รายการอ้างอิง

1. Malier, Y., *The French Approach to Using HPC,* Concrete International, July 1991, pp.28-32
2. Limsuwan, E., *Current Development and Implementation of HPC in Thailand*, International Workshop on High-Performance Concrete, November 21-22, 1994, Bangkok, Thailand, SP-159 , pp.57-77
3. สุพรรณ์ ศิริรัชรินทร์, *การศึกษาคอนกรีตกำลังสูงมาก*, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2525
4. สกุล พจนารถ, *พฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาก*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , พ.ศ. 2525
5. Nimityongskul, P. , *Mix Proportions for High Performance Concrete* , Pre-Workshop On High Performance Concrete, Bangkok, Thailand, July 1994, pp.23-38
6. กิตติกร ตันเปาว์, *ผลกระทบจากขนาดคละของมวลรวมในสภาพเหลวของคอนกรีตสมรรถนะสูง*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2538
7. ณรงค์ศักดิ์ ลีวานิชกิจ, *ผลของขนาดคละมวลรวมต่อสภาพแข็งตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูง*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2539
8. กรกฎ วิจิตรพงศ์ , *การใช้ขี้เถ้าลอยแม่เมาะในการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2531
9. วิศว จักรไพศาล , *ผลกระทบของขี้เถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง* , วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2539
10. สมภพ สุวรรณกวิน, *ผลกระทบของซิลิก้าฟูมในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง* ,วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2539
11. Road Research Laboratory, *Design of Concrete Mixes*, Road Note No. 4 , Department of Scientific and Industrial Research, HMSO, London, Revised Edition ,1956
12. Teychenne, D. C., Frankin, R. E., and Erntroy, H. C., *Design of Normal Concrete Mixes*, Department of Environment, HMSO, London, 1975, Revised edition, 1988, Teychenne, D. C., Franklin, R. E., and Hobbs, D.W. 1988, Department of Environment/BRE
13. ACI Committee 211, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concreta (ACI 211.1-91)*, American Concrete Institute, Detroit, 38 pp.
14. ACI Committee 201, *Proposed revision of : Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R)*, ACI Materials Journal, September-October 1991, pp.544-582
15. Azaz-un-Nabi, *A Microcomputer Peckage for Concrete Mix Design*, A Master Thesis submitted to Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, March 1992, ST 92-23, 63 pp.

16. Nicholas, J. C., and James R.C., *Outline of a National Plan on High Performance Concrete, Report on the NIST/ACI Workshop May 16-18 1990*, National Institute of Standard and Technology Center for Building Technology, Gaithersburg, December 1990

17. FIP/CEB, *High Strength Concrete State Of the Art Report*, Bulletin 'd Information, No.197, FIP, August 1990

18. Forster, S. W., *High Performance Concrete: Understanding the basics* , Special report from the High Performance Concrete Committee, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 1994

19. SHRP-C/FR-91-103, *High Performance Concretes : A state of the art report*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC., 991

20. Ozawa K.,Maekawa K., and Okamura H., *High Performance Concrete with High Filling Capacity*, Proceeding of the International Symposium, Admixtures for Concrete : Improvement of Properties, Barcelona May14-17,1990, pp.51-62

21. Okamura H., *Self-Compacting High-Performance Concrete*, Concrete International July 1997,pp.50-54

22. ACI Committee 207, *Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures (ACI 207.1R-70) Reaffirmed 1980*, American Concrete Institute, Detroit, 37 pp.

23. ACI Committee 224, *Control of Cracking in Concrete Structures*, Journal ACI, Vol. 69, No.12, December 1972, pp 717-753

24. Bogue, R.H. & Lerch, W., *Hydration of Portland Cement Compounds*, Ind. Engng Chem., 26(8) (1934), 837-47.

25. U S Bureau of Reclamation, *Concrete Manual* , 8th edition , Denver, CO, USA, 1975, p.45.

26. Verbeck, G.J. & Foster, C. W., *Long time study of cement performance in concrete*, The Heats of Hydration of the Cements. Proc. ASTM 50 (1950) 1235-57.

27. Price, W. H., *Factors influencing concrete strength*, J. ACI, 47(2) , 1951, 417-32.

28. Goltermann, P., Johansen, V., and Palbol, L., *Packing of Aggregates: An Alternative Tool to Determine the Optimal Aggregate Mix*, ACI Materials Journal, September-October 1997, pp.435-443

29. Fuller, W. B., and Thompson, S. E., *The Laws of Proportioning Concrete*, Trans ASCE, 59, 1907, pp. 67-143

30. ACI Committee 304, *Placing Concrete by Pumping Methods (ACI 304.2R)* , ACI Materials Journal, July-August 1995, pp.441-464

31. ACI Committee 211, *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash (ACI 211.4R-93)*, American Concrete Institute, Detroit, 13 pp.

32. ACI Committee 226, *Silica Fume in Concrete*, Committee Preliminary Report, ACI Materials Journal, March-April 1987,pp.158-166

33. Blick, R. L., Peterson, C., F., and Winter, M. E., *Proportioning and Controlling High Strength Concrete*, Proportioning Concrete Mixes, ACI Publication SP-46, American Concrete Institute, Detroit, 1974,pp.141-166

34. ACI Committee 363, *State-of-the-Art Report on High – Strength Concrete (ACI 363R-92)*, American Concrete Institute, Detroit, 55 pp.

35. Hewlett, P. C., *The Concept of Superplasticized Concrete*, Superplasticizers in Concrete, SP-62, American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 1 – 20

36. Meyer, A., *Experiences in the Use of Superplasticizers in Germany*, Superplasticizers in Concrete, SP-62, American Concrete Institute, Detroit, 1979, pp. 1 – 20

37. Stitmannaithum, B, *Effect of Mixing Intensity on Fresh Properties of Fresh Concrete Mixed by Pan Type Mixer*, A Dissertation submitted to The University of Tokyo, September 1992, 169 pp.

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

39. Loudon, A. G., *Computetion of Permeability from Simple Soil Tests*, Geotechnique, 3, 165-183, 1952-1953

40. Pongporncharoen, S., *Prediction of Workability of Fresh Concrete Containing Fly Ash*, A Master Thesis Submitted to Asian Institute of Technology, April 1997, ST97-4, 69pp.

41. ทนก บริบูรณ์สมสิน, บรรณศักดิ์ ชูสาย และ นนทวัฒน์ ปาณสมบูรณ์, *แบบจำลองและการประยุกต์ใช้คอนกรีตไหล*, โครงงานทางวิศวกรรมโยธา,ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2541

42. Abrams, D. A., *Design of concrete mixes*. Bull, No.1, Structure of Materials Research Laboratories, Lews Inst., Chicago, 1918. Reprinted in, *A Selection of Historic American Papers on Concrete*, 1926-1976 (ACI SP 52), Detroit, MI, 1976, pp.309-330

43. Saul, A. G. A., *Principles Underlying the Stream Curing of Concrete at Atmospheric Pressure*, Magazine of Concrete Research (London), V.2, No.6, Mar 1951, pp. 127-140

44. Plowman, J. M., *Meturity and Strength of Concrete*, Magazine of Concrete Research (London), V.8, No.22, Mar 1956, pp.13-22

45. Guo Chenju, *Maturity of Concrete : Method for Predicting Early-Stage Strength*, ACI Materials Journal, July-August 1989, pp.341-353

46. BS 8110: 1985 , *Structurel Use of Concrete – Part 1 : Code of prectice for Design and Construction. British Standard Institution, London, 1985*

47. Comite Euro-International Du Beton, *CEB-FIP Model Code 1990 : Design Code*, Thomas telford 1993

48. ยศชัย จูประพัทธศรี,*การศึกษาอุณหภูมิเพิ่มแบบทักก่นความร้อนในคอนกรีตหลา*, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2532

49. Sarker, P. K., *Hydration Heat Modelling of Concrete Using Fly Ash*, A Master Thesis Submitted to Asian Institute of Technology, April 1997, ST97-4, 69pp.

50. Srichoo, A.-T., *Development of Low Heat Concrete Using Fly Ash and Pumicite*, A Master Thesis Submitted to Asian Institute of Technology, April 1997, ST 97-4, 55pp.

51. Bentur, A. , and Goldman, A., *Curing effects, strength end properties of high strength silice fume concretes*, J. Mater. Civ. Engng, 1 (1), 1988, 46-58

52. Meland, I., *Influences on condensed silica fume and fly ash on the heat evolution in cement pastes.* In Fly ash, silica fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete (ACI Spec. Publ. SP-79, Vol. II), ed. V. M. Malhotra, ACI, Detroit, MI, USA, 1983, pp. 665-676

53. Malhotra, V. M., *Superplasticizers: Their Effect on Fresh and Hardened Concrete*,Concrete International, May 1981, pp.66-81

54. Loo, Y-C., Ahmad, S. F., *A Comparative Study of Four Popular Concrete Mix Design Methods*, Research Report No. 151 c.2 , Division of Structural Engineering and Construction, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand,October 1982, 23 pp.

55. ACI Committee 214, *Recommend Practice for Evalution of Strength Test Results of Concrete (ACI 214-77)*, ACI Standard, American Concrete Institute, Detroit

56. สมยศ สิริโสภณศิลป์, *การกระจายอุณหภูมิบนหน้าตัดคอนกรีตรูปกล่องที่อยู่กลางแจ้ง*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , พ.ศ. 2526

57. ปราโมทย์ เดชะอำไพ,*ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิศวกรรม*, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2542, 483 หน้า

58. ACI Committee 318, *Building Code Requirement for Structurel Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*, ACI Manual of Concrete Practice Part3-1997, 369 pp.

59. Hognestad, E., *High Strength Bars as Concrete Reinforcement, Part 2, Control of Flexural Crecking*, Journal, Portland Cement Association Research and Development Laboratories, Vol.4, No.1, January 1962, pp.46-63

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้างคอนกรีตหลาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ก. สมมุติฐานของการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้างคอนกรีตหลาในงานวิจัย อยู่ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวและมีคุณสมบัติทางความร้อนเหมือนกันในทุกทิศทาง
2. คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและตลอดช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์
3. การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่ใน 2 มิติ โดยมีพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนเหมือนกันในทุก ๆ หน้าตัด
4. อุณหภูมิที่กระจายในส่วนย่อย ๆ มีลักษณะเป็นฟังก์ชั่นเส้นตรง
5. อัตราการกำเนิดพลังงานความร้อนภายในเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ และ วัสดุประสานอื่น ๆ มีลักษณะเดียวกับผลทดลองอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อน

ข. สมการเชิงอนุพันธ์ควบคุม

การถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้างคอนกรีตหลา สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ ผ.1 ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งจากการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่น หรืออุณหภูมิที่ถูกกำหนดขึ้นภายในโดเมน Ω การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน การให้ความร้อนที่ผิว หรืออุณหภูมิที่ถูกกำหนดขึ้นที่ผิว ในโดเมน Γ สามารถทำการศึกษาได้โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการถ่ายเทความร้อนทั่วไปในสถานะไม่อยู่ตัว (Transient State) ดังนี้

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}+\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)+\dot{Q}=\rho c\frac{\partial T}{\partial t}$$

หรือ

$$-\nabla \bullet \underset{\sim}{q} + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{(ผ-1)}$$

โดยที่ q_x q_y และ q_z คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ในทิศทาง x y และ z ตามลำดับ (Heat flux, Btu/ ft^2-hr) โดยในการวิเคราะห์จะพิจารณาให้เวกเตอร์ของสนามความร้อน $\underset{\sim}{q}$ มีทิศทางเป็นบวกเมื่อพุ่งออกในทิศทางตั้งฉากกับจากผิวของวัตถุ Q คืออัตราการผลิตความร้อนที่เกิดขึ้นภายในต่อหน่วยปริมาตรเนื้อวัสดุ ต่อหน่วยเวลา (Btu / ft^3 – hr) ρ คือ ความหนาแน่นของมวล (lb/ft^3) c คือค่าความร้อนจำเพาะ (Btu/ lb-°F) และ T คือ อุณหภูมิภายในซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา t เป็นตัวแปรที่ต้องการทราบค่าในการวิเคราะห์

ค. เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนนั้น เงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องสามารถกำหนดได้ทั้งเงื่อนไขขอบเขตแบบไดริชเลต์ (Dirichlet Boundary Condition) คือ จุดกำหนดอุณหภูมิ $T(x,y,z,t)$ ภายในโดเมน Ω หรือที่ผิว Γ เงื่อนไขแบบนูนแมนน์ (Neumann Boundary Condition) คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทที่ผิว หรือเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบผสม (Mixed Boundary Condition) คือ การพาความร้อนในลักษณะต่าง ๆ รวมไปถึงการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังนี้

ค. 1 จุดกำหนดอุณหภูมิ

ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาถึงผลของการพาความร้อนที่ผิว การวิเคราะห์อาจจะทำการกำหนดอุณหภูมิที่ผิวของโครงสร้างให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) ที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และหากในขั้นตอนการก่อสร้างมีการใช้ท่อน้ำระบายความร้อนฝังอยู่ภายในโครงสร้างก็สามารถกำหนดอุณหภูมิภายในให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของผิวท่อน้ำโดยเฉลี่ยได้เช่นกัน

$$T(x,y,z,t)^{(\Gamma)} = T_s \qquad (ผ - 2)$$

$$T(x,y,z,t)^{(\Omega)} = T_{Pipe}(t) \qquad (ผ - 3)$$

t_a คือเวลาที่เริ่มพิจารณา T_{Pipe} คืออุณหภูมิที่ผิวของท่อระบายความร้อน

ค.2 ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว

ในกรณีที่มีการให้ความร้อนที่ผิวของโครงสร้างโดยตรง หรือกำหนดให้ผิวปราศจากการถ่ายเทความร้อน (Insulating Surace) ดังเช่นในกรณีที่ยังไม่ได้ทำการถอดแบบหล่อของคอนกรีตในช่วงอายุต้น ๆ ทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ในกรณีนี้จะทำการกำหนดฟลักซ์ความร้อน q_s โดยตรง ดังสมการ

$$\underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{n} = -q_s \qquad (ผ - 4)$$

