รายการอ้างอิง

1. Stitmannaithum, B., Effect of Mixing Intensity on Properties of Fresh Concrete Mixed by Pan Type Mixer. A Dissertation submitted to the University of Tokyo, Japan, 1992
2. Vom Berg, W., Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behaviour of cement pastes, Magazine of Concrete Research Vol.31.No.109.1979.p.211-216
3. Lapasin, R., Longo,V., and Rajgelj,S., Thixotropic behaviour of cement pastes, Cement and Concrete Research Vol.9.1979.p.309-318
4. Lapasin, R., Papo,A., and Rajgelj,S., Flow behavior of Fresh Cement Pastes.: A comparison of different rheological instruments and techniques, Cement and Concrete Research Vol.13,1983, p.349 - 356
5. Roy, D. M., and Asaga, K., Rheological properties of Cement Mixes: III. The effects of mixing procedures on viscometric properties of Mixes containing Superplasticizers. Cement and Concrete Research Vol.9.1979. p.731 – 739
6. Banfill,P.F.G., and Saunders,D.C., On the Viscometric Examination of Cement Pastes. Cement and Concrete Research Vol.11,1981, p.363 - 370
7. Kakizaki,M., et al., Effect of Mixing Method on Mechanical properties and Pore Structure of Ultra High – Strength Concrete, Proceedings 4th International Conference. Turkey,May,1992, p.997 – 1015
8. Mayer, Experiences in the use of Superplasticizers in Germany .Publication SP-62.American Concrete Institute,Detrpot.1979,p.21 - 36
9. Dodson,V.H., Concrete Admixtures , Van Nostrand Reinhold, New York, 1990
10. Yousuf,M. et al., Chemical and Physical effects of Sodium Lignosulfonate Superplasticizers on the hydration of Portland Cement and Solidification/Stabilization consequences , Cement and Concrete Research Vol.25, No.3,1995, p.671 - 682
11. Masood,I., and Agarwal,S.K., Effect of various Superplasticizers on rheological properties of cement paste and mortar .Cement and Concrete Research Vol.24. No.2, 1994,p.291 - 302
12. Ferran,G.,Cerull,T.,Clemente,P. and Dragoni,M., Adsorption of naphthalene sulfonate superplasticizers by cement particles through gel permeation chromatography , Publication SP-173.fifth CANMET/ACI , 1997, p.869 – 889
13. Singh,N.B., Reetika,Sarvahi, and Singh,N.P., Effect of Superplasticizers on the Hydration of cement , Cement and Concrete Research Vol.22,1992, p.725 – 735
14. Uchikawa,H. and hanehara,S., Effect of Admixture on Hydration of Cement, Adsorptive behavior of Admixture and Fluidity and Setting of Fresh Cement Paste , Cement and Concrete Research Vol.22,1992, p.1115 - 1129

15. Kishitani, K., Tomosawa, F. and Oka, S., Rheological Study of Superplasticized Concrete , Developments in the use of Superplasticizers SP-68. 1981, p.423 – 439

16. Hattori,K., Experiences with Mighty Superplasticizer in Japan in Superplasticizers in Concrete , Publication SP-62. American Concrete Institute,Detroit,1979,p.37 – 66

17. Daimon,M., and Roy,D,M., Rheological properties of cement mixes: II. Zeta potential and preliminary viscosity studies , Cement and Concrete Research Vol.9,1979,p.103 – 110

18. Banfill,P.F.G., A viscometric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques , Magazine of Concrete Research Vol.33,No.114,1981,p.37-47

19. Nishibayashi, S., Yamura, K., and Inoue, S., Rheological Properties of Superplasticized Concrete, Developments in the use of Superplasticizers SP-68. 1981, pp.441-466

20. Masood,Irshad and Agarwal,S.K., Effect of various superplasticizers on Rheological properties of Cement Paste and Mortar, Cement and Concrete Research Vol.24.No.2.1994.p.291-302

21. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต.มอก.733-2530

22. Aitcin, P-C., The use of Superplasticizers in High Performance concrete. High Performance Concrete:From material to structure,1992,p.14 -33

23. Yousuf,M. et al., Chemical and Physical effects of Sodium Lignosulfonate Superplasticizers on the hydration of Portland Cement and Solidification/Stabilization consequences. Cement and Concrete Research Vol.25, No.3,1995, p.671-682

24. Pongporncharoen, S., Prediction of Workability of Fresh Concrete containing Fly Ash. A Master Thesis submitted to Asian Institute of Technology,April, 1997

25. Kitticharoenkiat, P., A Slump Prediction Model Based on Water Retainability and Free Water Concepts. A Master Thesis submitted to Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasart University,September, 1998

26. Gray,W.A., The Packing of Solid Particles ,Chapman and Hall Ltd, London, 1968

27. Rosen,J,Milton, Surfactants and Interfacial Phenomena. New York, 1988

28. Aitcin, P-C., Carmel,Jolicoeur, and MacGregor,G,James, Superplasticizers: How they work and why they occasionally don't , Concrete International May,1994, p.45-85

29. Uchikawa, H, and Hanehar, S, Influence of Characteristics of Sulfonic Acid-Based Admixture on Interactive Force Between Cement Particles and Fluidity of Cement Paste .Publication SP-173,1997,p.23-34

30. Uchikawa, H, Hanehara, S, and Sawaki, D, The Role of Steric Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in Fresh Paste prepared with Organic Admixture , Cement and Concrete Research Vol.27,No1,1997,p.37-50

31. Dobias and Bohuslav. Coagulation and Flocculation: Theory and Applications. Marcel Dekker, Inc.,Newyork,1993

32. Nagele,E., The Zeta – Potential of Cement .Cement and Concrete Research Vol.15. 1985, p .453-162

33. Anderson,P,J, and Roy,D,M, The Effect of Superplasticizer Molecular Weight on its Adsorption on, and Disperion of,Cement , Cement and Concrete Research Vol.18,1988,p.980-986

34. Power,T.C., Properties of Fresh Concrete. John Wiley and Sons,Inc.,1968

35. Khunthongkeaw,J., Workability prediction model for concrete and mortar with and without of mineral and Chemical Admixtures. A Master Thesis submitted to Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasart University,September, 2001

36. Tattersall, G. H, and Banfill, P. F.G., The Rheology of Fresh Concrete. Pitman Publishing Inc., London,1983

37. Marshall, L, Brown., On the Generation of Heat During the Mixing of Cement Paste, Cement and Concrete Research Vol.20,pp.471-474,1991

38. Popovics,Sandor.,Fundamentals of Portland Cement Concrete: A Quantitative Approach Vol.1: Fresh Concrete. John Wiley & Sons,New York,1982

39. Murata, J, and Suzuki, K., New method of testing the flowability of grout. Magazine of Concrete Research No.181,pp.269-276,Dec,1997

40. Jeff,R.,Bury and Hamid Farzam ., Laboratory Evaluation of a Unique Anti - Washout Admixture in Grouts, Publication SP173. American Concrete Institute, Detroit, 1997

41. Ohta,A, Sugiyama,T, and Tanaka,Y, Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxlate-Based Superplasticizers, Publication SP-173.1997.p.359-377

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดสมการที่อ้างอิง

ก.1 แบบจำลองของ Gouy and Chapman[31] มีรากฐานจากสมการปัวซองค์ (Poisson's equation) ดังนี้

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} = -\frac{\rho(z)}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad \text{(ก.1)}$$

โดยที่

ϕ คือ ค่าศักย์ที่ชั้นคู่ (Double – layer potential)

ε_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศ (Permittivity of the vacuum)

ε_r คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นคู่ทางไฟฟ้าของตัวกลาง (Relative dielectric permittivity of the medium)

$\rho(z)$ คือ ความหนาแน่นประจุสุทธิต่อหน่วยปริมาตรที่ระยะทาง z จากระนาบที่ซึ่งเริ่มเกิดชั้นแพร่ ซึ่งค่านี้จะเป็นผลรวมสุทธิของความเข้มข้นของทั้งประจุบวกและลบ

Gouy and Chapman[31] เสนอความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความหนาแน่นของประจุและความเข้มข้นของประจุดังนี้

$$\rho(z) = \sum_i v_i F n_i(z) \quad \text{(ก.2)}$$

$$n_i(z) = n_i(\infty)\exp\left(\frac{-v_i F\phi(z)}{RT}\right) \quad \text{(ก.3)}$$

เมื่อ

$n_i(z)$ คือ ความเข้มข้นของประจุ i ที่ระยะทาง z จากผิวซึ่งมีค่าศักย์เป็น ϕ

v_i คือ จำนวนประกอบของประจุ i ที่ระยะทาง z จากผิวซึ่งมีค่าศักย์เป็น ϕ

$n_i(\infty)$ คือ ความเข้มข้นโดยรวม (Bulk concentration) ของประจุ i

R คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์

F คือ ประจุไฟฟ้าเบื้องต้น (Elementary electric charge)

จากสมการที่ (ก.1) – (ก.3) ให้สมการอนุพันธ์ดังสมการที่ (ก.4)

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} = -\frac{F}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\sum_i v_i n_i(\infty)\exp\left(-\frac{v_i F\phi(z)}{RT}\right) \quad \text{(ก.4)}$$

จากสมการที่ (ก.4) Gouy and Chapman [31] ได้วิเคราะห์หาผลเฉลยได้ดังนี้

$$\left(\frac{d\phi}{dz}\right) = -\left(\frac{8RTn}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\right)^{\frac{1}{2}} \sinh\left(\frac{vF\phi(z)}{2RT}\right) \qquad (ก.5)$$

$$\tanh\left(\frac{vF\phi(z)}{4RT}\right) = \tanh\left(\frac{vF\phi_d}{4RT}\right)\exp(-\kappa z) \qquad (ก.6)$$

โดยที่

ϕ_d คือ ค่าศักย์ของชั้นแพร่ (Potential of the diffuse layer)

n คือความเข้มข้นโดยรวม (Bulk concentration)

κ คือค่าเด็บ (Debye parameter) ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (ก.7)

$$\kappa = \left(\frac{F^2\sum_i n_i v_i^2}{\varepsilon_0\varepsilon_r RT}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (ก.7)$$

สำหรับค่าผกผันของ κ (κ^{-1}) ถูกเรียกว่าค่าความยาวเด็บ (Debye length) หรือความหนาของชั้นคู่ (Double – later thickness) [31]

ถ้าประจุที่ผิวถูกชดเชยด้วยประจุในชั้นแพร่แล้ว จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของประจุที่ผิว (σ_s) และค่าศักย์ที่ผิว (ϕ_s) เพื่ออธิบายความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบได้ดังสมการ (ก.8)

$$\sigma_s = -\int_0^\infty \rho(z)dz = -\sigma_d \qquad (ก.8)$$

แทนค่าสมการที่ (ก.1) ในสมการที่ (ก.8) ก็จะสามารถอินทริเกรตสมการที่ (ก.8) ดังนี้

$$-\sigma_d = \varepsilon_0\varepsilon_r \int_0^\infty \left(\frac{d^2\phi}{dz^2}\right)dz = -\varepsilon_0\varepsilon_r\left(\frac{d\phi}{dz}\right)_{z=0} \qquad (ก.9)$$

แทนค่าสมการที่ (ก.5) ในสมการที่ (ก.9) ได้

$$-\sigma_d = (8RT\varepsilon_0\varepsilon_r n)^{\frac{1}{2}} \sinh\left(\frac{vF\phi_d}{2RT}\right) \qquad (ก.10)$$

ก.2 สมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับความเข้มของการผสมและค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ โดยที่ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

กรณีที่ w/c =0.220 และ $\%_{SP}$ =0.2% เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Flow = -121.66(Log(MI))^2 + 174.66(Log(MI)) + 117.05 \quad (ก.11)$$

จากสมการที่ (ก.11) คำนวณหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่ให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุดได้ = 5.22 Wh/l

กรณีที่ w/c =0.212 และ $\%_{SP}$ =0.4% เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Flow = -180.62(Log(MI))^2 + 251.87(Log(MI)) + 103.20 \quad (ก.12)$$

จากสมการที่ (ก.12) คำนวณหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่ให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุดได้ = 4.98 Wh/l

กรณีที่ w/c =0.204 และ $\%_{SP}$ =0.6% เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Flow = -237.75(Log(MI))^2 + 307.44(Log(MI)) + 122.92 \quad (ก.13)$$

จากสมการที่ (ก.13) คำนวณหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่ให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุดได้ = 4.43 Wh/l

กรณีที่ w/c =0.199 และ $\%_{SP}$ =0.8% เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Flow = -346.34(Log(MI))^2 + 458.59(Log(MI)) + 77.20 \quad (ก.14)$$

จากสมการที่ (ก.14) คำนวณหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่ให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุดได้ = 4.59 Wh/l

กรณีที่ w/c =0.195 และ $\%_{SP}$ =1.0% เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Flow = -251.65(Log(MI))^2 + 334.75(Log(MI)) + 108.83 \quad (ก.15)$$

จากสมการที่ (ก.15) คำนวณหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่ให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุดได้ = 4.62 Wh/l

กรณีที่ w/c =0.193 และ $\%_{SP}$ =1.2% เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Flow = -158.92(Log(MI))^2 + 211.06(Log(MI)) + 136.31 \quad (ก.16)$$

จากสมการที่ (ก.16) คำนวณหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่ให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุดได้ = 4.61 Wh/l

กรณีที่ w/c =0.193 และ $\%_{SP}$ =1.4% เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Flow = -236.12(Log(MI))^2 + 318.09(Log(MI)) + 100.36 \quad (ก.16)$$

จากสมการที่ (ก.16) คำนวณหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่ให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลสูงสุดได้ = 4.72 Wh/l

ภาคผนวก ข.

รายการคำนวณ

ข.1. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

พิจารณาจากเส้นกราฟในรูปที่ 3.2 พบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) จะหาสมการตัวแทนความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวของซีเมนต์เพสต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ได้ดังนี้

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

แทนค่าย้อนกลับเพื่อหาค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ทำให้เกิดค่ายุบตัวเริ่มต้น (Slump=0) ได้ $w/c = 0.227$

ข.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย

ขนาดคละของทรายที่ใช้ในการทดลองเป็นดังตาราง 3.2 ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยตามแบบจำลองของ Kitticharoenkiat [25] (สมการที่ 3.10) ได้ = 0.0382 ซม.

คำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของทรงกลมสมมติต่อหน่วยปริมาตรของทราย ตามสมการที่ 3.9

$$S_{S0} = \frac{6}{D'_{av}}$$ อ้างอิงสมการที่ (3.9)

$$S_{S0} = 157.1$$ ตร.ซม./ลบ.ซม.

เมื่อพิจารณาถึงผลของความเป็นเหลี่ยมมุมของทราย จึงต้องคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมอีกครั้งตามสมการที่ (3.8)

$$S_{agg} = \frac{1}{\psi_S \rho_S} S_{S0}$$ อ้างอิงสมการที่ (3.8)

$$S_{agg} = 74095.5$$ ตร.ซม./กก.

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทรายตามสมการที่ (3.7)

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

$$\beta'_{agg} = 0.063$$

ข.3 การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีเมนต์จากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลน (Specific surface Blaine value) คำนวณจาก

$$Av.dia = \frac{6}{\rho \cdot SSB}$$

เมื่อ ρ คือค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์

ซีเมนต์ที่ใช้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลน (SSB) = 2900 ตร.ซม./ ก.

คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย =0.00657 มม.

ข.4 คำนวณหาค่าโคออร์ดิเนชั่นต่ำสุดของซีเมนต์เพลสต์ ซึ่งในกรณีนี้คือในสภาวะแห้ง ตามสมการที่ (3.24) โดยที่คุณสมบัติของซีเมนต์ดังตารางที่ 3.1

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

$$k_{\min} = 4.83$$

ข.5 คำนวณหาค่าโคออร์ดิเนชั่นสูงสุดของซีเมนต์เพลสต์ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ =0.227 (ดังแสดงในรายการคำนวณข้อ 1)

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

$$k_{\max} = 7.54$$

ข.6 คำนวณหาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดที่มีผลให้อนุภาคห่างกัน 0.1d และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ดังสมการที่ (3.33)

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

แทนค่าทั้งหมด จะหา $\left(w/c\right)_{\max} = 0.32$

ข.7 การคำนวณหาพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

คำนวณหาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคซึ่งอยู่ในรูปไร้หน่วยตามสมการ (3.17) และ (3.18)

มุม α ที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่ามุมที่ให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์ที่ระยะ 0.1d คือ

$\alpha = 11.3^{\circ}$ (รูปที่ 3.8)

สำหรับมุม δ นั้น Stitmannaithum [1] เสนอให้ $\delta = 0^{\circ}$

ตัวอย่างการคำนวณหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (สมการที่ (3.21) และ (3.22)) ที่ได้จากการแทนค่าต่าง ๆ เป็นดังนี้

กำหนดให้

ค่าแรงตึงผิว (T)ของน้ำมีค่า = 65 มิลลินิวตัน / เมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีเมนต์ (d)=0.000657 ซม.

สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์และค่าโคออร์ดิเนชั่น (k)ดังรายการคำนวณข้างต้น

w/c	k	a/d	$F = F_{HK} + F_{HR}$ Non dimension		$H = F \cdot d \cdot T$ (N)	σ_z (N/cm^2)
			F_{HK}	F_{HR}		
0	4.83	0.000	0.0000	0.0000	0	0
0.1	6.12	0.000	2.7159	0.1206	1.21×10^{-6}	1.36×10^{0}
0.198	7.39	0.000	2.7159	0.1206	1.21×10^{-6}	3.84×10^{0}
0.2015	7.43	0.000	2.7159	0.1206	1.21×10^{-6}	3.95×10^{0}
0.2069	7.50	0.000	2.7159	0.1206	1.21×10^{-6}	4.12×10^{0}
0.2074	7.51	0.000	2.7159	0.1206	1.21×10^{-6}	4.14×10^{0}
0.218	7.64	0.000	2.7159	0.1206	1.21×10^{-6}	4.48×10^{0}
0.22	7.67	0.000	2.7159	0.1206	1.21×10^{-6}	4.55×10^{0}
0.243	7.67	0.024	0.9821	0.1206	4.71×10^{-7}	1.70×10^{0}
0.26	7.67	0.042	0.5493	0.1206	2.86×10^{-7}	1.00×10^{0}
0.28	7.67	0.063	0.2481	0.1206	1.57×10^{-7}	5.32×10^{-1}
0.30	7.67	0.084	0.0296	0.1206	6.41×10^{-8}	2.10×10^{-1}
0.32	7.67	0.100	-0.1206	0.1206	0	0

การเปลี่ยนค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของซีเมนต์เพสต์เป็นพลังงานการผสมเป็นดังนี้

$$E_w = K'\sigma_z$$ อ้างอิงสมการที่ (3.35)

โดยที่ค่า K' ของเครื่องผสมชนิดใบพายไม่เป็นค่าคงที่ จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ พบว่าสามารถประมาณค่า K' ได้ด้วยสมการพหุนามกำลังสองดังนี้ $K' = 22.48(w/c)^2 - 5.10(w/c) + 0.65$

ข.8 ตัวอย่างการคำนวณหาแรงผลักเนื่องจากสารลดน้ำอย่างมาก

สมการค่าตัวประกอบแรงผลักเป็นดังนี้

$$\phi_{rep} = \left(1 + a\left(\frac{w}{c}\right)_{free}^{m}\right)$$ (อ้างอิงสมการที่ 3.59)

$$a = -0.054 + 0.217\%_{SP} - 0.134\%_{SP}^{2}$$

$$m = -1.461 + 2.232\%_{SP} - 1.325\%_{SP}^{2}$$

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

สำหรับผลการคำนวณโดยการแทนค่าต่าง ๆ ในสมการที่ (3.52) เป็นดังนี้

$\frac{w}{c}$	$\%_{SP}$	$\left(\frac{w}{c}\right)_{free}$	ϕ_{rep}
0.198	1.2	0.005	1.521
0.218	0.4	0.006	1.615
0.260	0.6	0.056	1.157
0.280	0.8	0.081	1.126
0.280	1.0	0.085	1.114
0.300	0.4	0.088	1.076
0.300	1.0	0.105	1.101

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดการทดสอบ

ค.1 วิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง

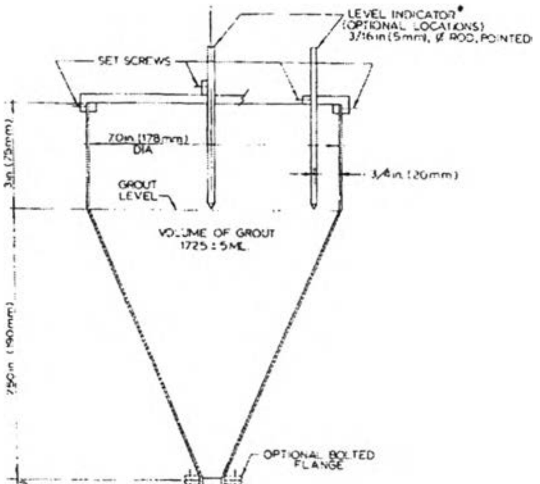
1. การทดสอบจะเริ่มจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงน้อย ๆ ซึ่งแน่นอนว่าค่ายุบตัวที่ได้จะเป็นศูนย์ โดยการทดสอบถูกกระทำ โดยใส่เพสต์ที่ปริมาตรประมาณ 1/3 ของแบบ (แบบชนิดกรวยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ด้านบนและล่าง 40±3 มม. และ 90±3 มม. ตามลำดับ และมีความสูง 75±3 มม. ซึ่งเป็นกรวยมาตรฐานสำหรับหาค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งของทรายตามมาตรฐาน ASTM C128 - 93) กระทุ้งเบา ๆ 25 ครั้ง

2. จากนั้นใส่เพสต์ลงไปอีก 2 ชั้นและกระทุ้งจนกระทั่งเต็มแบบ หลังจากนั้นยกแบบขึ้นอย่างช้า ๆ และวัดค่ายุบตัวของเพสต์ ทำทั้งหมดซ้ำโดยเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง จนกระทั่งเกิดค่ายุบตัวเริ่มต้น ซึ่งอัตราส่วนที่ทำให้เกิดค่ายุบตัวเริ่มต้นคือค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ

ค.2 วิธีการทดสอบหาระยะเวลาการไหลตามมาตรฐาน ASTM C939-94a

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. กรวยการไหล ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ ดังรูปที่ ค.1



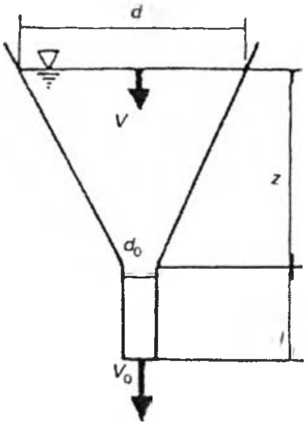
รูปที่ ค.1 กรวยการไหล

2. นาฬิกาจับเวลา

วิธีการทดสอบ

ก่อนการทดสอบต้องทำให้ผิวด้านในของกรวยชื้นด้วยการใส่น้ำและปล่อยให้ไหลออกที่ท่อปลายทุกครั้ง หาวัสดุปิดปลายท่อหรืออาจใช้นิ้วก็ได้ ใส่ซีเมนต์เพสต์หรือเกราท์ที่ต้องการทดสอบลงไปจนถึงขอบซึ่งจะต้องใช้ซีเมนต์เพสต์หรือเกราท์ปริมาตร 1725±5 มิลลิลิตร แต่เพื่อการประหยัด ในงานวิจัยนี้ จึงใช้ปริมาตรการทดสอบประมาณ 1000 มิลลิลิตร เริ่มจับเวลาพร้อมกับปล่อยวัสดุปิดปลายท่อหรือนิ้ว หยุดนาฬิกาเมื่อมีการขาดครั้งแรกของการไหลต่อเนื่องจากปลายท่อ ระยะเวลา ที่ได้คือระยะเวลาการไหล

วิธีกรวยการไหลเป็นวิธีการทดสอบหาค่าระยะเวลาการไหลของเกราท์ ซึ่งระยะเวลาการไหลที่ได้จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนืด สำหรับความสัมพันธ์ของระยะเวลาการไหลและค่าความหนืดนั้น Murata and Suzuki [38] อธิบายโดยใช้พลังงานที่ผิวของเกราท์ในกรวยการไหลและของเกราท์ที่ปลายออก (ดังรูปที่ ค.2) ดังนี้



รูปที่ ค.2 วิธีกรวยการไหล (Flow cone Method) [38]

$$\frac{\rho V^2}{2} + \rho g(z+l) = \frac{\rho V_0^2}{2} + f_m \frac{\rho V_0^2}{2} + \rho g h_l \qquad (ค.1)$$

โดยที่

V คือ ความเร็วตก (Falling velocity) ของผิวของเหลว (ซม. / วินาที)

V_0 คือ ความเร็วการไหลในท่อเปิด (ซม. / วินาที)

ρ คือ หน่วยน้ำหนักของเกราท์ (ก. / ลบ.ซม)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (ซม. / วินาที ^{2})

z คือ ความสูงของผิวของเหลว (ซม.)

l คือ ความยาวของท่อเปิด (ซม.)

f_m คือ ค่าความสูญเสีย (Loss factor)

h_l คือ ความดันสูญเสีย (Head loss) ในท่อเปิด (ซม.)

ถ้ากำหนดให้ความเอียงลาดพลังงาน (Energy Gradient) , I ถูกกำหนดโดย

$$h_l = lI \qquad (ค.2)$$

Buckingham – Reiner [35] เสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการไหลและความเอียงลาดพลังงาน (Energy Gradient) ของการไหลผ่านท่อดังนี้

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta_{pl}} \rho g I E \qquad (ค.3)$$

$$E = 1 - \frac{4}{3}\left(\frac{r_0}{R}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{r_0}{R}\right)^4 \qquad (ค.4)$$

โดยที่

Q คือ ปริมาตรการไหล (ลบ.ซม./วินาที)

η_{pl} คือ ความหนืดพลาสติก (Plastic Viscosity) ของเกราท์ (ปาสคาลวินาที, Pa·s)

R คือ รัศมีของท่อเปิด (ซม.)

r_0 คือ รัศมีของการไหลอุด (Plug Flow) $= 2\tau_f / gI$ เมื่อ τ_f คือหน่วยแรงคลาก (Yield Stress) (ปาสคาล,Pa)

จากความสัมพันธ์ $Q = VA$ (A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตร.ซม.)) จะได้

$$V_0 = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{R^2 \rho g I}{8\eta_{pl}} E \qquad (ค.5)$$

$$I = \frac{8\eta_{pl}}{R^2 \rho g E} V_0 \qquad (ค.6)$$

แทนค่าสมการที่ (ค.6) ในสมการที่ (ค.2)

$$h_l = \frac{8\eta_{pl}}{R^2 \rho g E} l V_0 = \frac{1}{K} V_0 \qquad (ค.7)$$

เมื่อ $K = R^2 \rho g E / 8\eta_{pl}$

จัดรูปสมการที่ (ค.1) โดยแทนที่ $V = (d_0/d)^2 V_0$ (เมื่อ d และ d_0 คือเส้นผ่าศูนย์กลางที่ผิวของเหลวและท่อเปิด ตามลำดับ) และพิจารณาร่วมกับสมการที่ (ค.7) ดังนี้

$$\left[1 + f_m - \left(\frac{d_0}{d}\right)^4\right] \frac{V_0^2}{2} + \frac{gl}{K} V_0 - g(z + l) = 0 \qquad (ค.8)$$

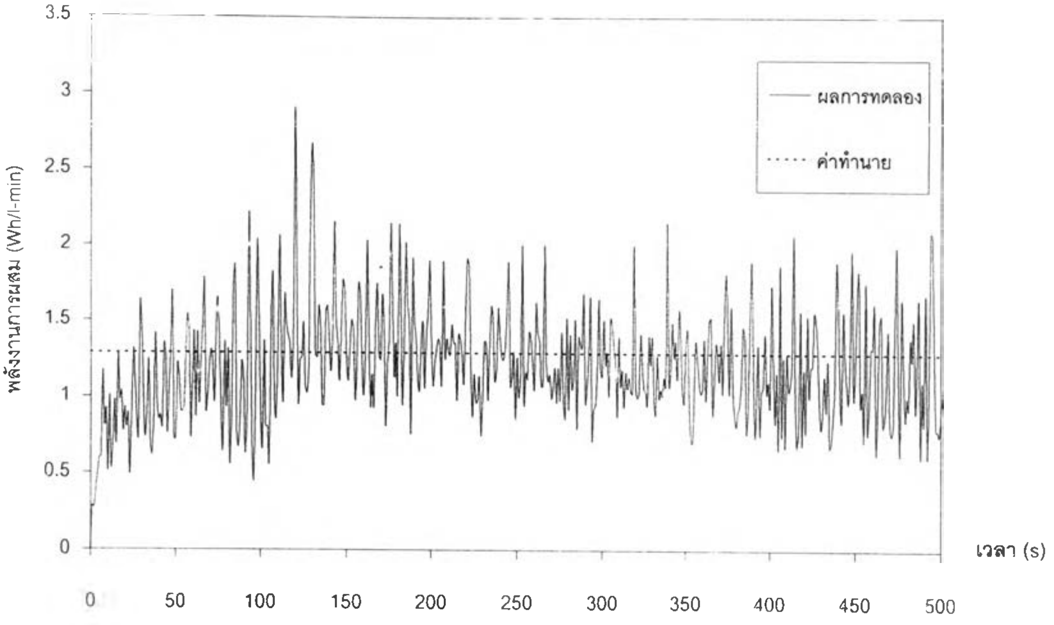
$$V_0 = -\frac{1}{F}\frac{gl}{K} + \sqrt{\left(\frac{gl}{K}\right)^2 \left(\frac{1}{F}\right)^2 + \frac{2g(z + l)}{F}} \qquad (ค.9)$$

เมื่อ $F = 1 + f_m - (d_0/d)^4$

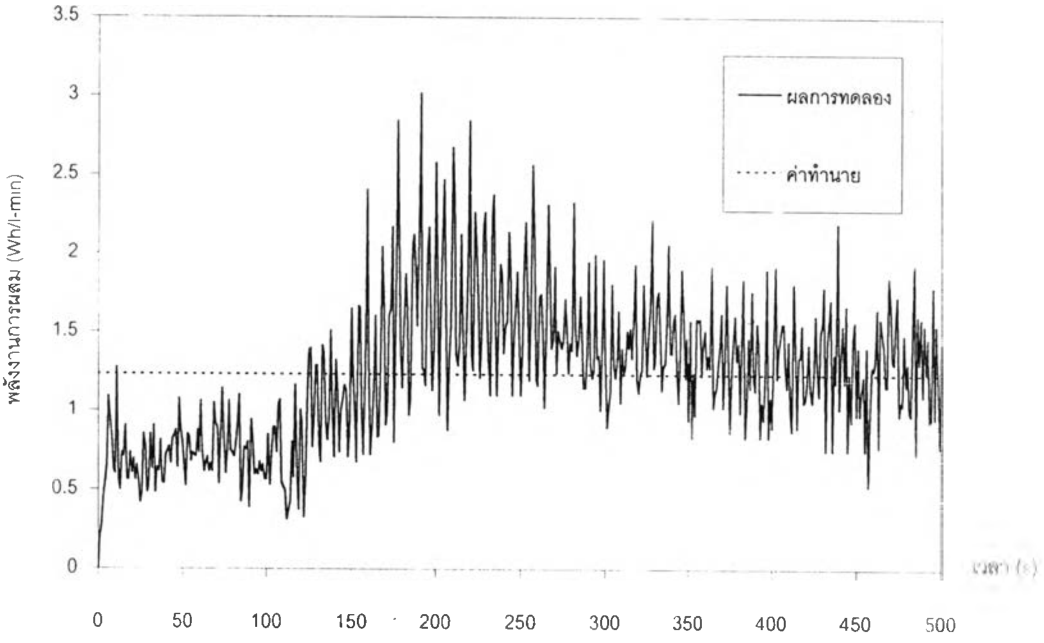
สำหรับการทดสอบโดยใช้กรวยการไหลนั้น จะได้ผลการทดลองเป็นระยะเวลาการไหล (Flow Time) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วการไหลและค่าความหนืดของเกราท์

ภาคผนวก ง.

