

บทที่ 2

ทฤษฎี

การทำ Energy Simulation

การประมาณค่าการใช้พลังงานสำหรับอาคารหลังหนึ่งๆ นั้นมีการพัฒนาวิธีการต่างๆ ขึ้นมามากมายและมีความสลับซับซ้อนที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ดี วิธีการเหล่านี้ก็สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ (1) space load (2) secondary equipment load และ (3) primary equipment energy requirements สำหรับในที่นี้คำว่า secondary จะหมายถึงอุปกรณ์ที่จ่ายตัวกลางสำหรับทำความร้อนความเย็น และ/หรือ การระบายอากาศ ไปสู่สถานที่ที่ต้องการจะปรับอากาศ ในขณะที่คำว่า primary หมายถึง อุปกรณ์ทำงานส่วนกลาง (central plant equipment) ที่ซึ่งใช้สำหรับแปลเปลี่ยนเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ หรือพลังงานไฟฟ้า ให้กลายเป็นความร้อนหรือความเย็น (heating or cooling effect) ตามต้องการ

การคำนวณค่า space load นั้นจะให้ค่าของพลังงานที่ซึ่งจะต้องเพิ่มหรือลดออกจากบริเวณพื้นที่เพื่อที่จะรักษาสภาพความสบายทางอุณหภูมิ (thermal comfort) เอาไว้

ในขั้นตอนถัดมาจึงทำการเปลี่ยนค่า space load ที่ได้มาจากขั้นตอนแรกให้กลายเป็นภาระ (load) ของอุปกรณ์ในชุด secondary system equipment ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการคิดค่าการสูญเสียพลังงานภายในห้องต่างๆ อันเป็นวิธีการเข้าถึงคำตอบอย่างง่าย ๆ หรืออาจใช้วิธีการที่ซับซ้อนกว่าเช่นวิธี Hour-by-hour simulation ก็ได้ ในขั้นตอนนี้จะต้องรวมเอาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการแจกจ่ายลมร้อนหรือลมเย็นในทุกรูปแบบ ของอุปกรณ์ในกลุ่ม secondary system เพื่อนำมาคำนวณค่าความต้องการพลังงานเช่น พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับการทำงานของพัดลม และพลังงานที่ปั๊มใช้ส่งน้ำร้อนและน้ำเย็นด้วย

การคำนวณในขั้นตอนที่สาม จะเปลี่ยนค่าภาระของอุปกรณ์ชุด primary equipment ให้กลายเป็นปริมาณเชื้อเพลิง และ พลังงานที่อุปกรณ์ชุดนี้ต้องการสำหรับจัดการกับภาระอันนี้ ในที่นี้

เราจะต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชุดนี้ทั้งในขณะที่ทำงานอย่างเต็มพิกัด และ ขณะทำงานแบบบางส่วน (full-load and part-load)

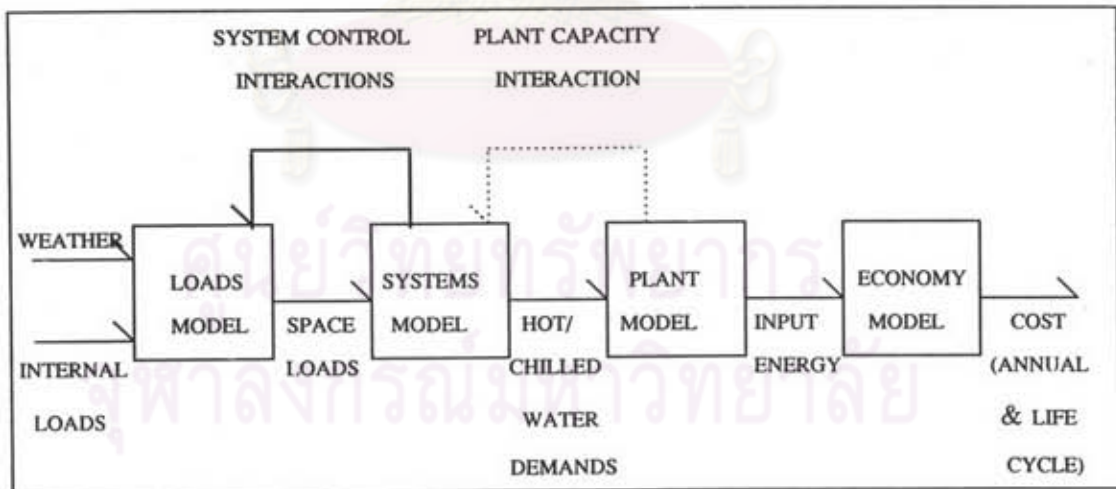
ในหลายๆครั้งการคำนวณทางพลังงานจะนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ด้วย ซึ่งจะเป็นการพิจารณาว่าการลงทุนกับสิ่งต่างๆ เหล่านี้จะเป็นผลดีทางเศรษฐศาสตร์หรือไม่ โดยจะเห็นว่าการคำนวณทางพลังงานนั้นสามารถบอกได้ถึงพลังงานที่อาคารต้องการใช้ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งทำให้การประมาณค่าใช้จ่ายที่เจ้าของอาคารจะต้องชำระแก่โรงงานไฟฟ้าก็เป็นเรื่องง่าย เมื่อพิจารณาพร้อมกับต้นทุนของอาคารและอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในอาคารแล้ว จะเป็นข้อมูลอย่างดีที่สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ได้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ที่ว่ามีวิธีการที่จะเข้าถึงคำตอบของปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับอาคารหนึ่งๆ นั้นมีอยู่หลายวิธี แม้ว่าในทุกๆ วิธีจะประกอบด้วยสามส่วนคือ (1) space load (2) secondary equipment load และ (3) primary equipment energy requirements ก็ตาม แต่ความซับซ้อนของโครงสร้างการคำนวณก็ยังคงแตกต่างกันอยู่อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งวิธีการต่างๆ เหล่านี้ถูกแบ่งออกตามความซับซ้อนของโครงสร้างการคำนวณเป็น สามประเภทด้วยกันคือ Single-measure methods, Simplified multiple-measure methods และ Detailed simulation methods

● Single-measure methods : เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการประมาณค่าการใช้พลังงานในบ้านพักอาศัยเท่านั้นเนื่องจากไม่มีความซับซ้อนเท่าใดนัก วิธีการในกลุ่ม single-measure method นี้จะต้องการข้อมูลการใช้พลังงานที่ผ่านมาจากอาคารแต่ละหลังที่จะทำการประมาณการใช้พลังงาน แต่สำหรับในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเหล่านี้สำหรับอาคารหลังอื่นๆ อาจใช้ข้อมูลจากอาคารหลังอื่นที่มีลักษณะคล้ายกันก็ได้ แต่ต้องมีการใช้งานอย่างระมัดระวังด้วย การใช้ค่าเฉลี่ยจากอาคารหลายๆ หลังในที่ดังต่างๆ กันอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการประมาณค่าการใช้พลังงานได้ ทั้งนี้เพราะผู้คนที่อาศัยอยู่ในท้องถิ่นที่ต่างกันย่อมมีพฤติกรรมการใช้พลังงานที่แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้สิ่งสำคัญที่ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการประมาณการใช้พลังงานจำเป็นจะต้องรับรู้ นั่นก็คือ การประมาณการใช้พลังงานจะให้ค่าแม่นยำกว่าหากช่วงเวลาที่นำมาคิดประมาณการใช้พลังงานนั้นมีช่วงเวลาที่ยาวนานกว่า ยกตัวอย่างเช่น การประมาณการใช้พลังงานในหนึ่งปีจะมีความแม่นยำมากกว่าการประมาณการใช้พลังงานในหนึ่งเดือน เป็นต้น ทั้งนี้เพราะการประมาณในระยะเวลาดังนั้น ค่าองค์ประกอบบางชนิดอาจจะไม่มีโอกาสได้นำเข้ามาสู่การพิจารณาก็เป็นได้ อันเป็นเหตุแห่งความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์คำตอบได้

● Simplified multiple-measure methods : แม้ว่าวิธีการคำนวณอย่างง่าย ๆ แบบ single-measure methods จะเหมาะสมกับอาคารที่พักอาศัยก็ตามที แต่ในบางครั้งการประมาณค่าอย่างง่าย ๆ นี้ก็อาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดครั้งใหญ่ได้ หากว่ามิได้มีการพิจารณา factor ที่สำคัญบางตัวซึ่งมีผลต่อการประมาณค่าการใช้พลังงานลงไปด้วย แต่ในขณะที่เดียวกันการประมาณค่าโดยวิธีคิดละเอียดคนั้นในบางครั้งก็จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายสูง และต้องการข้อมูลที่ยุ่งยากซับซ้อนรวมไปถึงอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ด้วย ดังนั้น simplified multiple-measure methods จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับการประมาณค่าการใช้พลังงานของอาคารขนาดกลางทั่วไป

● Detailed simulation methods : เมื่อจะใช้วิธีนี้ในการประมาณค่าการใช้พลังงานเราจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาคาร รวมถึงระบบพลังงานของมันไว้ แบบจำลองเหล่านี้จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่เกี่ยวข้องกันคือ (1) พฤติกรรมเชิงอุณหภูมิจากโครงสร้างอาคาร (the load model); (2) พฤติกรรมเชิงอุณหพลศาสตร์ของระบบจ่ายความร้อน/ความเย็น ของเครื่องปรับอากาศ (the secondary system model) และ (3) ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างภาระของอุปกรณ์ในชุด primary energy conversion equipment ต่อ พลังงานที่ตัวมันต้องการในการจัดการกับภาระอันนี้ (the plant model)



รูปที่ 2.1 Simplified Model for Detailed Simulation Method for Energy Estimation

รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งการทำงานพื้นฐานของแต่ละหน่วยหลักของระบบ control interaction ซึ่งจะแสดงให้เห็นข้อเท็จจริงที่ว่า ข้อจำกัดของความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิ

และ/หรือ ลักษณะรูปแบบในการควบคุมอุณหภูมิของระบบปรับอากาศมีผลต่อภาระของพื้นที่ (space load) นั่นก็คือระบบปรับอากาศจะยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้บ้างในช่วงแคบๆ อันหนึ่ง นอกจากนี้ขีดจำกัดของความสามารถ และ/หรือ รูปแบบในการควบคุมของ central plant ก็เป็นต้นเหตุของความเบี่ยงเบนของระบบ secondary system ซึ่งจะยังผลไปสู่ความเบี่ยงเบนของภาระของพื้นที่ (space load) ด้วย ซึ่งแสดงไว้ด้วยเส้นประในรูปที่ 2.1 ทั้งนี้เพราะแบบจำลองที่มีอยู่ในปัจจุบันยังไม่อาจคำนวณค่าในจุดนี้ได้ นอกจากนี้ในรูปที่ 2.1 ยังแสดงแบบจำลองทางเศรษฐศาสตร์ที่ซึ่งจะคำนวณมูลค่าของพลังงาน (และราคาต้นทุนในบางครั้ง) โดยยึดเอาจากตัวเลขของพลังงานที่ต้องใส่เข้าไปให้แก่ระบบ ดังนั้นเมื่อคิดรวมทั้งหมดแล้วแบบจำลองจะคำนวณค่าการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายสำหรับลักษณะอุณหภูมิอากาศและภาระภายในใดๆ ก็ตามที่ผู้ใช้ป้อนเข้ามา สำหรับวิธีการคำนวณแบบ detailed simulation methods นั้นมีอยู่สองวิธีที่นิยมใช้กันก็คือ Heat balance method และ Weighting factor method

Heat balance method อันเนื่องมาจากการกำหนดข้อสมมุติฐานสำหรับการคำนวณจำนวนน้อยช็อกกว่าวิธี Weighting factor method จึงทำให้วิธีการแบบ Heat balance method มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า ทั้งนี้เพราะวิธีการนี้ได้ถูกพัฒนามาโดยตรงจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (the First law of thermodynamics) และ หลักการของเมตริกซ์นั่นเอง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ค่อนข้างจะต้องใช้เวลาคำนวณที่ยาวนาน ยังผลให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง สิ่งสำคัญที่ควรรู้อีกอย่างหนึ่งก็คือวิธีการแบบ Weighting factor method ก็เป็นผลผลิตที่ถูกพัฒนามาจากวิธีการ Heat balance method นั่นเอง

วัตถุประสงค์ของวิธีการนี้ก็คือ การคำนวณค่าภาระความร้อน/ความเย็นสุทธิ/ความเย็นสุทธิ ของห้องในทันทีทันใด วิธีการนี้ก็คือการเขียนสมการสมดุลความร้อน (heat balance equation) สำหรับผนังทุกด้านของห้อง รวมกับอีกหนึ่งสมการของมวลอากาศภายในห้อง สมการชุดนี้จะนำมาแก้เพื่อหาค่าตอบของอุณหภูมิของผนังแต่ละด้านและของอากาศภายในห้อง หลังจากนั้นจึงนำอุณหภูมิผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณหาค่าภาระการพาความร้อนหรือความเย็น ซึ่งจะต้องถูกกำจัดให้หมดไปโดยเครื่องปรับอากาศ

เพื่อที่จะเขียนสมการสมดุลความร้อน ที่วางทั้งหมดในอาคารจะถูกมองว่าเป็นสิ่งซึ่งถูกปิดกั้นโดยผนังหลายๆ ชั้น กล่าวคือ ผนัง, พื้น, หน้าต่าง และ เพดาน และในทุกๆเวลา t พื้นผิว

ต่างๆ เหล่านี้จะถูกพิจารณาให้มีอุณหภูมิเดียวกันตลอดแผ่น ($T_{i,t}$) รวมทั้งมวลอากาศจะถูกมองว่ามีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั่วทั้งหมัดด้วย ($T_{a,t}$)

Weighting factor method ในกรณีของวิธีการ weighting factor method จะมีการทำงานแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนเพื่อที่จะหาค่าอุณหภูมิของอากาศ และ heat extraction rate ของห้อง หรือ ส่วนของอาคาร สำหรับสภาพการณ์หนึ่งๆ ในขั้นตอนแรกอุณหภูมิของห้องจะถูกกำหนดให้อยู่หนึ่งที่จุดใดจุดหนึ่ง แล้วจึงทำการพิจารณา heat gain ชนิดต่างๆ ในช่วงเวลาที่ t การคำนวณจะนำเอาค่าปัจจุบันและอดีตของ instantaneous heat gain (q_t, q_{t-1}, \dots), cooling load (Q_{t-1}, Q_{t-2}, \dots) และค่าถ่วงของ heat gain (the heat gain weighting factor) มาคำนวณรวมกันในลักษณะ

$$Q_t = v_0 q_t + v_1 q_{t-1} + \dots - w_1 Q_{t-1} - w_2 Q_{t-2} - \dots$$

โดยที่ Q_t คือ cooling load ในช่วงเวลาที่ t และ q_t คือ heat gain ในช่วงเวลาเดียวกัน

ในขั้นตอนที่สอง ค่า cooling load นี้จะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่า heat extraction rate และอุณหภูมิของอาคาร

การคำนวณ cooling load

การคำนวณค่า cooling load นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงสามวิธีที่นิยมใช้กันก็คือ CLTD/CLF procedure, Hour-by-hour method และ Heat balance equation

1. CLTD/CLF procedure เป็นวิธีการที่ใช้กันมานาน การคำนวณประกอบไปด้วยการพิจารณา heat gain ที่เข้ามาสู่พื้นที่โดยวิถีทางต่างๆ กัน เช่น จากการนำความร้อนผ่านผนัง, การนำความร้อนผ่านกระจกหน้าต่าง, จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดที่เกี่ยวกับการคำนวณ heat gain ชนิดต่างๆ กัน โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ สามารถหาได้จาก ASHRAE HANDBOOK (Fundamentals). บทที่ 26, 1981

ตารางที่ 2.1

Procedure for Calculating Space Design Cooling Load - Summary of Load Sources and Equations

Load Source	Equation
External	
Roof	$q = U \times A \times CLTD$
Wall	$q = U \times A \times CLTD$
Glass	
Conduction	$q = U \times A \times CLTD$
Solar	$q = A \times SC \times SHFG \times CLF$
Partitions,Ceilings,Floors	
	$q = U \times A \times TD$
Internal Lights	
	$q = INPUT \times CLF$
People	
Sensible	$q = No. \times Sens.H.G. \times CLF$
Latent	$q = No. \times Lat.H.G.$
Appliances	
Sensible	$q = HEATGAIN \times CLF$
Latent	$q = HEATGAIN$
Power	
	$q = HEATGAIN \times CLF$
Ventilation & Infiltration Air	
Sensible	$q = 1.232 \times L/s \times \Delta T$
Latent	$q = 3012 \times L/s \times \Delta W$
Total	$q = 4.334 \times L/s \times \Delta h$

2. Hour-by-hour method วิธีการนี้ยึดหลักการคำนวณพื้นฐาน 4 ชนิดด้วยกันคือ
- 2.1 heat gain ผ่านผนังภายนอกและหลังคาโดยใช้ transfer function
 - 2.2 heat gain ผ่านฉากกั้นภายใน, เพดาน และพื้นโดยใช้ transfer function
 - 2.3 เปลี่ยนค่า heat gain ที่ได้มาให้กลายเป็น cooling load ที่ถูกต้อง
 - 2.4 ขยายวิธีการออกไปสู่การคำนวณค่า heat extraction rate และอุณหภูมิของอากาศภายในห้อง

จะสังเกตเห็นว่าไม่มีการคำนวณใดๆ ที่กล่าวถึง (1) การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ (2) แหล่งความร้อนในพื้นที่ที่ทำการปรับอากาศ หรือ (3) การระบายและการรั่วไหลของอากาศ ทั้งนี้ เพราะการคำนวณค่าต่างๆ เหล่านี้จะใช้วิธีเดียวกันกับที่กล่าวไว้ใน CLTD/CLF procedure (ในตารางที่ 2.1) ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในการคำนวณนั้นได้มาจากการทดลอง และการใช้สมการ heat balance equation ทำการคำนวณออกมา ซึ่งสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

สมการ heat gain ผ่านหลังคาและผนัง

$$q_{e,\tau} = A \left[\sum_{n=0} b_n (t_{e,\tau-n\Delta}) - \sum_{n=1} d_n \frac{q_{e,\tau-n\Delta}}{A} - t_{rc} \sum_{n=0} c_n \right] \quad (2.1)$$

โดยที่

A = พื้นที่ภายในของหลังคาหรือผนัง, ตารางเมตร (ฟุต)

$q_{e,\tau}$ = heat gain ที่ผ่านจากพื้นผิวภายในของหลังคาหรือผนังเข้าสู่ห้อง, วัตต์ (Btu/h)

τ = เวลา, ชั่วโมง

Δ = ช่วงเวลา, ชั่วโมง

n = summation index

$t_{e,\tau-n\Delta}$ = sol-air temperatur ที่เวลา $\tau-n\Delta$, หน่วยเป็น °C (°F)

t_{rc} = อุณหภูมิของอากาศภายในห้องซึ่งกำหนดไว้ให้คงที่

a_n, b_n, c_n = transfer function coefficients (ตารางที่ 2.2)

ค่า transfer coefficients เหล่านี้ถูกคำนวณร่วมกันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกที่, สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในที่ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ผ่านผนังหรือหลังคา ในกรณีที่ชนิดของวัสดุที่เลือกมาไม่มีอยู่ในตารางที่ 2.2 ให้ใช้ค่าในตารางที่มีลักษณะคล้ายกับวัสดุที่เลือกมามากที่สุด และใช้ U-value ratio ปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ b และ c ไปด้วย

หลังจากได้ค่า heat gain มาแล้ว ก่อนที่จะนำไปคำนวณค่า cooling load จำเป็นจะต้องมีการปรับค่ากันเสียก่อน ทั้งนี้เพราะในความเป็นจริงนั้นจะมี heat gain บางส่วนสูญหายไปกับสิ่งแวดล้อม ค่าที่ปรับ (F_c) นี้จะขึ้นอยู่กับการนำความร้อนระหว่างอากาศภายในห้องและสิ่งแวดล้อม โดยค่าประมาณของ F_c คือ

$$F_c = 1 - 0.0116K_T \quad (2.2)$$

โดยที่ K_T คือ ค่าการนำความร้อนต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างอากาศภายในห้องกับสิ่งแวดล้อมในหน่วย $W / m^{\circ}C (Btu / h.ft.F)$ คือ

$$K_T = (1 / L_F)(U_w A_w + U_{ow} A_{ow} + U_c A_c) \quad (2.3)$$

โดยที่

L_F = ความยาวของผนังภายนอก, เมตร (ฟุต)

