยน้ำหนัก

σ_p คือ ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคผง

SS_p คือ พื้นที่ผิวจำเพาะแบบเบรนท์ (ตร.ซม./กรัม)

ทั้งนี้ยังพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมละเอียด และ มวลรวมหยาบ มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\beta_{agg} = 2 \times 10^{-6} SS_{agg}^{0.92} \quad (3.10)$$

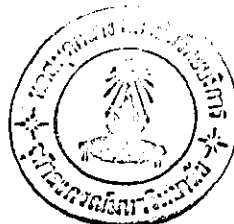
เมื่อ β_{agg} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมโดยน้ำหนัก ซึ่งไม่รวมน้ำที่ถูกดูดซึมในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง SS_{agg} คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม (ตร.ซม./กก.) จากการศึกษาค้นคว้า พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของมวลรวมแบบทรงกลมสมมติดังสมการ

$$SS_G = \frac{1}{\psi_G} SS_{G,0} \quad \text{และ} \quad SS_S = \frac{1}{\psi_S} SS_{S,0} \quad (3.11)$$

เมื่อ $SS_{G,0}$ และ $SS_{S,0}$ คือพื้นที่ผิวจำเพาะของทรงกลมสมมติ ของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามลำดับ คือค่าพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของมวลรวม สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$SS_0 = \frac{6}{D_{av}} \quad (3.12)$$

โดยที่ D_{av} คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสมมติของอนุภาคมวลรวม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ



$$D_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i d_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (3.13)$$

เมื่อ M_i คือ ร้อยละของมวลรวมที่ค้างบนแต่ละตะแกรงย่อยขนาด i ถึง
 d_i คือ ขนาดเฉลี่ยของกลุ่มขนาด i ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$d_i = \frac{l_i^L + l_i^U}{2} \quad (3.14)$$

l_i^U, l_i^L คือ ขนาดของช่องเปิดที่เป็นขอบเขตบนและล่างของกลุ่มขนาดลำดับที่ i ตามลำดับ โดยกลุ่มขนาด และค่าของขนาดเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มขนาดแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

$\frac{l}{\psi_G}$ และ $\frac{l}{\psi_S}$ คือ ตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุม (Angularity Factor) ของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดตามลำดับ โดย Loudon⁽³⁹⁾ เสนอว่าค่าของตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุม มีความสัมพันธ์กับปริมาณช่องว่างของกลุ่มขนาดใดกลุ่มขนาดหนึ่งของมวลรวมในสภาวะหลวม ดังสมการ โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

$$\frac{l}{\psi_L} = 1 + 4.44(\epsilon - 0.42) \quad (3.15)$$

Pongporncharoen⁽⁴⁰⁾ ได้ทดสอบเพื่อหาปริมาณช่องว่างในสภาวะหลวมของมวลรวมหยาบชนิดหินปูนย่อย (Crushed Lime Stone) ในกลุ่มขนาด 1/2 นิ้ว ถึง 3/4 นิ้ว และมวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำ ในกลุ่มขนาด #30 ถึง #50 โดยสมมุติว่าปริมาณช่องว่างของกลุ่มขนาดอื่น ๆ จะมีค่าเท่ากัน เนื่องจากมวลรวมมีรูปร่างที่เหมือนกันตามหลักการของ Powers โดยพบว่าปริมาณช่องว่างในสภาวะหลวมของ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดมีค่าเท่ากับ 51.24 % และ 47.40 % ตามลำดับ ซึ่งหากทำการคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.15) จะคำนวณค่าตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดมีค่าเท่ากับ 1.41 และ 1.24 ตามลำดับ ในงานวิจัยได้อ้างอิงค่าตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุมที่ทดสอบโดย Pongpomcharoen เนื่องจากมวลรวมที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน

3.2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำอิสระ และการยุบตัวของคอนกรีต

จากการศึกษาพบว่า การยุบตัวมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับปริมาณน้ำอิสระของส่วนผสม โดยความสัมพันธ์มีค่าความชัน (α) แปรเปลี่ยนตามสัดส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างของมวลรวมในสภาวะแห้งและอัดแน่น ($V_{paste} / V_{void}, \gamma$) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$Slump = \alpha (W_{free} - W_0) \quad (3.16)$$

เมื่อ α คือค่าความชันของความสัมพันธ์ของน้ำอิสระ และ ค่าการยุบตัว ซึ่งจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่าง ปริมาตร เพลตต่อ ช่องว่างของมวลรวมในสภาวะแห้งอัดแน่น ดังรูปที่ 3.5 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\alpha &= -1.50\gamma^3 + 6.05\gamma^2 - 7.41\gamma + 2.86 && \text{สำหรับ } 1.0 \leq \gamma \leq 1.7 \quad (3.17) \\ &= 0.39 && \text{สำหรับ } 1.7 \leq \gamma \leq 1.8\end{aligned}$$

โดยที่ W_0 คือปริมาณน้ำอิสระขั้นต่ำที่เพียงพอต่อการเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการยึดเกาะของมวลรวมกับมวลรวม และมวลรวมกับวัสดุผงในสภาวะแห้ง กล่าวคือปริมาณน้ำอิสระที่ต่ำกว่านี้จะไม่ทำให้คอนกรีตเกิดการยุบตัว ค่าของ W_0 มีความสัมพันธ์กับค่าของพื้นที่ผิวประสิทธิผลของวัสดุแข็ง ซึ่งนิยามว่า คือผลรวมของพื้นที่ผิวรวมของมวลรวม (S_{iagg}) กับพื้นที่ผิวของวัสดุผงคูณกับตัวประกอบประสิทธิผล (η) ดังสมการ

$$S_{eff} = S_{iagg} + \eta S_{powder} \quad (3.18)$$

โดยที่ $SS_{iagg} = SS_G + SS_S$ คือพื้นที่ผิวรวมของมวลรวม

จากการศึกษาพบว่า ตัวประกอบพื้นที่ผิวประสิทธิผล (η) มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับพื้นที่ผิวรวมของมวลรวมดังสมการที่ (3.19) ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อพื้นที่ผิวรวมของมวลรวมมีค่ามากขึ้น (ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องในกรณีที่มีสัดส่วนของอนุภาคละเอียดเพิ่มมากขึ้น) เป็นเหตุให้พื้นที่สัมผัสระหว่างมวลรวมมีค่ามากขึ้นและทำให้แนวโน้มที่วัสดุผงจะเกาะติดกับมวลรวมมีค่าลดลงโดยรวม^[38]

$$\eta = 0.026 e^{(-3 \times 10^{-8} S_{iagg})} \quad (3.19)$$

จากการวิเคราะห์สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่ากลางระหว่างค่าของปริมาณน้ำที่ต่ำที่สุดและเพียงพอที่จะเอาชนะแรงต้านผิวของวัสดุแข็ง (W_0) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะประสิทธิผล ได้ดังสมการ

$$W_0 = 8 \times 10^{-5} (S_{eff})^{0.76} \quad (3.20)$$

รูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบผลของการทำนายค่าการยุบตัวของส่วนผสมคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของแก้วลอย และ วัสดุผงนอกเหนือจากปูนซีเมนต์ ที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดสอบของงานวิจัยจำนวนหนึ่ง พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้สามารถใช้ทำนายค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีความถูกต้องอยู่ในช่วงระหว่าง 2.5 - 3.0 เซนติเมตร ซึ่งยอมรับได้ตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วยคอนกรีตผสมเสร็จ (มอก.213-2520)

3.2.3 การปรับแต่งคุณสมบัติในสภาวะเหลวด้วยสารเคมีผสมเพิ่ม

3.2.3.1 การคำนวณปริมาณการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม

เมื่อออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงให้มีกำลังอัด ความทนทาน และค่ายุบตัวเริ่มต้น เป็นไปตามข้อกำหนดการใช้งานแล้ว จะต้องปรับแต่งคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีตด้วยสารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษตามมาตรฐาน ASTM ประเภท G หรือ F โดยคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีตสมรรถนะสูงประเมินได้จากค่ายุบตัวและการไหลตัวของคอนกรีต สารลดน้ำพิเศษเป็นสารเคมีผสมเพิ่มที่มีประสิทธิภาพสูงในการกระจายอนุภาคซีเมนต์ด้วยการกระตุ้นที่ผิวทำให้ประจุที่ผิวของซีเมนต์เกิดการเปลี่ยนแปลงให้มีความเป็นกลาง หรือเป็นประจุเดียวกัน และยังมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่น ช่วยให้คอนกรีตมีการยุบตัวเพิ่มขึ้นได้แม้ว่าจะไม่มีค่ายุบตัวเริ่มต้นเลยก็ตาม เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษ จะพิจารณาให้ค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับ การเพิ่มปริมาณน้ำอิสระด้วยน้ำอิสระพิเศษ การลดลงของความแข็งแรงในการจัดเรียงตัวของวัสดุแข็ง และอัตราส่วนระหว่างปริมาณผลต่อช่องว่างของมวลรวมในสภาพแห้งและอัดแน่น รูปที่ 3.7 แสดงกลไกจำลองการเพิ่มค่าการยุบตัวของคอนกรีตในสภาวะเหลวโดยผลของสารลดน้ำพิเศษ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวส่วนเพิ่ม และ ปริมาณน้ำอิสระที่เพิ่มขึ้น กับ ค่าของ W_0^* ที่ลดลงเขียนได้ดังสมการที่ (3.21)

$$Slump(addition) = (\alpha + \alpha_{Add}) W_{free,Add} - \alpha W_0^* \quad (3.21)$$

เมื่อ $W_{free,Add}$ คือ ปริมาณน้ำอิสระเพิ่มเติม หน่วยเป็น กก./ลบ.ม.

W_0^* คือ ค่าปริมาณน้ำอิสระขั้นต่ำเพื่อให้เกิดค่ายุบตัว ที่ลดลง มีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม.

หากพิจารณาให้ผลของการเพิ่มความชื้น (α_{Add}) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำอิสระ (W_{free}) และค่าการยุบตัวมีน้อย และปริมาณน้ำอิสระขั้นต่ำที่ลดลง ขึ้นอยู่กับอัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษเพียงอย่างเดียว สมการที่ (3.21) ลดรูปได้เป็น

$$Slump(addition) = \alpha W_{free,Add}(SP) - \alpha W_0^* \quad (3.22)$$

เมื่อวิเคราะห์ความถดถอยแบบเชิงเส้นหลายตัวแปรของข้อมูลทดสอบเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำอิสระเพิ่มเติม และปริมาณน้ำอิสระขั้นต่ำที่เพียงพอต่อการหล่อลื่น โดยแต่ละกลุ่มส่วนผสมจะมีอัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษเท่ากัน โดยข้อมูลการวิเคราะห์ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แสดงได้ดังตารางที่ 3.3 จากการวิเคราะห์พบว่าค่าของน้ำอิสระเพิ่มเติม และปริมาณน้ำอิสระขั้นต่ำที่ลดลง มีความสัมพันธ์กับอัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษดังสมการ และสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

$$W_{free,Add} = 89.7 (1 - e^{-2.5x}) \quad (3.23)$$

$$-\alpha W_0^* = \frac{22.4(x^{3.8})}{1.3 + x^{3.8}} \quad (3.24)$$

เมื่อ x คือ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ (ลิตร) ต่อ ปริมาณซีเมนต์ 100 กก. รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวเพิ่มเติม และปริมาณสารลดน้ำพิเศษจากสมการที่ (3.22) และรูปที่ 3.10 แสดงค่าจากสมการที่ (3.22) และผลการทดสอบจากหลายงานวิจัย

สังเกตได้ว่าการใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อเพิ่มการยุบตัวของคอนกรีตจะทำได้ในขอบเขตจำกัด เมื่อส่วนผสมมีปริมาณพลสต์เพิ่มขึ้นค่ายุบตัวสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกโดยที่อัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษเท่าเดิม ในทางปฏิบัติผู้ผลิตแต่ละรายจะแนะนำอัตราการใช้งานไว้ต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.6 -1.5% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ซึ่งหากพิจารณาจากสมการที่ (3.22) พบว่าเป็นช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้งานและค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงเส้นตรง ทำให้ผู้ออกแบบสามารถปรับอัตราการใช้งานได้อย่างสะดวก โดยตารางที่ 3.4 จะแสดงอัตราการใช้ของสารลดน้ำพิเศษที่มีอยู่ในท้องตลาดโดยผู้ผลิต

3.2.3.2 การจำแนกระดับการไหลตัวของคอนกรีต

ค่าการไหลตัวเป็นดัชนีที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถทำงานได้ และความสามารถยึดเกาะตัว หรือความต้านทานการแยกตัวของส่วนผสมคอนกรีตขณะอัดแน่น โดยส่วนผสมที่มีค่าการไหลตัวที่สูงมากเกินไปมีโอกาสแยกตัวได้ง่าย ซึ่งพบในกรณีส่วนผสมของคอนกรีตไหลซึ่งมักจะมีปริมาณซีเมนต์หรือส่วนผสมละเอียดในปริมาณที่น้อย และหากส่วนผสมมีค่าการไหลตัวต่ำเกินไปจะมีความหนืดมากทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการอัดแน่นแม้ว่าส่วนผสมจะมีค่าการยุบตัวจะสูงก็ตาม ซึ่งจะพบในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงซึ่งต้องใช้ปริมาณซีเมนต์สูงและมีปริมาณน้ำต่ำ ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการไหลตัวของคอนกรีตได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสม ปริมาณของส่วนผสมละเอียด และปริมาณการใช้และประสิทธิภาพของสารลดน้ำพิเศษ

จากข้อมูลทดสอบที่ผ่านมา พบว่าค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัว และค่าการยุบตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 3.11 โดยค่ากลางของความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Flow = 2.46 Slump - 0.32 \quad (3.25)$$

ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งมีน้ำในส่วนผสมน้อยและมีส่วนผสมละเอียดสูงมาก จำเป็นต้องออกแบบให้ส่วนผสมมีการไหลตัวสูง ถ้าหากให้ข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ และในการออกแบบยอมรับให้มีค่าการไหลตัวต่ำกว่าค่ากลางในสัดส่วนเสียหาย (Proportion defective) เท่ากับ 15% จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลตัวและการยุบตัว ดังสมการ

$$Flow = 2.46 Slump - 3.64 \quad (3.26)$$

เมื่อ $Flow$ และ $Slump$ คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัวทดสอบตามมาตรฐานของ DIN 1048 และค่าการยุบตัวทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM C1473 ตามลำดับ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

ในกรณีของคอนกรีตไหล และคอนกรีตหลา ซึ่งมีปริมาณน้ำในส่วนผสมสูงกว่า จะมีการไหลตัวที่สูงกว่า แต่มีความเสี่ยงต่อการแยกตัวได้ง่าย ในการออกแบบส่วนผสมจึงแนะนำให้ใช้ค่าขีดจำกัดบนของสมการที่ (3.25) ในการออกแบบ ดังสมการ

$$Flow = 2.46 Slump + 7.42 \quad (3.27)$$

ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะกำหนดได้จากค่ายุบตัวของคอนกรีต และใช้สมการ (3.26) และ (3.27) ควบคุมค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัวของคอนกรีต โดยในกรณีของคอนกรีตไหล จะควบคุมระดับความสามารถทำงานได้จากการกำหนดค่ายุบตัวเป็นหลัก โดยจะแบ่งออกเป็นสามระดับ ดังนี้

- ก. ความสามารถในการไหลปกติ - เป็นขีดจำกัดล่างของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงเมื่อพิจารณาจากความสามารถทำงานได้ของส่วนผสม โดยส่วนผสมควรมีค่ายุบตัวระหว่าง 20 ถึง 22.5 เซนติเมตร
- ข. ความสามารถในการไหลปานกลาง - ส่วนผสมควรมีค่าการยุบตัวระหว่าง 22.5 ถึง 25 เซนติเมตร
- ค. ความสามารถในการไหลสูง - มีค่าการยุบตัวสูงกว่า 25 เซนติเมตร เป็นขีดจำกัดบนของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงเพื่อป้องกันการแยกตัวของส่วนผสม

ในกรณีของคอนกรีตกำลังสูง พบว่าส่วนผสมนอกจากจะต้องมีค่ายุบตัวเป็นไปตามข้อกำหนดแล้วยังต้องควบคุมการไหลตัวมิให้น้อยเกินไป โดยในการกำหนดจะมุ่งเน้นทำการออกแบบเพื่อควบคุมการไหลตัวของคอนกรีตเป็นสำคัญ โดยกำหนดจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัว ดังนี้

- ก. ความสามารถในการไหลปกติ - ส่วนผสมมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัวระหว่าง 50 ถึง 55 เซนติเมตร ในขณะที่ค่าการยุบตัวต้องไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร
- ข. ความสามารถในการไหลปานกลาง - ส่วนผสมมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัวระหว่าง 60 ถึง 65 เซนติเมตร
- ค. ความสามารถในการไหลตัวสูง - ส่วนผสมมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัวสูงกว่า 65 เซนติเมตร

โดยโปรแกรมจะคำนวณอัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษให้มีความสอดคล้องกับความสามารถทางการไหลตัวของคอนกรีตตามที่กำหนด ทั้งนี้อัตราการใช้งานของสารลดน้ำพิเศษที่คำนวณได้จะต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตของการใช้งานที่กำหนด

3.2.4 การคำนวณสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์

3.2.4.1. ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีต

สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีความสำคัญในการควบคุมความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว ซึ่งมีต่อกำลังอัดของคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตนั้นได้รับการยอมรับมาเป็นเวลาช้านาน นับตั้งแต่ Abrams^[42] ได้เสนอ กฎของสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยอื่น ที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต ได้แก่ ความสามารถในการอัดแน่น ประเภท รูปร่าง ลักษณะผิว กำลังและปริมาณของมวลรวม แต่ในทางปฏิบัติรวมทั้งมาตรฐานการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบ

ดั้งเดิม ยังคงยอมรับการใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็นตัวแปรหลักในการคาดคะเนกำลังอัดของคอนกรีต เนื่องจากสะดวกและมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ หากพิจารณาส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะพบว่า นิยมใช้มวลรวมหินปูนย่อยซึ่งมีกำลังบดอัด (Crushing Strength) สูงกว่ากำลังอัดคอนกรีตในสภาวะแข็งตัวมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของกำลังของมวลรวมที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีต และจากการวิเคราะห์ส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าสัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.3 – 5.5 ในช่วงสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ระหว่าง 0.22 ถึง 0.46 โดยพบว่าไม่มีผลต่อการแปรเปลี่ยนกำลังอัดมากนักเนื่องจากที่ค่าสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์หนึ่ง ๆ สัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์นี้จะเปลี่ยนแปลงได้ไม่มากนัก เนื่องจากถูกกำหนดโดยปริมาณซีเมนต์ต่ำสุดที่สอดคล้องกับปริมาณน้ำซึ่งทำให้ส่วนผสมมีความชื้นเพียงพอเหมาะก่อนปรับด้วยน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม (โดยปกติควรจะมีค่าใกล้เคียงกับสภาพอิ่มตัวของส่วนผสม) เพื่อให้เกิดความประหยัด นอกจากนี้คอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นคอนกรีตที่มีความสามารถในการอัดแน่นสูง ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวพอจะสนับสนุนได้ว่าปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจากสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของส่วนผสมจะไม่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตมากนัก

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูงจากงานวิจัยที่ผ่านมา จะพบว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีตในรูปแบบของฟังก์ชันเอกซโปเนนเชียล โดยส่วนเบี่ยงเบนมีค่าต่ำซึ่งมีเหตุผลเพียงพอที่จะทำให้สามารถจะตัดปัจจัยอื่นออกจากการพิจารณาได้ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$f_c' = \frac{A}{B^{W/C}} \quad (3.28)$$

เมื่อ f_c' คือ ค่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างทรงกระบอก มีหน่วยเป็น เมกะปาสคาล (Mpa)

W/C คือ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก

A, B คือ ค่าคงที่จากการทดสอบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรอื่นที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตนอกเหนือจากสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ได้แก่ อายุของคอนกรีต ประเภทของซีเมนต์ สภาพแวดล้อมในการปรมและผลของมวลรวม

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$f_c'_{28} = \frac{177}{24^{W/C}} \quad (3.29)$$

ในรูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และแสดงขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่ $\pm 5\%$ จากค่ากลาง และสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ แทน จะส่งผลต่อค่าคงที่ในสมการที่ (3.29) ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถทำการวิเคราะห์ได้จากข้อมูลทางสถิติของผลทดสอบตัวอย่างทั้งในห้องปฏิบัติการ และจากในสภาพสนามโดยรูปแบบความสัมพันธ์ในสมการยังคงเดิม

3.2.4.2 การพัฒนากำลัษณ์ขงคองกรรท

แม้วโดยท่วไปจะนยมใช้ค้ำก้ำลัษณ์ขงคองกรรทที่อญ 28 วันเป็นเกณท์ข้งอ้งนการออกแบบส่วผลม แต่ในบางกรณททท้มีความจ้เป็นต้องท้การออกแบบโดยข้งอ้งก้ำลัษณ์ขงคองกรรทที่อญอื่ ๆ ประกอบด้วย ดังเชน งานคองกรรทท้ต้องการถอดแบบเร็ว หรือกองกรรทท้ต้องรับแรงในระยะต้น เชน งานคองกรรทข้ดแรง งานซ่อมแซมผิว จราจรในสภาพแรงด่วน หรือกองกรรทก้ำลัษณ์สูงท้ต้องรับประกันก้ำลัษณ์ที่อญ 24 ชม. เป็นต้น และในกรณทท้ล้สำหรับ ส่วผลมขงคองกรรทท้มีสารปอชโรซาน สามารถท้การข้งอ้งก้ำลัษณ์ได้ท้อญยาวนานกว้ 28 วัน เพื่อความ ประหยัด การคาดคะเนก้ำลัษณ์ตามอญขงคองกรรทเพื่อใช้ในการออกแบบ สามารถท้ได้โดยใช้หลักการเจริญเติบโต (Maturity Concept) ท้เสนอโดย Saul ^[43] ซึงเป็นหลักการท้เชื่อมโยงผลเนื่องจากอุณหภูมิขงสภาวะแวดล้อมระ บมคองกรรทและ ผลขงเวลาท้มีต่อการพัฒนาก้ำลัษณ์ขงคองกรรท โดย ฟังก์ชันการเจริญเติบโตขงคองกรรท (Maturity function) เขียนได้ดังสมการ

$$M_t = \sum_{i=0}^t (T - T_o) \Delta t \quad (3.30-1)$$

หรือ

$$M_t = \int_0^t (T(t) - T_o) dt \quad (3.30-2)$$

M_t คือ ค้การเจริญเติบโต (Maturity) ขงคองกรรทท้อญ t วัน

T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงเวลา t (องศาเซลเซียส)

