รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมอุตุนิยมวิทยา, กองภูมิอากาศ. ข้อมูลอากาศรายชั่วโมง [Computer file]. กรุงเทพมหานคร : กรมอุตุนิยมวิทยา, 2544.

ตุลย์ มณีวัฒนา และ อัครา กิจการเจริญสิน. อุณหภูมิออกแบบสำหรับกรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ หาดใหญ่ และ อุบลราชธานี. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15. หน้า RA46 – RA50. 28 –30 พฤศจิกายน 2544 ณ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร.

สมบูรณ์ ติรสิทธิ์. การศึกษาเชิงวิเคราะห์ของการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

ภาษาอังกฤษ

Akins, R. E., Peterka, J. A. and Cermak, J. E. Averaged pressure coefficients for rectangular builidings. Wind Engineering (1979) : 369-380.

ASHRAE. 1997 ASHRAE Fundamental Handbook. Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1997.

ASHRAE. 2001 ASHRAE Fundamental Handbook. Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2001.

ASHRAE. Standard 55-1981 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1981.

ASHRAE. Standard 55-1995a : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1995.

Boon-Long, P. et al. Simulation of natural ventilation in three types of public buildings in Thailand. ASHRAE/USAID, Proceedings of the ASEAN Far East Conference on Air Conditioning in Hot Climates. pp. 188-199. Kuala Lumpur, 1989.

Fanger, P. O. Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering. New York : McGraw-Hill,1970.

Gagge, A. P.; Fobelets, A. P. and Berglund, L. G. A standard predictive index of human response to the thermal environmental. ASHRAE Transactions 92 (1986) : 709-731.

Hittle, D. C. Calculation building heating and cooling loads using the frequency response of multilayered slab. Ph.D. Thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois, 1979.

Hittle, D. C. An improved root-finding procedure for use in calculating transient heat flow through multilayered slabs. International Journal of Heat and Mass Transfer 26 (1983) : 1685-1693.

Int-Hout, D. Thermal Comfort Calculations / a computer model. ASHRAE Transactions 92 (1990) : 1027-1038.

ISO 7730. International Standard : Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 1994.

Klote, J. H. and Milke, J. A. Design of Smoke Management Systems. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1992.

Liesen, R. J. and Pederson, C. O. An evaluation of inside surface heat balance models for cooling load calculation. ASHRAE Transactions 103 (1997) : 485-502.

McClellan, T. M. and Pederson, C. O. Investigation of outside heat balance models for use in a heat balance cooling load calculation procedure. ASHRAE Transactions 103 (1997) : 469-484.

Pederson, C. O. and others. Cooling and Heating Load Calculation Principles. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1998.

Pederson, C. O.; Fisher, D. E. and Liesen, R. J. Development of a heat balance based procedure for calculating cooling load. ASHRAE Transaction 103 (1997) : 459-468.

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กำแหง จิตต์โสภักตร์. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในอาคาร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

ภาษาอังกฤษ

ASHRAE. 1993 ASHRAE Fundamental Handbook. Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1993.

Awbi, H. Ventilation of Buildings. London : Spon, 1991.

Burden, R. L. and Faires, J. D. Numerical Analysis. 7th ed. United States of America : Wadsworth Group, 2001.

Chapman, S. J. Fortran 90/95 for scientists and Engineers. McGraw-Hill, 1998.

Chapra, S. C. and Canale, R. P. Numerical Methods for Engineers. 3rd ed. Singapore : McGraw-Hill, 1998.

Doherty, T.J. and Arens E. Evaluation of the physiological bases of the thermal comfort models. ASHRAE Transaction 94 (1998) : 1371-1378.

Etzel, M. and Dickeson, K. Digital Visual Fortran Programmer's Guide. 3rd ed. United States of America : Digital Press, 1999.

Fobelets, A. P. R. and Gagge, A. P. Rationalization of the effective temperature ET*, as a measure of the enthalpy of the human indoor environment. ASHRAE Transactions 94 (1988) : 12-31.

Fountain, M. E. and Hoizenga, C. User's Manual for the ASHRAE Thermal Comfort Model. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1995.

McQuiston, F. C. And Spitler, J. D. Cooling and Heating Load Calculation Manual. 2nd ed. Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1994.

Nyhoff, L. R. and Leestma, S. Fortran 90. New Jersey : Prentice-Hall, 1997.

Parsons, K. C. Human response to hot environments : a comparison of ISO and ASHRAE methods of assessment. ASHRAE Transactions 92 (1986) : 1027-1038.

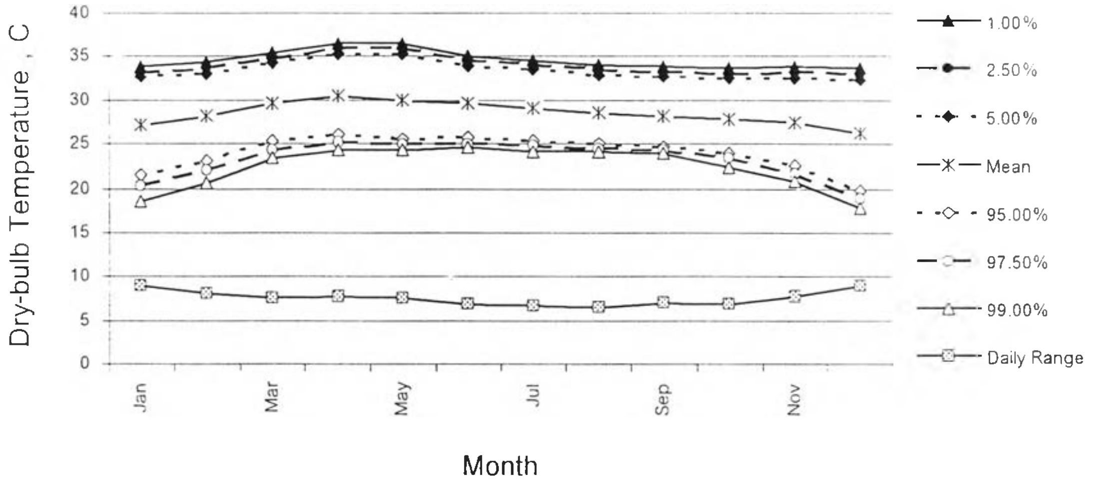
Patankar, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill, 1980.

Tamura, G. T. Smoke Movement and Control in High-rise Buildings. United States of America : National Fire Protection Association, 1994.

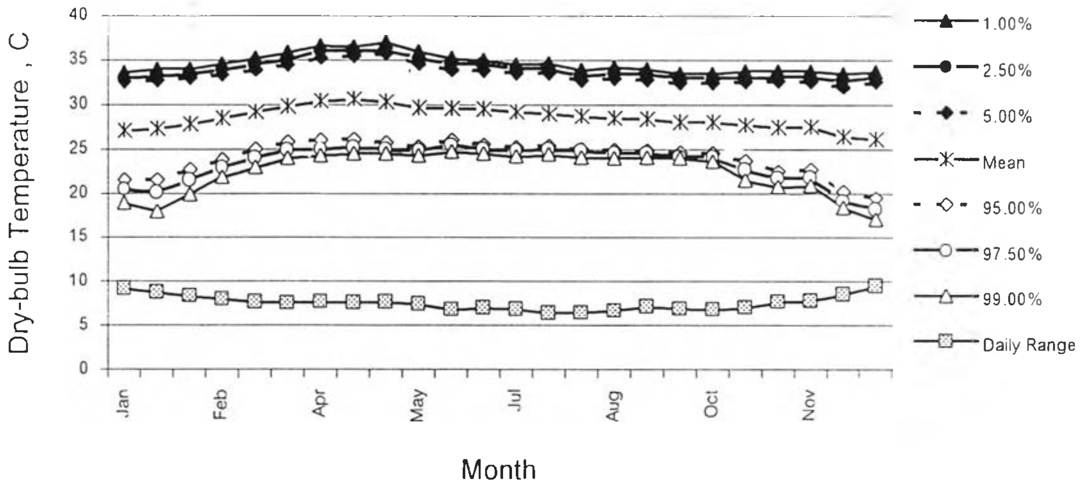
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

อุณหภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร



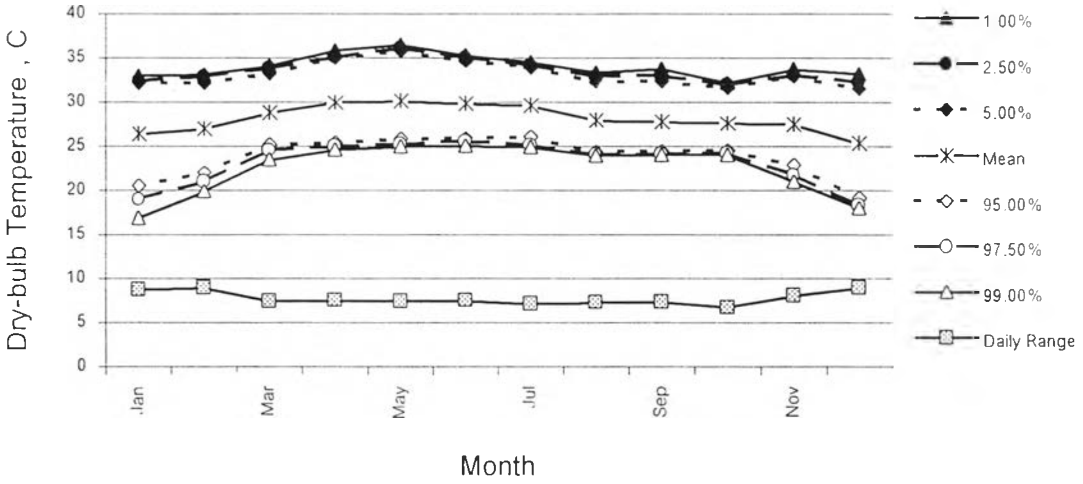
รูป ก.1 อุณหภูมิกระเปาะแห้งในแต่ละเดือนของกรุงเทพมหานคร
ตั้งแต่ พ.ศ. 2531 – พ.ศ. 2542 [3]



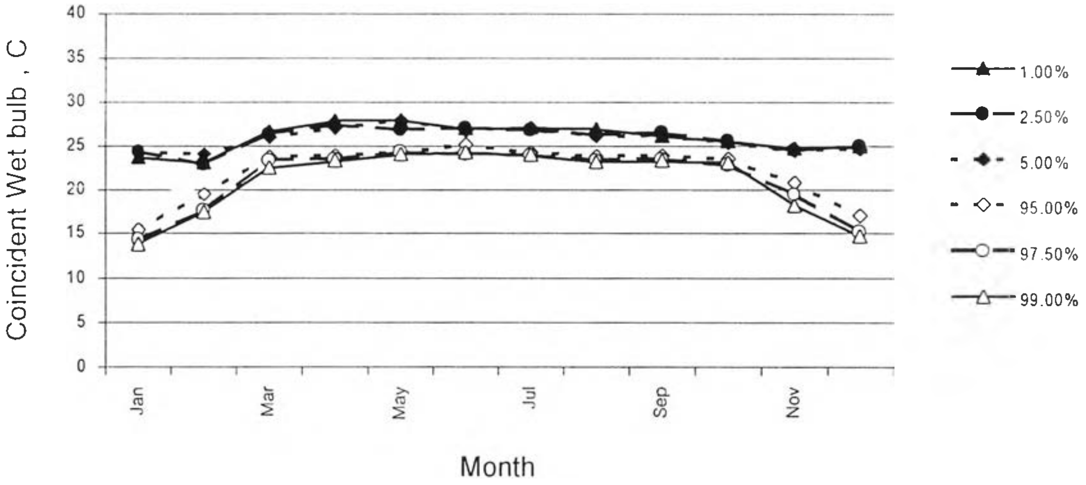
รูป ก.2 อุณหภูมิกระเปาะแห้งในรอบครึ่งเดือนของกรุงเทพมหานคร
ตั้งแต่ พ.ศ. 2531 – พ.ศ. 2542 [3]

---

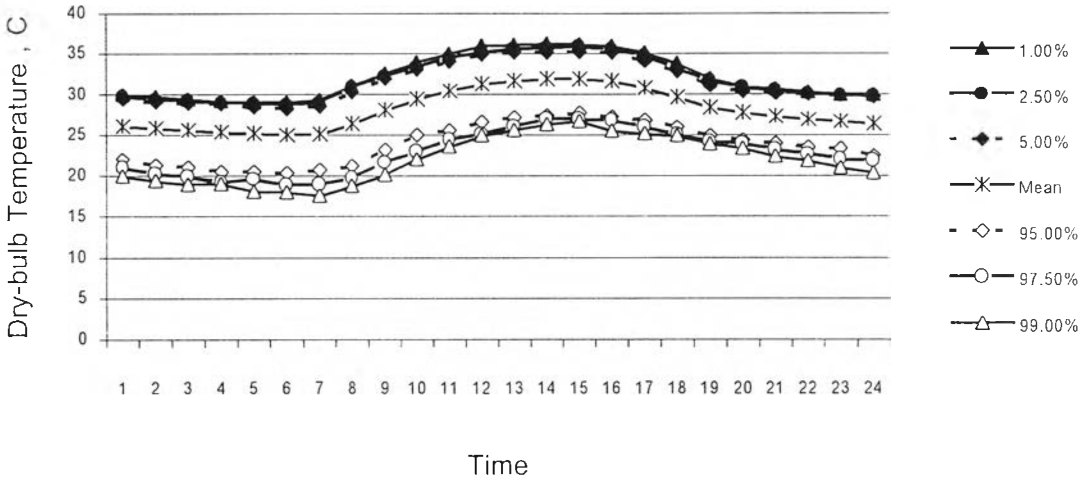
[3] ตุลย์ มณีวัฒนา และ อัครา กิจการเจริญสิน, " อุณหภูมิออกแบบสำหรับกรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ หาดใหญ่ และ อุบลราชธานี," ประชุมวิชาการเครือข่ายเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 (2544) : RA-46 ถึง RA-50.



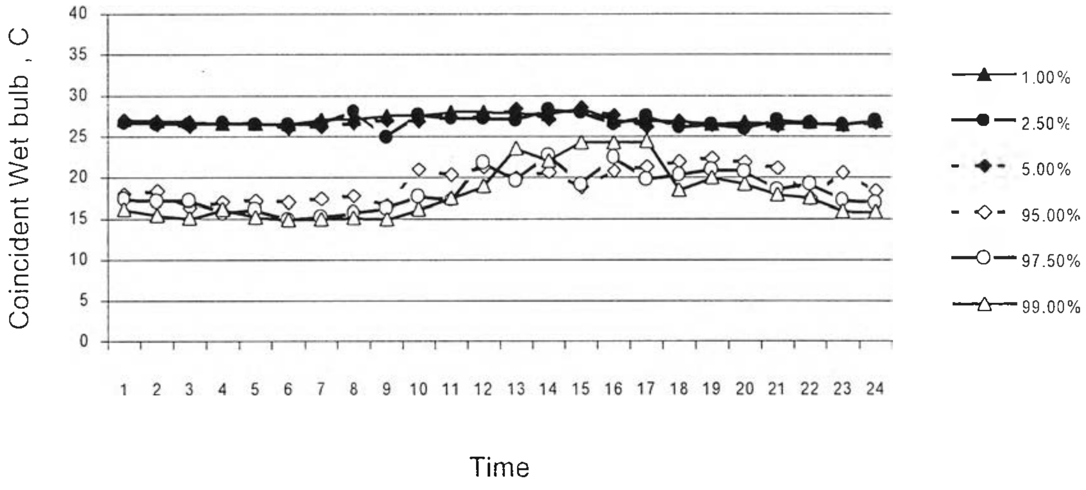
รูป ก.3 อุณหภูมิกระเปาะแห้งของกรุงเทพมหานครในพ.ศ. 2536



รูป ก.4 อุณหภูมิกระเปาะเปียกเฉลี่ยที่สอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง
ของกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ. 2536



รูป ก.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้งเป็นรายชั่วโมงของกรุงเทพมหานครในปีพ.ศ. 2536

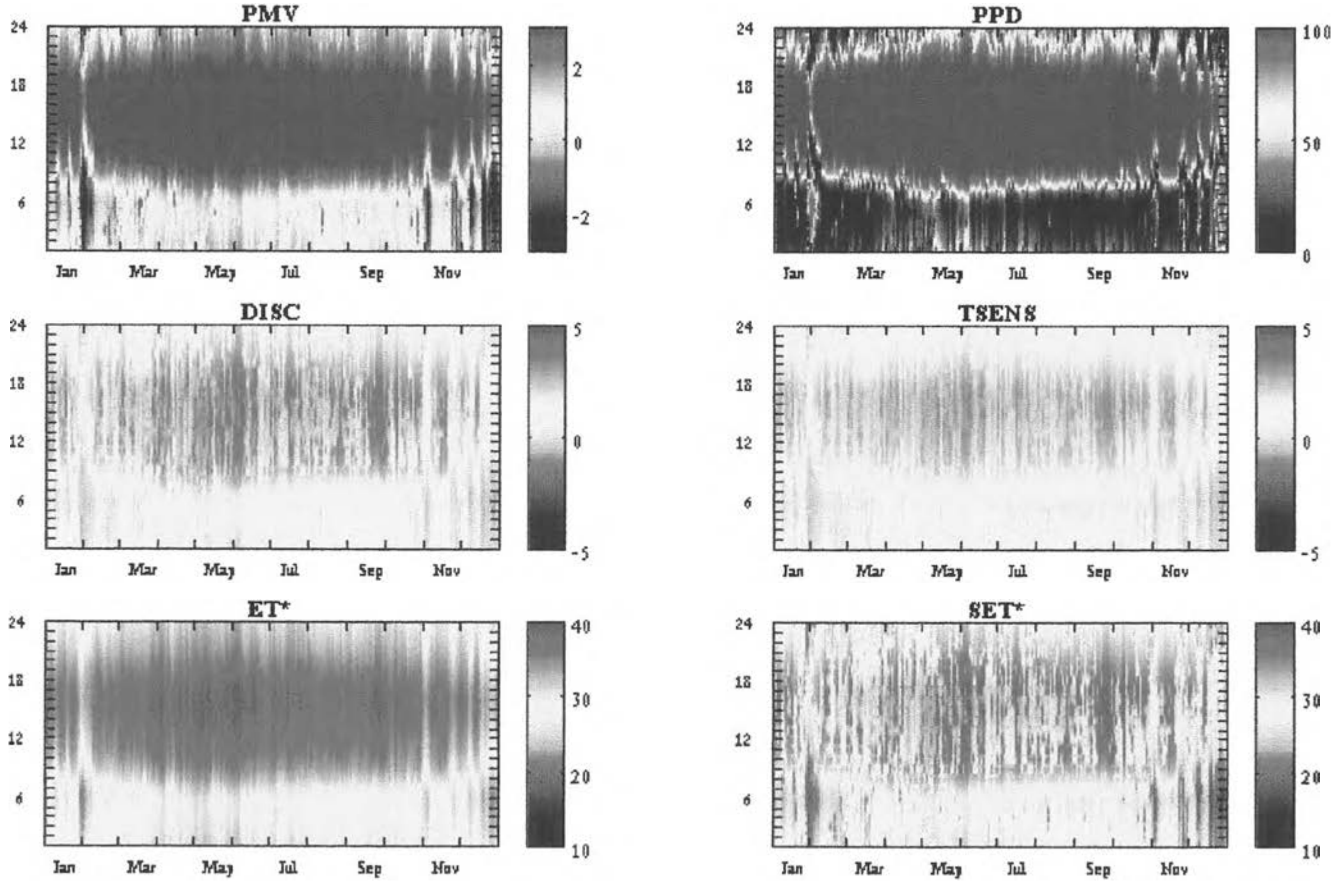


รูป ก.6 อุณหภูมิกระเปาะเปียกเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงที่สอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง
ของกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ. 2536

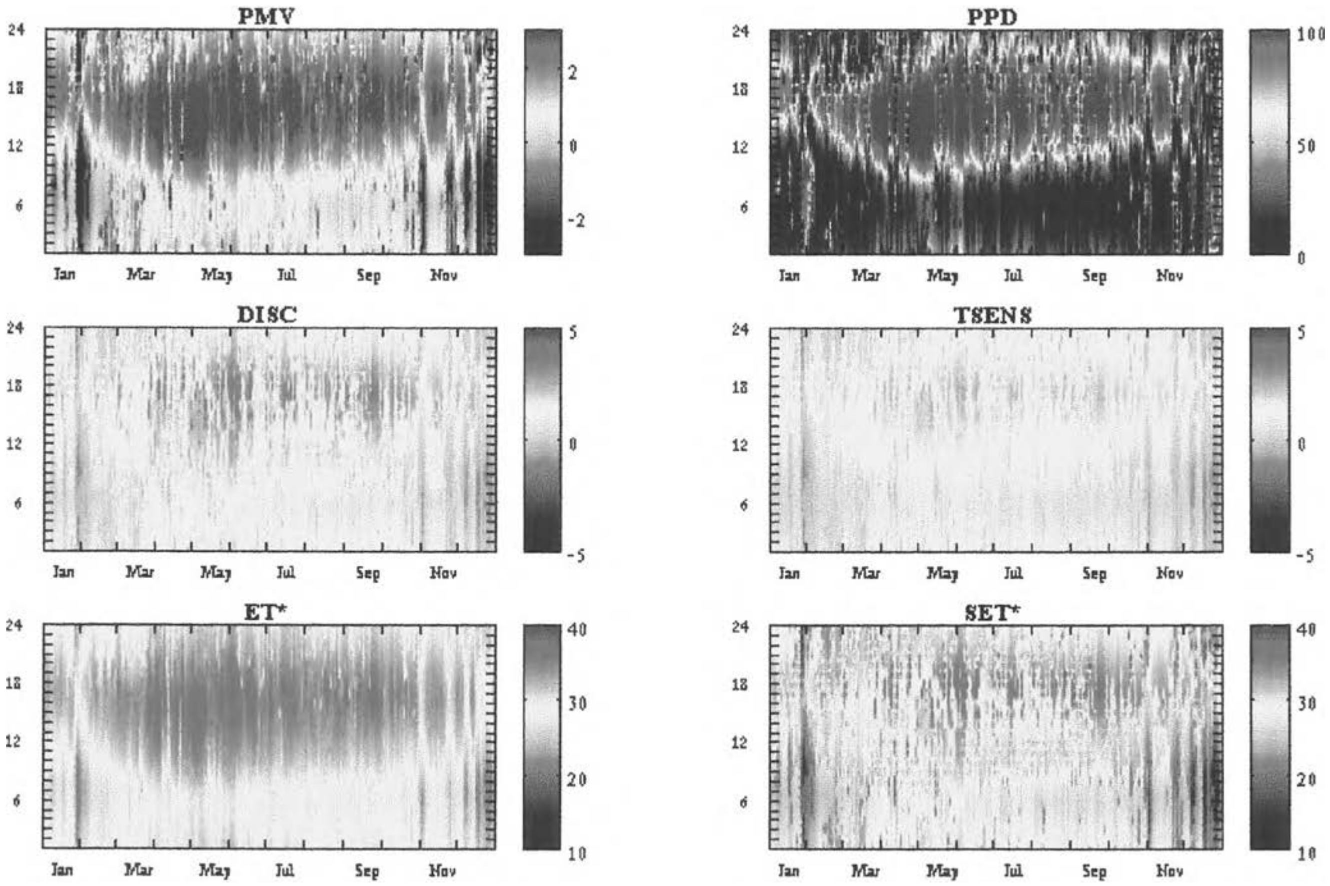
ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ภาวะสบายเชิงความร้อนรายชั่วโมงของบ้านจำลอง

เพื่อเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับผลการคำนวณภาวะสบายเชิงความร้อนของบ้านจำลองนอกเหนือจากรายละเอียดที่แสดงไว้ในบทที่ 4 ภาวะสบายของบ้านจำลองเฉพาะกรณีพื้นฐานซึ่งไม่มีทั้งกันสาดและช่องเปิด กับ บ้านจำลองที่ติดกันสาด เจาะช่องเปิด และติดฉนวนความร้อนบนฝ้าเพดาน ถูกนำมาแสดงใหม่อีกครั้งในรูป contour plot ของค่าดัชนีความสุขสบายต่างๆ ในทุกชั่วโมงตลอดระยะเวลา 1 ปี ค่าดัชนีความสุขสบายซึ่งนำมาแสดงผลดังกล่าวได้แก่ PMV PPD ET* SET* DISC และ TSENS ดังนั้นหากพิจารณาค่าดัชนีเหล่านี้จากกราฟอย่างละเอียดจะทำให้ทราบได้ถึงภาวะสบายของอาคารที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชั่วโมงตลอดทั้งปี



รูป ข.1 ภาวะสบายของบ้านจำลองกรณีพื้นฐานที่ไม่มีกันสาด ช่องเปิด และ ฉนวนความร้อน



รูป ข.2 ภาวะสบายในกรณีที่ติดกันสาด เจาะช่องเปิด และ ติดฉนวนความร้อนบนฝ้าเพดาน

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในการวิเคราะห์ความสุขสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยในแบบจำลองอาคารของงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรนที่ได้รับการพัฒนาขึ้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวนี้มีซึ่งมีชื่อว่า TCAP (Thermal Comfort Analysis Program, TCAP) จะใช้ในการคำนวณดัชนีความสุขสบายเชิงความร้อนที่สามารถบ่งบอกถึงความพึงพอใจเชิงความร้อนที่ผู้อยู่อาศัยได้รับ ดัชนีต่างๆ ที่กล่าวมานี้ได้แก่ PMV (Predicted Mean Vote), PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), T_o (Operative Temperature), ET* (Effective Temperature), SET* (Standard Effective Temperature), DISC (Thermal Discomfort) และ TSENS (Thermal Sensation) จากการที่ดัชนีแต่ละตัวแสดงถึงลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาทุกดัชนีควบคู่กันไป เพื่อจะได้ผลการวิเคราะห์แม่นยำ

TCAP นำค่าพารามิเตอร์ของแต่ละบุคคลอันได้แก่ อัตราการเผาผลาญพลังงาน (M) งานที่ทำ (W) และความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ (I_{cl}) มาเป็นข้อมูลป้อนเข้า ส่วนพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ (t_a) อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (t_{mrt}) ความเร็วอากาศ (v) และความชื้นสัมพัทธ์ (Rh) นั้นจะต้องทำการคำนวณโดยตรง ค่า t_a และ t_{mrt} สามารถทำได้จากการพิจารณาสมดุลความร้อนของทั้งอาคารที่ประกอบด้วยสมดุลความร้อนของผนังภายนอกอาคาร (สมการ 80) การนำความร้อนผ่านผนัง (สมการ 81 และ 82) สมดุลความร้อนของผนังภายในอาคาร (สมการ 83) และสมดุลความร้อนของอากาศภายในโซน (สมการ 60) สมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นทั้ง 4 จุดที่กล่าวมานี้จะคำนวณจากข้อมูลอากาศจริงรายชั่วโมงที่ได้รับจากกรมอุตุนิยมวิทยา (2544) และจำเป็นต้องพิจารณาสมดุลความร้อนของทั้ง 24 ชั่วโมงด้วยระบบสมการพร้อมกัน (simultaneous equation) ประเด็นสำคัญในการคำนวณสมดุลความร้อนก็คือการคำนวณการนำความร้อนผ่านผนังซึ่งเป็นตัวเชื่อมโยงสมดุลความร้อนของผนังด้านในและด้านนอกเข้าด้วยกัน ฟังก์ชันการนำความร้อน (conduction transfer function, CTF) ที่ได้รับการศึกษาและพัฒนาโดย Hittle, D.C. (1979) ถูกนำมาคำนวณการนำความร้อนของชั้นผนังโดยประมาณการเปลี่ยนของโครงร่างอุณหภูมิผนังด้วยลูกคลื่นสามเหลี่ยม (triangular pulse) ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิของพื้นผิวเมื่อเวลาในอดีต จึงส่งผลให้การคำนวณสมดุลความร้อนในอาคารมีความจำเป็นต้องพิจารณาสมดุลความร้อนของทั้ง 24 ชั่วโมงพร้อมกัน

อย่างไรก็ตามการพิจารณาสมดุลความร้อนในอาคารมีความจำเป็นต้องพิจารณาการพาความร้อนที่เกิดขึ้นกับผนังซึ่งเป็นฟังก์ชันของ v ที่เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมซึ่งยังไม่ทราบค่าอยู่ในขณะนี้ ดังนั้นการคำนวณสมดุลความร้อนของอาคารทั้ง 24 ชั่วโมงนี้มีความจำเป็นต้องกระทำพร้อมๆ กับการวิเคราะห์การไหลของอากาศในอาคารตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง (สมการ 85 และ 95)

การวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในอาคารจะใช้แบบจำลองเครือข่าย (Network models) ซึ่งใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์ระบบป้องกันไฟในอาคารสูงมาประยุกต์เข้ากับการคำนวณ แบบจำลองเครือข่ายจะจำลองอาคารด้วยเครือข่ายของจุดต่อ (node) และบริเวณ (space) ซึ่งมีความดันและอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยกำหนดให้หนึ่งห้องประกอบด้วยหนึ่งจุดต่อ สมการของ Bernoulli (สมการ 85) จะใช้ในการทำนายพฤติกรรมของอากาศโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งออก (c_d) เป็นตัวแก้ไขเพื่อทำให้ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ผลการวิเคราะห์การไหลของอากาศจะทำให้ทราบถึงอัตราการไหลของอากาศ ($\dot{m}$) ที่เข้าหรือออกจากห้องในแต่ละช่องทางการไหลได้ จึงทำให้สามารถประมาณค่า v ภายในห้องเพื่อใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อน และวิเคราะห์ความสุขสบายเชิงความร้อนของผู้ที่อยู่อาศัยภายใน

เมื่อการคำนวณสมดุลความร้อนของอาคารเสร็จสิ้นจะทำให้ทราบค่าของอุณหภูมิผนังด้านนอก (T_o) และอุณหภูมิผนังด้านใน (T_i) อุณหภูมิอากาศในโซน (t_a) รวมถึงความเร็วอากาศในห้อง (v) ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (t_{mrt}) จะเป็นพารามิเตอร์ที่ได้รับการคำนวณถัดมา การคำนวณค่า t_{mrt} ของ TCAP เป็นไปใน 2 แนวทาง คือ การคำนวณจากอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของระนาบ (t_{pr}) (สมการ 70 และ 71) กับการคำนวณจากค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ (สมการ 74) การคำนวณ t_{mrt} จาก t_{pr} จะถูกจำกัดเฉพาะห้องที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก แต่ผลการคำนวณที่ได้มีความแม่นยำสูงมาก เนื่องจากการคำนวณจะพิจารณาทั้งตำแหน่งและระยะห่างของผนังเทียบกับบุคคลที่อยู่ภายในห้อง นอกจากนี้การคำนวณยังทำให้ทราบถึงอุณหภูมิการแผ่รังสีที่ไม่สมมาตร (radiant temperature asymmetry) อันเป็นหนึ่งในหลายๆ สาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่พึงพอใจเชิงความร้อนเฉพาะแห่ง ส่วนการคำนวณ t_{mrt} จากค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่นั้นสามารถใช้กับห้องที่เป็นรูปทรงใดๆ โดยไม่ต้องระบุว่าเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือไม่ หากแต่ว่าการคำนวณ t_{mrt} ในแนวทางนี้จะไม่พิจารณาถึงระยะห่างระหว่างบุคคลกับผนังหรือผนังกับผนัง จึงทำให้ผลการคำนวณไม่แม่นยำเท่าที่ควร

สำหรับ Rh ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมตัวสุดท้ายที่ยังไม่ได้รับการคำนวณนี้เป็นพารามิเตอร์ที่มีขั้นตอนการคำนวณซึ่งซับซ้อนน้อยที่สุด โดยกำหนดให้สัดส่วนความชื้นของอากาศภายในห้อง (w_a) ที่ไม่มีการควบคุมความชื้นมีค่าเท่ากับข้อมูลอากาศ นั่นคือการกำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทมวลของไอน้ำระหว่างโซนควบคุมกับสิ่งแวดล้อม การประมาณเช่นนี้เป็นผลสืบเนื่องจากการคำนวณสมดุลความร้อนซึ่งเป็นหัวใจของกระบวนการคำนวณใน TCAP ที่ไม่มีการพิจารณาถึงการถ่ายเทมวลของไอน้ำในอากาศผ่านผนัง ดังนั้นหากปัญหาที่กำลังพิจารณามีความจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการถ่ายเทมวลของไอน้ำผ่านผนังเข้ามาสู่โซนควบคุมแล้วโปรแกรม TCAP ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงปรากฏการณ์เหล่านี้จึงไม่เหมาะต่อการนำมาวิเคราะห์

เมื่อเสร็จสิ้นการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมของแต่ละส่วนในอาคารแล้ว ดัชนีที่บ่งบอกถึงความสุขสบายเชิงความร้อนถูกนำมาคำนวณร่วมกับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละบุคคล การวิเคราะห์ถึงความสุขสบายเชิงความร้อนใน TCAP สามารถระบุระยะเวลาในการคำนวณเป็นรายวัน รายเดือน หรือรายปีได้ ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์ปัญหาเป็นรายเดือนหรือรายปีนั้นผลการคำนวณต่างๆ ของ TCAP ไม่ว่าจะเป็นค่า T_i T_o และ T_a ของโซนที่พิจารณา ภาระการทำความเย็นที่แต่ละโซนได้รับ อัตราการไหลของอากาศ ความดันตกคร่อมในแต่ละช่องทางการไหล รวมถึงค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงความสุขสบายเชิงความร้อนตลอดเวลา 24 ชั่วโมงจะแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ยรวมถึงค่าที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆอันได้แก่ ค่าที่ 1.0% 2.5% 5.0% 95.0% 97.5% และ 99.0% นอกจากนี้เพื่อให้ผลการคำนวณง่ายต่อการวิเคราะห์มากขึ้น TCAP จะทำการสรุปค่า PMV และ SET* ในแต่ละเดือนออกมาด้วย

การคำนวณของ TCAP ทั้งหมดที่กล่าวมาจะกระทำด้วย 1 โปรแกรมหลัก กับ 7 โมดูลย่อยได้แก่โปรแกรม TCAP โมดูล TCAP_HBcompute โมดูล TCAP_FlowAnalyse โมดูล TCAP_ResponseFactor โมดูล TCAP_SolarCompute โมดูลTCAP_Library โมดูล TCAP_MRTtemp และ โมดูล TCAP_Comfort รายละเอียดของโปรแกรม การทำงานของแต่ละโมดูลรวมถึงแผนภูมิขั้นตอนการคำนวณแสดงได้ต่อไปนี้

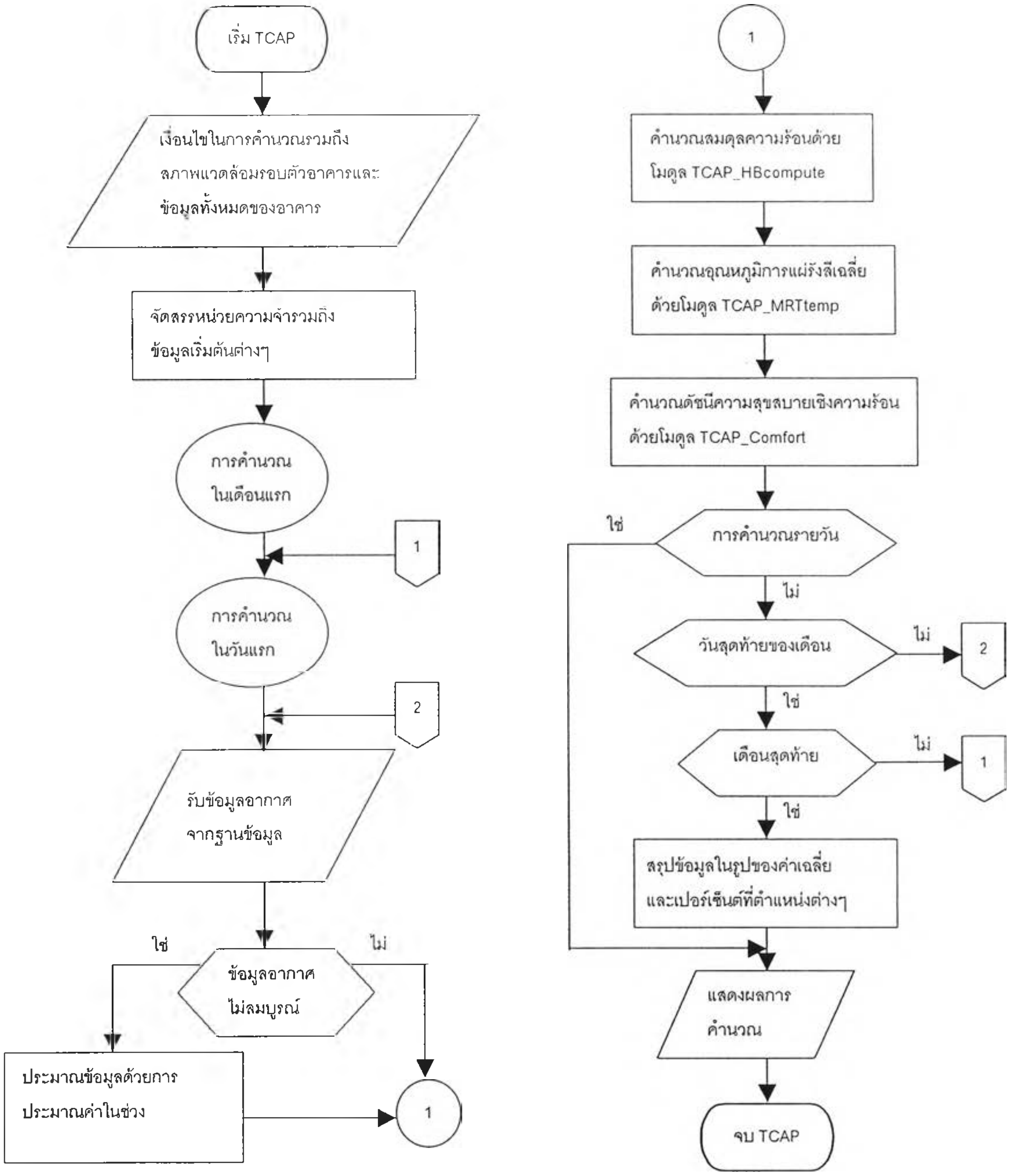
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.1 โปรแกรม TCAP

โปรแกรม TCAP เป็นโปรแกรมหลักของ TCAP มีหน้าที่ในการรับข้อมูลที่ป้อนเข้า รวมถึงจัดสรรหน่วยความจำให้ตัวแปรแต่ละตัวอย่างเหมาะสมกับแต่ละปัญหาที่ทำการพิจารณา ลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้ TCAP ไม่มีข้อจำกัดเรื่องจำนวนผนัง จำนวนช่องเปิดรวมถึงจำนวนกระจกในแต่ละโซนโดยสามารถบรรจุเข้าไปในโปรแกรมได้ตราบเท่าที่หน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ยังคงเหลืออยู่ อย่างไรก็ตาม TCAP สามารถพิจารณาโซนควบคุมได้เพียงหนึ่งหรือสองโซนเท่านั้น โดยอาจเพิ่มการพิจารณาเป็นสามโซนได้ แต่โซนที่สามนี้จะทำการวิเคราะห์เฉพาะอัตราการไหลของอากาศ ($\dot{m}$) เท่านั้น

นอกจาก TCAP จะมีหน้าที่จัดสรรหน่วยความจำให้แก่โมดูลแต่ละหน่วยแล้ว TCAP ยังทำหน้าที่ควบคุมการคำนวณให้เข้าเป็นไปตามที่ผู้ใช้กำหนดไม่ว่าจะเป็นการคำนวณรายวัน รายเดือน หรือ รายปี TCAP ทำการบันทึกผลการคำนวณในแต่ละชั่วโมงไว้และทำการสรุปข้อมูลออกมาในช่วงท้ายของโปรแกรม จากลักษณะที่กล่าวมานี้ทำให้ TCAP มีลักษณะเป็นหน่วยควบคุมที่ทำการเรียกข้อมูลต่างๆตลอดจนทำการปรับแต่งข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ด้วยการประมาณในช่วง (interpolation) ก่อนส่งข้อมูลไปให้แต่ละโมดูลย่อยที่มีหน้าที่ในการคำนวณเฉพาะทางนั้นทำการวิเคราะห์ เช่น โมดูลที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อน โมดูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสุขสบายเชิงความร้อนรวมถึงโมดูลที่ใช้ในการสรุปผลการคำนวณ

เมื่อการคำนวณสิ้นสุดผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับการคำนวณในแต่ละกรณีจะแสดงออกมาในรูปตารางซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำโปรแกรมประเภทสเปรดชีท (Spreadsheet) ไปวาดกราฟ หรือทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป แผนภูมิการทำงานของโปรแกรม TCAP แสดงได้ในรูป ค.1



รูป ค.1 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรม TCAP

ค.2 โมดูล TCAP_HBcompute

โมดูลTCAP_HBcompute เป็นโมดูลที่ทำการวิเคราะห์สมดุลความร้อนของทั้งอาคารซึ่งประกอบด้วยสมดุลความร้อนของผนังภายนอกอาคาร (สมการ 80) การนำความร้อนผ่านผนัง (สมการ 81 และ 82) สมดุลความร้อนของผนังด้านในอาคาร (สมการ 83) และสมดุลความร้อนของอากาศภายในโซนควบคุม (สมการ 84) โดยมีความจำเป็นต้องแก้ระบบสมการพร้อมกัน (simultaneous equation) ของทั้งอาคารตลอดเวลา 24 ชั่วโมง การคำนวณสมดุลความร้อนทั้งสี่จุดที่กล่าวมานี้จะกระทำตามวิธีและคำแนะนำของ McClellan, T.M. (1997) Hittle, D.C. (1979, 1983) Liesen, R.J. (1997) และ Pederson, C.O. (1997) ตามลำดับ แต่จากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่าการคำนวณสมดุลความร้อนมีความจำเป็นต้องทราบถึงการรั่วซึมของอากาศ อัตราการระบายอากาศรวมถึงความเร็วอากาศที่อยู่ภายในอาคาร จึงทำให้โมดูล TCAP_HBcompute มีความจำเป็นต้องทำการพิจารณาควบคู่กับโมดูล TCAP_FlowAnalyse อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

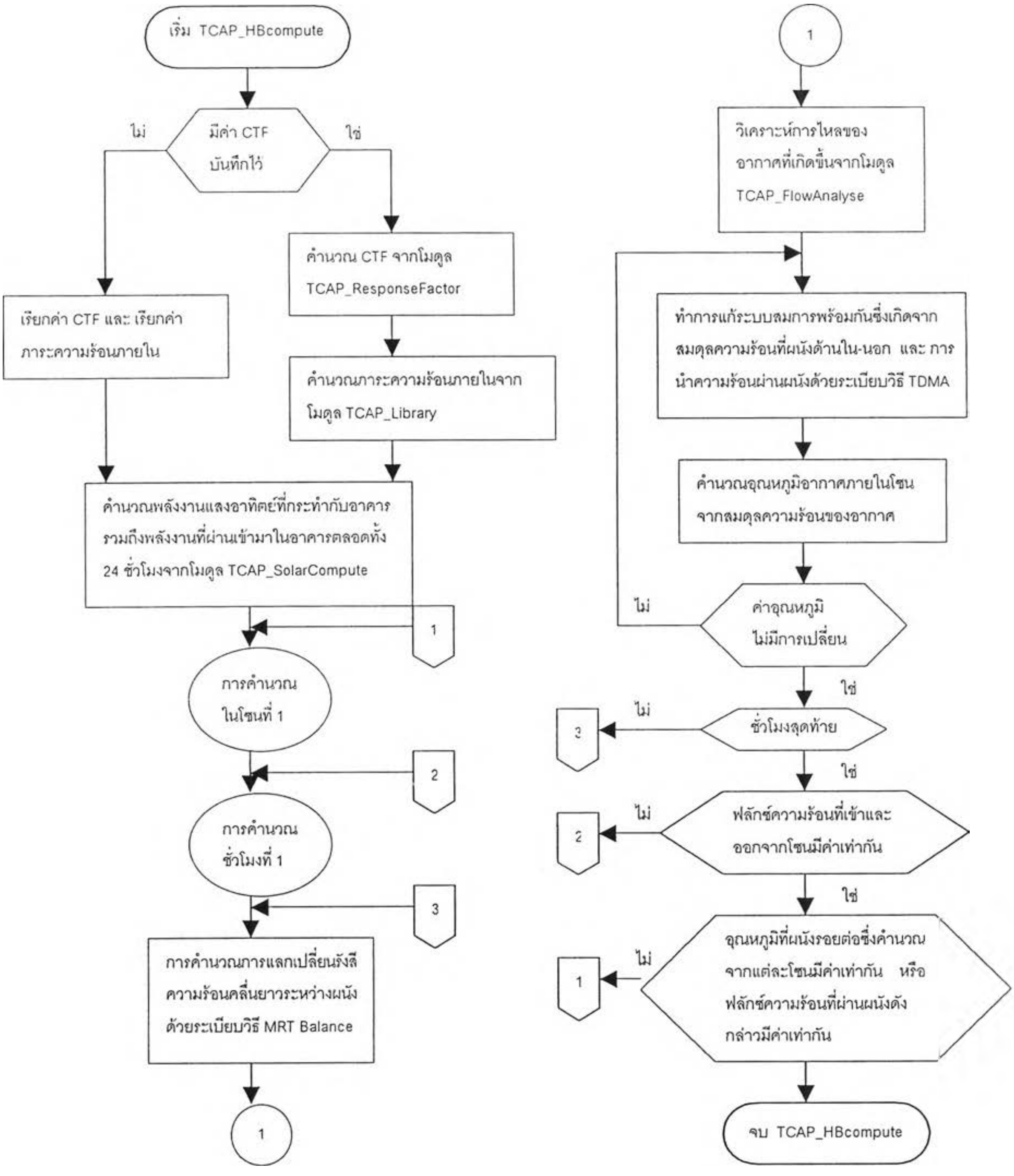
การคำนวณในโมดูล TCAP_HBcompute เริ่มจากการคำนวณฟังก์ชันการนำความร้อน (conduction transfer function) โมดูล TCAP_ResponseFactor ซึ่งเป็นโมดูลเฉพาะทางที่ใช้คำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นผนังนั้นถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันการนำความร้อนของผนังที่คำนวณได้จะถูกบันทึกไว้เพื่อใช้ในการคำนวณครั้งต่อไปซึ่งไม่จำเป็นต้องกลับมาคำนวณซ้ำอีกครั้ง จากนั้นค่าภาระต่างๆที่ส่งผลกระทบต่ออาคารตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมงจะได้รับการคำนวณ ค่าภาระที่กล่าวถึงนี้ ได้แก่ ค่าภาระภายใน (internal load) และพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งคำนวณโดยโมดูล TCAP_Library และ โมดูล TCAP_SolarCompute ตามลำดับ แบบจำลองของดวงอาทิตย์ซึ่งคำนวณโดยโมดูล TCAP_SolarCompute และนำมาใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนนั้นจะอ้างอิงจากแบบจำลองของ ASHRAE (2001) ซึ่งเป็นการคำนวณในสภาพที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง หลังจากที่เสร็จสิ้นการคำนวณต่างๆ โมดูล TCAP_HBcompute จะเข้าสู่การคำนวณในขั้นต่อไปซึ่งถือว่าเป็นหัวใจของการคำนวณสมดุลความร้อน

จากที่กล่าวมาแล้วสรุปได้ว่าหัวใจของการคำนวณสมดุลความร้อนก็คือสมดุลความร้อนทั้ง 4 จุดตลอดเวลา 24 ชั่วโมงซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาควบคู่กับอัตราการระบายอากาศที่เกิดขึ้น ณ เวลาที่ทำการพิจารณา ดังนั้นการคำนวณในขั้นตอนต่อมาของโมดูล TCAP_HBcompute ก็คือการสร้างเมตริกซ์เพื่อคำนวณหา T_i T_o T_a และ ΔP เวลาทั้ง 24 ชั่วโมง

จากวัตถุประสงค์ดังกล่าว ระเบียบวิธี MRT Balance ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวภายในโซน (q''_{Lwx}) ที่พิจารณาโดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าพื้นผิวแต่ละพื้นผิวทำการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสีความร้อนกับพื้นผิวปลอมที่สร้างขึ้นซึ่งมีพื้นที่ ค่าการเปล่งรังสีความร้อน รวมถึงอุณหภูมิเท่ากับค่าเฉลี่ยของพื้นผิวอื่นๆ ภายในโซน สำหรับการวิเคราะห์อัตราการไหลของอากาศ ณ เวลาที่กำลังพิจารณานั้นเป็นหน้าที่ของโมดูล TCAP_FlowAnalyse ที่จะดำเนินการแทนทั้งหมดและส่งผลการคำนวณคืนกลับมาเพื่อใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนของผนังด้านในอาคาร จากนั้นโมดูล TCAP_HBcompute จะแก้ระบบสมการพร้อมกันของสมการ (80) ถึง สมการ (83) โดยไม่พิจารณาสมการ (84) เนื่องจากการพิจารณาเช่นนี้จะทำให้เมตริกซ์ของระบบสมการที่ทำการคำนวณมีลักษณะพิเศษที่เรียกว่าเมตริกซ์แบบสามแถวทแยง (tri-diagonal matrix) ซึ่งสามารถคำนวณได้อย่างสะดวกด้วยระเบียบวิธี TDMA (Tri-Diagonal Metric Algorithm) ค่า T_i และ T_o ที่ได้จากการแก้ระบบสมการพร้อมกันจะนำมาคำนวณหาค่า T_a โดยใช้สมการ (84) กระบวนการทำซ้ำ (iteration) ถูกนำมาใช้ในการคำนวณจนกว่าคำตอบจะสอดคล้องกับสมดุลความร้อนทั้ง 4 แห่ง แต่กระบวนการเนินเช่นนี้มีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การไหลของอากาศใหม่ในทุกๆ รอบการทำซ้ำจนกว่าจะเกิดการลู่เข้า หลังจากที่การคำนวณลู่เข้าแล้วกระบวนการทั้งหมดจะถูกดำเนินการซ้ำอีกครั้งจนเสร็จสิ้นการคำนวณตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง จากนั้นจะกลับไปเริ่มต้นการคำนวณ ณ ชั่วโมงแรกใหม่จนกว่าคำตอบของทั้ง 24 ชั่วโมงจะมีความสอดคล้อง

การลู่เข้าของกระบวนการทำซ้ำจะเกิดขึ้นเมื่อ T_i T_o และ T_a ที่คำนวณได้ในแต่ละรอบการทำซ้ำมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือฟลักซ์ความร้อนรวมที่เข้า (q''_{ki}) และฟลักซ์ความร้อนที่ออก (q''_{ko}) จากอาคารมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากการคำนวณสมดุลความร้อนในอาคารเกี่ยวข้องกับสมดุลความร้อนทั้ง 24 ชั่วโมง ดังนั้นเงื่อนไขการลู่เข้าจะต้องเป็นจริงตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง นอกจากนี้หากปัญหาที่ทำการคำนวณมีจำนวนโซนมากกว่าหนึ่งโซนแล้วเงื่อนไขในการลู่เข้าจะต้องตรวจสอบว่า T_i T_o q''_{ki} และ q''_{ko} ของผนังดังกล่าวซึ่งคำนวณได้จากแต่ละโซนนั้นมีค่าเท่ากัน

เมื่อพิจารณาภาพรวมของโมดูล TCAP_HBcompute แล้วจะสามารถสรุปได้ว่าโมดูลดังกล่าวเป็นโมดูลที่ควบคุมการคำนวณเกือบทั้งหมดในโปรแกรมซึ่งจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขในการคำนวณที่ระบุโดยโปรแกรมหลักของ TCAP แผนภูมิการทำงานของโมดูล TCAP_HBcompute สามารถแสดงได้ในรูป ค.2



รูป ค.2 แผนภูมิการทำงานของโมดูล TCAP_HBcompute

ค.3 โมดูล TCAP_FlowAnalyse

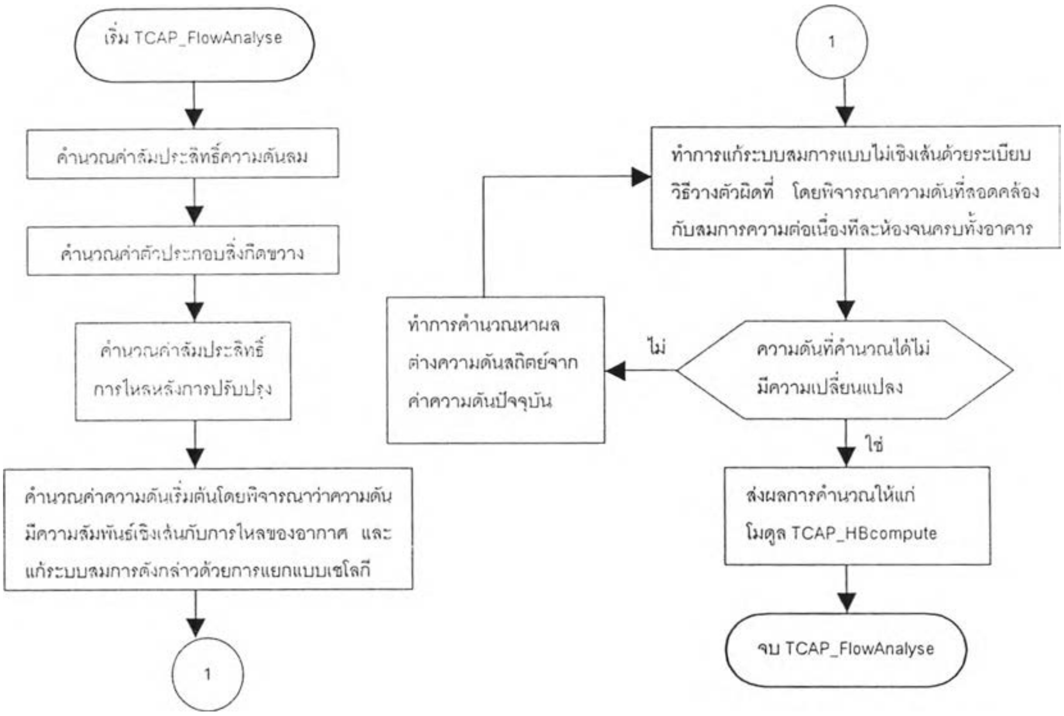
โมดูล TCAP_FlowAnalyse เป็นโมดูลซึ่งทำหน้าที่ในการวิเคราะห์อัตราการระบายอากาศที่เกิดขึ้นในอาคาร เพื่อประโยชน์ในการคำนวณสมดุลความร้อนรวมถึงการประมาณค่า v ภายในโซนซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความสุขสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร การคำนวณภายในโมดูลเป็นการประยุกต์เทคนิคที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมควันไฟเพื่อวิเคราะห์การไหลของอากาศที่เกิดขึ้นในอาคาร แบบจำลองเครือข่ายจะถูกนำมาใช้งานเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวโดยที่แบบจำลองเครือข่ายจะจำลองอาคารด้วยจุดต่อและบริเวณโดยกำหนดให้ห้องแต่ละห้องซึ่งมีอุณหภูมิและความดันที่แตกต่างกันสามารถแทนด้วยหนึ่งจุด ในแบบจำลองนี้จะพิจารณาว่าการไหลของอากาศซึ่งเกิดขึ้นที่รอยแตกรวมถึงจุดรั่วซึมและช่องเปิดต่างๆ เป็นฟังก์ชันของความดันตกคร่อมของแต่ละช่องทางการไหล (ΔP) โดยอากาศจะไหลจากบริเวณที่มีความดันสูงไปสู่บริเวณที่มีความดันต่ำ แต่จากการที่ความดันในแต่ละห้องของอาคารนั้นขึ้นอยู่กับ T_a ซึ่งทราบได้จากการคำนวณสมดุลความร้อน จึงจำเป็นต้องคำนวณโมดูล TCAP_FlowAnalyse ควบคู่กับโมดูล TCAP_HBcompute ดังนั้นเมื่อไรก็ตามที่โมดูล TCAP_HBcompute มีการเปลี่ยนแปลง T_a อันเกิดจากกระบวนการทำซ้ำ โมดูล TCAP_FlowAnalyse จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์อัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นในอาคารทุกครั้ง

การคำนวณในโมดูล TCAP_FlowAnalyse เริ่มต้นจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความดันลม (c_w) ที่แต่ละพื้นผิวของอาคาร ลมเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการกระจายความดันบนพื้นผิวภายนอกอาคารโดยขึ้นอยู่กับทิศทางลม ความเร็วลม ความหนาแน่นอากาศ ทิศทางของพื้นผิว รวมถึงสภาพสิ่งแวดล้อมรอบตัวอาคาร ในกรณีที่อาคารซึ่งกำลังพิจารณามีความสูงไม่มาก สิ่งกีดขวางภายนอกอาคารมีอิทธิพลต่อลมที่พัดเข้าสู่อาคารอย่างยิ่งโดยทำให้ความดันอันเกิดจากลมมีค่าลดลง นอกจากความดันลมมีค่าน้อยลงแล้วสิ่งกีดขวางต่างๆ ยังทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศที่ไม่เพียงแต่ทำให้ความเร็วลมลดลงแล้วแต่ยังทำให้ทิศทางของลมมีการเปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย ดังนั้นการนำข้อมูลลมที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา (2544) มาใช้ในการวิเคราะห์อาคารที่มีความสูงไม่มากควรกระทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้การประมาณความเร็วลมที่หน้าอาคารซึ่งมีความสูงไม่มากมีความถูกต้องแม่นยำขึ้น ค่าตัวประกอบสิ่งกีดขวาง (shelter factor, s) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทางลมและลักษณะของสิ่งกีดขวางซึ่งอยู่โดยรอบถูกนำมาคำนวณเพื่อลดอิทธิพลของลมที่มีต่ออาคารดังกล่าวลง

เมื่อทราบ c_w และ s แล้วจึงทำให้โมดูลสามารถคำนวณการกระจายตัวของความดันที่อยู่รอบอาคารได้อย่างถูกต้อง จากนั้นโมดูล TCAP_FlowAnalyse จะคำนวณ c_{adj} ของทุกช่องทางการไหลที่มีอยู่ในอาคาร c_{adj} นี้ทำให้การคำนวณการไหลของอากาศภายในอาคารซึ่งคำนวณด้วยสมการ (85) มีความสะดวกขึ้นโดยกำหนดให้ $\dot{m}$ แปรผันตรงกับ $\sqrt{\Delta P}$ (สมการ 86) เพราะเหตุนี้จึงทำให้ $\dot{m}$ กับ ΔP ในแต่ละจุดต่อมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นและจำเป็นต้องแก้ระบบสมการแบบไม่เชิงเส้นซึ่งมีความซับซ้อนจึงจะทราบถึงค่าความดันของแต่ละห้องในอาคารได้ โมดูล TCAP_FlowAnalyse ทำการแก้ระบบสมการดังกล่าวโดยใช้ระเบียบวิธีการวางตัวผิดที่ (False-position method) คำนวณค่าความดันในอาคารทีละห้องจนกว่าความดันที่คำนวณได้จะสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง (สมการ 95) การคำนวณดังกล่าวทำการพิจารณาว่าความดันในห้องอื่นๆ ที่เชื่อมต่อกับห้องที่กำลังพิจารณานั้นมีค่าคงที่ การคำนวณค่าความดันในแต่ละห้องนี้จะดำเนินการไปจนครบทุกห้องและจะทำการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าความดันในแต่ละห้องซึ่งคำนวณได้ในแต่ละรอบการทำซ้ำนั้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เพื่อให้การแก้ระบบสมการไม่เชิงเส้นดังกล่าวมีความรวดเร็วขึ้น ค่าความดันตั้งต้นที่ใช้ในการคำนวณควรมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบของระบบสมการแบบไม่เชิงเส้นให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นก่อนทำการแก้ระบบสมการแบบไม่เชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีวางตัวผิดที่นั้นจะพิจารณาว่า $\dot{m}$ ระหว่างจุดต่อต่างๆ ในอาคารมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ ΔP การพิจารณาดังกล่าวนี้ทำให้เมตริกซ์ของระบบสมการเชิงเส้นที่ได้มีความสมมาตรและสามารถนำมาหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วด้วยระเบียบวิธีการแยกแบบโชเลสกี (Cholesky decomposition method) การนำค่าความดันตั้งต้นที่คำนวณได้ไปใช้เป็นความดันเริ่มต้นในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีวางตัวผิดที่นั้นทำให้การคำนวณดังกล่าวมีความรวดเร็วขึ้น

เมื่อทราบความดันของจุดต่อแต่ละจุดในอาคารแล้วจะทำให้ทราบถึงอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านแต่ละช่องทางการไหลโดยปริยาย การทราบค่าที่แน่นอนของอัตราการไหลที่ผ่านเข้าออกโซนควบคุมทำให้การคำนวณสมดุลความร้อนที่กระทำโดยโมดูล TCAP_HBcompute มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นอันนำไปสู่การวิเคราะห์ความสุขสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยในอาคารได้อย่างแม่นยำ การคำนวณทั้งหมดของโมดูลสามารถแสดงได้ในรูป ค.3



รูป ค.3 แผนภูมิการทำงานของโมดูล TCAP_FlowAnalyse

ค.4 โมดูล TCAP_ResponseFactor

โมดูล TCAP_ResponseFactor เป็นโมดูลที่สนับสนุนโมดูล TCAP_HBcompute โดยคำนวณค่าฟังก์ชันการนำความร้อนซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการเชื่อมโยงระหว่างสมดุลความร้อนของผนังด้านนอกกับสมดุลความร้อนของผนังด้านในผ่านกระบวนการนำความร้อนด้วยระเบียบวิธีตัวประกอบการตอบสนอง (response factors methods) ระเบียบวิธีดังกล่าวนี้จะประมาณการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วย pulse รูปสามเหลี่ยมหลายๆรูปที่วางเหลื่อมกันอยู่ จากการซ้อนกันของ pulse จึงทำให้เกิดเป็นโครงร่างของอุณหภูมิ (temperature profile) ขึ้นซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยการประมาณแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal approximation)

สำหรับการคำนวณโดยทั่วไปนั้น อันดับ (Order) ของค่าฟังก์ชันการนำความร้อนสำหรับผนัง หลังคา และพื้นที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมักจะมีค่าไม่เกิน 5 อันดับ การคำนวณจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับจำนวนพจน์ของอุณหภูมิพื้นผิวในอดีตที่ใช้หาค่าอุณหภูมิพื้นผิวในปัจจุบัน รายละเอียดที่สมบูรณ์ของระเบียบวิธีนี้สามารถศึกษาได้จากวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก Hittle, D.C. (1979)

เนื่องจากระเบียบวิธีตัวประกอบการตอบสนองนำค่าอุณหภูมิพื้นผิวในอดีตมาหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวในปัจจุบัน ดังนั้นจึงต้องแก้ระบบสมการพร้อมกันเพื่อทราบถึงกระบวนการนำความร้อนผ่านชั้นผนังของเปลือกอาคาร นอกจากนี้ยังต้องเสียหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์และเวลาในการคำนวณเป็นอย่างมาก ถ้าหากจำนวนพจน์ของค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ใช้เพิ่มมากขึ้น โมดูล TCAP_ResponseFactor จะจำกัดพจน์ของการคำนวณไว้ที่ 24 ค่าซึ่งแสดงถึงค่าอุณหภูมิของวันที่ผ่านมา ถ้ามีความจำเป็นต้องใช้จำนวนพจน์มากกว่านี้ TCAP_ResponseFactor จะเพิ่มอันดับในการคำนวณโดยอัตโนมัติจึงทำให้พจน์ถูกใช้ในการคำนวณมีจำนวนน้อยลง อันดับในการคำนวณของโมดูลสามารถเพิ่มได้ถึงอันดับที่ 5

ค.5 โมดูล TCAP_SolarCompute

โมดูล TCAP_SolarCompute ทำหน้าที่ในการคำนวณทุกกระบวนการที่เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งของดวงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์แบบตรง พลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจาย การแผ่รังสีความร้อนจากท้องฟ้า การแผ่รังสีความร้อนจากดิน พลังงานแสงอาทิตย์ที่ดูดซับหรือทะลุผ่านกระจก รวมถึงเงาที่เกิดจากหลังคาและกันสาด แบบจำลองสำคัญที่ใช้ในการคำนวณภายในโมดูลจะอ้างอิงจาก ASHRAE (2001) ซึ่งกำหนดให้ท้องฟ้ามีความปลอดโปร่งตลอดทั้งปี ความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองนี้ได้ถูกอภิปรายไว้ในงานวิจัยของ McClellan, T.M. (1997) และ Pederson, C.O. (1997) นอกจากนี้ในงานวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าค่าการสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ของพื้นดินซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.09 ถึง 0.34 สามารถทำให้ค่าภาระการทำความเย็นเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 3% ถึง 6% ขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี โมดูล TCAP_SolarCompute ตระหนักถึงปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงคำนวณโดยใช้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จากพื้นดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามพื้นผิวแต่ละประเภทและมุมที่แสงตกกระทบในแต่ละองศาซึ่งได้มาจากการประมาณค่าในช่วงของข้อมูลที่นำเสนอไว้ใน ASHRAE (2001)

พลังงานจากดวงอาทิตย์ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อผนังภายนอกเท่านั้นแต่ยังส่งผลกระทบต่อผนังภายในด้วย รังสีความร้อนคลื่นสั้นในรูปของแสงอาทิตย์ที่ผ่านทะลุระบบหน้าต่างเข้า (q''_{sol}) มาเป็นสาเหตุสำคัญของภาระการทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น การทำนายปรากฏการณ์ดังกล่าวจะกระทำตามสมมุติฐานของ Liesen, R.J. (1997) ซึ่งทำการเฉลี่ยรังสีคลื่นสั้น (q''_{SW}) ของดวงอาทิตย์ หลอดไฟ รวมถึงรังสีสะท้อนจากที่ต่างๆ ให้แก่ทุกพื้นผิวในห้อง ส่วน q''_{sol} จะทำการฉายลงสู่พื้นทั้งหมด

ระบบหน้าต่างที่โมดูล TCAP_SolarCompute สามารถคำนวณได้จะมีเพียง DSA glass (Double-Strength Sheet Glass) ซึ่งเป็นกระจกมาตรฐานของ ASHRAE ที่มีค่าการทะลุของแสง ค่าการดูดซับแสง ค่าการสะท้อนของแสงเท่ากับ 0.86 0.08 และ 0.06 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามคุณลักษณะของ DSA glass ที่มีต่อดวงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนแปลงให้เทียบเท่ากับระบบหน้าต่างชนิดอื่นได้โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา (shading coefficient) มาใช้ ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงาหมายถึงสัดส่วนระหว่างพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ผ่านระบบกระจกซึ่งกำลังพิจารณาภายใต้สภาวะที่กำหนดต่อพลังงานความร้อนที่ผ่านกระจกมาตรฐานภายใต้ภาวะเดียวกัน จากการนำค่าสัมประสิทธิ์การบังเงามาใช้จะทำให้โมดูล TCAP_SolarCompute มีความยืดหยุ่นอย่างสูงต่อการวิเคราะห์กระจกในรูปแบบต่างๆ

หน้าที่สำคัญอีกประการของโมดูล TCAP_SolarCompute ก็คือการวิเคราะห์พื้นที่การบังเงาที่เกิดขึ้นจากหลังคาและกันสาดของระบบหน้าต่างโดยทำการพิจารณาว่าการบังเงาที่เกิดจากส่วนต่างๆ นั้นสามารถป้องกันได้เฉพาะรังสีความร้อนแบบตรงจากดวงอาทิตย์

ลักษณะทั้งหมดที่กล่าวมานี้ทำให้โมดูล TCAP_SolarCompute สามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากรังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ได้อย่างสมบูรณ์แบบและเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้โปรแกรม TCAP วิเคราะห์ปัญหาได้อย่างถูกต้อง

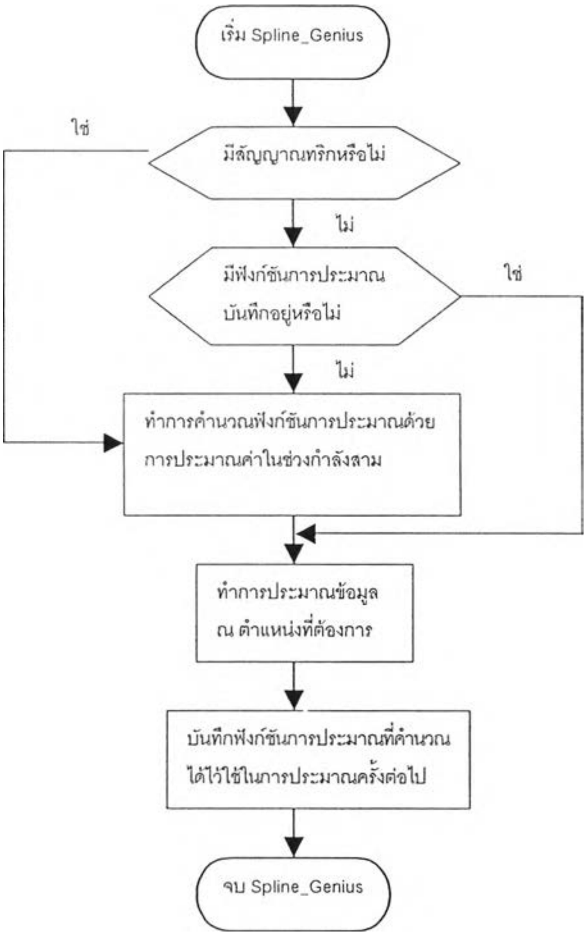
ค.6 โมดูล TCAP_Library

โมดูล TCAP_Library มีหน้าที่สนับสนุนการทำงานของทุกโมดูลในโปรแกรม TCAP โดยบรรจุแบบจำลองของการคำนวณค่าต่างๆ รวมถึงโปรแกรมย่อยเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเชิงเลขเอาไว้ อาทิเช่น แบบจำลองที่ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่าภาระภายใน แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (h_r) แบบจำลองของอุณหภูมิท้องฟ้า โปรแกรมย่อยที่ใช้แก้ระบบสมการที่เมตริกซ์มีลักษณะสามแถวทแยง โปรแกรมย่อยที่ใช้แก้ระบบสมการที่เมตริกซ์มีลักษณะสมมาตร โปรแกรมย่อยที่ใช้ในการประมาณค่าในช่วง และโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการเรียงลำดับข้อมูล เป็นต้น

หนึ่งในโปรแกรมย่อยที่มีความสำคัญที่สุดของโมดูลก็คือโปรแกรมย่อยซึ่งใช้ในการประมาณค่าในช่วง จากการที่ TCAP มีความจำเป็นต้องนำผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยต่างๆ มาใช้ในการคำนวณโดยเก็บอยู่ในรูปฐานข้อมูลซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีงานวิจัยใหม่เกิดขึ้นในอนาคต ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำสมการหรือความสัมพันธ์ใดๆ ซึ่งแสดงถึง

ฐานข้อมูลดังกล่าวมาบรรจุไว้ในโปรแกรมเพราะนอกจากโปรแกรมแก้ไขได้ยากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับฐานข้อมูลแล้วนักวิจัยคนอื่นๆ ที่จะนำโปรแกรมมาใช้อาจไม่มั่นใจในความถูกต้องของสมการหรือความสัมพันธ์นั้นๆ ได้ โครงสร้างโปรแกรมที่ดีควรมีการออกแบบให้โปรแกรมสามารถจัดการฐานข้อมูลได้ด้วยตนเองและศักยภาพเพียงพอที่จะบันทึกฟังก์ชันการประมาณของฐานข้อมูลที่เคยวิเคราะห์ไปแล้วเพื่อสามารถการนำมาใช้ใหม่โดยไม่จำเป็นคำนวณซ้ำอีก นอกจากนี้ฟังก์ชันการประมาณที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำสามารถคำนวณซ้ำใหม่ได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ฐานข้อมูลหรือเมื่อไรก็ตามที่โปรแกรมต้องการคำนวณใหม่ โปรแกรมย่อยที่มีคุณสมบัติตามที่กล่าวมานี้ได้รับการบรรจุอยู่ใน TCAP_Library โดยมีชื่อว่า Spline_Genius

Spline_Genius เป็นโปรแกรมย่อยอรรถประโยชน์ซึ่งทำหน้าที่สนับสนุนกระบวนการประมาณค่าในช่วงของทุกโมดูล ฐานข้อมูลในแต่ละโมดูลจะมีหมายเลขรหัสกำกับไว้เพื่อบอกให้โปรแกรมทราบว่าฐานข้อมูลดังกล่าวหมายถึงอะไรและใช้ในกระบวนการใด Spline_Genius ใช้หมายเลขรหัสดังกล่าวในการตรวจสอบถึงการคำนวณที่เกิดขึ้นกับฐานข้อมูลนั้นๆว่ามีข้อมูลของฟังก์ชันการประมาณบันทึกอยู่หรือไม่ ถ้ามีข้อมูลของฟังก์ชันการประมาณบันทึกอยู่ก็จะนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ทันที แต่ถ้าไม่มีการบันทึกแล้วการประมาณค่าในช่วงกำลังสาม (cubic spline interpolation) ถูกนำมาประมาณข้อมูล ณ ตำแหน่งที่ต้องการและจะบันทึกผลการคำนวณไว้ในหน่วยความจำเพื่อประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ในครั้งต่อไป ในกรณีที่โมดูลมีการปรับปรุงฐานข้อมูลระหว่างการดำเนินงาน โมดูลเหล่านี้จะส่งสัญญาณทริกไปที่ Spline_Genius เพื่อลบข้อมูลที่บันทึกไว้และคำนวณฟังก์ชันการประมาณขึ้นใหม่ด้วยวิธีการเดิม ขั้นตอนการวิเคราะห์ของโปรแกรมย่อย Spline_Genius แสดงได้รูป ค.4



รูป ค.4 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย Spline_Genius

ค.7 โมดูล TCAP_MRTtemp

โมดูล TCAP_MRTtemp มีหน้าที่ในการคำนวณค่า t_{mrt} โดยใช้สมการ (69) ถึง (74) จึงทำให้การวิเคราะห์ปัญหาของโมดูลนี้ถูกจำกัดอยู่เฉพาะห้องนี้รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก อย่างไรก็ตามการนำอุณหภูมิการแผ่รังสีของระนาบมาใช้ในการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิการแผ่รังสีที่ไม่สมมาตรอันเป็นสาเหตุของความไม่สบายเฉพาะแห่งซึ่งเกิดขึ้นแม้ว่าสภาพแวดล้อมจะอยู่ในช่วงที่ทำให้เกิดความสุขสบายเชิงความร้อนแล้วก็ตาม

ข้อมูลตั้งต้นซึ่งจำเป็นต้องส่งให้โมดูลทำการวิเคราะห์ได้แก่ T_i ของผนังภายในห้องทั้ง 6 ทิศทาง ขนาดของห้องที่ทำการวิเคราะห์ รวมทั้งตำแหน่งของบุคคลที่อยู่ภายในห้องโดยต้องระบุด้วยว่าบุคคลคนนั้นกำลังนั่งหรือยืน ขนาดของห้องและตำแหน่งของบุคคลที่ระบุให้แก่โมดูลนี้ถูกใช้ในการคำนวณค่าตัวประกอบเชิงมุมซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณค่า t_{pr} ตามสมการ (72) และ (73) ค่า t_{pr} หมายถึงอุณหภูมิสม่ำเสมอของพื้นผิวปิดที่มีฟลักซ์การแผ่รังสีตก

กระทบบนเอลิเมนต์ย่อยตามทิศทางที่ระบุเท่ากับปริมาณการแผ่รังสีที่ได้จากสิ่งแวดล้อมจริง ค่า t_{pr} จะคำนวณจากค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับตัวประกอบเชิงมุมของห้าทิศทางที่เหลือซึ่งปิดล้อมเอลิเมนต์นั้นอยู่ (สมการ 69) เมื่อคำนวณค่า t_{pr} ใน 6 ทิศทางเรียบร้อยแล้ว t_{mrt} ที่กระทำต่อผู้อยู่อาศัยภายในอาคารสามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักระหว่างอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของระนาบทั้ง 6 ทิศทางกับพื้นที่ผิวของกริดรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่แสดงถึงบุคคลซึ่งมีรูปร่างต่างกันไปในแต่ละกิจกรรม (สมการ 70 และ 71) ส่วนค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ไม่สมมาตรนั้นคำนวณได้โดยตรงจากความแตกต่างของอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยของระนาบใน 3 แกนอ้างอิงตามระบบพิกัดแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ASHRAE Standard 55-a (ASHRAE 1992/1995), Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy เป็นมาตรฐานที่ใช้ตรวจสอบว่าอุณหภูมิการแผ่รังสีที่ไม่สมมาตรซึ่งคำนวณจากโมดูลทำให้คนเกิดความไม่สบายเฉพาะแห่งหรือไม่ ASHRAE (1995) ระบุว่าคนรับรู้ถึงความร้อนจากเพดานที่ร้อนได้ไวกว่าความร้อนและความเย็นจากระนาบตั้งฉากซึ่งอยู่ตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงกำหนดขอบเขตของอุณหภูมิการแผ่รังสีที่ไม่สมมาตรในทิศทางที่ตั้งฉากไม่ให้มีค่าเกิน 5 ^{o}C และ 10 ^{o}C ในทิศทางระดับ นอกจากนี้มาตรฐานดังกล่าวยังกล่าวถึงรายละเอียดของสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดความสุขสบายและไม่สุขสบายซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์ผลการคำนวณของโปรแกรม TCAP

หลังจากที่โมดูล TCAP_MRTtemp ทำการวิเคราะห์เสร็จสิ้น ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จะส่งต่อให้โมดูล TCAP_Comfort คำนวณค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงความสุขสบายของผู้อยู่อาศัยในขั้นตอนต่อไป

ค.8 โมดูล TCAP_Comfort

โมดูล TCAP_Comfort เป็นโมดูลที่ใช้วิเคราะห์ความสุขสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยภายในโดยคำนวณค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงความสุขสบายเชิงความร้อนทุกตัวที่เกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นค่า PMV PPD T_O ET* SET* DISC และ TSENS จึงกล่าวได้ว่าโมดูลนี้เป็นหัวใจของกระบวนการวิเคราะห์ความสุขสบายเชิงความร้อนในโปรแกรม TCAP โมดูล TCAP_Comfort จะรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละบุคคลจากข้อมูลที่ป้อนเข้าตั้งแต่เริ่มการคำนวณและรับค่าพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมจากโมดูลต่างๆ ดังนี้ T_a จากโมดูล TCAP_HBcompute v จากโมดูล TCAP_FlowAnalyse และ T_{mrt} จากโมดูล TCAP_MRTtemp ส่วน Rh คำนวณจากสมมุติฐานที่ว่า

ไม่มีการถ่ายเทมวลของไอน้ำระหว่างโซนควบคุมกับสิ่งแวดล้อม จากนั้นจะทำการคำนวณค่าดัชนีแต่ละตัวแล้วคืนค่าให้โปรแกรมหลักเพื่อรวบรวมและทำการสรุปต่อไป

ภายในโมดูลประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อยอรรถประโยชน์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของอากาศแห้งและอากาศเปียก โปรแกรมย่อยต่างๆ ที่วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับร่างกายและโปรแกรมย่อยที่คำนวณค่าดัชนีความสุขสบาย โปรแกรมย่อยที่บรรจุอยู่ในโมดูลเหล่านี้ได้รับการออกแบบให้ทำการคำนวณเฉพาะอย่างเพื่อประโยชน์ในการศึกษาและเป็นแหล่งอ้างอิงแก่นักวิจัยคนอื่นๆ ดังนั้นการคำนวณค่าดัชนีแต่ละค่ามีความเกี่ยวข้องกับชุดของโปรแกรมจำนวนหนึ่งและมีความจำเป็นต้องดำเนินการร่วมกัน โปรแกรมย่อยสำคัญที่เชื่อมโยงกับโปรแกรมหลักของ TCAP ได้แก่ โปรแกรมย่อย PMV_VALUE โปรแกรมย่อย SET_VALUE และโปรแกรมย่อย DISC_TSENS

โปรแกรมย่อย PMV_VALUE มีหน้าที่ในการคำนวณค่า PPD ซึ่งเป็นดัชนีที่ทำนายปฏิกิริยาตอบสนองโดยเฉลี่ยของคนกลุ่มใหญ่ซึ่งแสดงผลการคำนวณตามหน่วยวัดความรู้สึกทางความร้อนของ ASHRAE ช่วงของค่า PMV ซึ่งก่อให้เกิดความสุขสบายเชิงความร้อนที่ยอมรับได้ สามารถอ้างอิงได้จาก ISO (7730)

โปรแกรมย่อย SET_VALUE มีหน้าที่ในการคำนวณค่า SET* ตามวิธีของ 2NM ซึ่งมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์กลไกการทำงานที่เกิดขึ้นในร่างกายไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่ผิวหนัง อุณหภูมิที่แกนกลางร่างกาย ความเปียกชื้นที่เกิดขึ้นบนผิวหนังอันเกิดจากการขับเหงื่อหรือแม้กระทั่งอัตราการไหลเวียนโลหิตที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเวลา จึงเห็นได้ว่าค่า SET* เป็นดัชนีที่อยู่ในสภาวะไม่คงที่ซึ่งต่างจากค่าPMV นอกจากค่า SET* จะสามารถคำนวณได้ในโปรแกรมย่อยนี้แล้ว ค่า ET* และ T_o สามารถนำมาคำนวณโดยใช้โปรแกรมนี้ได้เช่นกัน ขอบเขตของดัชนีที่ทำให้บุคคลมีความสุขสบายเชิงความร้อนได้อภิปรายไว้อย่างละเอียดใน ASHRAE Standard 55 (ASHRAE 1992/1995)

โปรแกรมย่อย DISC_TSENS มีหน้าที่ในการวิเคราะห์ดัชนีความสุขสบายเชิงความร้อนตามวิธีของ 2NM ที่สำคัญอีก 2 ตัวคือ DISC และ TSENS ดัชนีทั้งสองตัวนี้จะนำมาวิเคราะห์ควบคู่ไปกับค่าดัชนีอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว

ขั้นตอนการคำนวณอย่างละเอียดของทุกโมดูลที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นถึงการทำงานในภาพรวมของ TCAP ได้เป็นอย่างดี รายละเอียดของกระบวนการทำงานสามารถดูได้จาก

ตัวโปรแกรมโดยตรง นอกจากนี้ยังสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงต่างๆตามที่ระบุไว้ในรายการอ้างอิง

ค.9 การตรวจสอบโปรแกรม

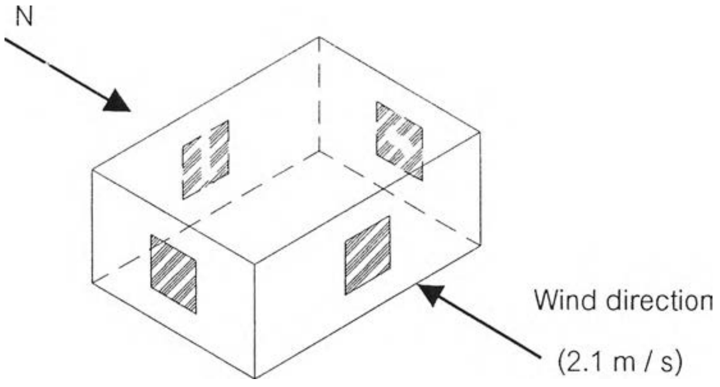
เมื่อทราบถึงแนวคิดรวมถึงวิธีการคำนวณของโปรแกรม TCAP แล้วขั้น ตอนต่อไปจะนำเสนอถึงความถูกต้องแม่นยำของโปรแกรมที่สร้างขึ้นเทียบกับโปรแกรมการคำนวณเฉพาะทางที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ตามที่กล่าวมาแล้วว่าโมดูลที่เป็นหัวใจของการคำนวณในโปรแกรม TCAP ก็คือโมดูล TCAP_HBcompute และโมดูล TCAP_FlowAnalyse ดังนั้นการตรวจสอบผลการคำนวณจึงมุ่งเน้นไปที่ความถูกต้องของโมดูลทั้งสองเป็นสำคัญ แต่จากการที่โมดูลทั้งคู่มีรากฐานการพัฒนามาจากการวิเคราะห์ปัญหาที่ต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหานั้นๆ มาเป็นเกณฑ์อ้างอิง HBfort (Perderson, C.O., 1998) และ ASCOS (Klote, J.H., 1992) ซึ่งเป็นโปรแกรมมาตรฐานของ ASHRAE ที่ใช้ในการคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธีสมดุลความร้อนสำหรับหนึ่งโซนควบคุมและใช้ในการวิเคราะห์การไหลของอากาศในระบบควบคุมควันไฟนั้นถูกนำมาเป็นแม่แบบในการพัฒนาและตรวจสอบถึงความถูกต้อง นอกจากนี้โปรแกรม LoadCal ของ สมบูรณ์ (2543) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของระบบหลังคาด้วยระเบียบวิธีสมดุลความร้อนและเป็นโปรแกรมตั้งต้นที่ TCAP พัฒนาต่อมานั้นถูกนำมาแสดงผลเชิงเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นถึงความแม่นยำของการคำนวณและความก้าวหน้าของโปรแกรม TCAP รายละเอียดและขั้นตอนการตรวจสอบสามารถศึกษาได้จากหัวข้อที่จะนำเสนอต่อไปนี้

ค.9.1 ความถูกต้องของโมดูล TCAP_HBcompute

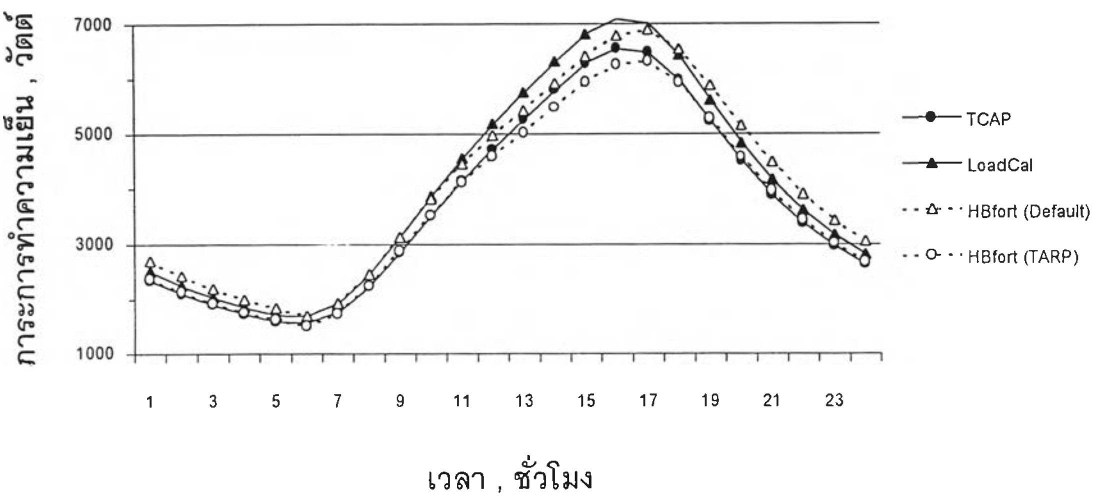
โมดูล TCAP_HBcompute ที่เป็นหัวใจของการคำนวณสมดุลความร้อนของโปรแกรม TCAP ถูกนำมาตรวจสอบด้วยโปรแกรม HBfort ซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อคำนวณภาระการทำความเย็นของโซนควบคุมเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก รายละเอียดของโครงสร้างกำแพง ผนัง หลังคา ตำแหน่งที่ตั้งรวมถึงลักษณะภูมิอากาศสามารถกำหนดได้อย่างอิสระโดยแสดงผลการคำนวณอยู่ในรูปภาระการทำความเย็นที่เวลาต่างๆ อย่างไรก็ตามผลการคำนวณของโมดูล TCAP_HBcompute ไม่สามารถตรวจสอบด้วยโปรแกรมดังกล่าวได้โดยตรง เนื่องจากในการวิเคราะห์ของโมดูลจะพิจารณาถึงรายละเอียดปลีกย่อยจำนวนมาก จากที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้ทราบว่าโมดูล TCAP_HBcompute จะคำนึงถึงอัตราการระบายอากาศและการรั่วซึมในแต่ละชั่วโมง ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนของพื้นดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ความเร็วลมและทิศทางที่แปรเปลี่ยนไปตลอดทั้งวัน รวมถึงรายละเอียดของแหล่งภาระ

ภายในซึ่งสามารถกำหนดได้อย่างอิสระตลอด 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามความสามารถในการคำนวณทั้งหมดที่กล่าวมานี้ของโมดูล TCAP_HBcompute จำเป็นต้องตัดทอนออกเพื่อให้สามารถตรวจสอบด้วยโปรแกรม HBfort ได้ สำหรับโครงสร้างของโปรแกรม HBfort แม้ว่าจะมีความสามารถในการคำนวณที่จำกัดอยู่เฉพาะห้องสี่เหลี่ยมมุมฉากและคำนวณได้เฉพาะค่าภาระการทำความเย็นเท่านั้น แต่โครงสร้างนี้ไม่เป็นอุปสรรคในการตรวจสอบเนื่องจากโมดูลสามารถวิเคราะห์โซนควบคุมหนึ่งหรือสองโซนก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิอากาศในโซนหรือภาระการทำความเย็นตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานได้อีกด้วย

ปัญหาพื้นฐานที่ถูกเลือกมาเพื่อตรวจสอบถึงความถูกต้องของโปรแกรมได้แก่ห้องรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากขนาด 5 m x 7 m x 3 m ซึ่งนำกระจกมาตรฐานแบบบางและมีชั้นเดียวหนา 1/6″ ขนาด 1.4 m x 1.4 m มาติดตั้งที่กำแพงทั้งสี่ด้านของห้อง ในการจะคำนวณพิจารณาค่าอุณหภูมิอากาศของกรุงเทพมหานครเมื่อวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2536 ซึ่งอยู่ในฤดูร้อนเป็นสำคัญ โดยทำการกำหนดว่าห้องดังกล่าวซึ่งตั้งอยู่ในภูมิประเทศเปิดโล่งถูกลมพัดด้วยความเร็ว 2.1 m/s พัดเข้ามาทางทิศเหนืออย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังกำหนดให้การสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ของพื้นดินมีค่า 0.25 คงที่ตลอดทั้งวันรวมทั้งไม่มีแหล่งความร้อนใดๆอยู่ภายในห้องที่ทำการพิจารณา รูปทรงของห้องที่ใช้ในการคำนวณสามารถพิจารณาได้จากรูป ค.5



รูป ค.5 ห้องสี่เหลี่ยมมุมฉากที่นำมาคำนวณค่าภาระการทำความเย็น



รูป ค.6 ค่าภาระการทำความเย็นที่คำนวณได้จากโปรแกรมต่างๆ

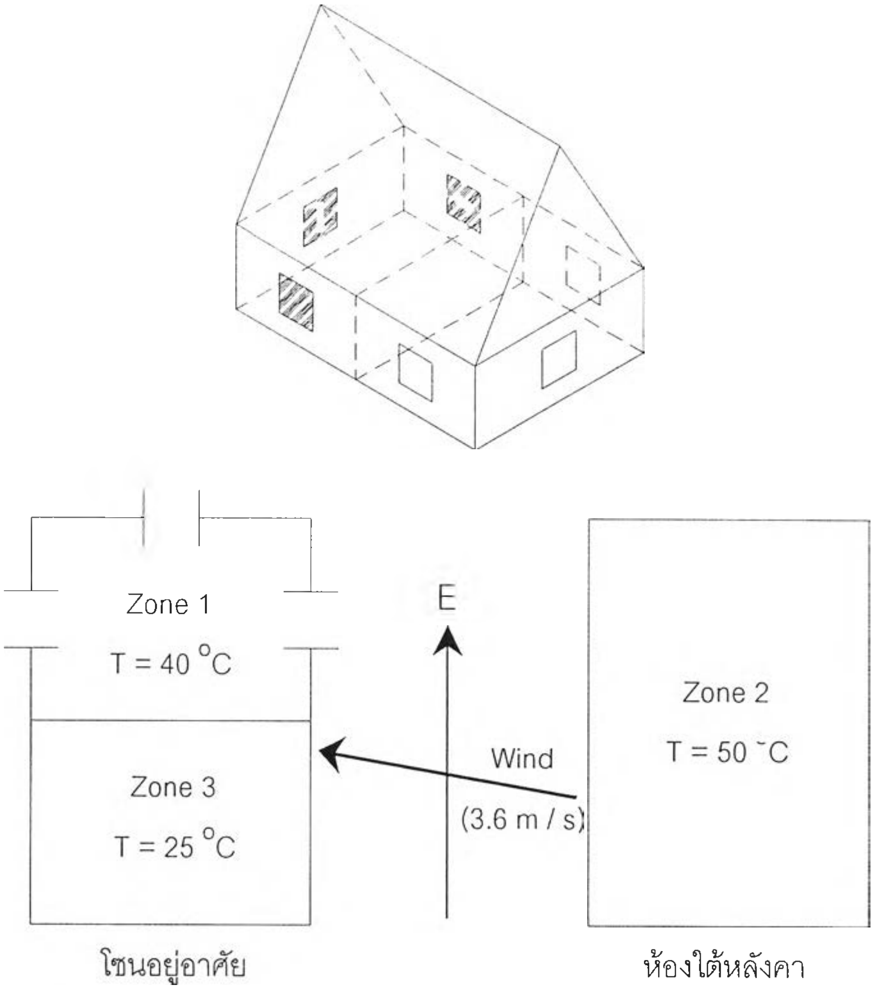
รูป ค.6 นำเสนอถึงค่าภาระการทำความเย็นของห้องที่ใช้ศึกษาในแต่ละชั่วโมง โดยพบว่าผลการคำนวณจากโปรแกรม LoadCal กับโปรแกรม HBfort ซึ่งใช้ค่าตั้งต้นของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) ที่มีค่าคงที่นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าผลการคำนวณจากโมดูล TCAP_HBcompute อย่างไรก็ตามการที่โปรแกรม LoadCal คำนวณค่า h_c จากแบบจำลองของ BLAST Detailed Convection Model ซึ่งต่างจากค่าตั้งต้นของโปรแกรม HBfort ดังนั้นจึงไม่สามารถนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกันได้ หากทำการกำหนดให้โปรแกรม HBfort นำแบบจำลอง TARP Detailed Convection Model มาคำนวณเช่นเดียวกับโมดูล TCAP_HBcompute ดังรูป ค.6 แล้วสามารถเห็นได้ว่าค่าภาระการทำความเย็นที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันมากโดยที่ผลการคำนวณตั้งแต่เวลา 1:00 น. ถึง 11:00 น. และช่วงเวลาตั้งแต่ 17:00 น. ถึง 24:00 น. ค่าที่ได้จากทั้งสองโปรแกรมเกือบมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งภาระสูงสุด ณ เวลา 16:00 น. มีค่าเพียง 4.79% ส่วนผลการคำนวณของโปรแกรม LoadCal ซึ่งคำนวณด้วยแบบจำลอง h_c ที่ต่างออกไปนั้นไม่มีผลใดๆต่อการคำนวณเนื่องจากบ้านจำลองที่กำลังพิจารณาตั้งอยู่บนภูมิประเทศเปิดจึงทำให้แบบจำลองของ BLAST เท่ากันทุกประการกับแบบจำลองของ TARP ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าผลการคำนวณของโปรแกรม LoadCal เบี่ยงเบนไปจากโปรแกรม HBfort อย่างเห็นได้ชัด เพราะฉะนั้นสามารถสรุปได้ว่าโมดูล TCAP_HBcompute สามารถวิเคราะห์สมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำและมีความผิดพลาดน้อยกว่าโปรแกรม LoadCal ซึ่งเป็นโปรแกรมต้นแบบของการพัฒนา

ค.9.2 ความถูกต้องของโมดูล TCAP_FlowAnalyse

โมดูล TCAP_FlowAnalyse ได้รับการออกแบบเพื่อวิเคราะห์ถึงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารโดยคำนวณควบคู่ไปกับโมดูล TCAP_HBcompute การตรวจสอบถึงความถูกต้องทำได้โดยนำโปรแกรม ASCOS ซึ่งเป็นโปรแกรมของ ASHRAE มาใช้ ทั้งนี้เนื่องจากโมดูลถูกสร้างขึ้นโดยมี ASCOS เป็นแบบอย่างแต่จำกัดการคำนวณให้สามารถวิเคราะห์โซนควบคุมได้ไม่เกินสามโซน พร้อมทั้งตัดการวิเคราะห์เกี่ยวกับโถงบันไดและปล่องต่างๆ ซึ่งไม่จำเป็นต่อการคำนวณออก อย่างไรก็ตามโมดูล TCAP_FlowAnalyse ได้เพิ่มเติมความสามารถในการคำนวณด้านอื่นๆ นอกเหนือจากความสามารถที่มีอยู่เดิมใน ASCOS อันได้แก่การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความดันลม (c_w) และค่าตัวประกอบสิ่งกีดขวาง (s) เพื่อทำให้โมดูล TCAP_FlowAnalyse เหมาะสมต่อการวิเคราะห์อาคารเตี้ยมากกว่าโปรแกรม ASCOS ที่ได้รับการออกแบบมาสำหรับอาคารสูง ดังนั้นข้อมูลป้อนเข้าของทั้งสองโปรแกรมจำเป็นต้องมีลักษณะที่ต่างกันเพื่อสามารถนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกันได้ ข้อมูลป้อนเข้าของโมดูล TCAP_FlowAnalyse สามารถอยู่ในรูปของข้อมูลอากาศโดยตรงได้เนื่องจากโมดูลจะทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ เพื่อมาวิเคราะห์ความดันตกคร่อมอาคารเตี้ยได้ด้วยตนเอง แต่สำหรับโปรแกรม ASCOS ที่ออกแบบมาสำหรับอาคารสูงพบว่าไม่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ได้ด้วยตนเองและไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากสิ่งกีดขวางรอบตัวอาคาร ดังนั้นข้อมูลป้อนเข้ามีความจำเป็นต้องอยู่ในรูปของความดันที่พื้นผิวภายนอกกำแพงโดยตรงจึงสามารถวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้นในอาคารเตี้ยได้

รูป ค.7 แสดงถึงรูปทรงของบ้านจำลองที่นำมาตรวจสอบถึงผลการคำนวณจากโมดูล TCAP_FlowAnalyse เทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ASCOS บ้านจำลองดังกล่าวมีขนาด 7 m x 10 m x 3 m หลังคาเป็นหน้าจั่ว 60 องศา มุงด้วยกระเบื้องคอนกรีตและตั้งอยู่บนภูมิประเทศเปิดโล่งในทิศตามตะวัน โซนที่อยู่อาศัยถูกแบ่งครึ่งออกเป็นสองส่วนซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน โซนแรกมีอุณหภูมิ 40 ^{o}C และเจาะช่องเปิดขนาด 1.4 m x 1.4 m ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกำแพงทั้งสามด้าน ส่วนอีกโซนหนึ่งจะติดตั้งกระจกมาตรฐานหนา 1/8″ บนกำแพง ณ ตำแหน่งเดียวกับช่องเปิดที่อยู่บนโซนแรก จากนั้นเปิดเครื่องปรับอากาศเพื่อให้อุณหภูมิภายในโซนคงที่ที่ระดับ 25 ^{o}C สำหรับห้องใต้หลังคาถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิ 50 ^{o}C สม่ำเสมอตลอดทั้งโซนโดยมีรอยรั่วซึมปรากฏอยู่ตามรอยต่อของกระเบื้องมุงหลังคา หากพิจารณาว่าสิ่งแวดล้อมภายนอกมีอุณหภูมิคงที่ 28 ^{o}C โดยมีลมพัดสม่ำเสมอด้วยความเร็ว 3.6 m/s มาทางทิศใต้เยื้องไปทางด้าน

ตะวันออก 10 $^{\circ}$ แล้วอัตราการไหลของอากาศรวมถึงความดันตกคร่อมช่องทางการไหลซึ่งคำนวณ โดยโปรแกรม ASCOS และโมดูล TCAP_FlowAnalyse สามารถแสดงได้ดังตาราง ค.1



รูป ค.7 บ้านตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์การไหลของอากาศ

ตาราง ค.1 นำเสนอถึงผลการวิเคราะห์ของบ้านตัวอย่างด้วยโมดูล TCAP_FlowAnalyse เทียบกับโปรแกรม ASCOS และพบว่าผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยที่ความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 12.5% ความคลาดเคลื่อนของโมดูล TCAP_FlowAnalyse นั้นเกิดจากการกำหนดเงื่อนไขการลู่เข้าให้มีความละเอียดน้อยกว่า ASCOS เพื่อให้โมดูลคำนวณด้วยเวลาที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากผลการคำนวณอัตราการไหลในแต่ละรอบการทำซ้ำมิใช่ค่าที่แท้จริงอันเป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิภายในบริเวณควบคุมซึ่งคำนวณด้วยโมดูล TCAP_HBcompute นั้นเป็นหนึ่งในตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จึงไม่มีความจำเป็นต้องคำนวณค่าอัตราการไหลที่มีความแม่นยำถึงหลายตำแหน่งทศนิยม ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าโมดูล TCAP_FlowAnalyse มีความถูกต้องแม่นยำสูงและสามารถสนับสนุนการคำนวณภายในโปรแกรม TCAP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตาราง ค.1 ผลการวิเคราะห์อัตราการไหลของอากาศผ่านบ้านตัวอย่าง

โซน	ความดันเกจ (Pa)		เชื่อมต่อกับ	ความดันตกคร่อม (Pa)		อัตราการไหล (m^3/s)		
	ASCOS	TCAP		ASCOS	TCAP	ASCOS	TCAP	ความผิดพลาด
1	155.4	155.4	โซน 3	-0.5	-0.5	-0.002	-0.002	0.0%
			โซน 2	-1.8	-1.8	-0.008	-0.009	1.5%
			ทิศ ต.อ.	-1.0	-1.0	-1.568	-1.668	12.5%
			ทิศใต้	2.7	2.7	2.694	2.755	2.3%
			ทิศเหนือ	-0.5	-0.5	-1.112	-1.119	0.6%
2	104.2	104.2	โซน 1	1.8	1.8	0.008	0.009	12.5%
			โซน 3	0.2	0.2	0.002	0.002	0.0%
			ทิศ ต.อ.	-2.6	-2.6	-0.007	-0.007	0.0%
			ทิศใต้	2.8	2.8	0.020	0.021	5.0%
			ทิศ ต.ต.	-3.9	-3.9	-0.008	-0.009	12.5%
			ทิศเหนือ	-1.9	-1.9	-0.016	-0.018	12.5%
3	154.9	154.9	โซน 1	0.5	0.5	0.002	0.002	0.0%
			โซน 2	-0.2	-0.2	-0.002	-0.002	0.0%
			ทิศใต้	3.2	3.2	0.005	0.005	0.0%
			ทิศ ต.ต.	-1.4	-1.4	-0.004	-0.004	0.0%
			ทิศเหนือ	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0%

ค.9.3 ความถูกต้องของโปรแกรม TCAP

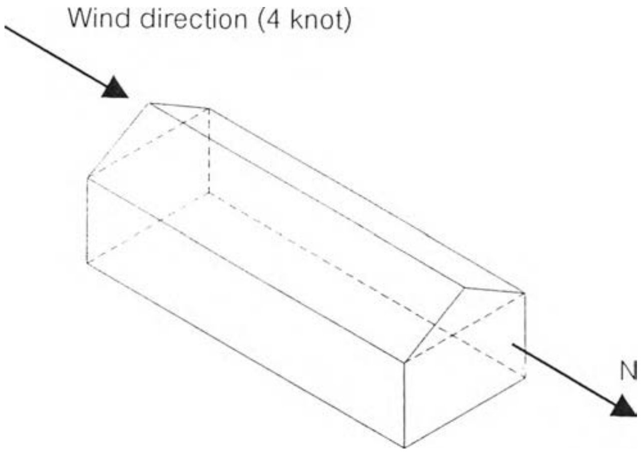
จากหัวข้อที่ผ่านมาได้ทำการตรวจสอบถึงความถูกต้องของโมดูล TCAP_HBcompute และโมดูล TCAP_FlowAnalyse ซึ่งเป็นโมดูลหลักของการคำนวณในโปรแกรม TCAP ในขั้นตอนนี้จะทำการตรวจสอบถึงความถูกต้องของโปรแกรม TCAP ว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับความเป็นจริงหรือไม่ แต่จากที่การวิจัยครั้งนี้ไม่มีการทดลองเพื่อตรวจสอบถึงความแม่นยำของผลการคำนวณ อีกทั้งไม่มีงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงมาอ้างอิง จึงจำเป็นต้องตรวจสอบโดยกำหนดสภาพแวดล้อมรวมทั้งเงื่อนไขการคำนวณต่างๆให้ใกล้เคียงกับกรณีที่พอจะคาดเดาถึงแนวโน้มของผลการคำนวณได้ ในที่นี้จะนำบ้านจำลองกรณีพื้นฐานที่ไม่มีกันสาดและช่องเปิดซึ่งถูกใช้เป็นกรณีอ้างอิงสำหรับงานวิจัยมาเป็นกรณีศึกษา บ้านจำลองกรณีพื้นฐานถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 5 m x 13 m x 3 m วางตัวอยู่ในทิศขวางตะวัน ระบบหลังคาเป็นรูปหน้าจั่วทำมุม 30 องศากับแนวระดับ มุงด้วยกระเบื้องคอนกรีตและไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งยื่นออกมาเป็นร่มเงาให้แก่กำแพง ฝ้าเพดานที่ทำด้วยแผ่นยิปซัมหนา 9 mm ถูกติดตั้งเข้าไปเพื่อแบ่งบ้านจำลองดังกล่าวออกเป็นสองโซนควบคุมอันได้แก่บริเวณที่อยู่อาศัยและห้องใต้หลังคา กำแพงแต่ละด้านก่อด้วยอิฐมอญขนาด 3″ และ ทั้งสองด้านฉาบปูนหนา 1/2″ โดยไม่ทำการติดฉนวนความร้อนหรือวัสดุใดๆเพิ่มเติมเข้าไป พื้นทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 6″ ซึ่งวางอยู่บนเสาเข็มซึ่งลึกลงไปใต้พื้นดิน รูปทรงของบ้านจำลองมีการนำเสนอไว้ในรูป ค.8

การตรวจสอบโปรแกรมจะพิจารณาถึงแนวโน้มของอุณหภูมิพื้นผิวต่างๆซึ่งคำนวณอยู่ในระยะเวลาและเงื่อนไขที่กำหนด ดวงอาทิตย์ถูกกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2536 โดยไม่มีการเคลื่อนที่ อุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียกตามรูป ค.9 ซึ่งการกำหนดขึ้นมานั้นถูกนำมาคำนวณเพื่อแสดงถึงลักษณะอากาศในแต่ละวันซึ่งจะเหมือนเดิมเสมอไม่ว่าเวลาจะผ่านไปนานเท่าไรก็ตาม นอกจากนี้ยังกำหนดให้ลมพัดด้วยความเร็ว 1 knot เข้ามาทางทิศใต้อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง การตรวจสอบโปรแกรมจะพิจารณาผลการคำนวณในรอบสามวันที่มีลักษณะภูมิอากาศและตำแหน่งของดวงอาทิตย์เหมือนกันทุกประการว่าเป็นไปในทิศทางใด ค่าอุณหภูมิของแต่ละพื้นผิวปรากฏเป็นคาบของเวลาหรือไม่ และค่าอุณหภูมิเหล่านี้มีขนาดเท่ากันหรือไม่ รวมทั้งพิจารณาว่าค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวันมีขนาดเท่าไรเมื่อเทียบกับค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าอุณหภูมิพื้นผิวต่างๆที่คำนวณจากโปรแกรม TCAP โดยอยู่ในเงื่อนไขทั้งหมดที่กล่าวมานี้แสดงอยู่ในรูป ค.10

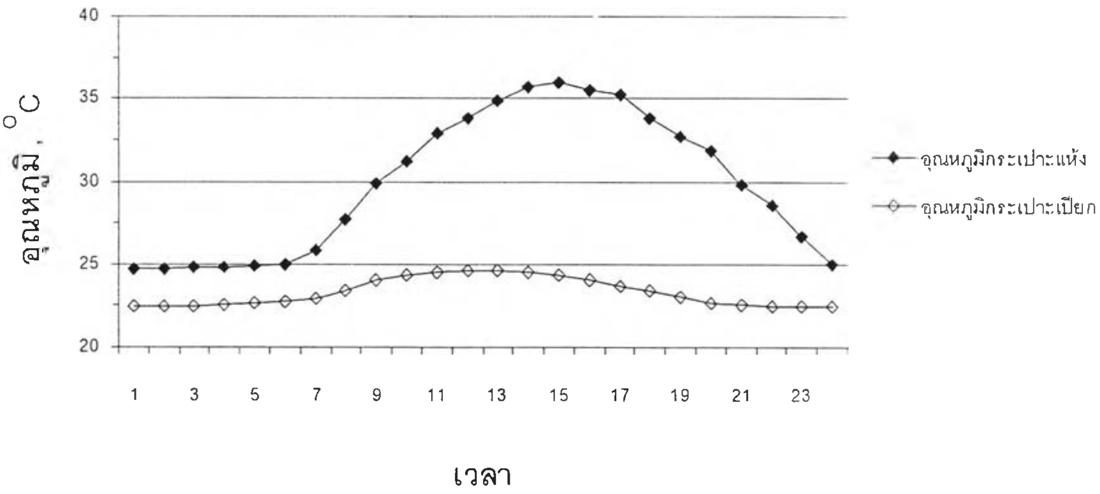
รูป ค.10 แสดงค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวต่างๆ รวมถึงอุณหภูมิอากาศภายในบริเวณควบคุมโดยแสดงผลเทียบกับเวลาสุริยะและค่าอุณหภูมิของอากาศภายนอก เมื่อพิจารณาผลการคำนวณพบว่าค่าอุณหภูมิของแต่ละพื้นผิวมีลักษณะเป็นคาบตามเวลาในรอบ 24 ชั่วโมงและมีขนาดที่เท่ากันในแต่ละวันซึ่งตรงกับที่คาดการณ์ไว้ในตอนต้น ดังนั้นสามารถมั่นใจในผลการคำนวณของโปรแกรม TCAP ได้ในอีกระดับ นอกจากนี้เพื่อให้เข้าใจถึงภาพรวมของปริมาณความร้อนที่เข้าสู่บ้านจำลองกรณีพื้นฐานซึ่งใช้เป็นกรณีอ้างอิงในงานวิจัย จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิในแต่ละพื้นผิวตามรูป ค.10 โดยละเอียด รวมทั้งพิจารณาด้วยว่าผลการคำนวณดังกล่าวสอดคล้องกับความเป็นจริงหรือไม่

จากการพิจารณาทำให้ทราบว่าอุณหภูมิของกำแพงด้านนอกทางทิศตะวันออกเริ่มมีค่าสูงขึ้นตั้งแต่ช่วงเช้าและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงสุดเมื่อเวลาประมาณ 12:00 น. จากนั้นอุณหภูมิจะเริ่มลดต่ำลงจนใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ส่วนอุณหภูมิด้านนอกของกำแพงทางด้านตะวันตกนั้นจะมีลักษณะตรงข้ามกัน อีกทั้งยังมีขนาดอุณหภูมิที่มากกว่าโดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มมีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลาบ่ายจนถึงจุดสูงสุดเมื่อเวลาประมาณ 16:00 น. เพราะฉะนั้นกำแพงด้านตะวันตกจึงรับปริมาณความร้อนที่มากกว่าโดยเฉพาะในช่วงเย็น อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาถึงอุณหภูมิของพื้นผิวภายในของกำแพงทั้งสองทิศทางพบว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวนี้มีขนาดที่น้อยกว่าพื้นผิวด้านนอกและช่วงเวลาที่อุณหภูมิมีค่าสูงสุดยังถูกหน่วงให้ช้าลง ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าโครงสร้างกำแพงของบ้านจำลองสามารถป้องกันความร้อนได้ในระดับหนึ่งโดยทำการเก็บความร้อนสะสมไว้แล้วจึงค่อยๆส่งผ่านความร้อนออกมาเมื่อเวลาผ่านไป แต่ลักษณะดังกล่าวกลับให้ผลเสียในช่วงเวลากลางคืน เนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวภายในมีค่ามากกว่าอากาศภายนอกจึงเป็นเหตุให้อุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่าสูงกว่าสิ่งแวดล้อม สำหรับอุณหภูมิพื้นผิวหลังคาทางตะวันตกและตะวันออกนั้นยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกับกำแพงเว้นแต่ขนาดของอุณหภูมิจะมีค่าสูงกว่ามาก นอกจากนี้ยังพบว่าค่าของอุณหภูมิพื้นผิวภายในกับภายนอกเกือบไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เกิดจากหลังคาได้รับการมุงด้วยกระเบื้องคอนกรีตที่มีมวลน้อยกว่ากำแพงจึงทำให้หลังคาป้องกันความร้อนรวมทั้งเก็บกักความร้อนได้ไม่ดีเท่า แต่จากการที่หลังคาเก็บสะสมปริมาณความร้อนไว้เพียงเล็กน้อยจึงสามารถคืนความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็วโดยสังเกตได้จากค่าอุณหภูมิที่ลดต่ำลงอย่างฉับพลันตั้งแต่ช่วงหัวค่ำจนทำให้อุณหภูมิที่พื้นผิวทั้งสองด้านของหลังคามีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศภายนอก ส่วนกำแพงและผนังทั้งทางทิศเหนือและทิศใต้จะพบว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวมีค่าน้อยกว่าทางทิศตะวันตกและตะวันออกอย่างเห็นได้ชัด จึงแสดงให้เห็นว่าดวงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อทางทิศเหนือและทางใต้น้อยกว่า ดังนั้นหากกำหนดให้บ้านวางตัวอยู่ในทิศตามตะวัน

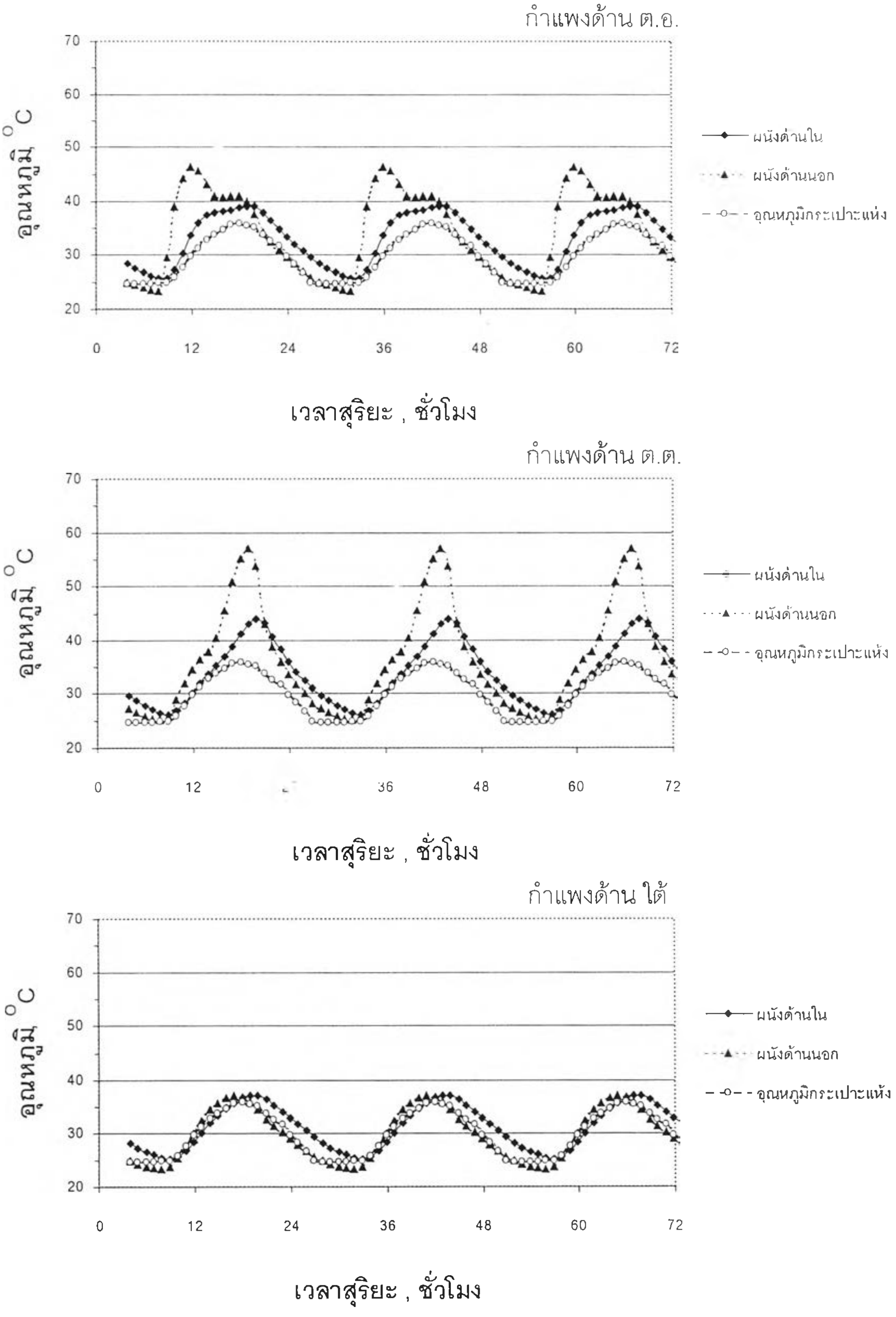
แล้วปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารควรมีค่าน้อยกว่าและอาจส่งผลให้ความสุขสบายเชิงความร้อนอยู่ในระดับที่ดีกว่า (รายละเอียดเกี่ยวกับอิทธิพลของทิศอาคารที่มีผลต่อความสุขสบายเชิงความร้อนสามารถศึกษาได้จากบทที่ 4) นอกจากนั้นหากเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของกำแพงและหลังคาระหว่างทิศเหนือกับทิศใต้จะพบว่าอุณหภูมิของพื้นผิวทางทิศใต้ซึ่งถูกลมพัดอยู่ตลอดเวลามีค่าน้อยกว่าทางทิศเหนือ เพราะฉะนั้นสามารถกล่าวได้ว่าลมมีอิทธิพลบางอย่างต่ออุณหภูมิพื้นผิว สำหรับฝ้าเพดานที่แบ่งบ้านจำลองออกเป็นส่วนของห้องใต้หลังคาและโซนอยู่อาศัยนั้นพบว่าฝ้าเพดานทำให้อุณหภูมิอากาศของแต่ละห้องมีความแตกต่างกันมากโดยสังเกตว่าอุณหภูมิของห้องใต้หลังคามีค่าสูงมากในช่วงกลางวันในขณะที่อุณหภูมิภายในห้องมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ในทางกลับกันอุณหภูมิของห้องใต้หลังคามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงเวลากลางคืนจนมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ลักษณะของอุณหภูมิอากาศภายในโซนเช่นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะโครงสร้างของผนังที่แตกต่างกัน



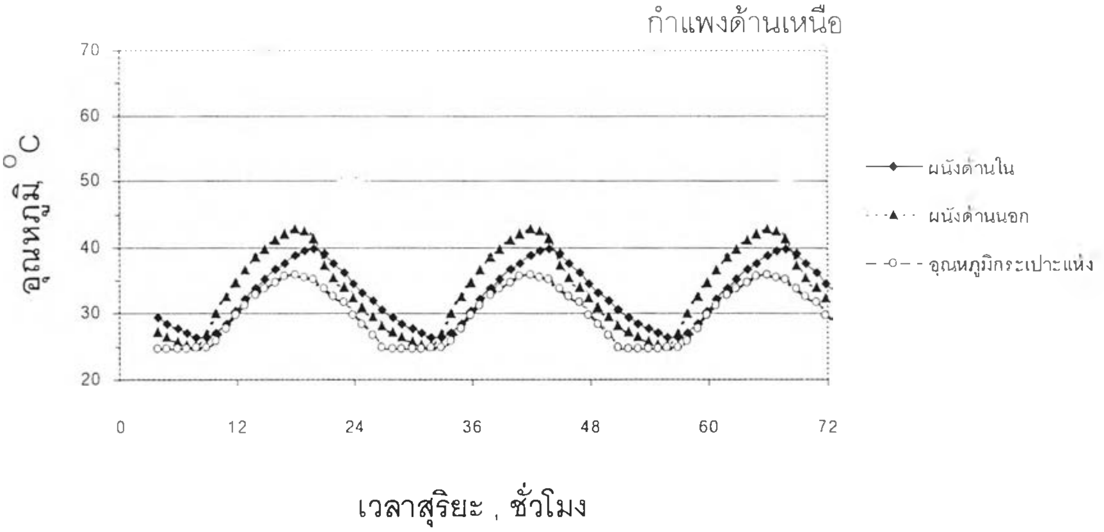
รูป ค.8 รูปทรงของบ้านกรณีพื้นฐานที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม TCAP

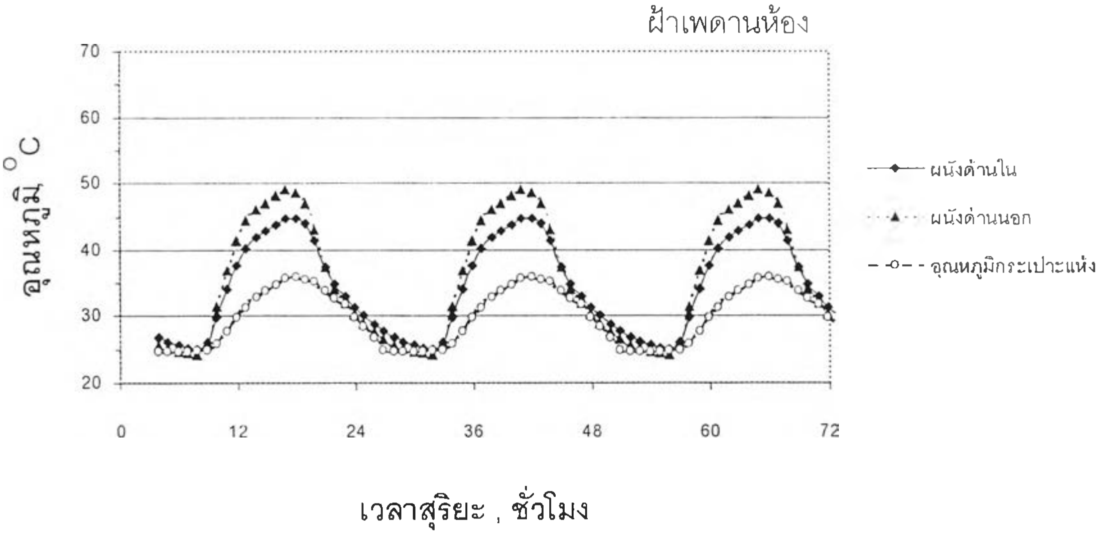


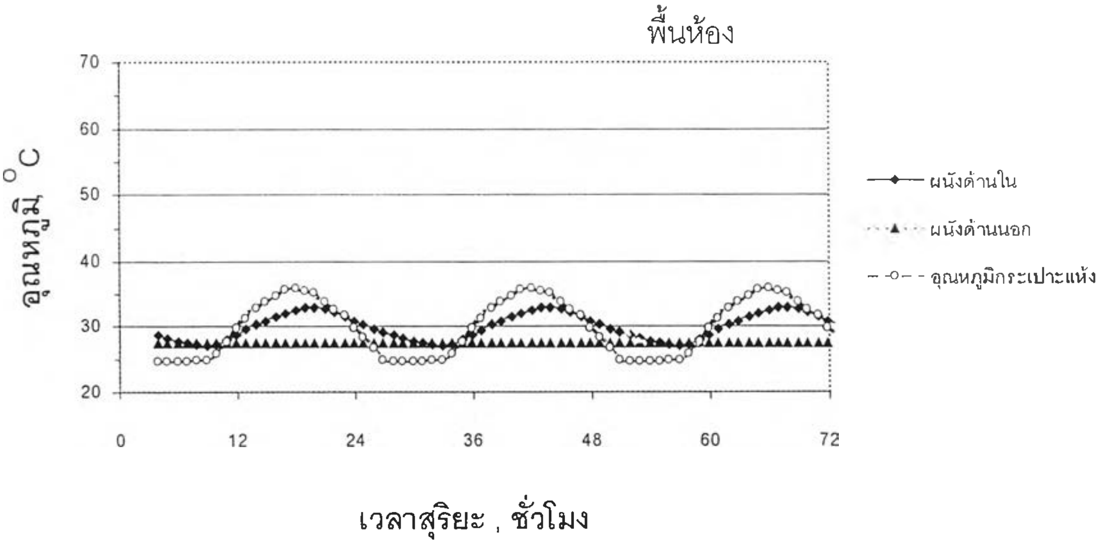
รูป ค.9 ข้อมูลอากาศที่สมมุติขึ้นเพื่อใช้ทดสอบโปรแกรม



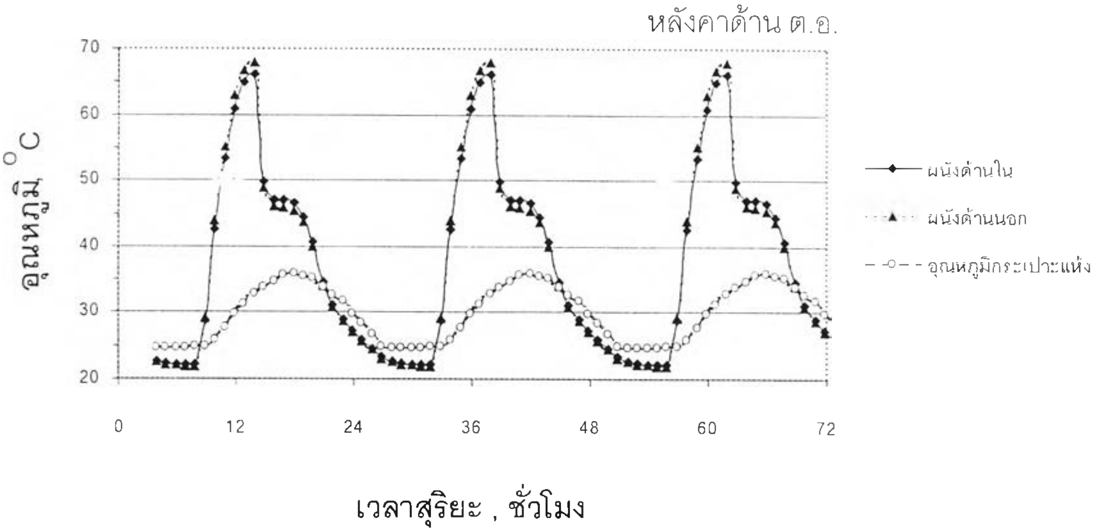
รูป ค.10 อุณหภูมิของแต่ละผนังที่เวลาต่างๆ

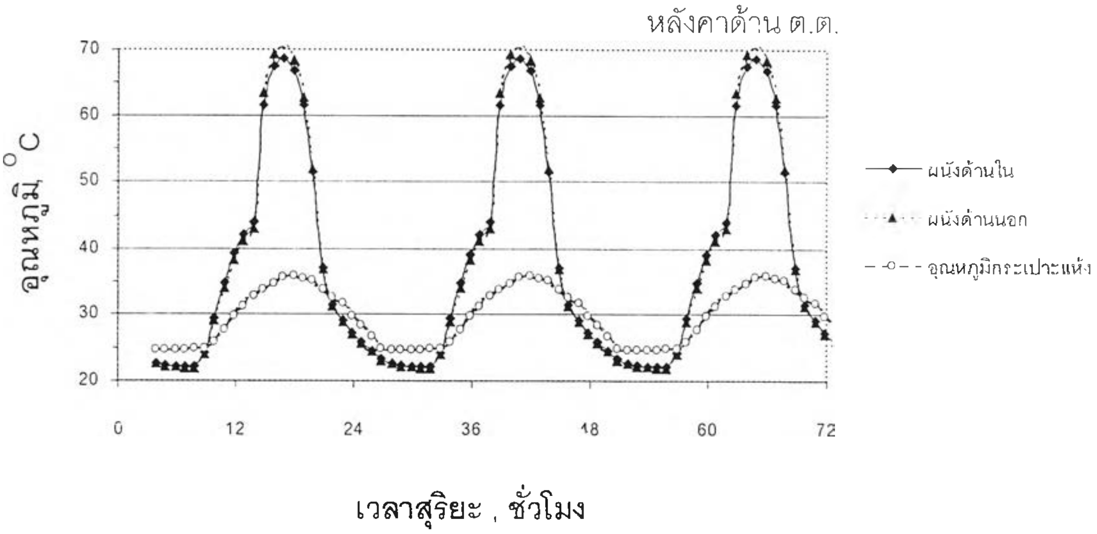


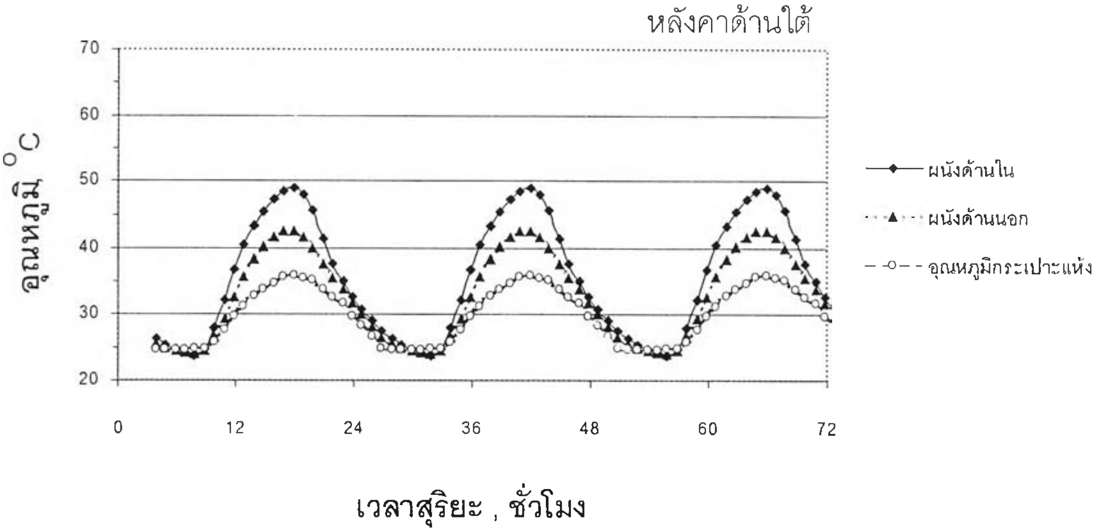




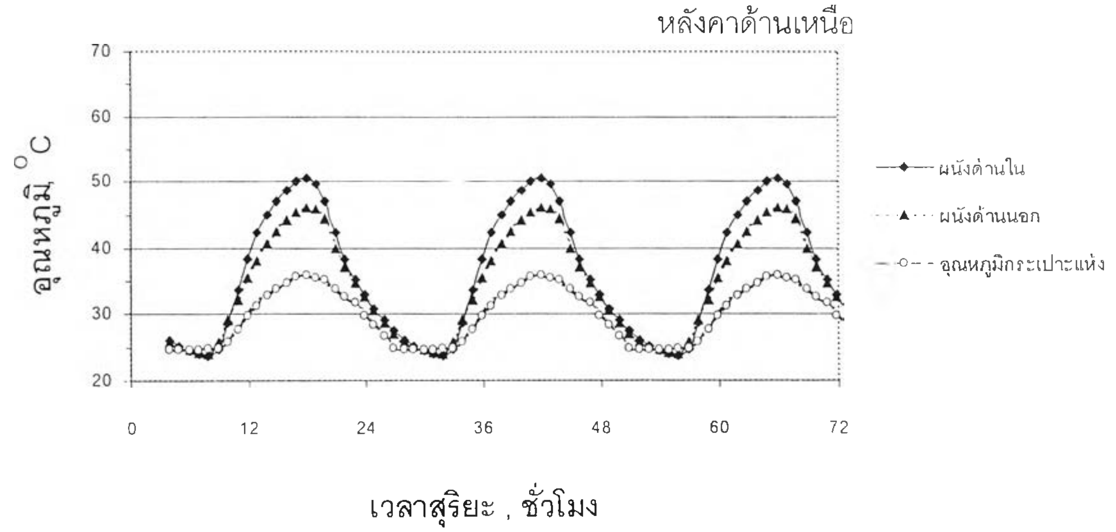
รูป ค.10 (ต่อ) อุณหภูมิของแต่ละผนังที่เวลาต่างๆ

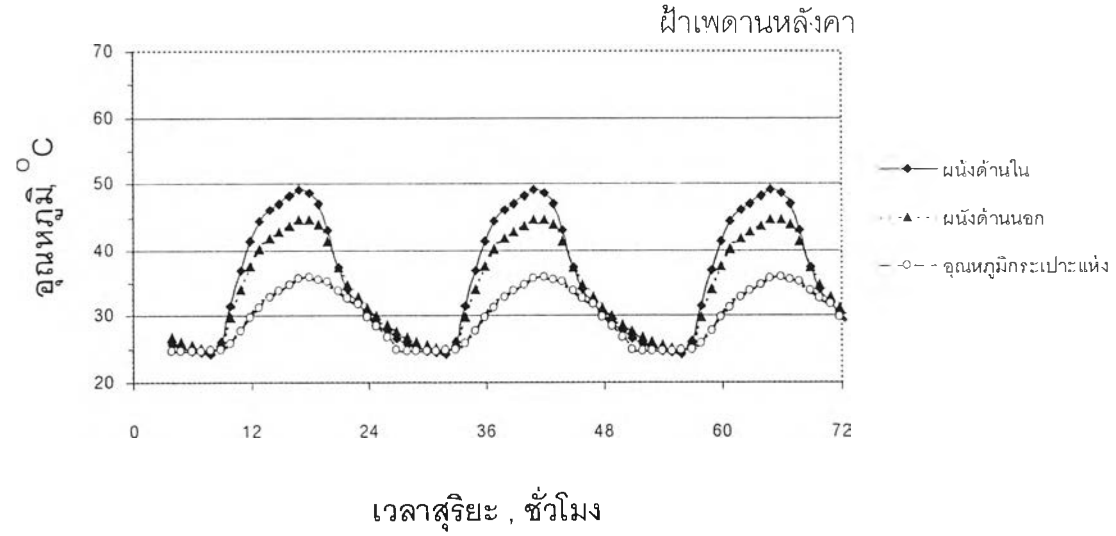


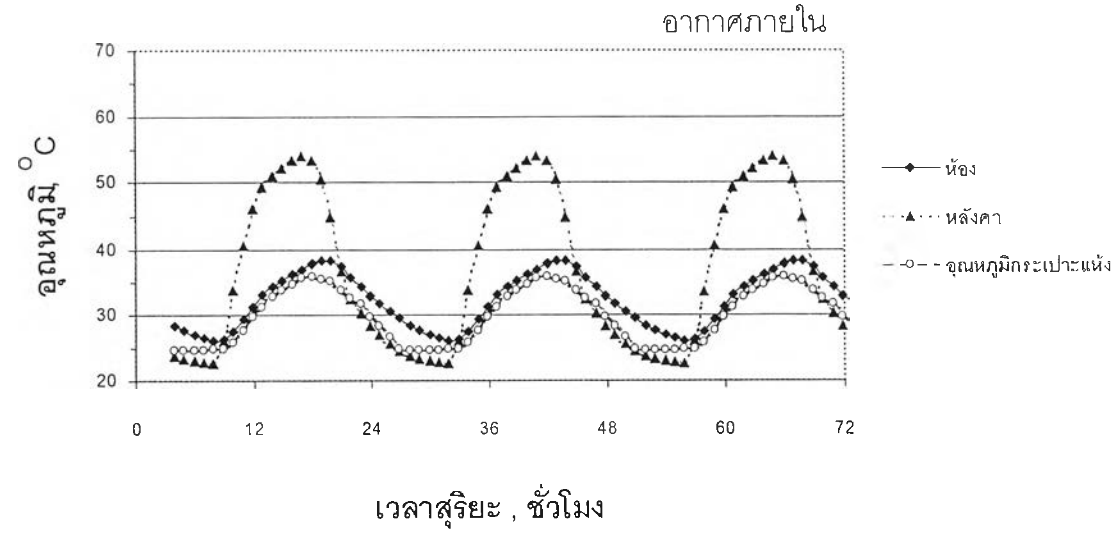




รูป ค.10 (ต่อ) อุณหภูมิของแต่ละผนังที่เวลาต่างๆ







รูป ค.10 (ต่อ) อุณหภูมิของแต่ละผนังที่เวลาต่างๆ

รายละเอียดทั้งหมดที่นำเสนอนี้แสดงภาพรวมของปริมาณความร้อนที่ส่วนต่างๆ ของอาคารได้รับเพื่อประโยชน์ในการพิจารณาถึงความสุขสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัย (นำเสนอไว้ในบทที่ 4) นอกจากนี้ยังแสดงถึง 1.ความสามารถของโมดูล TCAP_HBCompute ที่วิเคราะห์สมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารได้อย่างแม่นยำ 2.ศักยภาพของโมดูล TCAP_FlowAnalyse ที่วิเคราะห์ถึงอัตราการไหลของอากาศซึ่งสามารถเทียบเท่าได้กับโปรแกรมต้นแบบ และ 3.แนวโน้มของการคำนวณด้วยโปรแกรม TCAP ที่สอดคล้องกับความเป็นจริง เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าโปรแกรม TCAP มีความถูกต้องและทำให้มั่นใจในผลการวิเคราะห์ได้ในระดับหนึ่ง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอัครา กิจการเจริญสิน เกิดเมื่อวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2521 ที่เขตป้อมปราบ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2542