U = U-value ของโครงสร้างผนัง (ตัว w คือ หน้าต่าง, ow คือ กำแพงภายนอก, c คือ ระเบียง)

A = พื้นที่ของผนัง, ตารางเมตร (ฟุต)

สำหรับตัวเลข 0.0116 เป็นตัวเลขของหน่วยเมตริกซ์ ในกรณีของหน่วยอังกฤษจะต้องเปลี่ยนเป็น 0.02

วิธีที่เป็นที่ยอมรับสำหรับการคำนวณ cooling load นั้น เป็นวิธีการคำนวณที่พิจารณาถึงธรรมชาติของ heat gain และ heat extraction ของพื้นที่ที่สนใจ ในกรณีที่เรามีข้อมูลของ heat gain ในลักษณะที่ห่างกันเป็นช่วงๆ โดยแต่ละช่วงมีช่วงห่างของเวลาเท่าๆ กัน จะทำให้เราได้ค่า cooling load ออกมาในลักษณะ

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่าง Transfer function coefficients

No.	Construction ^a Description	Code No. of Layers	Coefficient b_n and d_n ^b						U	Σc_n		
			n=0	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5			n=6	
1	Roof terrace system	A0, C12, B1, B6, E2, E3, C5, E4, E5, E0	b	0.0000	.00008	.00048	.00039	.00006		0.062	.00101	
		d	1.0000	-1.730	.856	-.116	.002					
2	4-in. wood with 2-in. insulation	A0, E2, E3, B6, B9, E4, E5, E0	b	0.0000	.00000	.00000	.00016	.00018	.00006	.00000	0.064	.00042
		d	1.0000	-2.298	1.867	-.659	.103	-.006	.000			
3	2.5-in. wood with 2-in. insulation	A0, E2, E3, B6, B8, E4, E5, E0	b	0.0000	.00010	.00080	.00110	.00003		0.076	.00230	
		d	1.0000	-1.570	.842	-.150	.008	-.0001				
4	1-in. wood with 2-in. insulation	A0, E2, E3, B6, B7, E4, E5, E0	b	0.0000	.0234	.00630	.00140	.00000		0.083	.01120	
		d	1.0000	-1.086	.227	-.007	.00000					
5	4-in. wood with 1-in. insulation	A0, E2, E3, B5, B9, E4, E5, E0	b	0.0000	.00000	.00030	.00030	.00030	.0001		0.045	.00080
		d	1.0000	-2.221	-1.726	-.574	.084	-.005	.000			
6	2.5-in. wood with 1-in. insulation	A0, E2, E3, B6, B7, E4, E5, E0	b	0.0000	.00020	.00170	.0017	.0003		0.095	.00390	
		d	1.0000	-1.593	.750	-.121	-.006					
7	1-in. wood with 1-in. insulation	A0, E2, E3, B5, B7, E4, E5, E0	b	0.0000	.00820	.01030	.00140			0.115	.02020	
		d	1.0000	-1.005	.185	-.005						
8	8-in. l.w. concrete	A0, E2, E3, C16, E4, E5, E0	b	0.0000	.00002	.00046	.00133	.0008	.00011		0.092	.00271
		d	1.0000	-1.911	1.221	-.310	.030	-.001	.000			
9	6-in. l.w. concrete	A0, E2, E3, C15, E4, E5, E0	b	0.0000	.00040	.00340	.00360	.0007		0.109	.00810	
		d	1.0000	-1.490	.655	-.094	.004					
10	4-in. l.w. concrete	A0, E2, E3, C14, E4, E5, E0	b	0.0000	.00550	.01410	.00450	.0002		0.134	.02440	
		d	1.0000	-1.069	.267	-.014	.000					
11	6-in. h.w. concrete with 2-in. insulation	A0, E2, E3, B6, C13, E4, E5, E0	b	0.0000	.00015	.00076	.00050	.00005		0.083	.00146	
		d	1.0000	-1.456	.533	-.061	.001					
12	4-in. h.w. concrete with 2-in. insulation	A0, E2, E3, B6, C5, E4, E5, E0	b	0.0000	.00070	.00160	.00050			0.090	.00280	
		d	1.0000	-1.244	.238	-.013						

(จาก ASHRAE HANDBOOK Fundamentals. บทที่ 25, 1977)

(cooling load ที่เวลา τ)

$$Q_\tau = \sum_{i=1} (v_0 q_\tau + v_1 q_{\tau-\Delta} + v_2 q_{\tau-2\Delta} + \dots) - w_1 Q_{\tau-\Delta} - w_2 Q_{\tau-2\Delta} - \dots \quad (2.4)$$

สำหรับค่า v 's และ w 's ดูได้จากตารางที่ 2.4 และ 2.3 ตามลำดับ

ในขั้นตอนสุดท้าย จะทำการคำนวณค่า heat extraction rate และ อุณหภูมิของห้อง เป็นที่ทราบกันคืออยู่โดยทั่วไปแล้วว่า ในอาคารที่ได้รับการปรับสภาพอากาศ อุณหภูมิของอากาศจะ ส่ายไปมาอยู่ระหว่างจุดสมดุลอันหนึ่ง การคำนวณถึงความไม่เสถียรภาพของอุณหภูมินี้สามารถทำได้หากมีข้อมูลลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ปรับอากาศเพิ่มเติม ลักษณะการทำงานของเครื่องทำความเย็นนั้นสามารถประมาณได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรงทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$ER_\tau = W_\tau + St_{rc} \quad (2.5)$$

โดยที่

ER_τ = อัตราการนำความร้อนออกจากห้องที่เวลา τ

t_{rc} = อุณหภูมิของอากาศที่เวลา τ

W และ S = พารามิเตอร์ของลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ปรับอากาศ

S = $(ER_{\max} - ER_{\min})$ / ช่วงการส่ายของอุณหภูมิที่ยอมรับได้

W = $\frac{(ER_{\max} - ER_{\min})}{2} - St_{rc}^*$

t_{rc}^* = อุณหภูมิที่ตั้งไว้ที่เทอร์โมสแตทที่เวลา τ

ในขณะที่ heat extraction rate และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจะสัมพันธ์กัน ด้วย transfer function ในรูปแบบ

$$\sum_{i=0}^1 p_i (ER_{\tau-i\Delta} - Q_{\tau-i\Delta}) = \sum_{i=0}^2 g_i (t_{rc} - t_{r,\tau-i\Delta}) \quad (2.6)$$

ค่า p และ g เป็น สัมประสิทธิ์ของ transfer function และ Q คือ cooling load ของห้องที่ทำการพิจารณา

ตารางที่ 2.3

The Value of w_1 for Different Room Air Circulation Rates and Envelope Construction

Room Envelope Construction*	50.8-mm (2-in.) Wood Floor	76.2-mm (3-in.) Concrete Floor	152.4-mm (6-in.) Concrete Floor	203.2-mm (8-in.) Concrete Floor	304.8-mm (12-in.) Concrete Floor	Room Air** Circulation & Types of Supply and Return
Specific Mass, kg/m ² (lb/ft ²) of floor area	48.82 (10)	195.28 (40)	366.15 (75)	585.84 (120)	781.12 (160)	
	-0.88	-0.92	-0.95	-0.97	-0.98	Low
	-0.84	-0.90	-0.94	-0.96	-0.97	Medium
	-0.81	-0.88	-0.93	-0.95	-0.97	High
	-0.77	-0.85	-0.92	-0.95	-0.97	Very high
	-0.73	-0.83	-0.91	-0.94	-0.96	

*Floor covered with carpet and rubber pad; for a floor covered only with floor tile take next w_1 value down the column.
 **Low: Low ventilation rate—minimum required to cope with cooling load due to lights and occupants in interior zone. Supply through floor, wall, or ceiling diffuser. Ceiling space not vented and $h = 2.27 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (0.4 Btu/h·ft²·°F) (where h = inside surface convection coefficient used in calculation of w_1 value).
 Medium: Medium ventilation rate, supply through floor, wall or ceiling diffuser. Ceiling space not vented and $h = 3.41 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (0.6 Btu/h·ft²·°F).
 High: Room air circulation induced by primary air of induction unit or by fan coil unit. Return through ceiling space and $h = 4.54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (0.8 Btu/h·ft²·°F).
 Very high: High room circulation used to minimize temperature gradients in a room. Return through ceiling space and $h = 6.81 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (1.2 Btu/h·ft²·°F).

(จาก ASHRAE HANDBOOK Fundamentals, บทที่ 26, 1981)

ตารางที่ 2.4 Coefficients of Room Transfer Functions^a

Heat Gain Component	Room Envelope Construction ^b	τ_0	τ_1 Dimensionless	τ_2
Solar heat gain through glass ^c with no interior shading, and heat generated by equipment and people which is dissipated by radiation	Light	0.224	$-1+w_1-\tau_0$	0.0
	Medium	0.197	$-1+w_1-\tau_0$	0.0
	Heavy	0.187	$-1+w_1-\tau_0$	0.0
conduction heat gain through exterior walls, roofs, partitions and doors, and windows with blinds or drapes	Light	0.703	$-1+w_1-\tau_0$	0.0
	Medium	0.681	$-1+w_1-\tau_0$	0.0
	Heavy	0.676	$-1+w_1-\tau_0$	0.0
Heat generated by lights ^d	Light	0.0	"a" in Table 15	$-1+w_1-\tau_1$
	Medium	0.0	"a" in Table 15	$-1+w_1-\tau_1$
	Heavy	0.0	"a" in Table 15	$-1+w_1-\tau_1$
Heat generated by equipment and people which is dissipated by convection and energy gain due to ventilation and infiltration air	Light	1.0	0.0	0.0
	Medium	1.0	0.0	0.0
	Heavy	1.0	0.0	0.0

^aThe transfer function coefficients in this table were calculated by procedures outlined in Ref 23, and are applicable for cases where all heat gain energy eventually appears as cooling load. The computer program used was developed at the National Research Council of Canada, Division of Building Research.

