



Journal of Thailand Concrete Association

วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตไหลเข้าแบบโดยไม่จี้เขย่า โดยอาศัยแบบจำลองทำนาย
ความสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การต้านทานการแยกตัว และความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวาง
A design approach for self-compacting concrete based on deformability,
segregation resistance and passing ability models

รัชต์ยุตม์ เกษมชัยศิริ¹ เฉลิมชัย วาณิชย์ล้าเลิศ² สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล³

¹รองกรรมการผู้จัดการ บริษัท PT SCG ReadyMix Indonesia จำกัด

²ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ARTICLE INFO:

Received: May 25, 2015

Received Revised Form: July 15, 2015

Accepted: July 27, 2015

ABSTRACT :

An approach for SCC mix proportioning based on the authors' developed models for predicting deformability, segregation and passing ability was introduced. The deformability model was developed based on the concepts of water retainability of solid particles, free water content and inter-particle forces in the concrete. Both deformation capacity, measured by a slump flow value, and velocity of deformation, measured by a time to attain slump flow of 50 cm, were included. Segregation was considered to have relationship with bleeding, so a bleeding prediction model was adopted. Passing ability was simulated by adopting a model for predicting aggregate blocking during SCC flow through narrow spaces. The parameters considered in the model are size distribution, volumetric ratio and shape of aggregates. Also considered for passing ability are the effect of viscosity of the concrete, clear spacing of the reinforcement and size of the reinforcement. Experimental results from the authors and other researchers were used in the verification of the proposed models. It was shown that the proposed models were satisfactory for predicting the tested results.

*Corresponding Author,

Email address: somnuk@siit.tu.ac.th

KEYWORDS: Self-Compacting Concrete, Design Approach, Prediction Model, Filling Ability, Deformability, Segregation Resistance, Passing Ability

1. บทนำ

คอนกรีตไหลเข้าแบบโดยไม่จี้เขย่า (Self-Compacting Concrete – SCC) คือ คอนกรีตที่พัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาทางงานก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตให้ทำงานได้ง่ายและมีความคงทน และเมื่อใช้คอนกรีตประเภทนี้จะสามารถลดจำนวนแรงงานและลดระยะเวลาในการก่อสร้างได้อีกด้วย ดังนั้นในช่วงเวลาที่ผ่านมามีงานวิจัยคอนกรีตประเภทนี้เกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง เพื่อส่งเสริมการใช้งาน

ให้แพร่หลายมากยิ่งขึ้น และเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว ต้องอาศัยวิธีการออกแบบส่วนผสมที่เชื่อถือได้ โดยครอบคลุมถึงสมรรถนะคอนกรีตที่ต้องการและวัสดุที่สามารถหาได้ อุปสรรคที่สำคัญอันหนึ่งคือไม่สามารถใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตรธรรมดาได้ เนื่องจากคุณลักษณะที่แตกต่างกันอย่างมากมาย โดยเฉพาะในด้านคอนกรีตสด ซึ่งแม้ปัจจุบันจะมีวิธีการออกแบบที่ใช้กันอยู่สำหรับคอนกรีตไหลเข้าแบบโดยไม่จี้เขย่า แต่ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยังไม่ครอบคลุมถึง

สมบัติวัสดุผสมที่มีอยู่หลากหลาย วิธีการออกแบบที่ถือว่าเป็นต้นแบบและนิยมใช้กันในช่วงเวลาเริ่มต้นของการพัฒนา คือวิธีการของ University of Tokyo [1] และได้พัฒนาไปเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในช่วงเวลาต่อมา ได้แก่ วิธีการของ Delf University, University College of London และ Ouchi และคณะ [2] ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการออกแบบ SCC โดยอาศัยแบบจำลองทำนายสมรรถนะของคอนกรีตสด กล่าวคือความสามารถไหลเติมเต็ม (Filling Ability) ซึ่งหมายถึงความสามารถที่คอนกรีตไหลและเติมเต็มช่องว่างในแบบหล่อ โดยอาศัยเฉพาะแรงโน้มถ่วง ซึ่งคอนกรีตที่ได้ต้องมีสมรรถนะตามต้องการ โดยมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกลไกของความสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง, การต้านทานต่อการแยกตัว และความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวาง [3]

2. พารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลอง

สืบเนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยเกี่ยวกับกลไกและปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดชนิดต่างๆ ซึ่งได้รับการพิสูจน์จากการใช้งานของคอนกรีตประเภทต่างๆแล้ว ได้แก่ ค่ายุบตัวของคอนกรีตทั่วไป, เวลาวิบี (Vebe time) สำหรับคอนกรีตบดอัด [4] และค่ายุบตัวการไหลสำหรับมอร์ตาร์ [5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ในการสร้างแบบจำลองทำนายความสามารถไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ SCC เช่นเดียวกัน

2.1 ปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีต

น้ำอิสระในคอนกรีต หมายถึงน้ำที่ไม่ถูกยึดจับโดยวัสดุของแข็งในคอนกรีตสด ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$W_{fr} = W_u - W_{rp} - W_{ra}' + W_{aa} \quad (1)$$

เมื่อ W_{fr} คือปริมาณน้ำอิสระ, W_u คือปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสมคอนกรีต, W_{rp} คือ ปริมาณน้ำที่ถูกยึดจับโดยวัสดุผง, W_{ra}' คือ ปริมาณน้ำที่ถูกยึดจับบนผิวของมวลรวม และ W_{aa} คือ ปริมาณน้ำอิสระส่วนเพิ่มจากผลของการแทรกตัวของวัสดุขนาดเล็กมาก โดยปริมาณน้ำทั้งหมดมีหน่วยเป็น กก./ม.³ ของคอนกรีต

2.2 ความสามารถกักเก็บน้ำของวัสดุผง

น้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผง หมายถึง น้ำที่ถูกดูดซึมโดยอนุภาควัสดุผงรวมกับน้ำที่ถูกกักเก็บบนผิวอีกส่วนหนึ่ง ซึ่งปริมาณน้ำดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากผลรวมของน้ำหนักวัสดุผง และความสามารถกักเก็บน้ำของวัสดุผงแต่ละชนิด ดังสมการ

$$W_{rp} = \sum_{i=1}^n \beta_{pi} w_{pi} \quad (2)$$

เมื่อ β_{pi} และ w_{pi} คือ สัมประสิทธิ์ความสามารถกักเก็บน้ำ และน้ำหนักแห้งของวัสดุผงชนิด i (กก./ม.³ คอนกรีต) ตามลำดับ และ n คือจำนวนชนิดวัสดุผงทั้งหมดที่ใช้ผสมในคอนกรีต ทั้งนี้ความสามารถกักเก็บน้ำของวัสดุผงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความพรุน, ลักษณะของผิว, รูปร่าง, การกระจายของขนาด และการสูญเสียจากการเผาไหม้ [4,5]

2.3 ความสามารถกักเก็บน้ำที่ผิวของมวลรวม

โดยปกติการปรับส่วนผสมคอนกรีตจะใช้ค่าความชื้นมาตรฐานของมวลรวมที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง แต่ในทางปฏิบัติยังมีน้ำอีกส่วนหนึ่งที่ติดยึดอยู่ที่ผิวมวลรวมและมีผลกระทบต่อบุคคลสมบัติคอนกรีตสดโดยตรง ซึ่งความสามารถกักเก็บได้ของน้ำที่ผิวมวลรวม สามารถหาได้จากสมการ

$$W_{ra}' = \beta_s' w_s' + \beta_g' w_g' \quad (3)$$

เมื่อ β_s' และ β_g' คือ สัมประสิทธิ์ความสามารถกักเก็บน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามลำดับ และ w_s' และ w_g' คือ น้ำหนักในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบตามลำดับ (กก./ม.³ คอนกรีต) ซึ่งความสามารถกักเก็บน้ำของมวลรวมมีผลจากขนาดและรูปร่างของมวลรวม [5]

2.4 ปริมาณน้ำขั้นต่ำที่ต้องการเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