ผลการทดลอง

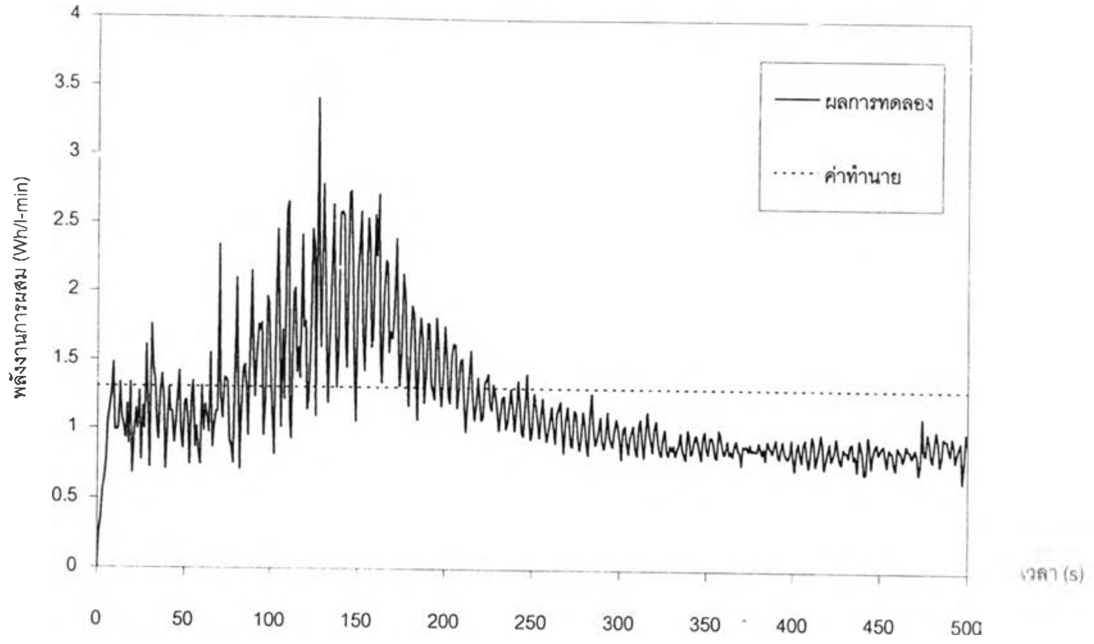


(ก.) พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ w/c=0.218, %SP=0.4%

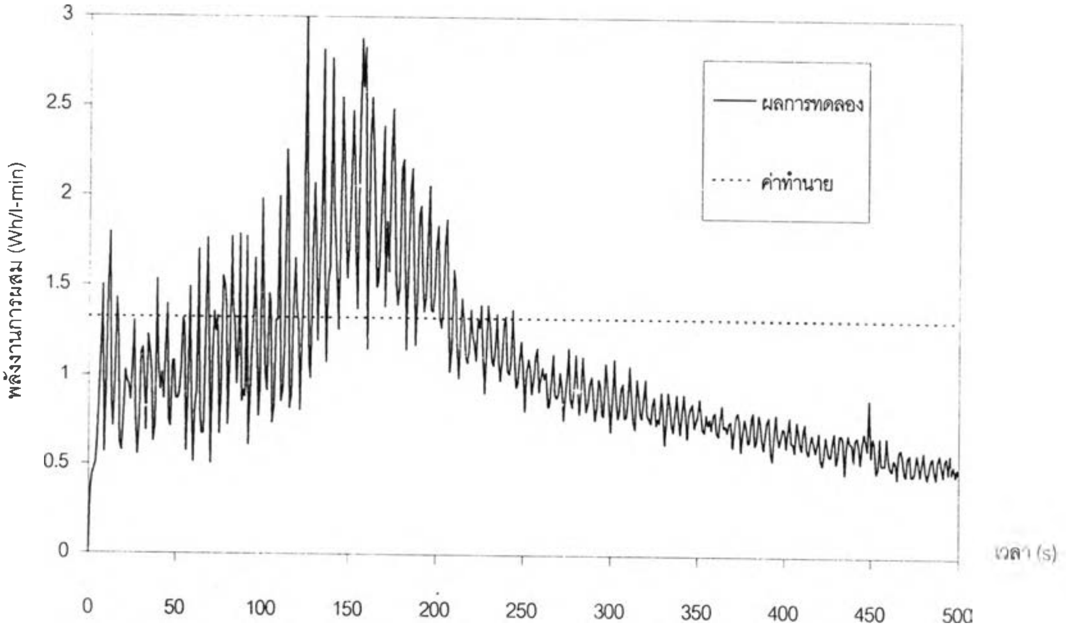


(ข.) พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ w/c =0.2074 และ %SP=0.6%

รูปที่ ง.1 เปรียบเทียบผลการทดลองและค่าทำนายพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์

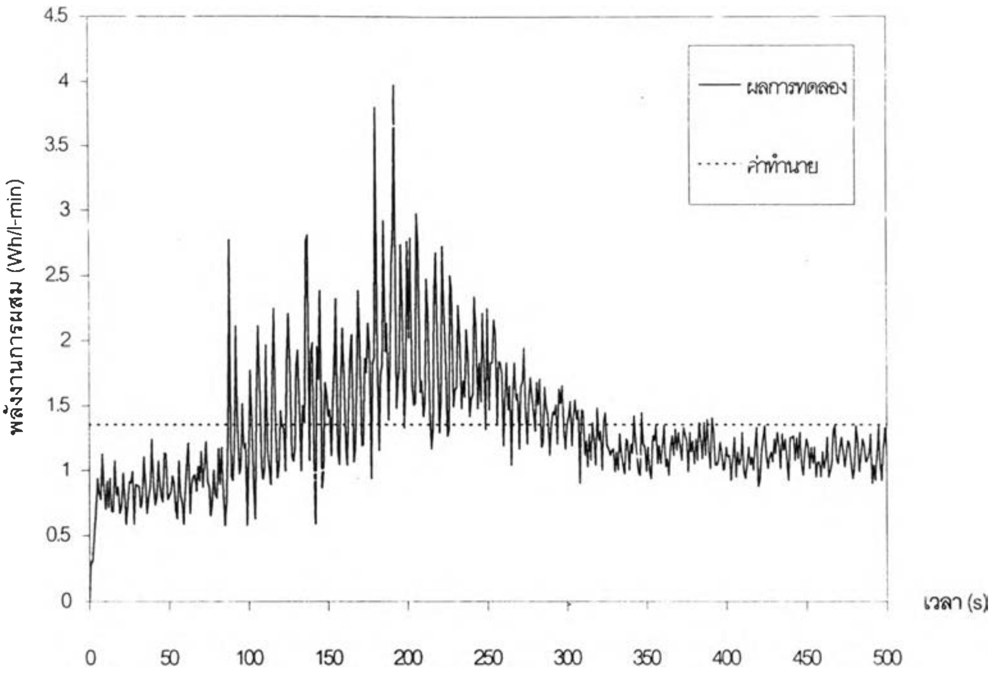


(ก.) พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ w/c =0.2069 และ %SP=0.8%

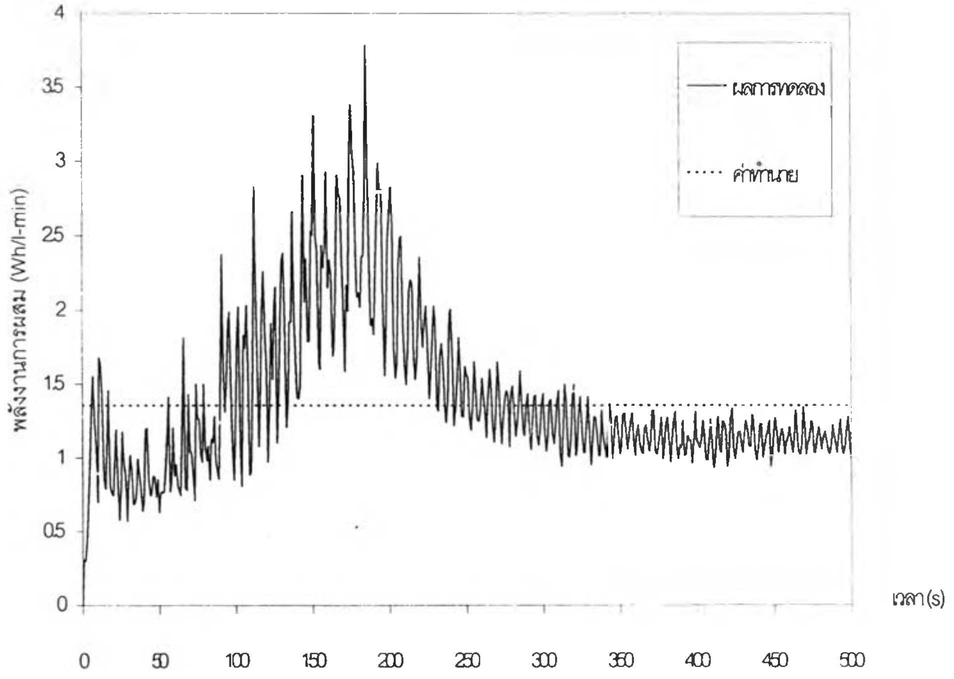


(ข.) พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ w/c =0.2015 และ %SP=1.0%

รูปที่ ง.2 เปรียบเทียบผลการทดลองและค่าทำนายพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์

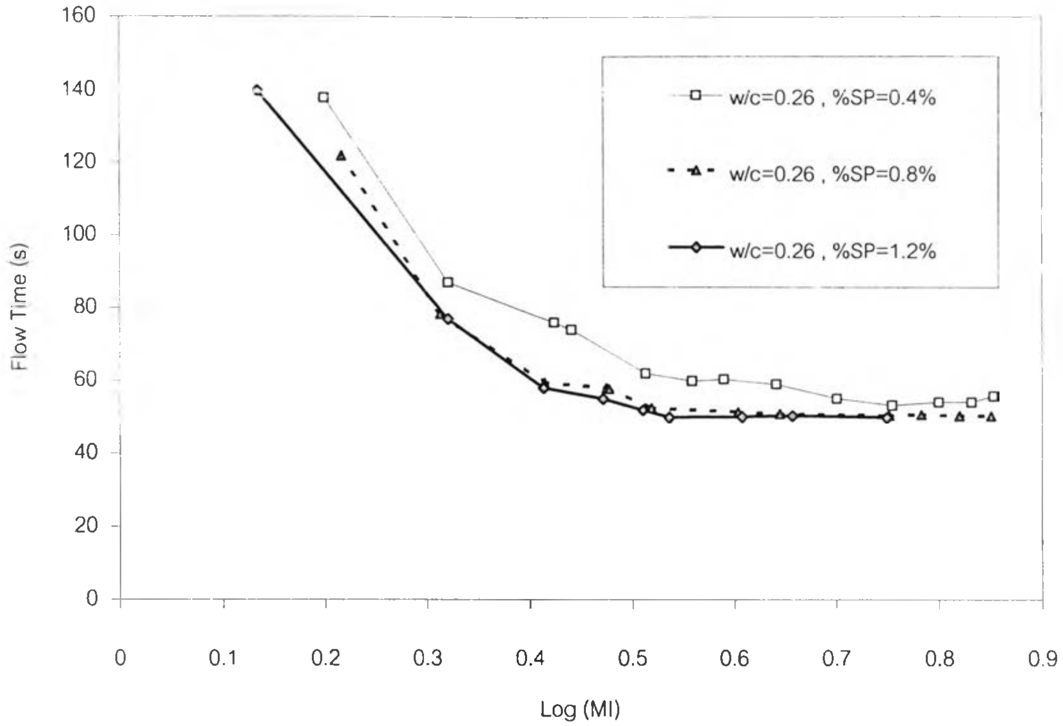


(ก.) พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ w/c =0.198 และ %SP=1.2%

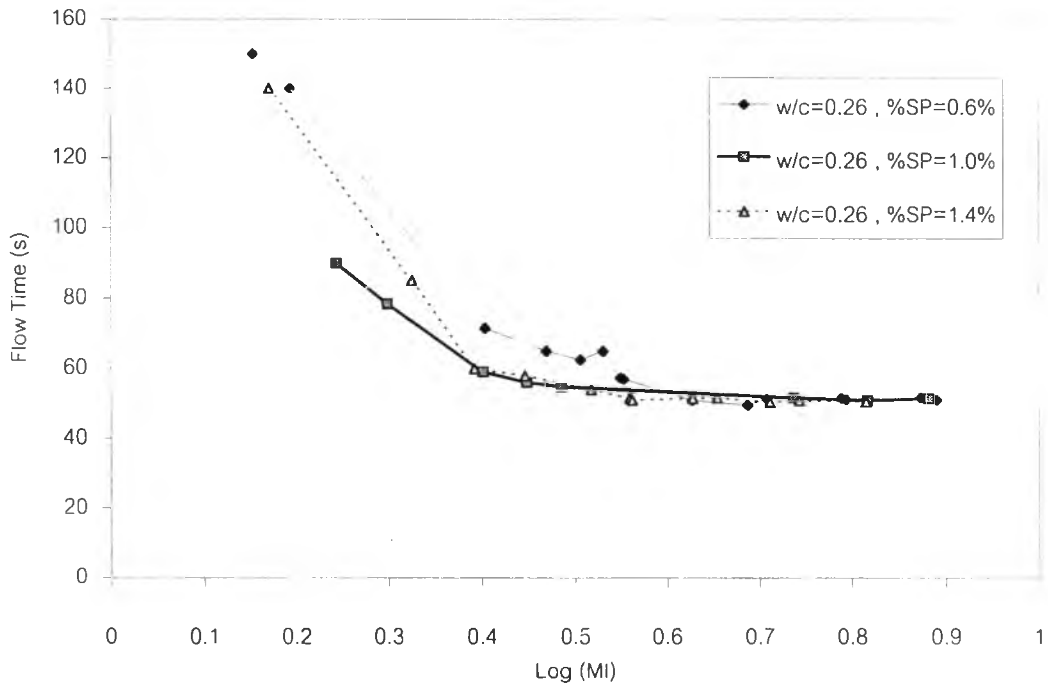


(ข.) พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ w/c =0.198 และ %SP=1.4%

รูปที่ ง.3 เปรียบเทียบผลการทดลองและค่าทำนายพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์

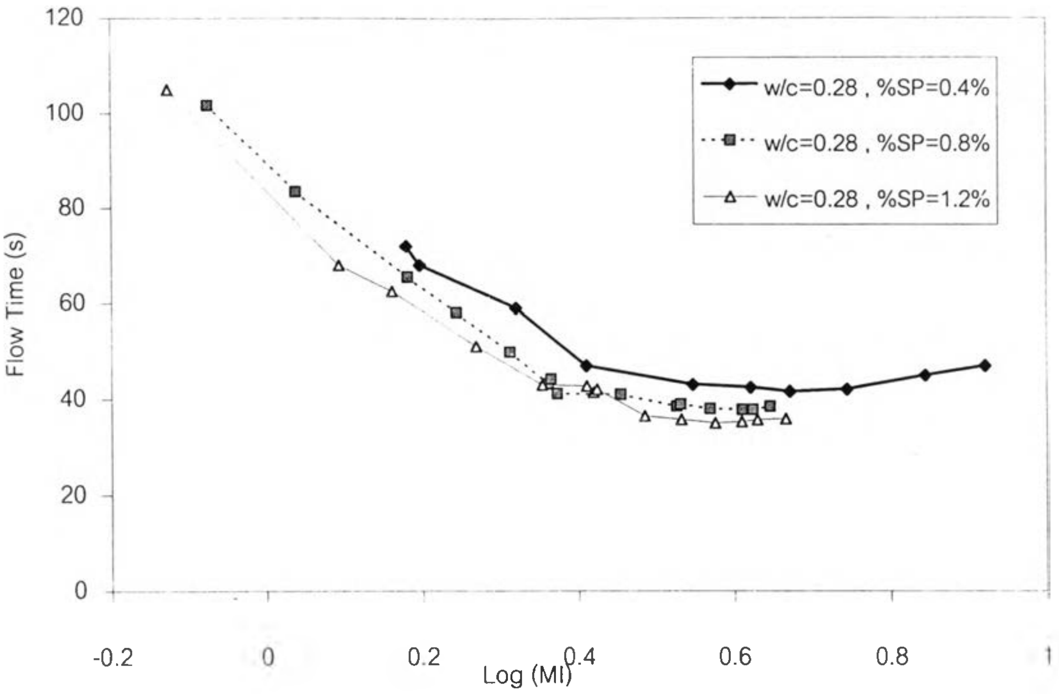


(ก.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

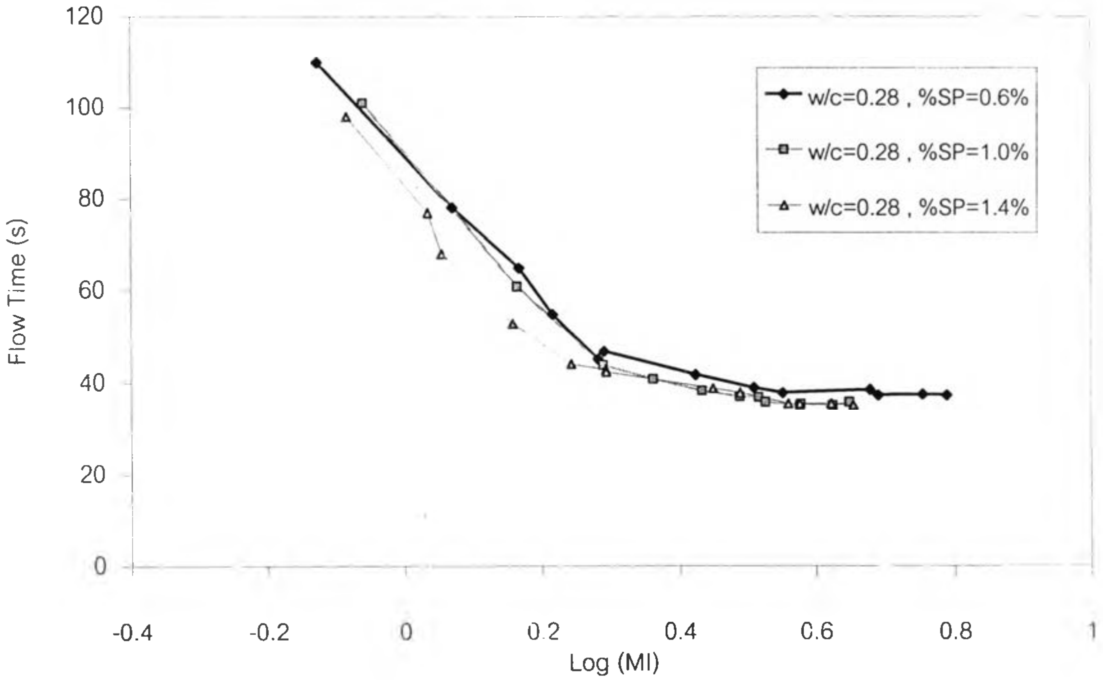


(ข.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.4 ผลการทดลองหาระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ของซีเมนต์เพสต์