^bThe designations *Light, Medium, and Heavy* denote:

Light construction: frame exterior wall, 50.8-mm (2-in.) concrete floor slab, approximately 146 kg (30 lb) of material/m² (ft²) of floor area.

Medium construction: 101.6-mm (4-in.) concrete exterior wall, 101.6-mm (4-in.) concrete floor slab, approximately 341 kg (70 lb) of building material/m² (ft²) of floor area.

Heavy construction: 152.4-mm (6-in.) concrete exterior wall, 152.4-mm (6-in.) concrete floor slab, approximately 635 kg (130 lb) of building material/m² (ft²) of floor area.

For all cases, the room was assumed furnished.

^cThe coefficients of the transfer function that relate room cooling load to solar heat gain through glass depend on where the solar energy is absorbed. If the window is shaded by an inside blind or curtain, most of the solar energy is absorbed by the shade, and is transferred to the room by convection and long-wave radiation in about the same proportion as the heat gain through walls and roofs. Thus, heat gain through windows with inside shading devices can be combined with wall and roof heat gain and converted to cooling load using the transfer function for heat gain through walls.

^dIf ventilating air is exhausted through the space above the ceiling, it removes some heat from the lights before it enters the room. This heat is a load on the air-conditioning plant if the air is recirculated, even though it is not part of the heat gain of the room. The percent of heat gain appearing in the room depends on the type of lighting fixture, its mounting, and the exhaust air flow.

(จาก ASHRAE HANDBOOK Fundamentals, บทที่ 26, 1981)

ตารางที่ 2.5 Normalized Coefficients of Space Air Transfer Functions^a

Room Envelope Construction ^b	ξ_0^*	ξ_1^* W/(m ² ·K)	ξ_2^*	p_0 Dimensionless	p_1
Light	+9.54	-9.82	+0.28	1.0	-0.82
Medium	+10.28	-10.73	+0.45	1.0	-0.87
Heavy	+10.50	-11.07	+0.57	1.0	-0.93

^aFor simplified procedure for calculating space air transfer function coefficients, see ASHRAE (1975).

^bThe designations *Light, Medium, and Heavy* denote the same meanings as those footnoted for Table 25.

(จาก ASHRAE HANDBOOK Fundamentals, บทที่ 26, 1981)

เพื่อที่จะได้ค่า p และ g จะต้องทำดังนี้

(1) เลือกค่า $p_0, p_1, g_0^*, g_1^*, g_2^*$ จากตารางที่ 2.5

(2) เนื่องจากค่าจากตารางที่ 2.5 นั้นยังมีได้คิดรวมถึงการสูญเสียความร้อนออกไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก และเป็นการคิดค่าเหล่านี้ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย ดังนั้นจึงต้องทำการปรับค่า โดยใช้ค่า conductance K_T , area A , ventilation rate V_r และ infiltration rate VI_r L/s (cfm) ให้เป็น

$$g_{0,r} = g_0^* A + p_0 [K_T + 1.232(V_r + VI_r)] \quad (2.7)$$

$$g_{1,r} = g_1^* A + p_1 [K_T + 1.232(V_{r-1\Delta} + VI_{r-1\Delta})] \quad (2.8)$$

$$g_{2,r} = g_2^* A \quad (2.9)$$

สำหรับ English unit

$$g_{0,r} = g_0^* A + p_0 [K_T + 1.10(V_r + VI_r)] \quad (2.10)$$

$$g_{1,r} = g_1^* A + p_1 [K_T + 1.10(V_{r-1\Delta} + VI_{r-1\Delta})] \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) จะได้ว่า

$$ER = \frac{g_0}{S + g_0} W_r + \frac{S}{S + g_0} I_r \quad (2.12)$$

โดยที่

$$I_r = t_{rc} \sum_{i=1}^2 g_i - \sum_{i=1}^2 g_i (t_{r,\tau-i\Delta} + 17.77) + \sum_{i=1}^l p_i (Q_{\tau-i\Delta}) - \sum_{i=1}^l p_i (ER_{\tau-i\Delta})$$

สำหรับในกรณีที่ ค่า ER ที่คำนวณได้มีค่าสูงเกินกว่าค่า ER_{\max} หรือต่ำกว่าค่า ER_{\min} ค่า ER นั้นจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ER_{\max} หรือ ER_{\min} ตามแต่กรณีตามลำดับ และในหลังจากนั้นจะต้องคำนวณหาค่า t_{rc} อุณหภูมิห้องที่ชั่วโมงต่างๆจากสมการ

$$t_{rc} = [(1/g_0)(I_r - ER_r) - 17.77] \quad (2.13)$$

ในกรณีหน่วยอังกฤษ ตัวเลข 17.77 จะถูกตัดออกไป

2. Heat Balance Equation การคิดคำนวณในรูปแบบนี้จะตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า อุณหภูมิของผนังแต่ละด้านจะเท่ากันตลอดทั่วทั้งแผ่น รวมทั้ง อุณหภูมิของมวลอากาศภายในห้อง จะต้องเท่ากันด้วย ดังนั้นที่ผนังด้านที่ i ณ เวลา t สมการสมดุลความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ก็คือ

$$q_{i,t} = h_i(T_{a,t} - T_{i,t}) + \sum_{k=1}^n g_{i,k}(T_{k,t} - T_{i,t}) + R_i \quad (2.14)$$

พจน์แรกทางขวาคือการพาความร้อน พจน์ที่สองคือการแลกเปลี่ยนทางความร้อน long wave และ พจน์สุดท้ายคือการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อน short wave

สำหรับค่า $q_{i,t}$ นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้คือ

$$\begin{aligned} q_{i,t} &= \sum_{j=0}^m X_j T_{i,t-i} - \sum_{j=0}^m Y_j T_{0i,t-j} + CRq_{i,t-1} \\ &= X_0 T_{i,t} + \sum_{j=1}^m X_j T_{i,t-i} - \sum_{j=0}^m Y_j T_{0i,t-j} + CRq_{i,t-1} \end{aligned} \quad (2.15)$$

อันเป็นรูปของการนำความร้อนผ่านผนังกำแพงของอาคาร ร่วมกับ ความร้อนสะสมในมวลกำแพงของอาคาร แล้วนำมาปรับแก้ไขด้วย transfer function

เมื่อนำสมการที่ (2.14) มารวมกับสมการที่ (2.15) จะได้

$$(X_0 + h_i + \sum_{k=1}^m g_{i,k})T_{i,t} - \sum_{k=1}^m g_{i,k}T_{k,t} - h_i T_{a,t} = -\sum_{j=1}^m X_j T_{i,t-j} + \sum_{j=0}^m Y_j T_{0j,t-j} + CRq_{i,t-1} + R_i \quad (2.16)$$

ซึ่งจะทำให้เราได้สมการออกมา n ชุด นอกจากนี้ยังมีสมการของมวลอากาศภายในห้องอีกหนึ่งสมการ คือ

$$\sum_{j=0}^n S_j h_j (T_{j,t} - T_{a,t}) + m_1 c_p (T_{0a,t} - T_{a,t}) + QI_t + QS_t = 0 \quad (2.17)$$

พจน์แรกทางซ้ายมือของสมการคือ การพาความร้อน พจน์ที่สองแทนการระบายอากาศ คือ ความร้อนของวัตถุภายในห้องในรูปแบบการพาความร้อน และ คือ อัตราของการใส่พลังงานเข้าไป หรือ นำออกมา โดยเครื่องปรับอากาศ ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\sum_{j=1}^n S_j h_j (T_{j,t} - T_{a,t}) - m_1 c_p (T_{a,t}) = -m_1 c_p T_{0a,t} - QI_t - QS_t \quad (2.18)$$

ท้ายที่สุดจะทำให้ได้ชุดของสมการ $n+1$ ชุด ในรูปของเมทริกซ์ ดังนี้

$$AT_t = B \quad (2.19)$$

โดยที่ ค่าองค์ประกอบของเมทริกซ์ A เป็น

diagonal

$$a_{i,i} = X_0 + h_i + \sum_{k=1}^n q_k \quad ; i = 1, n$$

$$a_{n+1,n+1} = -\left(\sum_{k=1}^n S_k h_k + m_1 C_p\right)$$

off-diagonal

$$a_{i,j} = -g_{i,j} \quad ; i, j = 1, n$$

$$a_{i,n+1} = -h_i \quad ; i = 1, n$$

$$a_{n+1,i} = S_i h_i \quad ; i = 1, n$$

สำหรับ องค์ประกอบของเมทริกซ์ B ก็คือพจน์ทางขวามือของสมการที่ (2.16) และ

(2.18) นั่นเอง

การคำนวณค่า Heatgain ผ่านกรอบอาคารโดยใช้ Response factor

สืบเนื่องมาจากการคำนวณค่า Heatgain ผ่านกรอบของห้องโดยวิธี Transfer Function Method (รวมถึงการคำนวณ Heatload โดยวิธี CLTD) จำเป็นต้องยึดติดกับค่าคงที่ต่างๆ ในตารางที่ระบุไว้ใน ASHRAE Handbook (Fundamentals). บทที่ 25, 1977 ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานวิธีการต่างๆ เหล่านี้ไม่เกิดความคล่องตัวในการทำงาน ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการคำนวณค่าภาระความร้อนเหล่านี้ จึงจำเป็นต้องมีส่วนการคำนวณค่าคงตัวเหล่านี้ออกมาได้เองโดยไม่ต้องพึ่งพิงฐานข้อมูลจากตารางใดๆ

การสร้างชุดสมการพร้อมสัมประสิทธิ์ เพื่อทำการคำนวณค่าภาระความร้อนนั้น เริ่มต้นจากสมการเชิงอนุพันธ์ของการนำความร้อนในหนึ่งมิติสำหรับวัสดุเนื้อเดียว คือ