เมื่อ q_s คือฟลักซ์การไหลเข้าของความร้อน (Heat Flux) มีหน่วยเป็น Btu/ ft^2 -hr. มีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทางพุ่งเข้าสู่ผิวของโครงสร้างซึ่งสวนกับค่าของฟลักซ์ความร้อนซึ่งมีทิศพุ่งออกจากผิว

ค.3 การพาความร้อนที่ผิว

การพาความร้อนโดยลม

นอกจากการถ่ายเทความร้อนภายในแล้ว ภายหลังจากทำการถอดแบบหล่อโครงสร้างคอนกรีตหลาสามารถถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศภายนอกได้โดยการพาความร้อนอันเนื่องมาจากลม ซึ่งจัดเป็นการพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) โดยสมการเงื่อนไขขอบเขตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\underset{\sim}{q}^{T}\ \underset{\sim}{n} = h_c\left(T - T_\infty(t)\right) \qquad (ผ - 5)$$

เมื่อ h_c คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น Btu/ft^2-hr-$^\circ$F ซึ่ง ASHRAE กำหนดให้มีค่าขึ้นกับทิศทางการพัดพา และความเร็วลม ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

สำหรับพื้นผิวที่ตั้งในแนวดิ่งและขวางทิศทางลม

$$h_c = 0.99 + 0.31\,v \qquad (ผ - 6)$$

สำหรับผิวทั่วไป

$$h_c = 0.66 + 0.133\,v \qquad (ผ - 7)$$

เมื่อ v คือค่าเฉลี่ยความเร็วลม มีหน่วยเป็น ไมล์ต่อชั่วโมง

T_∞ คืออุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมภายนอก ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อใช้ช่วงเวลาพิจารณาที่มากพอสามารถจำลองให้มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave) ซึ่งแปรผันระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของวันได้ดังสมการ

$$T_\infty(t) = T_{ave} + A\sin\omega\left(t + t_\phi - t_{st}\right) \qquad (ผ - 8)$$

เมื่อ T_{ave} คือค่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของวัน และ A คือผลต่างของค่าอุณหภูมิที่ขึ้นสูงสุด (หรือต่ำสุด) กับค่าเฉลี่ย โดยค่าของ ω คือคาบการกลับ โดยปกติจะสมมติให้อุณหภูมิถึงจุดสูงสุดที่ตอนกลางวัน และต่ำสุดที่เวลาเที่ยงคืน จะได้ค่าของ ω เท่ากับ $\frac{\pi}{12}$ โดยที่ t_{st} และ t_ϕ คือ เวลาอ้างอิง และ เวลาเริ่มต้นของการคำนวณ ตามลำดับ

การพาความร้อนเนื่องจากระเหยของน้ำที่ผิว

น้ำที่อยู่ในช่องว่างที่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะเกิดการระเหยเนื่องจากการสะสมของพลังงานความร้อนและความแตกต่างของความดันภายในช่องว่างและความดันบรรยากาศ การระเหยของน้ำที่บริเวณผิวจะพาความร้อนออกไปจากคอนกรีตด้วย สมการเงื่อนไขขอบเขตของการพาความร้อนที่ผิวเนื่องจากการระเหยของน้ำภายในโครงสร้างคอนกรีตหลา สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\underset{\sim}{q}^{T}\ \underset{\sim}{n} = K_D\left(h_s - h_a\right) \qquad (ผ - 9)$$

โดยที่

$h_a = C_{pa}T_\infty + w_a h_{ga}$ = Enthalpy ของอากาศชื้น (Btu / lb of dry air)

$h_s = Cpa\,T + w_s h_{gs}$ = Enthalpy ของอากาศชื้นที่ผิว (Btu / lb of dry air)

$h_{ga} = 1061 + 0.441\,T_\infty$ = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิของอากาศ (Btu / lb)

$w_a, w_s = 0.622\,\dfrac{H_u P_{ws}}{P_t - H_u P_{ws}}$ = อัตราส่วนของน้ำหนักไอน้ำต่ออากาศของอากาศและที่ผิวตามลำดับ

H_u = ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

P_t = ความดันบรรยากาศ (atm)

$P_{ws} = 218.167 \times 10^{-B0}$ = ความดันอากาศชื้นของอากาศหรือที่ผิว (atm)

$K_D = h_c / C_{pm}$

$C_{pm} = (1 + w_a)C_{pa}$ = ความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น (Btu/ lb –°F)

C_{pa} = ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง = 0.24 Btu / lb – ° F

U_1 = อุณหภูมิของอากาศที่ผิว (°K)

$$B_0 = \frac{B_2\left(B_3 + B_4 B_1 + B_5 B_1^3\right)}{\left(1 + B_6 B_1\right)}$$

$B_1 = 647.27 - U_1$

$B_2 = B_1 / U_1$

$B_3 = 3.2473814$

$B_4 = 5.66826 \times 10^{-3}$

$B_5 = 1.1702379 \times 10^{-8}$

$B_6 = 2.1878462 \times 10^{-3}$

ค.4 การดูดกลืนและการแผ่รังสีความร้อน

ในโครงสร้างคอนกรีตบาง ผลของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการดูดกลืนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดหน่วยแรงเหนี่ยวนำ (Induced Stress) ขึ้นภายในโครงสร้าง [56] โดยปกติแล้ววัตถุสามารถดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในรูปแบบของคลื่นสั้น ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตแสดงได้ดังสมการ

$$\underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{n} = -\alpha q_r \qquad (ผ-10)$$

เมื่อ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของผิววัสดุ (absorptivity) และ q_r คือ ปริมาณความร้อนที่ตกกระทบเนื่องจากการแผ่รังสี มีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่ถูกแสงแดดใน 1 วัน โดยที่

$$q_r(t) = \frac{1.70\,S}{T}\left[\frac{\sin^2 p + 2\sin p}{3}\right] \qquad (ผ-11)$$

เมื่อ $p = \frac{\pi t}{T}$ เมื่อ $t_{AM} \le t \le t_{PM}$ และ

$q_r = 0$ เมื่อ $t \le t_{AM}$ หรือ $t \ge t_{PM}$

โดย T คือช่วงเวลาที่ถูกแสงแดดใน 1 วัน และ S คือปริมาณแสงแดด มีหน่วยเป็น Btu/ ft^2-hr t_{AM}, t_{PM} คือเวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและตก ตามลำดับ นอกจากนี้วัตถุยังสามารถแผ่รังสีออกในลักษณะของคลื่นยาว ซึ่งเขียนเงื่อนไขขอบเขตได้ดังสมการ

$$\underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{n} = \varepsilon\sigma\left(T_s^4 - \overline{T_\infty^4}\right) \qquad (ผ - 12)$$

เมื่อ ε และ σ คือค่าสัมประสิทธิ์ของการเปล่งรังสี (emissivity) และ ค่าคงที่ของซเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann constant) $\overline{T_\infty}$ คืออุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการแผ่รังสี

ในการวิเคราะห์จะไม่พิจารณาถึงผลของการแผ่รังสีความร้อนในรูปแบบของคลื่นยาวซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาของความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบสมการทำให้สามารถประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณได้โดยสะดวก อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการคำนวณจะอยู่ในเชิงปลอดภัยเนื่องจากเป็นผลที่ลดอุณหภูมิภายใน

ง. ผลของอัตราการเทคอนกรีต

อัตราการเทคอนกรีตมีผลอย่างยิ่งต่ออัตราการกำเนิดอุณหภูมิโดยรวมของคอนกรีตทั้งหมด ในการก่อสร้างหากใช้อัตราการเทคอนกรีตที่สูง จะทำให้ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นเนื่องจากคอนกรีตในแต่ละชั้นที่เทมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากผลของการกำเนิดความร้อนของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตธรรมดาแล้ว นิยมที่จะทำการเทคอนกรีตโดยหยุดเทเป็นชั้น ๆ เพื่อลดผลของความร้อนสะสมที่เกิดขึ้น แต่สำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งสามารถทำการมีการควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้สามารถทำการเทคอนกรีตได้อย่างต่อเนื่อง

จ. สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ควบคุมให้อยู่ในรูปแบบอย่างอ่อน (Weak Form) เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบประมาณ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้หลักของการแปรผัน (Variational

Method) หรือ โดยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weight Residual Method) โดยในงานวิจัยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างแบบ บับโนฟ-กาเลอร์คิน (Bubnov-Galerkin) เพื่อสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นโดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ควบคุมและเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สมมติให้การกระจายอุณหภูมิที่จุดใด ๆ ภายในเอลิเมนต์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่จุดต่อดังสมการ

$$T(x,y,z,t)) = \{N_1, N_2, ..., N_r\}\, \underset{\sim}{T}(t)$$

$$T(x,y,z,t) = \underset{\sim}{N}(x,y,z)\, \underset{\sim}{T}(t) \qquad \text{(ผ -13)}$$

โดย $\underset{\sim}{N}(x,y,z)$ คือฟังก์ชั่นรูปร่างของการกระจายอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์ และ $\underset{\sim}{T}(t)$ คือค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ และค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\left\{\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}\right\}^T = \underbrace{\left\{\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right\}^T \underset{\sim}{N}}_{\underset{\sim}{B}}\, \underset{\sim}{T}(t) \qquad \text{(ผ - 14)}$$

จากวิธีการของ บับโนฟ-กาเลอร์คิน กำหนดให้ใช้ฟังก์ชั่นถ่วงน้ำหนักเป็นฟังก์ชั่นรูปร่างของเอลิเมนต์ จะได้

$$\int_{\Omega^{(e)}} \left(\nabla \cdot \underset{\sim}{q} - Q + \rho\, c\, \frac{\partial T}{\partial t}\right) \underset{\sim}{N}^T \, d\Omega = 0 \qquad \text{(ผ - 15)}$$

เมื่อกระจายสมการที่ (ผ- 15) และทำการอินทิเกรตทีละส่วน โดยทฤษฎีบทของเกาส์ จะได้

$$\int_{\Gamma^{(e)}} (\underset{\sim}{q}^T \cdot \underset{\sim}{n})\, \underset{\sim}{N}^T \, d\Gamma - \int_{\Omega^{(e)}} \underset{\sim}{B}^T\, \underset{\sim}{q}\, d\Omega - \int_{\Omega^{(e)}} Q\, \underset{\sim}{N}^T \, d\Omega + \int_{\Omega^{(e)}} \rho\, c\, \underset{\sim}{N}^T \, d\Omega\, \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \qquad \text{(ผ -16)}$$

จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier 's Law) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวกเตอร์ของสนามความร้อน $\underset{\sim}{q}$ และเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ได้ดังสมการ

$$\underset{\sim}{q} = -\underset{\sim}{k} \left\{\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}\right\}^T \qquad \text{(ผ - 17)}$$

เมื่อ $\underset{\sim}{k}$ คือเมตริกของการนำความร้อนของเอลิเมนต์ สำหรับวัสดุแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) จะได้

$$\underset{\sim}{k} = \begin{bmatrix} kxx & kxy & kxz \\ kyx & kyy & kyz \\ kzx & kzy & kzz \end{bmatrix} \qquad \text{(ผ -18)}$$

และหากพิจารณาให้วัสดุมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) จะได้เมตริก $\underset{\sim}{k}$ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$\underset{\sim}{k} = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \qquad \text{(ผ -19)}$$

เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อน ของวัสดุ มีหน่วยเป็น Btu/ ft-hr-^{o}F

แทนสมการที่สมการที่ (ผ - 20) ในสมการที่ (ผ - 14) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\underset{\sim}{q} = - \underset{\sim}{k}\ \underset{\sim}{B}\ \underset{\sim}{T}(t) \qquad \text{(ผ - 20)}$$

แทนสมการที่ (ผ- 20) ลงในสมการที่ (ผ-16) จะได้

$$\int_{\Gamma^{(e)}} (\underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{n})\, \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma + \int_{\Omega^{(e)}} \underset{\sim}{B}^T\, \underset{\sim}{k}\, \underset{\sim}{B}\, d\Omega\, \underset{\sim}{T} - \int_{\Omega^{(e)}} Q\, \underset{\sim}{N}^T\, d\Omega + \int_{\Omega^{(e)}} \rho c\, \underset{\sim}{N}^T\, \underset{\sim}{N}\, d\Omega\, \frac{\partial \underset{\sim}{T}}{\partial t} \qquad \text{(ผ - 21)}$$

พจน์แรกของสมการที่ (ผ-21) แทนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวของเอลิเมนต์ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ ค. ซึ่งเมื่อแทนด้วยการถ่ายเทความร้อนในลักษณะต่าง ๆ จะได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\int_{\Gamma^{(e)}} h_c(T_s - T_\infty)\, \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma + \int_{\Gamma^{(e)}} \left(\varepsilon\sigma\left(T_s^4 - T_\infty^4\right) - \alpha q_r\right) \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma - \int_{\Gamma^{(e)}} q_s\, \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma + \int_{\Omega^{(e)}} \underset{\sim}{B}^T\, \underset{\sim}{k}\, \underset{\sim}{B}\, d\Omega\, \underset{\sim}{T} - \int_{\Omega^{(e)}} \underset{\sim}{Q}\, \underset{\sim}{N}^T\, d\Omega +$$

$$\int_{\Omega^{(e)}} \rho c\, \underset{\sim}{N}^T\, \underset{\sim}{N}\, d\Omega\, \frac{\partial \underset{\sim}{T}}{\partial t} + \int_{\Gamma^{(e)}} K_D(h_s - h_a)\, \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma = 0 \qquad \text{(ผ - 22)}$$