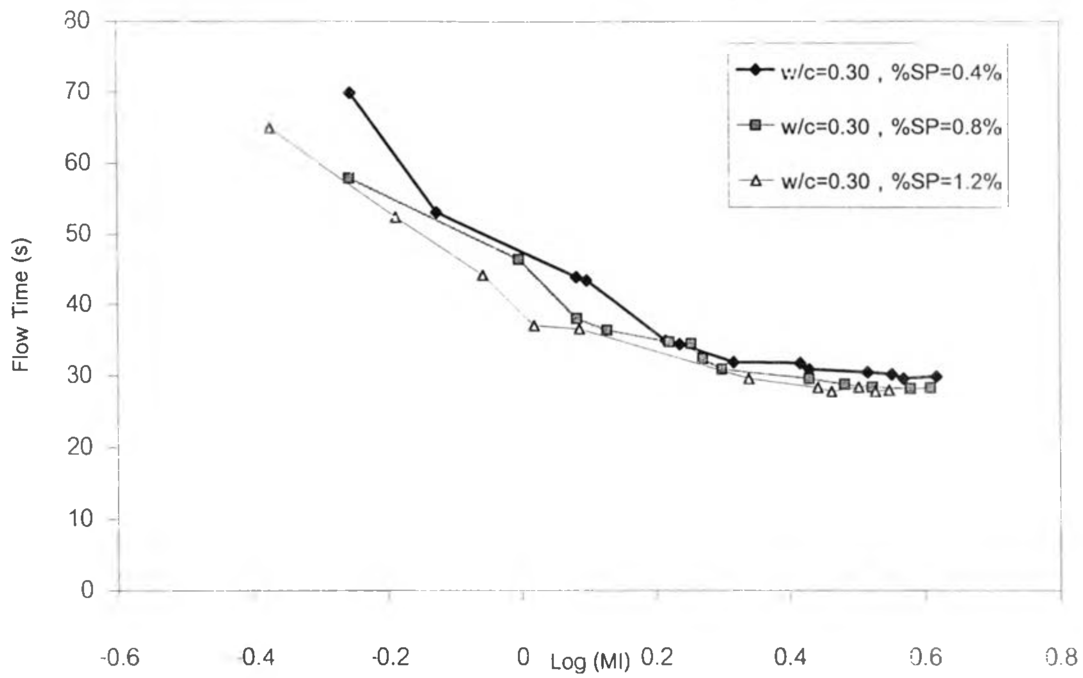


(ค.)ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

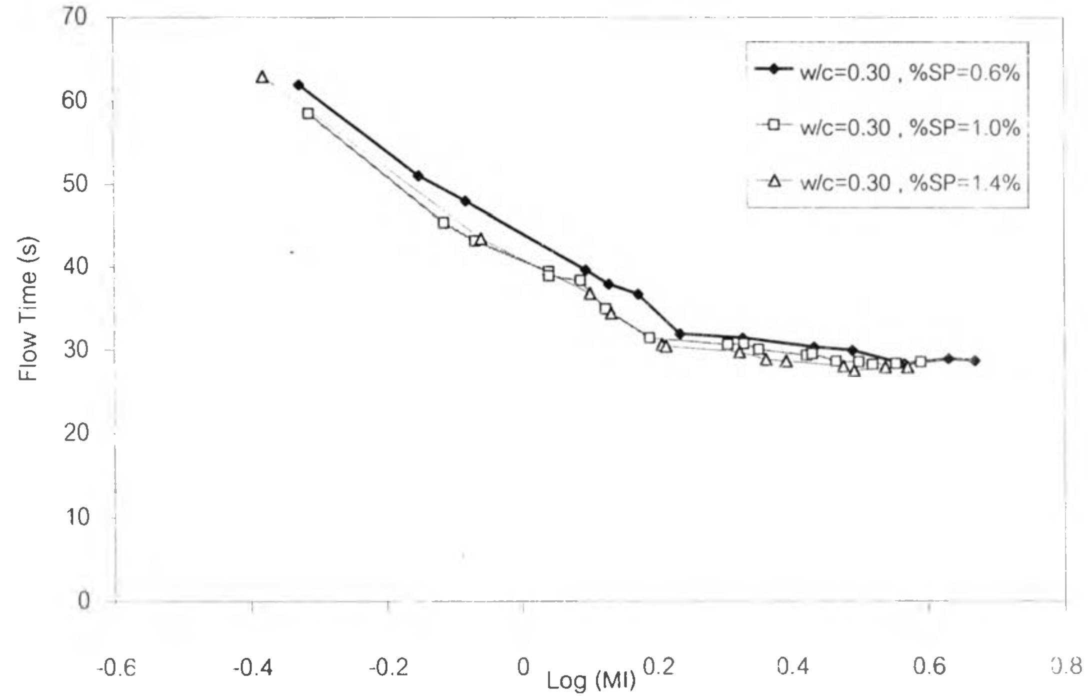


(ง.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.4 (ต่อ)

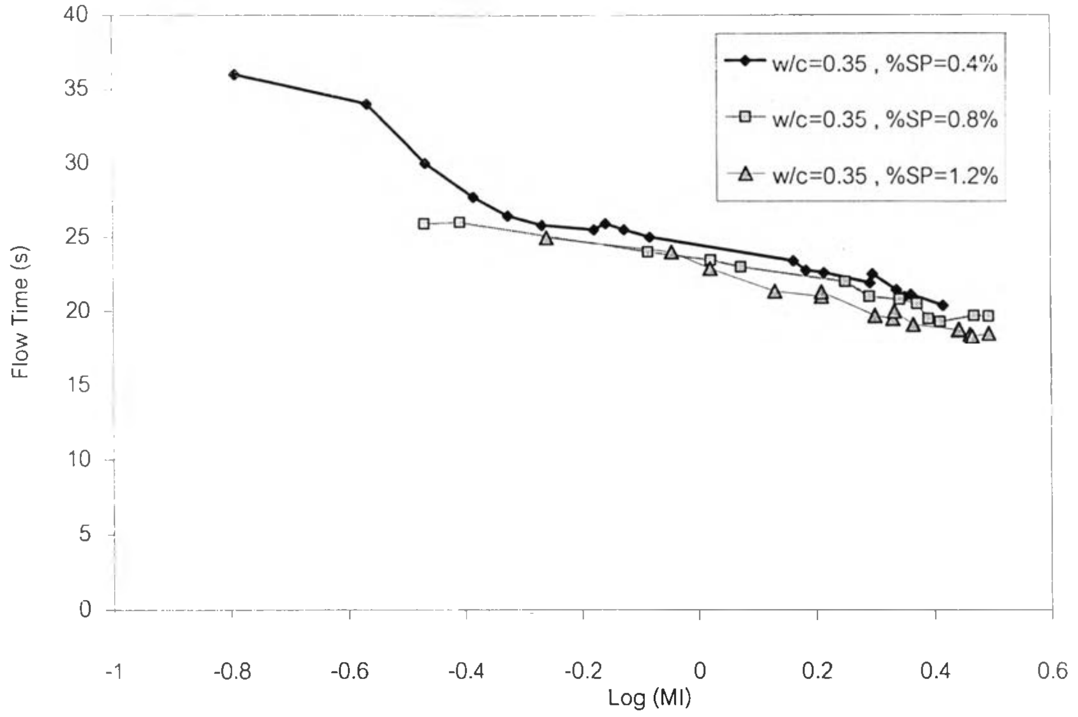


(จ.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

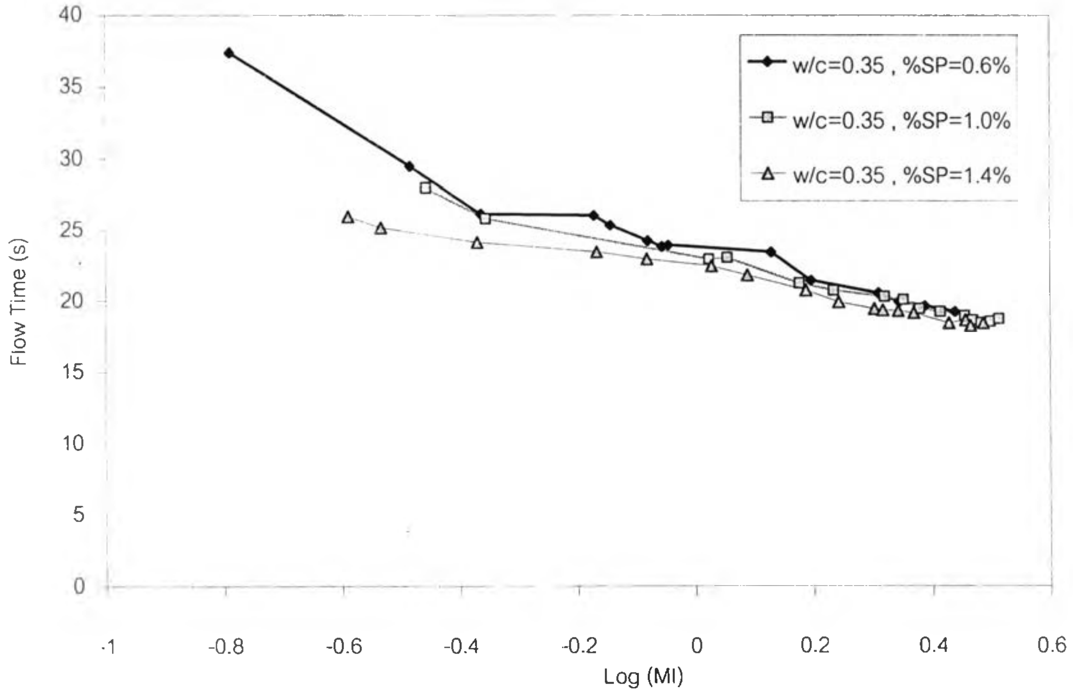


(ฉ.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.4 (ต่อ)

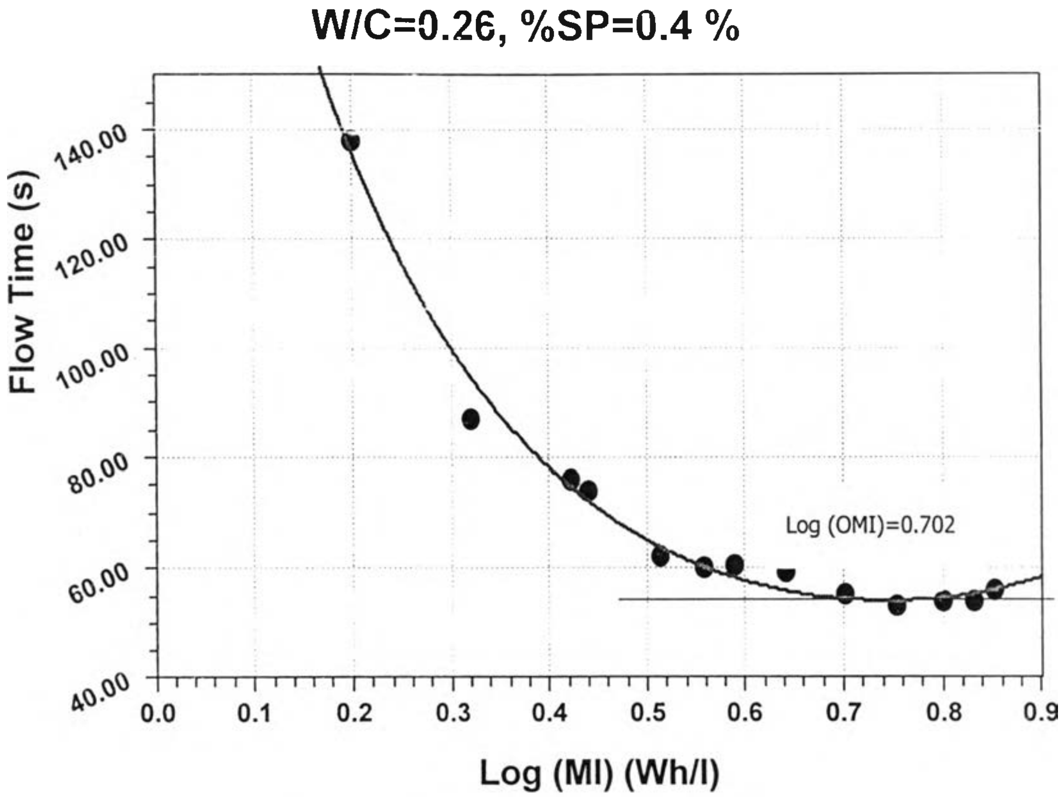


(ช.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

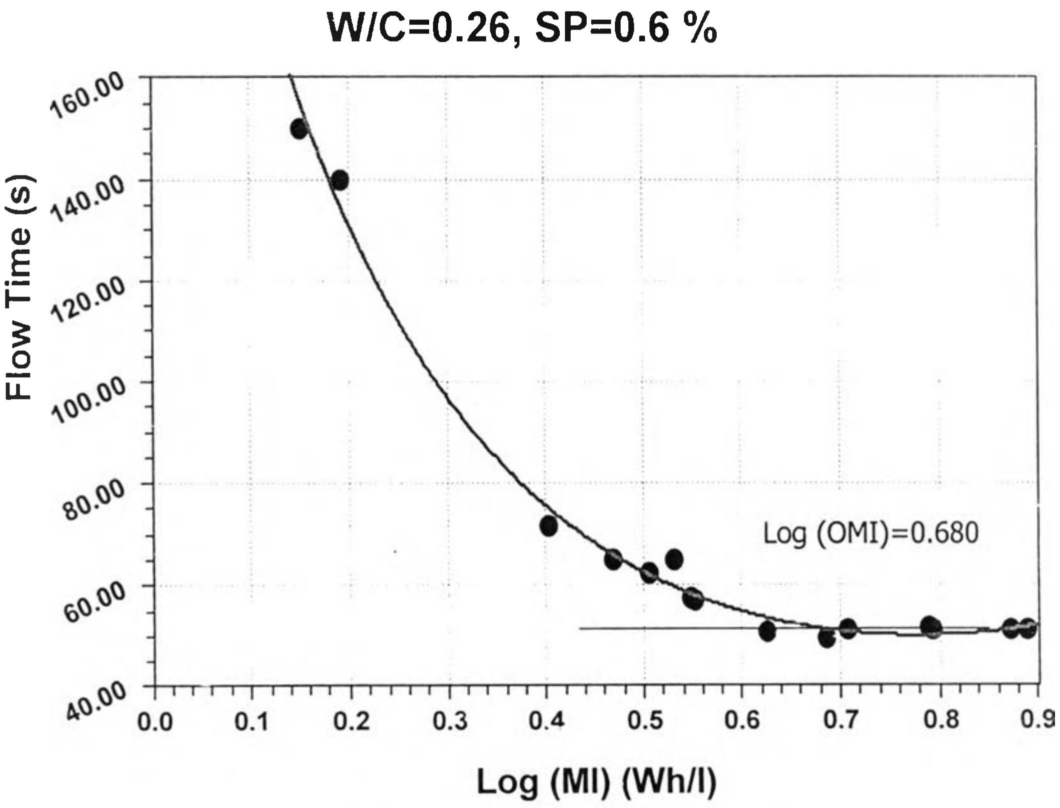


(ซ.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.4 (ต่อ)

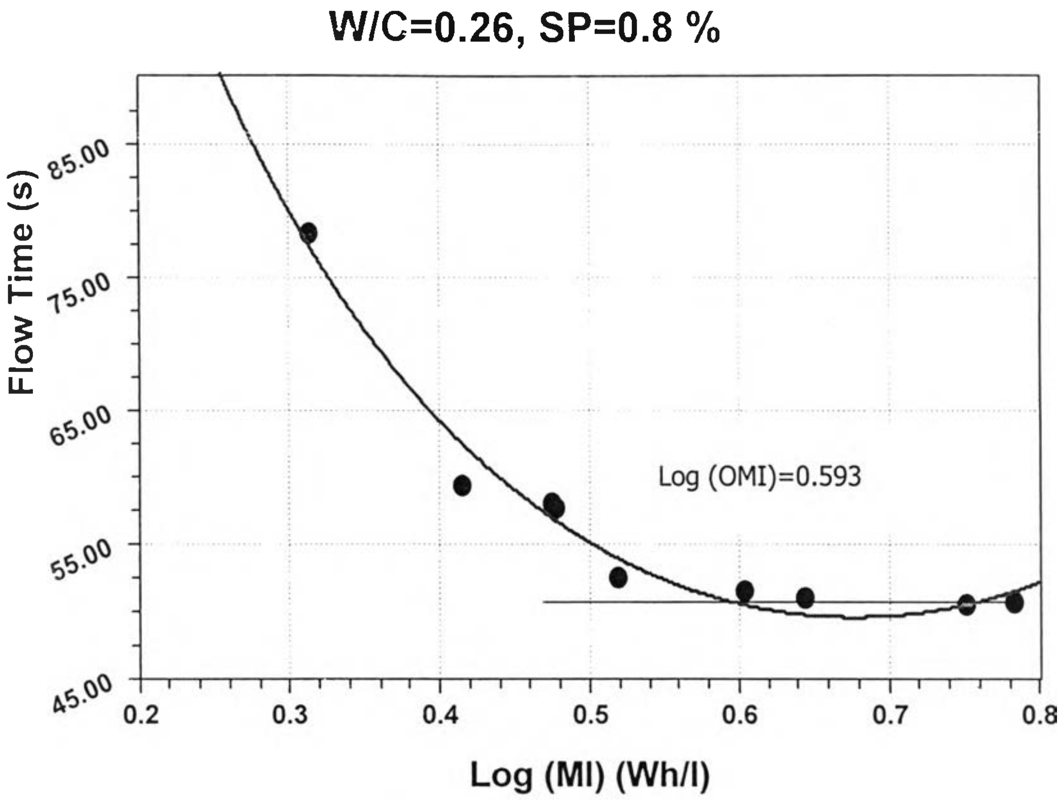


(ก.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

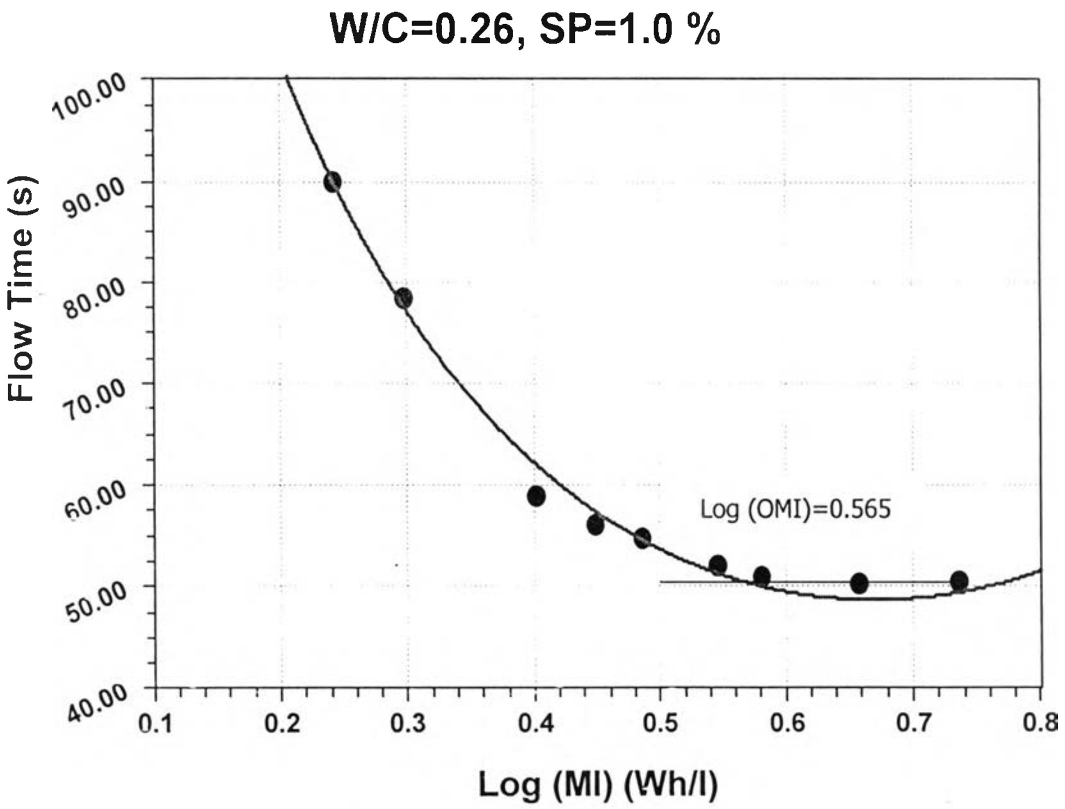


(ข.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ($w/c = 0.26$)

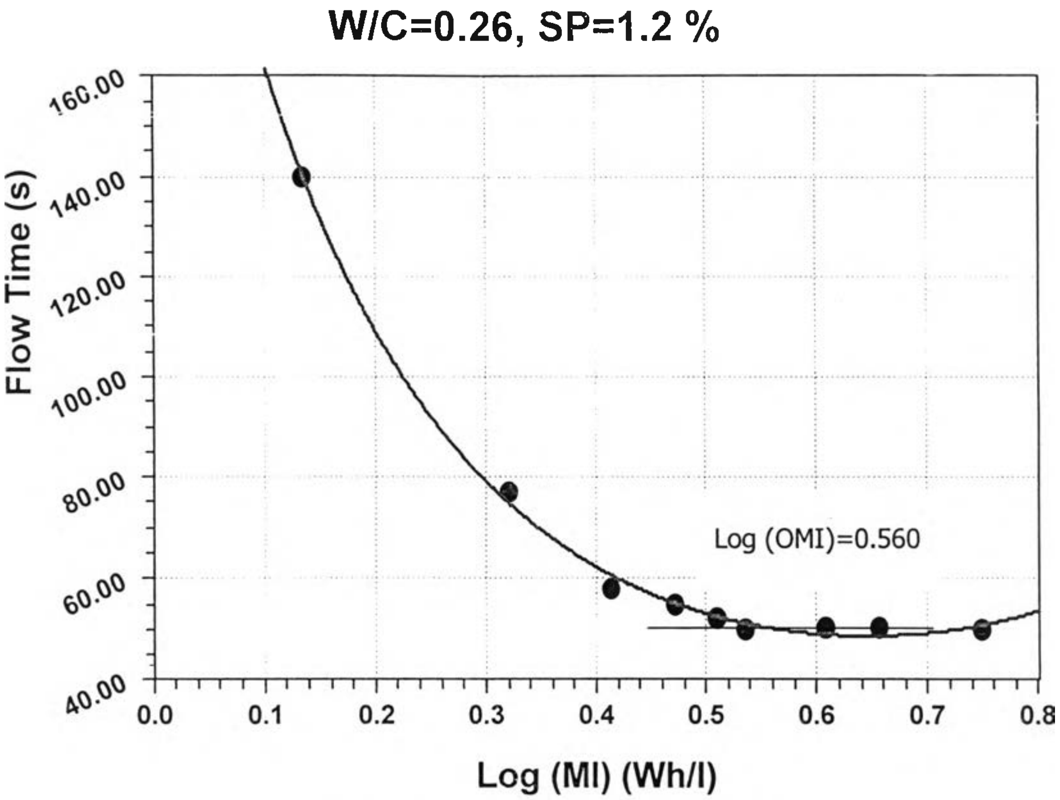


(ค.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

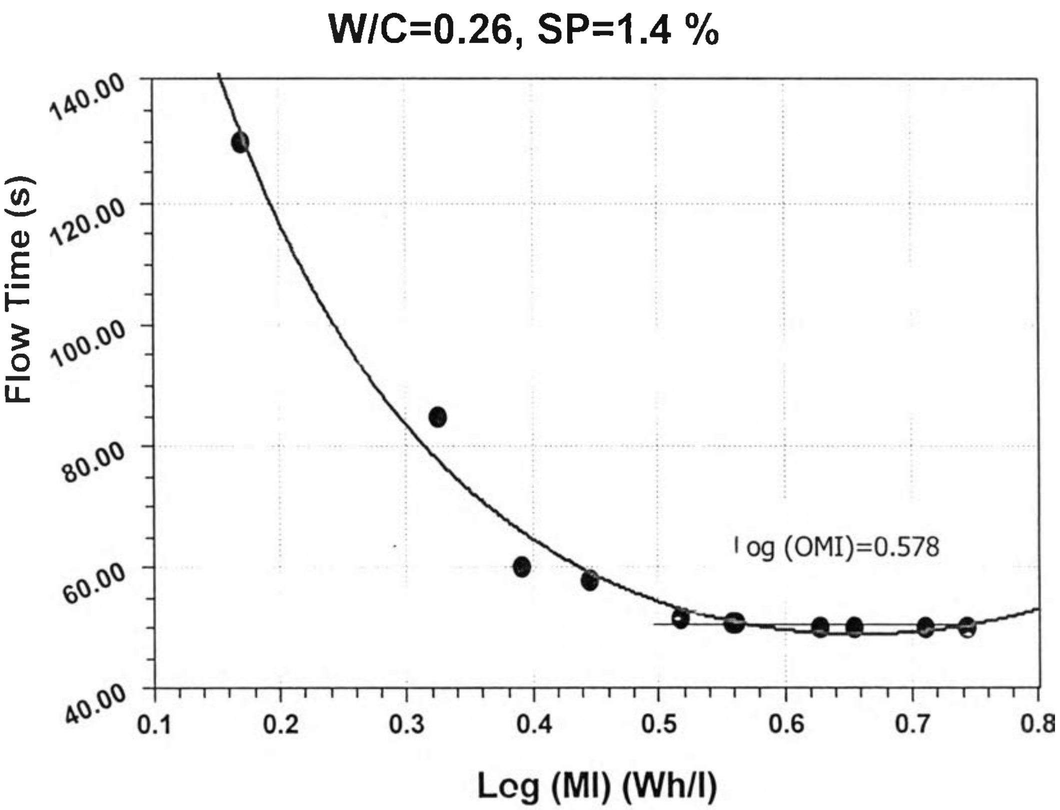


(ง.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.5 (ต่อ)

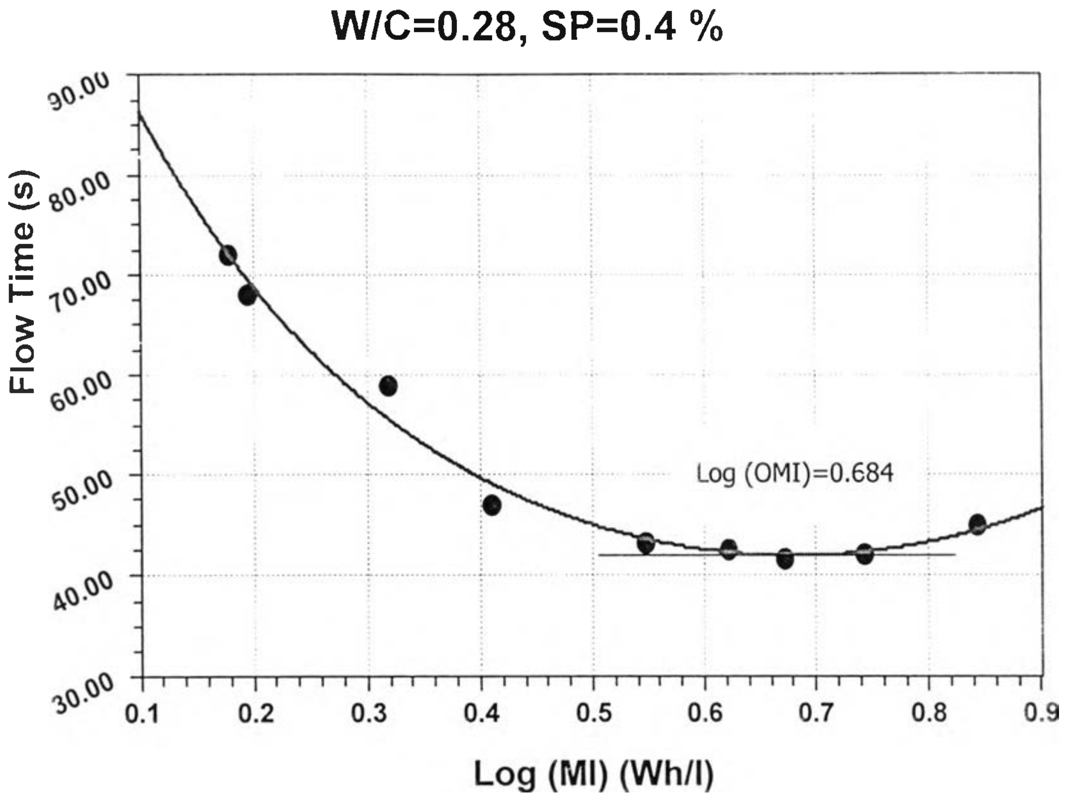


(จ.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

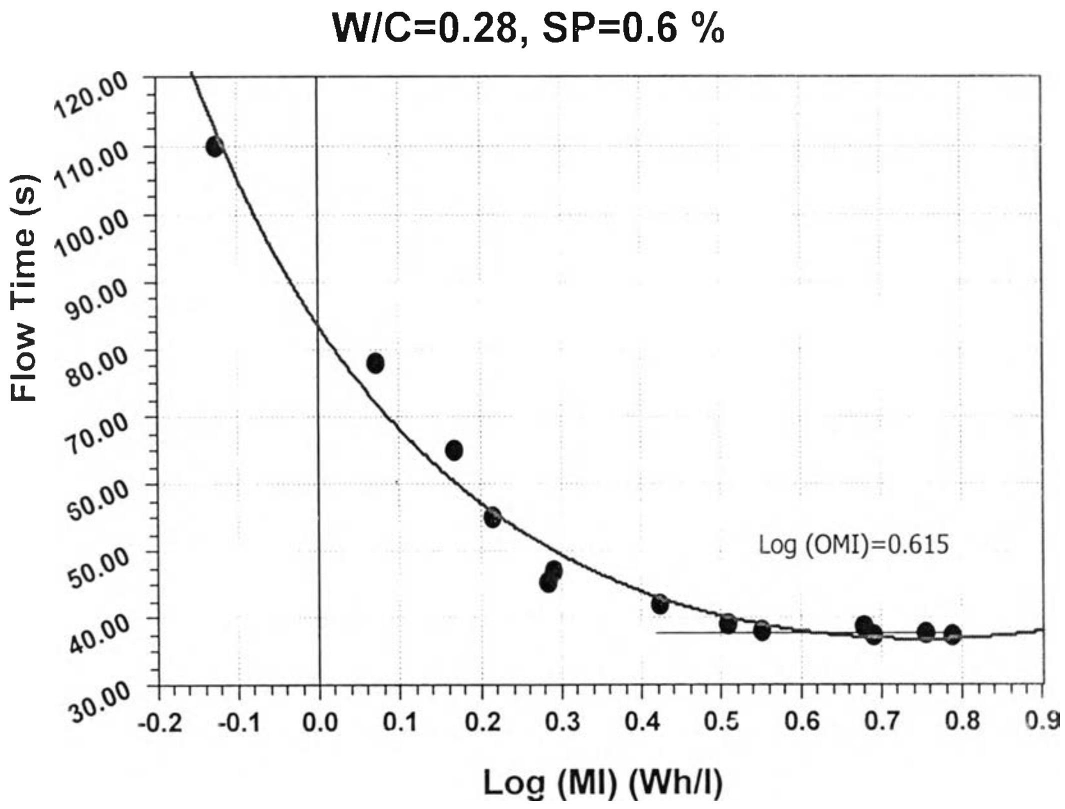


(ฉ.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.5 (ต่อ)