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (2.20)$$

where

x = displacement

t = time

T = temperature

α = diffusivity

และการไหลของสมการความร้อน

$$q(x,t) = -k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \quad (2.21)$$

where

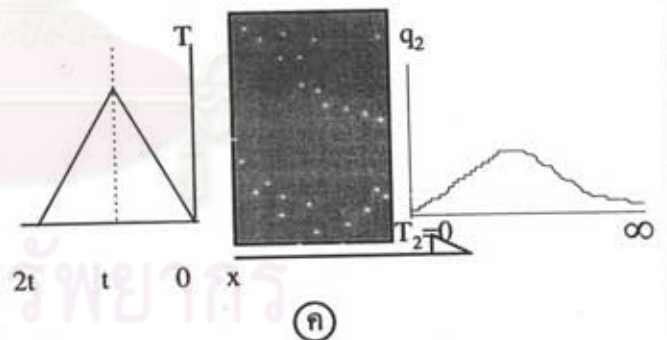
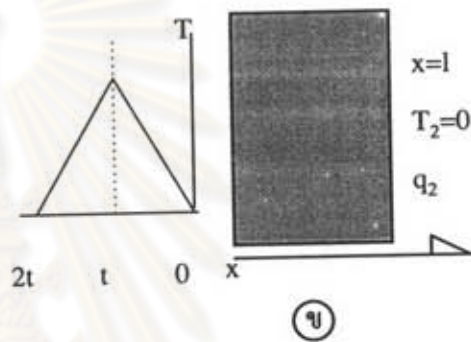
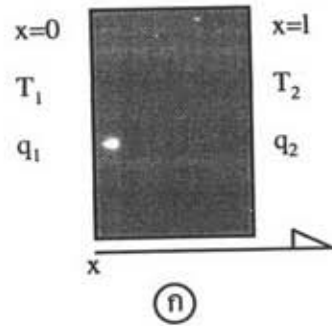
q = heat flux

k = conductivity

พิจารณาภาพตัดก้ำแพง ดังรูป 2.2ก
surface 1 คือ ผิวค้ำนอกของห้อง
surface 2 คือ ผิวค้ำในของห้อง

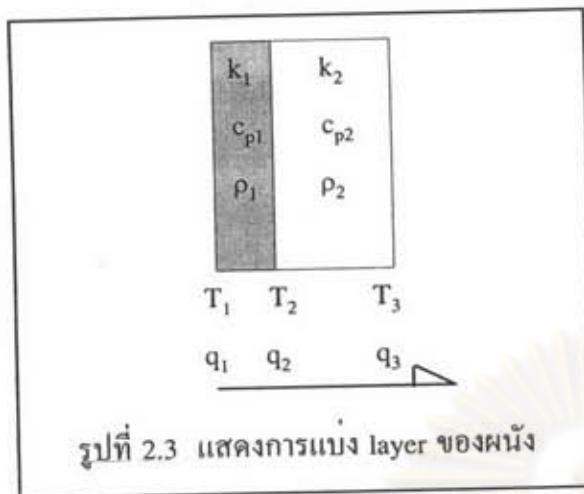
เพื่อที่จะพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้น
จาก pulse รูปสามเหลี่ยมสูง 1 หน่วย
ของอุณหภูมิภายนอกอาคาร โดย
กำหนดให้อุณหภูมิภายในเท่ากับศูนย์

จากนั้นจึงคำนวณค่าความร้อนที่ไหล
ผ่านเข้าไปทางค้ำ surface 2



รูปที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของ pulse ของอุณหภูมิหนึ่ง
หน่วยที่มีผลต่อ heatgain ที่ไหลเข้าสู่ห้อง

การคำนวณเพื่อหาค่า Heatgain (q_2) นั้น สามารถทำได้หลายวิธีแต่ในที่นี้จะใช้วิธี Finite Element Method เนื่องจากเป็นวิธีเชิงเลขจึงเหมาะสมกับการโปรแกรมลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการพัฒนาไปสู่การคำนวณค่า Heatgain สำหรับกรอบอาคารแบบ multilayer ได้ด้วย



รูปแบบการคำนวณ สำหรับการคำนวณค่า Heatgain โดยวิธี Finite Element Method เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} C_1 + 2k_1\Delta t & -2k_1\Delta t & 0 \\ -2k_1\Delta t & C_1 + 2k_1\Delta t + C_2 + 2k_2\Delta t & -2k_2\Delta t \\ 0 & -2k_2\Delta t & C_2 + 2k_2\Delta t \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix}_{n+1} = \begin{Bmatrix} C_1(T_1)_n + 2\Delta t(q_1)_{n+1} \\ C_1(T_2)_n + C_2(T_2)_n \\ C_3(T_3)_n + 2\Delta t(q_3)_{n+1} \end{Bmatrix}$$

---- (2.22)

where

$$C = \rho C_p L$$

$$k = k / L$$

T = temperature

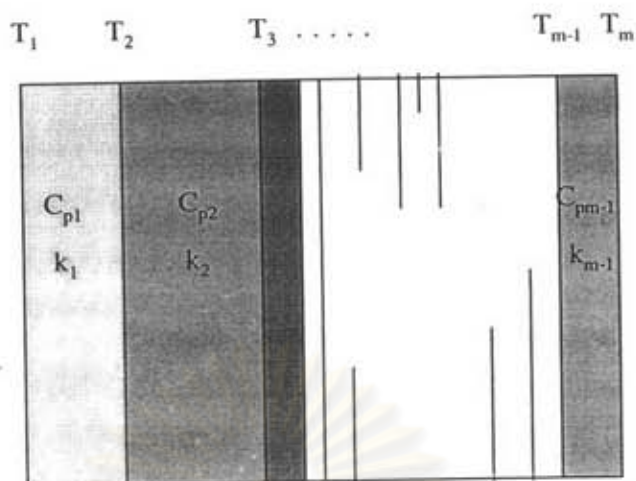
q = heat flux per unit area

n = time (n)

(รายละเอียดการพิสูจน์สมการชุดนี้จะไม่นำมากล่าวถึง หากแต่ผู้สนใจจะสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก ปราโมทย์ เคชะอำไพ. (ร.ศ. ค.ร.). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. บทที่ 8, 2537)

ในบางครั้งเราจำเป็นต้องเลือกผนังออกเป็นแผ่นๆ (multilayer) เพื่อนำมาคำนวณความจำเป็นในการเลือกผนังออกเป็นแผ่นหลายๆ แผ่นนั้นเป็นผลมาจาก

1. โครงสร้างของผนังประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด จึงมีค่า C_p , ρ และ k ต่างกัน ดังเช่นในรูปประกอบข้างต้น
2. ขนาดความหนาของผนังมากเกินไป ทำให้ได้ element ที่หยาบ ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณโดยวิธีการ Finite Element Method มีความคลาดเคลื่อนได้ (อันเป็นลักษณะเฉพาะของวิธีเชิงเลข)

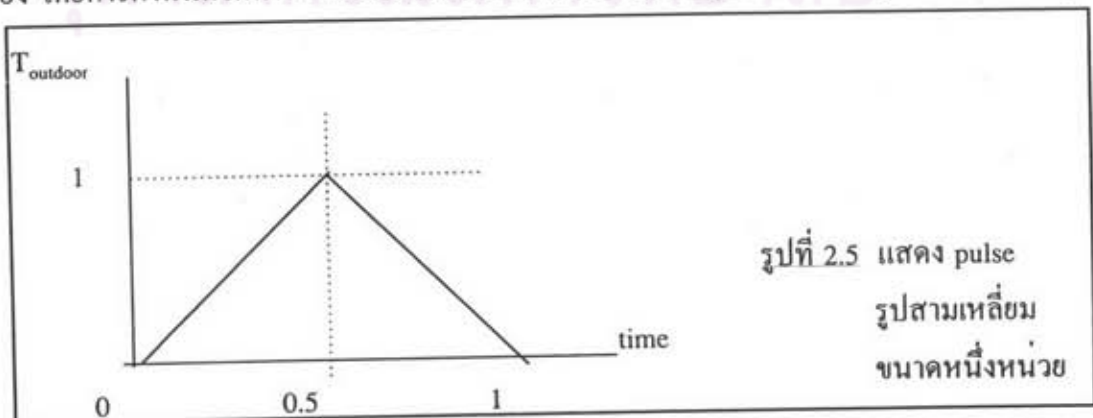


รูปที่ 2.4 Multi-layer Wall

$$\begin{bmatrix} C_1 + 2k_1 \Delta t & -2k_1 \Delta t & 0 & \dots & \dots \\ -2k_1 \Delta t & C_1 + 2k_1 \Delta t + C_2 + 2k_2 \Delta t & -2k_2 \Delta t & \dots & \dots \\ 0 & -2k_2 \Delta t & C_2 + 2k_2 \Delta t + C_3 + 2k_3 \Delta t & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & C_{m-1} + 2k_{m-1} \Delta t \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_m \end{bmatrix}_{n+1} = \begin{bmatrix} C_1(T_1)_n + 2\Delta t(q_1)_{n+1} \\ C_1(T_2)_n + C_2(T_2)_n \\ C_3(T_3)_n + C_4(T_3)_n \\ \vdots \\ C_{m-1}(T_m)_n + 2\Delta t(q_m)_{n+1} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

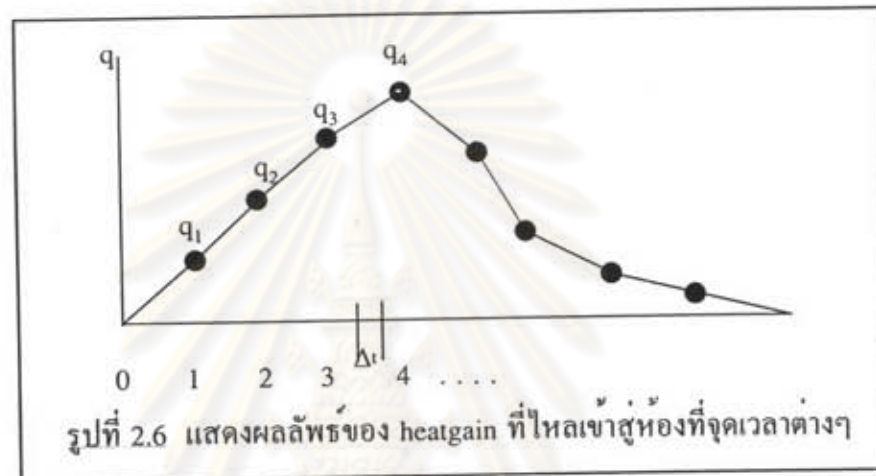
หลังจากได้ชุดสมการ Finite Element Method แล้ว จึงทำการคำนวณค่า q'' ที่ผิวด้านใน
ห้อง โดยการกำหนดให้ค่า T ภายนอกห้องมีลักษณะเป็น pulse รูปสามเหลี่ยมสูงหนึ่งหน่วยดังรูป