คือ ปริมาณน้ำอิสระที่ต้องใช้ในการเอาชนะแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งเพื่อทำให้คอนกรีตสดเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยแรงกระทำที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนการสัมผัสที่มีโอกาสเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคของแข็ง ทั้งนี้อนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะมีผลให้เกิดการสัมผัสที่มากขึ้น ดังนั้นแรงกระทำระหว่างผิวสัมผัสจึงพิจารณาตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวของของแข็ง ปริมาณน้ำที่ต้องการขั้นต่ำ เพื่อเอาชนะแรงระหว่างพื้นที่

ผิวของอนุภาค(W_0) จึงแสดงในรูปฟังก์ชันของพื้นที่ผิวประสิทธิผล นอกจากนี้ อนุภาคนาขนาดเล็กที่แทรกตัวระหว่างอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่สามารถลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคลงได้จากผลของการหล่อลื่น [5,6] ซึ่งแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การหล่อลื่นของวัสดุแทรกขนาดเล็ก (L) โดยสมการหาค่า W_0 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$W_0 = 8 \times 10^{-5} \cdot S_{eff}^{0.76} / L \quad (4)$$

เมื่อ W_0 คือ ปริมาณน้ำอิสระขั้นต่ำที่ต้องการทำให้เริ่มต้นเกิดค่ายุบตัวการไหล (กก./ม.³ ของคอนกรีต) และ S_{eff} คือ พื้นที่ผิวประสิทธิผลของอนุภาคของแข็ง (ชม.²/ม.³ ของคอนกรีต) และ L คือ ค่าสัมประสิทธิ์หล่อลื่นจากวัสดุแทรกตัวขนาดเล็ก [4,5]

2.5 พื้นที่ผิวประสิทธิผลของอนุภาคของแข็ง

พื้นที่ผิวประสิทธิผลของอนุภาคของแข็งเป็นพื้นที่ผิวของอนุภาคของแข็งทั้งหมดในคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกันและก่อให้เกิดความผิดที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคอนกรีตสด บ่งชี้ถึงการสัมผัสที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ระหว่างมวลรวมละเอียด, มวลรวมหยาบ และวัสดุผง ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$S_{eff}' = \eta_a \cdot S_{ta} + 1000 \cdot \eta_p \cdot \phi_m \cdot \sum_{i=1}^n S_{pi} w_{pi} \quad (5)$$

เมื่อ S_{eff}' คือ พื้นที่ผิวประสิทธิผล (ชม.²/ม.³ ของคอนกรีต) S_{ta} คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวม (ชม.²/ม.³ ของคอนกรีต) S_{pi} คือ พื้นที่ผิวของวัสดุผงชนิด i (ชม.²/กรัม) w_{pi} คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุผงชนิด i (กก./ม.³ ของคอนกรีต) n คือ จำนวนชนิดของวัสดุผงทั้งหมดที่ผสมในคอนกรีต η_a และ η_p คือ อัตราส่วนการสัมผัสประสิทธิผลระหว่างมวลรวมและวัสดุผงตามลำดับ และ ϕ_m คือ แฟคเตอร์ส่วนลดจากการใช้น้ำยาลดน้ำ

3. แบบจำลองทำนายความสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

ในการสร้างแบบจำลองทำนายความสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformability) ได้พิจารณาถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation capacity) ซึ่งหมายถึง ระยะทางที่คอนกรีตสามารถไหลไปได้หลังจากปล่อยให้คอนกรีตเริ่มไหล และความเร็วใน

การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation Velocity) หมายถึง ความเร็วในการไหลของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ดีจำเป็นต้องมีความสมดุลระหว่างค่าทั้งสอง