$T(t)$ คือฟังก์ชันขงอุณหภูมิท้เวลา t ใด ๆ

T_o คือ ค้อุณหภูมิข้สุดข้งอ้ง มีค้เท่ากับ -10 องศาเซลเซียส ซึงถือว้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว้่งน้และ ซิเมนต์ไม่สามารถท้จะเกิดขึ้นได้ หากพิจารณาให้อุณหภูมิเฉลี่ยขณะท้การบมคองกรรทมีค้คงท้เท่ากับ k_T สามารถเขียนสมการท้ (3.30) ได้เป็น

$$M_t = (k_T + 10)t \quad (3.31)$$

Plowman ^[44] เสนอความสัมพันธ์ระหว้่งการเจริญเติบโตและก้ำลัษณ์ขงคองกรรทในรูปขงสมการลอการิทึม ซึงใช้ ท้ทำนายก้ำลัษณ์ขงคองกรรทท้มีความซึ้นท้พอเพียงนการเกิดปฏิกิริยา และในช่วงอญท้จ้ก้ด (ในงานวิจัยน้ใช้กับอญ คองกรรทไม่เกิน 91 วัน ซึงเป็นอญสูงสุดขงข้อมูลการทดสอบ) ดังสมการ

$$fc'_t = a + b \log M_t \quad (3.32)$$

เมื่อแทนค้จากสมการท้ (3.31) ลงนสมการท้ (3.32) และกำหนดให้ค้ก้ำลัษณ์ท้เวลา $1/k_T$ วัน มีค้้น้อยมาก จะได้ค้ขง $a = 0$ และสามารถคำนวณก้ำลัษณ์ท้อญต่าง ๆ เทียบกับก้ำลัษณ์ท้อญ 28 วันได้ ดังสมการ

$$fc'_t = \frac{\log M_t}{\log M_{28}} fc'_{28} \quad (3.33-1)$$

หรือ
$$fc'_t = \frac{\log(k_T + 10)t}{\log 980} fc'_{28} = H(t) \cdot fc'_{28} \quad (3.33-2)$$

หากกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำขณะปมคอนกรีตมีค่าเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส ตลอดอายุการปม พบว่าผลการคำนวณที่ได้จากสมการที่ (3.33) ให้ค่าที่สอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุตั้งแต่ 3 วัน ถึง 91 วัน ได้เป็นอย่างดี เว้นแต่ที่คอนกรีตอายุ 1 วัน ทำนายค่าได้ต่ำกว่าผลการทดสอบ จากการวิเคราะห์พบว่าขณะที่คอนกรีตอายุ 1 วัน ค่าจากสมการ (3.33) ต่ำกว่าผลการทดสอบโดยเฉลี่ยประมาณ 1.05 เท่า โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.06 และจากการคำนวณย้อนกลับจะให้ค่าอุณหภูมิของคอนกรีตประมาณ 32 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาของ Guo ^[45] พบว่าหลักการของ Saul สามารถใช้งานได้ดีในช่วงอุณหภูมิการปมปกติซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 30 องศาเซลเซียส ในกรณีที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าที่ทำนายด้วยสมการที่ (3.33) จะให้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากไม่ได้พิจารณาผลของการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว หลักการของ Saul ยังคงใช้งานได้ดี ซึ่งมาตรฐาน ASTM C1017 ได้ยอมรับให้เป็นวิธีการมาตรฐานในการคาดคะเนกำลังอัดของตัวอย่างที่ทำการปมแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Curing) รูปที่ 3.13 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่คำนวณโดยหลักการเจริญเติบโตร่วมกับทำการปรับแก้กำลังอัดของคอนกรีตที่ 1 วัน ผลลัพธ์ที่ได้จะมีขอบเขตความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน 5 Mpa และ รูปที่ 3.14 แสดงการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ จากหลักการเจริญเติบโต ซึ่งพบว่าเมื่อสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่าต่ำจะทำให้การพัฒนา กำลังอัดในระยะต้นของคอนกรีตเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว โดยการพัฒนา กำลังอัดในระยะปลายจะไม่แตกต่างกันนัก

3.2.4.3 การคำนวณสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้สอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีต

ในกรณีที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย หรือ ซิลิกาฟูม ความสัมพันธ์ของสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตในสมการที่ (3.33) ยังคงใช้ได้ เพียงแต่ต้องพิจารณาถึงผลเนื่องจากวัสดุปอซโซลานซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นวัสดุประสานที่คล้ายคลึงกับซีเมนต์ การปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และกำลังอัดของคอนกรีตสามารถทำได้โดยแปลงค่าปริมาณซีเมนต์ให้เป็นปริมาณซีเมนต์ประสิทธิผล ดังสมการ

$$fc' = \frac{A}{B^{w/Cef}} \cdot H(t) \quad (3.34)$$

เมื่อ A, B คือ ค่าคงที่ในสมการที่ (3.29) เท่ากับ 177 และ 24 ตามลำดับ

$H(t)$ คือ ฟังก์ชันที่เกี่ยวกับการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ

และ Cef คือ ปริมาณซีเมนต์ประสิทธิผล สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Cef = f(r)(c + p) \quad (3.35)$$

โดยที่ c, p คือ ปริมาณของซีเมนต์ และวัสดุปอซโซลานในส่วนผสม (กก./ลบ.ม.) ตามลำดับ

$f(r)$ คือ ฟังก์ชันประสิทธิผล

และ r คือ สัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอร์โซลาน ซึ่ง $r = \frac{p}{c+p}$

ฟังก์ชันประสิทธิผล แสดงถึงประสิทธิภาพร่วมในการทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานของซีเมนต์ และวัสดุปอร์โซลาน หากการใช้วัสดุปอร์โซลานแทนที่ซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นที่อายุเท่ากัน ค่าของฟังก์ชันประสิทธิผล จะมากกว่า 1.0 และในทางตรงข้าม หากการใช้วัสดุปอร์โซลานทดแทนซีเมนต์แล้วทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง ค่าของฟังก์ชันประสิทธิผล จะมีค่าต่ำกว่า 1.0 และในกรณีที่ไม่มีการใช้วัสดุปอร์โซลานค่าของฟังก์ชันประสิทธิผล จะมีค่าเป็น 1.0 ค่าของฟังก์ชันประสิทธิผล จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของวัสดุปอร์โซลานที่ใช้ โดยขึ้นกับคุณสมบัติของซีเมนต์และวัสดุปอร์โซลานที่ใช้ สัดส่วนการแทนที่ อายุของคอนกรีต ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM 618 จากข้อมูลของ วิศวะ^[9] และซิลิกาฟูม ที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1240 จากข้อมูลของ สมภพ^[10] สามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันประสิทธิผล และสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ที่อายุต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 3.5 โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย และซิลิกาฟูม ที่ใช้แสดงได้ดังตารางที่ 3.6 จากรูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าลอยชนิด C ตามข้อมูลการทดสอบทดแทนซีเมนต์ในอัตราที่เหมาะสม (ไม่เกิน 20%) จะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ดีขึ้น โดยประสิทธิภาพของเถ้าลอยค่อนข้างสม่ำเสมอในช่วงอายุตั้งแต่ 28 ถึง 91 วัน อย่างไรก็ตาม หากพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน พบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดลดต่ำลงตามสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ในส่วนผสม จากรูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าซิลิกาฟูมมีประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มเติมจากซีเมนต์ได้ดีกว่าเถ้าลอย โดยการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมในสัดส่วนตั้งแต่ 5 - 25% โดยน้ำหนักซีเมนต์จะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่อายุ 1 วัน ซิลิกาฟูม จะทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยเฉลี่ยสูงขึ้นในทุก ๆ สัดส่วนการแทนที่ และประสิทธิภาพของซิลิกาฟูมจะลดลงเมื่ออายุสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพในการใช้เถ้าลอยสูงสุดอยู่ที่สัดส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยประมาณ

3.2.4.4 ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อความทนทาน

นอกเหนือจากการพิจารณากำลังอัดที่ออกแบบแล้ว การกำหนดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตไหล หรือคอนกรีตหยาบ ที่มีกำลังอัดไม่สูง จะต้องพิจารณาถึงความทนทานของคอนกรีตร่วมด้วย เนื่องจากสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีความสัมพันธ์อย่างมากกับความสามารถซึมผ่านของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดต่ำลงถึงค่าหนึ่งจะทำความสามารถซึมผ่านของคอนกรีตลดต่ำลงอย่างมาก จนสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นคอนกรีตปราศจากการซึมผ่าน (impermeable) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ดังนั้นในข้อกำหนดความทนทานสำหรับการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตจึงกำหนดค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดที่ยอมให้ใช้ในส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานตามที่เพียงพอกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน

ในงานวิจัยได้ศึกษารวบรวมข้อกำหนดของ BS 8110: Part 1 Clause 3.3.3^[46] ร่วมกับข้อเสนอแนะของ ACI Committee 201^[14] ACI Committee 211^[13] และ ข้อกำหนดของ CEB-MC 90^[47] และนำมาพิจารณาเพื่อสร้างเกณฑ์กำหนดที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นข้อพิจารณาในการออกแบบส่วนผสมเพื่อความทนทานของคอนกรีต โดยกำหนดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดเพื่อควบคุมความสามารถซึมผ่านของคอนกรีต และกำหนดปริมาณซีเมนต์ต่ำสุด เพื่อควบคุม

สภาวะความเป็นต่างในเนื้อของคอนกรีต ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริม สามารถตามสภาพความเปิดเผยของคอนกรีต และระยะหุ้มเหล็กเสริม เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งาน โปรแกรมสำหรับการออกแบบจะจำแนกสภาพความเปิดเผยของคอนกรีตออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ สภาพความเปิดเผยอย่างอ่อน สภาพความเปิดเผยปานกลาง สภาพความเปิดเผยรุนแรง และสภาพความเปิดเผยรุนแรงมาก และโปรแกรมจะให้กำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งจะนำไปพิจารณาถึงสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุด และปริมาณซีเมนต์ต่ำสุดที่ยอมให้ในส่วนผสม

การใช้งานคอนกรีตในสภาพความเปิดเผยรุนแรงมากนั้น ACI Committee 201^[14] แนะนำให้ใช้ซีเมนต์ด้านทานซัลเฟต (SRPC) ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ทดแทนการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (OPC) และเมื่อคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำที่มีซัลเฟตละลายอยู่ในอัตราที่สูงกว่า 10,000 ส่วนในล้านส่วน หรือ สัมผัสกับดินที่มีซัลเฟตที่ละลายได้อยู่สูงกว่าร้อยละ 2 จะต้องใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ด้านทานซัลเฟตที่มีส่วนผสมของสารปอซโซลานร่วมด้วย นอกจากนี้ตามข้อกำหนดของ CEB MC-90^[47] ยังได้กำหนดให้มีการป้องกันผิวหน้าของคอนกรีตมิให้มีการสัมผัสกับกรด หรือสารเคมีที่มีอำนาจในการกัดกร่อนรุนแรงโดยตรง ตารางที่ 1.7 และตารางที่ 3.7 และ 3.8 แสดงข้อกำหนดสำหรับการออกแบบส่วนผสมเพื่อความทนทานของคอนกรีตตามคำแนะนำของ ACI Committee 201 และ ข้อกำหนดของ CEB ตามลำดับ จากการศึกษาที่ผ่านมา ระบุได้ว่าแร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานมีส่วนช่วยปรับปรุงความสามารถด้านความทนทานของคอนกรีต ข้อกำหนดของ CEB กำหนดให้คำนวณสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประสิทธิภาพ แทนการใช้ค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์แบบดั้งเดิม ดังสมการ

$$(w/c)_{ef} = \frac{w}{c + \alpha p} \quad (3.36)$$

โดยที่ w, c, p คือ ปริมาณน้ำ ซีเมนต์ และ วัสดุปอซโซลานในส่วนผสม ตามลำดับ

α คือ ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพ ของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าฟังก์ชันประสิทธิภาพในสมการที่ (3.35) ดังนี้

$$c + \alpha p = f(r)(c + p) \quad (3.37)$$

หรือ

$$\alpha = f(r) - [1 - f(r)] \frac{1-r}{r} \quad (3.38)$$

เพื่อให้ผลที่ได้อยู่ในเชิงปลอดภัย จะพิจารณาค่าของ $f(r)$ ที่เป็นขีดจำกัดล่างของคอนกรีต ที่อายุ 91 วัน โดยสำหรับค่าเฉลี่ย จะได้ค่าของ α มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ในช่วง 20 - 35% มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 0.3 และสำหรับซิลิกาฟุ้งในสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ 5 - 15 % จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.9 ถึง 1.6 อย่างไรก็ตามในกรณีที่ไม่มีการทดสอบ CEB กำหนดให้ใช้ค่าของ α ไม่เกิน 0.5 สำหรับค่าเฉลี่ย และ 0.7 สำหรับซิลิกาฟุ้ง เพื่อใช้คำนวณค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประสิทธิภาพ

จากข้อกำหนดความทนทานทั้งจากข้อกำหนดของ BS 8110^[46] CEB-MC90^[47] ACI Committee 211^[13] หรือ ACI Committee 201^[14] พบว่าขีดจำกัดล่างของค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในสภาพความเปิดเผยรุนแรงมากจะอยู่ที่

0.45 ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว คอนกรีตกำลังสูงจะลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้มีความต่ำกว่าค่าตามข้อกำหนด ซึ่งทำให้คอนกรีตกำลังสูงสามารถผ่านเกณฑ์ของข้อกำหนดความทนทานได้ในทุก ๆ กรณี และไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อกำหนดเพื่อความทนทานของคอนกรีตในการออกแบบ

3.2.5 การกำหนดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมเพื่อจำกัดอุณหภูมิเพิ่ม

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่คอนกรีตกำลังก่อตัวในโครงสร้างคอนกรีตหนา จะทำให้อุณหภูมิภายในเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากอัตราการกำเนิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำและซีเมนต์สูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่ภายนอกมาก ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตหนาเกิดการขยายตัว และหดตัวไม่เท่ากันทั้งองค์อาคาร และเกิดการร้าวร้าวระหว่างคอนกรีต และเหล็กเสริม เป็นเหตุให้เกิดหน่วยแรงซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวโดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตมีอายุยังน้อย ซึ่งส่งผลต่อกำลังของโครงสร้างโดยรวม การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างคอนกรีตหนาเป็นวิธีการที่ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง และเนื่องจากการกระจายความร้อนภายในโครงสร้างได้รับผลจากรันตอนและวิธีการก่อสร้างก่อสร้าง ผลของสภาพทางอุณหภูมิมิทธิของโครงสร้าง รวมทั้งคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต ทำให้ค่าที่วัดได้เป็นค่าเฉพาะกรณี การประมาณค่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนที่เกิดขึ้น ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ทำการตรวจวัดได้ ทั้งนี้ขึ้นกับการจำลองสภาวะแวดล้อมในการวิเคราะห์ และยังขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการทำนายอุณหภูมิเพิ่มของคอนกรีต โดยตารางที่ 3.9 แสดงปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิในโครงสร้างคอนกรีตหนา

3.2.5.1 ผลของซีเมนต์และอุณหภูมิเริ่มแรกต่ออุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อน

จากการศึกษาของ ยศชัย^[49] พบว่าปัจจัยที่มีต่อค่าอุณหภูมิสูงสุดและอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแบบกักกันความร้อนของคอนกรีตหนาได้แก่ ปริมาณซีเมนต์ ประเภทของซีเมนต์ และอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต ซึ่งจากการศึกษาไม่พบว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีส่วนสำคัญ โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะกักกันความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ดังสมการ

$$T_a = K(1 - e^{-a}) \quad (3.39)$$

เมื่อ K คือ อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส) มีความสัมพันธ์กับปริมาณของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ดังสมการ

$$K = 0.09 C \quad (3.40)$$

เมื่อปริมาณซีเมนต์ที่ใช้อยู่ระหว่าง 200 ถึง 500 กก./ลบ.ม.

และ a คือ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส/วัน) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีตดังสมการ

$$a = e^{(2.2 \times 10^{-12} T_o^{7.3} + 0.5)} \quad (3.41)$$

โดยที่ โดยที่ C และ T_o คือปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม (กก./ลบ.ม.) และอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต (องศาเซลเซียส) ตามลำดับ จากการศึกษาไม่พบว่าอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีตส่งผลต่ออุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่เกิดขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิโดยรวมของคอนกรีตที่เวลาใด ๆ คำนวณได้จากผลรวมของอุณหภูมิเริ่มแรกและอุณหภูมิเพิ่ม ดังสมการ

$$T_{tot} = T_o + T_a \quad (3.42)$$

อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลจากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัดอุณหภูมิในโครงสร้างจริง พบว่าควรดูสมการที่ (3.40) ด้วยค่าตัวประกอบ 1.7 จะทำให้ผลการวิเคราะห์ได้ค่าใกล้เคียงค่าที่ได้จากการวัดในทุก ๆ ตำแหน่ง โดยให้เหตุผลได้ว่าเป็นเพราะมีความร้อนบางส่วนสูญเสียไปเนื่องจากการระเหยเป็นไอของน้ำเย็นที่ผิวของตัวอย่างภายในเครื่องมือทดสอบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนที่ศึกษาโดย ยศชัย^[47] กับผลการทดสอบของ Sarker^[48] และ Srichoo^[50] ที่ทำการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มในสภาวะกึ่งกักกันความร้อน พบว่าค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุด มีความใกล้เคียงกัน โดยผลที่ได้มีค่าแตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 6 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในสภาวะกึ่งกักกันความร้อนจะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากขนาดตัวอย่างทดสอบที่ใหญ่กว่ามาก ซึ่งสรุปได้ว่าหากพิจารณาเพียงค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดแล้วสมการที่เสนอโดย ยศชัย จะให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบในทั้งสองลักษณะได้เป็นอย่างดี รูปที่ 3.18 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบผลของปริมาณซีเมนต์ที่มีต่ออุณหภูมิเพิ่มในสภาวะกึ่งกักกันความร้อน และความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.39) นอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตยังได้รับผลโดยตรงจากองค์ประกอบทางเคมีหลักของซีเมนต์ จากผลการศึกษายังพบว่า ค่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนสูงสุด K สำหรับซีเมนต์ประเภท 3 และ 5 มีค่าเป็น 1.1 และ 0.9 เท่าของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ a สำหรับซีเมนต์ประเภท 3 และ 5 นั้นมีสัดส่วนเป็น 1.2 และ 0.8 เท่า ตามลำดับ

3.2.5.2 ผลของสารปอโรซิลานที่มีต่ออุณหภูมิเพิ่ม

ในทางปฏิบัติแล้ว การควบคุมอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต จะต้องจำกัดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสม หรือเปลี่ยนซีเมนต์ให้เป็นประเภทที่ให้ความร้อนต่ำ ได้แก่ ซีเมนต์ประเภท 4 ซึ่งหาได้ยากในท้องตลาด วิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือ ทดแทนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุปอโรซิลานซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำกว่าซีเมนต์ซึ่งจะก่อให้เกิดความร้อนในปริมาณที่ต่ำกว่า จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าผลของซิลิกาฟุ่มในการลดอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนนั้นยังไม่เด่นชัด จากการศึกษาของ Bentur et. al.^[51] พบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มทดแทนซีเมนต์บางส่วนทำให้เพิ่มความร้อนที่เกิดขึ้น เนื่องจากความละเอียดของซิลิกาฟุ่มมีส่วนเร่งปฏิกิริยาปอโรซิลานิกที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นสูงเทียบเท่า หรือในบางกรณีสูงกว่าปูนซีเมนต์ แต่จากผลการศึกษาของ Meland^[52] กลับพบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มทดแทนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดได้ตามสัดส่วนการแทนที่ ทั้งนี้คาดว่าความแตกต่างอาจเกิดขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของซิลิกาฟุ่มที่ใช้ และสภาวะแวดล้อมในการทดสอบ เนื่องจากการใช้ซิลิกาฟุ่มทดแทนซีเมนต์ในการลดอุณหภูมิของคอนกรีตนั้นยังไม่เป็นที่ยอมรับในทางปฏิบัติเพราะมีราคาสูง ดัง

นั้นในงานวิจัยจะไม่พิจารณาถึงการใช้ซิลิกาฟูมในประเด็นนี้ โดยจะให้ความสนใจที่การใช้เถ้าลอยเพื่อทดแทนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

การศึกษาของ Srirachoo^[50] ได้ใช้เถ้าลอย ชนิด C และ ชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 311 ทดแทนซีเมนต์บางส่วน พบว่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกึ่งกักกันความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของแคลเซียมออกไซด์รวมของซีเมนต์และเถ้าลอย โดยเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น กับปริมาณของแคลเซียมออกไซด์รวม ได้ดังสมการ

$$T_{max} = K = 0.17 CaO_{Total} - 4.8 \quad (3.43)$$

โดยที่ CaO_{Total} คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมในส่วนผสม คำนวณได้จากสมการ

$$C = W_{Cement} \times \frac{\% CaO_{Cement}}{100} + W_{Flyash} \times \frac{\% CaO_{Flyash}}{100} \quad (3.44)$$

กล่าวคือ ค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดจะลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และหากพิจารณาด้วยหลักการนี้แล้วพบว่าเถ้าลอยชนิด C จะมีประสิทธิภาพในการลดค่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกึ่งกักกันความร้อนต่ำกว่าเถ้าลอยชนิด F ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดแบบกึ่งกักกันความร้อนที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.39) กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มแบบกึ่งกักกันความร้อนที่มีการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย พบว่าในกรณีที่ใช้เถ้าลอยชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ไม่เกิน 10% แทนที่ซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 40 ถึง 60 จะทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการสูงกว่าผลที่ได้จากการทดสอบแบบกึ่งกักกันความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 7 องศาเซลเซียส แต่สำหรับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM จะทำให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดมากกว่าค่าที่คำนวณโดยสมการที่ (3.39) อยู่ในช่วงระหว่าง 3 ถึง 6 องศาเซลเซียส สำหรับปริมาณของซีเมนต์ในช่วง 100 ถึง 200 กก./ลบ.ม. จากผลการเปรียบเทียบสามารถตั้งข้อสันนิษฐานได้ว่า การใช้เถ้าลอยชนิด F แทนที่ซีเมนต์บางส่วนทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิลดลง เป็นไปตามคำแนะนำของ ACI Committee 207 และเนื่องจากในการทดสอบแบบกึ่งกักกันความร้อนนั้นไม่สามารถทำการกักกันความร้อนได้อย่างสมบูรณ์เนื่องจากยังคงมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างและอุณหภูมิภายนอกจึงยังคงเกิดการถ่ายเทความร้อนจากภายในสู่ภายนอกได้ เป็นเหตุให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงสุดจึงมีค่าต่ำกว่าจากผลการทดสอบแบบกักกันความร้อน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Srirachoo^[50] ทำให้สรุปได้ว่าเถ้าลอยชนิด F ยังทำให้เกิดความร้อนเพิ่มบางส่วนเช่นเดียวกัน ในขณะที่เถ้าลอยชนิด C นั้นจะส่งผลน้อยต่อการลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ตามสัดส่วนของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ที่สูงขึ้น เนื่องจากในการทดสอบแบบกักกันความร้อนนั้น ไม่มีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในสู่ภายนอก ดังนั้นคาดว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจะได้รับผลของความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอยด้วย ในการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มแบบกึ่งกักกันความร้อนที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยบางส่วนสามารถทำการปรับปรุงสมการที่ (3.39) ที่เสนอโดย ยศชัย โดยให้อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากเถ้าลอยเป็นสัดส่วนกับปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอยนั้น ดังสมการ

$$K_{Flyash} = 0.09 \times \frac{\%CaO_{Flyash}}{\%CaO_{Cement}} W_{Flyash} \quad (3.45)$$