เมื่อแทนค่าของ $T_s = \underset{\sim}{N}\ \underset{\sim}{T}$ จะสามารถจัดรูปสมการที่ (ผ-22) ได้เป็น

$$\underset{\sim}{C}\ \dot{\underset{\sim}{T}} + \underbrace{\left[\underset{\sim}{K_c} + \underset{\sim}{K_h} + \underset{\sim}{K_r}\right]}_{K_T} \underset{\sim}{T} = \underset{\sim}{Q_Q} + \underset{\sim}{Q_q} + \underset{\sim}{Q_h} + \underset{\sim}{Q_r} \qquad \text{(ผ - 23)}$$

โดยที่

$$\underset{\sim}{C} = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c\, \underset{\sim}{N}^T\, \underset{\sim}{N}\, d\Omega \qquad \text{(ผ -24)}$$

$$\underset{\sim}{K_c} = \int_{\Omega^{(e)}} \underset{\sim}{B}^T\, \underset{\sim}{k}\, \underset{\sim}{B}\, d\Omega \qquad \text{(ผ - 25)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\underset{\sim}{K_h} = \int_{S_3} h_c \underset{\sim}{N}^T \underset{\sim}{N}\, d\Gamma + \int_{S_3} K_D C_{pa} \underset{\sim}{N}^T \underset{\sim}{N}\, d\Gamma \qquad (ผ - 26)$$

$$\underset{\sim}{K_r} = \int_{S_4} \varepsilon \sigma T^3 \underset{\sim}{N}^T \underset{\sim}{N}\, d\Gamma \qquad (ผ - 27)$$

$$\underset{\sim}{Q_c} = -\int_{S_1} (\underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{n}) \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma \qquad (ผ - 28)$$

$$\underset{\sim}{Q_q} = \int_{S_2} q_s \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma \qquad (ผ - 29)$$

$$\underset{\sim}{Q_h} = \int_{S_3} h_c T_\infty \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma + \int_{S_3} K_D \left(h_a - w_s h_{gs}\right) \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma \qquad (ผ - 30)$$

$$\underset{\sim}{Q_r} = \int_{S_4} \left(\varepsilon \sigma T_\infty^4 + \alpha q_r\right) \underset{\sim}{N}^T\, d\Gamma \qquad (ผ - 31)$$

$$\underset{\sim}{Q_Q} = \int_{\Omega^{(e)}} Q \underset{\sim}{N}^T\, d\Omega \qquad (ผ - 32)$$

สมการที่ (ผ - 32) เป็นเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจากผลของการกำเนิดความร้อนภายในโครงสร้างคอนกรีตหลาในสภาวะกักกันความร้อน โดยที่ Q เป็นอัตราการผลิตพลังงานความร้อนต่อหน่วยปริมาตร ต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น Btu/ ft^3-hr จากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.2.3 สามารถสร้างสมการสำหรับทำนายอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนได้ดังสมการ

$$T(t) = K\left(1 - e^{-at}\right) \qquad (3.17)$$

เมื่อ

$$a = e^{\left(2.2\times 10^{-12} T_o^{7.3} + 0.5\right)} \qquad (3.19)$$

โดยที่ K คือค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดจากการทดสอบแบบกักกันความร้อน คูณด้วยตัวประกอบปรับแก้มีค่าเท่ากับ 1.7 และ ค่าของสัมประสิทธิ์ a คืออัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อวัน ขึ้นกับอุณหภูมิเริ่มแรกของคอนกรีต ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในสภาวะกักกันความร้อนมีความสัมพันธ์กับเวลาที่ผ่านไป โดยนิยาม สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง Q และอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนได้ดังสมการ

$$Q = \frac{\rho c (T_n - T_{n-1})}{\Delta t} \qquad (ผ - 33)$$

หรือ

$$Q = \frac{1}{\Delta t} \rho c K\left(e^{-at_{n-1}} - e^{-at_n}\right) \qquad (ผ - 34)$$

เมื่อ Δt คือช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งเมื่อแทนสมการที่ (ผ-34) ในสมการที่ (ผ-32) จะได้โหลดเวกเตอร์ $\underset{\sim}{Q}$ ซึ่งจะกระจายผลของการผลิตความร้อนในคอนกรีตไปยังข้อต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบเชิงเส้นในสภาวะไม่อยู่ตัว (Transient State) จะต้องทำการแปลงสมการที่ (ผ -23) ให้อยู่ในรูปของสมการดีกรี 1 โดยวิธีการความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (Recurrence relation) จะได้ว่า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่อ ที่เวลา θ ใด ๆ เมื่อ $0 \le \theta \le 1$ โดยประมาณ เท่ากับ

$$\dot{\underset{\sim}{T}} \cong \frac{\underset{\sim}{T}_n - \underset{\sim}{T}_{n-1}}{\Delta t} \qquad \text{(ผ - 35)}$$

และค่าอุณหภูมิที่จุดต่อที่เวลา θ ใด ๆ ประมาณเท่ากับ

$$\underset{\sim}{T} \cong (1-\theta)\underset{\sim}{T}_{n-1} + \theta \underset{\sim}{T}_n \qquad \text{(ผ - 36)}$$

นอกจากนี้ หากโหลดเวกเตอร์ทางขวามือของสมการที่ (ผ -23) เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะได้

$$\underset{\sim}{Q} = (1-\theta)\underset{\sim}{Q}_{n-1} + \underset{\sim}{Q}_n \qquad \text{(ผ - 37)}$$

แทนค่าสมการที่ (ผ -32) (ผ -33) และ (ผ -34) ลงในสมการที่ (ผ - 20)

$$\left(\frac{1}{\Delta t}\underset{\sim}{C} + \theta \underset{\sim}{K}\right)\underset{\sim}{T}_n = \left(\frac{1}{\Delta t}\underset{\sim}{C} - (1-\theta)\underset{\sim}{K}\right)\underset{\sim}{T}_{n-1} + (1-\theta)\underset{\sim}{Q}_{n-1} + \theta \underset{\sim}{Q}_n \qquad \text{(ผ - 38)}$$

โดยสมการที่ (ผ-38) ต้องการเงื่อนไขเริ่มต้นคือ

$$T(x,y,z,0) = T_0(x,y,z) \qquad \text{(ผ - 39)}$$

ในกรณีที่ใช้ค่าของ $\theta < \frac{1}{2}$ อาจจะเกิดความไม่มีเสถียรภาพเชิงเลข (Numerical Instability) กล่าวคือ คำตอบจะลู่ออกแบบไร้ขีดจำกัด (Unbound Solution) ในการวิเคราะห์ควรใช้ช่วงเวลา Δt ไม่เกินกว่าช่วงเวลาวิกฤติ (Δt_{cr}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{(1-2\theta)\lambda_{max}} \qquad \text{(ผ - 40)}$$

เมื่อ λ_{max} คือค่าไอเกนส์ (eigenvalue) ที่ใหญ่ที่สุดของสมการ

$$\left[\underset{\sim}{K}_T - \lambda \underset{\sim}{C}\right]\underset{\sim}{\bar{T}} = 0 \qquad \text{(ผ – 41)}$$

โดยที่ $\underset{\sim}{\phi}^T \underset{\sim}{C} \underset{\sim}{\phi} = I$ เมื่อ $\underset{\sim}{\phi}$ คือ Normalized eigenvector ของระบบ

อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่เสถียรอย่างมีเงื่อนไข (Conditional Unstability) ในการคำนวณ จะใช้วิธีของ แครงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson) ซึ่งกำหนดให้ $\theta = 1/2$ จะได้

$$\underbrace{\left(\frac{1}{\Delta t}\underset{\sim}{C} + \frac{1}{2}\underset{\sim}{K}\right)}_{KSYS}\underset{\sim}{T}_n = \underbrace{\left(\frac{1}{\Delta t}\underset{\sim}{C} - \frac{1}{2}\underset{\sim}{K}\right)\underset{\sim}{T}_{n-1} + \frac{1}{2}(Q_{n-1}+Q_n)}_{QSYS} \qquad (ผ - 42)$$

โดยค่าที่ได้จะเป็นขีดจำกัดบนของการวิเคราะห์ เมื่อทราบคำตอบของค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ ณ รอบการคำนวณที่ $n-1$ และจากช่วงเวลา Δt ที่กำหนด สามารถทำการคำนวณหาผลลัพธ์ ณ รอบการคำนวณที่ n ได้

ฉ. เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ได้เลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบความเครียดคงที่ (Constant Strain Triangle, CST) ซึ่งสามารถที่จะคำนวณสติฟเนสเมตริก $\underset{\sim}{K}$ ของเอลิเมนต์ให้อยู่ในรูปแบบปิด (Closed Form) ได้ นับเป็นการสะดวกต่อการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาเอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังรูปที่ ผ.2 ซึ่งมีตัวแปรไม่รู้ค่าที่จุดต่อละ 1 ค่า โดยสมมุติลักษณะการกระจายแบบประมาณของอุณหภูมิบนแผ่นเรียบดังสมการ

$$\phi(x,y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \qquad (ผ - 43)$$

หรือ

$$\phi(x,y) = \underbrace{\{1 \quad x \quad y\}}_{\underset{\sim}{f}^T}\underbrace{\begin{bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \alpha_3\end{bmatrix}}_{\underset{\sim}{\alpha}}$$

หากพิจารณาค่าของ ϕ ที่จุดต่อต่าง ๆ จะได้

$$\begin{bmatrix}\phi_1\\ \phi_2\\ \phi_3\end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix}1 & x_1 & y_1\\ 1 & x_2 & y_2\\ 1 & x_3 & y_3\end{bmatrix}}_{\underset{\sim}{G}}\begin{bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \alpha_3\end{bmatrix} \qquad (ผ - 44)$$

จะได้

$$\phi(x,y) = \underbrace{\underset{\sim}{f}^T \underset{\sim}{G}^{-1}}_{\underset{\sim}{N}}\underset{\sim}{\phi} \qquad (ผ - 45)$$

เมื่อ

$$\underset{\sim}{N} = \{N_1 \quad N_2 \quad N_3\} \quad \text{โดยที่} \quad N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y) \quad i = 1,2,3$$

$$A = \text{พื้นที่ของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม} = \frac{1}{2}[x_2(y_3 - y_1) + x_1(y_2 - y_3) + x_3(y_1 - y_2)] \qquad (ผ - 46)$$

$$a_1 = x_2y_3 - x_3y_2 \qquad b_1 = y_2 - y_3 \qquad c_1 = x_3 - x_2$$
$$a_2 = x_3y_1 - x_1y_3 \qquad b_2 = y_3 - y_1 \qquad c_2 = x_1 - x_3 \qquad \text{(ผ - 47)}$$
$$a_3 = x_1y_2 - x_2y_1 \qquad b_3 = y_1 - y_2 \qquad c_3 = x_2 - x_1$$

ดังนั้น

$$\underset{\sim}{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \{N_1 \;\; N_2 \;\; N_3\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix}$$
$$= \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \qquad \text{(ผ - 48)}$$

จากสมการที่ (ผ - 24) ถึง (ผ - 32) จะได้

$$\underset{\sim}{C} = \frac{\rho c A t}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \qquad \text{(ผ – 49)}$$

$$\underset{\sim}{K_c} = \frac{k t}{4A} \begin{bmatrix} b_1b_1+c_1c_1 & b_1b_2+c_1c_2 & b_1b_3+c_1c_3 \\ & b_2b_2+c_2c_2 & b_2b_3+c_2c_3 \\ SYM & & b_3b_3+c_3c_3 \end{bmatrix} \qquad \text{(ผ – 50)}$$

$$\underset{\sim}{K_h} = \frac{h_c L_{1\text{-}2}\, t}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$ สำหรับเอลิเมนต์ที่มีการพาความร้อนตลอดผิว 1 – 2

(ผ – 51)

$$\underset{\sim}{K_{h,ev}} = \frac{K_D C_{pa} L_{1\text{-}2}\, t}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$ สำหรับเอลิเมนต์ที่มีการระเหยของน้ำตลอดผิว 1 – 2

(ผ – 52)

$$\underset{\sim}{Q_Q} = \frac{QA\, t}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(ผ – 53)}$$

$$\underset{\sim}{Q_q} = \frac{q_s L_{1\text{-}2}\, t}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$ สำหรับเอลิเมนต์ที่มีการให้ฟลักซ์ความร้อนตลอดผิว 1 - 2

(ผ – 54)

$$\underset{\sim}{Q_h} = \frac{h_c T_\infty L_{1\text{-}2}\, t}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$ สำหรับเอลิเมนต์ที่มีการพาความร้อนตลอดผิว 1 – 2

(ผ – 55)

$$\underset{\sim}{Q}_{h,ev} = \frac{K_D\left(h_a - w_s h_{gs}\right) L_{1\text{-}2}\, t}{2}\begin{bmatrix}1\\1\\0\end{bmatrix}$$ สำหรับเอลิเมนต์ที่มีการระเหยของน้ำตลอดผิว 1 – 2 (ผ – 56)

$$\underset{\sim}{Q}_{r} = \frac{\alpha q_r\, L_{1\text{-}2}\, t}{2}\begin{bmatrix}1\\1\\0\end{bmatrix}$$ สำหรับเอลิเมนต์ที่มีการดูดกลืนรังสีความร้อนตลอดผิว 1 – 2 (ผ – 57)

ข. โปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้างคอนกรีตหลาในสภาวะไม่อยู่ตัวจะใช้โปรแกรม HEAT2DT ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยทำการปรับเปลี่ยนเพิ่มเติมลำดับการทำงาน จากโปรแกรม HEAT2D ของ ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ[67] ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในสภาวะอยู่ตัว (Steady-State Heat Transfer) โดยมีลำดับการทำงานหลักของโปรแกรม แสดงได้ดังรูปที่ ผ-3 ซึ่งแต่ละส่วนทำหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