3.1 แบบจำลองทำนายปริมาณการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

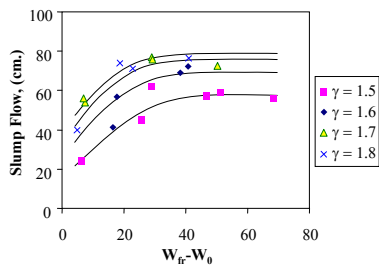
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีตสดมีความสัมพันธ์กับความสามารถไหลได้ของมอร์ตาร์และคอนกรีตหลายประเภท [4,5,6,7] และปริมาณน้ำอิสระมีความสัมพันธ์กับค่ายุบตัวการไหลของ SCC ดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

$$SF = \phi_{rep}' \cdot \alpha_{SF} \cdot (W_{fr} - W_0) + 20 \quad (6)$$

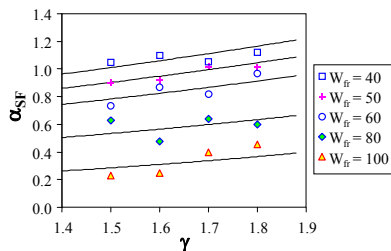
เมื่อ SF คือ ค่ายุบตัวการไหลของ SCC (ชม.) ϕ_{rep}' คือ ปัจจัยส่วนลดจากการใช้น้ำยาลดน้ำปริมาณมาก (Superplasticizer), α_{SF} คือ ค่าความชันของเส้นโค้งค่ายุบตัวการไหลกับปริมาณน้ำอิสระ W_{fr} คือ ปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีต (กก./ม.³ ของคอนกรีต) และ W_0 คือ ปริมาณน้ำอิสระขั้นต่ำที่ต้องการให้เริ่มเกิดการยุบตัวการไหล (กก./ม.³ ของคอนกรีต)

จากความสัมพันธ์ข้างต้นพบว่า ความชันของเส้นโค้งค่ายุบตัวการไหลและปริมาณน้ำอิสระจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวม (γ) มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำอิสระมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2

เมื่อแรงผลักดันเกิดขึ้นระหว่างวัสดุเชื่อมประสานจากการใช้น้ำยาลดน้ำมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความชันของเส้นโค้ง ค่ายุบตัวการไหล และปริมาณน้ำอิสระมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนตัวได้ของอนุภาคในคอนกรีต นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อคอนกรีตมีค่าปริมาตรเฟสต่อช่องว่างของมวลรวมเท่ากัน น้ำยาลดน้ำประเภทลิโนลโนลโฟเนต และแนพทา ลีน มีประสิทธิภาพการลดน้ำน้อยกว่าน้ำยาลดน้ำประเภทโพลีคาร์ โบซิเลท [8]



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวการไหล และ $W_{fr}-W_0$



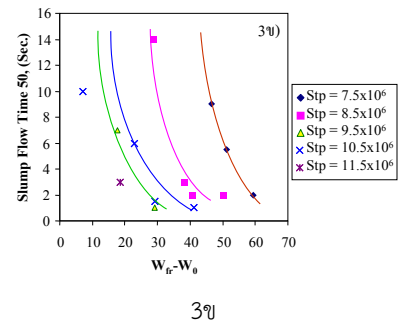
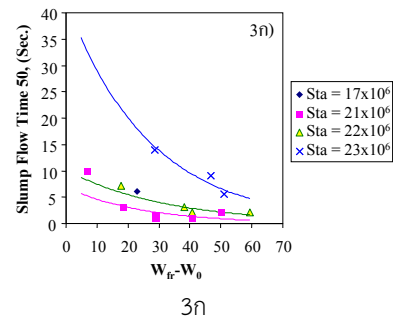
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันของเส้นโค้ง ค่ายุบตัวการไหล-ปริมาณน้ำอิสระ กับอัตราส่วนปริมาณเพสต์ต่อช่องว่างมวลรวมในสภาพอัดแน่น (γ)

3.2 แบบจำลองทำนายความเร็วการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

การวัดความเร็วของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สามารถทำได้โดยวัดระยะเวลาที่คอนกรีตเริ่มต้นไหลจนมีเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลของคอนกรีตเท่ากับ 50 ซม. (T_{50}) ซึ่งคุณสมบัตินี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนืดของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าเวลายุบตัวการไหล 50 ซม. มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีตลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วน รูปที่ 3ก แสดงให้เห็นว่าเมื่อพื้นที่ผิวประสิทธิภาพของมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เวลายุบตัวการไหลเพิ่มขึ้น และในทางกลับกัน เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวประสิทธิภาพของวัสดุผงให้มีค่าสูงขึ้น มีผลทำให้เวลายุบตัวการไหลสั้นลง ดังแสดงในรูปที่ 3ข ทั้งนี้เนื่องจากเพสต์มีผลต่อการหล่อลื่นของอนุภาคมวลรวม นอกจากนี้ยังได้พิจารณาผลจากการใช้น้ำยาลดน้ำในการสร้างสมการหาค่าระยะเวลายุบตัวการไหล ดังนี้

$$T_{50} = \phi_{rep}' \left[(14.28S_u^2 - 610.99S_u + 6538.01) \exp^{(-0.0077S_u^2 + 0.3406S_u - 3.7975)(W_u - W_0)} \right] \quad (7)$$

