

การคำนวณค่าซีแอลดีใหม่สำหรับผนังและหลังคาจากฟิรูดิกเรสปอนส์แฟกเตอร์

RECALCULATION OF CLTD FOR WALLS AND ROOFS FROM PERIODIC RESPONSE FACTORS

ตูลย์ มณีวัฒนา และ กฤษณะ มานิตย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร (02) 2186640, โทรสาร (02) 2522889, E-mail: fmetmn@kankrow.eng.chula.ac.th

Tul Maneewattana and Kritsana Maniit

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Prathumwan, Bangkok 10330

Tel: (02) 2186640 Fax: (02) 2522889, E-mail: fmetmn@kankrow.eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการคำนวณค่า Cooling Load Temperature Difference (CLTD) สำหรับผนังกลุ่ม A ถึง G และหลังคาชนิดที่ 1 ถึง 13 ของ ASHRAE GRP-158 ใหม่ ด้วยวิธี Radiant Time Series (RTSM) ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ CLTD เดิมซึ่งคำนวณมาจากวิธี Transfer Function (TFM) ในงานวิจัยนี้คำนวณค่า PRF จากวิธี Direct root และ วิธี Frequency Domain Regression (FDR) ส่วนค่า RTF จะคำนวณจากวิธีสมดุลความร้อน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ที่ประดิษฐ์ขึ้น

ผลการวิจัยพบว่าผลรวมของค่า PRF ที่คำนวณจากวิธี Direct root แบบใช้ค่า Response Factors จะคลาดเคลื่อนจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ไม่เกิน 1% ส่วนผลรวมของค่า PRF ที่คำนวณจากวิธี FDR จะคลาดเคลื่อนจากค่า U ไม่เกิน 0.001% ค่า CLTD สูงสุดในรอบวันเฉลี่ยสำหรับผนังกลุ่ม A-G จากวิธี RTSM จะสูงกว่าวิธี TFM 1.1 °C ค่า CLTD สูงสุดในรอบวันเฉลี่ยของหลังคาชนิดที่ 1-13 ที่ไม่มีฝ้าเพดานจากวิธี RTSM จะสูงกว่าวิธี TFM 2.1 °C ค่า CLTD สูงสุดในรอบวันเฉลี่ยของหลังคาชนิดที่ 1-13 ที่มีฝ้าเพดานจากวิธี RTSM จะสูงกว่าวิธี TFM 1.2 °C ค่า CLTD สูงสุดในรอบวันของผนังและหลังคาทั้งที่มีและไม่มีฝ้าเพดานจากวิธี RTSM จะเกิดช้ากว่าวิธี TFM ประมาณ 1-2 ชั่วโมง

Abstract

This research presents the recalculation of Cooling Load Temperature Difference (CLTD) for wall groups A-G and roof types 1-13 in ASHRAE GRP-158 by Radiant Time Series Method (RTSM). The results were then compared with the old CLTD calculated from a Transfer Function Method (TFM). In this research, PRF is calculated from direct root method and Frequency Domain Regression Method (FDR) while RTF

determined by heat balance method using a computer program developed from MATLAB program.

The results have shown that the errors between the summation of PRF and overall heat transfer coefficient (U) that calculated from direct root method (Response Factors) are not exceed 1% and from FDR method are not exceed 0.001%. The average of maximum CLTD for wall groups A-G from RTSM is 1.1 °C higher than TFM. The average of maximum CLTD for roof types 1-13 without suspended ceiling from RTSM is 2.1 °C higher than TFM. The average of maximum CLTD for roof types 1-13 with suspended ceiling from RTSM is 1.2 °C higher than TFM. The maximum CLTD for walls, roofs with and without suspended ceiling from RTSM occurred about 1-2 hours slower than TFM.

1. บทนำ

วิธีการคำนวณภาระการทำความเย็น Radiant Time Series Method (RTSM) เป็นวิธีใหม่ที่ปรับปรุงมาจากวิธีสมดุลความร้อน [2] มีวิธีการคำนวณ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นที่ 1 หาค่า Heat gain ที่เข้ามาในรอบอาคารจากค่า Periodic Response Factors (PRF) ขั้นที่ 2 แบ่งค่า Heat gain เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ Heat gain จากการพาซึ่งจะเป็นภาระการทำความเย็น ณ ชั่วโมงนั้นทันที ส่วนที่สองคือ Heat gain จากการแผ่รังสีซึ่งจะต้องใช้ค่า Radiant Time Factors (RTF) เปลี่ยนให้เป็นภาระการทำความเย็น อัตราส่วนของ Heat gain จากการพาและการแผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของความร้อน ในงานวิจัยนี้จะใช้จากเอกสารอ้างอิง [2] ผลบวกของภาระการทำความเย็นทั้งสองส่วนจะเป็นภาระการทำความเย็นรวมซึ่งจะนำไปคำนวณค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A ถึง G และหลังคาชนิดที่ 1 ถึง 13 ของ ASHRAE GRP-158 [1]

2. การคำนวณค่า Periodic Response Factors (PRF)

การคำนวณค่า PRF โดยวิธี Direct root finding จะหาได้จากค่า Response Factors [5] เป็นสัมประสิทธิ์อนุกรมอนันต์ ซึ่งทราบกันโดยทั่วไปว่าเป็นคำตอบแบบแม่นยำ (Exact solution) ในขั้นตอนการแปลงลาปลาซย้อนกลับเพื่อหาค่า Response Factors นั้นจะค้นหารากของสมการ $B(s)=0$ จากสมการจริงโดยตรง [4] แต่ค่าของรากที่ได้จะเป็นค่าประมาณขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ใช้ในการค้นหา สมการ Heat flux ที่สัมพันธ์กับค่า Response Factors ของผนังด้านในเป็น

$$q_\theta'' = \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{o,i-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Z_j T_{i,i-j\delta} \quad (1)$$