โปรแกรมหลัก

ทำหน้าที่รับข้อมูลและค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติของคอนกรีต อุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนสูงสุด สภาพทางอุตนิยมวิทยาที่เกี่ยวข้อง ช่วงเวลาสังเกตุการณ์ ส่วนเพิ่มของเวลา และเวลาที่ต้องการแสดงผล ข้อมูลกำหนดรหัสการสร้างของจุดต่อ และเอลิเมนต์ โดยทำการเรียกโปรแกรมย่อยต่าง ๆ ซึ่งทำหน้าที่ในการสร้าง โคออดิเนตของจุดต่อ และ รหัสการต่อเชื่อมเอลิเมนต์ ดังกล่าว และจุดกำหนดอุณหภูมิที่เป็น FIXED POINT และเงื่อนไขขอบเขตอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องแปงตามประเภท ภายหลังจากที่โปรแกรมรับข้อมูลแล้วจะทำการคำนวณขนาดครึ่งความกว้างแบนด์ของสติฟเนสเมตริก (Half Band Width) เพื่อกำหนดรอบการทำงานในการสำหรับจัดเก็บข้อมูลและการประมวลผล

โปรแกรมย่อย

NODEGEN - สร้างข้อมูลตำแหน่งของจุดต่อ ตามรหัสของการสร้างข้อมูล

ELEMGEN - สร้างข้อมูลรหัสการเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ ตามรหัสของการสร้างข้อมูล

FIXEDTEMP – กำหนดอุณหภูมิที่ทราบค่าที่จุดต่อ

TEMPINITIAL - กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่จุดต่อ

TRI - คำนวณเอลิเมนต์เมตริกซ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชนิดของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นรวมทั้งโหลดเวกเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และ ผลของความไม่เสถียรของการถ่ายเทความร้อน

WINDCONVECGEN- สร้างโหลดเวกเตอร์ และสติฟเนสเมตริกของเอลิเมนต์เนื่องจากผลของการพาความร้อนโดยลม

EVAPOGEN - สร้างโหลดเวกเตอร์ และสติฟเนสเมตริกของเอลิเมนต์เนื่องจากผลของการพาความร้อนโดยการระเหย

ABSORPGEN - สร้างโหลดเวกเตอร์ ของเอลิเมนต์เนื่องจากผลของการดูดกลืนรังสีจากดวงอาทิตย์

HEATGEN - สร้างโหลดเวกเตอร์ เนื่องจากผลของการกำเนิดความร้อนภายในเอลิเมนต์

ASSMBLE - ทำการจัดเก็บโหลดเวกเตอร์ และ สติฟเนสเมตริกอย่างเป็นระบบในรูปแบบของ Banded Symmetric Matrix เพื่อเป็นการประหยัดหน่วยความจำ

APPLYBC - กำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบจำเป็นของสมการ คือ การกำหนดอุณหภูมิที่จุด FIXED POINT โดยใช้วิธีการกำจัด (Elimination Approach) เพื่อจัดเตรียมระบบสมการสำหรับหาผลลัพธ์ต่อไป

SOLVE -แก้ปัญหาระบบสมการโดยใช้วิธีการกำจัดของเกาส์ (Gauss Elimination) เพื่อหาค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อต่าง ๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปใช้คำนวณโหลดเวกเตอร์สำหรับการคำนวณในรอบต่อไป

ข. ลักษณะข้อมูลที่ต้องการ และ รูปแบบผลลัพธ์ของการคำนวณ

ส่วนประกอบ และ รูปแบบข้อมูลที่โปรแกรมต้องการสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

<u>ส่วนที่ 1</u> หัวเรื่อง และคำอธิบาย

บรรทัดแรก ตัวเลขระบุจำนวนบรรทัดที่เป็นหัวเรื่อง

บรรทัดต่อไป ประโยคต่าง ๆ ที่มีจำนวนบรรทัดเท่ากับที่ระบุไว้

ตัวอย่างเช่น : 2

MAT FOUNDATION

UNIT FARENHIDE METER LBS HR

<u>ส่วนที่ 2</u> กำหนดขนาดของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์

บรรทัดแรก คำย่อกำหนดความหมายของตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ 2 ค่าตัวเลขแสดงจำนวนจุดต่อ จำนวนเอลิเมนต์ จำนวนชนิดของวัสดุ ระยะเวลาสังเกตการณ์ ค่าเพิ่มของช่วงเวลาวิเคราะห์ ช่วงเวลาสำหรับพิมพ์ผลลัพธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตลอดหน้าตัด อัตราการให้ความร้อน ค่าอุณหภูมิแวดล้อมโดยเฉลี่ย ครึ่งผลต่างของ

อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดและต่ำสุด เวลาที่เริ่มทำการวิเคราะห์ ค่าควบคุมการอ่านข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมจากไฟล์ข้อมูล

ตัวอย่าง:

NPOIN	NELEM	NMAT	TO	DT	TP	H	QS	TMEAN	HDIFF	TST	AMT
286	504	3	432	2	6	0	0	89.6	9	7	0

หมายเหตุ: AMT = 1 เมื่อต้องการอ่านข้อมูลของอุณหภูมิแวดล้อมจากไฟล์ข้อมูล

AMT = 0 เมื่อให้โปรแกรมจำลองอุณหภูมิของแวดล้อมโดยอัตโนมัติ (ดูสมการที่ ผ-8)

ส่วนที่ 3 คุณสมบัติต่าง ๆ ของปัญหา

บรรทัดแรก หัวข้อ

บรรทัดที่ 2 คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดต่อไป ตัวเลขแสดงหมายเลขระบุชนิดของวัสดุ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนในทิศทางหลัก อุณหภูมิเพิ่มแบบทักทันความร้อนสูงสุด อุณหภูมิเริ่มต้นขณะเทคอนกรีต ความหนาของเอลิเมนต์ (ให้ค่าเป็น 1 สำหรับปัญหาความเครียดระนาบ) ความหนาแน่นมวล ค่าความจุร้อนจำเพาะช่วงเวลาที่คอนกรีตเทเข้าสู่แบบหล่อก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์

ตัวอย่าง :

$ MATERIAL PROPERTIES

MAT	K	PEAK	TPOUR	THICK	DENS	C	NTLAG
1	0.81	98.06	93.2	1	150	0.23	18
2	0.81	98.06	93.2	1	150	0.23	12

ส่วนที่ 4 พิกัดของจุดต่อ

บรรทัดแรก หัวข้อ

บรรทัดที่ 2 คำย่อของการสร้างข้อมูล และจำนวนชุดข้อมูล

บรรทัดที่ 3 ข้อมูลตรรกกำหนดรหัสสร้างข้อมูล จำนวนแถวของรหัส

บรรทัดต่อไป คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดต่อ ๆ ไป หมายเลขของจุดต่อเริ่มต้น หมายเลขจุดต่อปลาย ค่าเพิ่มของหมายเลขจุดต่อ พิกัดเริ่มในแนวแกน X ค่าเพิ่มของระยะทางในแนวแกน X พิกัดเริ่มในแนวแกน Y ค่าเพิ่มของระยะทางในแนวแกน Y

บรรทัดต่อไป โหมดการเพิ่มจุดต่อ ต้องกำหนดให้มีค่า เป็น .TRUE. เมื่อต้องการเพิ่มจุดต่อ และกำหนดตำนวนจุดต่อที่ต้องการเพิ่ม

ตัวอย่าง :

$ NODAL COORDINATES

GEN	NROW
.TRUE.	2

NST	NEN	NINC	STX	DX	STY	DY
1	22	1	0	0.4	0	0

23 44 1 0 0.4 0.4 0

$ ADD NODES

ADD NADD

.TRUE. 1

NODE X-COOR Y-COOR

45 0 0.8

หมายเหตุ : เมื่อไม่ต้องการเพิ่มค่าจุดต่อ ให้กำหนดตัวแปร ADD ให้มีค่าเป็น .FALSE. และไม่ต้องใส่บรรทัดที่เหลือ

ส่วนที่ 5 กำหนดจุดที่ทราบค่าอุณหภูมิ

บรรทัดแรก หัวข้อ

บรรทัดที่ 2 คำย่อระบุจำนวนชุดข้อมูล

บรรทัดที่ 3 ค่าระบุจำนวนชุดข้อมูล

บรรทัดที่4 คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ ค่าหมายเลขจุดต่อเริ่มต้นของชุดข้อมูล หมายเลขจุดต่อสุดท้าย ค่าเพิ่มหมายเลขจุดต่อ และอุณหภูมิที่ทราบค่าที่จุดต่อ

ตัวอย่าง : $ APPLY NODAL FIXED TEMPERATURE

NOSET

1

NST NEN NINC TEMP

1 10 2 96

หมายเหตุ : ในกรณีที่ต้องการให้โปรแกรมทำการคำนวณผลลัพธ์ที่ทุก ๆ จุดต่อ ให้กำหนดค่าของ NOSET มีค่าเป็น 0 และไม่ต้องใส่ข้อมูลในบรรทัดต่อ ๆ ไป

ส่วนที่ 6 กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของจุดต่อ

บรรทัดแรก หัวข้อ

บรรทัดที่ 2 คำย่อระบุจำนวนชุดข้อมูล

บรรทัดที่ 3 ค่าระบุจำนวนชุดข้อมูล

บรรทัดที่4 คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ ค่าหมายเลขจุดต่อเริ่มต้นของชุดข้อมูล หมายเลขจุดต่อสุดท้าย ค่าเพิ่มหมายเลขจุดต่อ และอุณหภูมิเริ่มต้นของการคำนวณ

ตัวอย่าง : $ INITIAL TEMPERATURE AT NODES

NOSET

1

NST NEN NINC TEMPO

1 286 1 86

หมายเหตุ : ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบไม่อยู่ตัว ต้องกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของจุดต่อเสมอ

ส่วนที่ 7 คุณสมบัติของเอลิเมนต์

บรรทัดแรก คำย่อกำหนดความหมายของตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ 2 หมายเลขเอลิเมนต์เริ่มต้น หมายเลขเอลิเมนต์สุดท้าย ค่าเพิ่มหมายเลขของเอลิเมนต์ จุดต่อที่ 1 2 และ 3 ของเอลิเมนต์แรก ตามลำดับ ค่าเพิ่มหมายเลขจุดต่อที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ รหัสชนิดของวัสดุ รหัสของการกำเนิดความร้อนได้เองของเอลิเมนต์ การให้ความร้อนที่ผิวจากภายนอก และ การพาความร้อนตลอดหน้าตัด

บรรทัดต่อ ๆ ไป โหมดการเพิ่มจุดต่อ ต้องกำหนดให้มีค่า เป็น .TRUE. เมื่อต้องการเพิ่มจุดต่อ และกำหนดตำนวนจุดต่อที่ต้องการเพิ่ม

ตัวอย่าง :

EST	EEN	EINC	II	JJ	KK	DII	DJJ	DKK	MAT	Q	QS	H
1	39	2	1	24	23	1	1	1	1	1	0	0
2	40	2	1	2	24	1	1	1	1	1	0	0

$ ADD ELEMENT

ADD	NADD
.TRUE.	2

ELE	II	JJ	KK	MAT	Q	QS	H
41	21	22	43	1	1	0	0
42	22	44	43	1	1	0	0

หมายเหตุ : รหัสของรหัสของการกำเนิดความร้อนได้เองของเอลิเมนต์ การให้ความร้อนที่ผิวจากภายนอก และการพาความร้อนตลอดหน้าตัด ให้มีค่าเป็น 1 เมื่อต้องการให้มีโหลดชนิดนั้น ๆ และ 0 เมื่อไม่มีโหลดประเภทนั้น ๆ

ส่วนที่ 8 การพาความร้อนที่ขอบของเอลิเมนต์โดยลม

บรรทัดแรก หัวข้อ

บรรทัดที่ 2 คำย่อของการสร้างข้อมูล และจำนวนชุดข้อมูล

บรรทัดที่ 3 ข้อมูลตรรกกำหนดรหัสสร้างข้อมูล จำนวนแถวของรหัส

บรรทัดที่ 4 คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ 5 หมายเลขเอลิเมนต์เริ่มต้น หมายเลขเอลิเมนต์สุดท้าย ค่าเพิ่มหมายเลขของเอลิเมนต์ จุดต่อปลายทั้งสองของขอบที่มีการพาความร้อน ค่าส่วนเพิ่มหมายเลขของจุดต่อทั้งสองของขอบที่มีการพาความร้อน เวลาที่เริ่มมีการพาความร้อนโดยลมนับจากเวลาเริ่มต้น สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

บรรทัดต่อ ๆ ไป โหมดการเพิ่มเอลิเมนต์

ตัวอย่าง :

```
$  WIND CONVECTION
GEN     NROW
.TRUE.  1
EST     EEN     EINC    N1      N2      DN1     DN2     NTST    HC
1       463     42      1       23      22      22      24      0.7
$ ADD ELEMENT
ADD     NADD
.TRUE.  1
ELE     N1      N2      NTST    HC
464     265     266     24      0.7
```

<u>ส่วนที่ 9</u> การพาความร้อนที่ขอบของเอลิเมนต์โดยการระเหย

บรรทัดแรก หัวข้อ

บรรทัดที่ 2 คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ 3 ข้อมูลตรรกกำหนดรหัสสร้างข้อมูล จำนวนแถวของรหัส ความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์

บรรทัดที่ 4 คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ 5 หมายเลขเอลิเมนต์เริ่มต้น หมายเลขเอลิเมนต์สุดท้าย ค่าเพิ่มหมายเลขของเอลิเมนต์ จุดต่อปลายทั้งสองของขอบที่มีการพาความร้อน ค่าส่วนเพิ่มหมายเลขของจุดต่อทั้งสองของขอบที่มีการพาความร้อน เวลาที่เริ่มมีการพาความร้อนโดยการระเหยนับจากเวลาเริ่มต้น สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

บรรทัดต่อ ๆ ไป โหมดการเพิ่มเอลิเมนต์

ตัวอย่าง :

```
$  EVAPORATION
GEN     NROW    PRESS   HUMID
.TRUE.  1       1       0.85
EST     EEN     EINC    N1      N2      DN1     DN2     NTST    HC
1       463     42      1       23      22      22      24      1
$ ADD ELEMENT
ADD     NADD
.TRUE.  1
ELE     N1      N2      NTST    HC
464     265     266     24      0.7
```