เมื่อ T_{50} คือ เวลายุบตัวการไหลที่ 50 ซม. (วินาที) ϕ_{rep}' คือปัจจัยส่วนลดจากการใช้น้ำยาลดน้ำปริมาณมาก S_{ca} คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวม (ซม.²/ม.³ ของคอนกรีต) W_{fr} คือ ปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีตสด (กก./ม.³ ของคอนกรีต) และ W_0 คือ ปริมาณน้ำอิสระขั้นต่ำที่ทำให้เริ่มเกิดการยุบตัวการไหล (กก./ม.³ ของคอนกรีต)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลายุบตัวการไหล 50 ซม. และ $W_{fr}-W_0$ แสดงถึงผลกระทบของพื้นที่ผิวประสิทธิภาพของมวลรวม (S_{ca}) และพื้นที่ผิวประสิทธิภาพของวัสดุผง (S_{sp}) ในรูปที่ 3ก และ 3ข ตามลำดับ

4. แบบจำลองทำนายการต้านทานการแยกตัว

คอนกรีตไหลเข้าแบบโดยไม่จีเย้า ไม่ควรมีการแยกตัวทั้งที่อยู่ในสภาพนิ่งและสภาพไหลตัว กล่าวคือ ไม่ควรเกิดการเยิ้ม น้ำ การแยกตัวระหว่างเพสต์กับมวลรวม และการแยกตัวของมวลรวม หยาบที่ทำให้เกิดการติดขัดตัว (blocking) ซึ่งสิ่งสำคัญเพื่อหลีกเลี่ยงการแยกตัวระหว่างน้ำและของแข็งในคอนกรีต (การเยิ้ม น้ำ) คือ การลดปริมาณน้ำที่เคลื่อนตัวได้ในส่วนผสม จากพื้นฐานความสัมพันธ์ของการเยิ้มน้ำที่จะนำไปสู่การแยกตัวของคอนกรีต และประสบการณ์ในทางปฏิบัติของคณะผู้วิจัย พบว่า SCC ที่ไม่มีน้ำเยิ้มจะไม่มีปัญหาการแยกตัวในระหว่างการไหล ดังนั้น ในการศึกษาจึงใช้ปริมาณน้ำเยิ้ม ในการบ่งชี้เบื้องต้นถึงการแยกตัวของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ยังต้องอาศัยการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการใช้งานและการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้จากผลทดสอบพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำเยิ้ม ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ พื้นที่ผิวของอนุภาคของแข็ง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณอากาศในคอนกรีต โดยสามารถสร้าง

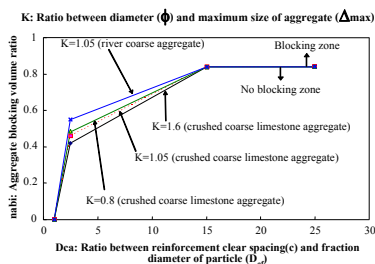
เป็นสมการทำนายปริมาตรน้ำเยิ้ม (BV) ที่ระยะเวลา 30 นาทีหลังผสมเป็นต้นไปได้ดังนี้

$$BV(t) = BV(t_0) + \int_{t_0}^t BR(t) dt \quad (8)$$

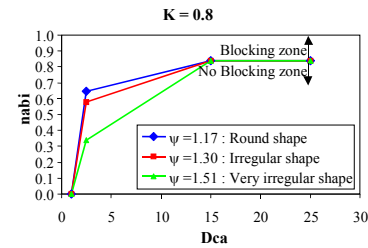
เมื่อ t_0 คือ เวลาที่ 30 นาที และ $BR(t)$ คือ ฟังก์ชันของอัตราการเกิดน้ำเยิ้ม [9]

5. แบบจำลองทำนายความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวาง

ในการศึกษานี้ ได้เสนอเกณฑ์ประเมินการติดขัดตัวของมวลรวมเพื่อใช้ในการควบคุมขนาด, สัดส่วน และปริมาตรของมวลรวมเพื่อให้ความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางของ SCC เป็นไปตามต้องการ ทั้งนี้อัตราส่วนปริมาตรการติดขัดตัวของมวลรวมหมายถึง อัตราส่วนที่มีค่าสูงสุดของปริมาตรมวลรวมที่มีขนาดเดียวกันของกลุ่มขนาด i ต่อปริมาตรมวลรวมทั้งหมดที่ไม่ก่อให้เกิดการติดขัดตัวระหว่างที่คอนกรีตไหลผ่านช่องแคบ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต่อขนาดมวลรวม อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่อขนาดโตสุดของมวลรวม แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคในคอนกรีต และคุณสมบัติความหนืดของเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4 [10]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาตรการเกิดติดขัดตัวและอัตราส่วนระยะห่างช่องว่างและขนาดอนุภาคมวลรวม โดยพิจารณาถึงรูปร่างของมวลรวม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาตรที่เกิดติดขัดตัวและอัตราส่วนระยะห่างช่องว่างต่อขนาดอนุภาคมวลรวม

ทั้งนี้ สมการสำหรับคำนวณหาปริมาตรมวลรวมสูงสุด จากอัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อปริมาตรมวลรวมทั้งหมด ของแต่ละกลุ่มขนาดมวลรวม สามารถกำหนดได้จากสมการดังนี้

$$\text{ความเสี่ยงต่อการติดขัดตัว} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_{ai}}{n_{abi}} \right) < 1.0 \quad (9)$$

เมื่อ n_{ai} คือ อัตราส่วนปริมาตรมวลรวมขนาดเดียวกันกลุ่ม i และ n_{abi} คือ อัตราส่วนปริมาตรที่เกิดการติดขัดตัวต่อปริมาตรมวลรวมทั้งหมด

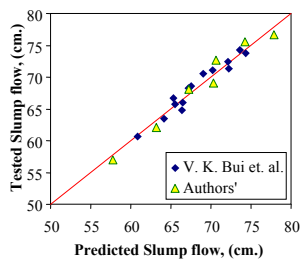
ค่าสูงสุดของปริมาตรมวลรวมที่สามารถใส่ได้ในคอนกรีตโดยไม่เกิดการติดขัด คือ ปริมาตรที่คำนวณได้จากความเสี่ยงการเกิดติดขัดตัวเกือบเท่ากับ 1 และจากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมต่อขนาดโตสุดของมวลรวม (K) มีค่าสูงขึ้น จะทำให้อัตราส่วนปริมาตรที่เกิดการติดขัดตัวมีค่าลดลง เนื่องจากเหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่า จะเป็นฐานรองรับขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อของมวลรวม (Aggregate bridging) ที่บริเวณช่องแคบได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ อัตราส่วนปริมาตรติดขัดตัวจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการใช้มวลรวมที่มีรูปร่างกลมและมน ทำให้สามารถใช้ปริมาณมวลรวมหยาบเพิ่มมากขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมหยาบรูปร่างเหลี่ยมมุมที่ได้จากการย่อยมวลรวม จากรูปที่ 5 พบว่ามวลรวมหยาบที่มีรูปร่างเหลี่ยมมุมมีผลทำให้อัตราส่วนของมวลรวมที่เกิดติดขัดตัวมีค่าลดลง ซึ่งมีผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลรวมที่มีมากกว่ามวลรวมที่มีรูปร่างกลมและมน

แบบจำลองที่นำเสนอในการวิจัยนี้ ได้รับการทวนสอบความแม่นยำจากผลทดสอบของคณะผู้วิจัยและนักวิจัยท่านอื่น ซึ่งพบว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายค่ายุบตัวการไหล เวลายุบตัวการไหล