โดยที่

q_θ'' = Heat flux ที่ผนังด้านในที่ชั่วโมงปัจจุบัน (W/m^2)

Z_j = Internal Response Factors

Y_j = Cross Response Factors

$T_{i,i-j\delta}$ = Inside surface temperature j ชั่วโมงที่ผ่านมา ($^{\circ}C$)

$T_{o,i-j\delta}$ = Outside surface temperature j ชั่วโมงที่ผ่านมา ($^{\circ}C$)

δ = Time interval (3600 วินาที หรือ 1 ชั่วโมง)

สำหรับ Steady periodic function จะเป็นการบังคับให้รูปแบบของอุณหภูมิเหมือนเดิมทุกวัน (24 ชั่วโมง) จะสามารถจัดเรียงสมการ (1) ใหม่เป็น

$$q_\theta'' = \sum_{j=0}^{23} Y_j T_{o,i-j\delta} - \sum_{j=0}^{23} Z_j T_{i,i-j\delta} + \sum_{j=24}^{47} Y_j T_{o,i-j\delta} - \sum_{j=24}^{47} Z_j T_{i,i-j\delta} + \sum_{j=48}^{63} Y_j T_{o,i-j\delta} - \sum_{j=48}^{63} Z_j T_{i,i-j\delta} + \dots \quad (2)$$

แยกเทอมแรกของ Z - Summation ของสมการ (2) ออกจะได้

$$q_\theta'' = \sum_{j=0}^{23} Y_j T_{o,i-j\delta} - Z_0 T_{i,i} - \sum_{j=0}^{23} Z_j T_{i,i-j\delta} + \sum_{j=24}^{47} Y_j T_{o,i-j\delta} - Z_{24} T_{i,i-24} - \sum_{j=25}^{47} Z_j T_{i,i-j\delta} + \sum_{j=48}^{63} Y_j T_{o,i-j\delta} - Z_{48} T_{i,i-48} - \sum_{j=49}^{63} Z_j T_{i,i-j\delta} + \dots \quad (3)$$

เนื่องจากอุณหภูมิเหมือนเดิมทุกวัน ดังนั้น $T_{i,i}, T_{i,i-24}, T_{i,i-48}, \dots$ จะมีค่าเท่ากัน และสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่เวลาเดียวกันของทุกวันสามารถนำมารวมกันได้เป็นสัมประสิทธิ์ตัวใหม่ซึ่งเรียกว่า Internal Periodic Response Factors, Z_{pj}

$$Z_{p0} = Z_0 + Z_{24} + Z_{48} + \dots \quad (4)$$

$$Z_{p1} = Z_1 + Z_{25} + Z_{49} + \dots \quad (5)$$

พิจารณาสมการ (4) และ (5) จะได้ผลรวมของ Internal Periodic Response Factors จาก Internal Response Factors เป็น

$$Z_{pj} = \sum_{k=0}^n Z_{j+24k} \quad (6)$$

สำหรับ Cross Periodic Response Factors, Y_{pj} ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ

$$Y_{pj} = \sum_{k=0}^n Y_{j+24k} \quad (7)$$

$$q_\theta'' = \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} T_{o,i-j\delta} - \sum_{j=0}^{23} Z_{pj} T_{i,i-j\delta} \quad (8)$$

เนื่องจากการคิดชั้นอากาศที่ผิวของตัวกลางการนำความร้อนทั้งภายนอกและภายในรวมเป็นชั้นของตัวกลางการนำความร้อนชั้นหนึ่งด้วย ดังนั้นอุณหภูมิที่ผิวผนังและหลังคาทั้งภายนอกและภายในจะถูกแทนที่ด้วยอุณหภูมิอากาศ ถ้าสมมติให้อุณหภูมิภายในห้องมีค่าคงที่เป็น T_{rc} จะทำให้สมการ (8) เป็น

$$q_\theta'' = \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} T_{o,i-j\delta} - T_{rc} \sum_{j=0}^{23} Z_{pj} \quad (9)$$

เนื่องจากผลรวมของ Z_p เท่ากับผลรวมของ Y_p ดังนั้นจึงทำให้ผลรวมของ Z_p เท่ากับผลรวมของ Y_p ด้วย และเมื่อพิจารณาให้อุณหภูมิอากาศภายนอกเป็นแบบ Steady state periodic function หรือ Sol-air temperature, t_e สมการ (9) จะเป็น

$$q_\theta'' = \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} (t_{e,\theta-j\delta} - t_{rc}) \quad (10)$$

สมการที่ (10) เป็นสมการหาค่า Heat gain ผ่านกรอบอาคารที่ชั่วโมง θ จากค่า Periodic response factors

วิธีการคำนวณค่า PRF อีกวิธีหนึ่ง คือวิธี Frequency Domain Regression (FDR) วิธีนี้จะจำลองสมการจริงที่เรียกว่า Theoretical frequency characteristic, $G(s)$ ให้อยู่ในรูปของ Polynomial s-transfer function, $\tilde{G}(s)$ เริ่มต้นพิจารณาจาก Transfer function matrix [3]

$$\begin{bmatrix} q_{out} \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G_x & G_y \\ -G_z & G_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out} \\ T_{in} \end{bmatrix} \quad (11)$$

โดยที่

$$G_x(s) = A(s)/B(s) \quad (12)$$

$$G_y(s) = 1/B(s) \quad (13)$$

$$G_z(s) = D(s)/B(s) \quad (14)$$

สมการ (12) - (14) เรียกว่า External, Cross และ Internal transfer function ตามลำดับ ซึ่งจะทำการแทนค่า s ด้วย $j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$) ลงไปจะได้ Complex function ของ $G_x(j\omega)$, $G_y(j\omega)$ และ $G_z(j\omega)$ ตามลำดับ และเรียกว่า Theoretical frequency characteristics ของ External, Cross และ Internal heat conduction ตามลำดับ $\tilde{G}(s)$ จะถูกแสดงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนฟังก์ชัน Polynomial 2 ชุด ที่มีเลขชี้กำลัง r และ m

$$\tilde{G}(j\omega) = \frac{\beta_0 + \beta_1(j\omega) + \beta_2(j\omega)^2 + \dots + \beta_r(j\omega)^r}{1 + \alpha_1(j\omega) + \alpha_2(j\omega)^2 + \dots + \alpha_m(j\omega)^m} \quad (15)$$

รายละเอียดการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (15) แสดงอยู่ใน [3] เนื่องจากแบบจำลอง $\tilde{G}(j\omega)$ สามารถจำลองได้ใกล้เคียงกับสมการจริงหลายชุดขึ้นอยู่กับเลขชี้กำลัง r และ m ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบเพื่อเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดก่อน ในงานวิจัยนี้จะตรวจสอบ $\tilde{G}(j\omega)$ โดยใช้ค่า R^2

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (\tilde{G}(j\omega_k) - \bar{G})^2}{\sum_{k=1}^N (G(j\omega_k) - \bar{G})^2} \quad (16)$$

$$\text{โดยที่ } \bar{G} = \frac{\sum_{k=1}^N G(j\omega_k)}{N} \quad (17)$$

สำหรับขั้นตอนการแปลงลาปลาซย้อนกลับเพื่อหาค่า Response Factors นั้นจะหารากของสมการรากของสมการ $B(s)=0$ จากสมการที่ (11) ซึ่งจะได้ค่ารากจริง แต่ก็ยังเป็นเพียงรากจริงของแบบจำลอง Polynomial s-transfer function

การคำนวณค่า Cross PRF จาก Polynomial s-transfer function จะอ้างอิงจากบทความ [8] โดยหาจากการแปลงลาปลาซย้อนกลับสมการที่ (15) จะได้

$$Y_{p0} = U + \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\Delta\tau} (1 - e^{-s_i \Delta\tau}) \frac{1 - e^{-(M-1)s_i \Delta\tau}}{1 - e^{-Ms_i \Delta\tau}} \quad (18)$$

$$Y_{pj} = -\sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\Delta\tau} (1 - e^{-s_i \Delta\tau})^2 \frac{e^{-(j-1)s_i \Delta\tau}}{1 - e^{-Ms_i \Delta\tau}} \quad (1 \leq j \leq M-1) \quad (19)$$

เมื่อ Y_{pj} = Cross Periodic Response Factors

$$j = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

$$M = 24$$

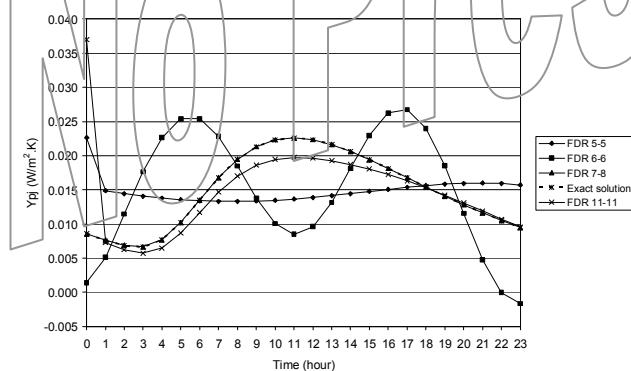
$\Delta\tau$ = Time interval, 1 Hour

$$\delta = \text{Residue} = -\tilde{B}(-s_i) / [s_i^2 \tilde{A}'(-s_i)]$$

m = จำนวน Root ของ Polynomial s-transfer function

U = U-Factor ($W/m^2.K$)

s = Roots

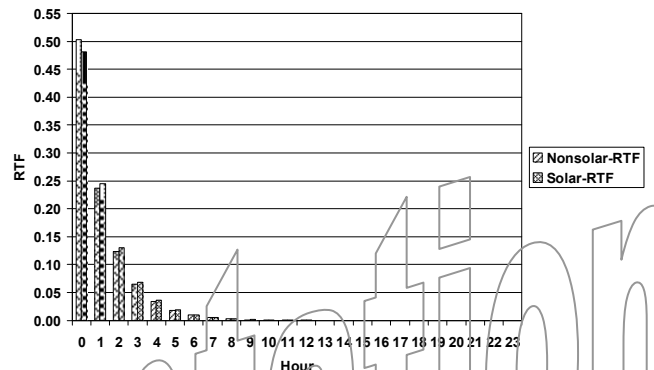


รูปที่ 1 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 30 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)

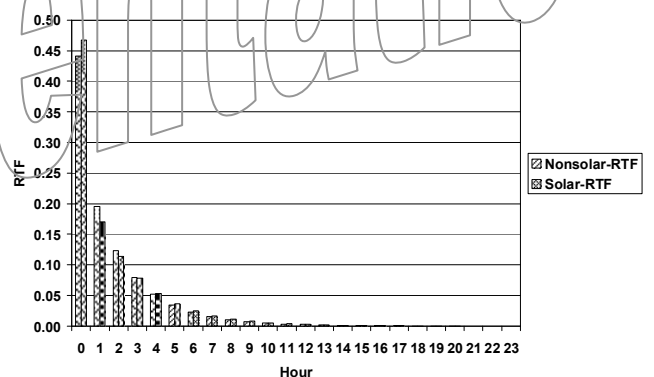
3. การคำนวณค่า Radiant Time Factors (RTF)

ค่าสัมประสิทธิ์ Radiant Time Factors (RTF) คือการตอบสนองเชิงความร้อนของโซนที่มีต่ออากาศภายในโซนจากค่าความร้อนของการแผ่รังสี จะใช้สำหรับเปลี่ยนค่า Heat gain จากการแผ่รังสีให้เป็นภาระการทำความเย็นที่ชั่วโมงใดๆ จะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ Solar-RTF และ Nonsolar-RTF สำหรับผนังและหลังคาจะใช้ค่า Nonsolar-RTF แบบจำลองของโซนมีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 3 เมตร และสูง 3 เมตร ประกอบด้วยผนัง 4 ด้าน พื้น 1 ด้าน