<u>ส่วนที่10</u> การดูดกลืนรังสีความร้อนแบบคลื่นสั้น

บรรทัดแรก หัวข้อ

บรรทัดที่ 2 คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ 3 ข้อมูลตรรกกำหนดรหัสสร้างข้อมูล จำนวนแถวของรหัส ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อน ปริมาณแสงแดดใน 1 วัน เวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้น เวลาที่ดวงอาทิตย์ตก

บรรทัดที่ 4 คำย่อกำหนดความหมายตัวแปรต่าง ๆ

บรรทัดที่ 5 หมายเลขเอลิเมนต์เริ่มต้น หมายเลขเอลิเมนต์สุดท้าย ค่าเพิ่มหมายเลขของเอลิเมนต์ จุดต่อปลายทั้งสองของขอบที่มีการพาความร้อน ค่าส่วนเพิ่มหมายเลขของจุดต่อทั้งสองของขอบที่มีการพาความร้อน เวลาที่เริ่มมีการดูดกลืนรังสีความร้อนนับจากเวลาเริ่มต้น

บรรทัดต่อ ๆ ไป โหมดการเพิ่มเอลิเมนต์

ตัวอย่าง :

```
$  ABSORPTION OF SHORT WAVE  DUE TO  RADIATION
GEN     NROW  ABS     QR      TAM     TPM
.TRUE.  1     0.5     2000    7       17
EST     EEN   EINC    N1      N2      DN1     DN2     NTST
465     503   2       265     266     1       1       0
$ ADD ELEMENT
ADD     NADD
.TRUE.  1
ELE     N1      N2      NTST
464     265     266     0
```

ส่วนที่ 11 ระบุจุดต่อที่ต้องการพิมพ์ผลลัพธ์

บรรทัดแรก คำระบุจุดต่อที่ต้องการแสดงผลลัพธ์

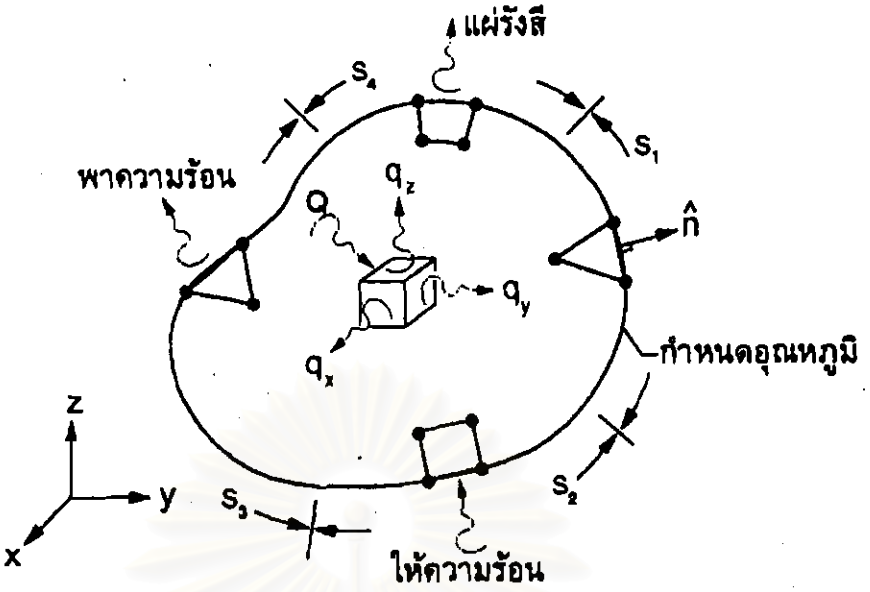
บรรทัดที่ 2 จำนวนจุดต่อที่ต้องการแสดงผลลัพธ์