รูปที่ 2.5 แสดง pulse
รูปสามเหลี่ยม
ขนาดหนึ่งหน่วย

สำหรับเวลาที่ 0, 0.5, 1 นั้นสามารถกำหนดให้เป็นหน่วยเวลาใดๆ ก็ได้ แต่ในที่นี้จะใช้เป็นหน่วยชั่วโมง เนื่องจากเหมาะสมกับข้อมูลอากาศที่จะมีการเก็บสถิติไว้ในรูปแบบของอุณหภูมิในชั่วโมงต่างๆ อยู่แล้ว และนอกจากนี้ช่วงเวลา 1 ชั่วโมงก็มีความละเอียดและแม่นยำในการใช้งานอย่างพอเพียงแล้ว (อ้างอิง ASHRAE Handbook fundamentals. chp.25, 1997)

ผลลัพธ์ q ที่ผ่านเข้ามาที่ผิวด้านในห้องจะอยู่ในรูปของ q ที่เวลาต่างๆ กัน ดังรูป 2.6



โดยที่ $q_{t=1}$ หาได้จากชุดสมการ Finite Element Method และ constraints ต่างๆ คือ

$$T_{\text{outdoor}}(t) = t \quad \text{และ}$$

$$T(x,t=0) = 0$$

Δt = ค่าของช่วงเวลาเล็กๆ ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิด convergence ในชุดสมการของ Finite Element ได้

$q_{t=2}$ หาได้จากชุดสมการ Finite Element Method และ constraints ต่างๆ คือ

$$T_{\text{outdoor}}(t) = 1-(t-1) \quad \text{และ}$$

$$T(x,t=0) = T(x,t=1) \quad \text{ที่ได้จากช่วงเวลาแรก}$$

$q_{t=3}$ หาได้จากชุดสมการ Finite Element Method และ constraints ต่างๆ คือ

$$T_{\text{outdoor}}(t) = 0 \quad \text{และ}$$

$$T(x,t=0) = T(x,t=2) \quad \text{ที่ได้จากช่วงเวลาที่สอง}$$

$q_{t=4, 5, 6, \dots}$ ได้มาในลักษณะเดียวกับ $q_{t=3}$

การ convergence ของคำตอบจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$q_{t=1} + q_{t=2} + q_{t=3} + \dots + q_{t=n} = \sum q = U \text{ (overall conductivity)} \quad (2.24)$$

หรือกำหนดใหม่เป็น $a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n = \sum a = U \text{ (overall conductivity)} \quad (2.25)$

(สำหรับการคำนวณในคอมพิวเตอร์จะใช้ที่ประมาณ $\sum a = 0.99$ หรือ 1.01 ของ U)

ในกรณี pulse ของอุณหภูมิภายนอกมีขนาดเท่ากับ T_o หน่วย จะได้ Heatgain ในชั่วโมงต่างๆ เป็นดังนี้

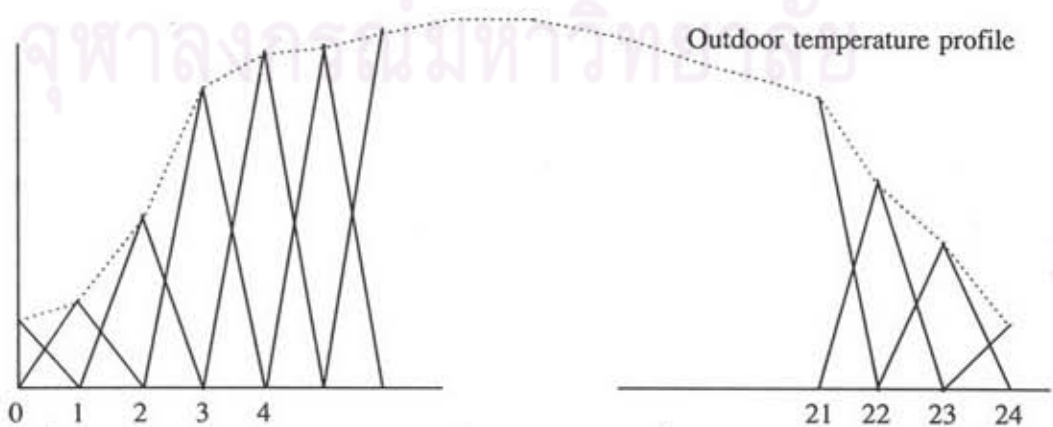
ที่ชั่วโมงที่ 1	Heatgain =	$a_1 T_o$	
2	Heatgain =	$a_2 T_o$	
3	Heatgain =	$a_3 T_o$	และในทำนองเดียวกัน

สำหรับผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มลดอุณหภูมิภายในห้องก็สามารถทำได้โดยวิธีคล้ายกันกับวิธีข้างต้น ซึ่งท้ายที่สุดแล้วก็จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็น b_1, b_2, \dots แทน a_1, a_2, \dots

ดังนั้น Heatgain ที่ไหลเข้าสู่ห้องจึงมีค่าเท่ากับผลรวมของผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มลดอุณหภูมิทั้งภายนอกและภายในนั่นเอง

$$q_{t=c} = a_c T_o + b_c T_i \quad (2.26)$$

สำหรับการคำนวณที่ใช้ข้อมูลอากาศในลักษณะ อุณหภูมิในแต่ละชั่วโมง จะได้ว่า ในหนึ่งวันจะมี pulse ของอุณหภูมิรูปสามเหลี่ยมจำนวน 24 ชุดเข้ากระทำกับผนังด้วยระยะเวลาห่างกัน 1 ชั่วโมงไล่กันไป ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการ superposition ของ pulse รูปสามเหลี่ยมของอุณหภูมิ ตลอด 24 ชั่วโมง

ฉะนั้นใน แต่ละชั่วโมงจะมี pulse ของอุณหภูมิมากกว่า 1 ชุดที่จะเข้ามามีผลต่อค่า Heatgain ของผนัง เช่นในกรณีของ Heatgain ในชั่วโมงที่ 5 จะได้อ่า Heatgain คือ

$$q_{t=5} = (a_1 T_5 + a_2 T_4 + a_3 T_3 + a_4 T_2 + a_5 T_1 + a_6 T_0 + a_7 T_{-1} + \dots + a_n T_{(6-n)}) + (b_1 T_{i5} + b_2 T_{i4} + b_3 T_{i3} + \dots + b_n T_{i(6-n)})$$

โดยที่ในการคำนวณโดยทั่วไปจะกำหนดให้ T_i คงที่ไว้ก่อน (แล้วจึงนำมาปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับ schedule ในภายหลัง) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned} q_{t=5} &= \sum_{i=1}^n a_i T_{(6-i)} + T_i \sum_{i=1}^n b_i \\ &= \sum_{i=1}^n a_i T_{(6-i)} + T_i \times U \end{aligned} \quad (2.26)$$

โดยที่ $T_0 = T_{24}$ ของวันวาน
 $T_{-1} = T_{23}$ ของวันวาน และในทำนองเดียวกัน

ในบางครั้งเราอาจใช้ $T_0 = T_{24}$ ของวันเดียวกันก็ได้ ในรูปแบบเดียวกันกับการคำนวณแบบ Transfer Function Method ซึ่งการกระทำเหล่านี้จะทำให้เราสามารถใช้อำนาจเพียง 24 ตัวเท่านั้นในการคำนวณ Heatgain ในแต่ละชั่วโมงของวันนั้นๆ

ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับงานวิศวกรรมในครั้งนี จะเลือกใช้วิธีของ Response Factor ในการคำนวณค่า Heatgain ผ่านผนังอาคารซึ่งจะทำให้โปรแกรมไม่ติดอยู่กับตารางชนิดของกำแพงต่างๆ (ตาราง CLTD สำหรับวิธี CLTD/CLF และ ตารางที่ 2.2 สำหรับวิธี TFM) และผู้ใช้สามารถกำหนด layer ของผนัง หรือหลังคาได้เองโดยอิสระ

ต่อจากนั้นจึงใช้วิธี Weighting Factor Method ในการปรับค่า Heatgain ให้กลายเป็นภาระความร้อน และ โหลดความร้อนของชุดอุปกรณ์ทำความเย็นในที่สุด ภาคผนวก จ ท้ายหนังสือฉบับนี้ได้นำเอาผลลัพธ์ที่เกี่ยวกับภาระความร้อนของอาคารซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ กัน 3 แบบ คือ CLTD/CLF, TFM และ Response Factor Method (Testing algorithm) ผลลัพธ์นั้นได้แก่ CLTD ของวัสดุชนิดเดียวที่แปรเปลี่ยนไปตามทิศทาง และ เดือนต่างๆ , CLTD

ของวัสดุสามชนิดแปรเปลี่ยนไปตามทิศทาง และ เดือนต่างๆ และ ค่า solar cooling load (SCL) ของกระจกมาตรฐาน (Double-strength sheet glass DSA) แปรเปลี่ยนไปตามทิศทาง และ เดือนต่างๆ

ผลลัพธ์ที่ได้มาแสดงให้เห็นว่า วิธีของ Reponse Factor ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับวิธี TFM มาก แต่วิธี CLTD จะให้ผลต่างออกไป ทั้งนี้เพราะการคำนวณแบบ Response Factor และ TFM นั้นมีลักษณะเป็นการคำนวณแบบ computation ซึ่งได้พัฒนามาจากสมการแม่นยำทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกัน และ ทั้งสองวิธีการยังให้ความสำคัญกับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำผนังและหลังคา เฉพาะแบบอีกด้วย ต่างจากวิธี CLTD/CLF ซึ่งเป็นข้อมูลจากตารางที่มีการแบ่งชนิดของกำแพงไว้อย่างหยาบๆ