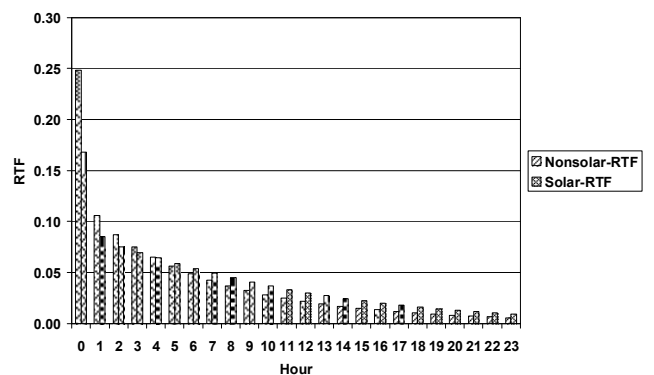
และหลังคา 1 ด้าน ค่า RTF หาได้จากการให้ค่า Radiant heat gain pulse 1 หน่วย ที่ชั่วโมงที่ 1 และซ้ำทุกๆ 24 ชั่วโมง กระจายอย่างสม่ำเสมอทุกพื้นผิวสำหรับ Nonsolar-RTF และกระจายอย่างสม่ำเสมอเฉพาะที่พื้นสำหรับ Solar-RTF ตามลำดับ ความร้อนนี้จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวภายในเพิ่ม และจะถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อากาศโดยการพาเป็นภาระการทำความเย็น เมื่อนำภาระการทำความเย็นแต่ละชั่วโมงหารด้วยผลรวมของภาระการทำความเย็นรวมจะได้ค่า RTF ซึ่งผลรวมของค่า RTF จะต้องเท่ากับ 1 เสมอ ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า RTF 3 กรณี คือ Light, Medium และ Heavy weight zone



รูปที่ 2 ค่า RTF สำหรับ Light weight zone



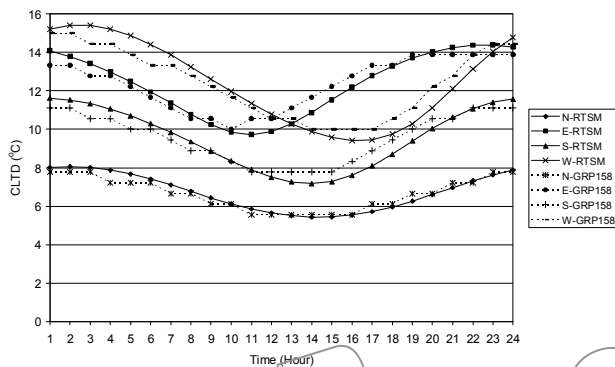
รูปที่ 3 ค่า RTF สำหรับ Medium weight zone



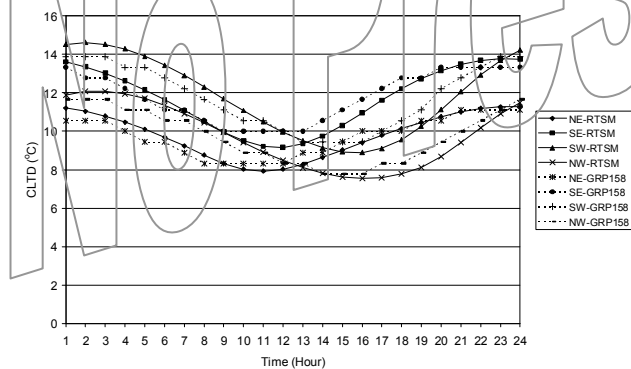
รูปที่ 4 ค่า RTF สำหรับ Heavy weight zone

4. การคำนวณค่า CLTD

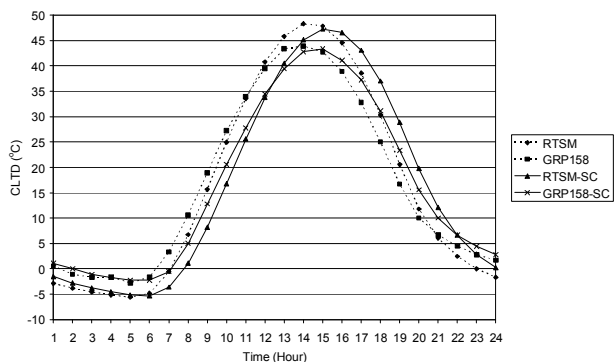
การคำนวณค่า CLTD จะต้องคำนวณภาระการทำความเย็น (Cooling load) รายชั่วโมงด้วยวิธี Radiant Time Series (RTSM) ก่อน จากนั้นจึงหารภาระการทำความเย็นนี้ ด้วยผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่ของผนังหรือหลังคา ซึ่งในการคำนวณทั้งหมดเขียนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB รูปที่ 5 และ รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A และรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 1 ของ ASHRAE GRP-158 จะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกัน ค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A ถึง G และหลังคาชนิดที่ 1 ถึง 13 ของ ASHRAE GRP-158 แสดงไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 5 ค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 1 ที่ไม่มีฝ้าเพดาน