บรรทัดที่ 3 หมายเลขจุดต่อที่ต้องการแสดงผลลัพธ์เรียงตามลำดับจากน้อยไปมาก

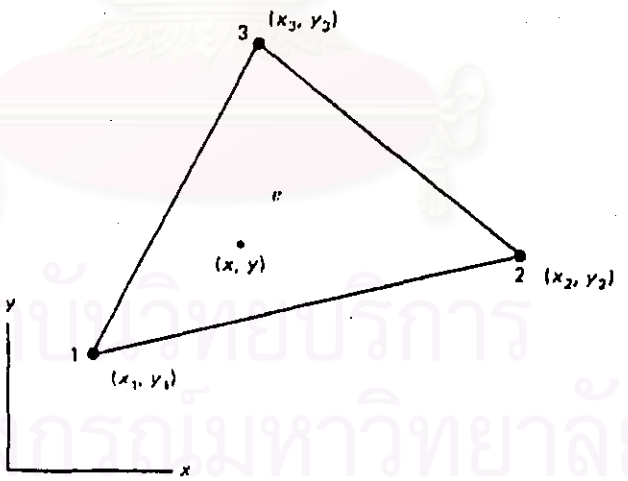
ตัวอย่าง :

```
LIST NODE
3
1 41  209  253
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ผ.1 ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในสามมิติ



รูปที่ ผ.2 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบเชิงเส้นที่ใช้ในการวิเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดเพื่อควบคุมการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตหล่า

สมมติฐานของการวิเคราะห์

1. โครงสร้างมีการหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความลึกเท่านั้น
2. หน้าตัดมีความสมมาตรและอุณหภูมิกระจายสม่ำเสมอ การหดตัวเกิดขึ้นในแนวแกนเท่านั้น
3. การกระจายอุณหภูมิบนหน้าตัดของโครงสร้างหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. คอนกรีตยังไม่เกิดการแตกร้าว

การวิเคราะห์

พิจารณาชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีการเสริมเหล็กในแนวแกนสมมาตรทั้งหน้าตัด ดังรูปที่ ผ.3 เมื่อคอนกรีตล้วนเกิดการหดตัวด้วยความเครียดเท่ากับ ε_{sh} เหล็กเสริมจะหดตัว เท่ากับ x ในขณะที่คอนกรีตจะถูกดึงรั้งไว้ด้วยความเครียดเท่ากับ ε_c เมื่อพิจารณาความสอดคล้องทางความเครียด (Strain compatibility) ของหน้าตัด จะได้

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{sh} - x \qquad \text{(ผ-58)}$$

จากกฎความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของวัสดุในช่วงอิลาสติก (Constitutive law) จะได้

$$f_{c,t}\frac{(1+C_t)}{E_c} = \varepsilon_{sh} - \frac{f_s}{E_s} \qquad \text{(ผ-59)}$$

พิจารณาสมดุลย์ของแรงในแนวแกนบนหน้าตัด จะได้

$$f_s A_s = f_{c,t} A_c \qquad \text{(ผ-60)}$$

จากสมการที่ (ผ-59) และ (ผ-60) จะเขียนหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตได้ดังสมการ

$$f_{c,t} = \frac{\varepsilon_{sh}}{\frac{A_c/A_s}{E_s} + \frac{(1+C_t)}{E_c}} \qquad \text{(ผ-61)}$$

โดยที่

A_c, A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต และเหล็กเสริม ตามลำดับ

E_c, E_s คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และ เหล็กเสริม ตามลำดับ

C_t คือ สัมประสิทธิ์การคืบตัวของคอนกรีต

การหดตัวของคอนกรีตล้วน (ε_{sh}) ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดความลึกของโครงสร้าง คำนวณได้จาก

$$\varepsilon_{sh} = \int_h \alpha \, dT \qquad \text{(ผ-62)}$$

หรือ

$$\varepsilon_{sh} = \int_h \alpha \frac{dT}{dy} \, dy \qquad \text{(ผ-63)}$$

α คือ สัมประสิทธิ์การยืดหดตัวเนื่องจากผลของอุณหภูมิของคอนกรีต กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-5} ถึง 1.3×10^{-5} ต่อ องศาเซลเซียส

$\frac{dT}{dy}$ คือ เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ณ เวลาที่พิจารณา (องศาเซลเซียส ต่อเมตร)

h คือ ระยะครึ่งหนึ่งของความลึกของโครงสร้าง (เมตร)

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงการกระจายอุณหภูมิบนหน้าตัดของโครงสร้างตามความลึกจากผิวได้ดังรูปที่ ผ.4 และจากการวิเคราะห์ความถดถอย สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความลึกได้ในรูปเอกซ์โปเนนเชียล ดังสมการ

$$T = a\left(b - e^{-cy}\right) \qquad \text{(ผ-64)}$$

เมื่อ a, b, c คือ ค่าคงที่ เท่ากับ 38.36 (องศาเซลเซียส) 1.86 และ 3.47 (ต่อ เมตร) ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม และคุณสมบัติการนำความร้อนของคอนกรีต

y คือ ความลึกจากผิวถึงจุดที่พิจารณา (เมตร)

T คือ อุณหภูมิ ณ จุดที่พิจารณา (องศาเซลเซียส)

พิจารณาสมการที่ (ผ-64) จะพบว่า

$$T_{max} = ab \qquad \text{(ผ-65)}$$

และ

$$T_{surface} = a\left(b - 1\right) \qquad \text{(ผ-66)}$$

เมื่อ T_{max} คือ อุณหภูมิสูงสุดที่กึ่งกลางความลึกของโครงสร้าง (องศาเซลเซียส)

$T_{surface}$ คือ อุณหภูมิที่ผิวของโครงสร้าง (องศาเซลเซียส)

จากสมการที่ (ผ-65) และ (ผ-66) จะได้

$$a = T_{max} - T_{surface} \tag{ผ-67}$$

และ $$b = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{surface}} \tag{ผ-68}$$

เมื่อคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลง จะได้ c มีค่าคงที่ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (ผ-64) ใหม่ได้เป็น

$$T = T_{max}\left(1 - \frac{e^{-cy}}{T_{max}}\left(T_{max} - T_{surface}\right)\right) \tag{ผ-69}$$

แทนสมการที่ (ผ-69) ในสมการที่ (ผ-63) จะได้

$$\varepsilon_{sh} = \alpha\left(T_{max} - T_{surface}\right)\left(1 - e^{-ch}\right) \tag{ผ-70}$$

ดังนั้นหากทราบอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ความลึกของโครงสร้าง ปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต และหน่วยแรงดึงของคอนกรีตที่ยอมให้สามารถคำนวณอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดที่ยอมให้ได้ดังสมการ

$$\Delta T = T_{max} - T_{surface} = \frac{f_{c,t}}{\alpha\left(1 - e^{-ch}\right)}\left[\frac{A_c/A_s}{E_s} + \frac{\left(1 + C_t\right)}{E_c}\right] \tag{ผ-71}$$

เมื่อ $f_{c,t}$ มีค่าไม่เกิน หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีต ซึ่งได้มาจากการทดสอบแบบผ่าซีก ตามมาตรฐาน โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $0.5\sqrt{fc'}$ สำหรับคอนกรีตหน่วยน้ำหนักปกติ และใช้ตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 1.7 สำหรับคอนกรีตหน่วยน้ำหนักปกติ

จากสมดุลย์ของแรงบนหน้าตัด จะได้ว่าหน่วยแรงดึงบนหน้าตัดคอนกรีตสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมต่อคอนกรีต และหน่วยแรงของเหล็กเสริม เพื่อที่จะควบคุมการแตกร้าวของโครงสร้าง ต้องจำกัดหน่วยแรงในเหล็กเสริมมิให้เกินพิกัดที่ยอมให้ ซึ่งสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงดึงในแนวแกน สามารถคำนวณได้จากสมการที่เสนอโดย Hognestad[50] ดังนี้

$$w_{max} = \frac{d_b f_s f_{c,t}}{\rho_e 2u E_s} \tag{ผ-73}$$

เมื่อ w_{max} คือ ความกว้างของรอยแตกสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้น (มิลลิเมตร)

ρ_e คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตประสิทธิผล มีค่าเท่ากับ A_s/A_e สำหรับชิ้นส่วนรับแรงดึงตามแนวแกน $A_e = A_g$

d_b คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (มิลลิเมตร)

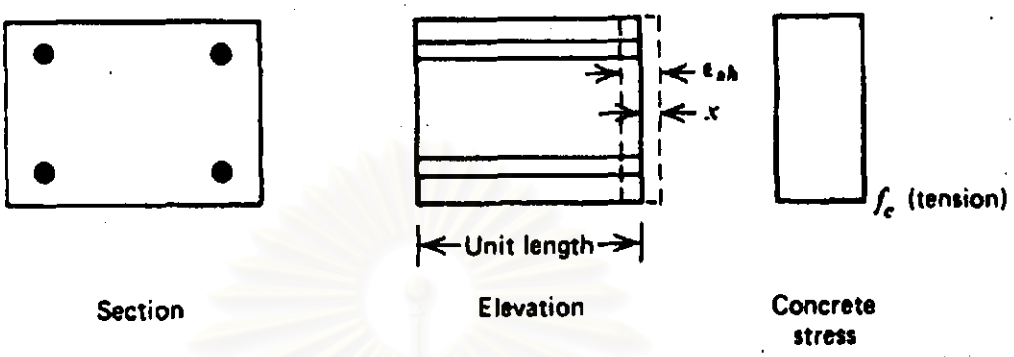
u คือ หน่วยแรงยึดหน่วงของคอนกรีตที่ยอมให้โดยเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.) พิจารณาได้จากมาตรฐานของ วสท.1007-34 สำหรับเหล็กเสริมข้ออ้อย ตามมาตรฐาน ASTM A305 รับแรงดึง มีค่าเท่ากับ $3.23\sqrt{fc'}/d_b$ กก./ตร.ซม. และไม่เกิน 35 กก./ตร.ซม.

แทนสมการที่ (ผ-60) ในสมการที่ (ผ-73) จะได้

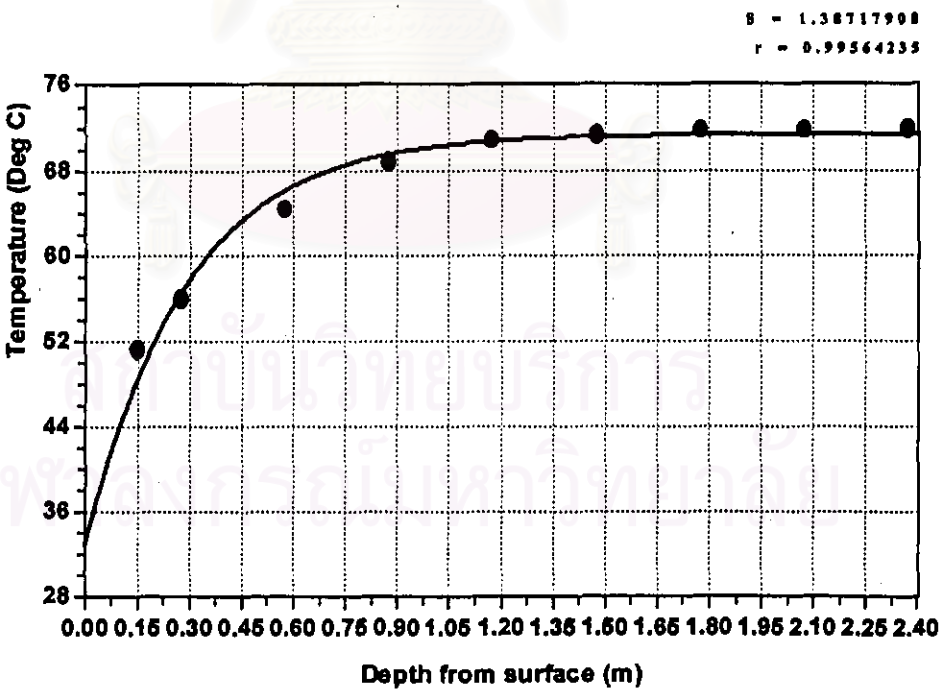
$$f_s = \sqrt{\frac{2w_{max}uE_s}{d_b}} \qquad \text{(ผ-74)}$$

จากข้อกำหนดของ ACI Committee 224[23] กำหนดให้ความกว้างรอยแตกมีค่าไม่เกิน 0.30 มม. สำหรับโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับความชื้น หรืออยู่ใต้ดิน เมื่อกำหนดให้โครงสร้างมีการเสริมเหล็กเพื่อควบคุมการแตกร้าวเนื่องจากผลของอุณหภูมิตามข้อกำหนดของ ACI 318-95[58] ด้วยอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมต่อต่อหน้าตัดของคอนกรีตเท่ากับ 0.0018 และเพื่อให้เกิดผลในทางปลอดภัย สมควรกำหนดให้อุณหภูมิเพิ่มในโครงสร้างคอนกรีตหลามีค่าไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 175 กก./ตร.ซม. และสำหรับโครงสร้างที่มีความลึกน้อยกว่า 3.00 เมตร จะเพิ่มค่าอุณหภูมิเพิ่มได้ดังสมการที่ (ผ-71) โดยหน่วยแรงดึงในคอนกรีต จะถูกควบคุมโดยความกว้างของรอยแตกที่ยอมให้ ดังสมการที่ (ผ-74)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ผ.3 การหดตัวของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดสมมาตร



รูปที่ ผ.4 การกระจายอุณหภูมิของหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์

ภาคผนวก ค

มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

มอก. 15-2523	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
มอก. 213-2520	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย คอนกรีตผสมเสร็จ
มอก. 566-2528	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย มวลผสมคอนกรีต
มอก. 733-2530	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต
มอก. 985-2533	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับทำคอนกรีตไหล

มาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้อง

AGGREGATES	
ASTM C33-93	Specifications for Concrete Aggregates
ASTM C29/C 29M-91a	Standard Test Method for Unit Weight and Void in Aggregate
ASTM C70-94	Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate
ASTM C127-93	Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate
ASTM C128-93	Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate
ASTM C136-95a	Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
ASTM C1252-93	Standard Test Method for Void Content, Uncompacted, of Fine Aggregates (as Influenced by Particle shape, Surface Texture, and Grading)
CONCRETE	
ASTM C94-96	Specifications for Ready-Mixed Concrete
ASTM C494-92	Specifications for Chemical Admixtures for Concrete
ASTM C1017-92	Specifications for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete
ASTM C39-94	Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