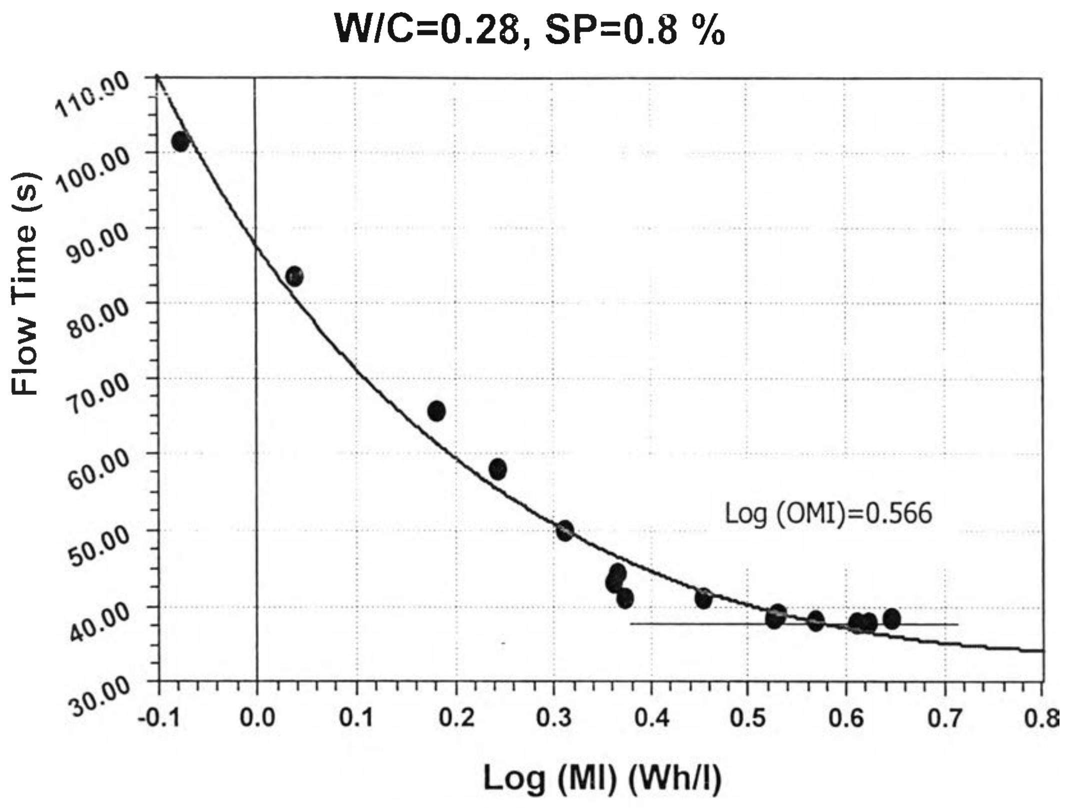


(ก.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

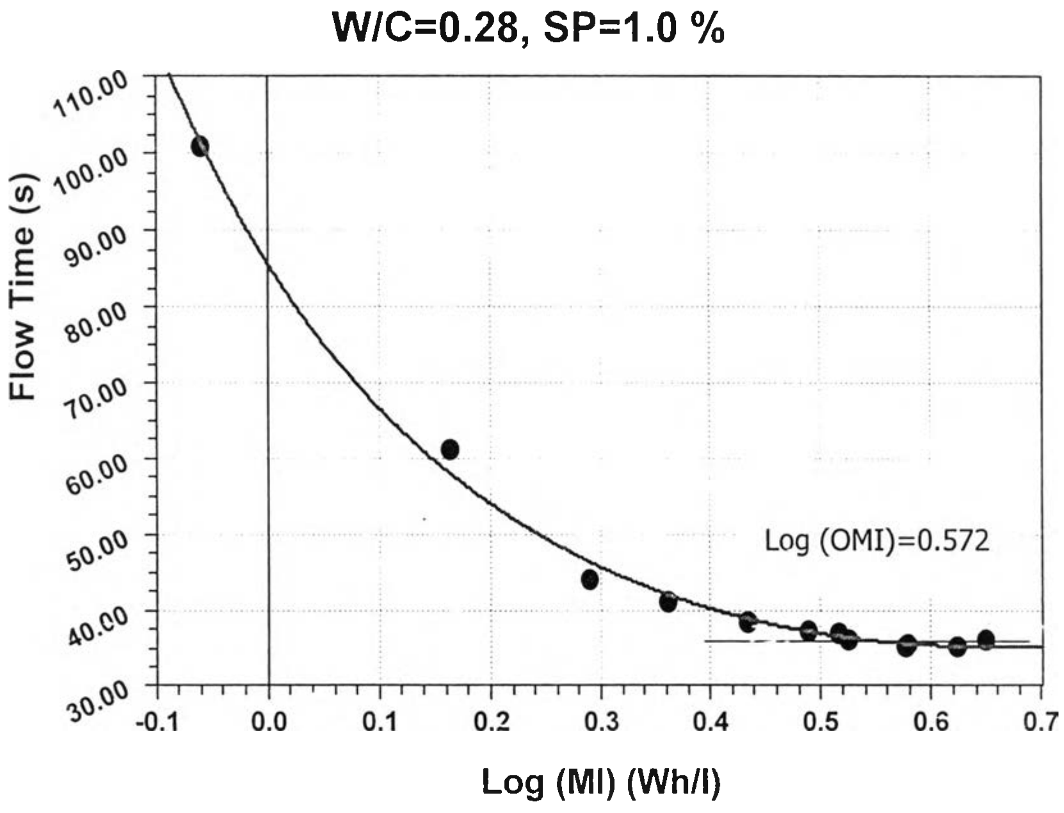


(ข.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ($w/c = 0.28$)

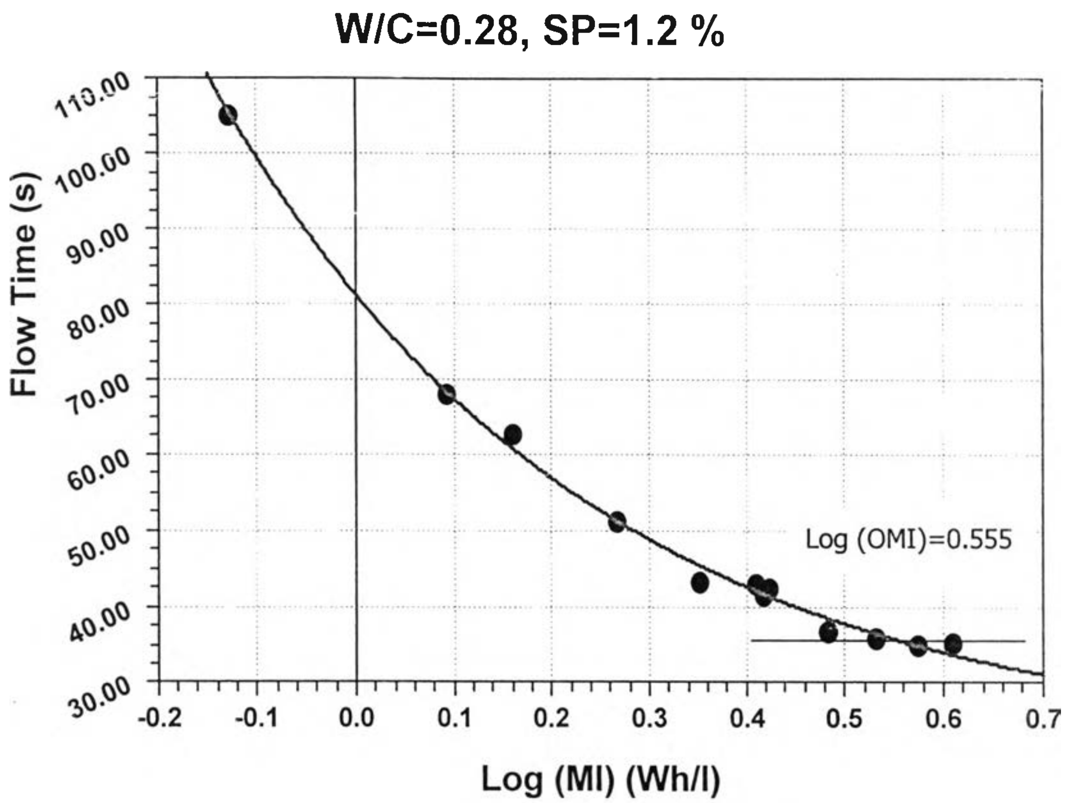


(ค.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

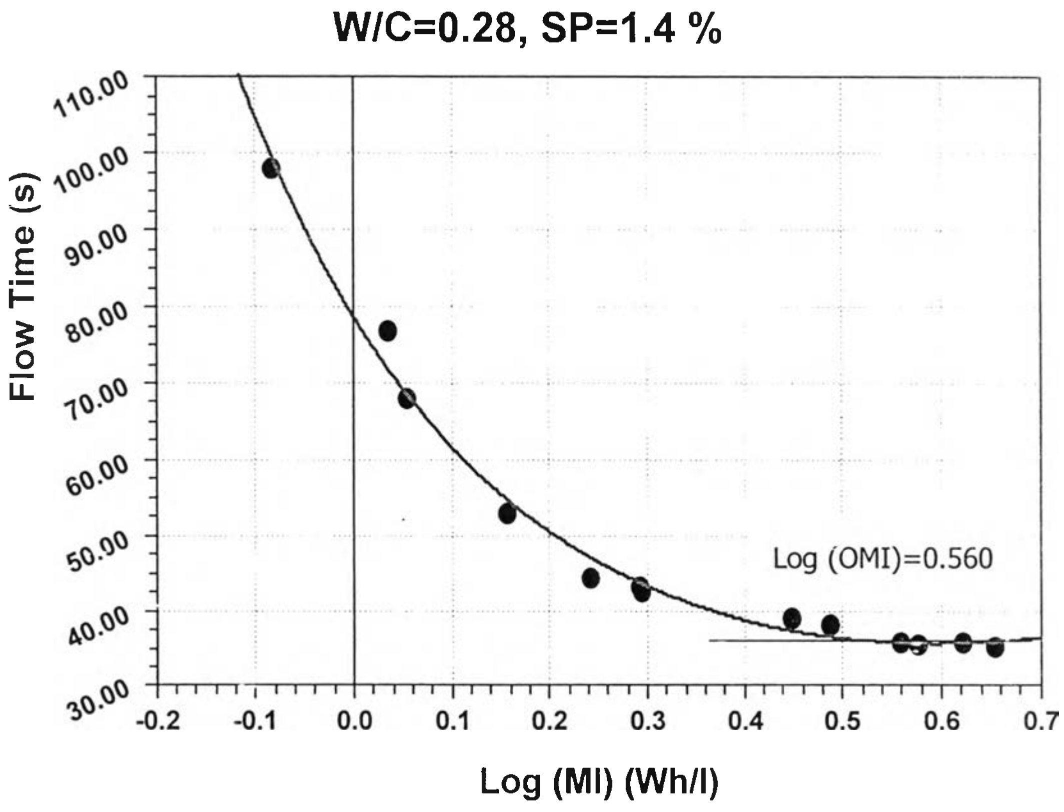


(ง.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.6 (ต่อ)

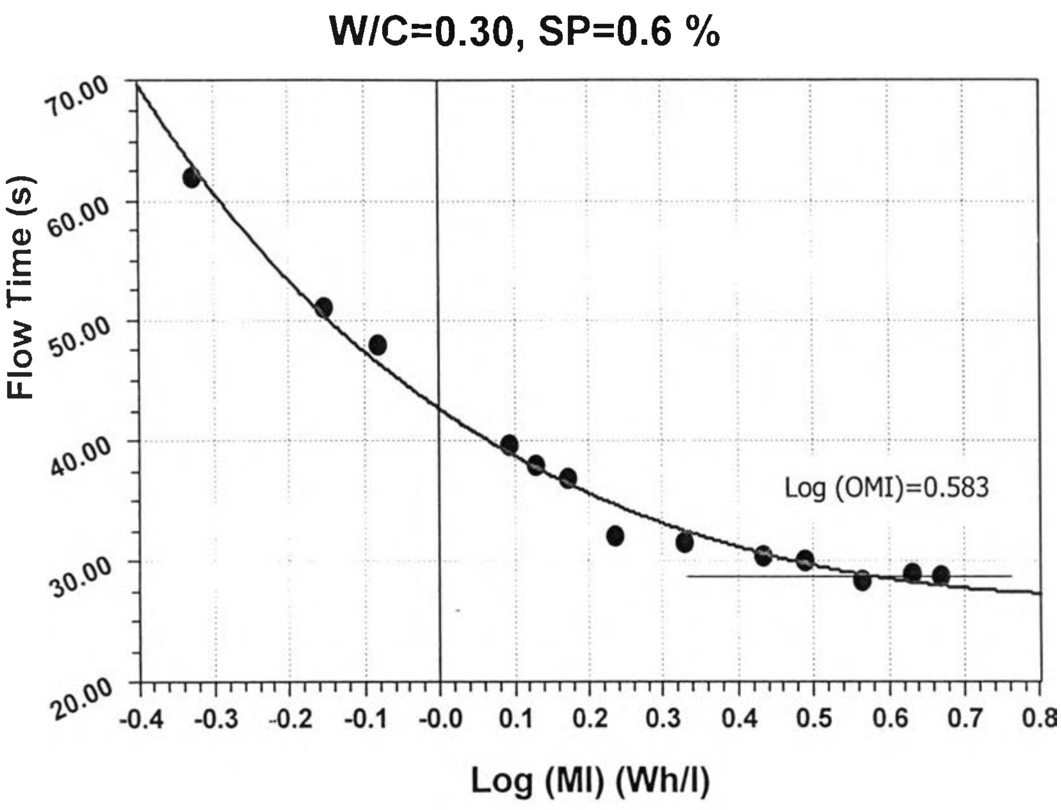


(จ.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

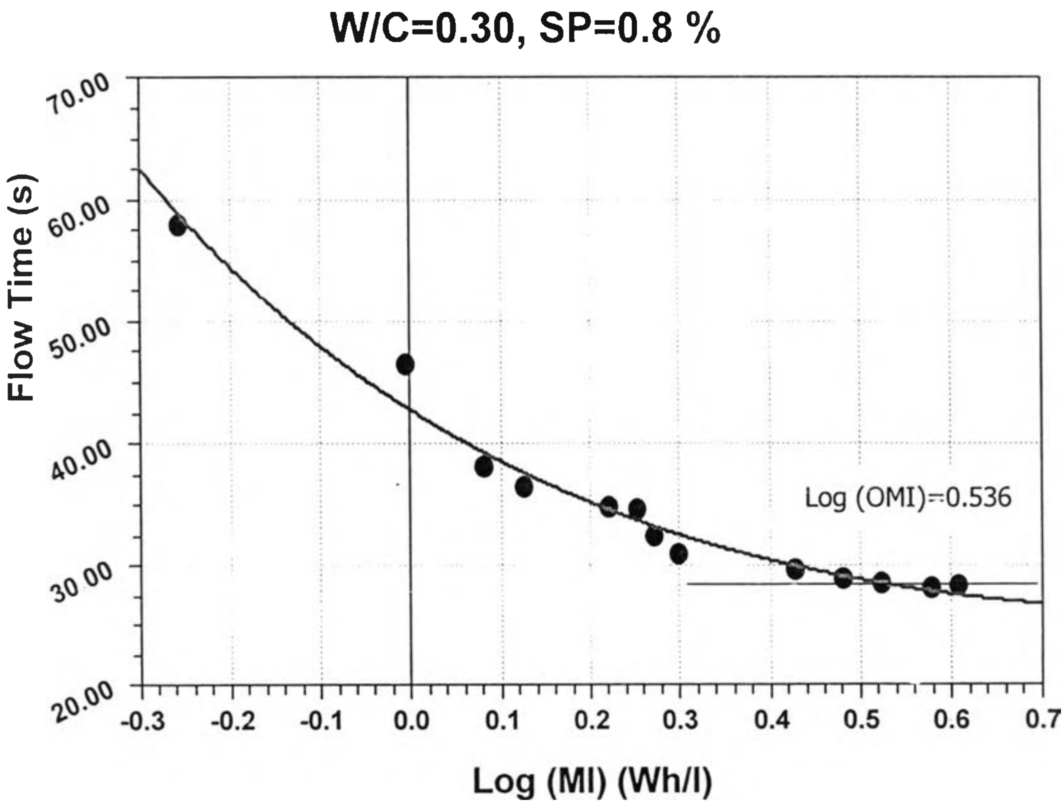


(ฉ.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.6 (ต่อ)

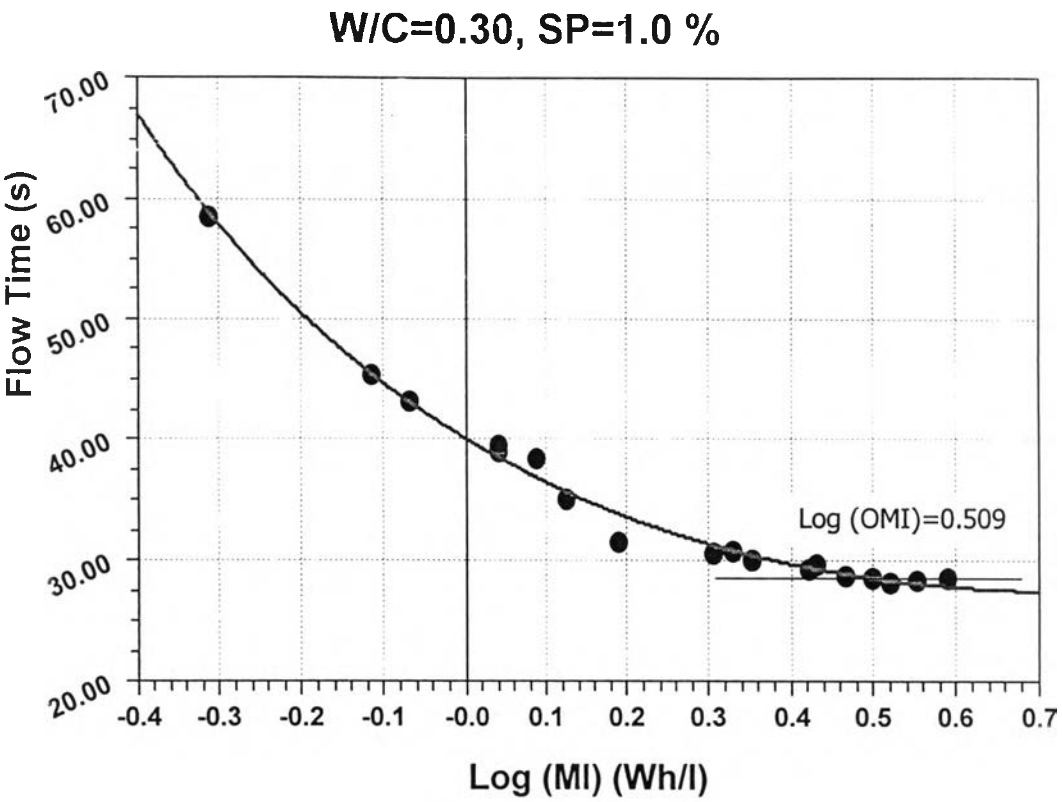


(ก.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

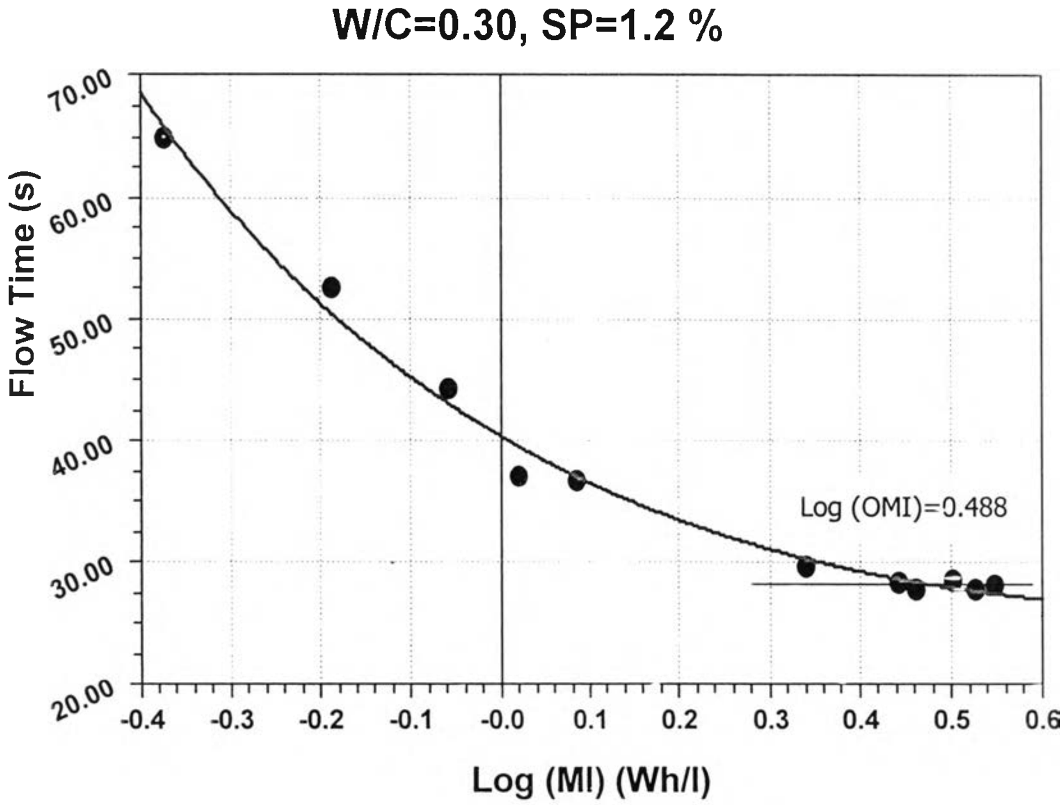


(ข.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ($w/c = 0.30$)

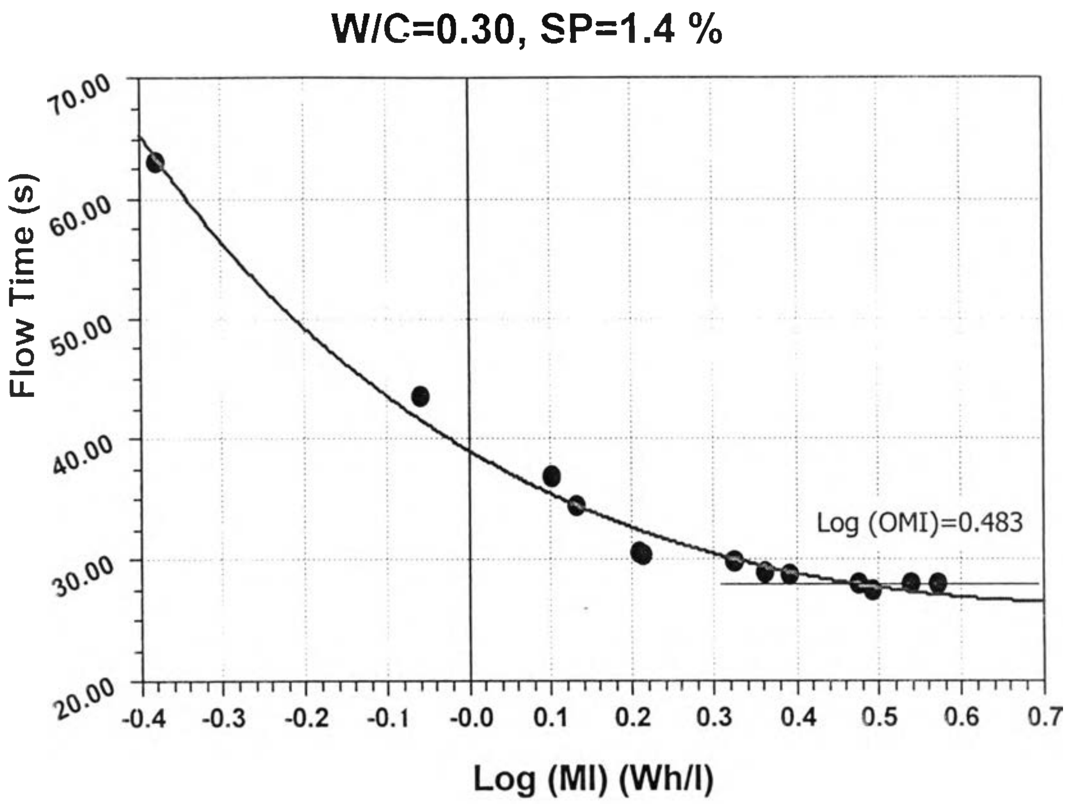


(ค.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม



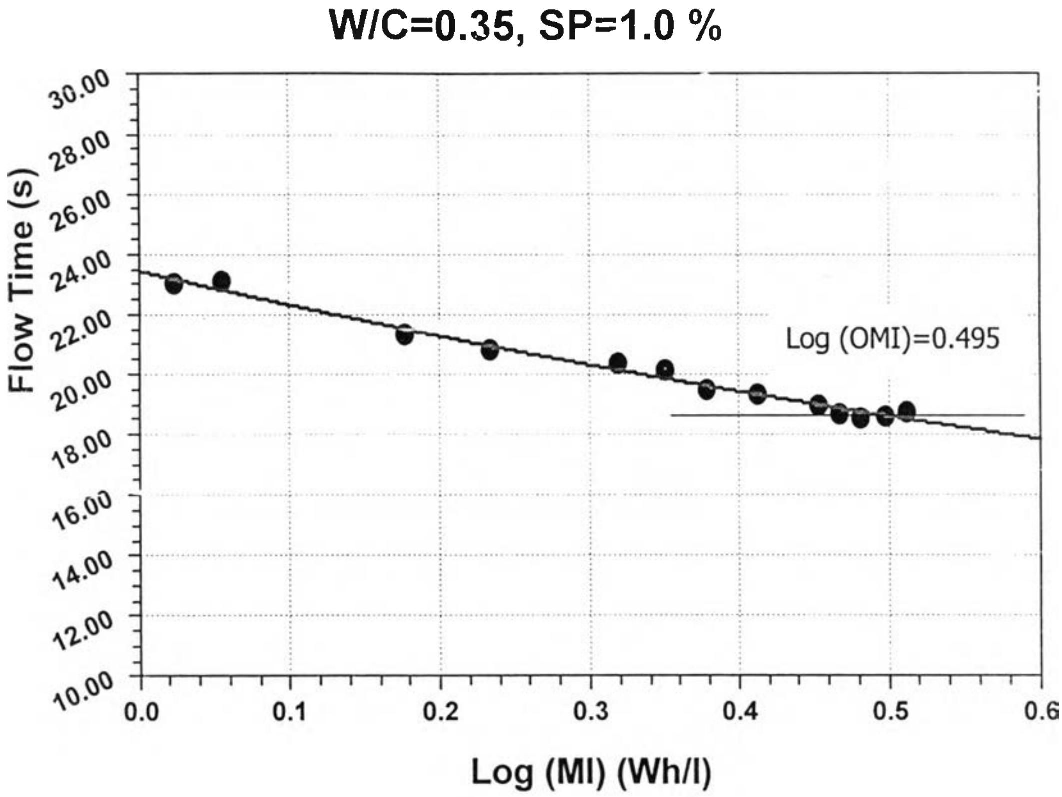
(ง.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.7 (ต่อ)

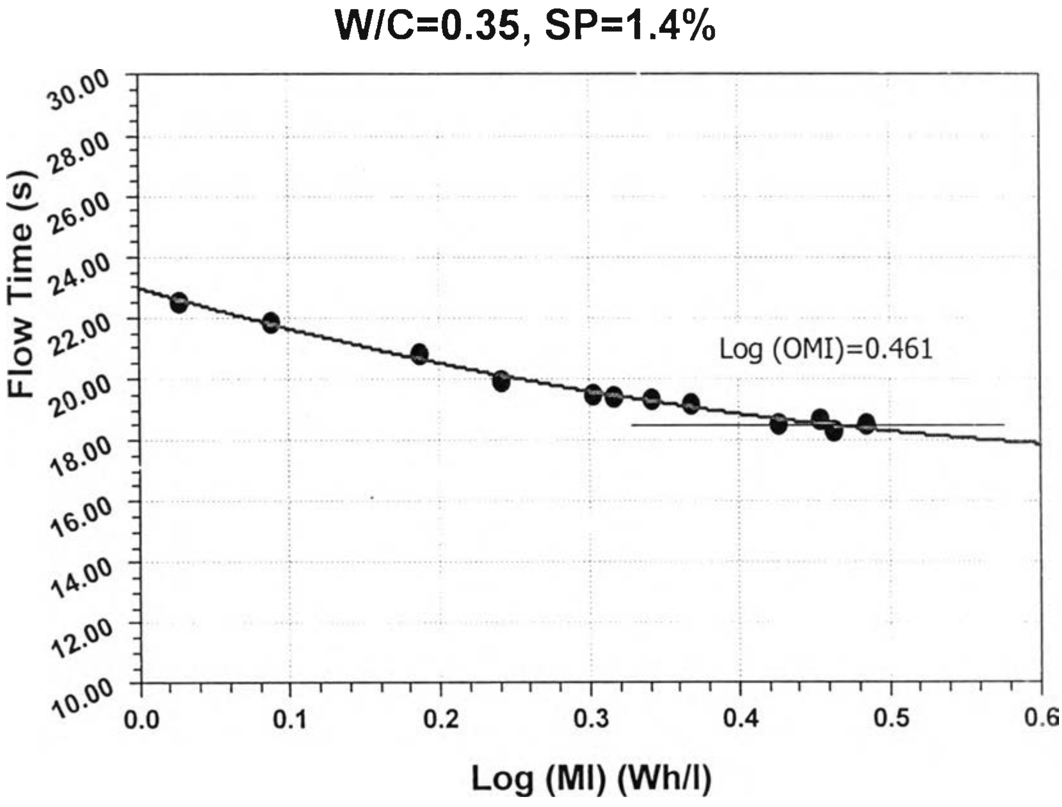


(จ.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.7 (ต่อ)

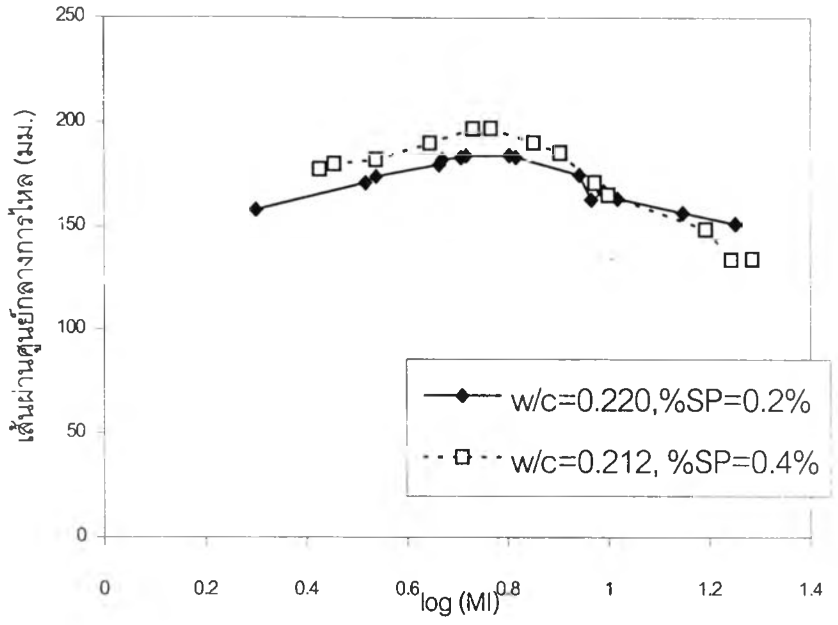


(ก.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

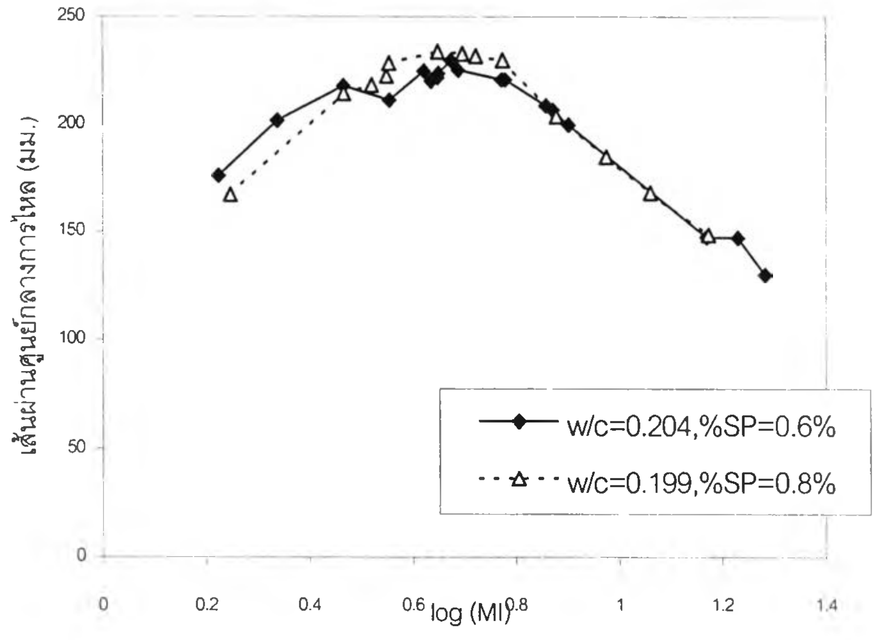


(ข.) ระยะเวลาการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.8 การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ($w/c = 0.35$)

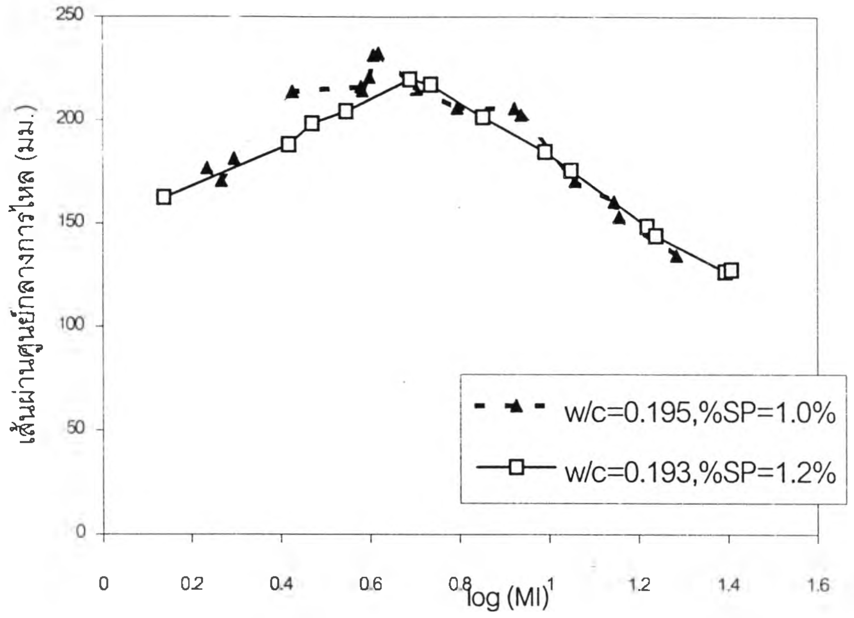


(ก.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

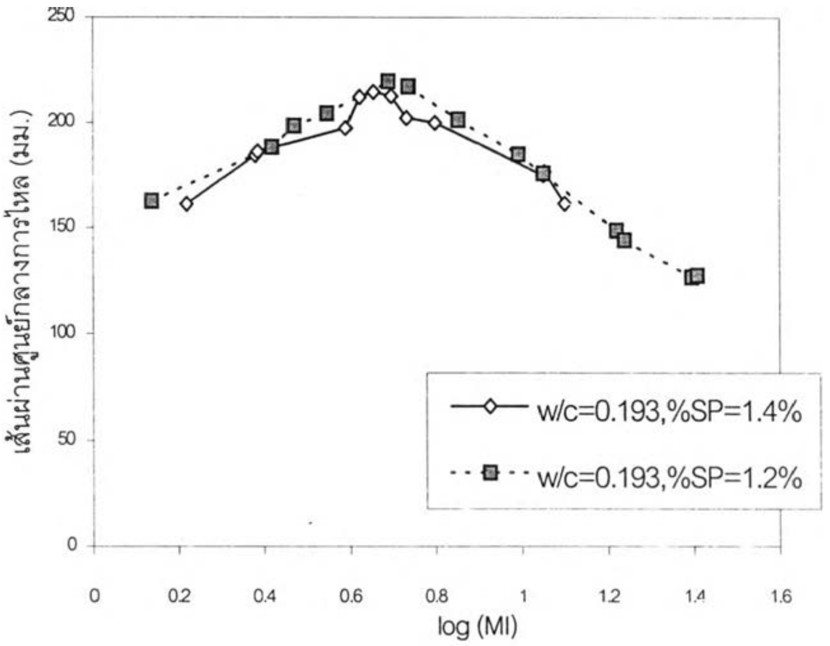


(ข.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.9 ผลการทดลองผลของระดับความเข้มของการผสมต่อค่าการไหลของซีเมนต์เพลสต์

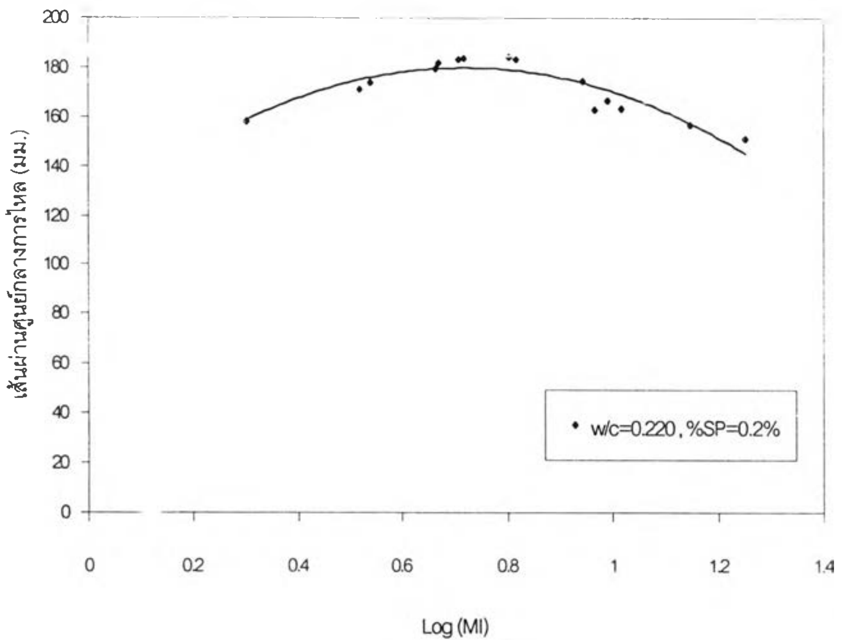


(ค.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

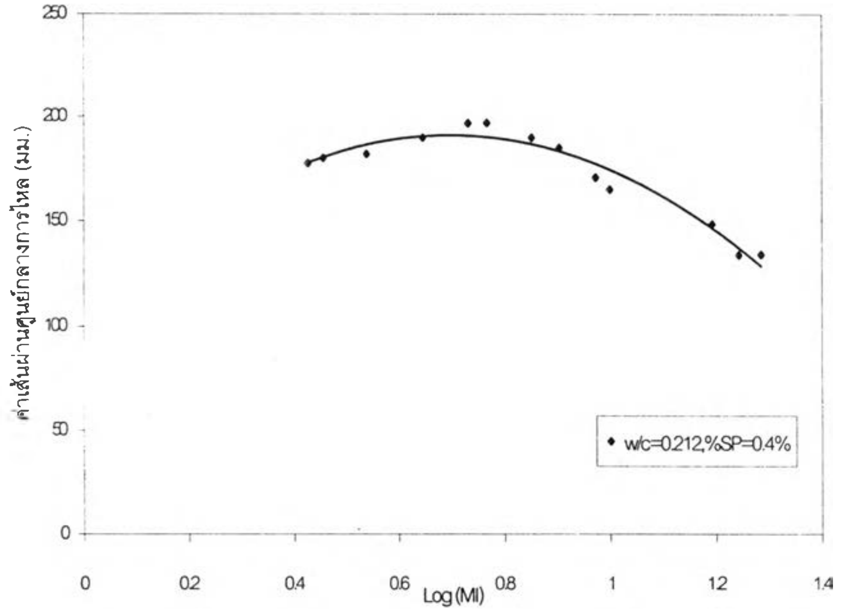


(ง.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.9 (ต่อ)

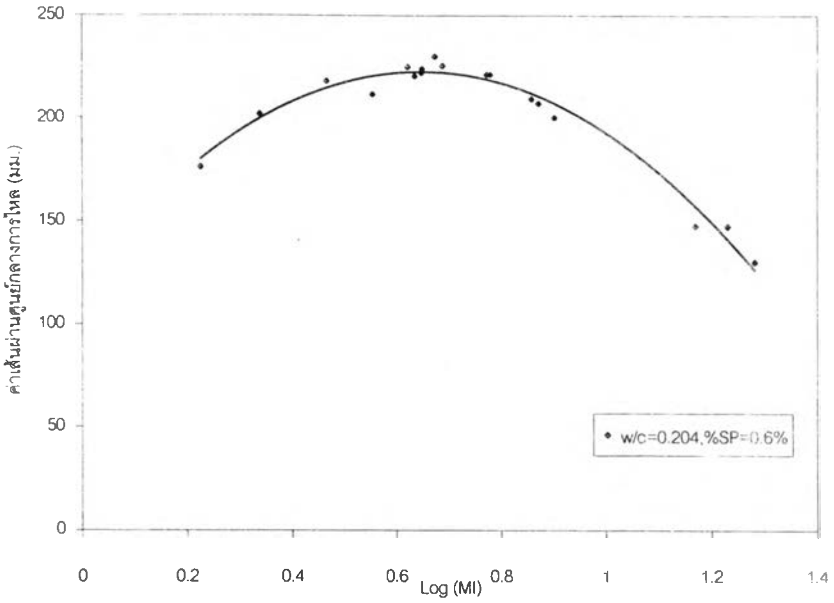


(ก.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

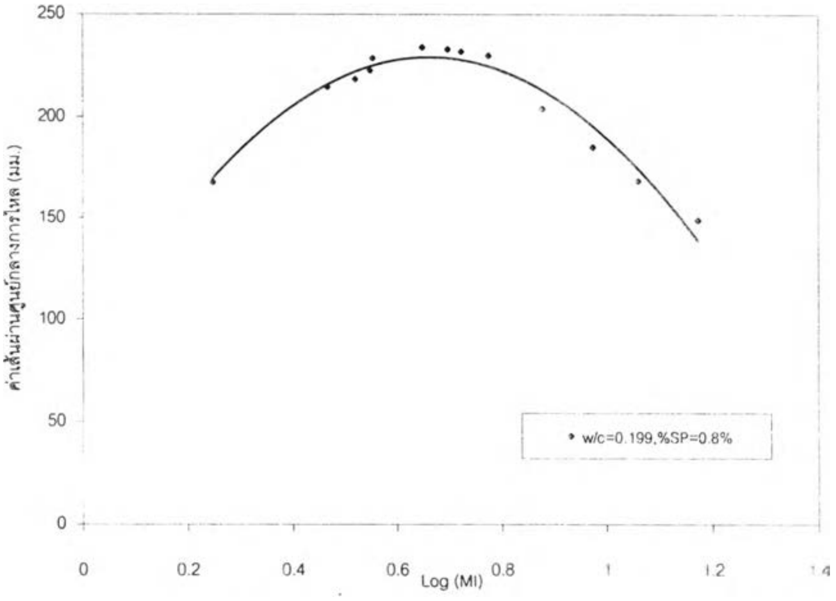


(ข.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.10 ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อค่าการไหลของซีเมนต์เพลสต์

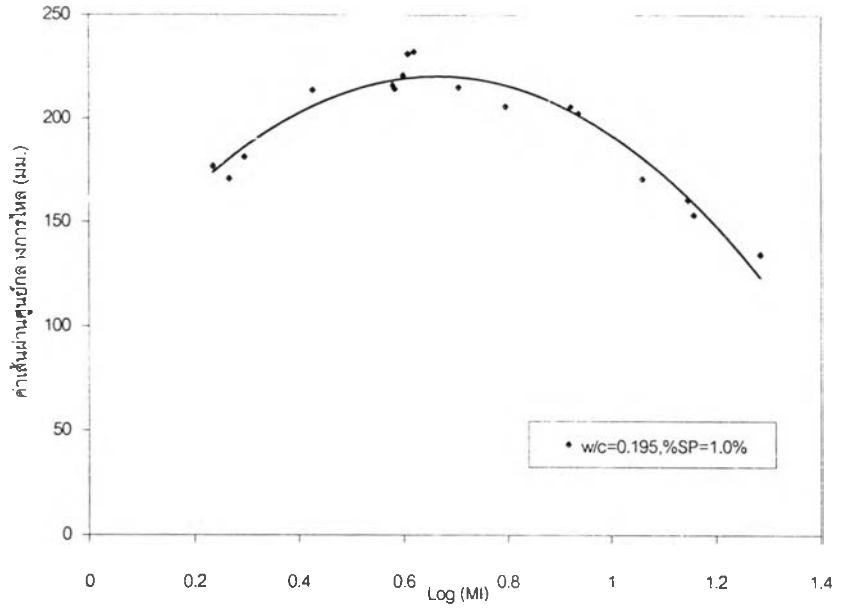


(ค.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

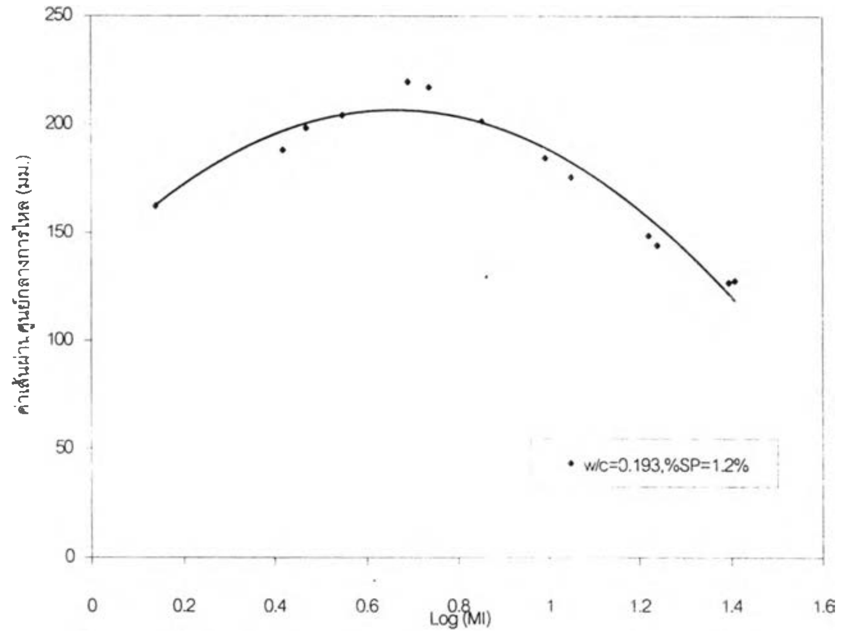


(ง.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.10 (ต่อ)

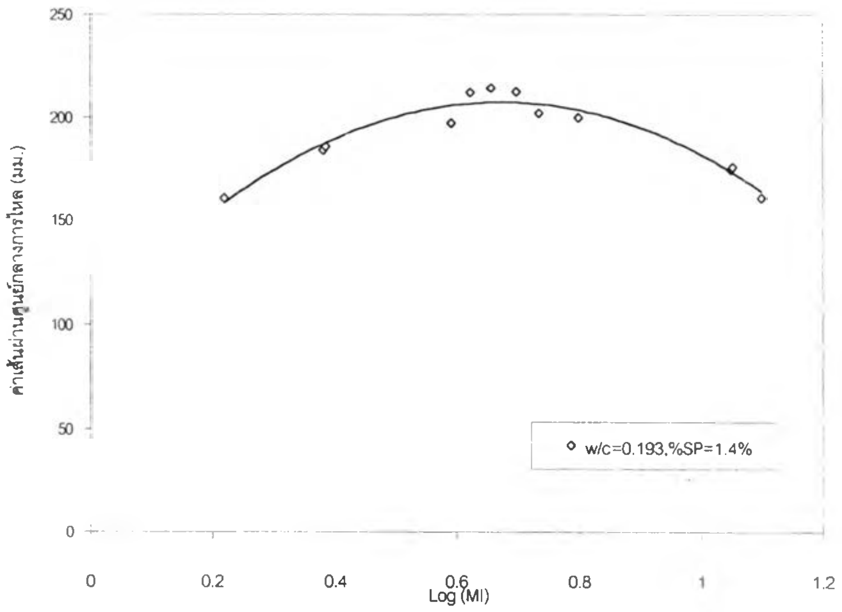


(จ.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม



(ฉ.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.10 (ต่อ)



(ช.) เส้นผ่านศูนย์กลางการไหลและระดับความเข้มของการผสม

รูปที่ ง.10 (ต่อ)

ภาคผนวก จ.

มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

มอก. 15-2532	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
มอก. 733-2530	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับทำคอนกรีต
มอก. 985-2533	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับทำคอนกรีตไหล

มาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้อง

Concrete and Aggregates (ASTM Volume 04.02)

ASTM C29/C29M–91a	Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate
ASTM C128-93	Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate
ASTM C494-92	Specification for Chemical Admixture for Concrete
ASTM C939-94a	Test Method for Flow of Grout for Preplaced – Aggregate Concrete (Flow Cone Method)
ASTM C1017-92	Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete

Cement (ASTM Volume 04.01)

ASTM C109/C109M-95	Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2 in. or [50 mm] Cube Specimens)
ASTM C150-95a	Specification for Portland Cement
ASTM C187-86	Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement
ASTM C188-95	Test Method for Density of Hydraulic Cement
ASTM C191-92	Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle
ASTM C204-96	Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus
ASTM C230-90	Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement
ASTM C305-94	Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency
ASTM C778-92a	Specification for Standard Sand

ประวัติผู้เขียน

นาย นิพนธ์ พงษ์ลิมานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ.2519 ที่จังหวัดชุมพร ได้รับการศึกษาในชั้นประถมและมัธยมที่ โรงเรียนฝวาหมิงกงลิ และศรียาภัย ตามลำดับ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ในปีการศึกษา 2540