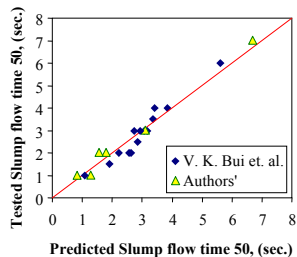
50 ซม. การเย็นน้ำ และความเสี่ยงต่อการติดขัดตัวของมวลรวม ได้อย่างเป็นที่น่าสนใจ ดังรูปที่ 6, 7 และ 8

6. สรุปผลการวิจัย

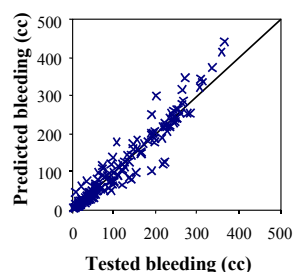
งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตไหลเข้าแบบโดยไม่จี้เขย่า โดยอาศัยแบบจำลองทำนายคุณสมบัติคอนกรีตที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณความสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ค่ายุบตัวการไหล), ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (T_{50}), การต้านทานการแยกตัว (การเย็นน้ำ) และ ค่าความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (การติดขัดตัวของมวลรวม) ซึ่งผลการทวนสอบความแม่นยำพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายคุณสมบัติข้างต้นของคอนกรีตไหลเข้าแบบโดยไม่จี้เขย่า ได้อย่างเป็นที่น่าสนใจ



รูปที่ 6 ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายค่ายุบตัวการไหล



รูปที่ 7 ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายเวลายุบตัวการไหล



รูปที่ 8 ผลการทวนสอบปริมาณน้ำเย็นที่ระยะเวลาต่างๆ (30, 40, 50, 80, 110, 140 นาที หลังผสม)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Okamura, H., and Ozawa, K., 1995. Mix Design for Self-Compacting Concrete, *Concrete Library of JSCE*, pp.107-120.
- [2] Domone, P., 2000. Mix design, *Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, pp. 49-65.
- [3] Tangtermsirikul, and Khayat, K., 2000. Fresh concrete properties, Self-Compacting Concrete, *State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, Edited by A Skarendahl and O.Petersson, pp. 17-21.
- [4] Khunthongkeaw J., and Tangtermsirikul, S., 2003. Vibration Consistency Prediction Model for Roller Compacted Concrete, *ACI Material Journal*, Vol. 100, No. 1, Jan-Feb, 2003, pp149-157.
- [5] Tangtermsirikul, S., Khunthongkeaw J., and Kitticharoenkiat, P., 1999. A Slump Model for Predicting Workability of Fresh Mortar and Concrete, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE*, No. 676, pp149-157.
- [6] Lane, R.O., 1983. Effects of Fly Ash on Freshly Mixed Concrete, *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 5, No. 10, pp. 50-52.
- [7] Ozawa, K., Tangtermsirikul, S. and Maekawa, K., 1992. Role of Powder Materials on the Filling Capacity of Fresh Concrete. *The 4th Canmet/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Supplementary Papers, pp. 121-130.

- [8] Wangchuk, S. Khunthongkeaw, J. and Tangtermsirikul, S., 2003. Effects of Water-Reducing Admixtures on Initial Slump of Fresh Concrete, *R&D Journal of the Engineering Institute of Thailand*, Vol.14, No.1, pp.19-26.
- [9] Thumasujarit, K. and Tangtermsirikul, S., 2004. Bleeding Model for Fly Ash Concrete, *Proceedings of the 9th National Convention on Civil Engineering*, Petchaburi, 19-21 May 2004, Vol.1, pp. MAT-184-MAT-189
- [10] Tangtermsirikul, S., and Bui, V. K., 1995. Blocking Criteria for Aggregate Phase of Self-Compacting High Performance Concrete, *Proceedings of the Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering*, 19-20 December 1995, Bangkok Thailand, pp. 58-69.
- [11] Bui, V. K., Akkaya, Y., and Shah, S. P., 2002. Rheological Model for Self-Consolidating Concrete, *ACI Material Journal*, Vol. 99, No. 6, Nov-Dec, 2002, pp. 549-559.