ASTM C143-90a	Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete
ASTM C617-94	Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
ASTM C192/C 192M-95	Standard Practice for Concrete Test Specimens, Making and Curing in the Laboratory
ASTM C1074-93	Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Concept

ภาคผนวก ค (ต่อ)

CEMENTITIOUS MATERIAL

ASTM C150-95a	Specifications for Portland Cement
ASTM C188-95	Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement
ASTM C204-96	Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus
ASTM C1240-95a	Specifications for Silica Fume for Use in Hydraulic-Cement Concrete and Mortar
ASTM C618-96	Specifications for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete

GENERAL METHODS OF TESTING

ASTM E74-91	Standard Practice for Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Load Indication of TestingMachines

มาตรฐาน BSI และ DIN ที่เกี่ยวข้อง

BS 812: Part 105.1:1985	Method for Determination of Flakiness Index
DIN 1048:Part 1	Method for Determination of Flow of Fresh Concrete

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การใช้งานโปรแกรม

ส่วนประกอบของโปรแกรม

โปรแกรม HPCX ประกอบไปด้วยส่วนทำงานหลักสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนควบคุมโปรแกรม (Program Controller) ซึ่งทำหน้าที่ เปิด ปิด ฟอร์มสำหรับออกแบบ บันทึก หรือเรียกแฟ้มข้อมูล พิมพ์รายงานผลลัพธ์ ตั้งค่าตัวเลือกต่าง ๆ ออกจากโปรแกรม และส่วนฟอร์มการออกแบบ ซึ่งประกอบไปด้วยหน้าต่างย่อย เรียกว่า แท็บ (Tab) ซึ่งผู้ออกแบบสามารถสับเปลี่ยนไปมาได้ขณะทำการออกแบบ ฟอร์มการออกแบบจะประกอบด้วยหน้าต่างย่อยหรือแท็บ จำนวน 4 หน้า ซึ่งมีหน้าที่ติดต่อกับผู้ออกแบบในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น การรับข้อมูล หรือ แสดงผลของการคำนวณ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

หน้าต่างรับข้อมูลวัสดุผสม

ภายในประกอบไปด้วยส่วนรับข้อมูลของวัสดุผสมที่แบ่งด้วยเส้นกรอบและเส้นกรอบย่อยต่าง ๆ ได้แก่ กรอบรับข้อมูลคุณสมบัติของมวลรวม ตารางกริดรับข้อมูลขนาดคละของมวลรวม กรอบรับข้อมูลชนิดและค่าปริมาณซีเมนต์สูงสุดในส่วนผสม กรอบรับข้อมูลอัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษสูงสุด และต่ำสุด และกรอบรับข้อมูลพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ ได้แก่ ปริมาณช่องว่างของมวลรวม และปริมาณฟองอากาศในส่วนผสม นอกจากนี้ในกรณีที่ผู้ใช้ขาดข้อมูลที่แน่ชัดของมวลรวมและวัสดุผสมที่ใช้โปรแกรมยังได้เตรียมกรอบสำหรับใช้ค่าที่ตั้งไว้ เพื่ออำนวยความสะดวกในการออกแบบ แสดงได้ดังรูปที่ ผ.5

หน้าต่างรับข้อมูลเพื่อกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตในการออกแบบ

ใช้ในขั้นตอนการคำนวณออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงภายหลังจากที่โปรแกรมได้รับข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติวัสดุผสมเรียบร้อยแล้ว ภายในประกอบไปด้วย กรอบรับข้อมูลต่าง ๆ เรียงตามลำดับขั้นของการออกแบบ ได้แก่ กรอบสำหรับเลือกชนิดของคอนกรีตสมรรถนะสูงในการออกแบบ กรอบสำหรับเลือกวิธีการผสมมวลรวม กรอบสำหรับกำหนดค่ากำลังอัดของคอนกรีต กรอบสำหรับกำหนดพารามิเตอร์สำหรับใช้พิจารณาข้อกำหนดด้านความทนทานในการออกแบบส่วนผสม กรอบสำหรับเลือกระดับความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต กรอบสำหรับกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนที่เกิดขึ้น และกรอบสำหรับกำหนดสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยแร่ธาตุผสมเพิ่ม แสดงได้ดังรูปที่ ผ.6

หน้าต่างแสดงขนาดคละของมวลรวม

ประกอบไปด้วย กราฟแสดงการกระจายขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสม รวมทั้งขนาดคละร่วมจากการคำนวณ และขอบเขตขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง กรอบสำหรับแสดงสัดส่วนของ

มวลรวมต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณทั้งโดยปริมาตร และโดยน้ำหนัก ตารางกริดแสดงขนาดคละร่วมของมวลรวมที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดของขนาดคละที่เหมาะสม ดังแสดงได้ดังรูปที่ ผ.7

หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณออกแบบ

ประกอบไปด้วย ตารางกริดแสดงส่วนผสมที่ได้จากการคำนวณออกแบบ กราฟแสดงปริมาณของวัสดุผสมต่าง ๆ กราฟแสดงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ และกราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแบบกักกันความร้อน ดังแสดงได้ดังรูปที่ ผ.8

การใช้งาน

ขั้นตอนของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงด้วยโปรแกรมคอมพิเวเตอร์จะถูกดำเนินไปตามตามลำดับขั้นตอนที่เสนอแนะในงานวิจัย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ป้อนคุณสมบัติของวัสดุผสม ในส่วนต่าง ๆ ของหน้าต่างคุณสมบัติของวัสดุ โดยข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องกำหนดในส่วนต่าง ๆ ได้แก่

(ส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2)

มวลรวม - ชนิดของมวลรวมที่ใช้ (Type of Aggregate used) ได้แก่ หินขนาดโตสุด 20 มม. และ 10 มม. และ ทราย ที่มีขนาดคละแตกต่างกันได้2 ชนิด

- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
- ค่าการดูดซึม (Absorption)
- ความชื้น (Moisture Content)
- ร้อยละที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานโดยน้ำหนักของมวลรวม (Percent Passing by Weight)

ในกรณีที่มีการใช้มวลรวมครบทั้ง 4 ชนิดผู้ออกแบบสามารถกำหนดให้ใช้วิธีการผสมมวลรวมแบบซิมเพลกซ์ ได้โดยกำหนดให้มีการใช้มวลรวมอย่างน้อย 1 ชนิดในปริมาณที่ต่ำที่สุด หากผู้ออกแบบต้องการบันทึกข้อมูลของมวลรวมที่ใช้ สามารถทำได้ด้วยการเลือกที่เมนู ไฟล์ /บันทึกข้อมูลมวลรวม (File/ Save Aggregate Data) จะปรากฏเมนูย่อยขึ้นบนหน้าจอ และให้ผู้ออกแบบทำการกำหนดชื่อของไฟล์ข้อมูลมวลรวมซึ่งโปรแกรมจะตั้งประเภทของไฟล์ให้มีคำต่อท้ายเป็น .agg เพื่อแยกออกจากไฟล์ข้อมูลส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

เมื่อต้องการเรียกใช้ข้อมูลของมวลรวมที่เคยทำการบันทึกไว้แล้ว สามารถทำได้โดยเลือกที่เมนู ไฟล์/ เรียกข้อมูลมวลรวม (File/ Load Aggregate Data) จะปรากฏเมนูย่อยขึ้นบนหน้าจอ และให้ผู้ออกแบบทำการเลือกชื่อของไฟล์ข้อมูลมวลรวมที่มี โดยเมนูย่อยนี้จะแสดงให้เห็นเฉพาะไฟล์ข้อมูลของมวลรวมซึ่งจะมีคำต่อท้ายเป็น .agg เท่านั้น เพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล

(ส่วนที่ 3)

ซีเมนต์ - ประเภทของซีเมนต์ที่ใช้ โดยโปรแกรมจะกำหนดให้เป็นตัวเลือก ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement, OPC) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดแข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement, RHPC) และ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดต้านทานซัลเฟต (Sulphate Resistant Portland Cement, SRPC)

- ปริมาณซีเมนต์สูงสุดในส่วนผสม เป็นค่าที่กำหนดสำหรับการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตไหลและคอนกรีตกำลังสูง ในกรณีของการออกแบบคอนกรีตหลานั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณปริมาณซีเมนต์สูงสุดจากข้อกำหนดอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนสูงสุด

(ส่วนที่ 4)

สารลดน้ำพิเศษ - กำหนดอัตราการใช้งานต่ำสุด และสูงสุด (Minimum and Maximum Dosage)

(ส่วนที่ 5)

ป้อนข้อมูลของช่องว่างของมวลรวม และปริมาณอากาศในส่วนผสม

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> กำหนดข้อมูลคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง ในหน้าต่างแสดงรายการการออกแบบ โดยมีขั้นตอนย่อยดังนี้

2.1 เลือกประเภทของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ต้องการออกแบบ ในส่วนที่ 1 ได้แก่ คอนกรีตไหล (Flowable Concrete) คอนกรีตหลา (Mass Concrete) และคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete)

2.2 กำหนดวิธีการผสมมวลรวม ในส่วนที่ 2 ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (ค่าที่ตั้งไว้) หรือวิธีซิมเพล็กซ์ ซึ่งโปรแกรมจะสามารถทำการคำนวณโดยวิธีการซิมเพล็กซ์ได้ต่อเมื่อมีการใช้ไวลรวมครบทั้ง 4 ชนิด และมีชนิดใดชนิดหนึ่งถูกกำหนดให้ใช้ในปริมาณที่ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ได้จากการแสดงผลของหน้าต่างแสดงผลการผสมมวลรวม และทำการปรับแก้คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ตามความเหมาะสม

2.3 กำหนดค่ากำลังอัดระบุ (Characteristic Strength) ของคอนกรีต และอายุอ้างอิงของคอนกรีตที่ทำการทดสอบในส่วนที่ 3 ของหน้าต่างแสดงรายการออกแบบโดยโปรแกรมจะสามารถคำนวณค่ากำลังอัดเป้าหมาย (Target Mean Strength) ของคอนกรีตได้ 2 วิธี คือ

2.3.1 วิธีการปฏิบัติมาตรฐานของ ACI 214 (ACI 214 Standard Paractice)

ด้วยวิธีการของ ACI 214 Committee [55] ผู้ออกแบบต้องป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณดังนี้

- สัดส่วนเสียหาย (Proportion Defective) มีค่าตั้งแต่ 1% 2.275% 2.5% 5% 10% และ 20% ซึ่งจะมีผลต่อค่าคงที่ทางสถิติ ในการคำนวณค่ากำลังอัดส่วนเผื่อ (Strength Margin)

- ชั้นการทำงาน (Class of Operation) ได้แก่ ข้อมูลจากในสนาม (General Construction Testing) หรือ ข้อมูลที่ได้จากส่วนผสมทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Trial Batches) ซึ่งจะมีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของตัวอย่าง
- ระดับมาตรฐานการควบคุม ได้แก่ ระดับ ดีเลิศ (Excellent) ดีมาก (Very Good) ดี (Good) พอใช้ (Fair) และแย่ (Poor) โดยจะมีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง
- จำนวนข้อมูลของตัวอย่างทดสอบ จะมีผลต่อการปรับแก้ค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการคำนวณค่ากำลังอัดส่วนเผื่อ

2.3.2 กำหนดค่าส่วนเผื่อกำลังอัด (Strength Margin) โดยตรง

ผู้ออกแบบสามารถกำหนดค่าส่วนเผื่อกำลังอัดได้โดยตรงจากตัวเลือก "ค่าที่กำหนดโดยผู้ใช้ (User Specified Value) " และทำการกำหนดค่าส่วนเผื่อกำลังอัดมีหน่วยเป็น เมกะพาสคาล (Mpa) ในกรณีที่ผู้ออกแบบต้องการควบคุมค่าส่วนเผื่อมิให้น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนดโดย ACI 214 Committee แล้วผู้ออกแบบต้องทำเครื่องหมายที่ กล่องเช็คข้อมูล (Checkbox) "ค่าต้องการต่ำสุดของ ACI 214 (ACI 214 Minimum Requirement)"

2.4 กำหนดพารามิเตอร์เพื่อกำหนดค่าจำกัดของการออกแบบส่วนผสมเพื่อความทนทานของคอนกรีต ในส่วนที่ 4 ได้แก่

- ระดับชั้นความเปิดเผยของโครงสร้างคอนกรีต (Classes of Exposure)
- ระยะหุ้มเหล็กเสริม

2.5 กำหนดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต ในส่วนที่ 5 ได้แก่

- ค่ายุบตัวเริ่มต้น สำหรับคอนกรีตไหล และคอนกรีตหลา สามารถทำการกำหนดค่ายุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตได้ตั้งแต่ 75 มม. ถึง 150 มม. ในขณะที่คอนกรีตกำลังสูง ผู้ออกแบบจะสามารถเลือกค่ายุบตัวเริ่มต้นของส่วนผสมได้สูงไม่เกิน 50 มม.
- ระดับความสามารถการไหลตัวของคอนกรีต ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ ระดับปกติ ระดับปานกลาง และ ระดับสูง

2.6 ในกรณีที่ทำการออกแบบส่วนผสมเป็นคอนกรีตหลา ผู้ออกแบบต้องกำหนดพารามิเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิเพื่อสูงสุดแบบกักกันความร้อนที่เกิดขึ้น ในส่วนที่ 6 ได้แก่

- ค่าอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนสูงสุดที่ยอมให้ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณปริมาณซีเมนต์สูงสุดที่ยอมให้ในส่วนผสม
- อุณหภูมิขณะทำการเทคอนกรีตมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส จะมีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิแบบกักกันความร้อน

2.7 กำหนดสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยสารปอซโซลาน ในส่วนที่ 7

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จเรียบร้อย คลิ๊กที่ปุ่ม "OK" เพื่อให้โปรแกรมทำการประมวลผล

ขั้นตอนที่ 4 เปลี่ยนไปที่หน้าต่างแสดงผล เพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบจากตารางส่วนผสมผลลัพธ์ ในส่วนที่ 1 ซึ่งถูกแปลงออกเป็น 15 แถว และ 4 หลัก เพื่อใช้แสดงผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณออกแบบ โดยในแต่ละแถว และแต่ละหลัก จะใช้แสดงผลลัพธ์ดังนี้

แถวที่ 1	แสดงปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม
แถวที่ 2	แสดงปริมาณของแร่ธาตุผสมเพิ่มที่ต้องใช้ (ถ้ามี) หน่วยเป็น กิโลกรัม
แถวที่ 3	แสดงปริมาณน้ำที่ต้องใช้ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม
แถวที่ 4 ถึง 7	แสดงปริมาณของมวลรวมที่ใช้แยกตามประเภท ได้แก่ มวลรวมหยาบขนาด 20 มม. มวลรวมหยาบขนาด 10 มม. มวลรวมละเอียดชนิด A และ มวลรวมละเอียดชนิด B ตามลำดับ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม
แถวที่ 8	แสดงปริมาณของสารลดน้ำพิเศษที่ต้องใช้ มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร
แถวที่ 9	แสดงสัดส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม
แถวที่ 10	แสดงค่าของฟังก์ชั่นประสิทธิผลของวัสดุประสานในส่วนผสม
แถวที่ 11	แสดงแสดงสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของส่วนผสม
แถวที่ 12	แสดงค่าน้ำหนักรวมของวัสดุผสมทั้งหมด ยกเว้นสารเคมีผสมเพิ่ม
แถวที่ 13	แสดงค่าคาดการณ์ของค่ายุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่คำนวณได้จากส่วนผสมผลลัพธ์ มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
แถวที่ 14	แสดงค่าคาดการณ์ของค่ายุบตัวของคอนกรีตที่คำนวณได้จากส่วนผสมผลลัพธ์ มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
แถวที่ 15	แสดงค่าคาดการณ์ของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัวของคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธีการมาตรฐานของ DIN 1045 มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
แถวที่ 16	แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีหน่วยเป็น เมกะพาสคาล (Mpa)
แถวที่ 17	แสดงอายุของคอนกรีตที่ใช้อ้างอิงในการออกแบบ มีหน่วนเป็น วัน

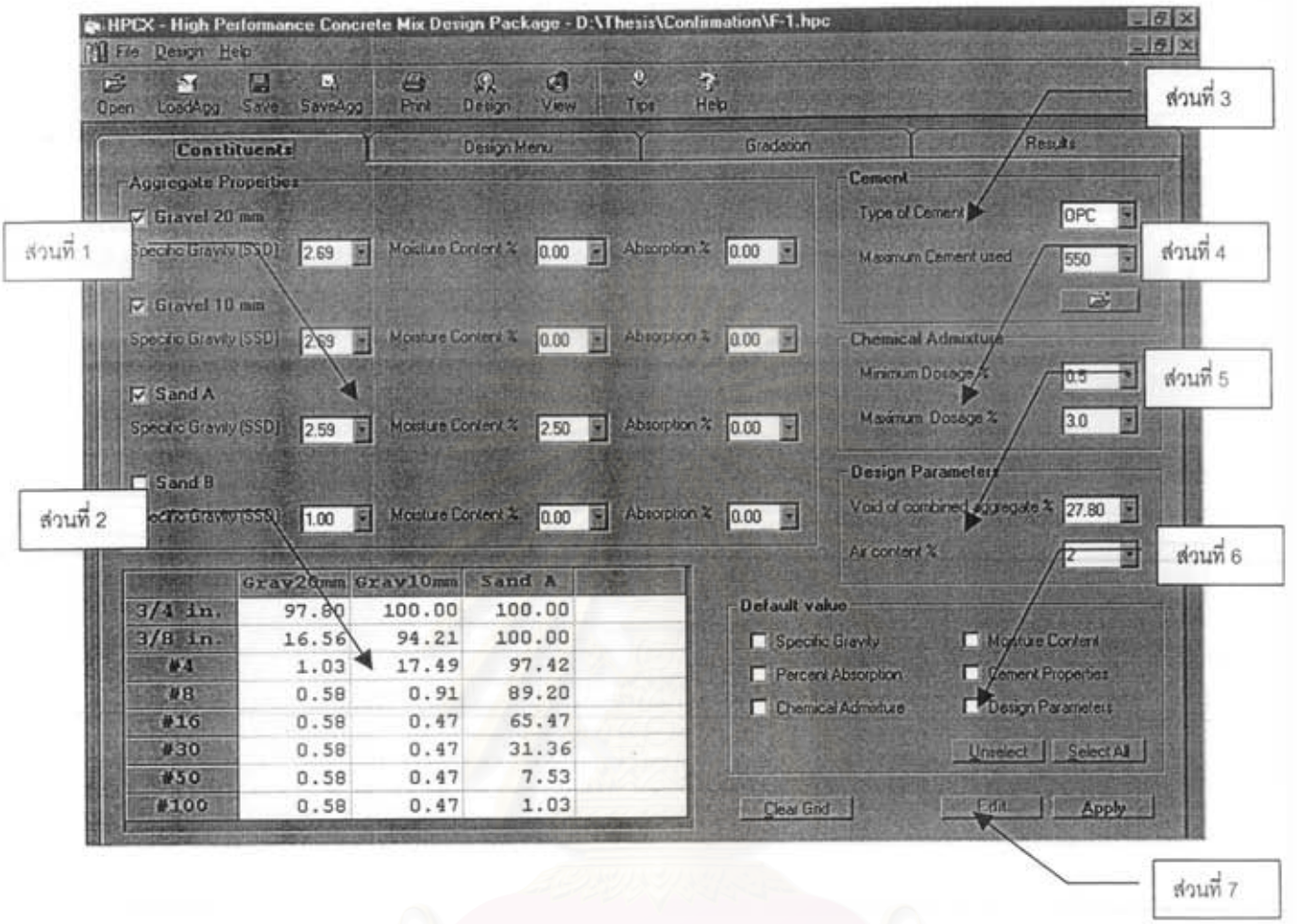
หลักที่ 1	แสดงส่วนผสมในขณะที่มวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ต่อหน่วยลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต
หลักที่ 2	แสดงส่วนผสมในขณะที่มวลรวมอยู่ในสภาพเปียก หรือสภาพจริง ณ ที่กองเก็บ ต่อหน่วยลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต
หลักที่ 3	แสดงส่วนผสมในขณะที่มวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ต่อปริมาตรที่ทำการชั่งตวงคอนกรีต
หลักที่ 4	แสดงส่วนผสมในขณะที่มวลรวมอยู่ในสภาพเปียก หรือสภาพจริง ณ ที่กองเก็บ ต่อปริมาตรที่ทำการชั่งตวงคอนกรีต

ในส่วนที่ 2 จะแสดงปริมาณของวัสดุผสมหลัก ได้แก่ ซีเมนต์ มวลรวม น้ำ และแร่ธาตุผสมเพิ่ม ในรูปแบบกราฟฟิก ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกได้ว่าต้องการแสดงผลเป็นกราฟแท่ง 3 มิติ (3D Bar Chart) หรือกราฟวงกลมแบบ 2 มิติ (2D Pie Chart) ได้จากส่วนที่ 3 โดยเมื่อเลือกการแสดงผลแบบ 3 มิติ ผู้ออกแบบสามารถหมุนกราฟในมุมมองต่าง ๆ ได้ โดยกดปุ่ม Ctrl และเคลื่อนอุปกรณ์ชี้ไปตามมุมมองที่ต้องการ

ในส่วนที่ 4 จะเป็นกล่องเครื่องหมายเพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกการแสดงผลแบบกราฟฟิกของกราฟการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ และกราฟแสดงการเพิ่มอุณหภูมิแบบกักกันความร้อนในคอนกรีตหลา

ขั้นตอนที่ 5 ผู้ออกแบบสามารถทำการคำนวณปริมาณวัสดุผสมตามปริมาตรตวงของคอนกรีตได้ โดยป้อนข้อมูลปริมาตรของคอนกรีตในส่วนที่ 5 โดยค่าที่ได้จะแสดงผลในตารางทั้งส่วนผสมที่มวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง และในสภาพเปียก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ส่วนที่ 1 - ส่วนรับข้อมูลคุณสมบัติของมวลรวมได้แก่ ชนิดของมวลรวมที่ใช้ ความถ่วงจำเพาะ ความชื้น การดูดซึม

ส่วนที่ 2 - ส่วนรับข้อมูลร้อยละที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานของมวลรวมขนาดต่าง ๆ

ส่วนที่ 3 - ส่วนรับข้อมูลชนิดของซีเมนต์ที่ใช้

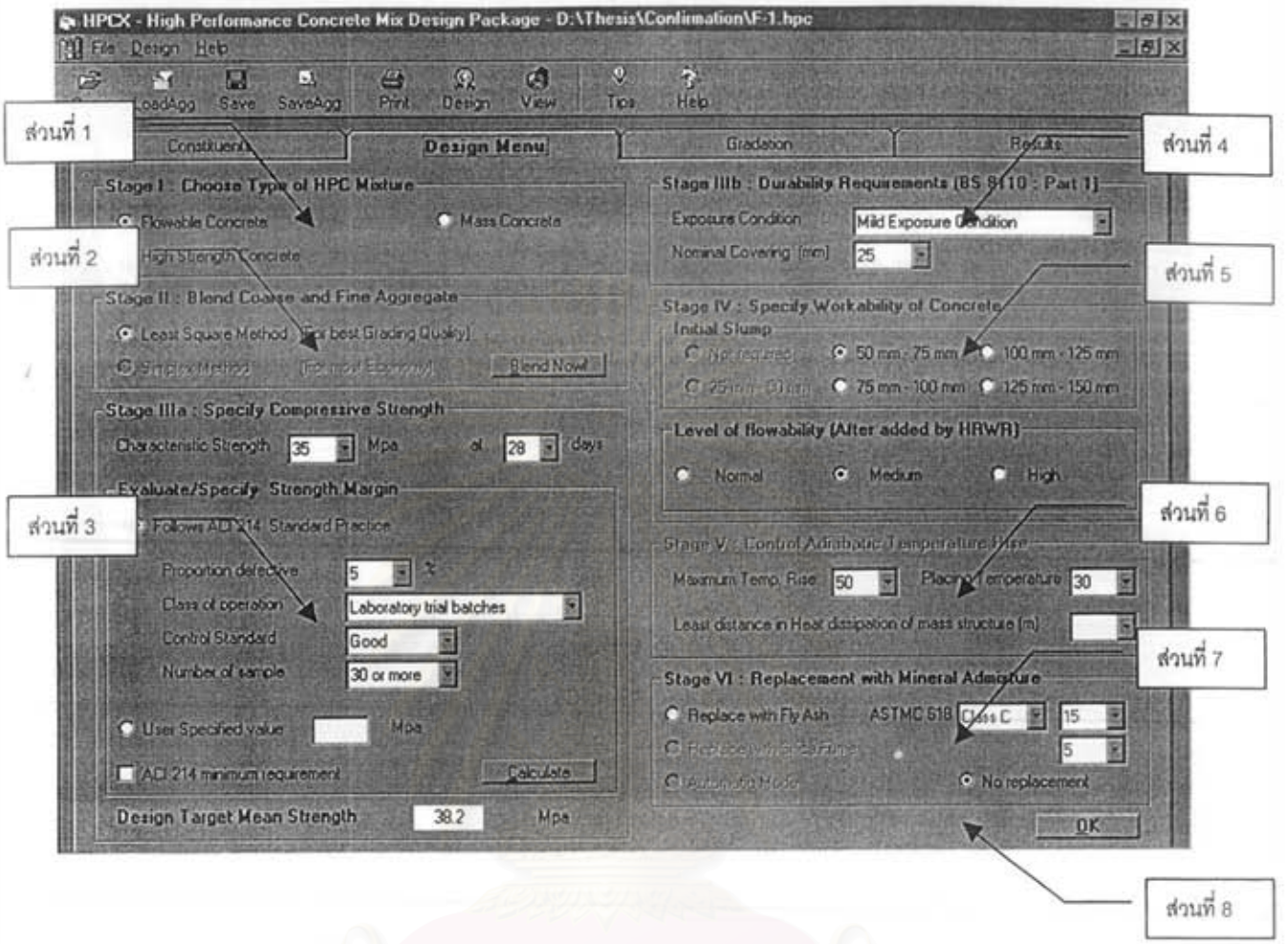
ส่วนที่ 4 - ส่วนกำหนดอัตราการใช้งานต่ำสุดและสูงสุดของสารลดน้ำพิเศษ

ส่วนที่ 5 - ส่วนกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ ได้แก่ ปริมาณช่องว่างของมวลรวม และปริมาณอากาศในส่วนผสม

ส่วนที่ 6 – ส่วนสำหรับตั้งค่าที่ตั้งไว้ (Default value)

ส่วนที่ 7 – ปุ่มคำสั่งแก้ไข และ ส่งข้อมูลสู่โปรแกรม

รูปที่ ผ.5 หน้าต่างรับข้อมูลวัสดุผสมและกรอบรับข้อมูลต่าง ๆ สำหรับการคำนวณ



ส่วนที่ 1 - ส่วนรับข้อมูลชนิดของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่จะทำการออกแบบ

ส่วนที่ 2 – ส่วนรับข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการผสมมวลรวม และคำสั่งทำการผสมมวลรวม

ส่วนที่ 3 – ส่วนรับข้อมูลของค่ากำลังอัด อายุอ้างอิง และค่าส่วนเผื่อกำลังอัดของคอนกรีต

ส่วนที่ 4 - ส่วนรับข้อมูลเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดในการออกแบบเพื่อความทนทาน

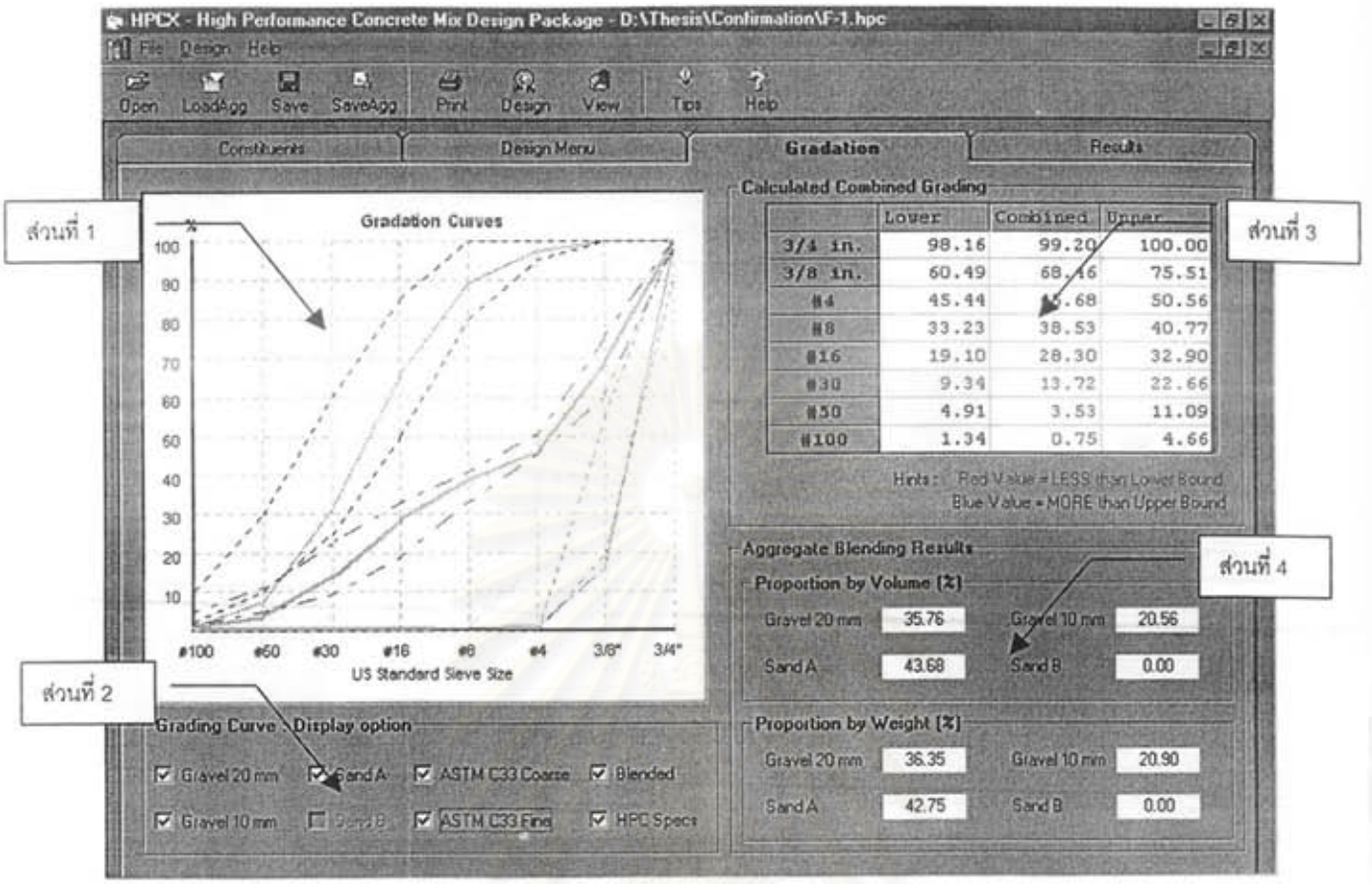
ส่วนที่ 5 - ส่วนรับข้อมูลความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสมรรถนะสูง

ส่วนที่ 6 – ส่วนรับข้อมูลเพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนในคอนกรีตหลา

ส่วนที่ 7 - ส่วนรับข้อมูลการใช้แร่ธาตุผสมเพิ่มทดแทนซีเมนต์บางส่วน

ส่วนที่ 8 – ปุ่มคำสั่งแก้ไข และส่งผ่านข้อมูลไปยังส่วนคำนวณหลัก

รูปที่ ผ.6 หน้าต่างรับข้อมูลเพื่อกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตในการออกแบบ



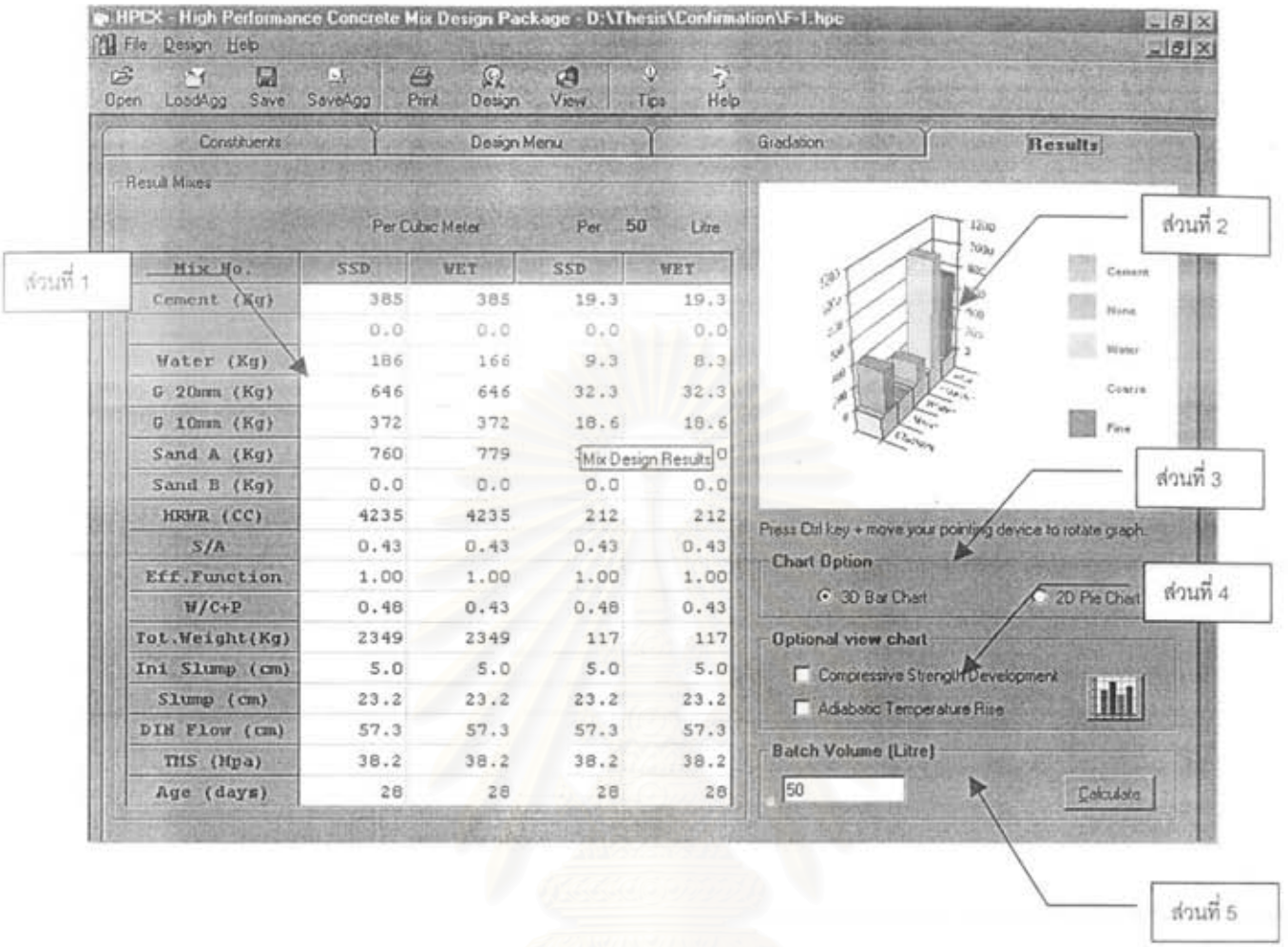
ส่วนที่ 1 – ส่วนแสดงข้อมูลเส้นโค้งขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ ขนาดคละร่วมที่ได้จากการคำนวณ และขอบเขตของมวลคละตามมาตรฐาน ASTM C33 และสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง

ส่วนที่ 2 - ส่วนควบคุมการแสดงผลเส้นโค้งขนาดคละ

ส่วนที่ 3 – ตารางข้อมูลแสดงข้อมูล ขอบเขตขนาดคละที่เหมาะสม และขนาดคละร่วมของมวลรวมที่ได้จากการคำนวณ

ส่วนที่ 4 – ส่วนแสดงผลสัดส่วนการผสมของมวลรวมที่ได้จากคำนวณ

รูปที่ ผ.7 หน้าต่างแสดงขนาดคละของมวลรวม



ส่วนที่ 1 – ตารางแสดงผลของส่วนผสมคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ

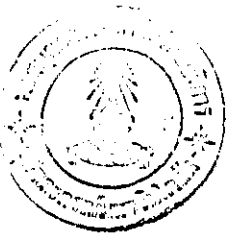
ส่วนที่ 2 – ส่วนแสดงผลปริมาณวัสดุผสมหลักในส่วนผสมแบบกราฟฟิก

ส่วนที่ 3 - ส่วนควบคุมการแสดงผลปริมาณวัสดุผสมหลักในแบบกราฟฟิก

ส่วนที่ 4 – ส่วนรับข้อมูลเลือกแสดงผลแบบกราฟฟิกของการพัฒนากำลังอัด และการพัฒนาอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อน

ส่วนที่ 5 - ส่วนกำหนดปริมาตรตวงของส่วนผสม

รูปที่ ผ.8 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณออกแบบ



ประวัติผู้เขียน

นาย อดิศร โอวาทศิริวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ได้รับการศึกษาในชั้นประถม และ มัธยมจากโรงเรียนทิวไผ่งาม จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2537 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ในปีการศึกษา 2540

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย