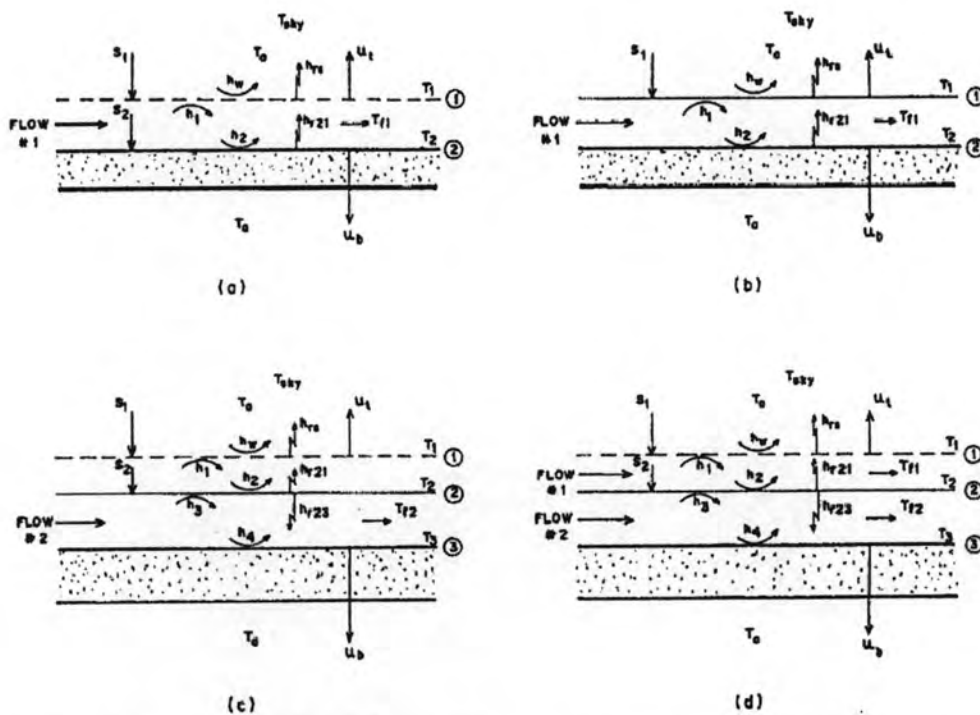


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

K.S.Ong (1995) ได้ศึกษาถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ solution procedure ของผลทางความร้อนของ solar air heater โดยวิเคราะห์ solar air heater ทั้งสิ้น 4 แบบซึ่งได้แก่แบบที่ 1 เป็น single channel กับ single air flow ระหว่าง glass ส่วนบนสุด และแผ่น absorber ส่วนล่างสุด แบบที่ 2 เหมือนกับแบบที่ 1 คือแบบที่ 2 จะไม่มี glass แบบที่ 3 จะแตกต่างจากแบบที่ 1 และ 2 คือเป็น Double channel แบบที่ 4 จะแตกต่างกับแบบที่ 3 คือเป็น double air flow (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ชนิดของ solar collector ทั้ง 4 แบบ รูป a ถึง d แสดง solar collector แบบที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ (Ong,1995)

$$\text{แบบที่ 1 (a) } S_2 = h_2(T_2 - T_n) + h_{r21}(T_2 - T_1) + U_b(T_2 - T_a)$$

$$\text{แบบที่ 2 (b) } 0 = h_2(T_2 - T_n) + h_{r21}(T_2 - T_1) + U_b(T_2 - T_a)$$

$$\text{แบบที่ 3 (c) } S_1 = h_{r21}(T_2 - T_1) + h_{nc}(T_2 - T_1) = U_t(T_1 - T_a)$$

$$S_2 = h_3(T_2 - T_{r2}) + h_{nc}(T_2 - T_1) + h_{r23}(T_2 - T_3) + h_{r21}(T_2 - T_1)$$

$$\text{แบบที่ 4 (d) } S_1 + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_1(T_n - T_1) = U_t(T_1 - T_a)$$

$$h_2(T_2 - T_n) = h_1(T_n - T_1) + Q_1$$

$$S_2 = h_3(T_2 - T_{r2}) + h_2(T_2 - T_n) + h_{r23}(T_2 - T_3) + h_{r21}(T_2 - T_1)$$

$$h_3(T_2 - T_{r2}) = h_4(T_{r2} - T_3) + Q_2$$

$$h_4(T_{r2} - T_3) = h_{r23}(T_2 - T_3) = U_b(T_3 - T_a)$$

S คือ solar radiation ดูดซับโดย surface (W/m^2) $T_{1,2,3}$ คืออุณหภูมิของพื้นผิว 1,2,3 ตามลำดับ(K) T_a คืออุณหภูมิ ambient (K) $h_{1,2,3,4}$ คือ forced convection heat transfer coefficient ($W/m^2 K$) h_{nc} คือ natural convection heat transfer coefficient ($W/m^2 K$) $T_{n,r2}$ คือ mean fluid temperature U_b คือ bottom loss coefficient ($W/m^2 K$) U_t คือ top loss coefficient งานวิจัยนี้ได้พบว่า เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มมากขึ้นอุณหภูมิจะลดลง สำหรับอัตราการไหลที่สูงกว่า อุณหภูมิที่ใช้ operate ใน collector จะต่ำกว่าแต่ประสิทธิภาพจะสูงกว่า เมื่อ wind heat transfer coefficient ลดลง over all top heat loss coefficient และอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างกระจกชั้นในสุดกับอากาศจะลดต่ำลง

H.D Ammari และคณะ (2003) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ performance ทางความร้อนของ solar air heater ที่มี slats (รูปที่ 2.2) โดยศึกษา single air pass flat plate collector ช่องอากาศไหลเวียนที่เชื่อมต่อกับ absorber plate และส่วน bottom plate เพื่อให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ดี นอกจากนี้ยังได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพัฒนาโดยอิทธิพลจากส่วน metal slats ที่เพิ่มเข้ามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ solar air heater โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของผลเฉลยซ้ำได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อแก้สมการ governing energy เพื่อประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยของ collector ผลกระทบของอัตราปริมาตรการไหลของอากาศ ความยาว collector ช่องว่างระหว่าง absorber และ bottom plate ต่อ performance ทางความร้อน นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบเชิงตัวเลขของการออกแบบ solar air heater งานวิจัยนี้ ผลแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีการปรับปรุงจะมีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ดีกว่าโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ คือ

- useful energy output (q_u)

$$(q_u) = F' [S - U_L (T_f - T_a)]$$

เมื่อ F' คือ factor ที่ใช้ใน math model ของ solar collector , S คือ solar radiation absorbed โดย the absorber surface (W/m^2) , C_p คือ specific heat ($J/kg K$) , U_L คือ overall heat transfer coefficient , T_f คือ fluid temperature , T_a คือ ambient temperature

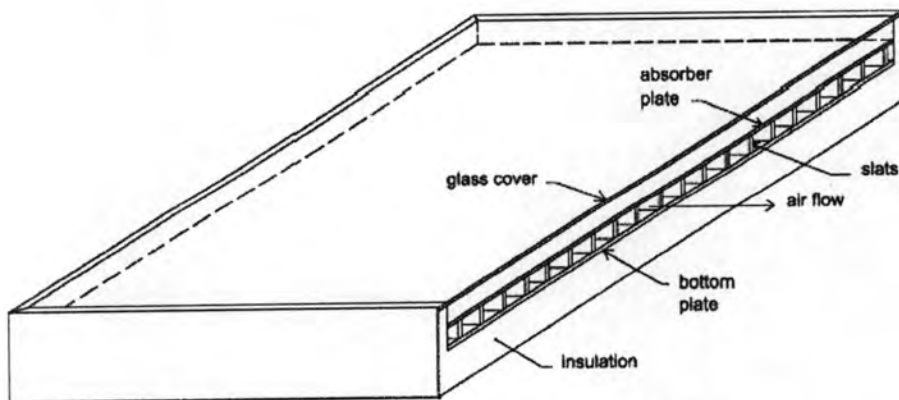
- daily average efficiency

$$\eta_{av/day} = \frac{\int_0^{day} m C_p (T_{f,o}(L_c, t) - T_{f,i}(0, t)) dt}{\int_0^{day} I_T(t) A_c dt}$$

- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ factor ที่ใช้ใน mathematical model

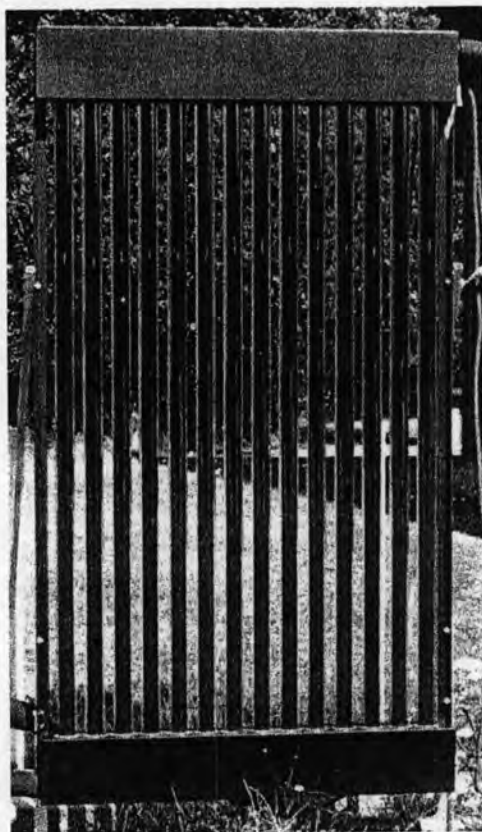
$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_c + \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_{r,1-3}}}}}$$

h_c คือ heat transfer coefficient ของ collector , $h_{r,1-3}$ คือ heat transfer coefficient ของ absorber plate ถึง bottom plate , U_L = Top loss coefficient



รูปที่ 2.2 solar air heater กับ slats (Ammari และคณะ ,2003)

L.Shah และคณะ (2004) ได้ศึกษา evacuated tubular collector ในแนวตั้ง(รูปที่ 2.3)โดยใช้ประโยชน์จาก solar radiation ทุกทิศทางโดยใช้ collector 2 แบบคือ Arcon HT flat plate collector และ evacuated tubular collector โดยศึกษาทั้งการทดลองและทฤษฎี สำหรับการทดลองจะทำ 2 แห่งคือเมือง Uumannaq ที่เกาะกรีนแลนด์ และเมืองโคเปนเฮเกนในประเทศเดนมาร์ก ส่วนการทดสอบแบบจำลองทางทฤษฎีนั้นสมการ performance ของ flat plate collector ได้อินทิเกรตเหนือ absorber โคครอบและแบบจำลองจะคำนวณจาก shading ในท้องซึ่งเป็นฟังก์ชันของ solar azimuth ผลการทดสอบทั้งจากการทดลองและทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าตัวท่อที่มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลาง 0.2 m และ collector azimuth อยู่ระหว่าง $45-60^{\circ}$ ไปทางทิศตะวันตกจะมี performance ทางความร้อนสูงสุดสำหรับการทดลองที่เดนมาร์กและเกาะกรีนแลนด์ Arcon HT flat plate collector มีประสิทธิภาพดีที่สุดที่เมืองโคเปนเฮเกน แต่ evacuated tubular collector มีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ Uumannaq เนื่องจากที่โคเปนเฮเกนนั้น collector ไม่ได้เอียงทำมุมที่ optimum ในเมือง Uumannaq มี latitude สูงกว่า และ solar radiation มากกว่าเพราะฉะนั้น evacuated tubular collector จึงสามารถใช้ประโยชน์จาก solar radiation ได้มากกว่า



รูปที่ 2.3 Evacuated tubular collector (Shah และคณะ ,2004)

- ทฤษฎีสมรรถนะ (P_u)

$$(P_u) = P_b + P_d + P_{gr} - P_{loss}$$

โดย P_u คือ useful power from collector/tube (W), P_b คือ power จาก beam radiation on collector/tube (W), P_{gr} คือ Power from ground-reflected radiation on collector/tube (W), P_d คือ power จาก diffuse radiation (W) และ P_{loss} คือ Heat loss from collector tube (W)

$$P_{loss} = 2\pi L r_p U_L (T_{fm} - T_a)$$

โดย L คือ pipe length (m), r_p คือ Absorber radius (m), U_L คือ heat loss coefficient based on absorber area ($W/(m^2K)$), T_{fm} คือ Fluid's mean temperature, T_a คือ ambient temperature

$$P_d = 2\pi r_p L F'(\tau\alpha)_e K_{\theta,d} G_d \int_{-\pi}^{\pi} F_{c-s} d\xi$$

โดย $K_{\theta,d}$ คือ incident angle modifier for diffuse radiation (ไม่มีหน่วย) G_d คือ diffuse radiation on horizontal (W/m^2), F_{c-s} คือ view factor from tube to sky, ξ คือ absorber surface azimuth F' คือ collector efficiency factor $(\tau\alpha)_e$ คือ effective transmittance absorptance product

$$P_{gr} = 2\pi r_p L F'(\tau\alpha)_e K_{\theta,gr} G_{gr} \int_{-\pi}^{\pi} F_{c-g} d\xi$$

โดย $K_{\theta,gr}$ คือ incident angle modifier for ground reflect radiation (ไม่มีหน่วย) G_{gr} คือ Ground reflect radiation on horizontal (W/m^2), F_{c-g} คือ view factor from tube to ground

$$P_b = L r_p F'(\tau\alpha)_e G_b \int_{\xi_{start}}^{\xi_{stop}} K_{\theta} R_b d\xi$$

โดย G_b คือ beam radiation on horizontal (W/m^2), K_{θ} คือ incident angle modifier radiation from beam radiation R_b คือ Geometric factor

S.B Riffat และคณะ (2005) ได้พัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อตรวจสอบ performance ของ heat pipe solar collector ที่มี thin membrane (รูปที่ 2.4) โดย heat pipe solar collector ได้ถูกสร้างและออกแบบขึ้นเพื่อที่จะให้ความร้อนจาก solar collector สามารถรับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยมีต้นทุนต่ำ ได้สร้างแบบจำลองทางทฤษฎีซึ่งเป็นการรวมชุดของสมการสมดุลทางความร้อนซึ่งพัฒนาโดยวิธีการวิเคราะห์กระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของ collector เช่น top cover, absorber และพื้นที่ condenser/manifold และได้มีการตรวจสอบความสัมพันธ์เหล่านั้น ในการตรวจสอบ performance ทางความร้อนของ collector ทำโดยใช้แบบจำลองทางทฤษฎี ในการทำนายโดยแบบจำลองพิสูจน์ว่าใช้ได้โดยใช้ข้อมูลการทดลองจากแหล่งที่

อ้างถึง การทดสอบประสิทธิภาพที่ได้อยู่ในช่วง 40-70% ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองเล็กน้อย โดยแบบจำลองทางทฤษฎีที่วิเคราะห์คือ

กระบวนการการถ่ายเทความร้อนส่วน top cover (Q_{inc})

$$(Q_{inc}) = Q_{abc} + Q_{ref} + Q_{tra}$$

Q_{inc} คือ incident radiation Q_{ref} คือ reflection Q_{abc} คือ balance Q_{tra} คือ transmission heat

กระบวนการการถ่ายเทความร้อนใน absorber(evaporator) plate (Q_{dw-a})

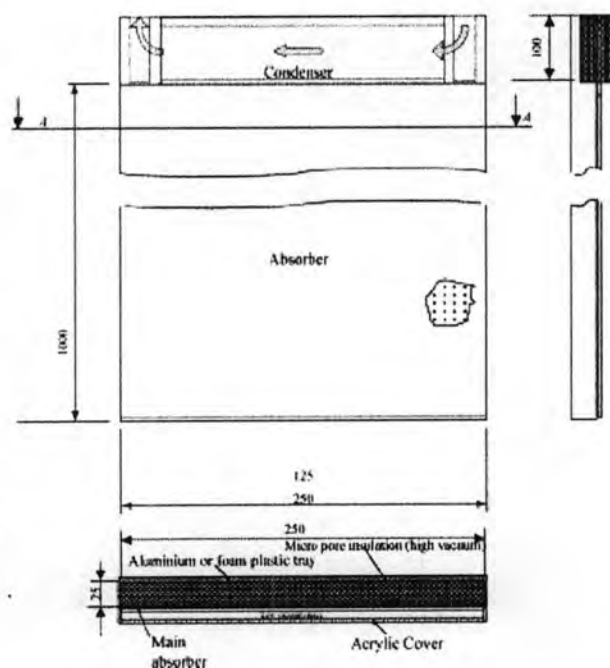
$$(Q_{dw-a}) = A_{ab}(t_{ab}-t_a)(\delta_{ab}/k_{ab} + \delta_{ins}/k_{ins} + \delta_{dw}/k_{dw} + 1/h_a)$$

A คือพื้นที่ ,t คืออุณหภูมิ , δ คือความหนา ,k คือค่าการนำความร้อน ,h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับ subscript dw คือ downside wall ,a คือ ambient ,ab คือ absorber ,ins คือ insulation layer

กระบวนการการถ่ายเทความร้อนใน condenser และ manifold ($Q_{hp,i}$)

$$(Q_{hp,i}) = \pi r_{hp}^2 (t_{hp, evap} - t_{hp, cond}) / R_{hp}$$

r คือ รัศมี ,R คือความต้านทานความร้อน สำหรับ subscript hp คือฮีตไปป์ ,evap คือ evaporator ,cond คือส่วน condenser



รูปที่ 2.4 Thin membrane heat pipe solar collector (Riffat และคณะ ,2005)

Haiting Cui และคณะ (2006) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ performance ทางความร้อนของหน่วยท่อสำหรับตัวรับแบบฮีตไปป์สำหรับใช้ในระบบ solar dynamic ตัวรับแบบฮีตไปป์จะช่วยลดมวลและเพิ่ม performance ทางความร้อนให้แก่ระบบ solar dynamic (รูปที่ 2.5) อุณหภูมิผนังฮีตไปป์, อุณหภูมิ working fluid ที่ไหลออก liquid PCM (Phase Change Material) fraction ของการถ่ายเทความร้อน และความร้อนที่ได้รับของตัวรับความร้อน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม performance และลดการ fluctuation ของอุณหภูมิ working fluid เพื่อที่จะให้ตัวรับความร้อนนั้นมีน้ำหนักลดลงนั้นเป็นไปได้ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้แก่

1. อัตราการสูญเสียความร้อนสูงสุดที่โครงสร้าง wick ($Q_{capillary}$)

$$(Q_{capillary}) = \frac{4\sigma}{L_{eff}(F_l + F_v)}$$

โดย Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน σ คือ surface tension, L_{eff} คือ effective heat pipe length, F_l คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของของไหล, F_v คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของก๊าซ

2. ชีดจำกัดความหนืด ($Q_{viscous}$)

$$(Q_{viscous}) = \frac{A_v D_v^2 h_{fg} \rho_0 p_0}{64 \mu L_{eff}}$$

A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องก๊าซ, D_v คือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องก๊าซ, h_{fg} ความร้อนในการระเหย, ρ_0 คือ stagnation vapor density, p_0 คือความดันใน evaporator, μ คือ dynamic viscosity

3. ชีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q_{sonic})

$$(Q_{sonic}) = A_v h_{fg} \rho_0 \left[\frac{K' R_g T_0}{2(K'+1)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

K' คืออัตราส่วนของ specific heat, R_g คือค่าคงที่ของแก๊ส, T_0 คือ stagnation temperature ของ gas ใน evaporator

4. อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดการผสม ($Q_{entrainment}$)

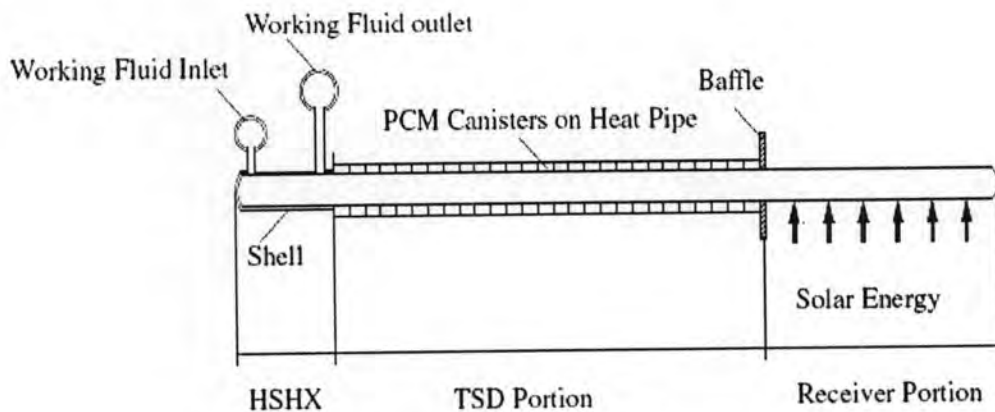
$$(Q_{entrainment}) = A_v h_{fg} \left(\frac{\sigma \rho_v}{2\tau_{hyd}} \right)^{1/2}$$

ρ_v ความหนาแน่นก๊าซ, τ_{hyd} คือ hydraulic radius ของ wick surface pore

5. การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดในการเดือด (Q_{boil})

$$(Q_{boil}) = \frac{2\pi L_{evap} K_{eff} \Delta T_{crit}}{\ln(r_i / r_v)}$$

L_{evap} ความยาวของ evaporator, k_{eff} คือ effective wick thermal conductivity, ΔT_{crit} คือ super heat ที่ต้องการสำหรับการเดือด r_i คือรัศมีภายในของท่อ r_v คือรัศมีช่องอากาศ (vapor passage radius)

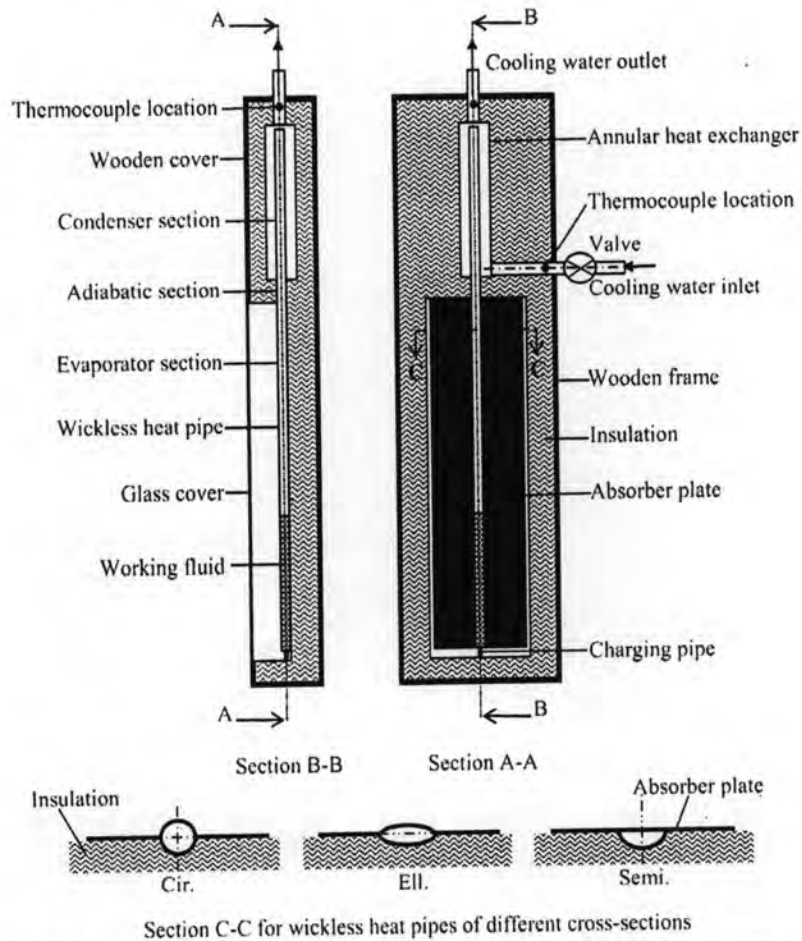


รูปที่ 2.5 หน่วยท่อของตัวรับแบบฮีตไปป์ (Cui และคณะ, 2006)

H.M.S Hussein (2006) ได้ศึกษา performance ของ wickless heat pipe flat plate solar collector (รูปที่ 2.6) ที่มีเรขาคณิตหน้าตัดและ filling ratio ต่างกันโดยทำการศึกษาที่กรุงไคโร ในประเทศอียิปต์ โดยเรขาคณิตหน้าตัดที่ศึกษามี 3 แบบได้แก่ circular, elliptical และ semi circular และ fluid ที่กลั่น filling ratio ที่ศึกษาจะมี 3 แบบคือ 10%, 20% และ 30% นอกจากนั้นยังได้ทดสอบอุณหภูมิน้ำเข้าที่แตกต่างกัน และอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าหน้าตัดแบบ elliptical จะมี performance ดีกว่าหน้าตัดแบบ circular ที่ water filling ratio ต่ำ จุด optimum ของ water filling ratio ของหน้าตัดแบบ elliptical จะน้อยกว่า circular ที่ water filling ratio 20% หน้าตัดแบบ semi circular จะมี performance ไม่ดีเมื่อเทียบกับหน้าตัดแบบอื่น

M. Agustus และคณะ (2007) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ unglazed transpired solar collectors หรือ UTC โดยได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ UTC (รูปที่ 2.7) โดยใช้การอธิบายการถ่ายเทความร้อน สำหรับส่วนประกอบของ collector และความสัมพันธ์ empirical สำหรับการประมาณการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ ซึ่งจะทำนาย performance ทางความร้อนของ UTC เหนือช่วงการออกแบวกว้าง ๆ และสภาพการทำงานของผลของ model ที่ได้ก็เพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์ผลกระทบตัวแปรสำคัญบน performance ของ UTC สำหรับการส่งผ่านอากาศ 45-55 °C สำหรับการนำไปอบ การศึกษาตัวแปรทำโดยแปรค่าของรูพรุน อัตราการไหลของอากาศ solar radiation และ solar absorbtivity/thermal emissivity และหาอิทธิพลเหล่านั้นบนประสิทธิภาพของ

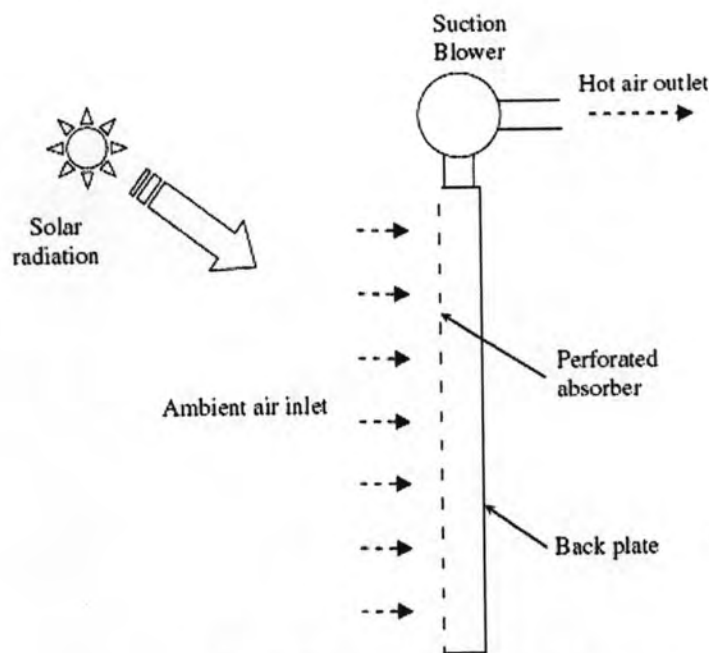
collector ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นและความร้อนที่ได้รับ ผลการวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่า performance ของความร้อนบน UTC ในช่วงอุณหภูมินี้ (45-55 °C) จะ เหมาะแก่การอบผลิตภัณฑ์อาหาร



รูปที่ 2.6 หน้าตัดของ wickless heat pipe flat plate solar collectors ตัวต้นแบบ (Hussein ,2006)

H.M.S Hussein และคณะ (2007) ได้ศึกษา wickless heat pipe flat plate solar collector (รูปที่ 2.8) ที่มี crossflow heat exchanger โดยทดสอบทั้งการทดลองและทฤษฎีโดยทดสอบที่กรุงไคโร ใน ประเทศอียิปต์ โดยได้จำลอง wickless heat pipe flat plate โดย solar water heaters ได้ถูกปรับปรุง เพื่อให้ใช้ได้ดีกับ wickless heat pipe ทั้งนี้ solar collector ชนิดนี้ประกอบด้วยผลเฉลยของ governing equation ของการวิเคราะห์สำหรับการพิสูจน์การจำลอง program wickless heat pipe flat plate solar collector ที่มี crossflow heat exchanger ซึ่งได้ถูกสร้างออกแบบและทดสอบที่สภาพอากาศและตัวแปร ค่าต่างกัน ตัวแปรประกอบด้วย อัตราการไหลของน้ำและอุณหภูมิน้ำเข้าที่แตกต่างกัน การเปรียบเทียบ

ระหว่างผลการทดลองกับการจำลองจะสอดคล้องกันภายใต้สภาพอากาศที่แตกต่างกัน ผลการทดลองกับทฤษฎีได้แสดงให้เห็นอัตราการไหล optimal จะใกล้เคียงกับ ASHRAE standard สำหรับการทดสอบ flat plate solar collectors ผลการทดลองและทฤษฎีได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวน wickless heat pipe จะมีผลกระทบกับประสิทธิภาพของ collector



รูปที่ 2.7 UTC (Agustus และคณะ ,2007)

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่

1. อัตราสมดุลพลังงานของส่วน condenser

$$\rho_{co} A_{ccs} C_{\infty} \frac{\partial T_{co}}{\partial t} = \pi d_i h_{co} (T_s - T_{\infty}) - \pi d_o h_{f,i} (T_{co} - T_w)$$

โดย ρ คือความหนาแน่น ,A คือพื้นที่ ,C คือความจุความร้อนจำเพาะ ,T คืออุณหภูมิ ,t คือเวลา ,d คือเส้นผ่านศูนย์กลาง ,h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สำหรับ subscript นั้น ,co คือส่วน condenser ,ccs คือ wall cross section ของส่วน condenser ,i คือ inside ,s คือ saturation ของ working fluid ของ wickless heat pipe ,fi คือ convective heat transfer ระหว่างส่วน condenser และส่วน cooling water w คือ water

2. อัตราสมดุลพลังงานในแต่ละส่วนของน้ำใน cross flow heat exchanger

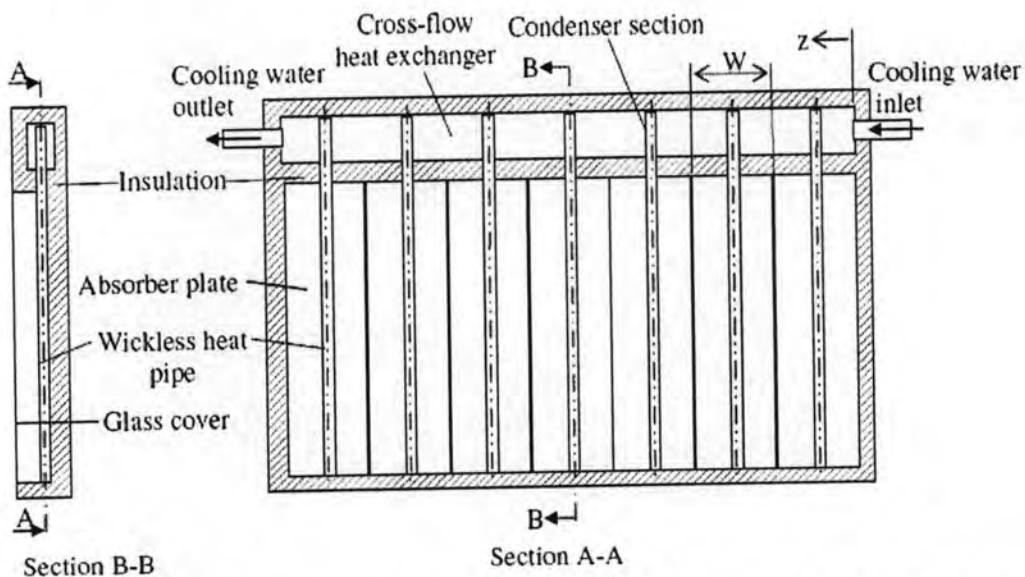
$$\rho_w A_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + m_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\pi d_o l_{co}}{W} h_{fo} (T_{co} - T_w) - P_{exi} h_{fo} (T_w - T_{ex})$$

โดย m คืออัตราการไหลใน heat exchanger, l คือ liquid phase ของ working fluid ใน wickless heat pipe, P คือ perimeter สำหรับ subscript นั้น ex คือ heat exchanger

3. อัตราสมดุลพลังงานในแต่ละส่วนของ cross flow heat exchanger

$$\rho_{ex} A_{excs} C_{ex} \frac{\partial T_{ex}}{\partial t} = k_{ex} A_{excs} \frac{\partial^2 T_{ex}}{\partial z^2} - P_{exi} h_{fo} (T_w - T_{ex})$$

โดย k คือ thermal conductivity ส่วน subscript นั้น exi คือ พื้นที่ภายในของ heat exchanger $excs$ คือ heat exchanger wall cross section



รูปที่ 2.8 หน้าตัดของตัว wickless heat pipes absorber plates, และ crossflow heat exchanger ของ wickless heat pipes flat plate solar collectors (Hussein และคณะ ,2007)

พิชัย ตั้งสถาพรพาณิชย์ (2529) ได้สร้างฮีทไปป์ไว้วัดโดยใช้ท่อแก้ว และทดสอบสมรรถนะที่มุมเอียงต่างๆ พบว่าที่มุมเอียง 70 องศา มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ได้ศึกษาเปลี่ยนอัตราการไหลของไหลทำงาน และเขียนโปรแกรมสำหรับคำนวณ และออกแบบพบว่าอุณหภูมิของออยล์บาร์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 120-125 [C] โดยเวลาจุ่มที่เหมาะสมประมาณ 5 นาที เมื่อเติมของไหลทำงานแล้วปล่อยให้

ให้ฮีทไปป์ทำงาน ของไหลทำงานจะลดลง 15 % และพบว่า การเก็บฮีทไปป์ตากแดดจะทำให้ฮีทไปป์เสื่อมสภาพ

ปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์ (2533) ได้ศึกษาโดยออกแบบดัดแปลงจากหม้อน้ำรถยนต์ โดยเป็นแบบ close loop ประยุกต์ใช้กับเตาเผาในอุตสาหกรรมโดยเอาความร้อนเหลือกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ท่อทองแดง และน้ำเป็นของไหลใช้งาน

วันชัย โกมลภมร (2530) ได้ศึกษาฮีทไปป์ แบบไหลครบวงจร หา อุณหภูมิ ปริมาณของเหลว และ มุมเอียงที่ เหมาะสม การไหลของไอและของเหลวควบแน่นเป็นวงจรในทิศทางเดียว ในการออกแบบฮีทไปป์แบบนี้ช่วยให้ฮีทไปป์ไร้วิกมีประสิทธิภาพดีขึ้น

สมใจ พิเชียรโสภณ (2526) ได้ศึกษาสมรรถนะเชิงทดลอง และจาก ทฤษฎีฮีทไปป์ ชนิดทองแดงและน้ำ ใช้วิกเป็นแบบตาข่าย ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงในการทดลองคือ มุมเอียง พลังค์ความร้อน พบว่าที่มุมเอียง 0 ถึง 20 องศา มีการถ่ายเทความร้อนดี หลังจากนั้นจะค่อนข้างคงที่ ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับมุมเอียง

ธนศักดิ์ ชุมวิสูตร (2546) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ แบบลวดตาข่าย โดยใช้ R-12 เป็นของไหลทำงาน ผลการทดสอบพบว่า ฮีทไปป์ทำงานได้ดีเมื่อมีแรงโน้มถ่วงช่วย (ส่วนของการควบแน่นสูงกว่าส่วนของการทำระเหย) โดยได้ฮีทฟลักซ์สูงสุด 1546.945 kW/m^2 ที่มุมเอียง 45 องศา กับแนวระดับ

ณิวัฒนา อัครวรักษ์ (2548) ได้ออกแบบสร้างและทดสอบสมรรถนะของฮีทไปป์ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบใช้งานได้ ฮีทไปป์ที่ใช้ทดสอบทำมาจากท่อทองแดง โดยใช้เมทานอลเป็นของเหลวทำงานโดยสร้างท่อฮีทไปป์ ที่ใช้วิกต่างๆกัน 3 แบบ คือ แบบไมโครกรูฟแบบลวดตาข่าย และ แบบไมโครกรูฟใส่ลวดตาข่าย ในการทดสอบหาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนนั้น ทำการทดสอบที่อุณหภูมิของส่วนอีแวปโปเรเตอร์ ตั้งแต่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส ได้ทำการทดสอบมุมเอียง 3 มุมเอียง คือ มุม 3 , 5 และ 7 องศา เทียบกับแนวระดับ โดยให้ของไหลทำงานไหลด้านแรงโน้มถ่วงของโลก จากการทดสอบพบว่า ฮีทไปป์ที่ทำการทดสอบ สามารถทำงานด้านแรงโน้มถ่วงของโลกได้ สำหรับฮีทไปป์ที่มีวิกแบบไมโครกรูฟ การถ่ายเทความร้อนที่สามารถวัดได้น้อยมากจนถึงได้ว่าไม่มี การถ่ายเทความร้อน ส่วนฮีทไปป์ที่มีวิกแบบลวดตาข่าย สามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงถึง 51.3 W การปรับปรุงให้ฮีทไปป์มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น สามารถทำได้โดยการทำให้แรงคาปิลลารีมีค่าสูงขึ้นซึ่งทำได้หลายวิธี ทั้งการใช้ของไหลทำงานที่มีค่าแรงดึงผิวสูงๆ และใช้วิกแบบสามารถให้แรงคาปิลลารีสูงๆ เป็นต้น

มานิจ มานะศิลป์ (2550) ได้ศึกษาสมรรถนะของฮีตไปป์ที่ใช้ซินเทอร์เมทที่เรียบเป็นวิก โดยใช้ผงทองแดงมาทำเป็นวัสดุซินเทอร์เมทที่เรียบเพื่อเป็นวิกของฮีตไปป์โดยใช้ผงทองแดงขนาด 212-300 ไมโครเมตร และใช้น้ำเป็นของไหลใช้งาน จากการทดลองพบว่าฮีตไปป์ที่สร้างขึ้นสามารถทำงานในสภาวะด้านแรงโน้มถ่วงของโลกได้ โดยที่มุมติดตั้ง 90° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีกว่าท่อกลม สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของฮีตไปป์จะขึ้นอยู่กับมุมติดตั้ง ที่มุม 90° ฮีตไปป์ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด ที่มุม 0° ฮีตไปป์ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดในการดำเนินการทำงานด้านแรงโน้มถ่วงของโลก

2.2 ดวงอาทิตย์และพลังงานแสงอาทิตย์

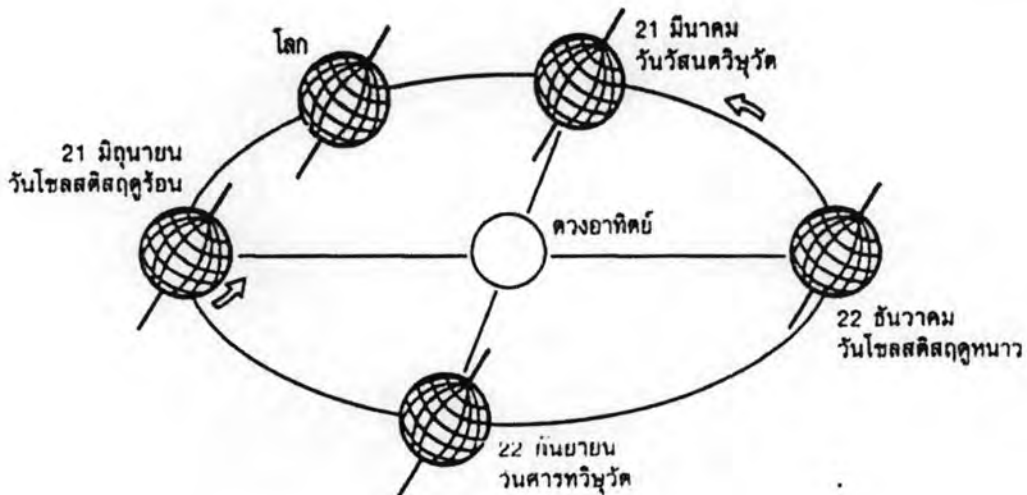
ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ประกอบด้วยกลุ่มก๊าซร้อน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.39×10^6 กิโลเมตรซึ่งมีขนาดใหญ่เป็น 110 เท่าของโลกหนัก 2.2×10^{27} ตัน มีอุณหภูมิที่พื้นผิว 5800 K และ 15,600,000 K ที่แกนกลาง ดวงอาทิตย์ประกอบด้วย ไฮโดรเจน 75% และ ฮีเลียม 25% นับโดยมวล (ไฮโดรเจน 92.1% และฮีเลียม 7.8% นับโดยจำนวนอะตอม) ที่เหลือจำนวน 0.1% เป็นโลหะ สัดส่วนเหล่านี้เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ โดยดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนไฮโดรเจนในแกนของมันให้กลายเป็นฮีเลียม

พลังงานของดวงอาทิตย์ประมาณ 386 พันล้าน พันล้าน เมกกะวัตต์ ผลิตโดยปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน ทุก ๆ หนึ่งวินาที ดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนไฮโดรเจน 700,000,000 ตัน ให้กลายเป็นฮีเลียม 695,000,000 ตัน และพลังงานในรูปของรังสีแกมมาอีกจำนวน 5,000,000 ตัน พุ่งตรงมายังพื้นผิว จากนั้นพลังงานถูกดูดกลืนเข้าไปและเปล่งออกไปอีก ทำให้อุณหภูมิลดต่ำลงเมื่อถึงพื้นผิว กลายเป็นแสงที่มองเห็นได้ ณ ช่วง 20% สุดท้ายก่อนที่จะถึงพื้นผิว

พื้นผิวของดวงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 ชั้นโดยบรรยากาศชั้นที่ติดกับผิวดวงอาทิตย์เรียกว่า โฟโตสเฟียร์(Photosphere) ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามายังโลก ถัดออกไปอีกเป็นชั้นของชั้นสโตนกิลและโครโมสเฟียร์ (Chromosphere) จนชั้นนอกสุดที่เป็นชั้นพวยพุ่งของแสงเรียกว่าชั้นโคโรนา (Corona)

เนื่องจากวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรีขณะที่มีการหมุนรอบตัวเอง โดยแกนหมุนเอียงทำมุมกับแนวตั้ง 23.45 องศา จะเกิดฤดูกาล ซึ่งมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์หลากหลายแก่โลก รูปที่ 2.9 แสดงวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์และตำแหน่งของโลกที่สำคัญ ตำแหน่งหลักบนเส้นวงรีมีอยู่ 2 แกนๆละ 2 ตำแหน่งดังนี้

1. แกนสั้นของวงรี มี 2 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นวันที่เวลากลางวันจะเท่ากับกลางคืน ซึ่งเรียกว่า วันวิษุวัต (Equinox) มี 2 วันคือวันที่ 21 มีนาคม เรียกว่า วสันตวิษุวัต (Vernal Equinox) และวันที่ 22 กันยายน เรียกว่า ศารทวิษุวัต (Autumnal Equinox) ตำแหน่งทั้ง 2 แสงอาทิตย์จะตั้งฉากกับโลกที่เส้นศูนย์สูตรตอนเที่ยงวัน
2. แกนยาวของวงรี มี 2 ตำแหน่ง เป็นวันที่โลกอยู่ไกลจากดวงอาทิตย์ประกอบการเอียงของของแกนหมุนของโลก จะทำให้ช่วงเวลากลางวันไม่เท่ากับเวลากลางคืนเรียกว่า วันโซลสติส (Solstice) มีอยู่ 2 วันคือ วันที่ 21 มิถุนายน เรียกว่าวัน โซลสติสฤดูร้อน (Summer Solstice) ซึ่งเป็นวันที่แสงอาทิตย์สามารถตั้งฉากกับโลกที่เส้นรุ้ง 23.5 องศาเหนือ (Tropic of Cancer) ที่เที่ยงวัน บริเวณเส้นรุ้ง 66.5 องศาเหนือ ถึงขั้วโลกเหนือจะเป็นกลางวันตลอด 24 ชั่วโมง (รูปที่ 2.10) และวันที่ 22 ธันวาคม เรียกว่าวัน โซลสติสฤดูหนาว (Winter Solstice) อันเป็นวันที่แสงอาทิตย์สามารถตั้งฉากกับโลกที่เส้นรุ้ง 23.5 องศาใต้ (Tropic of Capricorn) ที่เที่ยงวัน บริเวณเส้นรุ้ง 66.5 องศาใต้ ถึงขั้วโลกใต้จะเป็นกลางคืนตลอด 24 ชั่วโมง

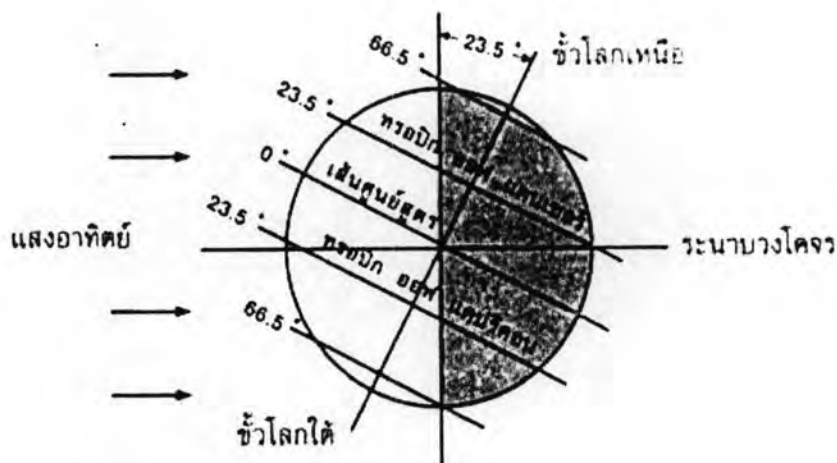


รูปที่ 2.9 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์และตำแหน่งของโลกที่สำคัญ

บรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกประกอบไปด้วย อากาศ ไอน้ำและอนุภาคฝุ่น ในอากาศยังมีโมเลกุลของก๊าซหลายๆหลายชนิดซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่พุ่งตรงมายังโลกกระจัดกระจาย (Scattering) ถูกเปลี่ยนทิศทางและถูกดูดกลืน (absorption) มีเพียงบางส่วนที่สามารถผ่านลงมาได้ ซึ่งสามารถแบ่งพลังงานแสงอาทิตย์ได้ 2 แบบคือ

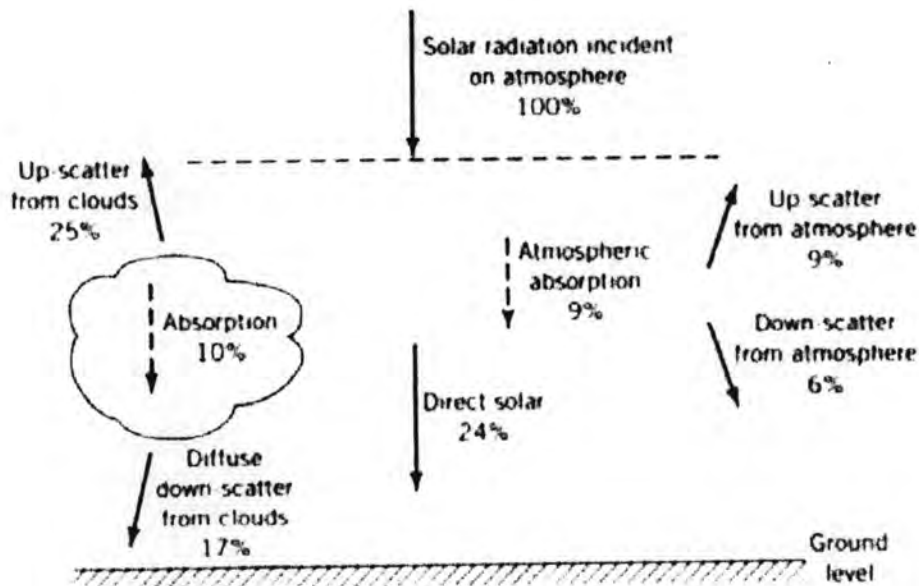
1.พลังงานแสงอาทิตย์แบบตรง(direct radiation) มาจากการเดินทางของคลื่นที่นำพลังงานแสงอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ตกกระทบ ณ ตำแหน่งนั้นๆ โดยตรงซึ่งจะปรากฏเงาขึ้นเมื่อมีการบังแสง

2.พลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจาย(diffuse radiation) เกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์แนวตรงที่ถูกเปลี่ยนคุณสมบัติโดยสภาพบรรยากาศและสภาพภูมิศาสตร์ ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์กระจัดกระจายทุกทิศทาง ตัวอย่างเช่น เมื่ออยู่ในที่ร่มก็ยังสามารถรับรู้ถึงความร้อนและความสว่างได้ ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจาย



รูปที่ 2.10 เรขาคณิตที่แสงอาทิตย์ส่องบนเส้นรุ้ง 23.5 องศาเหนือได้ และ 66.5 องศาเหนือได้

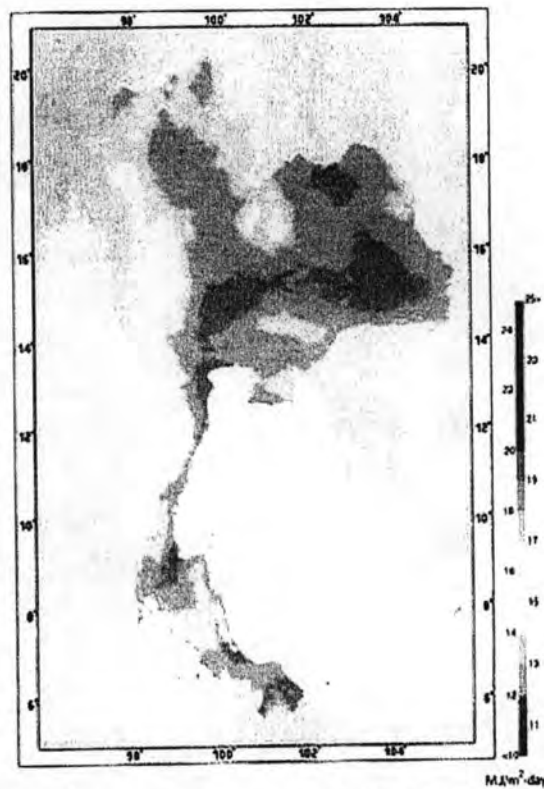
รูปที่ 2.11 แสดงสัดส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงบนโลก โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งมา 100 % ที่ตกลงบนชั้นบรรยากาศโลกจะมีเพียง 24 % โดยไม่เปลี่ยนทิศ (รังสีตรง) และจะมีรังสีหักเหเปลี่ยนทิศทางในก้อนเมฆ ฝุ่นละอองและชั้นบรรยากาศอีก 23 % (รังสีกระจาย) เท่านั้นที่ตกลงมาถึงพื้น



รูปที่ 2.11 สัดส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงบนโลก

2.3 ศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

จากข้อมูลแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย(พ.ศ.2542) โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ในแต่ละเดือนของประเทศได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m²-day บริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยตลอดปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัด นครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลาง ที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อุดรธานี และลพบุรี โดยได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีประมาณ 19 ถึง 20 MJ/m²-day พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีในช่วง 18 ถึง 19 MJ/m²-day จากการคำนวณพบว่ารังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m²-day ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงและเพียงพอที่จะนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้



รูปที่ 2.12 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ.2542)

2.4 ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์และภูมิอากาศ

จากการที่พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนผิวโลกแปรเปลี่ยนตามเวลา ทำให้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ดูดกลืนได้โดยแผงรับแสงอาทิตย์แปรเปลี่ยนตามเวลาด้วย การที่จะทราบถึงประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ได้นั้นจะขึ้นกับข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์และข้อมูลภูมิอากาศซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการคำนวณและการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพ

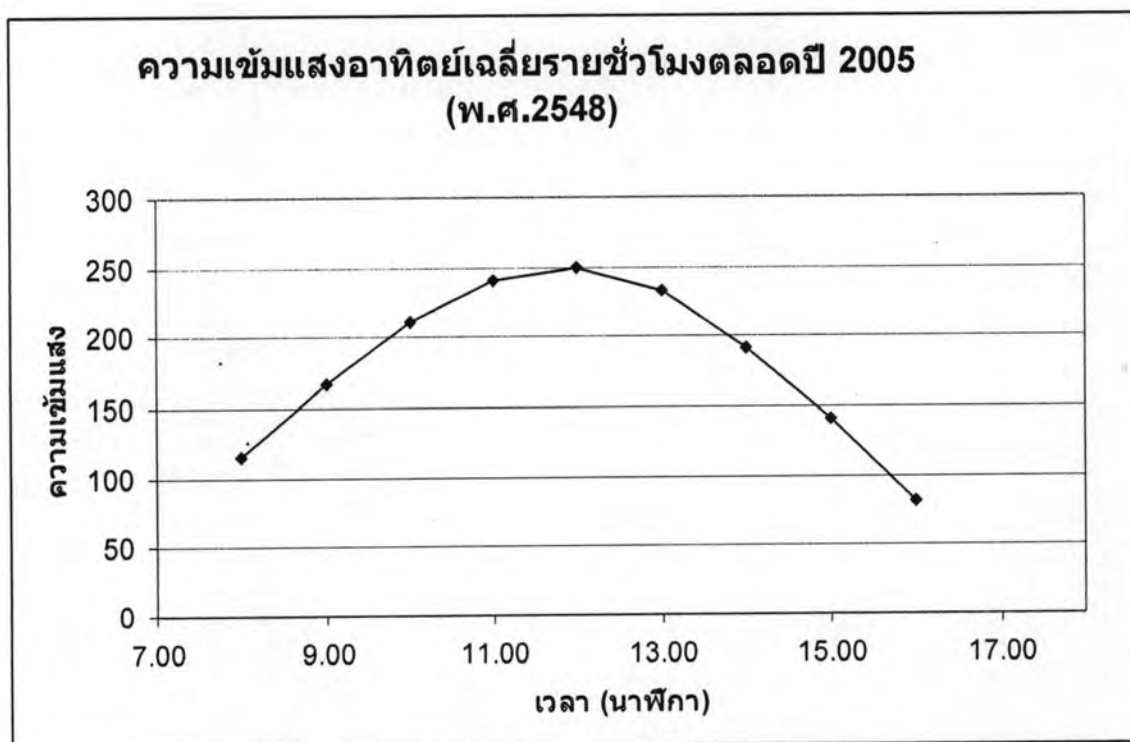
2.3.1 ข้อมูลความเข้มของแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมง

เป็นข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้จริงในปีที่ผ่านมา ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลความเข้มของแสงอาทิตย์ที่บันทึกไว้ในปี 2548 โดยกรมอุตุนิยมวิทยา ณ กรุงเทพมหานคร (กราฟที่ 2.1 และตารางที่ 2.1) ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์ในปีที่ผ่านมาที่เวลาใดเวลาหนึ่งอาจมีค่าไม่เท่ากับความเข้มของแสงอาทิตย์ที่เวลาเดียวกันของปีปัจจุบัน อย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้อาจจะไม่มีผลมาก

นักต่อการคำนวณหาประสิทธิภาพ เนื่องจากปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละปี

2.3.2 ข้อมูลอุณหภูมิของอากาศภายนอกเฉลี่ยรายชั่วโมง

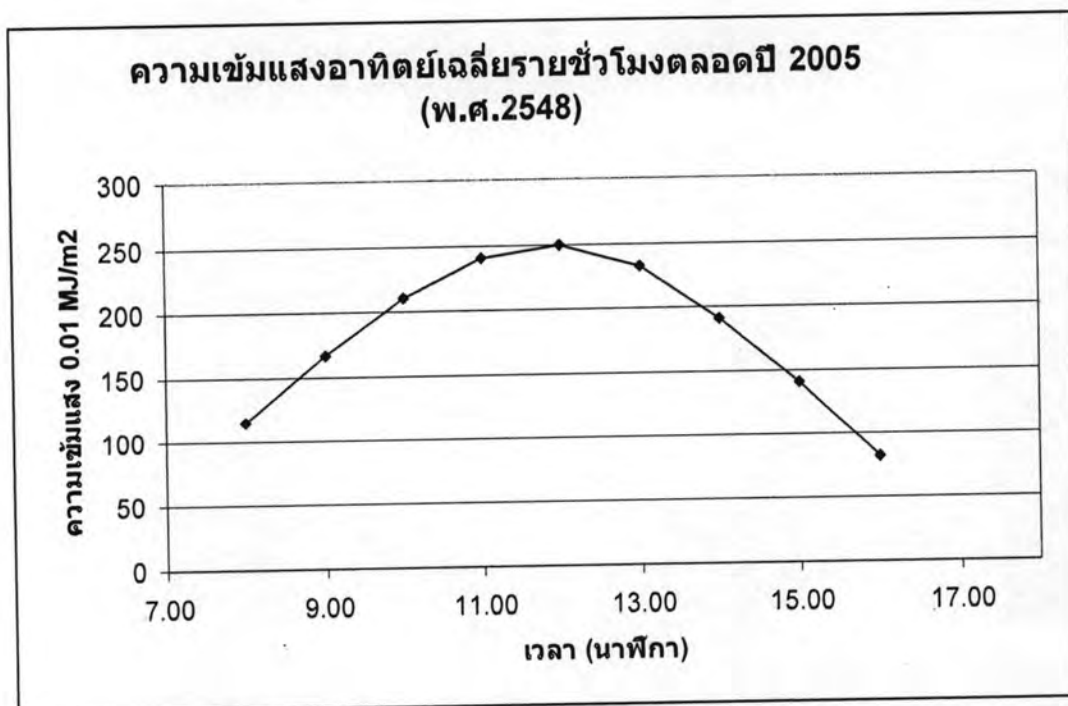
เป็นข้อมูลอุณหภูมิของอากาศภายนอกที่วัดได้จริงในปีที่ผ่านมา ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลอุณหภูมิของอากาศภายนอกที่บันทึกไว้ในปี 2548 โดยกรมอุตุนิยมวิทยา ณ กรุงเทพมหานคร (กราฟที่ 2.2 และตารางที่ 2.2) มาใช้ซึ่งข้อมูลอุณหภูมิของอากาศภายนอกนี้เป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้คำนวณประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์นี้ด้วย (ความเข้มแสงอาทิตย์ที่แสดงในกราฟ 2.1 มีหน่วยเป็น $\times 0.01 \text{ MJ/m}^2$)



กราฟที่ 2.1 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมงตลอดปี พ.ศ.2548

ตารางที่ 2.1 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมงตลอดปี พ.ศ.2548 หน่วย 0.01 MJ/m^2

Month	Time								
	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	78	133	194	227	245	240	209	145	81
2	93	152	203	250	276	281	248	188	115
3	104	157	206	255	285	290	255	192	108
4	130	182	233	276	296	286	232	182	98
5	143	181	226	247	272	262	209	165	102
6	137	176	218	259	272	247	190	143	96
7	112	170	205	231	233	202	169	117	80
8	118	168	215	228	237	217	166	128	84
9	105	172	200	234	216	195	163	110	61
10	133	182	227	238	229	205	152	115	51
11	125	174	207	220	208	179	153	99	44
12	99	159	202	223	219	192	152	107	52
Mean	115	167	211	241	249	233	192	141	81



กราฟที่ 2.2 อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยรายชั่วโมงตลอดปี พ.ศ.2548

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยรายชั่วโมงตลอดปี พ.ศ.2548 (หน่วย °C)

Month	Time								
	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	24.7	26.4	28	29.6	30.7	31.3	31.6	31.6	31.2
2	27.6	29.3	30.4	31.8	32.4	33.2	33.4	33.3	32.9
3	27.8	29.3	30.4	31.6	32.6	33.2	33.5	33.8	33.5
4	29.8	30.8	31.9	33	33.9	34.4	34.3	34.5	34.3
5	30	31.5	32.5	33.3	33.9	34	34.1	34.2	34
6	29.9	31	31.5	32.1	32.7	33.1	33	33.1	32.6
7	28.7	29.7	30.7	31.4	32.1	32.3	32.6	32	31.1
8	28.3	29.3	30.3	31.3	31.9	32.4	32.5	32.2	31.7
9	27.5	28.7	29.8	30.8	31.4	31.8	31.8	31.9	31.5
10	27.4	29.1	30.5	31.4	32	32	32.1	31.8	31.4
11	27	28.4	29.6	30.5	31.1	31.1	30.7	30.7	30.5
12	23.9	25.4	26.8	28.1	29	29.6	29.8	29.8	29.5
Mean	27.7	29.1	30.2	31.2	32	32.4	32.5	32.4	32

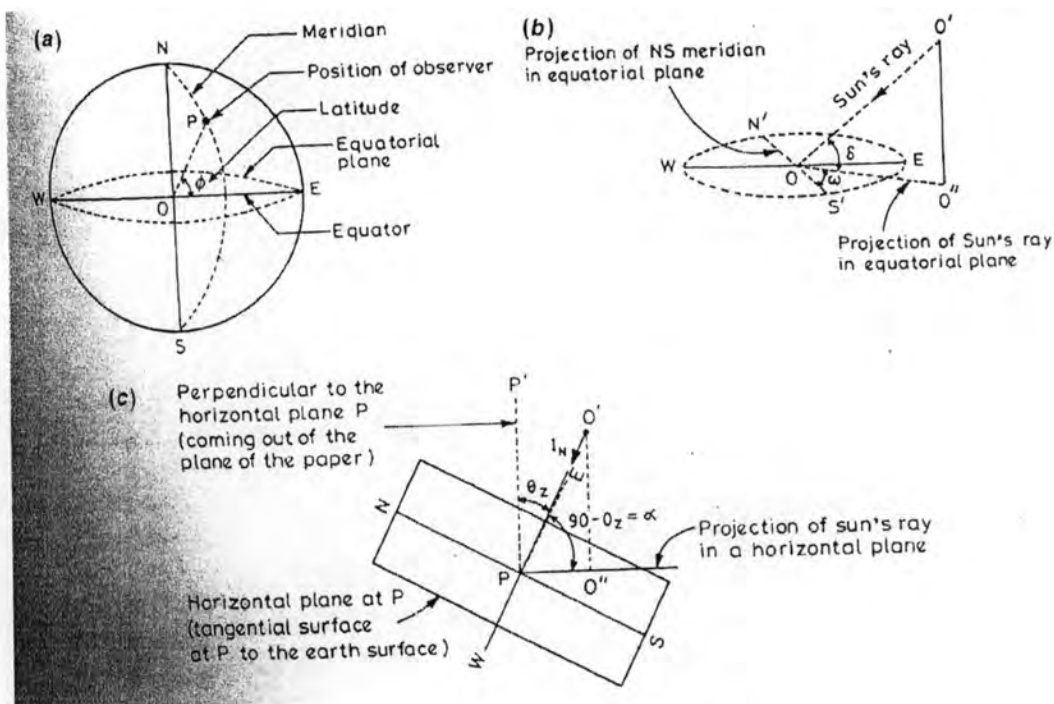
ในตารางที่ 2.3 ได้แสดงความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ยรายเดือนในปี พ.ศ.2549-2550 ณ กรุงเทพมหานคร

2.5 มุมระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก

เมื่อ θ คือมุม incidence หรือมุมตกกระทบของลำแสง I ดังนั้น flux incidence บนระนาบพื้นผิวคือ $I \cos \theta$ มุม θ หาได้จากสมการทั่วไป ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 2.14

ตารางที่ 2.3 ความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ยรายเดือนปี 2549(2006)-2550(2007) กรุงเทพมหานคร :หน่วย m/s

เดือน/ปี	วันที่																															เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
ม.ค.-06	3.6	2.6	3.6	2.6	3.6	3.1	5.1	4.6	3.6	2.6	7.7	3.1	2.6	4.1	4.6	3.6	3.6	5.1	3.6	3.1	5.7	6.2	3.6	4.1	2.6	6.2	3.6	4.1	3.6	2.6	3.6	4.12
ก.พ.-06	5.1	3.1	4.1	5.1	5.1	4.6	6.2	3.1	5.1	4.1	3.6	3.6	5.1	3.1	4.1	6.2	4.1	3.6	6.2	4.6	2.6	4.1	6.7	6.2	4.1	5.1	4.1	6.2				4.63
มี.ค.-06	5.1	4.6	7.2	4.1	4.6	7.2	4.6	4.6	12	5.7	4.6	5.1	6.2	3.6	6.2	4.1	5.1	6.2	5.1	4.1	7.2	5.7	6.7	4.6	4.1	4.6	7.2	13	4.6	9.3	9.8	6.17
เม.ย.-06	4.1	5.1	5.1	4.1	5.1	4.1	11	5.1	12	3.1	5.1	6.2	4.1	5.1	7.2	3.6	7.7	5.1	3.1	4.1	3.6	4.6	6.2	4.1	3.6	5.1	2.6	5.1	7.2	6.2		5.14
พ.ค.-06	3.6	3.1	4.1	3.6	5.1	4.1	6.2	3.6	4.1	4.1	7.2	3.6	6.7	8.2	3.6	2.6	4.1	2.1	9.3	6.2	4.1	4.6	5.1	4.1	5.1	4.1	5.1	6.2	7.7	4.1	4.6	4.63
มิ.ย.-06	5.1	6.2	9.8	4.6	3.6	4.6	8.2	4.1	5.1	7.7	3.1	8.7	4.1	5.1	4.6	8.7	7.7	2.6	2.6	5.1	3.1	4.6	8.2	6.2	3.1	5.1	3.6	4.6	7.7	6.2		5.66
ก.ค.-06	7.2	4.1	4.1	7.2	4.1	7.7	4.1	6.2	3.6	14	2.1	15	3.6	7.2	7.2	4.1	4.6	6.2	3.6	6.2	7.2	7.2	5.1	7.7	7.2	3.6	3.6	3.6	7.7	7.7	6.2	6.17
ส.ค.-06	3.1	3.1	8.2	7.7	7.7	5.1	6.2	4.1	5.1	4.6	4.6	7.2	9.3	16	4.6	6.2	4.1	7.7	7.2	5.1	3.6	6.2	7.7	5.1	7.7	7.2	3.6	3.6	7.7	7.7	6.2	5.14
ก.ย.-06	6.2	5.1	4.1	4.6	6.7	6.2	4.1	5.1	6.2	2.1	4.1	3.1	3.6	2.6	6.2	6.2	9.8	4.1	5.7	3.1	5.1	8.2	6.2	3.1	4.1	2.1	4.1	4.1	6.2	6.2		5.14
ต.ค.-06	3.6	13	4.1	4.1	5.7	4.1	6.2	4.1	4.6	4.1	3.6	4.1	6.2	6.2	2.6	3.1	4.1	7.2	4.6	2.1	3.6	4.1	5.1	2.6	3.1	2.6	4.1	5.1	3.6	3.6	2.6	4.63
พ.ย.-06	4.1	4.6	4.1	6.2	4.6	4.6	4.6	5.1	3.6	4.1	6.2	5.1	2.1	4.1	3.1	3.1	5.1	11	3.6	3.1	3.6	4.1	3.6	8.2	4.1	3.1	3.6	2.1	2.1	3.1		4.12
ธ.ค.-06	3.6	2.6	3.1	5.1	3.6	3.6	4.1	6.2	5.1	2.6	4.1	3.1	3.6	3.1	5.1	5.1	3.6	3.6	3.6	3.6	5.1	3.1	5.7	3.6	4.1	3.6	8.7	6.7	7.2	4.6	4.1	4.63
ม.ค.-07	3.6	5.1	4.1	2.6	4.1	5.1	5.1	3.6	5.7	4.1	6.2	3.6	4.1	4.1	5.1	2.6	2.6	3.6	5.1	4.1	7.2	2.6	5.1	3.6	4.1	3.6	8.7	6.7	7.2			5.14
ก.พ.-07	7.7	5.1	4.1	3.6	1.5	3.1	5.1	4.6	5.1	2.6	5.1	3.6	6.2	5.1	4.1	6.7	3.6	3.6	7.2	6.2	5.1	7.7	6.7	4.6	7.7	4.6	4.1	7.2				5.14
มี.ค.-07	6.7	6.2	7.2	5.1	5.1	6.2	4.6	4.6	6.2	5.1	3.6	7.7	5.1	6.7	6.2	4.6	6.7	6.2	5.7	7.7	5.1	4.1	4.1	5.1	5.7	4.1	5.1	5.1	5.7	6.2	4.6	5.66
เม.ย.-07	6.2	7.7	7.2	5.1	4.6	4.6	7.2	8.2	5.1	4.1	12	3.6	6.2	3.6	6.2	5.1	3.6	7.2	5.1	3.6	7.2	4.6	3.6	7.7	12	8.7	8.2	4.1	3.6	5.1		6.17
พ.ค.-07	3.1	2.6	5.1	5.1	9.3	6.2	3.1	6.2	4.1	7.2	4.6	6.2	2.6	7.2	2.6	6.2	3.6	9.8	4.1	4.1	4.6	4.1	3.1	4.6	9.3	5.1	6.2	8.2	3.6	4.1	7.2	5.14
มิ.ย.-07	2.6	4.6	6.2	5.1	5.1	4.6	3.1	4.1	4.1	3.1	4.6	6.2	4.1	3.1	9.3	3.6	5.7	7.2	5.1	4.1	4.6	4.6	8.7	6.2	3.1	3.6	5.1	16	2.6	13		5.66
ก.ค.-07	9.8	11	6.2	13	5.1	7.2	10	5.1	4.1	7.7	4.6	8.7	6.7	6.2	5.1	7.7	10	4.1	3.6	7.2	6.2	2.1	7.7	6.7	14	9.3	5.1	4.6	4.1	8.7	12	7.2
ส.ค.-07	5.1	4.6	5.1	8.2	9.3	6.2	8.7	8.2	7.7	5.1	7.2	6.2	8.2	7.2	5.1	4.1	8.2	6.2	6.7	13	6.2	5.1	5.1	4.1	6.2	6.2	5.1	3.1	6.2	4.1	3.1	6.17
ก.ย.-07	6.2	3.6	5.1	7.2	7.2	7.7	6.2	5.1	12	6.2	8.2	5.7	6.2	5.1	6.7	2.6	5.7	4.6	4.1	4.6	2.6	5.1	5.1	4.6	5.1	4.1	4.6	4.1	4.6	5.1		5.66
ต.ค.-07	5.1	4.6	3.6	7.2	3.6	6.2	7.2	4.6	4.1	6.2	5.1	3.6	4.1	8.2	4.1	4.6	6.2	3.6	3.6	4.6	5.1	4.1										5.14



รูปที่ 2.13 รูปที่มุมมองของมุมต่าง ๆ (Tiwari ,2004)

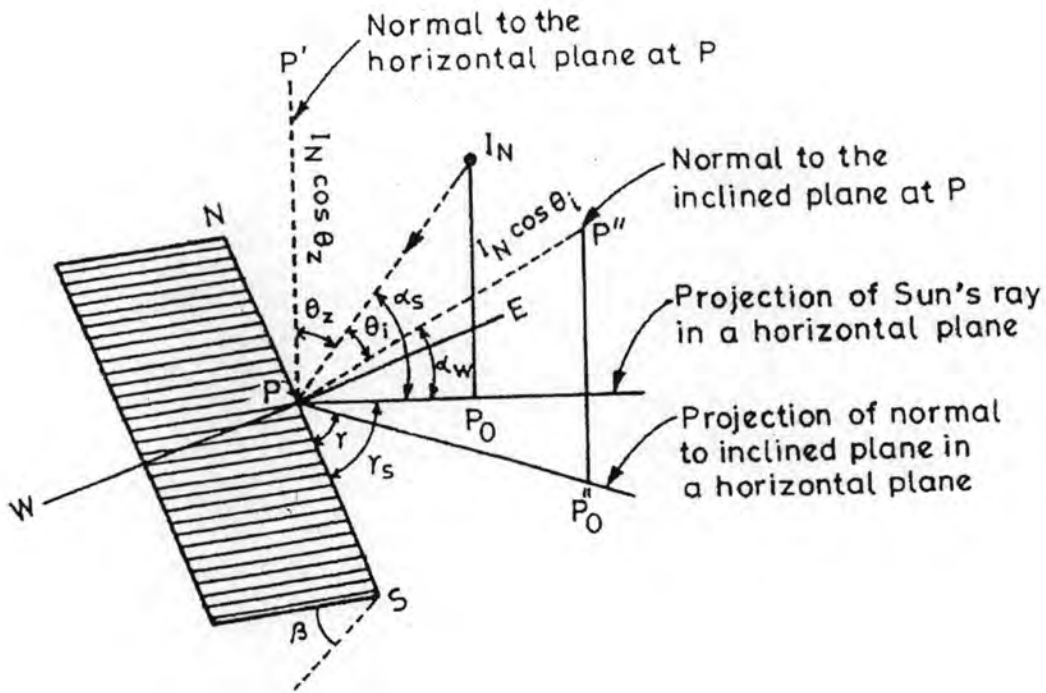
ละติจูด(ϕ) ละติจูดของแต่ละตำแหน่งคือมุมที่ทำโดยเส้น radial line และระนาบศูนย์สูตร (รูป 2.13a) latitude จะเป็นบวกสำหรับซีกโลกเหนือและเป็นลบสำหรับซีกโลกใต้

Declination(δ) คือมุมระหว่างเส้นลากจากจุดศูนย์กลางของโลกไปยังจุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์กับระนาบเส้นศูนย์สูตร (รูป 2.13b) Declination จะเกี่ยวเนื่องกับการหมุนของโลก ซึ่งแกนจะทำที่มุม 66.5° กับระนาบที่หมุนรอบดวงอาทิตย์ declination จะมีค่าสูงสุดคือ 23.45° วันที่ 21 มิถุนายน ไปยังค่าน้อยสุดคือ -23.45° วันที่ 21 ธันวาคม สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284 + n)\right]$$

n คือลำดับของวัน (1 ม.ค.=1, 31 ธ.ค.=365)

Hour angle(ω) คือมุมที่โลกหมุนไปเพื่อนำระนาบ meridian โดยตรงภายใต้ดวงอาทิตย์ อีกนัยหนึ่งคือมุมที่เปลี่ยนไปของดวงอาทิตย์ในทิศตะวันตกและตะวันออกของ meridian (วงกลมสมมุติที่ลากผ่านขั้วโลกเหนือและใต้) เนื่องจากการหมุนของโลกบนแกนที่ 15° ต่อชั่วโมง hour angle จะเป็น 0 ตอนเที่ยง เป็นลบตอนเช้า



รูปที่ 2.14 มุมมองของมุมต่าง ๆ ระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก (Tiwari, 2004)

เป็นลตอนบ่ยสำหรับซีกโลกเหนือ สำหรับซีกโลกใต้จะกลับกัน ตารางที่ 2.4 แสดงค่า hour angle (ω) hour angle คำนวณโดย

$$\omega = (ST - 12)15^\circ$$

โดย ST = เวลาท้องถิ่นของ solar (solar local time)

Zenith (θ_z) คือมุมระหว่างรังสีของดวงอาทิตย์และเส้นตั้งฉากกับระนาบ horizontal (รูปที่ 2.13c)

Altitude (α) คือมุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์และระนาบ horizontal (รูป 2.13c) โดย $\alpha = 90 - \theta_z$

Solar altitude angle (α_s) คือมุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์และ projection ของระนาบบน horizontal (รูป 2.14) นั่นคือ $\alpha = \alpha_s$

Slope (β) คือมุมระหว่างผิวระนาบซึ่งจะมีค่าเป็นบวกสำหรับระนาบเอียงไปทางทิศใต้และเป็นลบสำหรับทิศเหนือ (รูป 2.14c)

Surface azimuth (γ) คือมุมในระนาบ horizontal ระหว่างเส้นไปทางใต้และ projection ของพื้นผิวตั้งฉาก(ระนาบเอียง) บนระนาบ horizontal (รูป 2.14) มุมจะเป็นลบถ้าอยู่ทางตะวันออกของใต้ และจะเป็นบวกถ้าอยู่ทางตะวันตกของใต้สำหรับซีกโลกเหนือ ในทางกลับกันสำหรับซีกโลกใต้ค่า γ บางจุดได้แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ค่า hour angle ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาฬิกา)	6	7	8	9	10	11	12
Hour angle(องศา)	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
เวลา (นาฬิกา)	12	13	14	15	16	17	18
Hour angle(องศา)	0	+15	+30	+45	+60	+75	+90

ตารางที่ 2.5 มุม surface azimuth ที่ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับซีกโลกเหนือ

Surface orientation	γ
Sloped towards South	0°
Sloped towards North	-180°
Sloped towards East	-90°
Sloped towards West	$+90^\circ$
Sloped towards South-east	-45°
Sloped towards South-west	$+45^\circ$

Solar azimuth (γ_s) คือมุมในระนาบ horizontal เนื่องจากเส้นไปทางใต้ และ projection ของ beam radiation บนระนาบ horizontal (รูปที่ 2.14) ถ้า projection อยู่ทางตะวันออกของทางใต้มุมจะเป็นบวก และมุมจะเป็นลบเมื่ออยู่ทางตะวันตกของทางใต้ สำหรับซีกโลกเหนือ ส่วนซีกโลกใต้จะกลับกัน

Solar wall azimuth (α_w) คือมุมระหว่างระนาบตั้งฉากและ projection ของรังสีแสงอาทิตย์ในระนาบ horizontal (รูป 2.14)

Angle of incidence (θ_i) คือมุมระหว่าง beam radiation พื้นผิวและตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น
Angle of incidence อธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\cos\theta_i = (\cos\phi\cos\beta + \sin\phi\sin\beta\cos\gamma)\cos\delta\cos\omega + \cos\delta\sin\omega\sin\beta\sin\gamma + \sin\delta(\sin\phi\cos\beta - \cos\phi\sin\beta\cos\gamma)$$