และมีฝ้าเพดาน (SC) ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158

5. สรุป

วิธี RTSM สามารถใช้คำนวณภาระการทำความเย็นสำหรับแต่ละพื้นที่ได้โดยอาศัยแบบจำลองอุณหภูมิอากาศภายนอก (Sol-air temperature) ของพื้นที่นั้นๆ และจากผลการวิจัยพบว่าโปรแกรมคำนวณค่า CLTD ของผนังและหลังคาจากวิธี RTSM ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ จึงสามารถนำไปคำนวณค่า CLTD สำหรับผนังและหลังคาชนิดต่างๆ ได้ทุกพื้นที่ รวมทั้งประเทศไทยด้วยเพื่อนำไปประโยชน์ต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASHRAE (1979). Cooling and Heating Load Calculation Manual. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [2] ASHRAE (2001). ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [3] Chen, Y. M. and Wang, S. W. (2004). A new Procedure for Calculating Periodic Response Factors Based on Frequency Domain Regression Method. International Journal of Thermal Sciences. (Accepted, Source of SCI, EI)
- [4] Hittle, D. C. (1981). Calculating Building Heating and Cooling Loads Using The Frequency Response of Multilayered Slabs, Doctoral Dissertation, University of Illinois at Urbana - Champaign.
- [5] Spitler, J. D., Fisher, D. E. and Pedersen, C. O. (1997). The Radiant Time Series Cooling Load Calculation Procedure. ASHRAE Transactions 103(2): 503-515.
- [6] Spitler, J. D. and Fisher, D. E. (1999a). Development of Periodic Response Factors for Use with the Radiant Time Series Method. ASHRAE Transactions 105(2): 491-509.
- [7] Spitler, J. D. and Fisher, D. E. (1999b). On the Relationship Between the Radiant Time Series and Transfer Function Method for Design Cooling Load Calculations. HVAC&R Research 5(2): 123-136.
- [8] Wang, S.W. and Chen, Y.M. (2002). A Simple Procedure for Calculating Thermal Response Factors and Conduction Transfer Functions of Multiplayer Walls. Applied Thermal Engineering 22(3): 333-338.

ตารางที่ 1 ค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A-G ที่คำนวณโดยวิธี RTSM ($^{\circ}C$)

	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Group A Walls																							
N	8.0	8.1	8.0	7.9	7.7	7.4	7.1	6.8	6.4	6.1	5.9	5.6	5.5	5.4	5.5	5.5	5.7	6.0	6.3	6.6	7.0	7.3	7.6	7.9
NE	11.2	11.0	10.8	10.5	10.1	9.7	9.2	8.8	8.3	8.0	7.9	8.0	8.3	8.6	9.0	9.4	9.8	10.1	10.5	10.8	11.0	11.2	11.3	11.3
E	14.1	13.8	13.4	13.0	12.5	12.0	11.4	10.8	10.2	9.9	9.7	9.9	10.3	10.9	11.5	12.2	12.8	13.3	13.7	14.0	14.3	14.4	14.4	14.3
SE	13.6	13.4	13.0	12.6	12.2	11.6	11.1	10.5	10.0	9.5	9.2	9.2	9.3	9.7	10.3	11.0	11.6	12.2	12.7	13.2	13.5	13.7	13.8	13.8
S	11.6	11.5	11.3	11.1	10.7	10.3	9.8	9.4	8.9	8.4	7.9	7.5	7.3	7.2	7.3	7.6	8.1	8.7	9.4	10.0	10.6	11.1	11.4	11.6
SW	14.5	14.6	14.5	14.3	13.9	13.4	12.9	12.3	11.7	11.1	10.5	10.0	9.5	9.1	8.9	8.9	9.1	9.6	10.3	11.1	12.1	13.0	13.7	14.2
W	15.2	15.4	15.4	15.2	14.9	14.4	13.9	13.3	12.6	12.0	11.3	10.8	10.3	9.9	9.6	9.4	9.5	9.7	10.3	11.1	12.1	13.1	14.1	14.8
NW	11.9	12.1	12.1	12.0	11.7	11.4	10.9	10.5	9.9	9.4	8.9	8.5	8.1	7.8	7.6	7.6	7.6	7.8	8.1	8.7	9.4	10.2	10.9	11.5
	Group B Walls																							
N	8.3	8.1	7.7	7.3	6.7	6.1	5.5	5.0	4.5	4.2	3.9	3.8	3.9	4.1	4.4	4.8	5.3	5.9	6.5	7.2	7.7	8.1	8.4	8.4
NE	10.8	10.3	9.6	8.9	8.2	7.4	6.7	6.0	5.8	5.9	6.4	7.1	7.9	8.6	9.3	9.9	10.4	10.9	11.3	11.6	11.8	11.8	11.6	11.3
E	13.4	12.7	11.8	10.9	10.0	9.1	8.1	7.4	7.0	7.2	7.9	9.0	10.3	11.6	12.6	13.5	14.2	14.7	15.1	15.3	15.2	15.0	14.7	14.3
SE	13.3	12.5	11.7	10.8	9.9	9.0	8.1	7.3	6.7	6.6	6.9	7.6	8.6	9.8	11.0	12.1	13.0	13.7	14.3	14.6	14.7	14.6	14.3	13.9
S	12.0	11.5	10.8	10.1	9.3	8.5	7.6	6.8	6.1	5.4	5.0	4.8	5.0	5.5	6.4	7.5	8.7	9.9	10.9	11.7	12.3	12.6	12.6	12.4
SW	16.0	15.5	14.8	13.9	12.9	11.9	10.8	9.8	8.8	7.9	7.1	6.6	6.2	6.2	6.5	7.2	8.4	9.9	11.6	13.2	14.6	15.6	16.1	16.2
W	17.1	16.7	16.0	15.1	14.1	13.1	11.9	10.8	9.7	8.8	8.0	7.3	6.9	6.7	6.7	7.1	8.0	9.4	11.1	13.0	14.8	16.1	16.9	17.2
NW	13.3	13.0	12.5	11.8	11.0	10.2	9.3	8.4	7.5	6.8	6.2	5.7	5.4	5.3	5.4	5.7	6.3	7.2	8.4	9.8	11.2	12.3	13.0	13.3
	Group C Walls																							
N	9.2	8.5	7.8	7.0	6.2	5.4	4.6	4.1	3.8	3.7	3.8	4.0	4.4	4.9	5.6	6.4	7.3	8.1	8.9	9.6	10.1	10.2	10.1	9.7
NE	10.6	9.7	8.8	7.8	6.9	6.0	5.2	5.0	5.5	6.5	7.8	9.1	10.2	11.1	11.8	12.3	12.8	13.2	13.4	13.5	13.3	12.8	12.2	11.5
E	12.7	11.5	10.4	9.2	8.1	7.0	6.1	5.9	6.5	7.9	9.8	11.9	13.8	15.2	16.2	16.9	17.3	17.4	17.3	17.0	16.5	15.8	14.8	13.3
SE	12.7	11.6	10.4	9.3	8.2	7.1	6.1	5.6	5.6	6.4	7.7	9.5	11.4	13.2	14.7	15.7	16.5	16.9	17.0	16.8	16.4	15.7	14.8	13.3
S	12.3	11.3	10.2	9.1	8.0	7.0	6.0	5.1	4.5	4.1	4.1	4.6	5.6	7.1	8.8	10.6	12.3	13.6	14.5	15.0	15.0	14.7	14.1	13.3
SW	17.1	15.7	14.3	12.9	11.4	10.0	8.7	7.5	6.6	5.9	5.4	5.3	5.5	6.2	7.5	9.4	11.7	14.1	16.4	18.2	19.2	19.4	19.0	18.3
W	18.7	17.3	15.8	14.3	12.7	11.2	9.7	8.5	7.4	6.6	6.0	5.8	5.8	6.2	7.9	8.5	10.6	13.2	16.0	18.4	20.0	20.7	20.5	19.8
NW	14.8	13.7	12.6	11.3	10.1	8.9	7.7	6.7	5.8	5.2	4.9	4.8	4.9	5.3	5.9	6.9	8.2	10.0	12.1	14.0	15.4	16.0	16.0	15.6
	Group D Walls																							
N	9.2	8.2	7.1	6.1	5.1	4.2	3.4	2.9	2.9	3.0	3.3	3.8	4.5	5.3	6.3	7.4	8.5	9.4	10.3	11.1	11.5	11.3	10.8	10.1
NE	9.8	8.7	7.5	6.4	5.4	4.4	3.7	3.7	4.8	6.7	8.8	10.6	12.0	12.8	13.4	13.9	14.2	14.4	14.5	14.3	13.8	13.0	12.1	11.0
E	11.4	10.0	8.7	7.4	6.2	5.1	4.2	4.2	5.6	8.1	11.1	14.1	16.6	18.1	18.9	19.1	19.1	18.8	18.3	17.6	16.7	15.5	14.2	12.8
SE	11.6	10.1	8.8	7.5	6.3	5.2	4.2	3.8	4.4	5.9	8.2	10.9	13.6	15.8	17.4	18.4	18.8	18.8	18.4	17.8	16.9	15.7	14.4	13.3
S	11.7	10.3	8.9	7.6	6.4	5.3	4.3	3.4	2.9	2.7	3.1	4.2	5.9	8.1	10.6	13.0	15.0	16.4	17.1	17.1	16.5	15.6	14.4	13.3
SW	16.9	14.9	13.0	11.1	9.4	7.9	6.5	5.3	4.5	4.0	3.8	4.0	4.7	6.0	8.1	10.9	14.1	17.3	20.1	22.0	22.6	22.0	20.6	18.9
W	18.9	16.7	14.6	12.5	10.6	8.9	7.4	6.1	5.1	4.5	4.3	4.4	4.9	5.7	7.1	9.4	12.4	16.0	19.6	22.6	24.1	24.0	22.8	21.0
NW	15.1	13.4	11.7	10.1	8.5	7.1	5.8	4.8	4.0	3.6	3.5	3.8	4.3	5.1	6.2	7.5	9.4	11.9	14.6	17.1	18.5	18.7	18.0	16.7
	Group E Walls																							
N	6.2	5.0	3.8	2.8	1.9	1.2	1.3	1.9	2.6	3.2	4.2	5.3	6.6	8.0	9.4	10.6	11.5	12.3	12.9	12.6	11.6	10.3	8.9	7.5
NE	6.1	4.8	3.7	2.7	1.8	1.2	2.6	5.8	9.4	12.3	14.1	14.7	14.9	15.0	15.2	15.3	15.3	14.9	14.2	13.1	11.7	10.3	8.8	7.4
E	6.7	5.3	4.1	3.0	2.1	1.4	2.9	6.8	11.7	16.2	19.8	21.7	21.9	21.3	20.6	19.8	19.0	18.0	16.7	15.1	13.3	11.6	9.8	8.2
SE	6.9	5.5	4.2	3.1	2.1	1.4	1.9	4.1	7.6	11.6	15.5	18.7	20.6	21.3	21.1	20.5	19.6	18.6	17.2	15.6	13.7	11.9	10.1	8.4
S	7.3	5.8	4.5	3.3	2.3	1.4	0.9	0.9	1.4	2.8	5.2	8.4	11.9	15.2	17.8	19.5	19.9	19.3	18.1	16.4	14.5	12.6	10.7	8.9
SW	11.1	8.9	7.0	5.4	3.9	2.7	1.9	1.7	1.8	2.4	3.4	4.9	7.6	11.3	15.7	20.1	23.8	26.3	26.9	25.2	22.3	19.3	16.3	13.3
W	12.8	10.3	8.2	6.3	4.7	3.3	2.4	2.0	2.1	2.6	3.5	4.7	6.4	9.0	12.9	17.7	22.7	27.1	29.5	28.5	25.5	22.1	18.8	15.8
NW	10.4	8.4	6.6	5.0	3.7	2.5	1.8	1.5	1.7	2.3	3.3	4.5	6.0	7.6	9.7	12.7	16.4	20.1	22.6	22.3	20.3	17.7	15.1	12.7
	Group F Walls																							
N	4.9	3.5	2.3	1.3	0.4	-0.2	0.0	1.2	2.5	3.5	4.8	6.2	7.9	9.6	11.2	12.5	13.4	14.1	14.6	14.3	12.6	10.5	8.5	6.6
NE	4.4	3.1	2.1	1.1	0.3	-0.3	1.1	5.4	10.8	15.3	17.8	18.2	17.6	17.0	16.6	16.4	16.1	15.6	14.6	13.1	11.2	9.3	7.5	5.9
E	4.6	3.3	2.1	1.2	0.4	-0.2	1.3	6.4	13.3	19.9	24.8	27.1	26.7	24.7	22.5	20.8	19.3	17.8	16.2	14.2	12.0	9.9	7.9	6.1
SE	4.7	3.4	2.2	1.2	0.4	-0.2	0.3	3.3	8.1	13.7	19.0	23.1	25.4	25.6	24.4	22.6	20.8	19.0	17.1	14.9	12.5	10.2	8.1	6.3
S	5.1	3.6	2.4	1.4	0.5	-0.2	-0.6	-0.4	0.5	2.5	5.7	9.9	14.5	18.8	22.0	23.8	23.8	22.2	19.9	17.1	14.1	11.4	9.0	6.9
SW	8.1	5.8	3.9	2.4	1.2	0.3	-0.2	-0.1	0.5	1.7	3.2	5.3	8.5	13.3	18.9	24.5	29.1	31.9	32.1	29.2	24.3	19.2	14.7	11.1
W	9.6	6.8	4.7	2.9	1.6	0.6	0.0	0.0	0.6	1.7	3.2	5.1	7.2	10.3	15.0	21.0	27.4	32.9	35.9	34.3	29.1	23.1	17.7	13.3
NW	8.1	5.8	3.9	2.4	1.2	0.3	-0.2	-0.1	0.5	1.7	3.2	5.0	7.0	9.0	11.5	14.9	19.3	23.9	27.3	27.1	23.5	18.9	14.7	11.1
	Group G Walls																							
N	1.6	0.6	-0.2	-0.8	-1.3	-1.2	1.0	3.4	4.6	5.8	7.4	9.3	11.3	13.0	14.3	15.1	15.3	15.6	15.3	12.7	9.4	6.6	4.5	2.8
NE	1.4	0.5	-0.2	-0.9	-1.4	-0.4	6.0	14.4	20.5	22.9	21.8	19.0	17.1	16.3	16.1	15.9	15.3	14.2	12.3	9.9	7.5	5.5	3.9	2.5
E	1.4	0.5	-0.2	-0.9	-1.4	-0.3	6.8	17.3	26.5	31.9	33.2	30.7	25.6	21.5	19.0	17.5	16.2	14.7	12.6	10.0	7.6	5.6	3.9	2.5
SE	1.4	0.5	-0.2	-0.8	-1.4	-1.0	3.0	10.1	17.9	24.6	29.0	30.6	29.2	25.8	22.3	19.5	17.4	15.3	12.9	10.2	7.7	5.6	3.9	2.5
S	1.5	0.6	-0.2	-0.8	-1.4	-1.6	-1.1	0.3	2.8	7.1	12.7	18.5	23.5	26.8	27.9	26.6	23.3	19.2	15.3	11.5	8.4	6.0	4.1	2.6
SW	2.1	0.9	0.0	-0.8	-1.3	-1.6	-1.1	0.2	2.0	4.1	6.5	10.1	16.2	23.3	30.1	35.2	37.6	36.5	31.2	22.7	15.2	9.8	6.2	3.8
W	2.5	1.1	0.1	-0.7	-1.3	-1.6	-1.1	0.2	2.0	4.1	6.4	8.8	12.1	17.7	25.3	33.3	39.8	42.7	39.5	29.4	19.4	12.2	7.5	4.5
NW	2.2	1.0	0.0	-0.7	-1.3	-1.6	-1.1	0.2	2.0	4.1	6.4	8.7	11.0	13.4	17.2	22.6	28.8	32.6	32.0	24.7	16.7	10.7	6.7	4.1

ตารางที่ 2 ค่า CLTD สำหรับหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน 13 ชนิด ที่คำนวณโดยวิธี RTSM ($^{\circ}\text{C}$)

Hour	R1 $^{\circ}\text{C}$	R2 $^{\circ}\text{C}$	R3 $^{\circ}\text{C}$	R4 $^{\circ}\text{C}$	R5 $^{\circ}\text{C}$	R6 $^{\circ}\text{C}$	R7 $^{\circ}\text{C}$	R8 $^{\circ}\text{C}$	R9 $^{\circ}\text{C}$	R10 $^{\circ}\text{C}$	R11 $^{\circ}\text{C}$	R12 $^{\circ}\text{C}$	R13 $^{\circ}\text{C}$
1	-2.9	0.5	4.8	7.2	1.9	13.8	16.3	21.4	15.1	18.2	19.4	16.9	22.1
2	-3.8	-1.4	2.3	4.5	-0.2	10.3	13.2	18.3	12.6	15.3	17.4	15.1	20.4
3	-4.6	-2.7	0.3	2.3	-1.9	7.3	10.3	15.3	10.3	12.7	15.3	13.3	18.7
4	-5.2	-3.7	-1.3	0.5	-3.1	4.7	7.9	12.6	8.1	10.2	13.4	11.5	16.8
5	-5.6	-4.5	-2.6	-1.1	-4.0	2.6	5.7	10.0	6.2	8.1	11.5	9.9	15.0
6	-4.8	-5.0	-3.5	-2.2	-4.7	0.8	3.8	7.8	4.5	6.1	9.6	8.3	13.3
7	-0.6	-4.1	-3.7	-2.3	-4.4	-0.7	2.2	5.7	3.3	4.4	8.0	7.0	11.6
8	6.7	-0.9	-2.0	-0.7	-2.0	-1.3	1.2	4.0	2.9	3.1	6.6	6.0	10.1
9	15.7	4.7	1.7	2.6	2.6	-0.7	1.2	2.9	3.7	2.6	5.7	5.7	8.7
10	24.9	12.0	7.2	7.4	9.2	1.4	2.5	2.6	5.5	3.2	5.5	6.1	7.8
11	33.6	20.1	13.9	13.2	16.8	5.0	5.0	3.4	8.3	4.9	6.0	7.3	7.4
12	40.8	28.2	21.0	19.4	24.7	9.7	8.7	5.2	11.9	7.6	7.3	9.2	7.6
13	45.8	35.4	28.0	25.6	32.1	15.2	13.1	8.1	16.0	11.2	9.3	11.6	8.6
14	48.3	41.0	34.1	31.1	38.3	21.0	18.0	11.7	20.1	15.3	11.8	14.3	10.2
15	47.9	44.5	38.8	35.3	42.5	26.4	22.8	15.8	23.9	19.6	14.7	17.2	12.3
16	44.6	45.5	41.4	37.9	44.5	31.1	27.1	20.0	27.1	23.6	17.6	19.8	14.8
17	38.6	43.8	41.9	38.6	44.0	34.5	30.5	24.0	29.4	27.0	20.3	22.0	17.4
18	30.3	39.6	40.0	37.3	40.8	36.4	32.7	27.3	30.5	29.5	22.6	23.7	19.9
19	20.6	33.0	35.9	34.0	35.3	36.4	33.4	29.7	30.2	30.9	24.3	24.5	22.1
20	11.8	25.0	29.9	29.1	28.1	34.6	32.6	30.9	28.7	30.9	25.1	24.4	23.8
21	6.1	17.3	23.3	23.8	20.5	31.1	30.3	30.8	26.4	29.5	25.1	23.6	24.8
22	2.4	11.1	17.2	18.8	14.0	26.8	27.1	29.4	23.6	27.2	24.3	22.3	25.0
23	0.0	6.4	12.2	14.3	8.8	22.2	23.4	27.2	20.7	24.3	23.0	20.6	24.6
24	-1.7	3.0	8.1	10.5	4.9	17.8	19.8	24.4	17.3	21.3	21.3	18.8	23.5

ตารางที่ 3 ค่า CLTD สำหรับหลังคามีฝ้าเพดาน 13 ชนิด ที่คำนวณโดยวิธี RTSM ($^{\circ}\text{C}$)

Hour	R1 $^{\circ}\text{C}$	R2 $^{\circ}\text{C}$	R3 $^{\circ}\text{C}$	R4 $^{\circ}\text{C}$	R5 $^{\circ}\text{C}$	R6 $^{\circ}\text{C}$	R7 $^{\circ}\text{C}$	R8 $^{\circ}\text{C}$	R9 $^{\circ}\text{C}$	R10 $^{\circ}\text{C}$	R11 $^{\circ}\text{C}$	R12 $^{\circ}\text{C}$	R13 $^{\circ}\text{C}$
1	-1.5	9.9	11.6	16.4	13.5	19.8	20.0	22.7	17.5	19.8	17.8	17.6	20.4
2	-2.8	6.9	8.3	14.5	10.5	16.8	18.0	20.9	16.5	18.3	17.3	16.9	19.8
3	-3.8	4.4	5.5	12.6	7.9	14.0	16.1	18.9	15.4	16.8	16.7	16.2	19.0
4	-4.5	2.3	3.2	10.8	5.6	11.4	14.3	16.9	14.4	15.3	16.1	15.5	18.1
5	-5.1	0.5	1.3	9.2	3.7	9.0	12.5	14.9	13.3	13.8	15.4	14.8	17.1
6	-5.4	-0.9	-0.3	7.7	2.0	6.9	10.9	13.0	12.3	12.4	14.8	14.1	16.0
7	-3.6	-1.8	-1.5	6.4	0.7	5.0	9.3	11.1	11.4	11.1	14.1	13.4	15.0
8	1.1	-1.4	-1.6	5.8	0.4	3.5	8.0	9.4	10.7	9.9	13.4	12.8	13.9
9	8.2	0.6	-0.3	6.0	1.4	2.7	7.1	7.9	10.4	8.9	12.9	12.4	12.9
10	16.8	4.2	2.7	7.1	3.7	2.8	6.8	6.8	10.5	8.4	12.5	12.2	12.0
11	25.6	9.1	7.1	8.9	7.4	4.1	7.2	6.3	11.1	8.4	12.4	12.3	11.3
12	33.8	14.8	12.4	11.4	11.9	6.4	8.5	6.5	12.1	9.1	12.4	12.8	10.9
13	40.5	20.8	18.4	14.3	17.0	9.7	10.4	7.5	13.4	10.3	12.8	13.5	10.9
14	45.1	26.5	24.2	17.3	22.1	13.6	12.8	9.2	15.0	12.0	13.4	14.4	11.2
15	47.2	31.4	29.5	20.3	26.8	17.8	15.6	11.5	16.6	14.1	14.1	15.4	12.0
16	46.6	35.1	33.8	22.9	30.7	21.9	18.4	14.2	18.2	16.3	15.0	16.5	13.1
17	43.1	37.1	36.5	24.8	33.3	25.7	21.1	17.0	19.5	18.6	16.0	17.5	14.4
18	37.0	37.2	37.5	26.0	34.4	28.6	23.4	19.8	20.6	20.5	16.9	18.4	15.9
19	28.9	35.3	36.5	26.2	33.9	30.4	25.0	22.3	21.2	22.1	17.6	19.0	17.3
20	19.8	31.7	33.6	25.5	31.7	31.0	25.8	24.2	21.3	23.1	18.2	19.4	18.6
21	12.1	27.0	29.3	24.2	28.3	30.3	25.8	25.4	20.9	23.4	18.6	19.4	19.7
22	6.6	22.1	24.5	22.4	24.4	28.4	24.9	25.7	20.3	23.1	18.6	19.1	20.4
23	2.9	17.5	19.7	20.4	20.5	25.8	23.6	25.3	19.5	22.3	18.5	18.7	20.8
24	0.3	13.4	15.4	18.4	16.8	22.9	21.8	24.2	18.5	21.1	18.2	18.2	20.7