การคำนวณค่า solar heatgain

การคำนวณค่า solar heatgain คือการพิจารณาค่าอัตราความร้อนที่เกิดจากแสงแดดไหลผ่านกรอบอาคารที่เป็นกระจกเข้าสู่ตัวอาคาร แสงแดดที่ทำให้เกิดความร้อนนี้ถูกแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ Direct normal irradiation (I_{DN}) อันเป็นแสงในส่วนที่ถูกส่งมาโดยตรงจากดวงอาทิตย์ และ Diffused irradiation (I_d) เป็นส่วนของแสงที่สะท้อนจากสิ่งแวดล้อมก่อนเข้าสู่ตัวอาคาร การคำนวณค่าความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่กระจกหนึ่งหน่วยของอาคารสามารถใช้สมการที่ 2.27 คำนวณได้โดยตรง

$$\text{Solar Heat Gain}' (\text{SHG}') = I_{DN} \cdot \cos\theta + I_d \quad (2.27)$$

โดยที่ $\cos\theta$ คือค่าโคไซน์ของมุมตกกระทบของรังสีแสงแดดที่กระทำกับระนาบของผิวผนัง สามารถคำนวณค่า $\cos\theta$ ได้จากชุดสมการที่ 2.28 ถึง 2.32

$$\sin\beta = \cos L \cdot \cos\delta \cdot \cos H + \sin L \cdot \sin\delta \quad (2.28)$$

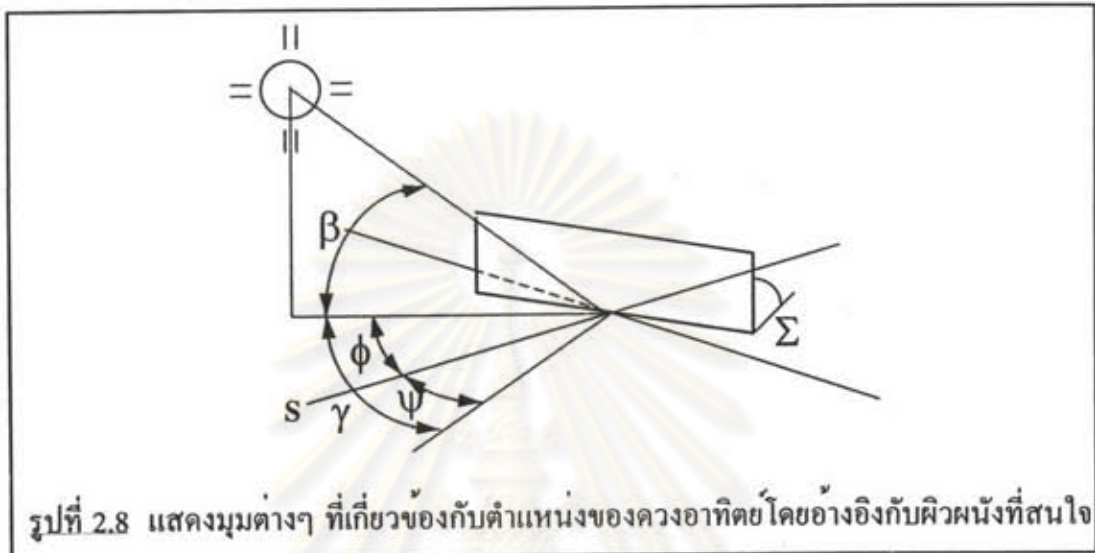
$$\cos\phi = (\sin\beta \cdot \sin L - \sin\delta) / (\cos\beta \cdot \cos L) \quad (2.29)$$

$$H = 0.25(\text{No. of minutes from solar noon}) \quad (2.30)$$

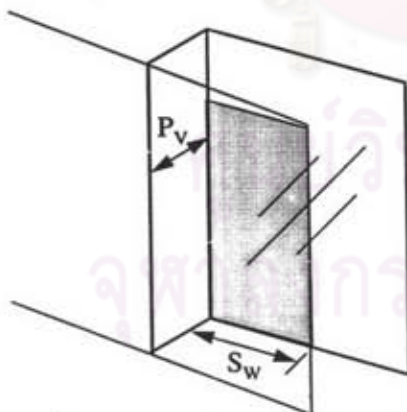
$$\text{No. of minutes from solar noon} = (\text{Equation of Time}) + 4(\text{LSM-LON}) \quad (2.31)$$

$$\cos\theta = \cos\beta \cdot \cos\gamma \cdot \sin\Sigma + \sin\beta \cdot \cos\Sigma \quad (2.32)$$

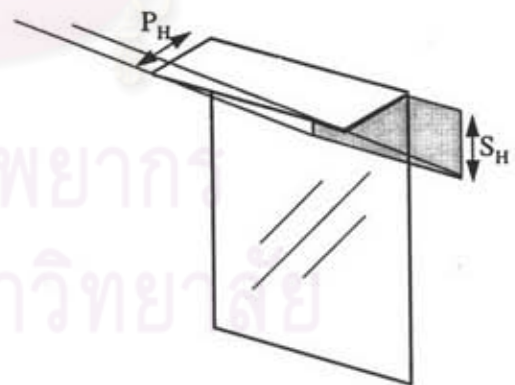
โดยที่ δ คือ declination ของดวงอาทิตย์, LSM คือ longitude of standard meridian และ LON คือ longitude ของที่ตั้งของอาคาร สำหรับ มุม β คือ solar altitude, ϕ คือ solar azimuth, γ คือ surface azimuth และ Σ คือ surface tilt ดังรูปประกอบที่ 2.8



ในกรณีที่มีหน้าต่างมี external shading devices จะมีผลให้แสงแดดที่ส่องผ่านเข้าสู่พื้นที่กระจกเปลี่ยนไปอันเนื่องจากเงาของ external shading devices ที่พาดตัวลงบนพื้นที่กระจกนั้น ขนาดของเงาที่ทอดตัวลงบนพื้นที่กระจกอย่างง่ายหาได้จากสมการที่ 2.33 และ 2.34



รูปที่ 2.9 แสดงภาพประกอบสมการ 2.33 เงาที่เกิดจาก Fin



รูปที่ 2.10 แสดงภาพประกอบสมการ 2.34 เงาที่เกิดจาก Overhang

$$S_w = P_v \cdot \tan \gamma \quad (2.33)$$

$$S_H = P_H \cdot \tan \beta / \cos \gamma \quad (2.34)$$

ซึ่งจะทำให้ได้ค่า solar heatgain สุทธิที่ไหลผ่านกระจกกรอบอาคารเป็นดังสมการ 2.35

$$\text{Solar Heat Gain (SHG)} = I_{DN} \cdot \cos\theta \cdot A_{\text{sunlit}} + I_d \cdot A_{\text{total}} \quad (2.35)$$

$$A_{\text{sunlit}} = (\text{ความกว้างกระจก} - S_w) \cdot (\text{ความสูงกระจก} - S_H) \quad (2.36)$$

$$A_{\text{total}} = (\text{ความกว้างกระจก}) \cdot (\text{ความสูงกระจก}) \quad (2.37)$$

การคำนวณ secondary equipment loads

โดยทั่วไปแล้ววัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองของ secondary equipment ก็คือการสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็น อัตราการทำความร้อน/ความเย็น ของคอยล์ เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ space sensible loads เข้ามา และเนื่องจาก secondary systems ประกอบไปด้วย mixing boxes, cooling coils, heating coils และ พัดลม ต่อติดอยู่ด้วยกัน ฉะนั้นหากใครคนหนึ่งต้องการทำแบบจำลองของ secondary system คนๆ นั้นจะต้องสามารถสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ย่อยที่ประกอบกันเป็น secondary system นี้ได้ แบบจำลองที่สำคัญของระบบ secondary ก็คือ แบบจำลองของพัดลม และ แบบจำลองของอุปกรณ์ควบคุม แบบจำลองของพัดลมนั้นมีความสำคัญอันเนื่องมาจากการใช้พลังงานของพัดลมนั้นเอง เพราะพลังงานที่พัดลมใช้ในการสร้างความเร็วให้แก่มวลอากาศนั้นจะกลายเป็น sensible heating load ในเวลาต่อมา ซึ่งมีการแนะนำว่า หากตัวของพัดลมวางตัวอยู่ในแนวการไหลของมวลอากาศพลังงานทั้งหมดที่พัดลมได้รับจะกลายเป็นพลังงานความร้อน ในขณะที่หากตัวของพัดลมไม่ได้วางตัวอยู่ในแนวการไหลของอากาศพลังงานเพียง $(1 - \text{ประสิทธิภาพของพัดลม})$ ส่วนเท่านั้นของพลังงานที่พัดลมใช้ไปจึงจะกลายเป็นความร้อน สำหรับพลังงานที่พัดลมใช้ไปนั้นสามารถหาได้จากข้อมูลของพัดลมที่ได้มาจาก catalogue ของบริษัทผู้ผลิต หรืออาจใช้สูตรง่าย ๆ คำนวณออกมาก็ได้ ดังเช่น

$$\text{Fan Power} = \frac{V \Delta P}{1000 \eta_F \eta_M} \quad (\text{watts}) \quad (2.38)$$

เมื่อ

$$V = \text{มวลอากาศไหล (L/s)}$$

$$\Delta P = \text{ความดันที่เพิ่มขึ้นผ่านพัดลม } N / m^3$$

$$\eta_F = \text{ประสิทธิภาพของพัดลม}$$

η_M = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

1/1000 = ตัวแปลงค่าจาก L ให้เป็น m^3

ส่วนการจำลองแบบระบบควบคุมนั้นหากกำหนดไว้อย่างไม่ถูกต้อง เช่น ตั้ง thermostat หรือ กำหนด dead band ของระบบไว้มิเหมาะสมกับความเป็นจริง ก็จะมีผลให้การประมาณค่าการใช้พลังงานคลาดเคลื่อนไปได้