และ อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดรวมสามารถคำนวณได้จาก

$$K_{Total} = K_{Cement} + K_{Flyash} \quad (3.46)$$

โดยค่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนที่เวลาใด ๆ คำนวณได้จาก

$$T_a = \alpha K_{Total} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (3.47)$$

โดยที่ α คือค่าตัวประกอบปรับแก้เนื่องจากผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อน มีค่าเท่ากับ 1.7 และเพื่อให้ผลที่เกิดขึ้นอยู่ในเชิงปลอดภัยจะพิจารณาให้ค่าลดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ในรูปที่ 3.19 แสดงการเปรียบเทียบผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิด C และ F ที่มีต่ออุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.47)

3.2.5.3 การวัดอุณหภูมิจากโครงสร้างจริง

โครงสร้างคอนกรีตหลาที่นำมาเปรียบเทียบเป็น ฐานรากแผ่นขนาด 8.4 x 38.4 x 4.75 เมตร ของโครงการสถานีขนส่งหมอชิตแห่งใหม่ (ข้อมูลจากบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด) โดยส่วนผสมคอนกรีตหลาที่ใช้มีปริมาณปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 210 กก./ลบ.ม. เถ้าลอยจากแหล่งแม่เมาะ ซึ่งมีปริมาณของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 20 โดยเฉลี่ย ในปริมาณ 190 กก./ลบ.ม. มีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 ใช้สารลดน้ำพิเศษในอัตรา 0.7 ลิตร/ลบ.ม. โดยคอนกรีตมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 320 กก./ตร.ซม. และ มีค่ายุบตัวระหว่าง 15 - 20 เซนติเมตร ในการก่อสร้างจะเทคอนกรีตอย่างต่อเนื่องด้วยอัตรา 80 ลบ.ม./ชั่วโมง โดยไม่มีการฝังท่อระบายความร้อนภายในโครงสร้าง สำหรับคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตนั้น ACI Committee 201^[14] เสนอว่า ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมเป็นสิ่งสำคัญ ในงานวิจัยจึงได้อ้างอิงจากข้อมูลของเขื่อน Angostura^[22] ซึ่งใช้มวลรวมประเภทหินปูนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตเท่ากับ 1.46 บี.ที.ยู/ฟุต/°ฟ/ซม. ความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.23 บี.ที.ยู/ปอนด์ / °ฟ

ในการวิจัยจะเปรียบเทียบผลการกระจายอุณหภูมิภายในโครงสร้าง ณ เวลาต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ กับค่าจากการตรวจวัดจากจุดสังเกต 3 จุด ได้แก่จุด A (จุดต่อที่ 314) และจุด C (จุดต่อที่ 74) ซึ่งอยู่ห่างจากผิวบนและผิวล่างของโครงสร้างเป็นระยะ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ และจุด B (จุดต่อที่ 194) ซึ่งอยู่กึ่งกลางของโครงสร้าง เพื่อนำไปคำนวณหาตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับการใช้งานต่อไป

ก. การวิเคราะห์อุณหภูมิเพิ่มโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยการประมาณสามารถทำได้โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมมีฟังก์ชันประมาณการแบบเชิงเส้น และทำการแบ่งเอลิเมนต์ย่อยของโครงสร้างดังรูปที่ 3.20 ก โดย

ใช้หลักการสมมาตรเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพียงครั้งเดียว ซึ่งสภาพที่ขอบจะมีคุณสมบัติเป็นอนวน รายละเอียดของวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์แสดงไว้ในภาคผนวก ก

ในการวิเคราะห์ได้ทำการจำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนของโครงสร้างเริ่มตั้งแต่ขณะทำการเทคอนกรีตจนกระทั่งแล้วเสร็จ โดยคำนวณอัตราการกำเนิดความร้อนของคอนกรีตจากสมการที่ (3.47) และเปรียบเทียบกับผลของการตรวจวัดกับโครงสร้างจริงเป็นเวลา 17 วัน เพื่อหาค่าของตัวประกอบความปลอดภัยที่เหมาะสมแก่การใช้งาน โดยจะพิจารณาให้คอนกรีตถูกเห็บถมกันที่ระดับอย่างต่อเนื่อง โดยในแต่ละระดับจะมีเวลาคลาด (Time lag) ตามระยะความลึกของชั้นและอัตราการเทคอนกรีตที่กำหนด ผลของการกำเนิดความร้อนจะถูกพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการเทคอนกรีตในแต่ละชั้นโดยคอนกรีตจะมีอัตราการกำเนิดความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาซึ่งอ้างอิงจากเวลาที่เริ่มต้นเทคอนกรีตในชั้นแรก โดยมีสมมติฐานที่ใช้วิเคราะห์ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนในทุก ๆ หน้าตัดที่ตั้งฉากกับระนาบของการวิเคราะห์เหมือนกัน
2. คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และอุณหภูมิ
3. ขณะทำการเทคอนกรีตการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นภายในชั้นของคอนกรีตที่กำลังเท และชั้นที่เทแล้วเสร็จ
4. ขณะทำการเทไม่พิจารณาถึงผลของการพาความร้อนเนื่องจากการระเหยของน้ำ การพาความร้อนเนื่องจากลม และการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ยาว และความร้อนที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถถ่ายเทออกสู่ภายนอกได้มากนัก
5. ความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถถ่ายเทสู่ที่ฐานรองรับซึ่งได้ทำการจำลองขึ้นส่วนที่มีคุณสมบัติเป็นดินเหนียว (Clay) ที่มีความลึกและความกว้างเป็น 2 เท่าของความลึก และความกว้างของโครงสร้างโดยประมาณ โดยที่ขอบของชั้นดิน จะถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 32 องศาเซลเซียส โดยคาดว่าความร้อนจากโครงสร้างมีการถ่ายเทมายังบริเวณดังกล่าวได้น้อยมาก
6. อุณหภูมิเริ่มต้นของจุดต่อในการคำนวณจะได้รับการคำนวณแบบทำซ้ำในทุก ๆ ชั้นของคอนกรีตที่ได้เทไปแล้ว
7. ทุก ๆ จุดต่อในชั้นเดียวกันจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากัน

ข. การเปรียบเทียบการวัดและการวิเคราะห์ผล

เมื่อใช้สมการที่ (3.47) โดยให้ค่าตัวประกอบ α มีค่าเท่ากับ 1.0 ซึ่งเป็นอัตราการกำเนิดความร้อนของคอนกรีตเท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบในสภาพกักกันความร้อน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.20 ข พบว่ารูปแบบการถ่ายเทอุณหภูมิมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัดทั้งบริเวณกึ่งกลางความลึก (จุดสังเกต B) และที่ฐานของโครงสร้าง (จุดสังเกต C) ในขณะที่ผิวบน (จุดสังเกต A) ผลจากการวิเคราะห์มีการถ่ายเทความร้อนรวดเร็วกว่าสภาพจริง ซึ่งพิจารณาได้ว่าเป็นผลเนื่องจาก ณ จุดดังกล่าวอุณหภูมิภายในจะได้รับผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อมมาก และคุณสมบัติการนำความร้อนของคอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อกำหนดให้ค่าของ α มีค่าเท่ากับ 1.69 ในรูปที่ 3.20 ก จะพบว่าผลลัพธ์ของการกระจายอุณหภูมิ และอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากโครงสร้างจริงมาก โดยในตำแหน่ง B และ C นั้นจะพบว่าโครงสร้างจริงมีการถ่ายเทความร้อนเร็วกว่าผลจากการวิเคราะห์เล็กน้อย

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสามารถใช้สมการที่ (3.47) ร่วมกับการวิเคราะห์โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยค่าตัวประกอบ α มีค่าไม่น้อยกว่า 1.7 ซึ่งเท่ากับ

ค่าที่เสนอโดย ยศชัย โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากสภาพการกักเก็บความร้อนของเครื่องมือไม่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดการสูญเสียไปกับโพรงอากาศในฉนวนความร้อน การพาความร้อนของน้ำที่ระเหยเป็นไอ รวมถึงผลของการตั้ง เครื่องมือทดสอบ อย่างไรก็ตามในการใช้งานควรเพิ่มค่าตัวประกอบปรับแก้ตามความเหมาะสม และความสำคัญของ โครงสร้าง

3.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ HPCX (High Performance Concrete Mix Design Package) ขึ้นเพื่อใช้สำหรับทำการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยโปรแกรมมีการทำงานบนระบบปฏิบัติการ วินโดว์ แบบ 32 บิต ได้แก่ ระบบปฏิบัติการ วินโดว์ 95/98 และ ระบบปฏิบัติการแบบวินโดว์ NT ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุดในปัจจุบัน การวิจัยได้ทำการพัฒนาให้ HPCX มีระบบการติดต่อกับผู้ใช้ ในรูปแบบที่เป็นมาตรฐานและเทียบเคียงได้กับโปรแกรมสำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตในเชิงพาณิชย์ โดยทั่วไป แนวคิดหลักของการพัฒนาโปรแกรมจะมุ่งเน้นให้เกิดความสะดวกในการใช้งานออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง

ในการพัฒนาโปรแกรมยังได้คำนึงถึงความสามารถในการคำนวณออกแบบและปรับส่วนผสมแบบอัตโนมัติ ในกรณีที่มีการคำนวณออกแบบตามขั้นตอนไม่ประสบผลสำเร็จ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยผู้ออกแบบมีความไม่เหมาะสม ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณและปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ส่วนผสมผลลัพธ์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุด โดยจะมีข้อความแสดงให้ทราบเมื่อมีเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นและให้ผู้ออกแบบทำการตัดสินใจเลือกวิธีการปรับแก้ส่วนผสมแบบอัตโนมัติในวิธีการต่าง ๆ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดในลำดับต่อไป

3.3.1 ภาษาคอมพิวเตอร์ในโปรแกรม

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัย ถูกพัฒนาขึ้นด้วย ภาษาวิชวลเบสิก เวอร์ชัน 6.0 เอนเตอร์ไพรส์ เอ็ดชัน (Visual Basic 6.0 Enterprise Edition) ของ ไมโครซอฟท์ คอร์ปอเรชั่น สหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นเวอร์ชันล่าสุดที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

ภาษาวิชวลเบสิก เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่เป็นการผสมผสานระหว่างการโปรแกรมแบบโครงสร้าง โดยภาษาเบสิก (BASIC: Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code) และการโปรแกรมแบบขับเคลื่อนเหตุการณ์ (Event-Driven Programming) โดยแนวคิดของการมองเห็น (Visual Concept) ทำให้สามารถทำการพัฒนาโปรแกรมที่มีความซับซ้อนได้โดยง่าย โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษาวิชวลเบสิกนี้จะประกอบไปด้วย วัตถุ หรือ ตัวควบคุม ต่าง ๆ ซึ่งจะทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งวัตถุหรือตัวควบคุมนี้สามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่าง ๆ ตามหน้าที่ที่ได้กำหนดให้ ไม่ว่าจะเป็นการข้อมูลจากผู้ใช้ การแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณ หรือแม้กระทั่งการติดต่อกับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้แล้ว วัตถุหรือตัวควบคุม แต่ละส่วนยังสามารถถูกกำหนดให้เชื่อมโยงซึ่งกันและกันได้ตามความต้องการ นับเป็นข้อได้เปรียบกว่าการพัฒนาด้วยวิธีการโปรแกรมแบบโครงสร้างเพียงอย่างเดียว

จากคุณสมบัติเหล่านี้เองทำให้ภาษา วิชาลเบสิก สามารถใช้งานได้อย่างเต็มรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการรับข้อมูล การประมวลผล หรือการแสดงผล ทำให้มีความเหมาะสมกับโปรแกรมออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งจำเป็นต้องรับข้อมูลหลากหลายประเภทจากผู้ใช้ และยังคงสื่อความหมายให้แก่ผู้ใช้เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน ในปัจจุบัน โปรแกรมสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตในเชิงพาณิชย์จะใช้หลักการเขียนโปรแกรมโดยแนวทางนี้แทบทั้งสิ้น

3.3.2 โครงสร้างและลำดับการทำงานของโปรแกรม

3.3.2.1 โครงสร้างของโปรแกรม

โครงสร้างหลักของโปรแกรมสำหรับออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย ส่วนรับข้อมูล ส่วนคำนวณ และส่วนแสดงผล โดยแนวคิดของการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา วิชาลเบสิก ส่วนรับและแสดงผลข้อมูลจะประกอบไปด้วย วัตถุ และหน่วยควบคุม ซึ่งทำหน้าที่รับ และแสดงผลข้อมูล โดยสามารถทำการโปรแกรมให้แต่ละส่วนมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันตามตามเงื่อนไข หรือทางเลือกที่กำหนด การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ในการพัฒนาโปรแกรมได้สร้างโปรแกรมย่อยในส่วนของการคำนวณในขั้นตอนต่าง ๆ และการแสดงผล โดยในส่วนรับข้อมูลนั้นจะต้องเขียนคำสั่งให้หน่วยควบคุมการรับข้อมูลปฏิบัติหน้าที่ตามต้องการ รายละเอียดของโปรแกรมย่อยสำหรับการคำนวณในส่วนต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.10 โดยในรูปที่ 3.21 แสดงโครงสร้างโปรแกรม

3.3.2.2 ลำดับการทำงานของโปรแกรม

การทำงานของโปรแกรมเริ่มจากการรับข้อมูลคุณสมบัติที่จำเป็นของวัสดุผสม และคุณสมบัติควบคุมของคอนกรีตสมรรถนะสูง ในส่วนรับข้อมูล โดยในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ด้วยโปรแกรมย่อย Blender และโปรแกรม DrawCurve จะทำการแสดงผลของการคำนวณในรูปของเส้นโค้งขนาดคละหากมวลรวมที่ใช้มีขนาดคละไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงจะต้องทำการปรับเปลี่ยนขนาดคละมวลรวมที่ใช้ หรือเพิ่มเติมมวลรวมกลุ่มพิเศษ โดยแสดงลำดับการทำงานได้ดังรูปที่ 3.22 เมื่อโปรแกรมรับข้อมูล และมวลรวมมีขนาดคละเป็นไปตามข้อกำหนดแล้ว จะทำการเรียกส่วนคำนวณหลัก ซึ่งจะทำหน้าที่จัดลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อยต่าง ๆ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.23 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าของปริมาณซีเมนต์เริ่มต้น ที่ใช้ในส่วนผสม โดยการพิจารณาจากข้อกำหนดความทนทานของ CEB และในกรณีที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยสารปอซโซลาน จะทำการคำนวณปริมาณของซีเมนต์ และสารปอซโซลานในส่วนผสมตามสัดส่วนการแทนที่จากค่าเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณปริมาณซีเมนต์สูงสุดที่ยอมให้ใช้ในส่วนผสม สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตหยาบสามารถคำนวณได้จาก ค่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนสูงสุดที่กำหนด และมิติของโครงสร้าง ด้วยโปรแกรมย่อย MaxCM และในกรณีของคอนกรีตกำลังสูงนั้น สามารถกำหนดได้โดยตรง ซึ่งปกติจะตั้งค่าไว้ไม่เกิน 550 กก./ลบ.ม. ตามข้อมูลของงานวิจัยที่ผ่านมา ในกรณีของคอนกรีตไหลนั้นไม่จำเป็นต้องกำหนดปริมาณซีเมนต์สูงสุด รูปที่ 3.24 แสดงลำดับการคำนวณของโปรแกรมย่อย MaxCM

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประสิทธิภาพ (ในกรณีที่มีการใช้สารปอซโซลาน) ที่มีความสอดคล้องกับกำลังอัดตามอายุของคอนกรีต โดยเรียกโปรแกรมย่อย CalWC ทั้งนี้ค่าที่ได้จะต้องไม่เกินกว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดตามข้อกำหนดของความหนาแน่น รูปที่ 3.25 แสดงลำดับการคำนวณของโปรแกรมย่อย CalWC

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณปริมาณน้ำจากสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประสิทธิภาพ และปริมาณของซีเมนต์ และสารปอซโซลาน โดยจากค่าสัดส่วนผสมของมวลรวมที่เหมาะสมสามารถทำการคำนวณส่วนผสมทั้งหมดซึ่งมีคุณสมบัติที่สอดคล้องกับกำลังอัดตามอายุของคอนกรีต และข้อกำหนดของความหนาแน่น

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่ายุบตัวของส่วนผสมโดยหลักการของน้ำอิสระ โดยโปรแกรมย่อย SlumpCal ซึ่งต้องทำงานร่วมกับโปรแกรมย่อย AggSSCal สำหรับส่งผ่านค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม โดยมีลำดับการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.26 ค่ายุบตัวที่คำนวณที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่ายุบตัวเริ่มต้น ของส่วนผสม หากการคำนวณได้ค่ายุบตัวเริ่มต้นน้อยกว่าค่าที่กำหนด โปรแกรมเพิ่มปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสม และย้อนกลับไปคำนวณในขั้นตอนแรกอีกครั้ง จนกว่าส่วนผสมจะมีค่ายุบตัวเริ่มต้นเป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ รูปที่ 3.27 แสดงลำดับการคำนวณของโปรแกรมย่อย SlumpCal

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อส่วนผสมมีค่ายุบตัวเริ่มต้นเป็นไปตามค่าที่กำหนดแล้ว จะคำนวณปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษตามค่ายุบตัวที่ต้องการเพิ่มเติมจากค่ายุบตัวเริ่มต้น โดยโปรแกรมย่อย CalcSuper ซึ่งค่าที่ได้จะต้องไม่น้อยกว่าปริมาณการใช้ต่ำสุดที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาได้จากข้อมูลของผู้ผลิต รูปที่ 3.28 แสดงลำดับการคำนวณของโปรแกรมย่อย CalcSuper

ขั้นตอนที่ 7 ดำเนินการปรับแก้ปริมาณของมวลรวม และน้ำในส่วนผสมตามสภาวะความชื้น และการดูดซึมน้ำของมวลรวมด้วยโปรแกรมย่อย AdjustBatch โดยมีลำดับการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.29

ขั้นตอนที่ 8 เมื่อได้ส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงแล้ว โปรแกรมย่อย DisplayMix จะแสดงผลลัพธ์ของส่วนผสมที่รวมทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตในตารางผลลัพธ์ และโปรแกรมย่อย DisplayChart จะแสดงกราฟปริมาณส่วนผสมของคอนกรีต การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ และอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนที่เกิดขึ้น

ในกรณีที่ผู้ออกแบบต้องการคำนวณส่วนผสมตามปริมาตรที่กำหนด โปรแกรมหลักจะเรียกโปรแกรมย่อย CalBatch เพื่อทำหน้าที่ในการคำนวณ โดยมีลำดับการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.30

3.3.3 ขบวนการปรับส่วนผสมแบบอัตโนมัติ

ถึงแม้ว่าการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงจะมีขั้นตอนที่แน่นอนตายตัว แต่เนื่องจากในการออกแบบนั้นจะมีข้อจำกัดต่าง ๆ ทั้งที่เกิดขึ้นเนื่องจากข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูงเอง หรือข้อกำหนดที่เกิดขึ้นโดยผู้ทำการออกแบบ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะไม่เกิดส่วนผสมผลลัพธ์ขึ้นในกระบวนการออกแบบ เพื่อเป็นการอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ออกแบบ ในงานวิจัยได้พัฒนาให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสามารถในการแก้ไขปัญหา

บางประการที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบที่ไม่เหมาะสม หรือเกิดจากข้อจำกัด ความคุมคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยโปรแกรมจะเสนอทางเลือกที่เหมาะสมในการปรับส่วนผสม กรณีที่มักเกิดขึ้นในกระบวนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงและขั้นตอนของการปรับส่วนผสมแบบอัตโนมัติ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. กรณีที่อัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษที่คำนวณได้มีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนด

ในกรณีที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษที่คำนวณได้ต่ำกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งมักเกิดขึ้นในกรณีของคอนกรีตไหล หรือ คอนกรีตหยาบ ที่มีค่ากำลังอัดต่ำ และมีการกำหนดค่ายุบตัวเริ่มต้นสูงเกินไป โปรแกรมจะเสนอทางเลือกให้ผู้ออกแบบในการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ใน 2 ทางเลือกได้แก่ การกำหนดให้ใช้สารลดน้ำพิเศษในอัตราต่ำสุดที่กำหนด และปรับลดค่ายุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ทำการออกแบบ โดยมีให้ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำการออกแบบ หรือโดยการยกเลิกการใช้สารลดน้ำพิเศษ และทำการคำนวณปริมาณน้ำเพิ่มเติมที่ทำให้เกิดค่ายุบตัวของคอนกรีตในส่วนที่เหลือ ซึ่งส่วนผสมคอนกรีตที่ได้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับส่วนผสมของคอนกรีตแบบดั้งเดิม

ในกรณีของสารลดน้ำพิเศษที่ต้องใช้เพื่อปรับปรุงค่าการยุบตัวของคอนกรีตสูงกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในกรณีของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง โปรแกรมจะกำหนดให้ใช้สารลดน้ำพิเศษในอัตราสูงสุด และย้อนกลับไปปรับส่วนผสมเพื่อให้เกิดค่ายุบตัวเริ่มต้นสูงขึ้น หรือในบางกรณีจะมีการกำหนดให้ใช้แร่ธาตุผสมเพิ่มร่วมด้วย เมื่อปริมาณซีเมนต์สูงกว่าค่าที่ยอมให้

ข. กรณีที่ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมสูงกว่าค่าที่กำหนด

ในกรณีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตหยาบ ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมถูกควบคุมด้วยค่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนสูงสุด ซึ่งโดยปกติคอนกรีตหยาบจะไม่ต้องการกำลังอัดที่สูงนัก แต่ในบางกรณีที่ต้องการกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดปัญหาการคำนวณที่ไม่พบส่วนผสมผลลัพธ์เนื่องจากส่วนผสมต้องการปริมาณซีเมนต์สูงกว่าค่าที่กำหนดเพื่อรักษาค่ากำลังอัด และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเอาไว้ การปรับแก้สามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราการแทนที่ซีเมนต์ด้วยแก้วลอย หรือลดค่ายุบตัวเริ่มต้นของส่วนผสม จะทำให้ส่วนผสมที่มีความเหมาะสมกับข้อจำกัดดังกล่าว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง⁽³⁰⁾

Type of powder	Physical properties					
	Specific gravity	Blaine fineness (cm ² /g)	%Retaining on sieve No.325	Moisture content (%)	β_p by weight	β_p by volume
Cement (C)	3.15	3122	8.60	0.11	0.23	0.7245
Lignite fly ash (FA0)	1.90	2014	45.68	0.11	0.21	0.3990
Lignite fly ash (FA1)	1.90	1824	44.50	0.12	0.21	0.3950
Lignite fly ash (FA2)	1.93	2076	43.88	0.07	0.20	0.3860
Lignite fly ash (FA3)	2.28	2347	NA	NA	0.18	0.4104
Lignite fly ash (FA4)	2.16	1646	NA	NA	0.18	0.3888
Lignite fly ash (FA5)	1.88	1498	NA	NA	0.21	0.3948
Fly ash (FA6)	2.26	2575	12.60	0.37	0.31	0.7006
Pumicite (PU)	2.36	2557	45.27	0.52	0.29	0.6844
Metakaolin (MK)	2.38	9169	NA	0.44	0.52	1.2376
Rice husk ash (RHA)	2.15	8240	74.85	1.28	0.69	1.4835

Note: Other replacement materials except FA0 were used in the series of other researchers which have been used to verified the anticipated model.

ตารางที่ 3.2 ค่าเฉลี่ยของกลุ่มขนาด (Size group) คำนวณโดยสมการที่ (3.14)

Size group	Group Number	Relative Size	d_i (mm)
#200 - #100	1	1	0.11
#100 - #50	2	2	0.23
#50 - #30	3	4	0.45
#30 - #16	4	8	0.89
#16 - #8	5	16	1.77
#8 - #4	6	32	3.56
#4 - 3/8 in	7	64	7.13
3/8 in - 3/4 in	8	128	14.25
3/4 in - 1 1/2 in	9	256	28.50

ตารางที่ 3.3 ค่าของ $W_{free,Add}$ และ $Slump_{Add}$ เมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษ

HRWR Dosage (%)	$W_{free,Add}$	$Slump_{Add}$	R^2
1.20	80.16	13.36	0.60
1.60	99.10	9.29	0.88
1.80	89.92	18.93	0.94
2.40	82.36	21.47	0.61

ตารางที่ 3.4 อัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษตามข้อเสนอแนะของผู้ผลิต

ชื่อทางการค้า	ผู้ผลิต	มาตรฐาน ASTM C494	อัตราการใช้งาน (% โดยน้ำหนักซีเมนต์)
DARACEM [®] 100	W.R. GRACE	Type G	0.3 - 1.5%
DAREX [®] 20+	W.R. GRACE	Type A and F	0.4 - 2.0%
Sikament [®] FF	SIKA	Type A and F	0.6 - 1.5%
Sikament [®] 520	SIKA	Type G	0.6 - 1.5%
Sikament [®] -9 EX	SIKA	Type A and F	0.6 - 1.5%
Mighty [®] - RD (HP)	KaO	Type A,F and G	0.8-1.5% (30-60 Mpa) 1.5-2.0% (60-80 Mpa) 2.0-2.4% (80-100 Mpa)

ตารางที่ 3.5 พังค์ขึ้นประสิทธิภาพของแก้วลอยและซิลิกาฟูม

แก้วลอย		
อายุ	ค่ากลาง	ขีดจำกัดล่าง
1 วัน	$2.4 r^2 - 1.7r + 1.0$	$-0.8 r + 1.0$
28 วัน	$-6.1r^2 + 1.7r + 1.0$	$-4.6 r^2 + 0.9 r + 1.0$
56 วัน		
91 วัน		
ซิลิกาฟูม		
อายุ	ค่ากลาง	ขีดจำกัดล่าง
1 วัน	1.1	0.9
28 วัน	$-18.9r^2 + 5.5 r + 1.0$	$-10.1 r^2 + 3.0 r + 1.0$
56 วัน	$-13.7 r^2 + 4.1 r + 1.0$	$-4.8 r^2 + 1.7 r + 1.0$
91 วัน	$-10.5 r^2 + 3.1 r + 1.0$	$-3.5 r^2 + 1.1 r + 1.0$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอย และซิลิกาฟูม ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าของ $f(r)$ ในงานวิจัย

องค์ประกอบทางเคมี	ถ้ำลอย*	ซิลิกาฟูม**
SiO ₂	34.8%	92-98%
Al ₂ O ₃	18.2%	0.5%
Fe ₂ O ₃	14.2%	2.1%
MgO	3.0%	0.3%
CaO	22.6%	0.8%
Na ₂ O	0.9%	0.1%
K ₂ O	2.2%	1.0%
SO ₃	3.3%	0.2%
LOI	0.2%	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	67.2	-
ASTM Class	C	-

* ข้อมูลจากงานวิจัยของ วิศว [9]

** ข้อมูลจากงานวิจัยของสมภพ [10]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 การจำแนกชั้นความเปิดเผยของคอนกรีตตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม โดย CEB^[46]

Exposure class	Environmental conditions
1. Dry environment	E.g. • interior of buildings used for normal habitation or offices
2. Humid environment (a) Without frost	E.g. • interior of buildings where humidity is high* • exterior components • components in non-aggressive soil and/or water
(b) With frost	E.g. • exterior components exposed to frost • components in non-aggressive soil and/or water and exposed to frost • interior components when the humidity is high and exposed to frost
3. Humid environment with frost and de-icing agents	E.g. • interior and exterior components exposed to frost and de-icing agents
4. Seawater environment (a) Without frost	E.g. • components completely or partially immersed in seawater or in the splash zone • components in saturated salt air (coastal area)
(b) With frost	E.g. • components partially immersed in seawater or in the splash zone and exposed to frost • components in saturated salt air and exposed to frost
5. Aggressive chemical environment† (a) (b) (c)	Slightly aggressive chemical environment (gas, liquid or solid) Aggressive industrial atmosphere Moderately aggressive chemical environment (gas, liquid or solid) Highly aggressive chemical environment (gas, liquid or solid)

* E.g. in commercial laundries.

† Chemically aggressive environments are classified further in clause d.6.6.4. Table d.3. They may occur alone or in combination with exposure classes 1–4.

ตารางที่ 3.8 ข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมเพื่อความทนทานของคอนกรีตจำแนกตามระดับชั้นความเปิดเผยของโครงสร้าง ที่กำหนดโดย CEB⁽⁴⁶⁾

	Exposure class according to Table d.1								
	1	2a	2b	3	4a	4b	5a	5b	5c†
Max. w/c ratio* for									
plain concrete	-	0.70	-	-	-	-	-	-	-
reinforced concrete	0.65	0.60	0.55	0.50	0.55	0.50	0.55	0.50	0.45
prestressed concrete	0.60	0.60	-	-	-	-	-	-	-
Min. cement content* in kg/m ³ for									
plain concrete	150	200	200	-	-	-	200	-	-
reinforced concrete	260	280	280	300	300	300	280	300	300
prestressed concrete	300	300	300	-	-	-	300	-	-
Min. air content of fresh concrete in % for nominal max. aggregate size of:‡									
32 mm	-	-	4§	4§	-	4§	-	-	-
16 mm	-	-	5§	5§	-	5§	-	-	-
8 mm	-	-	6§	6§	-	6§	-	-	-
Frost resistant aggregates	-	-	Yes	Yes	-	Yes	-	-	-
Impermeable concrete according to d.6.6.1	-	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

* Max w/c may be replaced by $(w/c)_f$ and min. cement content may be replaced by $(c + x/f)$ where national standards or regulations allow. Refer to clause d.6.3.3.2.

† In addition, the concrete should be protected against direct contact with the aggressive media, e.g. by coatings.

‡ With a spacing factor of the entrained air void system ≤ 0.20 mm.

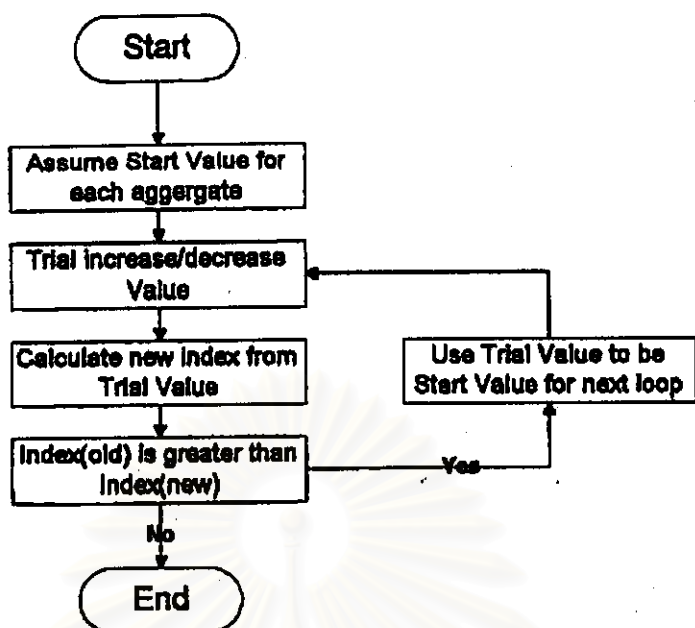
§ In cases where the degree of saturation is high for prolonged periods of time. e.g. for structures in the tidal zone, parts of locks, etc.

ตารางที่ 3.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มของอุณหภูมิในโครงสร้างคอนกรีตหนา

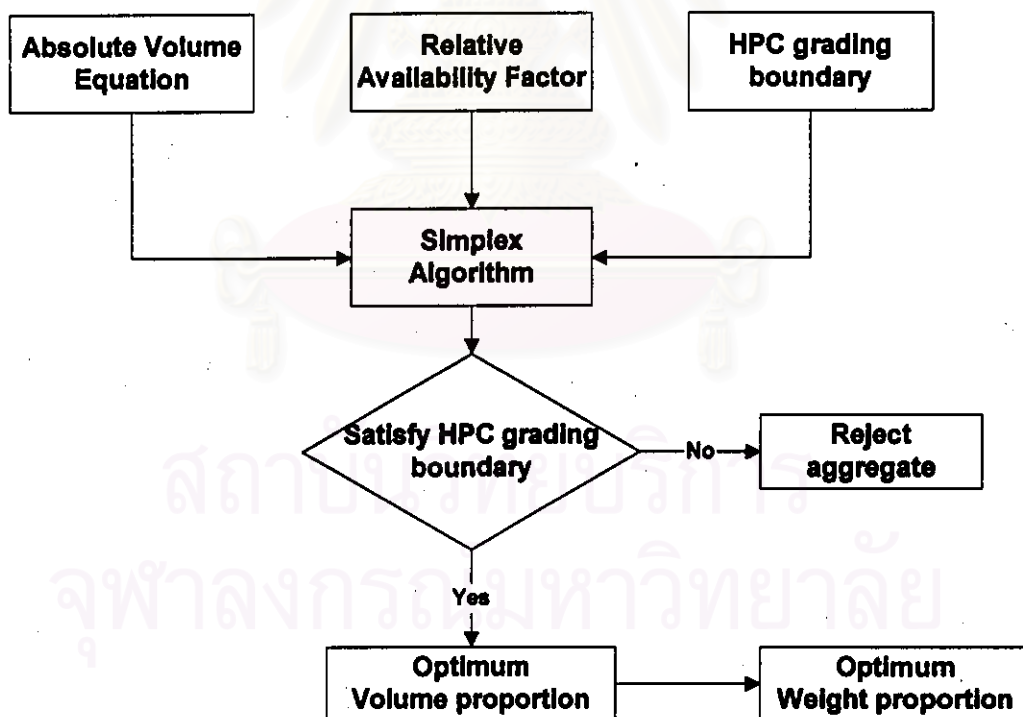
ปัจจัยเนื่องจากคอนกรีต	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าการนำความร้อน (Heat conductivity) ▪ ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ▪ ความหนาแน่น (Density) ▪ ความสามารถดูดซับความร้อนที่มีว (Heat absorpability) ▪ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิแบบกักกันความร้อน (ส่วนผสม)(Adlabatic Temperature Rise)
ปัจจัยเนื่องจากลักษณะโครงสร้าง	<ul style="list-style-type: none"> ▪ มิติของโครงสร้าง ▪ ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด
ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา	<ul style="list-style-type: none"> ▪ อุณหภูมิแวดล้อม ▪ ความชื้นสัมพัทธ์ ▪ ความดันบรรยากาศ ▪ ความเร็วลม ▪ ปริมาณแสงแดด และช่วงเวลาถูกแสงแดด
ปัจจัยเนื่องจากการก่อสร้าง	<ul style="list-style-type: none"> ▪ อัตราการเทคอนกรีตขององค์อาคาร ▪ การฝังท่อระบายความร้อน ▪ อุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีต

ตารางที่ 3.10 โปรแกรมย่อย และรายละเอียดหน้าที่การทำงาน

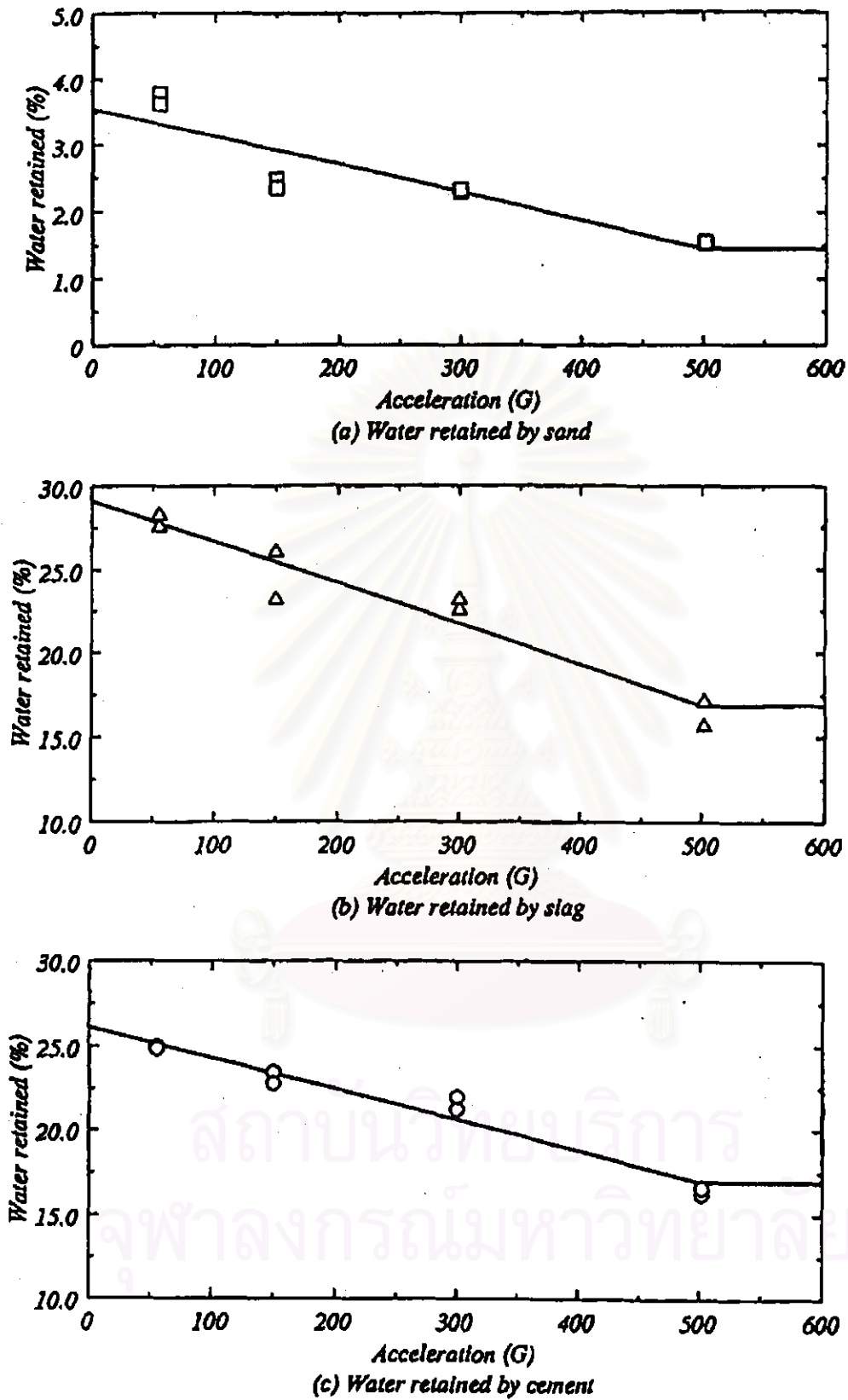
โปรแกรมย่อย	หน้าที่
ส่วนคำนวณ (Calculation Part)	
Blender	คำนวณส่วนผสมของมวลรวมที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงด้วยวิธีการ Least square หรือ วิธีการ Simplex (หัวข้อที่ 3.2.1)
MaxCM	คำนวณปริมาณซีเมนต์สูงสุดที่ยอมให้ตามข้อกำหนดความทนทานของคอนกรีต และตามแบบจำลองเพื่อควบคุมอุณหภูมิเพิ่ม (หัวข้อที่ 3.2.5)
CaWC	คำนวณสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประสิทธิภาพที่สอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ โดย Maturity Concept และ Effective Cement Concept (หัวข้อที่ 3.2.4)
AggSSCal	คำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมจากข้อมูลการกระจายขนาดคละ และประเภทของมวลรวม
SlumpCal	คำนวณค่ายุบตัวของคอนกรีตโดย Free Water Concept (หัวข้อที่ 3.2.2)
CalcSuper	คำนวณปริมาณน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงการไหลของคอนกรีต
AdjustBatch	ปรับแก้ส่วนผสมตามสภาพความชื้นของมวลรวม โดยคำนวณน้ำหนักเปียก และปรับแก้ปริมาณน้ำในส่วนผสม
CalBatch	คำนวณส่วนผสมตามปริมาตรตวงที่กำหนด
ส่วนแสดงผล (Output Part)	
DrawCurve	แสดงเส้นโค้งการคละของมวลรวมแต่ละประเภท รวมทั้งขนาดคละรวมและขอบเขตตามข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง
DisplayMix	แสดงผลลัพธ์การคำนวณในตารางกริด
DisplayChart	แสดงกราฟฟีก ได้แก่กราฟการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ กราฟอุณหภูมิเพิ่ม



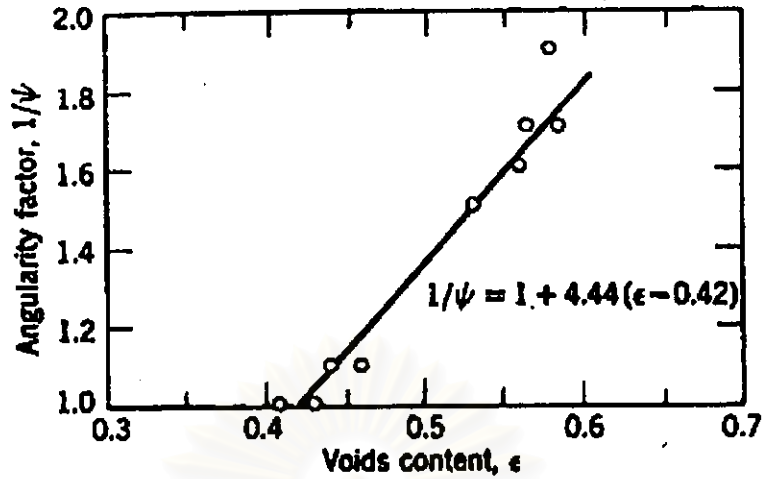
รูปที่ 3.1 (ก) ลำดับการหาค่าสัดส่วนคละของมวลรวมโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด



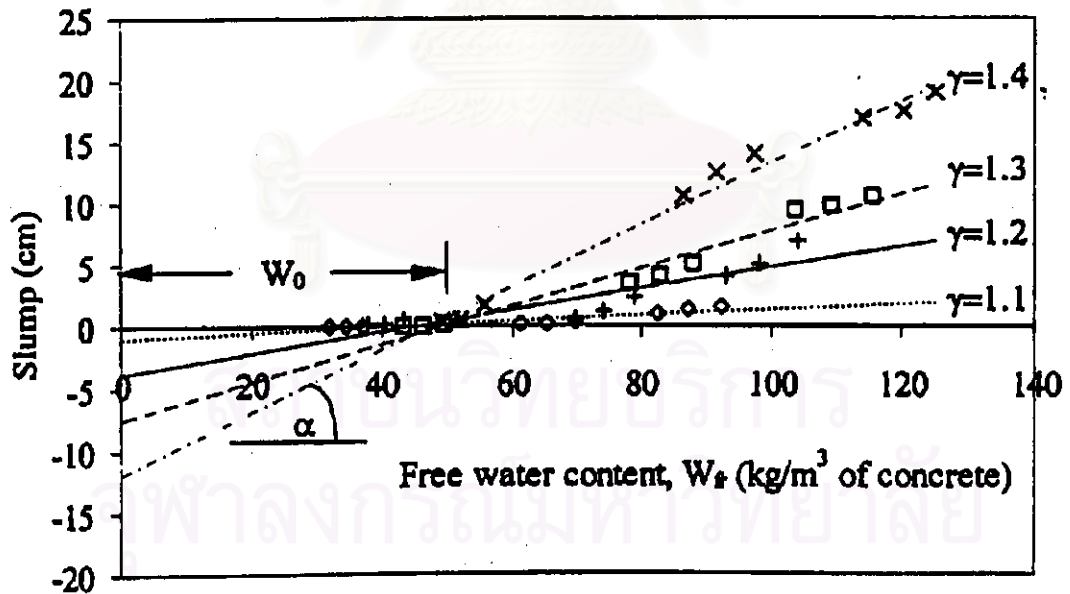
รูปที่ 3.1 (ข) ขั้นตอนการคำนวณสัดส่วนผสมของมวลรวมโดยวิธีซิมเพล็กซ์



รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของของ หวาย, แคลก และ ซีเมนต์ โดยวิธีเซนตริฟิวก⁽³⁷⁾



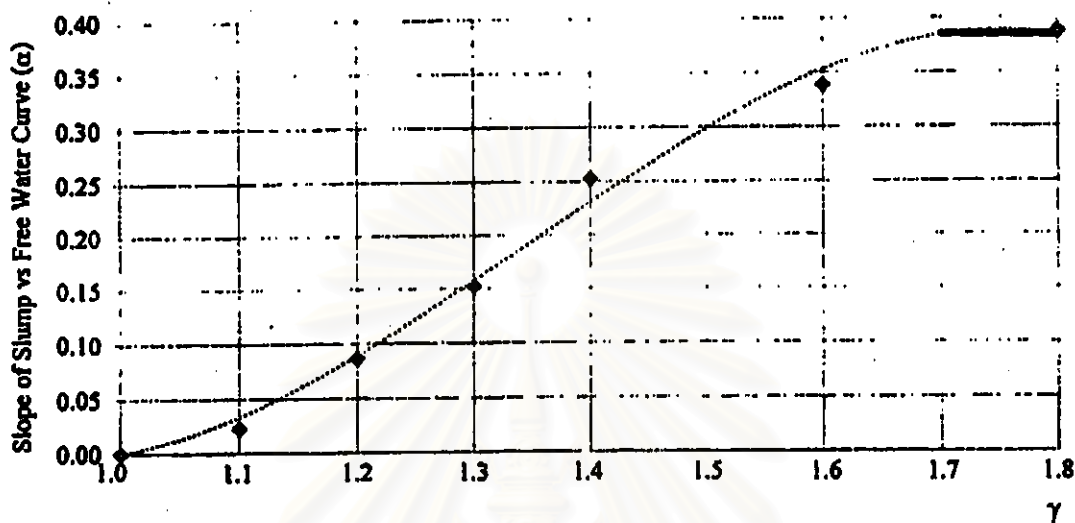
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุม และช่องว่างของมวลรวม^[39]



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของน้ำอิสระ และค่าการยุบตัวของคอนกรีตในสภาวะเหลว^[38]

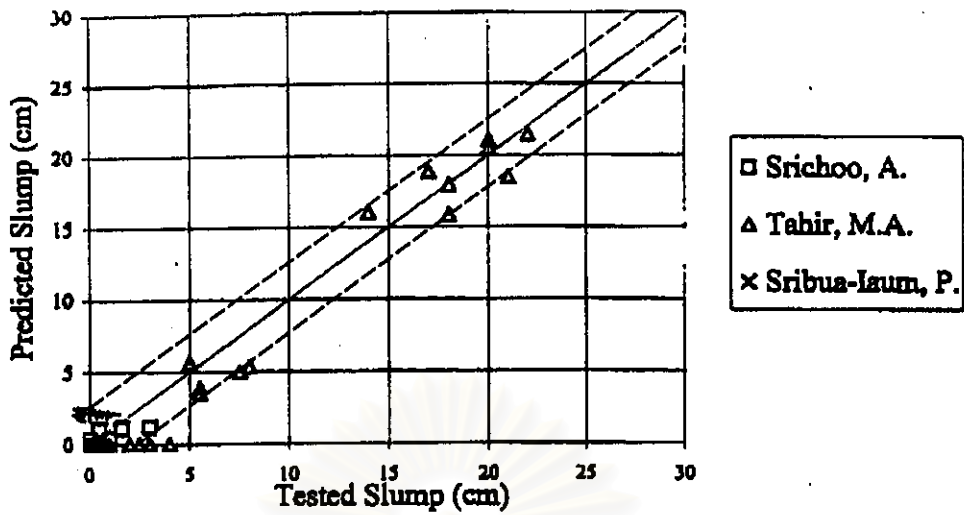
γ คือ อัตราส่วนของปริมาตรของเฟสต่อช่องว่างของมวลรวม

γ	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.8
Slope of Slump-Free Water Curve (α)	0.0000	0.0232	0.0868	0.1524	0.2526	0.3385	0.3879

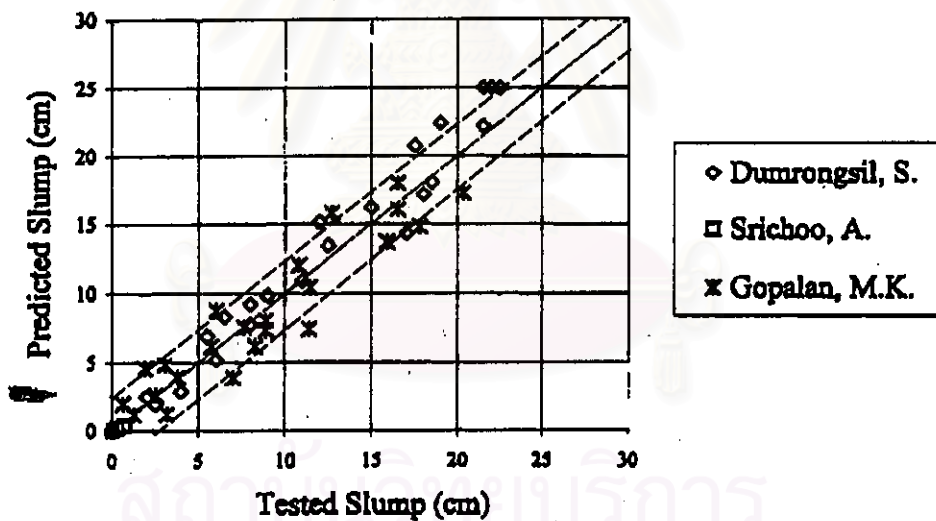


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของความชันของค่าการยุบตัวต่อปริมาณน้ำอิสระ กับอัตราส่วนของปริมาตรของเฟสต่อช่องว่างของมวลรวม⁽⁴⁰⁾

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)

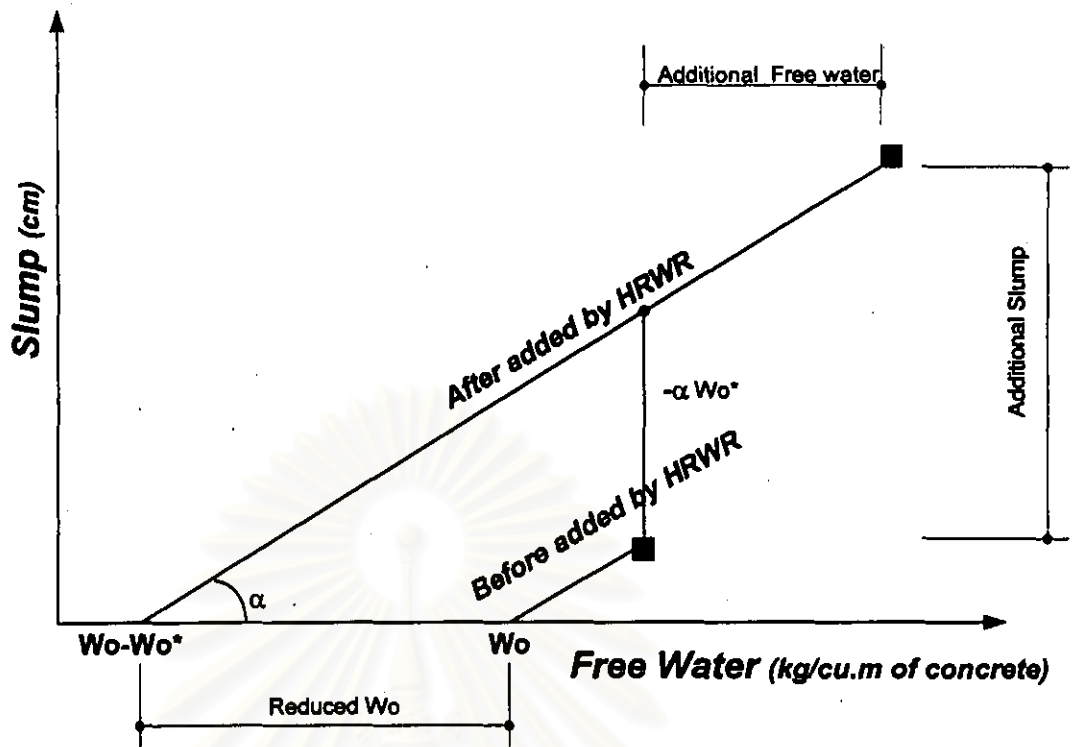


(b)

รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบ^[38]

a) คอนกรีตมีส่วนผสมของเถ้าลอย

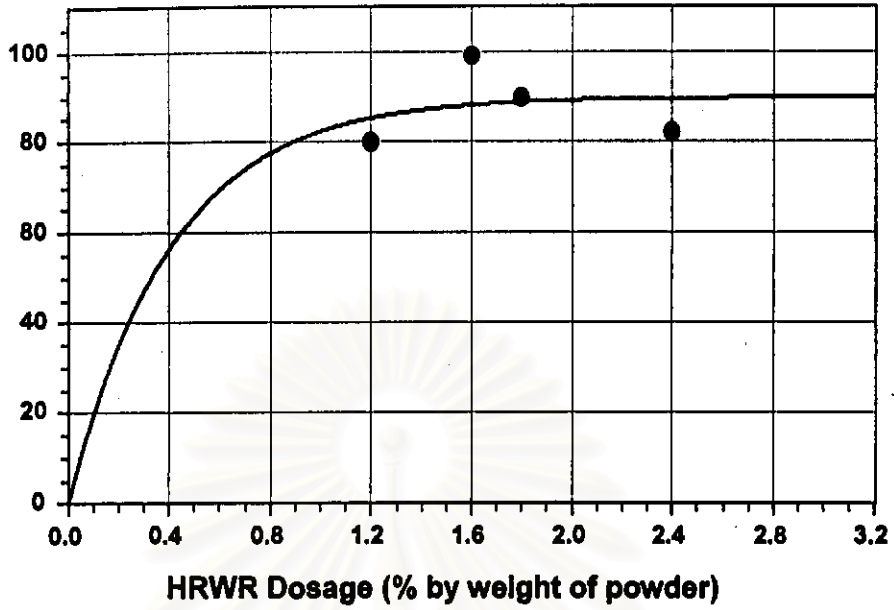
b) คอนกรีตมีส่วนผสมของวัสดุผงอื่น ๆ
(เถ้าลอย, เถ้าแกลบ, พูมิไซด์, ดินขาว)



รูปที่ 3.7 แบบจำลองกลไกการเพิ่มค่าการยุบตัวของคอนกรีตในสภาวะเหลวจากผลของสารลดน้ำพิเศษ

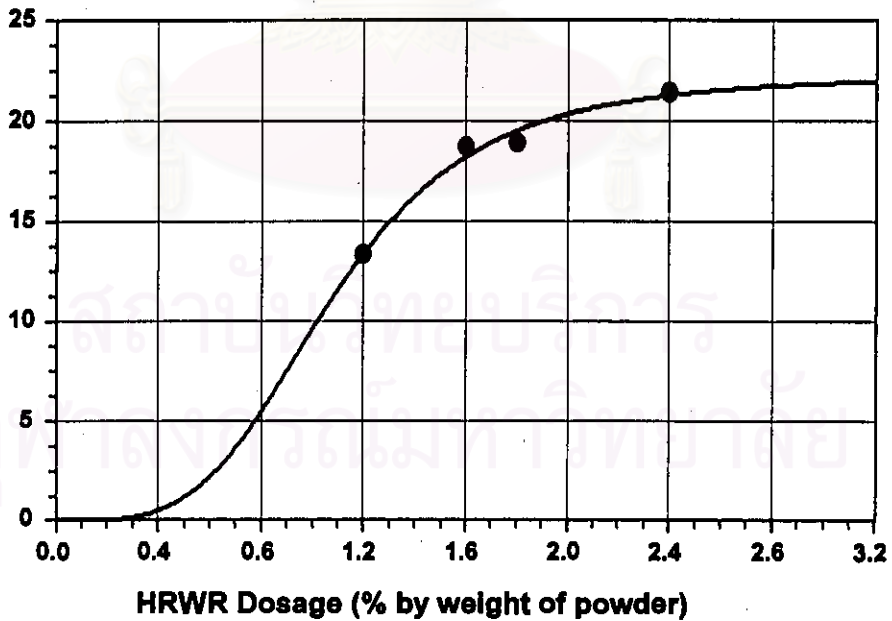
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Additional Free Water (kg/cu.m)

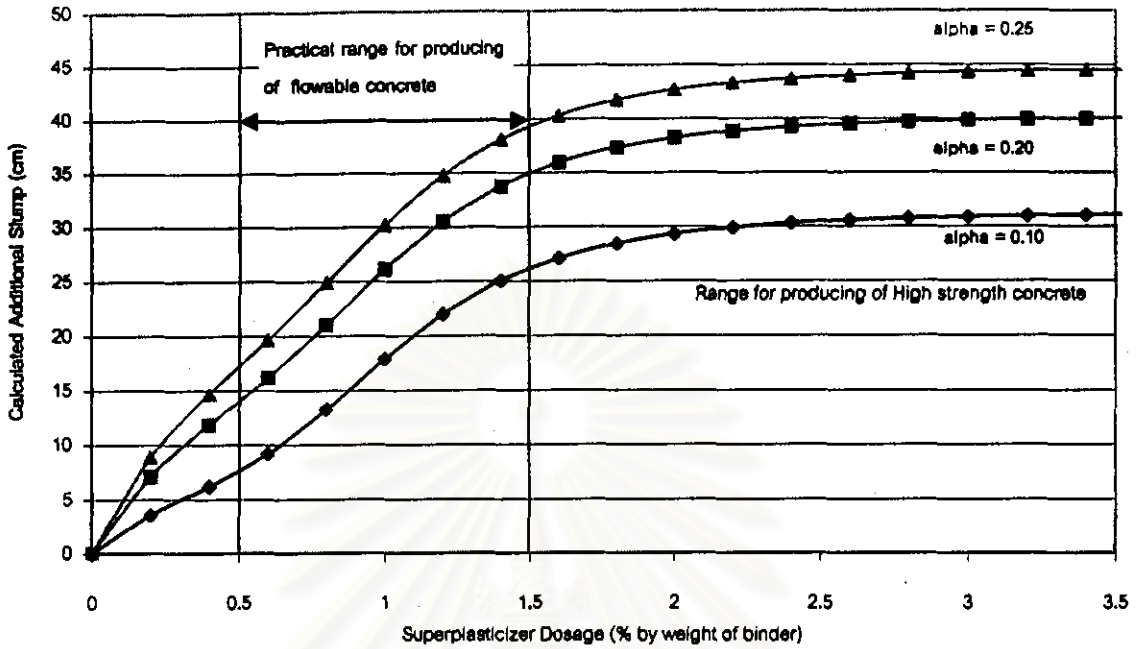


รูปที่ 3.8 ก. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำอิสระเพิ่มเติมกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

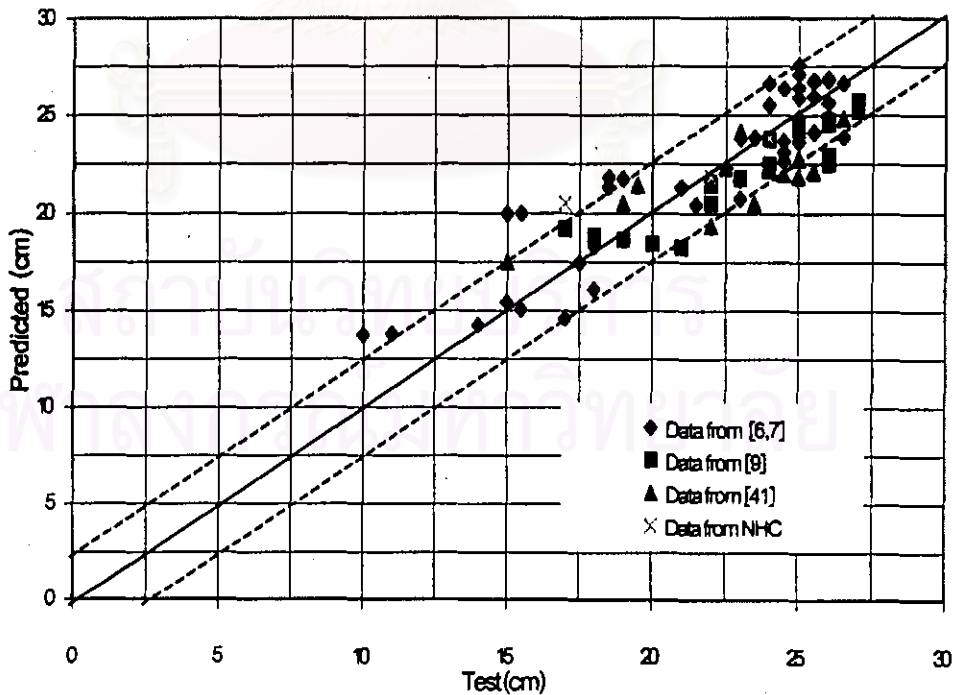
Additional Slump (cm)



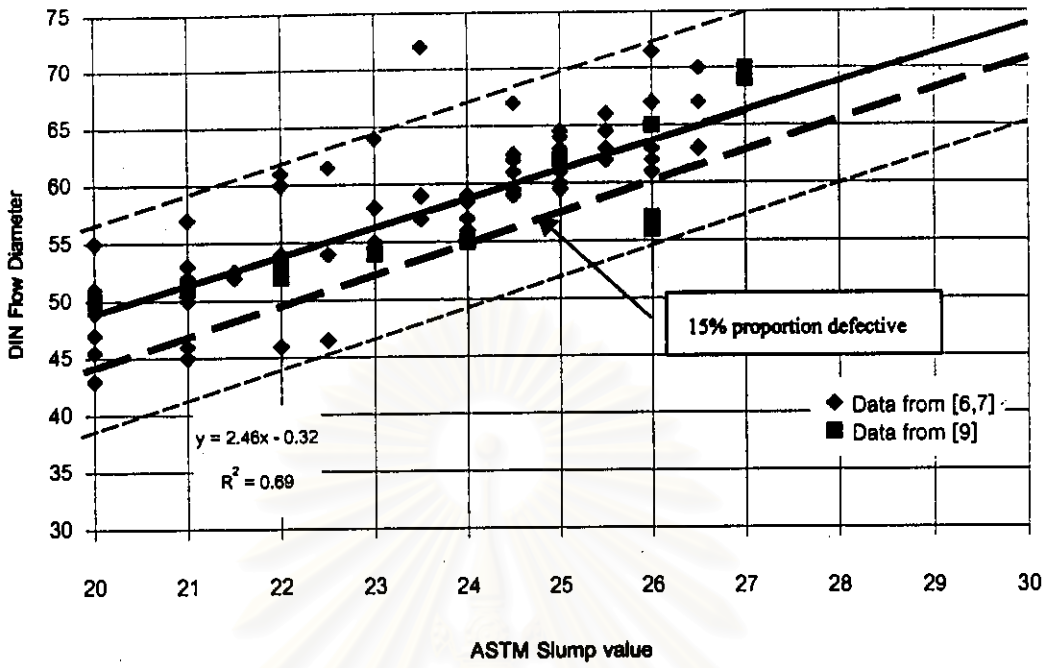
รูปที่ 3.8 ข. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของน้ำที่ต้องเอาชนะแรงเสียดทานที่ลดลง กับปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ



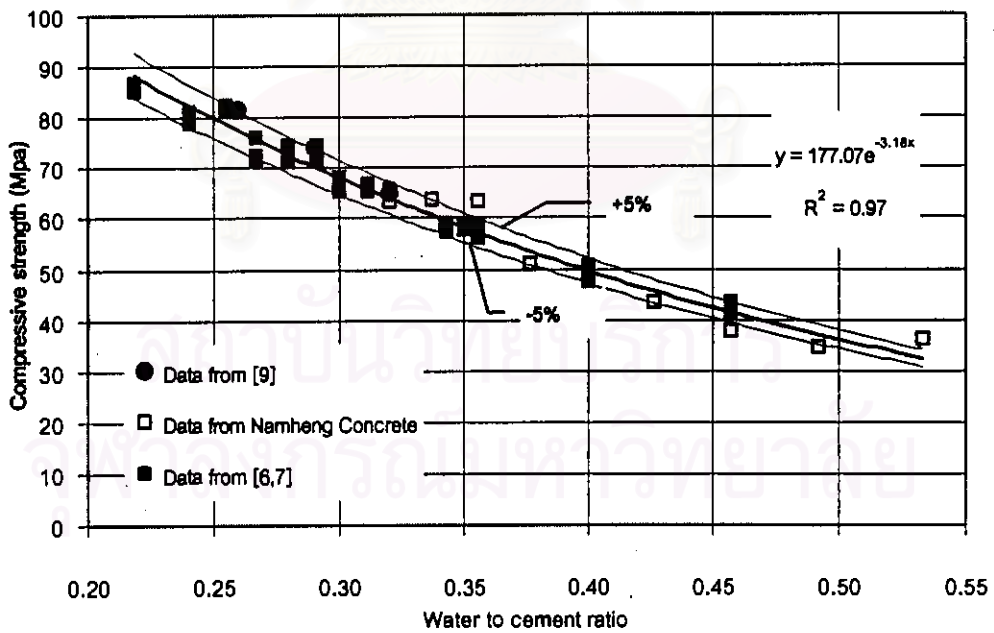
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของค่าการยุบตัวเพิ่มเติมกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษ จากการคำนวณโดยสมการที่ (3.22)



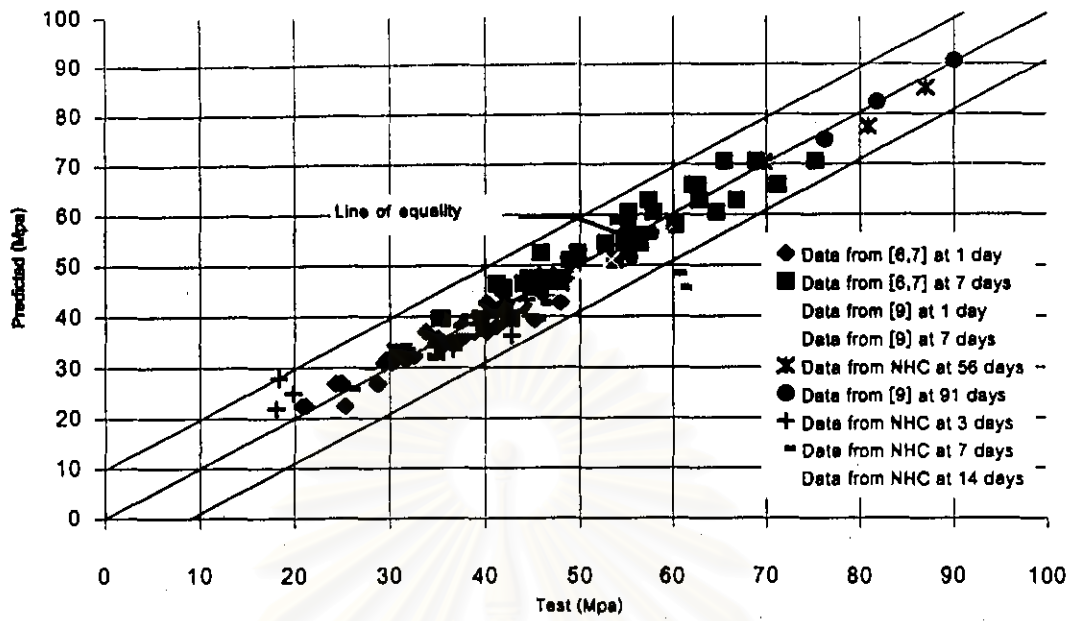
รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบค่าการยุบตัวจากการคำนวณและการทดสอบ



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัว และการไหลตัวของคอนกรีต

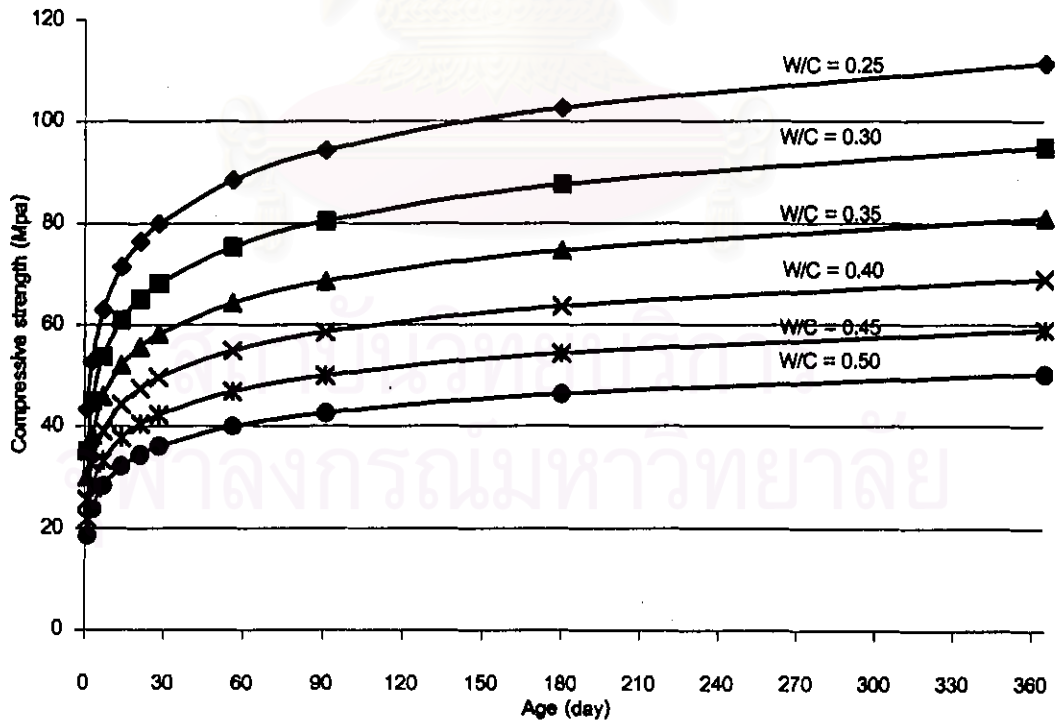


รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

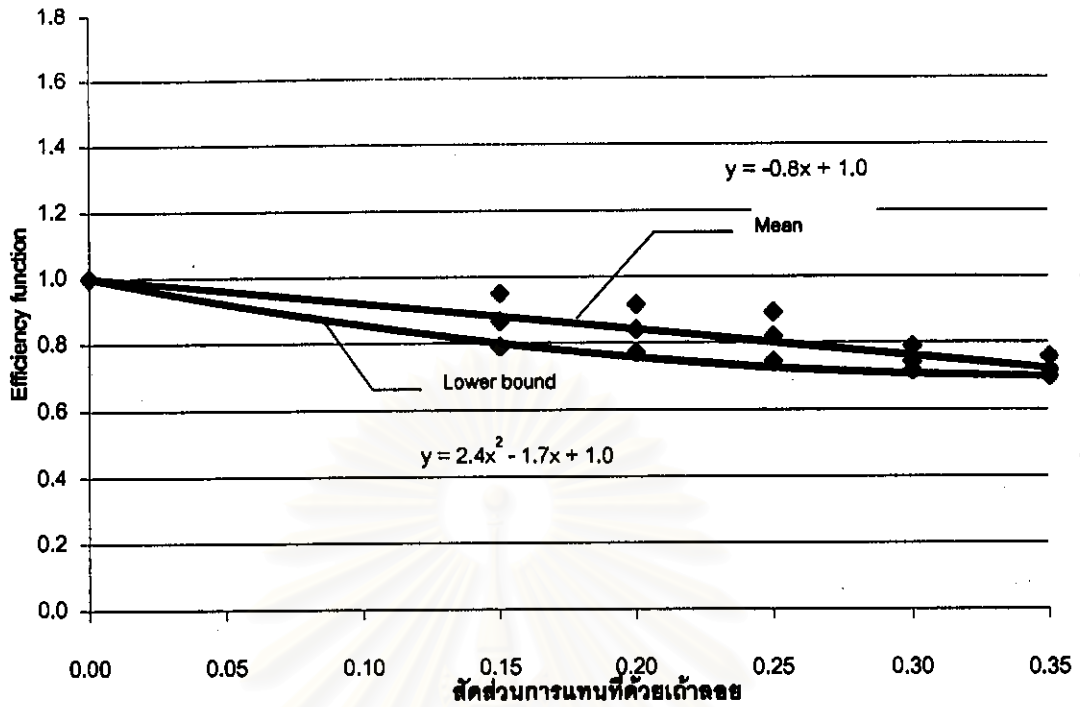


*NHC - Data from NamHeng Concrete (1992) Co.,Ltd. Laboratory Testing Mix (with Permission)

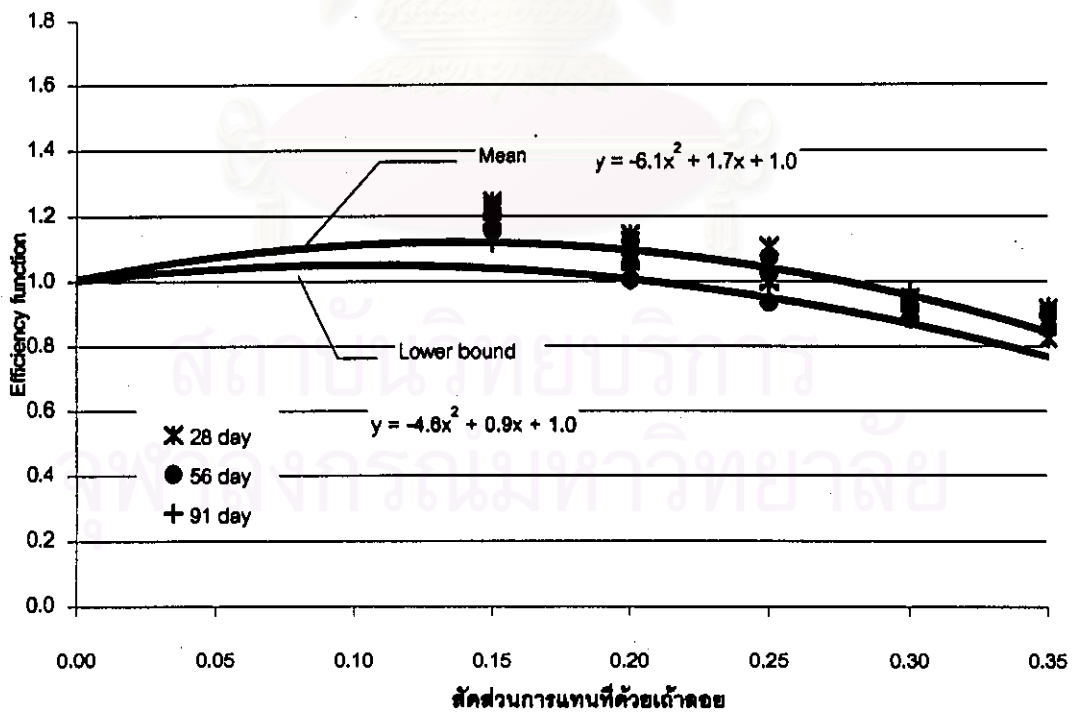
รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดจากสมการที่ (3.33) และผลการทดสอบ



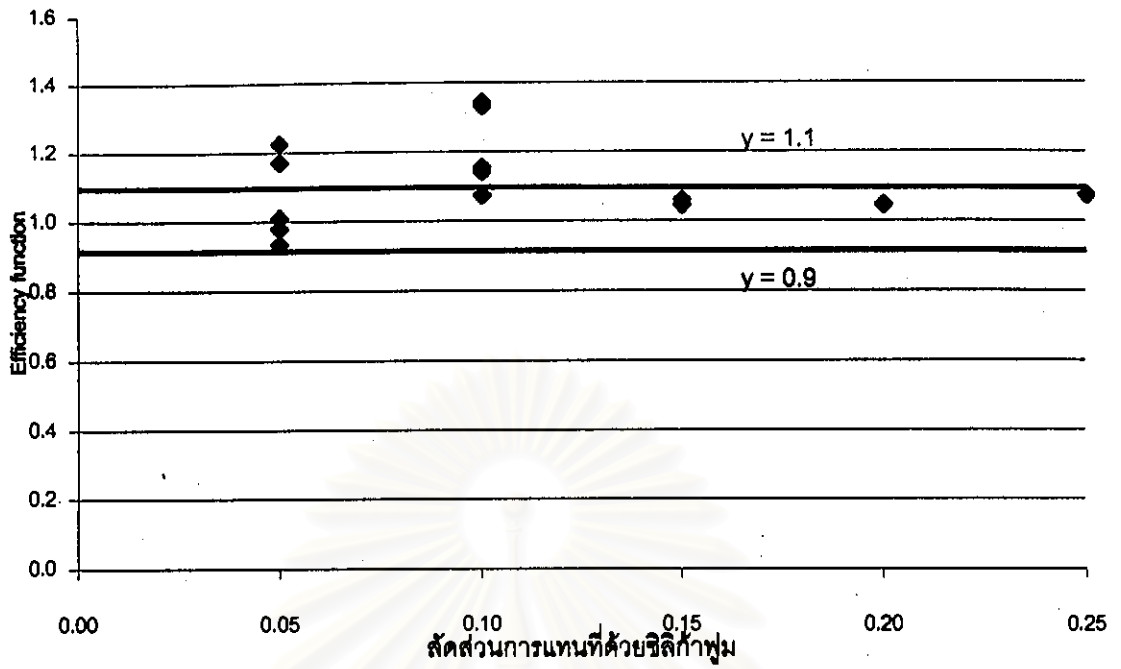
รูปที่ 3.14 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ คำนวณจากสมการที่ (3.33)



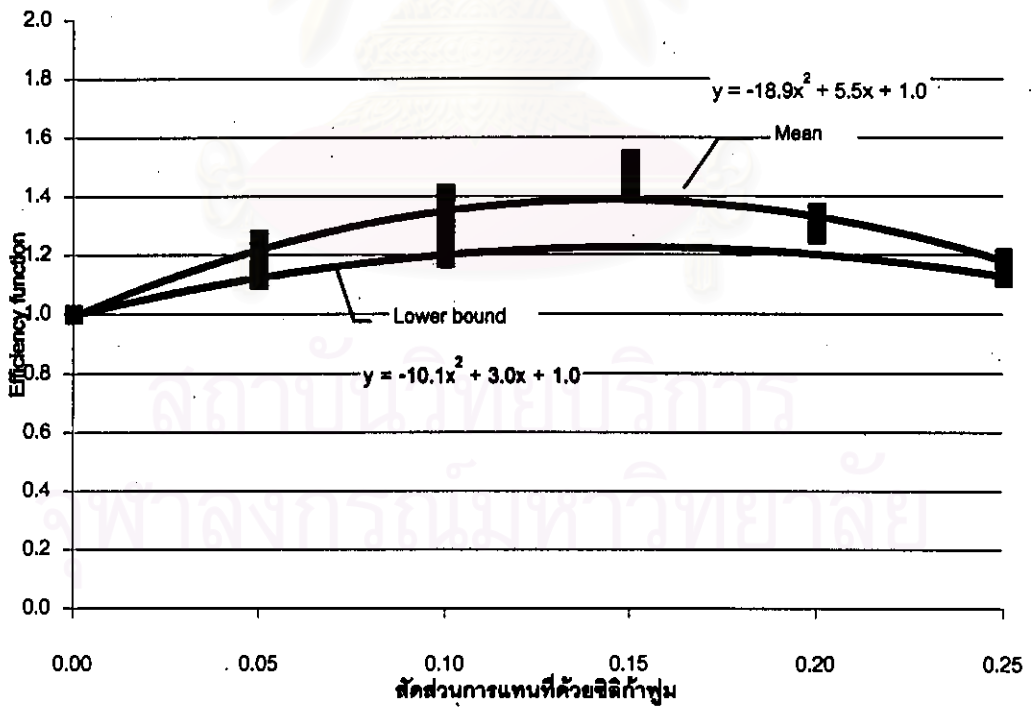
รูปที่ 3.15 (ก) ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของเถ้าลอย ที่อายุ 1 วัน



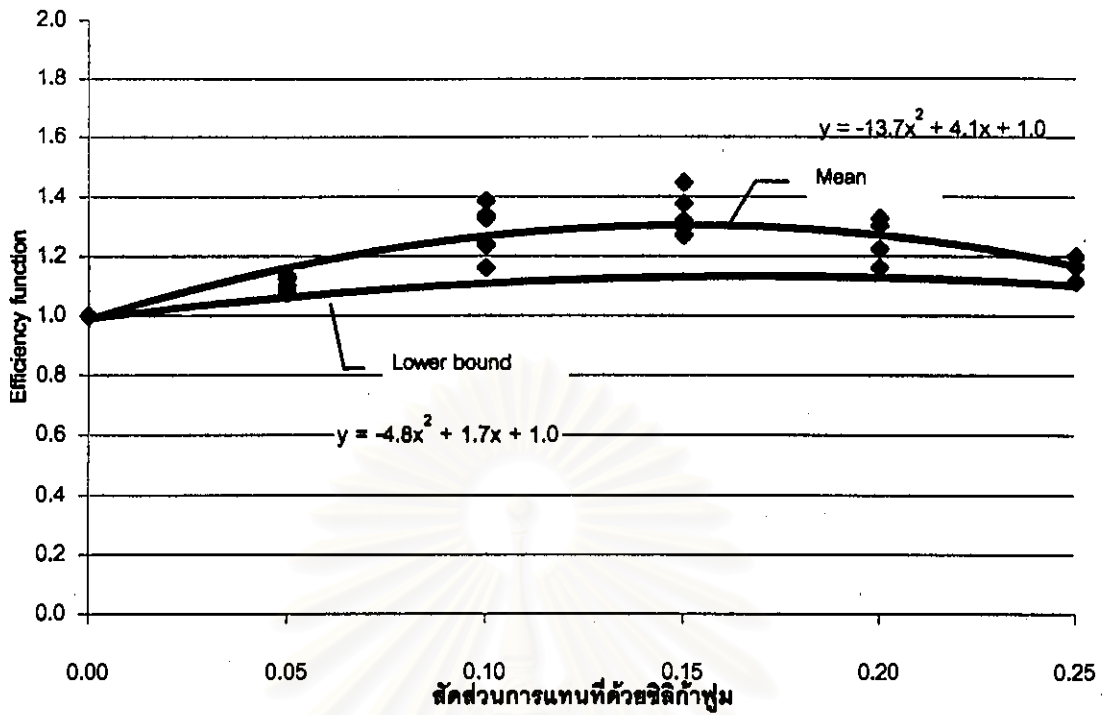
รูปที่ 3.15 (ข) ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของเถ้าลอย ที่อายุ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน



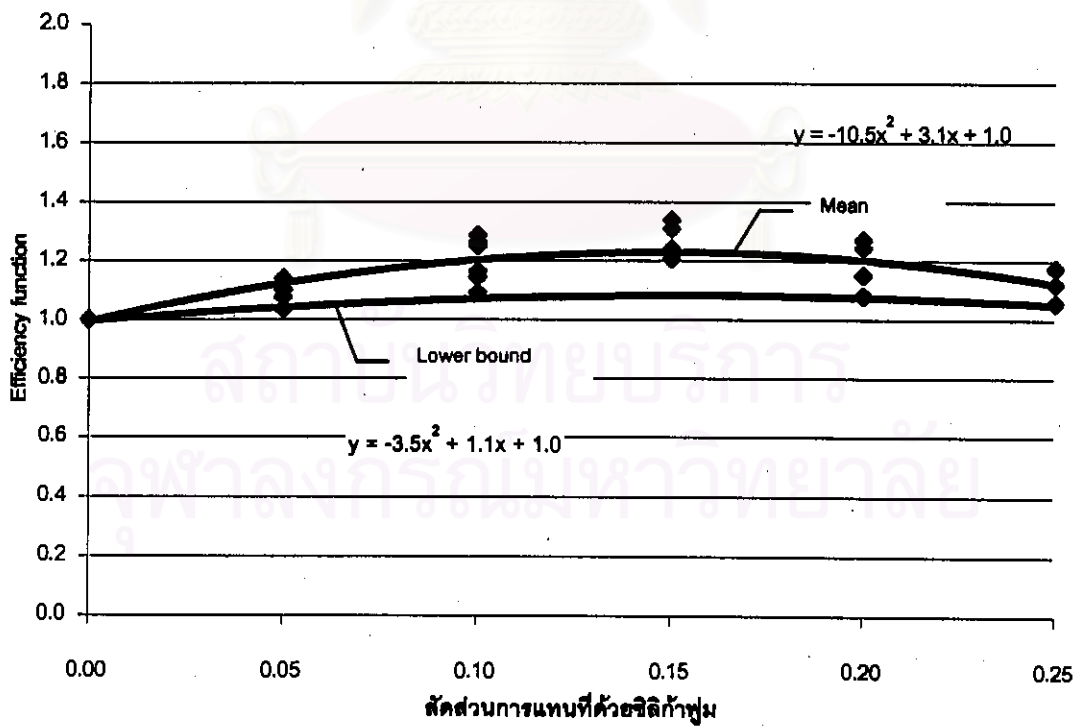
รูปที่ 3.16 (ก) ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของซิลิกาฟุ้ง ที่อายุ 1 วัน



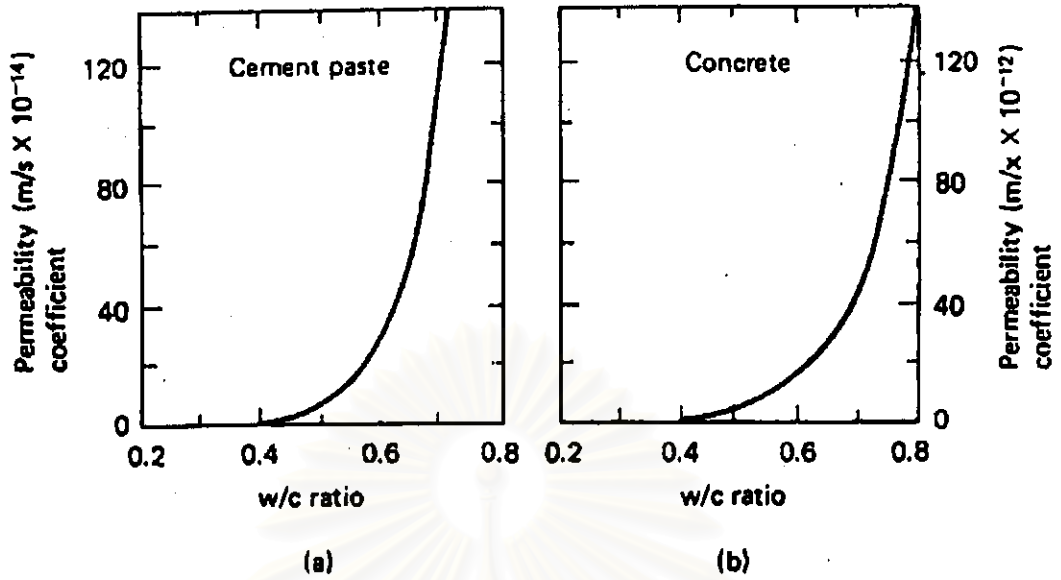
รูปที่ 3.16 (ข) ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของซิลิกาฟุ้ง ที่อายุ 28 วัน



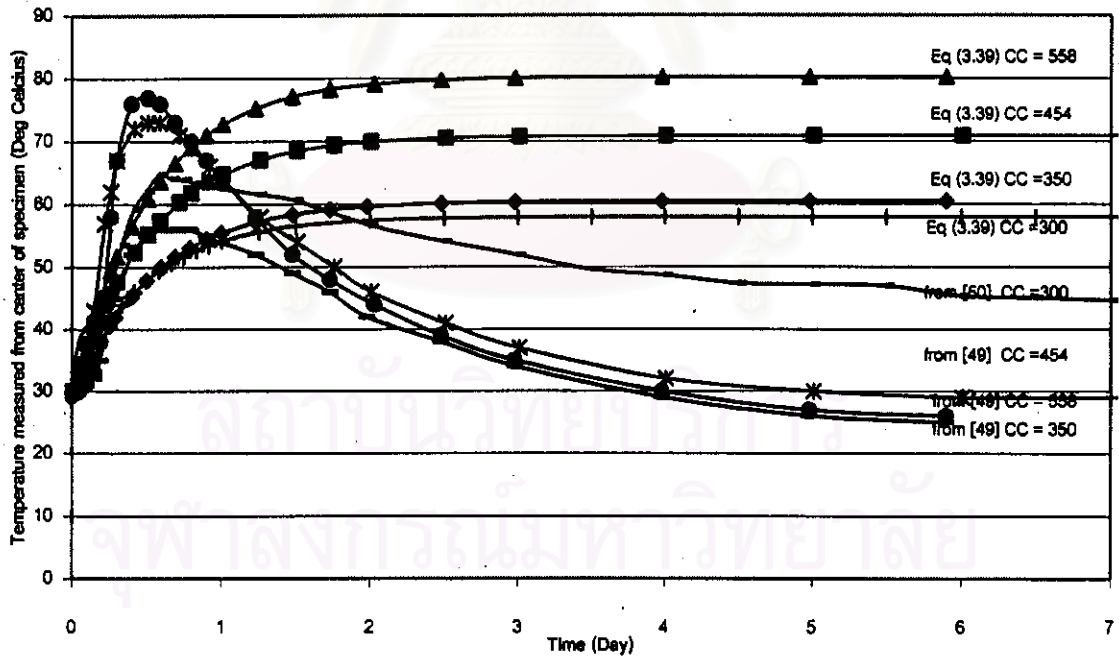
รูปที่ 3.16 (ค) ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของซิลิกาฟูม
ที่อายุ 56 วัน



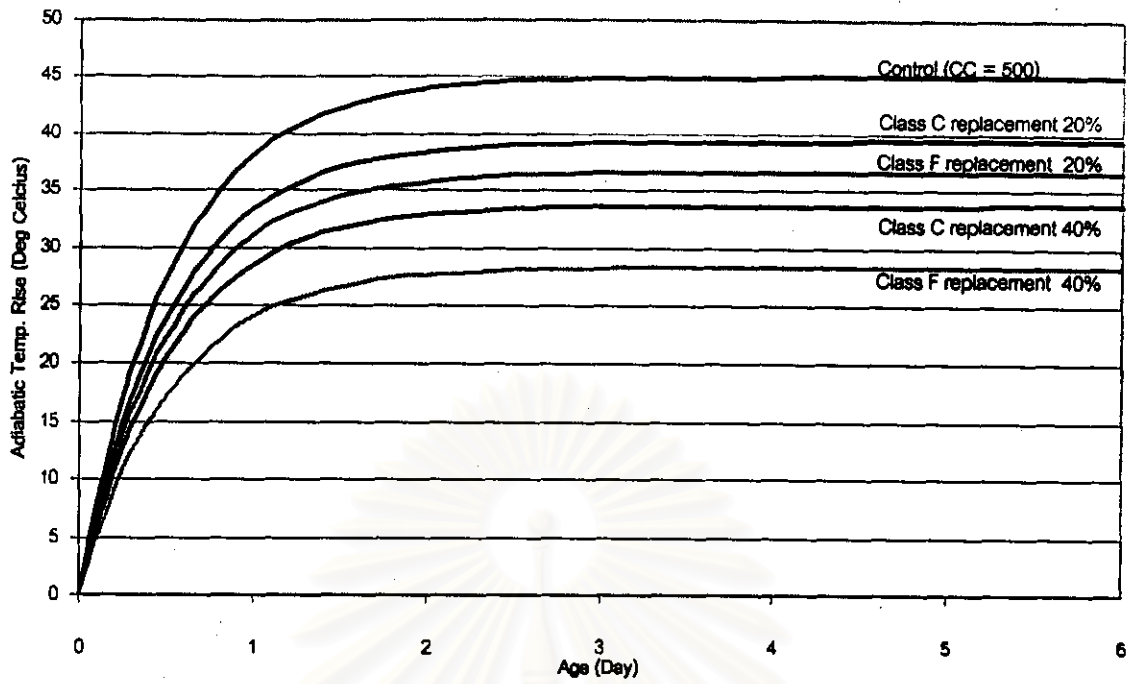
รูปที่ 3.16 (ง) ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของซิลิกาฟูม
ที่อายุ 91 วัน



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ต่อความสามารถซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต

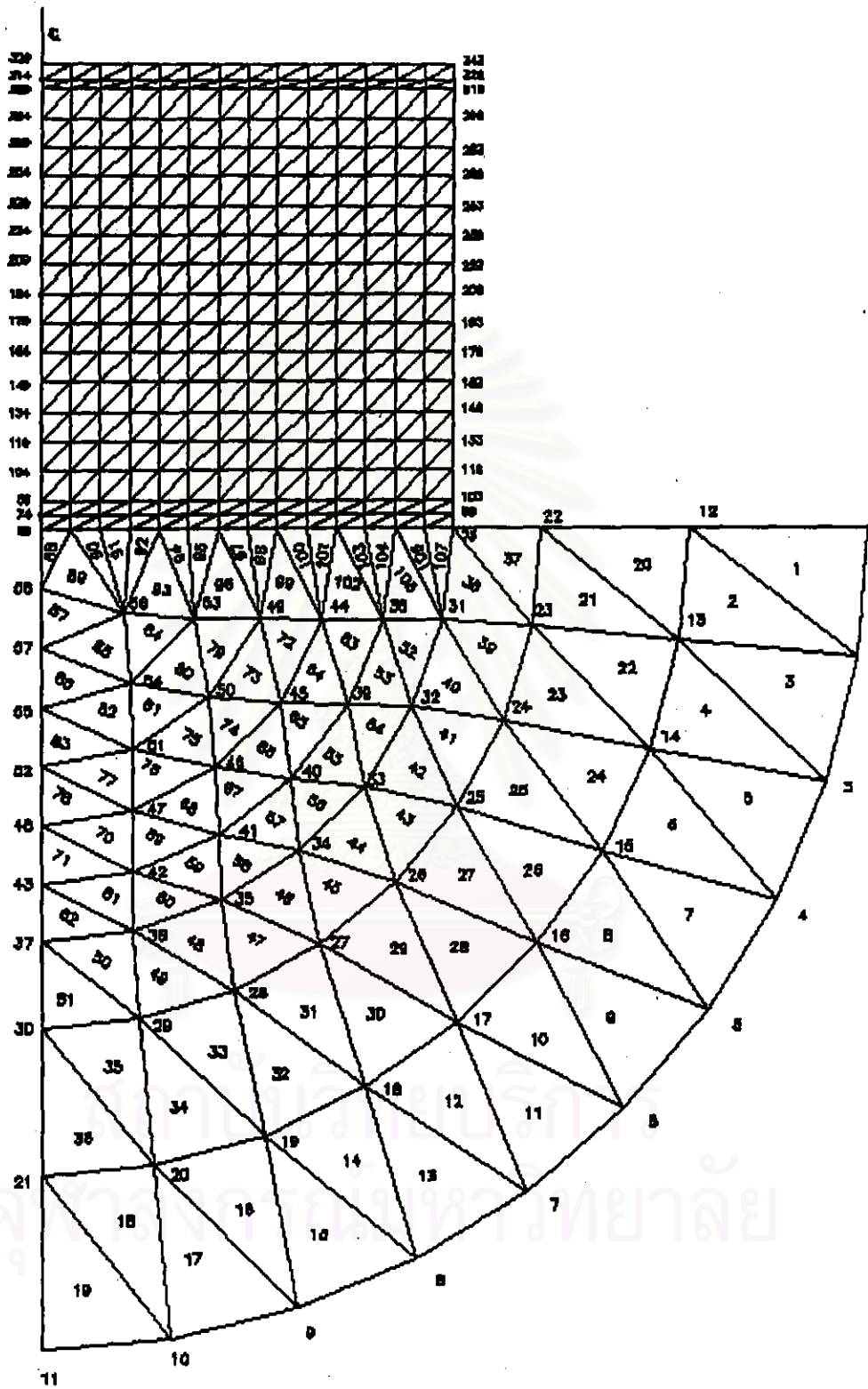


รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบค่าจากสมการที่ (3.39) กับผลการทดลองแบบกึ่งกักกันความร้อน

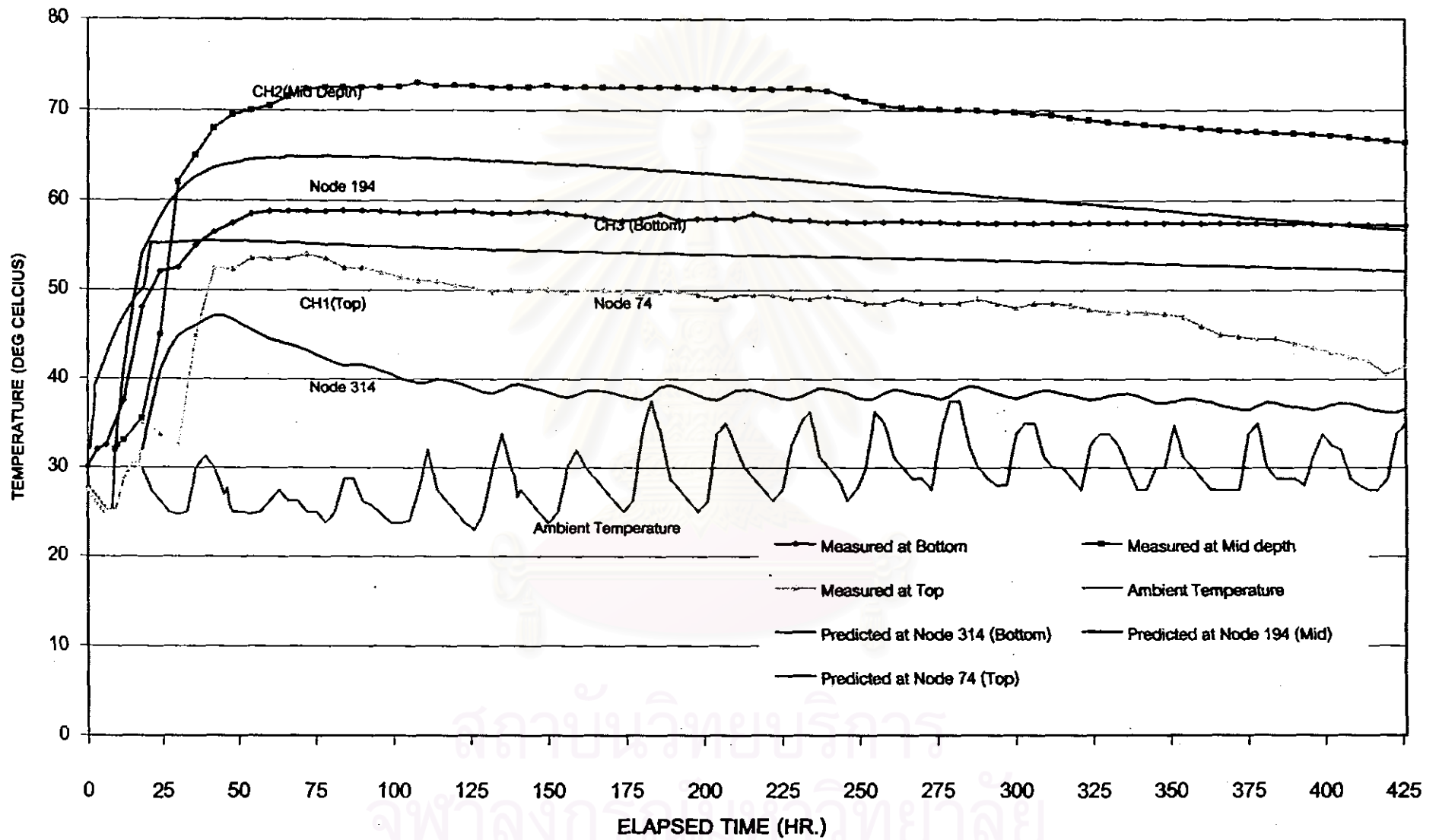


รูปที่ 3.19 อุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนของซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยชนิด F และ C
(สมการที่ 3.47)

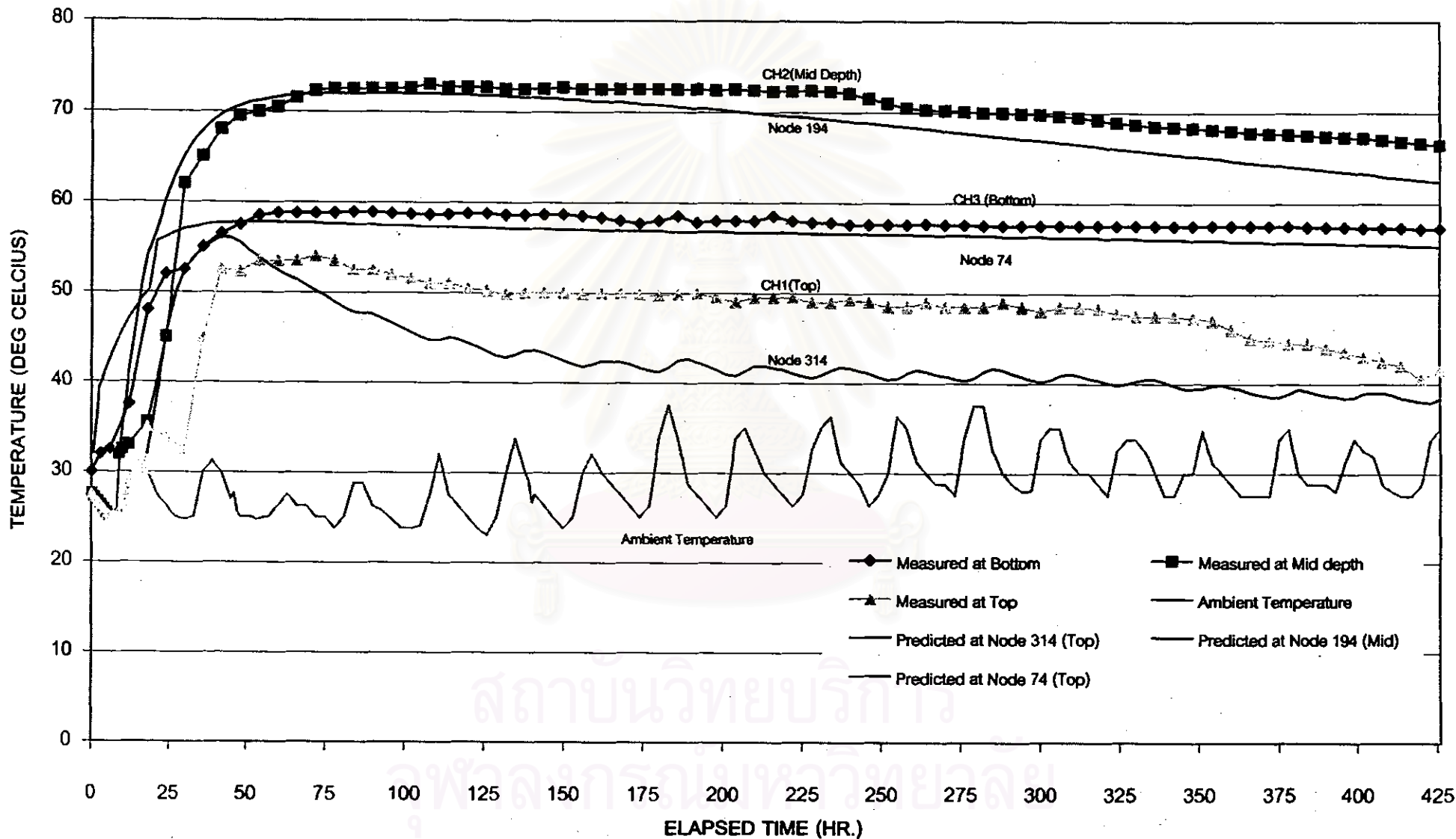
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



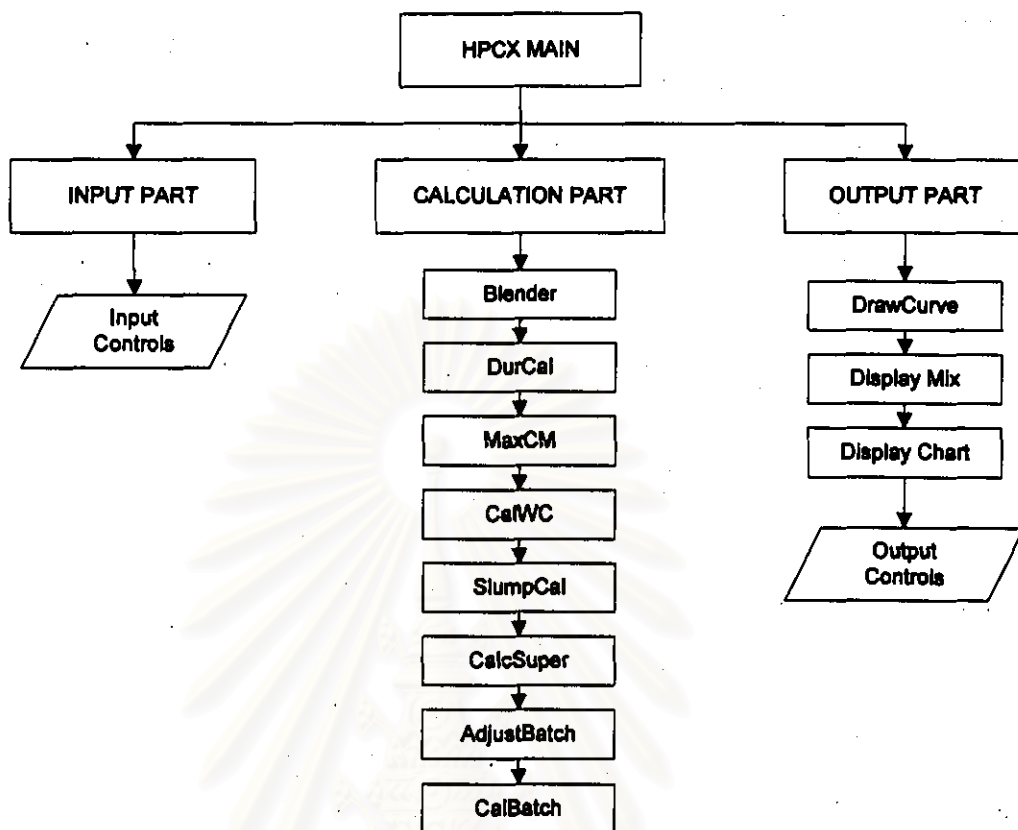
รูปที่ 3.20 ก. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โครงสร้างที่ใช้วิเคราะห์



รูปที่ 3.20 ข. เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ในกรณี $\alpha = 1.00$ กับค่าที่ได้จากการตรวจวัด

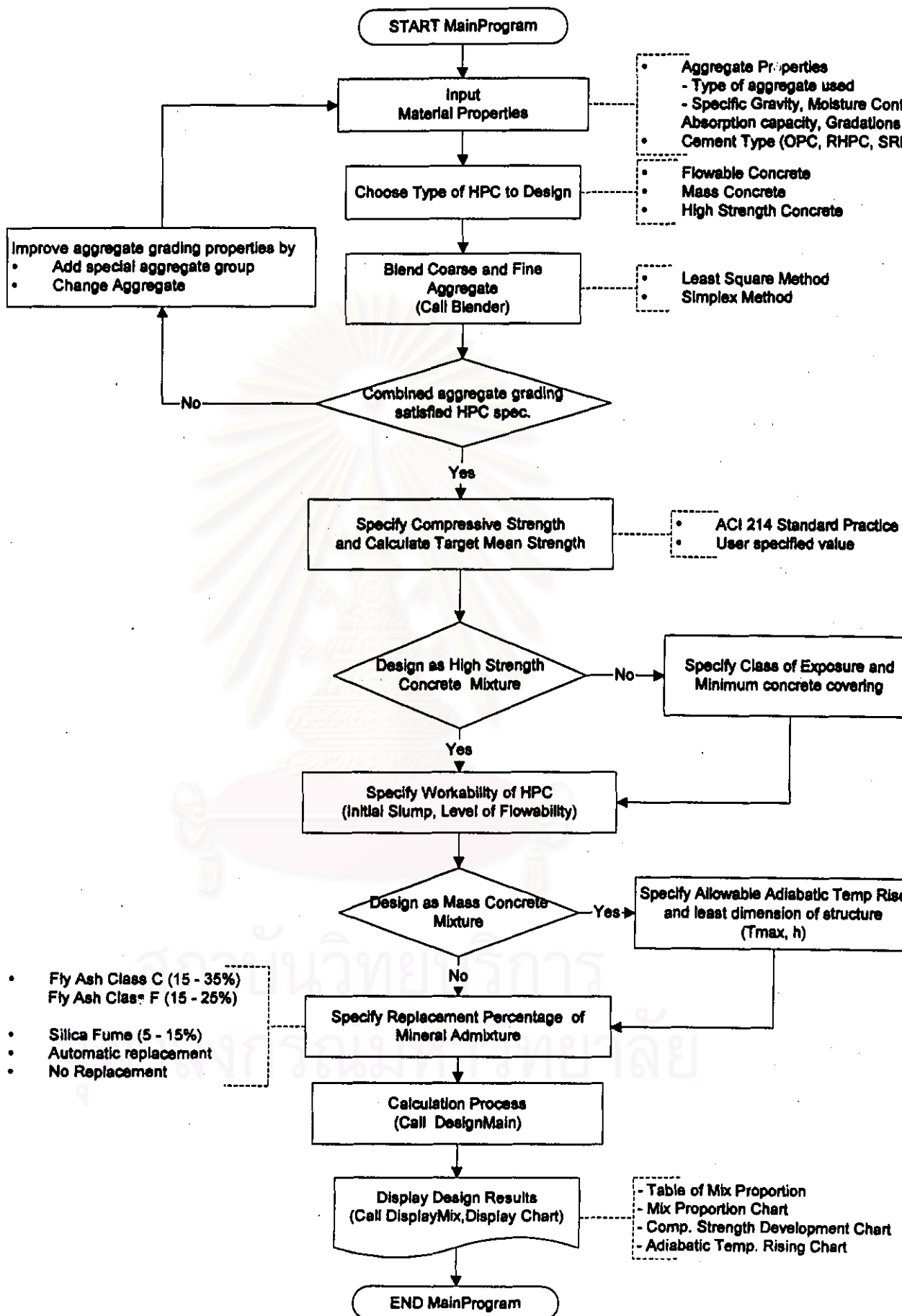


รูปที่ 3.20 ค. เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ในกรณี $\alpha = 1.69$ กับค่าที่ได้จากการตรวจวัด

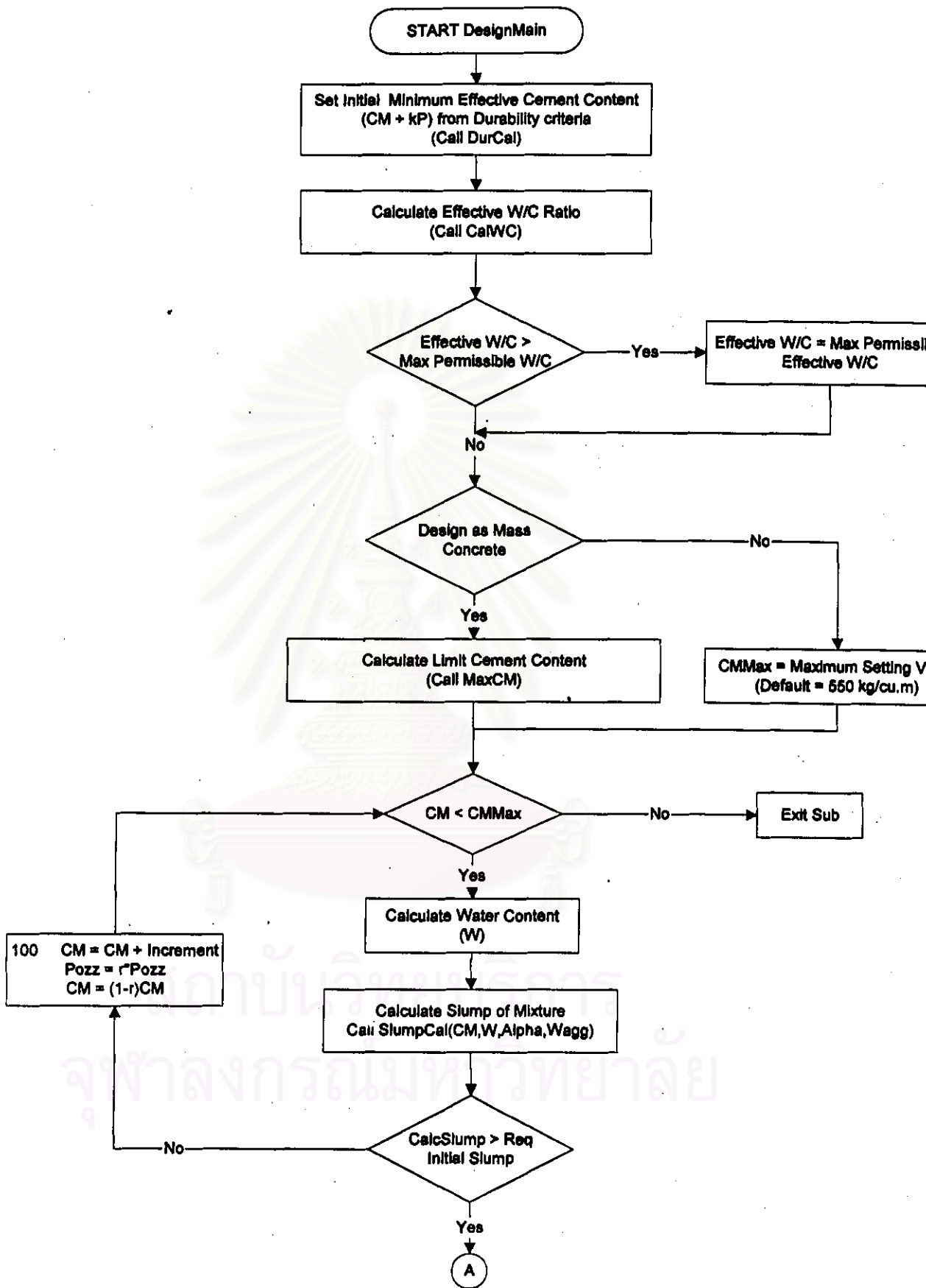


รูปที่ 3.21 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม

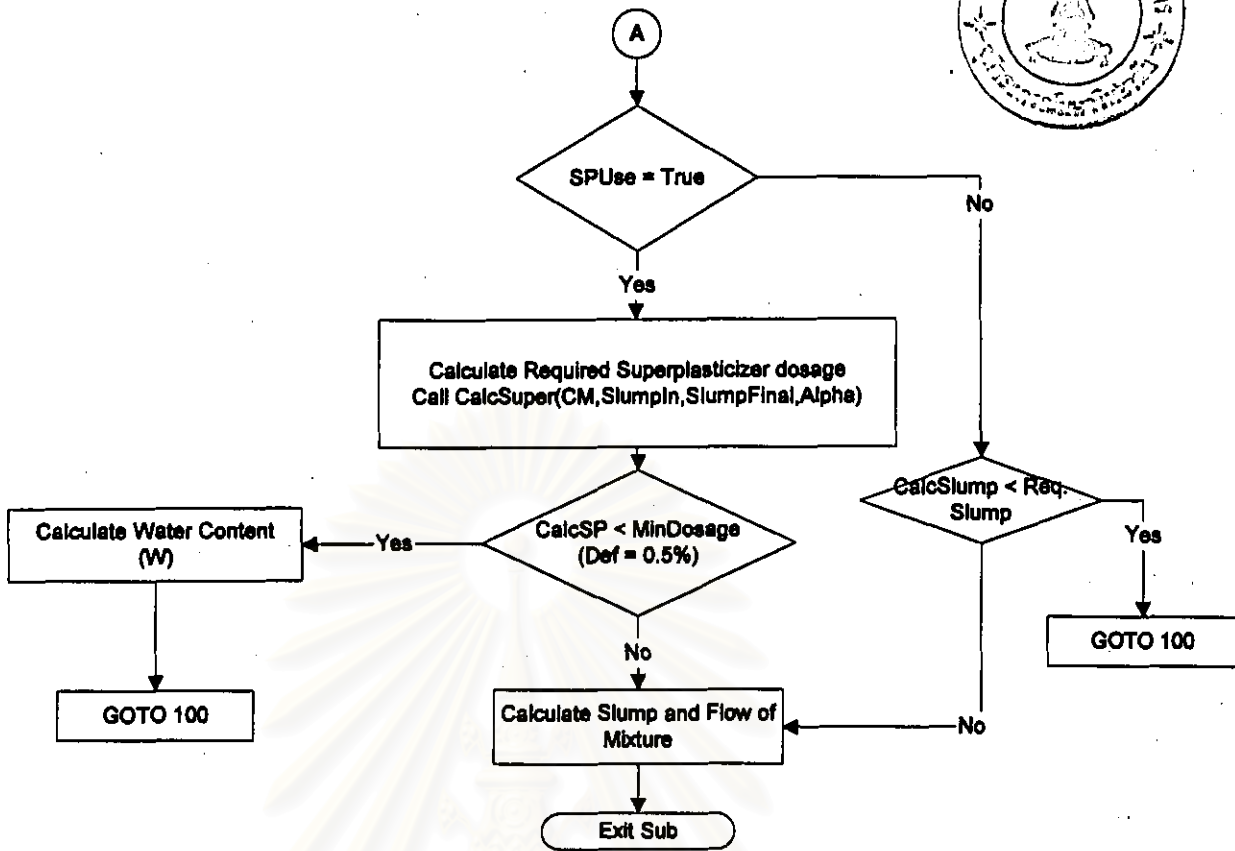
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



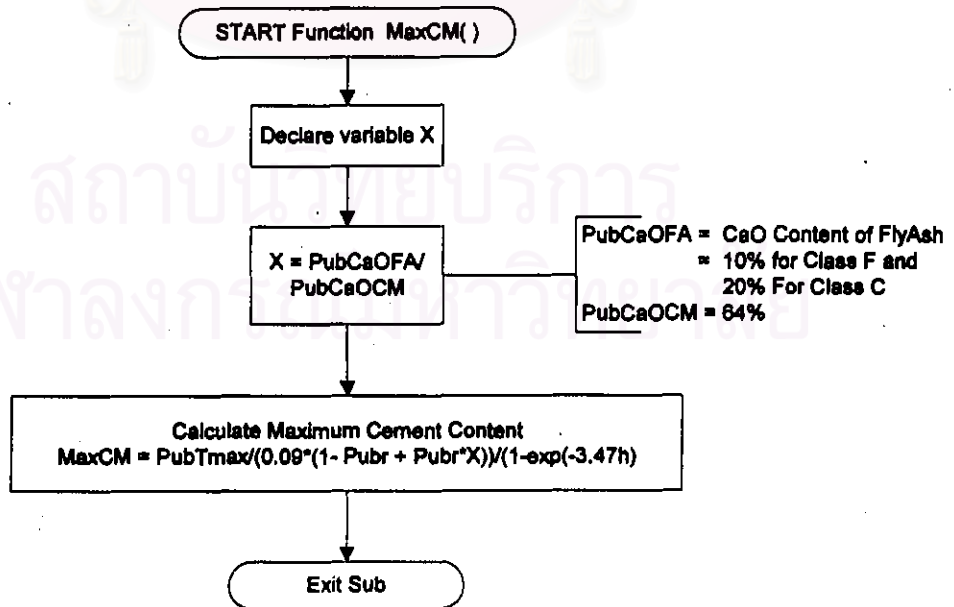
รูปที่ 3.22 ลำดับการทำงานของโปรแกรมสำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัย



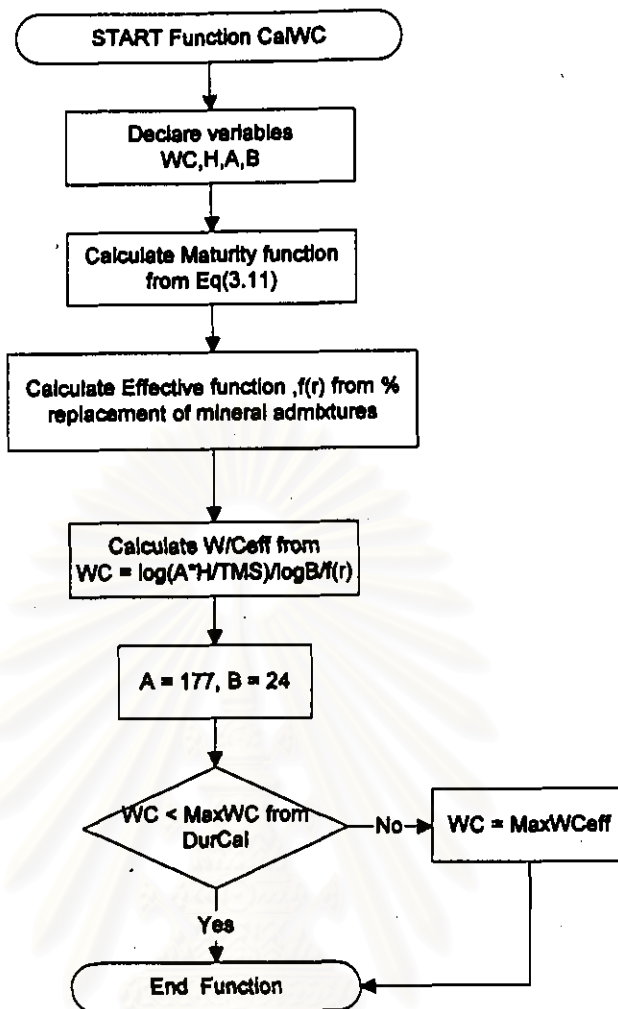
รูปที่ 3.23 ลำดับการทำงานของโปรแกรมการคำนวณหลัก



รูปที่ 3.23 (ต่อ) ลำดับการทำงานของโปรแกรมการคำนวณหลัก (ต่อ)

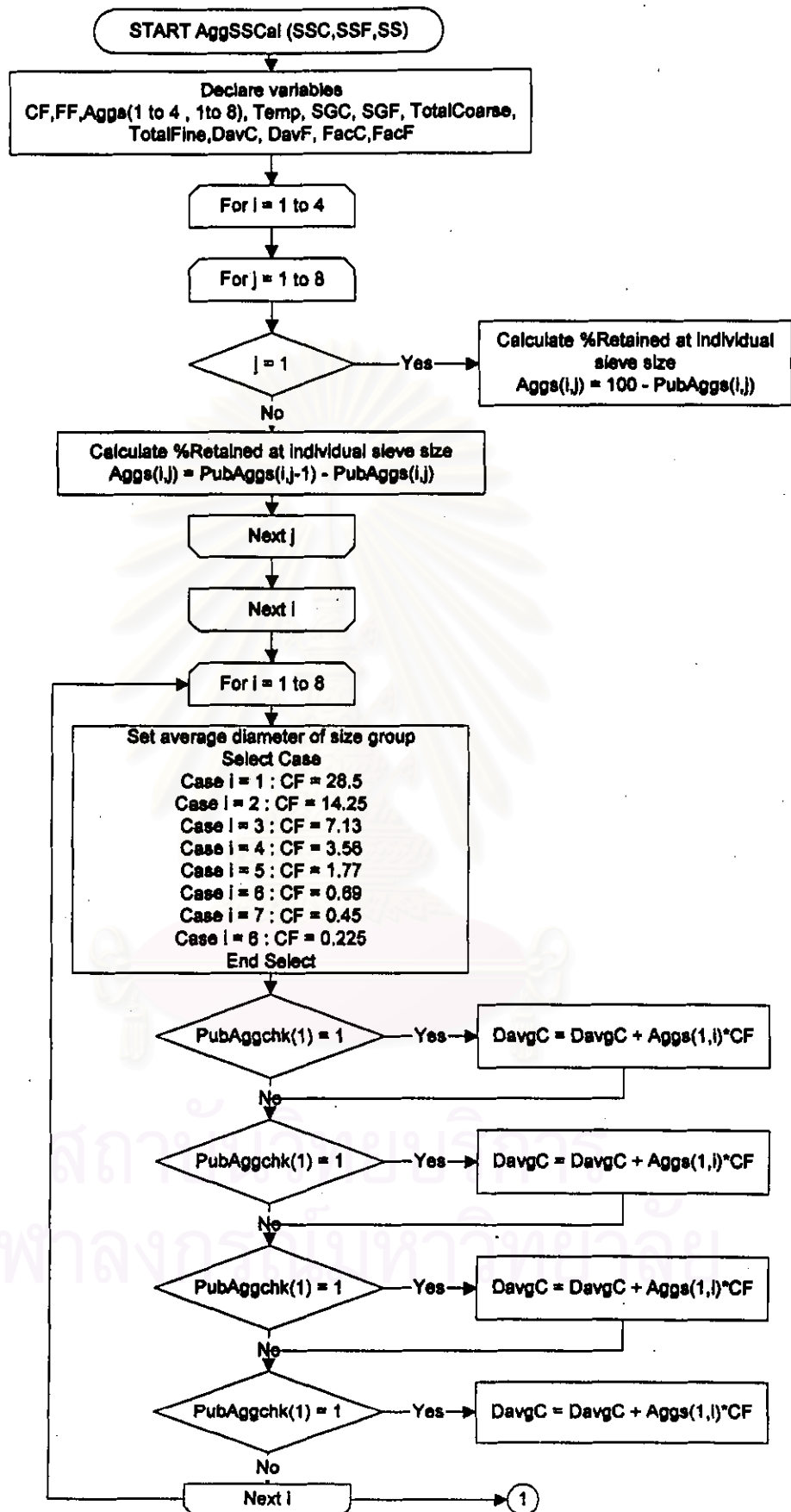


รูปที่ 3.24 ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย MaxCM

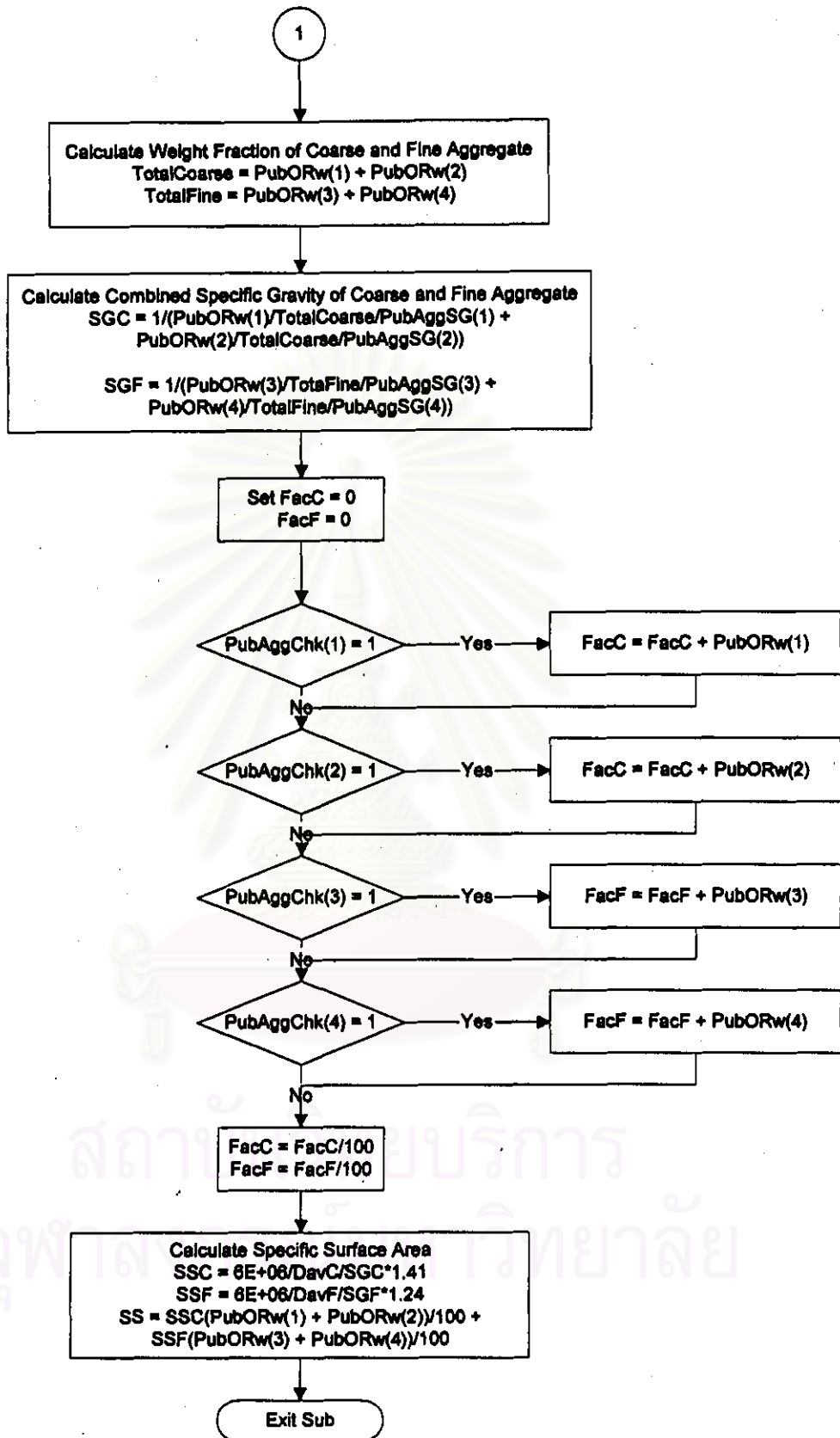


รูปที่ 3.25 ลำดับการคำนวณในโปรแกรมย่อย CaWC

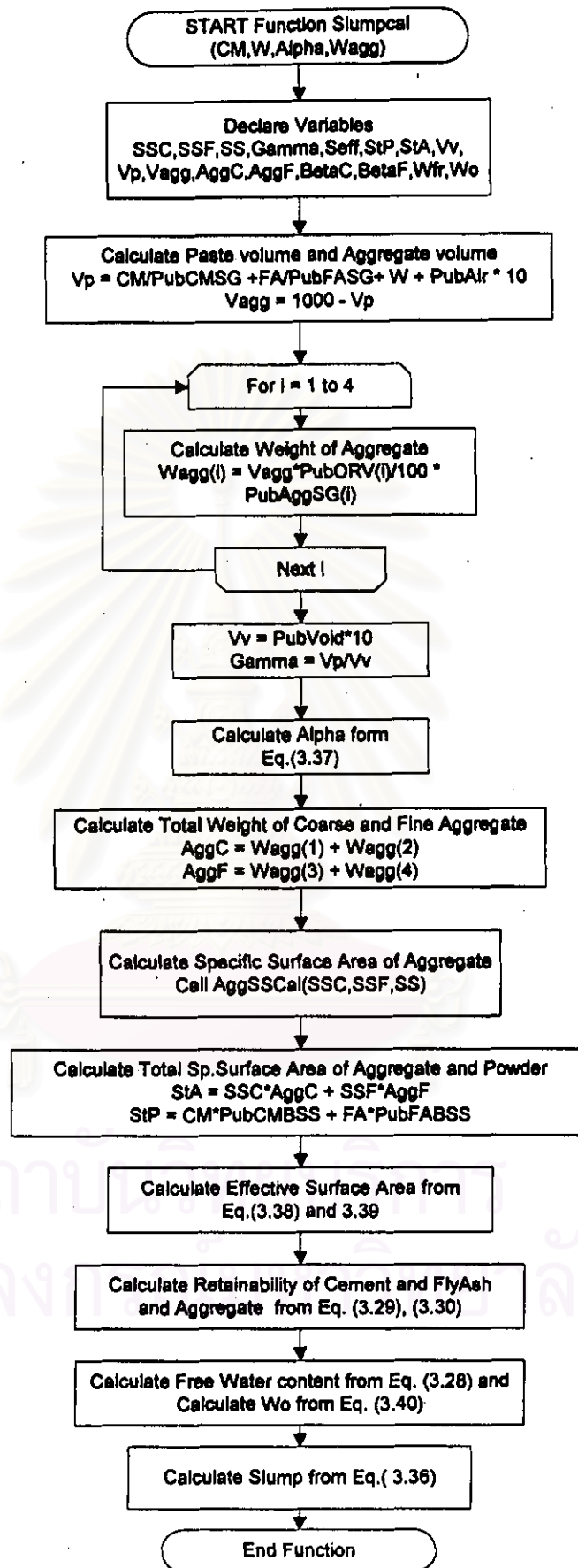
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



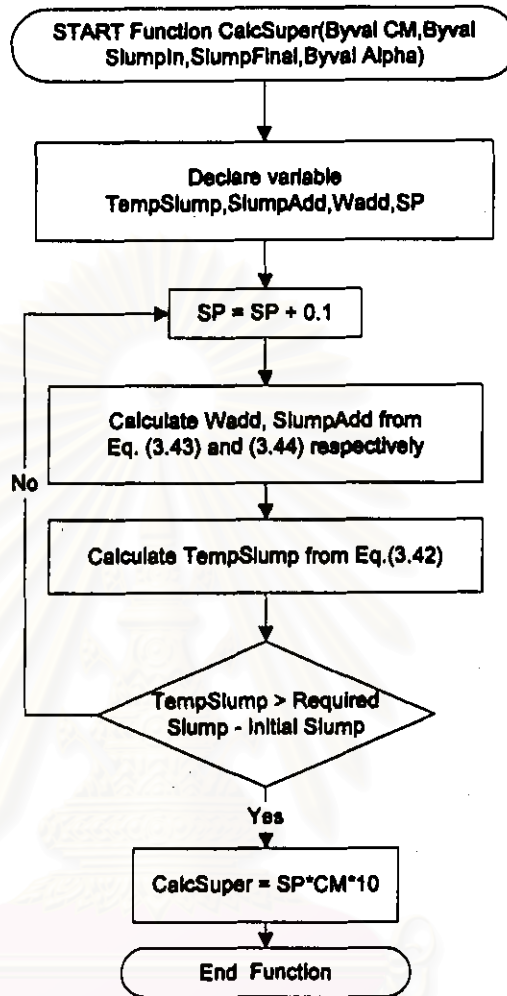
รูปที่ 3.26 ลำดับการคำนวณของโปรแกรมย่อย AggSSCal



รูปที่ 3.26 (ต่อ) ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย AggSSCal

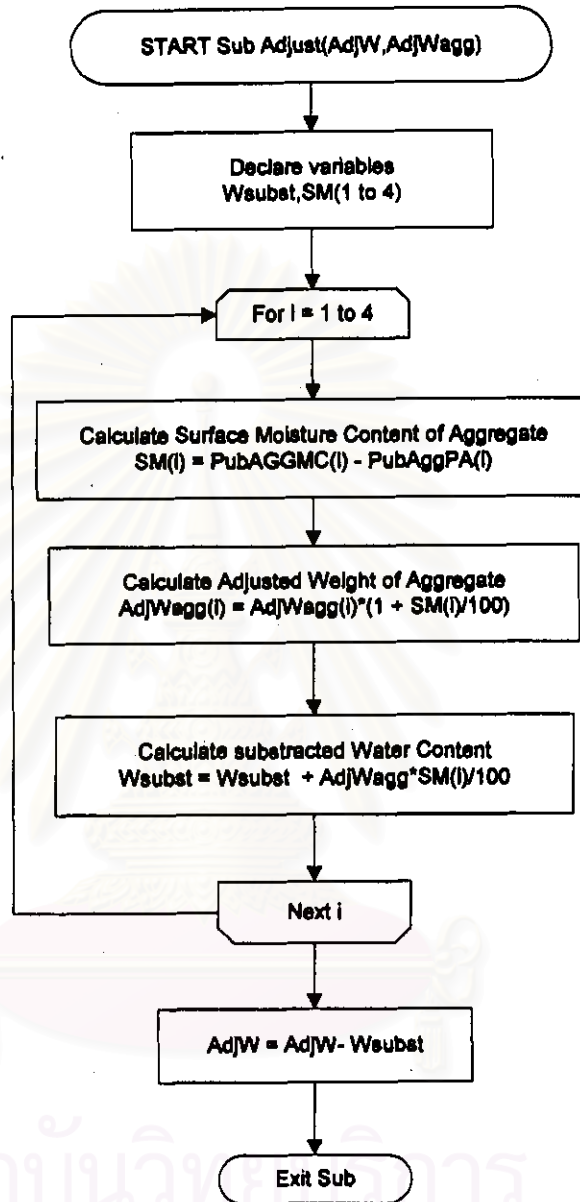


รูปที่ 3.27 ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย SlumpCal

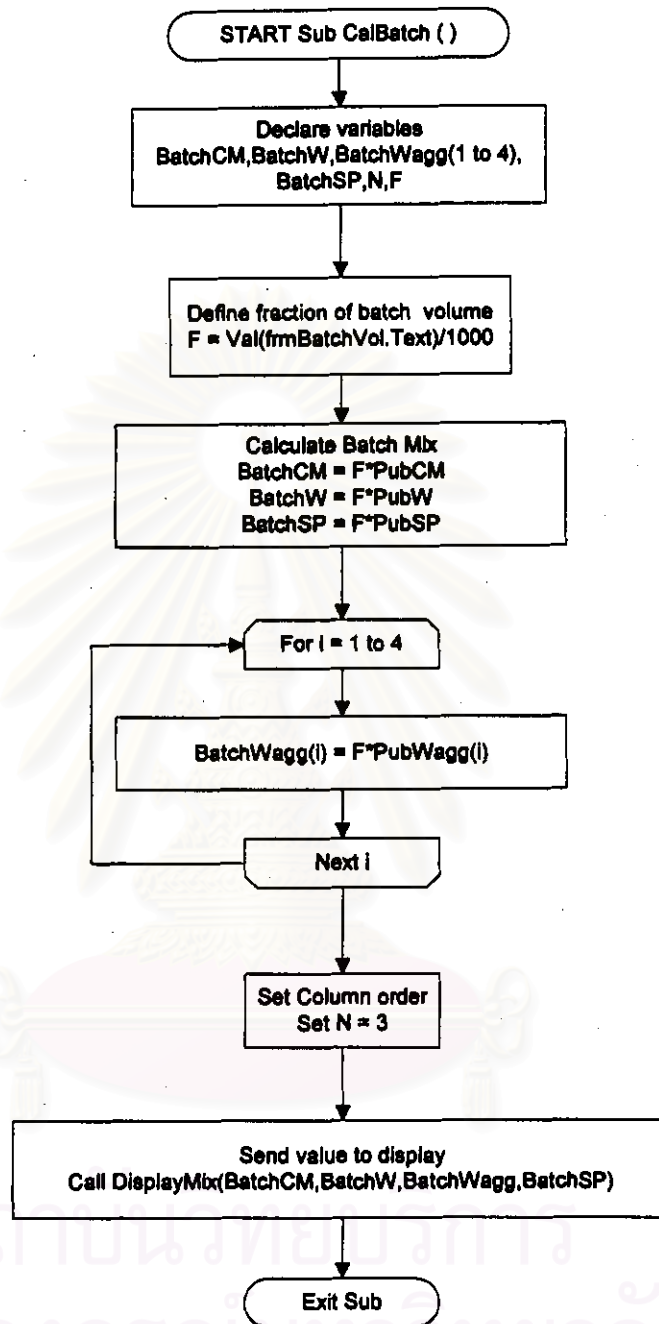


รูปที่ 3.28 ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย CalcSuper

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.29 ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย Adjust



รูปที่ 3.30 ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย CalBatch