การคำนวณ primary equipment energy requirements

วัตถุประสงค์ของการจำลองแบบ primary equipment ก็คือความต้องการทราบถึงปริมาณของพลังงานที่ต้องใช้ไปเพื่อให้ได้มาซึ่งสภาพของห้องตามที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วทางโรงงานผู้ผลิตจะระบุลักษณะการทำงานรวมทั้งลักษณะการใช้พลังงานของอุปกรณ์แต่ละชิ้นให้อยู่แล้ว ดังนั้นจึงเป็นการง่ายหากจะนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ในการประมาณการใช้พลังงาน แต่ในบางกรณีข้อมูลจากทางบริษัทผู้ผลิตอาจไม่ครอบคลุมการทำงานของอุปกรณ์ตัวนั้นๆ อย่างเพียงพอ การสร้างแบบจำลองเลียนแบบขึ้นมาเองโดยอาศัยข้อมูลเท่าที่มีอยู่ก็เป็นเรื่องที่ต้องจำเป็นขึ้นมา แต่การกระทำเช่นนี้จำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมากด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Flow Chart การทำงานของโปรแกรม BLN-ESP1

โปรแกรม Boonchai LertNuwat - Energy Simulation Program 1 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งมีวิธีการคำนวณในขั้นตอนต่างๆ ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 2.6 แสดง algorithm ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการ simulation

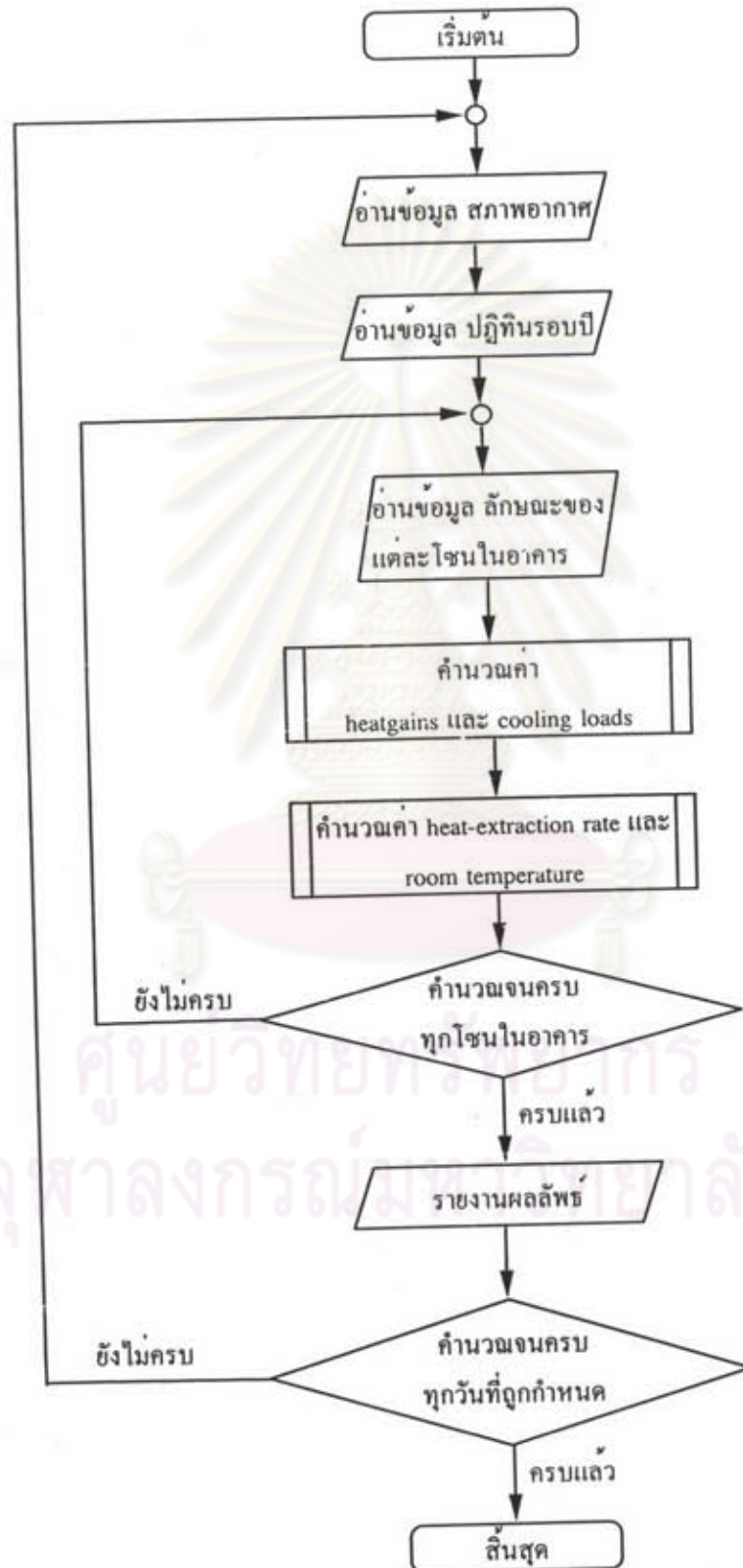
การคำนวณ heatgains	ใช้วิธี Responding Factor (ดูรายละเอียดหน้า 20-27)
การคำนวณ cooling loads	ใช้วิธี Weighting Factor (สมการ 2.2-2.4)
การคำนวณ heat-extraction rate	ใช้การคำนวณ heat-extraction rate ของวิธี TFM (ดูรายละเอียดหน้า 15-17)
การคำนวณ system loads	ใช้การ fitting curve จากข้อมูลจริง
การคำนวณ plant load	ใช้การ fitting curve จากข้อมูลจริง

การสร้างโปรแกรมถูกแบ่งออกเป็น 3 โปรแกรมหลักคือ

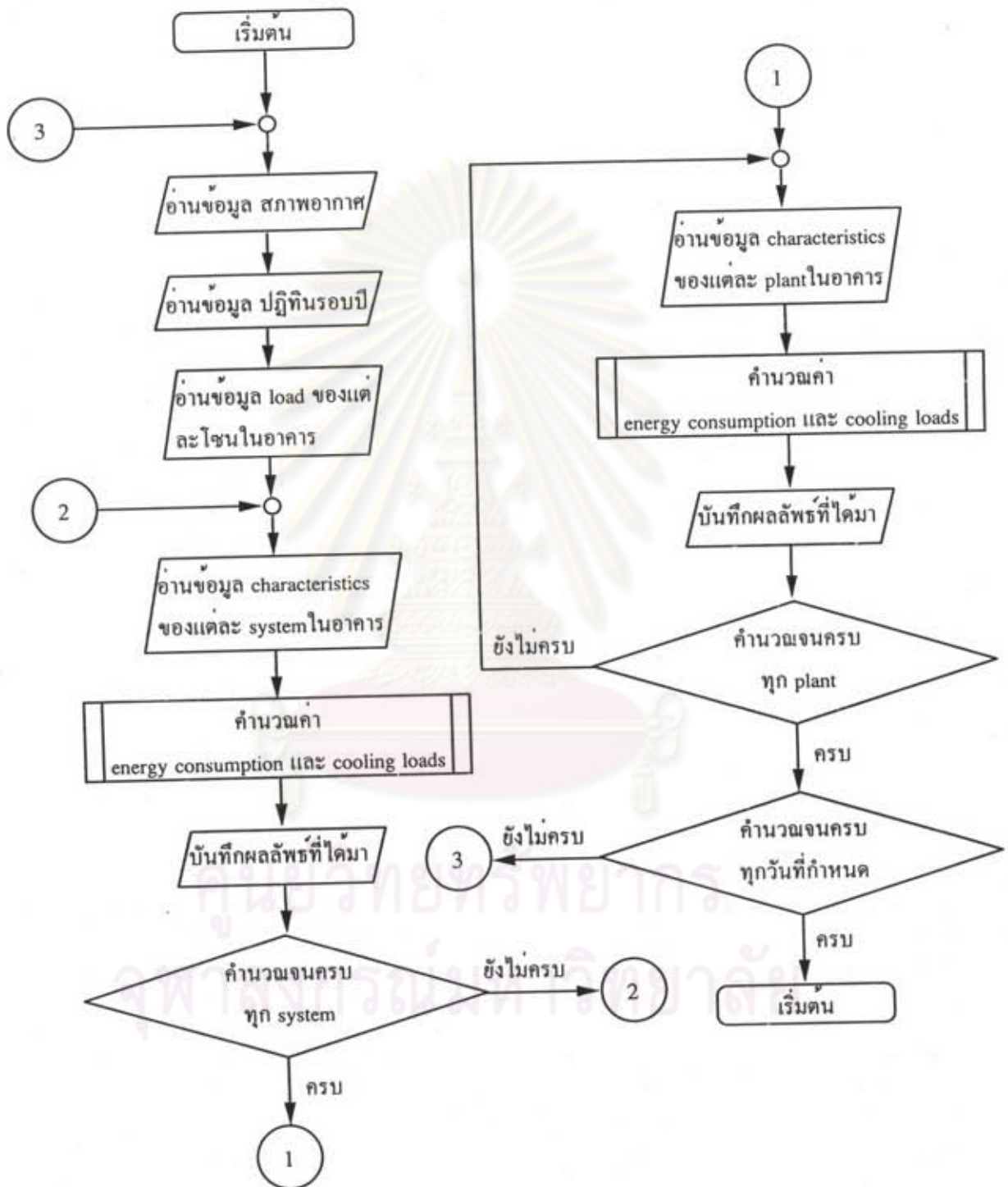
1. โปรแกรม CALEXE เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหาค่า cooling loads, heat-extraction rate และ room temperature ของแต่ละโซนใน
2. โปรแกรม SYSTEM.EXE เป็นโปรแกรม simulate การทำงานของ systems และ plant ของอาคารที่กำหนด ในขั้นตอนนี้จะได้ค่า energy consumptions ของ systems และ plant รวมทั้งภาระทางความร้อนที่อุปกรณ์แต่ละตัวต้องกระทำอีกด้วย
3. โปรแกรม REPORT.EXE เป็นโปรแกรมสำหรับสร้างตารางแสดงผลลัพธ์ต่างๆ ตามแต่ที่ผู้ใช้ต้องการ

Flow chart โดยคร่าวของโปรแกรมทั้ง 3 ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.11, 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ และ source code ของโปรแกรมทั้งสามสามารถตรวจสอบได้จากภาคผนวก ข ในตอนท้าย

รูปที่ 2.11 แสดง Flow chart ของ โปรแกรม CAL.EXE



รูปที่ 2.12 แสดง Flow chart ของ โปรแกรม SYSTEM.EXE



รูปที่ 2.13 แสดง Flow chart ของ โปรแกรม REPORT.EXE

